

Alexandre Lima de Oliveira

**CONTRIBUIÇÃO PARA A DOSAGEM E PRODUÇÃO DE
PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO**

**Tese de doutorado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina, como
parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil.**

**Florianópolis
2004**

CONTRIBUIÇÃO PARA A DOSAGEM E PRODUÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO

Alexandre Lima de Oliveira

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Florianópolis
2004

**Dedico este trabalho a minha
família, principalmente, aos
meus pais (José Valeriano e
Janne), pelo constante
incentivo e apoio.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor, orientador e amigo Luiz Roberto Prudêncio Jr., obrigado pela disposição, compreensão, incentivo e pela confiança que você sempre depositou em mim.

A minha família; meu pai (Valeriano), minha mãe (Janne) e meus irmãos (André e Anne); sem vocês eu não estaria aqui.

Aos membros do grupo GTec, minha segunda família; vocês estarão sempre dentro do meu coração. Em especial: Luca, Vaninha, Caseca, Arley (Marley) e Denis (Alemão); muito obrigado pela força nos trabalhos desenvolvidos dentro da Toniolo, serei eternamente grato.

Ao corpo-técnico da Toniolo Pré-moldados: Engenheiro Carlos Augusto Bedin e Jaderson Luiz Barbieri, por terem acreditado e apoiado esse trabalho. Ao amigo Lourival, que desenvolveu toda a parte do equipamento protótipo, e todos os funcionários da produção de artefatos vibroprensados (Ademir, Ceará, Sadir, Joarez,...); muito obrigado pela força pessoal.

Aos membros do LVA (Laboratório de Vibrações e acústica), pelo apoio na parte de instrumentação de vibração do equipamento protótipo; em especial ao amigo e parceiro de surf Julio.

À Professora Henriette Lebre La Rovere pelo auxílio na modelagem em elementos finitos.

Aos Funcionários do LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) – Luiz, Renato e Roque, pela ajuda e compreensão durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos: Cartana, Manara, Renato, Dú, Murilo, Champs, Simon, Italo, Elington, Nardi, Enzo, Marcelo (Bilú), Julio (rato), pelos momentos de descontração e muita diversão. Sem esquecer do meu cachorro (Tobi), companheiro de madrugadas de estudo.

À minha namorada Juliana Stramandinoli; muito obrigado pelo carinho, apoio, compreensão, alegria e companheirismo nas horas boas e ruins, fora e dentro d'água surfando; te amo.

Por último, porém não menos importante, à Deus, por me iluminar, me dar forças e condições para viver com alegria.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------|
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| LISTA DE TABELAS..... | xiii |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | xvii |
| GLOSSÁRIO | xviii |
| RESUMO..... | xx |
| ABSTRACT | xxi |
| | |
| 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 – OBJETIVOS DO TRABALHO | 6 |
| 1.2 – CONTEÚDO E DIVISÃO DO TRABALHO | 7 |
| | |
| 2 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO E DAS PEÇAS PARA PAVIMENTAÇÃO..... | 8 |
| 2.1 – CONCRETO PLÁSTICO x CONCRETO SECO..... | 8 |
| 2.2 – PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DAS PCP | 12 |
| 2.2.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | 12 |
| 2.2.2 – RESISTÊNCIA À ABRASÃO..... | 15 |
| 2.2.3 – ABSORÇÃO..... | 16 |
| 2.2.4 – AVALIAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL DAS PEÇAS | 16 |
| 2.2.4.1 – Imagens digitais | 17 |
| | |
| 3 – MATERIAIS CONSTITUINTES EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DE PCP | 20 |
| 3.1 – CIMENTO PORTLAND | 20 |
| 3.2 – AGREGADOS GRAÚDOS | 21 |
| 3.3 – AGREGADOS MIÚDOS | 22 |
| 3.4 – ÁGUA | 23 |
| 3.5 – ADITIVOS | 23 |
| 3.5.1 – ADITIVOS INCORPORADORES DE AR..... | 24 |
| 3.5.2 – PIGMENTOS..... | 25 |
| 3.6 – ADIÇÕES | 26 |
| | |
| 4 – MOLDAGEM DAS PCP | 27 |
| 4.1 – EQUIPAMENTOS DE VIBRO-COMPRESSÃO | 27 |
| 4.1.1 – SILO DE ARMAZENAMENTO | 27 |
| 4.1.2 – GAVETA | 28 |
| 4.1.3 – SISTEMA DE COMPRESSÃO | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.3.1 – Sapatas..... | 31 |
| 4.1.3.2 – Viga flutuante..... | 32 |
| 4.1.3.3 – Pistão hidráulico ou pneumático..... | 32 |
| 4.1.4 – FORMA..... | 33 |
| 4.1.5 – VIBRAÇÃO..... | 33 |
| 4.1.5.1 – Medição de vibração..... | 38 |
| 4.1.5.2 – Sistemas de vibração empregados em máquinas de vibro-compressão..... | 39 |
| 4.2 – CICLO DE PRODUÇÃO DAS MÁQUINAS VIBRO-PRENSAS..... | 42 |
| 4.3 – PARTICULARIDADES QUANTO À PRODUÇÃO DE PEÇAS PARA PAVIMENTAÇÃO..... | 48 |
| 4.3.1 - DISTRIBUIÇÃO DE PESOS NA CHAPA..... | 48 |
| 4.3.2 – VARIAÇÕES DE PESO NO DECORRER DA PRODUÇÃO..... | 48 |
| 4.3.3 – CUIDADOS COM A VELOCIDADE DE RECUO DA GAVETA E O RASPADOR DE PENTE..... | 49 |
| 4.3.4 – QUANTIDADE IDEAL DE ÁGUA DAS MISTURAS PARA A PRODUÇÃO DAS PEÇAS PARA PAVIMENTAÇÃO..... | 49 |
| 5 – MÉTODOS DE DOSAGEM PARA PCP..... | 51 |
| 5.1 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA COLUMBIA (COLUMBIA, 1986) | 51 |
| 5.2 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR DOWSON (1981)..... | 52 |
| 5.3 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA BESSER COMPANY E ADAPTADO POR MEDEIROS (PFEIFFENBERGER, 1985; MEDEIROS, 1993)..... | 54 |
| 5.4 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA ABCP (RODRIGUES, 1995a; PIOROTTI, 1989)..... | 56 |
| 5.5 – MÉTODO DE DOSAGEM DO IPT/EPUSP ADAPTADO (TANGO, 1994)..... | 58 |
| 5.6 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR FRASSON (2000)..... | 62 |
| 5.7 – COMENTÁRIOS SOBRE OS MÉTODOS DE DOSAGEM..... | 66 |
| 6. PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 70 |
| 6.1 – AVALIAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PRESCRITO PELA NBR 9780 (1987) PARAS AS PCP..... | 73 |
| 6.1.1 – AVALIAÇÃO NUMÉRICA EMPREGANDO-SE O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS..... | 73 |

| | |
|---|------------|
| 6.1.2 – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA LARGURA DE PEÇAS DE CONCRETO NO RESULTADO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO... | 87 |
| 6.2 – EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA – PREVISÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP, DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, AVALIAÇÃO DA TEXTURA E DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE IDEAL DE ÁGUA DA MISTURA..... | 92 |
| 6.2.1 – CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO..... | 92 |
| 6.2.1.1 – Definição do formato do corpo-de-prova | 92 |
| 6.2.1.2 – Equipamento de moldagem dos corpos-de-prova (9 x 8 cm)..... | 93 |
| 6.2.1.3 – Moldagem dos corpos-de-prova (9 x 8 cm) | 95 |
| 6.2.2 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA 9 x 8 cm..... | 97 |
| 6.2.2.1 – Moldagem das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 98 |
| 6.2.2.2 – Cura das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 99 |
| 6.2.2.3 – Seleção das PCP e coleta dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 99 |
| 6.2.2.4 – Determinação da massa específica saturada das peças..... | 99 |
| 6.2.2.5 – Determinação da resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 106 |
| 6.2.2.6 – Correlação entre massa específica saturada e resistência à compressão – PCP 60 mm..... | 106 |
| 6.2.2.7 – Correlação entre massa específica saturada e resistência à compressão – PCP 80 mm..... | 110 |
| 6.2.2.8 – Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP de 60 e 80 mm de altura..... | 112 |
| 6.2.2.9 – Influência do consumo de cimento nas correlações obtidas para as PCP de 60 e 80 mm e os corpos-de-prova 9 x 8 cm | 117 |
| 6.2.2.10 – Avaliação da resistência de prismas serrados provenientes das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 120 |
| 6.2.3 – ESTUDOS DE CASO EMPREGANDO-SE O EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA 9 X 8 cm..... | 122 |
| 6.2.3.1 – Caracterização dos materiais | 123 |
| 6.2.3.2 – Traços empregados..... | 125 |
| 6.2.3.3 – Moldagem das peças..... | 127 |

| | |
|--|-----|
| 6.2.3.4 – Apresentação e análise dos resultados..... | 131 |
| 6.2.4 – CONCLUSÕES..... | 141 |
| 6.3 – AVALIAÇÃO DA INTER-RELAÇÃO EQUIPAMENTO DE VIBRO-COMPRESSÃO x CONCRETO | 144 |
| 6.3.1 – CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO PRÓTOTIPO DE VIBRO-COMPRESSÃO | 145 |
| 6.3.1.1 – Projeto e execução do sistema de vibração..... | 145 |
| 6.3.1.2 – Projeto e execução do sistema de compressão..... | 150 |
| 6.3.2 – MOLDAGEM DAS PCP..... | 153 |
| 6.3.2.1 – Procedimentos para a moldagem das PCP – Determinação da resistência à compressão e tempo de vibro-compressão | 154 |
| 6.3.2.2 – Procedimentos para a moldagem das PCP – Avaliação da textura | 157 |
| 6.3.3 – INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE MÁQUINA NO TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO E NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP – ESTUDOS DE CASO | 159 |
| 6.3.3.1 – Metodologia empregada..... | 159 |
| 6.3.3.2 – Apresentação e análise dos resultados..... | 166 |
| 6.3.4 – AVALIAÇÃO EM ESCALA REAL DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE MISTURA NO TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DAS PCP..... | 183 |
| 6.3.5 – CONCLUSÕES..... | 186 |
| 6.4 – CORRELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DE UMA MÁQUINA VIBRO-PRENSA REAL E A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO SOQUETE / TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DO EQUIPAMENTO PRÓTOTIPO | 188 |
| 6.4.1 – METODOLOGIA EMPREGADA | 188 |
| 6.4.1.1 – Moldagem das peças..... | 188 |
| 6.4.2 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 190 |
| 6.4.2.1 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde das PCP - MONTANA | 190 |
| 6.4.2.2 – Energia de compactação em função da massa específica verde dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 191 |
| 6.4.2.3 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde das PCP – equipamento protótipo..... | 193 |

| | |
|--|-----|
| 6.4.2.4 – Correlação entre o tempo de vibro-compressão do equipamento da MONTANA e a energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 195 |
| 6.4.2.5 – Correlação entre o tempo de vibro-compressão do equipamento da MONTANA e o tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo..... | 197 |
| 6.4.3 – CONCLUSÕES..... | 199 |
| 6.5 – AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DAS CONDIÇÕES SUPERFICIAIS DAS PCP | 200 |
| 6.5.1 – METODOLOGIA EMPREGADA | 201 |
| 6.5.1.1 – Aquisição das imagens..... | 201 |
| 6.5.1.2 – Calibração do scanner..... | 202 |
| 6.5.1.3 – Definição da resolução..... | 204 |
| 6.5.1.4 – Comparação entre uma escala de textura de PCP definida pelo olho humano e o desvio padrão do histograma de frequência..... | 205 |
| 6.5.1.5 – Avaliação quantitativa da textura das PCP produzidas em uma máquina vibro-prensa real e no equipamento protótipo..... | 208 |
| 6.5.2 – CONCLUSÕES..... | 210 |
| | |
| 7 – PROPOSTA DE UM MÉTODO EXPERIMENTAL DE DOSAGEM PARA PCP | 211 |
| 7.1 – DEFINIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP | 211 |
| 7.2 – SELEÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM EMPREGADOS..... | 213 |
| 7.3 – PROPORÇÕES ENTRE OS AGREGADOS..... | 214 |
| 7.4 – TRAÇOS E PERCENTAGEM DE VOLUME DE SÓLIDOS A SEREM EMPREGADOS NO ESTUDO DE DOSAGEM..... | 217 |
| 7.5 – MOLDAGEM DAS PEÇAS E DETERMINAÇÃO DA UMIDADE ÓTIMA | 217 |
| 7.6 – CONSTRUÇÃO DAS CURVAS DE DOSAGEM..... | 220 |
| 7.7 – CORRELAÇÃO DA ENERGIA OU DO TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO PARA MOLDAGEM DAS PEÇAS COM O TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DA MÁQUINA VIBRO-PRENSA..... | 221 |
| 7.8 – DEFINIÇÃO DO TRAÇO PRELIMINAR..... | 223 |
| 7.9 – AJUSTES FINAIS NA MÁQUINA VIBRO-PRENSA..... | 226 |
| 7.10 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DO MÉTODO DE DOSAGEM..... | 228 |
| 7.10.1 – Parâmetros da mistura antiga | 228 |
| 7.10.2 – Determinação das proporções entre os agregados..... | 228 |

| | |
|--|------------|
| 7.10.3 – Avaliação da textura no equipamento protótipo | 230 |
| 7.10.4 – Traços e porcentagens de volume de sólidos empregadas no estudo de dosagem | 231 |
| 7.10.5 – Determinação da umidade ótima | 232 |
| 7.10.6 – Moldagem das peças e construção do ábaco de dosagem | 232 |
| 7.10.7 – Definição do traço preliminar | 235 |
| 7.10.8 – Determinação da umidade ideal para o traço preliminar..... | 237 |
| 7.10.9 – Resultado do estudo de dosagem para testes na máquina vibro-prensa | 238 |
| | |
| 8 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 239 |
| | |
| 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 243 |
| | |
| ANEXOS – RESULTADOS | 251 |
| ANEXOS – PROCEDIMENTOS..... | 264 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Detalhe da Via Appian em Roma, considerada a mais célebre via Romana | 1 |
| Figura 1.2 – Evolução nos formatos das PCP (SHACKEL,1990) | 3 |
| Figura 1.3 – Mapa dos fabricantes de blocos e PCP em Santa Catarina (Fonte: Votorantim Cimentos – 2002) | 5 |
| Figura 2.1 – Percentagem de água/materiais secos (H) em função do traço para uma certa consistência (PETRUCCI,1993)..... | 10 |
| Figura 2.2 – Resistência à compressão em função da relação água/cimento (a/c) para uma mesma proporção agregados/cimento (traço fixo) | 11 |
| Figura 2.3 – Detalhe dos ensaios de resistência à compressão: a) <i>split test</i> ; b) flexão; c) carregamento parcial..... | 13 |
| Figura 2.4 – Detalhe de uma imagem digitalizada | 18 |
| Figura 2.5 – Detalhe do espectro de frequências de uma imagem em tons de cinza | 19 |
| Figura 3.1 – Demanda de água para as diferentes cores (DOWSON, 1981) | 26 |
| Figura 4.1 – Principais partes de uma máquina vibro-prensa..... | 28 |
| Figura 4.2 – Corte longitudinal da gaveta (detalhe dos compartimentos)..... | 29 |
| Figura 4.3 – Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a forma | 29 |
| Figura 4.4 – Detalhe do conjunto de agitadores | 30 |
| Figura 4.5 – Detalhes da parte frontal da gaveta com os raspadores de forma e das sapatas..... | 30 |
| Figura 4.6 – Detalhe típico de um conjunto pente – forma para a produção de peças para pavimentação | 31 |
| Figura 4.7 – Esquema da ligação entre o pistão e a viga flutuante (pistão atuando como aplicador de carga) | 32 |
| Figura 4.8 – Curvas de deslocamento, velocidade e aceleração para uma vibração harmônica ... | 35 |
| Figura 4.9 – Diagrama que correlaciona amplitude, velocidade, aceleração e frequência (FIOLA & TARDINI, 1988) | 36 |
| Figura 4.10 – Espectro de frequência | 38 |
| Figura 4.11 – Detalhe de um sistema de mesa vibratória..... | 40 |
| Figura 4.12 – Detalhe de funcionamento de um sistema de mesa vibratória com quatro eixos excêntricos..... | 40 |
| Figura 4.13 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos fixados nas laterais da forma (BRESSION, 1981) | 41 |
| Figura 4.14 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos sob a forma (BRESSION, 1981) | 41 |
| Figura 4.15 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por biela-virabrequim (BRESSION, 1981)..... | 42 |
| Figura 4.16 – Esquema do ciclo de produção das máquinas vibro-prensas | 45 |
| Figura 4.17 – Esquema de produção de peças com duas camadas (<i>double-cap</i>) | 47 |
| Figura 4.18 – Problema sistemático de distribuição de peso por chapa devido à má regulagem da gaveta e da mesa de apoio da chapa em uma máquina Columbia..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.19 – Detalhe da superfície de uma peça produzida em um equipamento de vibro-compressão MONTANA – MBX975 com um teor de umidade ótimo ($H \approx 7,0\%$)..... | 50 |
| Figura 5.1 – Faixa granulométrica recomendada para produção de pavimentos pré-moldados de concreto (COLUMBIA, 1986) | 52 |
| Figura 5.2 – Curva granulométrica de referência (DOWSON, 1981)..... | 53 |
| Figura 5.3 – Curva granulométrica de referência em função do tipo de bloco a ser produzido: a) bloco de densidade normal b) bloco leve c) bloco leve de textura lisa e bloco de densidade mediana (PFEIFFENBERGER, 1985) | 55 |
| Figura 5.4 – Proporcionamento pedrisco-areia para obtenção do menor volume de vazios | 57 |
| Figura 5.5 – Diagrama de dosagem IPT adaptado para peças estruturais de concreto..... | 62 |
| Figura 5.6 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos (5 x 10 cm) x peso específico no estado verde para as diferentes proporções empregadas | 65 |
| Figura 6.1 – a) superfícies das pastilhas onde foram aplicadas as restrições; b) superfícies de contato entre as pastilhas de aço e a peça de concreto | 75 |
| Figura 6.2 – Resultados da análise numérica PAV1-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 77 |
| Figura 6.3 – Resultados da análise numérica PAV2-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 78 |
| Figura 6.4 – Resultados da análise numérica PAV3-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 79 |
| Figura 6.5 – Resultados da análise numérica PAV4-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 80 |
| Figura 6.6 – Resultados da análise numérica PAV1-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 81 |
| Figura 6.7 – Resultados da análise numérica PAV2-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 82 |
| Figura 6.8 – Resultados da análise numérica PAV3-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 83 |
| Figura 6.9 – Resultados da análise numérica PAV4-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B..... | 84 |
| Figura 6.10 – Resultados da análise numérica PAV5-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões máximas de tração – corte A; c) tensões máximas de tração – corte B .. | 85 |
| Figura 6.11 – Detalhe das tensões máximas de tração (MPa) – corte transversal: a) peças de menor e maior largura com 60 mm de altura; b) peças de menor e maior largura com 80 mm de altura | 87 |
| Figura 6.12 – Detalhe dos blocos de concreto serrados para ensaio de punção dupla | 88 |
| Figura 6.13 – a) corte no tubo de PVC - ϕ 100 mm; b) detalhe da obtenção dos corpos-de-prova - ϕ 90 mm..... | 89 |
| Figura 6.14 – Formato do corpo-de-prova para previsão da resistência das PCP – diâmetro igual ao das pastilhas de aplicação de carga e altura igual a altura intermediária dentre as prescritas pela NBR 9780 (1987) | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.15 – Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos 9 x 8 cm – a) soquete de compactação; b) molde cilíndrico; c) base de suporte para o molde; d) pastilhas de náilon para definição da altura dos corpos-de-prova | 94 |
| Figura 6.16 – Seqüência de moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 9 x 8 cm | 96 |
| Figura 6.17 – Massa específica em função do tempo de imersão: a) PAV3-60; b) PAV1-80; c) CP 9 x 8 cm | 101 |
| Figura 6.18 – Seqüência de determinação do volume médio das PCP..... | 102 |
| Figura 6.19 – Massa específica verde x massa específica saturada – PAV3-60 | 104 |
| Figura 6.20 – Massa específica verde x massa específica saturada – PAV2-80 | 104 |
| Figura 6.21 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV1-60 | 107 |
| Figura 6.22 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV2-60 | 107 |
| Figura 6.23 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV3-60 | 108 |
| Figura 6.24 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV4-60 | 108 |
| Figura 6.25 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV1-80 | 111 |
| Figura 6.26 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV2-80 | 111 |
| Figura 6.27 – Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova e das PCP com 60 mm de altura | 113 |
| Figura 6.28 – Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova e das PCP com 80 mm de altura | 113 |
| Figura 6.29 – Resistência à compressão das PCP – 60 mm – previsão de valores médio e individual..... | 115 |
| Figura 6.30 – Resistência à compressão das PCP – 80 mm – previsão de valores médio e individual..... | 116 |
| Figura 6.31 – Resistência à compressão das PCP de 60 e 80 mm em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 117 |
| Figura 6.32 – Resistência à compressão das PCP de 60 mm em função da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – curva média das PCP - 60 e curva com traço mais rico em cimento.. | 118 |
| Figura 6.33 – Resistência à compressão das PCP de 80 mm em função da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – curva média das PCP - 80 e curva com traço mais rico em cimento.. | 119 |
| Figura 6.34 – a) esquema dos prismas de 60 x 60 x 80 mm extraídos dos PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm; b) detalhe do rompimento dos prismas..... | 120 |
| Figura 6.35 – Resistência à compressão dos prismas de 60 x 60 x 80 mm obtidos dos PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 121 |
| Figura 6.36 – Curvas granulométricas resultantes empregadas nos Traços 1, 2 e 3 | 126 |
| Figura 6.37 – Curva granulométrica resultante empregada no Traço 3 juntamente com os limites prescritos pela Columbia | 126 |
| Figura 6.38 – Definição da porcentagem de volume de sólidos em função dos resultados encontrados na produção dos PAV1-80 no equipamento da Montana MBX 975..... | 128 |
| Figura 6.39 – Esquema do procedimento de cura dos corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 129 |
| Figura 6.40 – Detalhe das texturas dos PAV1-80 em função do aumento do grau de compacidade (massa específica no estado verde)..... | 130 |
| Figura 6.41 – Energia de compactação em função da relação água / cimento | 133 |

| | |
|--|------|
| Figura 6.42 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da relação água / cimento..... | 134 |
| Figura 6.43 – Condições superficiais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (presença e quantidade de água no topo das peças) – Traço 1..... | 1376 |
| Figura 6.44 – Condições superficiais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (presença e quantidade de água no topo das peças) – Traço 2..... | 1387 |
| Figura 6.45 – Condições superficiais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (presença e quantidade de água no topo das peças) – Traço 3..... | 1398 |
| Figura 6.46 – Detalhe das superfícies superiores das PCP tipo PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da massa específica verde..... | 140 |
| Figura 6.47 – Resultados obtidos através do ensaio de mancha de areia para as PCP e os corpos-de-prova 9 x 8 cm em função do grau de compacidade (massa específica no estado verde)..... | 141 |
| Figura 6.48 – Detalhe do sistema de vibração com eixo único..... | 146 |
| Figura 6.49 – Detalhe do sistema de vibração com dois eixos e duas massas excêntricas..... | 147 |
| Figura 6.50 – Detalhe do sistema de vibração construído para a máquina vibro-prensa protótipo..... | 149 |
| Figura 6.51 – Detalhe do sistema de compressão construído para a máquina vibro-prensa protótipo..... | 151 |
| Figura 6.52 – Detalhe do pino de aço colocado para evitar a transmissão de vibração para a caixa de redução..... | 152 |
| Figura 6.53 – Detalhe da marcação no embolo indicando o ponto inicial e final da fase de vibro-compressão cronometrada..... | 152 |
| Figura 6.54 – Chaves elétricas para controle dos sistemas de vibração e compressão da máquina protótipo..... | 153 |
| Figura 6.55 – Detalhe do molde empregado para a confecção das PCP na máquina protótipo..... | 154 |
| Figura 6.56 – Seqüência de moldagem das peças na máquina protótipo – determinação da resistência à compressão e tempo de vibro-compressão..... | 156 |
| Figura 6.57 – Seqüência de moldagem das peças na máquina protótipo – avaliação da textura..... | 158 |
| Figura 6.58 – Equipamento para medição de vibração..... | 162 |
| Figura 6.59 – Espectro de freqüência obtido através do analisador de vibrações..... | 163 |
| Figura 6.60 – Tempo de vibro-compressão em função da freqüência de vibração: a) carga de 100 kg; b) carga de 200 kg..... | 169 |
| Figura 6.61 – Tempo de vibro-compressão em função da amplitude de vibração: a) carga de 100 kg; b) carga de 200 kg..... | 170 |
| Figura 6.62 – Tempo de vibro-compressão x amplitude de vibração – cargas de 100 e 200 kg: a) Traço1; b) Traço2; c) Traço 3..... | 172 |
| Figura 6.63 – Resistência à compressão x amplitude de vibração: a) Traço1; b) Traço2; c) Traço 3..... | 179 |
| Figura 6.64 – Resistência à compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 1..... | 182 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.65 – Resistência à compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 2 | 182 |
| Figura 6.66 – Resistência à compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 3 | 182 |
| Figura 6.67 – Porcentagem de volume de sólidos em função do tempo de vibro-compressão para as PCP produzidas com os Traços 1 e 2 – MONTANA – MBX-975 | 185 |
| Figura 6.68 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde média das PCP produzidas no equipamento da MONTANA..... | 191 |
| Figura 6.69 – Energia de compactação em função da massa específica verde dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 193 |
| Figura 6.70 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde das PCP produzidas no equipamento protótipo | 194 |
| Figura 6.71 – Tempo de vibro-compressão da MONTANA em função da energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 195 |
| Figura 6.72 – Tempo de vibro-compressão da PCP em função da energia de compactação – previsão de valor médio e individual..... | 196 |
| Figura 6.73 – Tempo de vibro-compressão da MONTANA em função do tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo | 198 |
| Figura 6.74 – Tempo de vibro-compressão das PCP da MONTANA em função do tempo de vibro-compressão das PCP do protótipo – previsão de valor médio e individual..... | 199 |
| Figura 6.75 – Detalhe de PCP com texturas: a) fechada; b) aberta..... | 200 |
| Figura 6.76 – Detalhe das condições padronizadas para a aquisição das imagens | 201 |
| Figura 6.77 – Histogramas de frequências obtidos através de dois <i>scanners</i> distintos (Genius e HP 2200c)..... | 202 |
| Figura 6.78 – a) paleta de calibração; b) digitalização simultânea da paleta e da PCP..... | 203 |
| Figura 6.79 – Histogramas de frequências corrigidos obtidos através dos <i>scanners</i> Genius e HP 2200c | 204 |
| Figura 6.80 – Avaliação da influência da resolução no resultado do desvio padrão do histograma de frequências | 205 |
| Figura 6.81 – Escala de PCP em função da textura superficial..... | 207 |
| Figura 6.82 – PCP produzidas na máquina Montana MBX-975 e no equipamento protótipo de vibro-compressão | 209 |
| Figura 7.1 – Coeficiente de variação da resistência à compressão em função do coeficiente de variação da massa específica no estado verde das PCP..... | 212 |
| Figura 7.2 – Ábaco de dosagem obtido através das peças (corpos-de-prova 9 x 8 cm ou PCP – PAV1-80) moldadas em laboratório..... | 220 |
| Figura 7.3 – Ábaco de dosagem com o incremento da relação entre a máquina vibro-prensa real e o equipamento empregado para o estudo em laboratório (equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm ou protótipo de vibro-compressão)..... | 223 |
| Figura 7.4 – Determinação da energia de compactação ou do tempo de vibro-compressão do protótipo associado a um determinado tempo de vibro-compressão da máquina vibro-prensa | 224 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.5 – Definição do traço piloto através do ábaco de dosagem (m_{piloto}) | 225 |
| Figura 7.6 – Determinação da umidade ótima do traço preliminar ($m_{\text{preliminar}}$) | 225 |
| Figura 7.7 – Detalhe de PCP produzidas no equipamento protótipo empregando-se a proporção entre os agregados nova e a antiga | 231 |
| Figura 7.8 – Ábaco de dosagem para as PCP – soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 234 |
| Figura 7.9 – Ábaco de dosagem para as PCP – equipamento protótipo..... | 235 |
| Figura 7.10 – Definição do traço preliminar das PCP – soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 236 |
| Figura 7.11 – Definição do traço preliminar das PCP – equipamento protótipo..... | 236 |
| Figura 7.12 – Detalhe da determinação da umidade ideal do traço preliminar – corpos-de-prova 9 x 8 cm | 237 |
| Figura 7.13 – Detalhe da determinação da umidade ideal do traço preliminar – PCP produzidas no equipamento protótipo | 237 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1.1 – Número de fabricantes que possuem o selo de qualidade para as PCP (Fonte: Revista Prisma – nov/dez 2003) | 6 |
| Tabela 2.1 – Resistências à compressão especificadas pelas principais normas vigentes (Fonte: Third International Conference on Concrete Block Paving - Rome, Italy – 1988)..... | 14 |
| Tabela 2.2 – Fatores de correção das peças em função das alturas especificadas pela NBR 9780 (1987) | 15 |
| Tabela 2.3 – Especificações quanto à absorção das peças para pavimentação (Fonte: Third International Conference on Concrete Block Paving - Rome, Italy – 1988)..... | 16 |
| Tabela 3.1 – Características recomendadas para agregados graúdos empregados na produção de PCP | 22 |
| Tabela 3.2 – Características recomendadas para agregados miúdos empregados na produção de PCP | 22 |
| Tabela 5.1 – Valores de desvio padrão sugeridos em função do tipo de equipamento | 53 |
| Tabela 5.2 – Traços sugeridos em função da resistência à compressão média aos 28 dias para blocos de 14,5 x 19,0 x 29,5 cm (MEDEIROS, 1993)..... | 56 |
| Tabela 5.3, – Valores de k_{nt} em função do número de exemplares (n) | 59 |
| Tabela 5.4 – Valores sugeridos para ($k_{nt} \cdot s$) durante a primeira fase de produção..... | 59 |
| Tabela 5.5 – Sugestões de faixas de teores de agregado/cimento (m) | 60 |
| Tabela 5.6 – Condição e tipo de controle a ser avaliado para encontrar o provável coeficiente de variação de uma fábrica..... | 64 |
| Tabela 6.1 – Detalhe das formas das peças encontradas no mercado da Grande Florianópolis e estudadas neste trabalho | 74 |
| Tabela 6.2 – Proporções dos materiais empregadas na confecção do concreto | 89 |
| Tabela 6.3 – Resultados de resistência à compressão dos blocos e dos corpos-de-prova cilíndricos | 90 |
| Tabela 6.1 – Resultados da análise estatística – comparação múltipla de média para fator único..... | 91 |
| Tabela 6.5 – Energias por golpe e respectivas alturas de queda em função da porcentagem de volume de sólidos empregadas na moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 97 |
| Tabela 6.6 – Traços empregados na produção dos PCP com 60 e 80 mm de altura e sua respectiva serie de corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 98 |
| Tabela 6.7 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas..... | 105 |
| Tabela 6.8 – Resultados da análise de comparação de funções lineares | 105 |
| Tabela 6.9 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 60 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 109 |
| Tabela 6.10 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 60 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 109 |
| Tabela 6.11 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 80 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 110 |
| Tabela 6.12 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 80 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm..... | 112 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 6.13 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 60 mm de altura | 114 |
| Tabela 6.14 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 80 mm de altura | 114 |
| Tabela 6.15 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 60 mm | 115 |
| Tabela 6.16 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 80 mm | 115 |
| Tabela 6.17 – Resultados da análise de comparação de funções lineares - PCP de 60 e 80 mm | 116 |
| Tabela 6.18 – Proporção em massa dos materiais (kg) utilizados para o presente teste | 117 |
| Tabela 6.19 – Resultados da análise de comparação de funções lineares - PCP - 60 e Traço novo (consumo maior de cimento) | 119 |
| Tabela 6.20 – Resultados da análise de comparação de funções lineares - PCP - 80 e Traço novo (consumo maior de cimento) | 119 |
| Tabela 6.21 – Resultados da análise de comparação de funções lineares – prismas extraídos dos PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 122 |
| Tabela 6.22 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CPV – ARI-RS utilizado no trabalho | 123 |
| Tabela 6.23 – Composição granulométrica dos agregados empregados no estudo..... | 124 |
| Tabela 6.24 – Massas específicas dos agregados empregados..... | 124 |
| Tabela 6.25 – Coeficiente de forma dos agregados empregados | 125 |
| Tabela 6.26 – Porcentagem em massa dos agregados empregados para a confecção dos traços | 125 |
| Tabela 6.27 – Coeficiente de forma dos traços utilizados no presente estudo | 127 |
| Tabela 6.28 – Proporções em massa dos materiais empregados na confecção dos Traços 1, 2 e 3 | 127 |
| Tabela 6.29 – Relações água / cimento, quantidades de água e massa dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, para uma porcentagem de volume de sólidos de 78,6%, em função dos traços adotados | 129 |
| Tabela 6.30 – Resultados obtidos no presente estudo de caso para os três traços estudados..... | 132 |
| Tabela 6.31 – Teores de água obtidos nos ensaios de resistência, compactação e em função da condição superficial dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 139 |
| Tabela 6.32 – Resistência à compressão e energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da relação a/c ideal..... | 139 |
| Tabela 6.33 – Faixas teóricas de frequência (Hz) possíveis de serem empregadas no equipamento | 150 |
| Tabela 6.34 – Valores reais para os parâmetros de vibração empregados no presente estudo ... | 163 |
| Tabela 6.35 – Proporções em massa dos materiais empregados na confecção dos Traços 1, 2 e 3 | 164 |
| Tabela 6.36 – Massas verdes empregadas para a moldagem das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm | 165 |
| Tabela 6.37 – Resultados encontrados quanto ao tempo de vibro-compressão | 167 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 6.38 – Parâmetros estatísticos obtidos nas análises fatoriais – tempo de vibro-compressão | 168 |
| Tabela 6.39 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.61 | 171 |
| Tabela 6.40 – Comparação de funções lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.62 | 173 |
| Tabela 6.41 – Comparação de funções lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.61 | 173 |
| Tabela 6.42 – Resistências à compressão e massas específicas saturadas - Traço 1..... | 175 |
| Tabela 6.43 – Resistências à compressão e massas específicas saturadas - Traço 2..... | 176 |
| Tabela 6.44 – Resistências à compressão e massas específicas saturadas - Traço 3..... | 177 |
| Tabela 6.45 – Parâmetros estatísticos obtidos nas análises fatoriais..... | 178 |
| Tabela 6.46 – Parâmetros estatísticos obtidos para as correlações entre a resistência e a amplitude de vibração..... | 178 |
| Tabela 6.47 – Resistência à compressão e massa específica saturada para os corpos-de-prova 9 x 8 cm | 180 |
| Tabela 6.48 – Quantidades dos materiais empregados para produção dos PAV2-80 no equipamento da MONTANA – MBX-975 | 183 |
| Tabela 6.49 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento de vibro-compressão (MONTANA – MBX 975) – Traços 1 e 2 | 184 |
| Tabela 6.50 – Comparação de funções lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.62 | 185 |
| Tabela 6.51 – Traços empregados | 189 |
| Tabela 6.52 – Massas verdes empregadas para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP | 189 |
| Tabela 6.53 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento da MONTANA | 190 |
| Tabela 6.54 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.68 | 191 |
| Tabela 6.55 – Resultados obtidos para os corpos-de-prova 9 x 8 cm | 192 |
| Tabela 6.56 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.69 | 192 |
| Tabela 6.57 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento protótipo..... | 193 |
| Tabela 6.58 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.70 | 194 |
| Tabela 6.59 – Parâmetros estatísticos das correlações apresentadas na Figura 6.71..... | 196 |
| Tabela 6.60 – Resultados da análise de comparação de funções lineares | 197 |
| Tabela 6.61 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.73 | 197 |
| Tabela 6.62 – Resultados da análise de comparação de funções lineares | 198 |
| Tabela 6.63 – Resultados de desvios padrão obtidos das imagens digitalizadas das PCP apresentadas na Figura 6.81 – <i>scanners</i> Genius e HP 2200c | 207 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 6.64 – Resultados de desvios padrão obtidos das imagens digitalizadas das PCP produzidas na Montana e no equipamento protótipo | 208 |
| Tabela 7.1 – Coeficiente de <i>Student</i> (t) com um nível de confiabilidade de 80 %..... | 211 |
| Tabela 7.2 – Parâmetros estatísticos da correlação apresentada na Figura 7.1 | 212 |
| Tabela 7.3 – Resultados de energia de compactação e de textura (avaliação visual) para os corpos-de-prova 9 x 8 cm – composição das areias (grossa e fina) | 229 |
| Tabela 7.4 – Resultados de energia de compactação e de textura (avaliação visual) para os corpos-de-prova 9 x 8 cm – (80 – 20) agregados miúdos | 229 |
| Tabela 7.5 – Resultados de energia de compactação e de textura (avaliação visual) para os corpos-de-prova 9 x 8 cm – (70 – 30) agregados miúdos | 230 |
| Tabela 7.6 – Relação água / materiais secos em função do traço e da porcentagem de volume de sólidos..... | 232 |
| Tabela 7.7 – Resultados obtidos para os corpos-de-prova 9 x 8 cm | 233 |
| Tabela 7.8 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento protótipo..... | 233 |
| Tabela 7.9 – Resultados do estudo de dosagem – fase laboratorial | 238 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing Materials*

NBN – *Belgisch Instituut voor Normalisatie*

AFNOR – *Association Française de Normalisation*

BS – *British Standard*

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

AS – *Australian Standard*

NBR – Norma Brasileira

PCP – peça de concreto para pavimentação

CPII – E – Cimento Portland composto com Escória

CPII – Z – Cimento Portland composto com Pozolana

CPII – F – Cimento Portland composto com Filer

CPIII – Cimento Portland de Alto Forno

CPIV – Cimento Portland Pozolânico

CPV-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CPV-ARI-RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfato

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil

LVA – Laboratório de Vibrações e Acústica

GLOSSÁRIO

Máquina vibro-prensa: equipamento empregado para a moldagem das peças de concreto para pavimentação, capaz de exercer um efeito de vibração simultaneamente a um esforço de compressão;

Forma (molde): parte do equipamento de vibro-compressão que define o formato das peças;

Sapatas (pente ou contra-molde): negativo da forma que fica em contato com o concreto no momento da moldagem das peças, transmitindo à mistura a carga de compressão;

Gaveta: parte da máquina vibro-prensa responsável por trazer o concreto do silo de armazenamento para a forma;

Agitador: conjunto de hastes metálicas, localizado dentro da gaveta, que executa movimentos pendulares, para revolver o concreto, auxiliando a etapa de enchimento da forma com o referido material;

Raspador da forma: dispositivo com função de remover o excesso de concreto da forma;

Raspador das sapatas: dispositivo responsável pela limpeza das sapatas;

Chapa (bandeja): placa delgada, normalmente de aço, que serve de sustentação para as peças no momento da moldagem das mesmas no equipamento de vibro-compressão;

Grade (gaiolas): estrutura metálica formada, normalmente, por perfis “Us”, que serve de suporte para as chapas. As grades podem receber de 10 a 25 chapas, dependendo do porte do equipamento de vibro-compressão;

Coxim: amortecedor de borracha;

Sistema “biela-virabrequim”: sistema que se caracteriza pela conversão de movimentos circulares em movimentos retilíneos unidirecionais;

Mancal: dispositivo que serve de suporte para o eixo;

Tempo de alimentação: tempo em que a gaveta fica posicionada sobre a forma, com o agitador e o sistema de vibração acionados, para que se processe o enchimento dos vazados da forma pelo concreto;

Tempo de vibro-compressão: tempo necessário para vibro-prensar o concreto (moldagem das peças);

Compacidade: densidade; expressa o quão compacta é a peça;

Massa verde: massa quando o concreto encontra-se no estado fresco;

Massa saturada: massa quando o concreto encontra-se saturado por água (neste trabalho foi adotado o período de 14 dias de imersão em água para saturação do concreto);

Massa específica verde: relação entre a massa verde e o volume da peça;

Massa específica saturada: relação entre a massa saturada e o volume da peça;

Porcentagem de volume de sólidos: relação entre o volume de material sólido do concreto (volume de cimento e agregados) pelo volume da peça, expressa em porcentagem;

Relação água/materiais secos: razão entre a massa de água empregada na mistura pela massa dos materiais sólidos no estado seco (massa de cimento e agregados), expressa em porcentagem.

RESUMO

O número de fabricantes de peças de concreto para pavimentação (PCP) vem crescendo consideravelmente nos últimos anos no Brasil, em função do aumento do emprego desse produto como revestimento de vias, principalmente, em áreas urbanas. Para se ter uma idéia, somente em Santa Catarina, o número de fábricas no estado superou a casa de 80 unidades fabris no ano de 2002. Apesar da crescente demanda pelo produto e do aumento do número de produtores, são escassos os conhecimentos disponíveis na literatura sobre a tecnologia do concreto para a fabricação das PCP. Essa aparente falta de interesse dos pesquisadores quanto à produção de PCP, se deve pela dificuldade de acesso aos equipamentos de vibro-compressão e pelo fato dos concretos secos não outorgarem o mesmo *status* dos concretos convencionais e de alto-desempenho. Nesse panorama, os métodos de dosagem existente para as PCP são bastante incipientes, dependendo, fundamentalmente, de ajustes no próprio equipamento de vibro-compressão, o que torna o processo de dosagem oneroso. Assim sendo, dentro do presente trabalho foram desenvolvidos equipamentos e procedimentos de ensaios para a avaliação e caracterização das propriedades das PCP, visando a proposição de um método de dosagem experimental, que não necessitasse de ajustes excessivos no próprio equipamento de vibro-compressão. Os estudos mostraram que é possível a previsão de resistência à compressão das PCP, além da sua respectiva textura, por meio de corpos-de-prova 9 x 8 cm (diâmetro x altura), moldados através do soquete de compactação e das PCP produzidas no equipamento protótipo de vibro-compressão, ambos os equipamentos desenvolvidos dentro do presente trabalho. Além dos parâmetros mencionados, os referidos equipamentos, aliados a alguns procedimentos definidos dentro do próprio trabalho, permitem a determinação da quantidade ideal de água das misturas, bem como a determinação da energia de compactação dos corpos-de-prova e do tempo de vibro-compressão das peças, valores esses que servem como parâmetro para avaliação da compactabilidade das misturas.

ABSTRACT

In Brazil, manufacturing of concrete block paving units has grown considerably in the last years, due mainly to the increase demand for highway construction in urban areas. As an example, in Santa Catarina, the number of manufactures was already more than eighty in 2002. In spite of that, the available knowledge related to dry concrete technology for production of concrete block units is still scarce. The lack of specific literature is due to the difficulty to access concrete block machines and also due to the fact that dry concrete, as a research subject, has not the same status as ordinary concrete and high performance concrete. Within this context, mix design methods for concrete block paving units are still incipient, demanding many hours of tests conducted in the manufacturing plant, resulting in a very expensive process. Aiming to establish a reliable experimental mix design method, some equipments and test procedures to evaluate concrete block paving units properties, that can be performed out of the pre-cast concrete plant, are proposed in this work. Studies in this work have shown that it is possible to forecast the concrete block paving unit compressive strength and texture using the specimens obtained by the proposed method. Additional, studies using such equipments pointed out that it is possible to estimate the ideal water content of the mixture, as well as to measure the energy and the vibrate-compression time spent to mould the specimens. Such parameters are very important in the selection of aggregates process to be used concrete block paving.

1 – INTRODUÇÃO

A história dos revestimentos segmentados para pavimentação confunde-se com o início da própria pavimentação. O uso de pequenas pedras para criar uma superfície de rolamento remonta da Babilônia Antiga, sendo atribuído aos romanos o desenvolvimento de vias sofisticadas que, inicialmente, tinham propósitos militares, mas contribuíram muito para o desenvolvimento comercial. Segundo KNAPTON (1996), a via romana mais célebre foi a Via Appia, em Roma, construída pelo Censor Appius Claudius Caecus em 312 D. C., onde foram utilizadas pedras basálticas de dimensões consideráveis (Figura 1.1).



Figura 1.1 – Detalhe da Via Appia em Roma, considerada a mais célebre via Romana

Com o passar do tempo, basicamente, quatro tipos de revestimentos segmentados foram empregados, principalmente em áreas urbanas (SHACKEL, 1990):

Pedras

As pedras utilizadas na pavimentação eram, normalmente, pedras encontradas nos leitos dos rios, com diâmetros variando entre 100 e 150 mm. Porém, os revestimentos construídos com essas pedras apresentavam uma superfície muito irregular e, algumas regiões não dispunham desse tipo de material. Com isso, começou-se a empregar pedras cortadas provenientes, na

maioria das vezes, de jazidas de granito, basalto e em alguns casos de calcário. No entanto essa alternativa para revestimento de vias era bastante onerosa devido à necessidade de mão-de-obra especializada (SHACKEL, 1990).

Blocos de madeira

Os blocos de madeira foram constantemente utilizados como alternativa em substituição as pedras no início do século XIX. Os revestimentos produzidos com esse material podiam ser construídos por cerca de 65% dos custos dos revestimentos com pedras e reduziam consideravelmente os barulhos das rodas de ferro e das patas dos cavalos. No entanto, os blocos de madeira absorviam o odor das fezes dos cavalos, exalando, dessa forma, um cheiro desagradável quando molhados. Este tipo de revestimento foi completamente abandonado quando do advento dos veículos a motor, pois se tornavam escorregadios sob pneus (SHACKEL, 1990).

Tijolos

Quanto aos revestimentos de tijolos cerâmicos, há indícios de seu emprego desde 5000 anos atrás, na Mesopotâmia, devido à falta de pedras na região. Durante um bom tempo os tijolos cerâmicos foram empregados para a pavimentação, principalmente em áreas urbanas. Porém, a durabilidade desses revestimentos era baixa, pois os tijolos deterioravam-se quando submetidos ao tráfego. Com o advento dos tijolos vitrificados queimados a alta temperatura, estes foram muito empregados em toda Europa e na América até o final da II Guerra Mundial. Nessa época, houve uma grande procura por tijolos para reconstrução dos estragos pós-guerra, tornando a matéria-prima escassa e cara, o que, conseqüentemente, aumentou o custo deste tipo de pavimentação (SHACKEL, 1990).

Peças de concreto para pavimentação (PCP)

As primeiras PCP foram produzidas na Alemanha no final do século XIX. Antes da I Guerra Mundial (final do século XIX e início do século XX), já havia um grande número de patentes de PCP, o que, de certa forma, era um indicativo da preferência por esse produto (MEYER, 1981).

Porém, num primeiro momento, os tijolos e as PCP tinham custos muito similares, devido não só ao aumento dos preços dos tijolos, mas também, à forma artesanal com que as PCP eram produzidas. Com a introdução dos diferentes formatos de peças houve um estímulo no mercado

alemão em meados da década de 50, ocorrendo uma rápida proliferação desse sistema de pavimentação (SHACKEL, 1990).

Segundo SHACKEL (1990), três estágios de evolução foram identificados quanto às formas das PCP. No princípio, as referidas peças imitavam meramente as pedras e os tijolos cerâmicos. Nessa época, a única vantagem das PCP era a precisão e constância dimensional, comparadas às pedras e aos tijolos cerâmicos (Figura 1.2a). No segundo estágio de evolução, a forma das peças começou a ser refinada de modo que cada unidade poderia encaixar na unidade vizinha. Como exemplo, formas dentadas começaram a ser produzidas e disponibilizadas no mercado (Figura 1.2b). O refinamento nas formas e o endentamento das peças fez com que os mesmos se tornassem auto-locáveis, dispensando o uso de mão-de-obra qualificada. No entanto, no final do estágio de evolução (Figura 1.2c), formas inovadoras foram introduzidas tendo pouca ou nenhuma semelhança com as primeiras formas. Essas novas formas foram escolhidas com o intuito de possibilitar uma melhor transferência de carga entre as peças, diminuindo o nível de tensão nas camadas finais, além de facilitar o mecanismo de assentamento das peças.

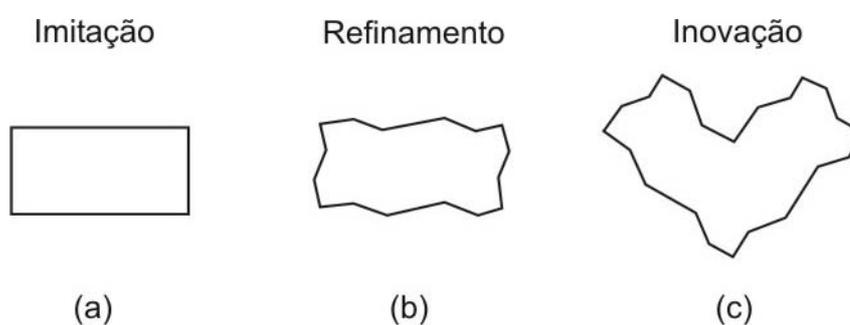


Figura 1.2 – Evolução nos formatos das PCP (SHACKEL,1990)

Esse fato, aliado ao aumento da mecanização e o surgimento das máquinas de ciclo automático de alta capacidade (vibro-prensas), após a II Guerra Mundial, fez com que os revestimentos com PCP passassem a ter um preço inferior, comparados às outras técnicas de pavimentação (PAGE, 1998).

Durante os anos 70, as PCP ganharam um grande nicho na Europa, sendo que, na Alemanha, havia mais de cinco fabricantes de equipamentos (PAGE, 1998). Antes mesmo da década de 80, alcançou-se, na mesma Alemanha, uma produção de mais de 45 milhões de m²/ano, sendo 36% dessa aplicada em vias e 30% em áreas industriais (SHACKEL, 1988).

O mercado Holandês foi um pouco mais relutante quanto à aceitação das PCP. No entanto, por questões econômicas, as PCP ganharam seu espaço em meados da década de 60. Nessa mesma época, em função da versatilidade das PCP e das diferentes formas, essa solução para revestimento começou a ser empregada além da Europa, estabelecendo-se na América Central e do Sul e na África do Sul. Durante a década de 70 as PCP foram introduzidas na Inglaterra, América do Norte, Austrália, Nova Zelândia e Japão (SHACKEL, 1990).

A introdução das peças na Inglaterra ocorreu quando algumas fábricas de pré-moldados inglesas adquiriram usinas de fabricantes alemães no final da década de 60. Inicialmente, as PCP eram empregadas apenas em áreas para pedestres como elementos decorativos. Entretanto, em 1973, uma nova cidade localizada a aproximadamente 50 km de Londres foi totalmente pavimentada empregando-se as referidas peças. Esse foi o marco inicial para o desenvolvimento da pavimentação com PCP na Inglaterra (KNAPTON & BARBER, 1979; COOK, 1981).

No início da década de 90, as PCP espalharam-se pelo Oriente Médio e Ásia. Estima-se que, nessa mesma época, a produção anual superou os 200 milhões de m², sendo cerca de 60% dessa mesma produção empregada em áreas de tráfego (SHACKEL, 1988).

Segundo RODRIGUES (1986), no Brasil não há registros precisos sobre a introdução das PCP pois, em princípio, a fabricação dos elementos pré-moldados era feita artesanalmente por indústrias de pouco porte e com baixa capacidade produtiva. Por isso, costuma-se considerar como marco do emprego das PCP o início da década de 70, em função do surgimento das primeiras fábricas de artefatos de concreto que dispunham de equipamentos de vibro-compressão no final da década de 60.

Desde então, este tipo de revestimento vem sendo empregado nos mais diversos locais, tais como: postos de gasolina, terminais e pontos de ônibus, aeroportos, estacionamentos, áreas industriais, portos, vias rurais e urbanas; merecendo destaque as aplicações nas cidades de Blumenau (SC), Ilha Bela (SP), Jundiaí (SP), São Caetano do Sul (SP) e Campo Grande (MS), bem como o emprego das PCP no Porto de Santos (Fonte: Revista Prisma nº 1, 2 e 3).

FERREIRA (1991) cita as principais vantagens da pavimentação com PCP como sendo:

- Baixo custo de manutenção, sendo recomendada para regiões em fase de crescimento;
- Pode ser posta em serviço imediatamente após a execução;
- Proporciona boa superfície de rolamento para velocidade de até 80 Km/h;
- Geralmente utiliza mão-de-obra não especializada;
- Efeito estético devido a diversidades nas formas e cores;
- Baixo custo devido à fabricação industrializada;

- Adequadamente projetada e executada, proporciona elevada vida útil.

Além da referidas vantagens, SHACKEL (1988) comenta ainda que, com uma dosagem apropriada, as superfícies das PCP podem oferecer níveis de desempenho superiores, em ambientes industriais severos, comparados com os revestimentos de concreto convencional ou asfálticos.

Em virtude dessas características e devido ao incentivo da indústria cimenteira, tem havido um constante crescimento no consumo de PCP no Brasil, facilmente constatado, devido ao número de fábricas e ao aumento das mesmas a cada ano. Neste cenário, a região sul do país vem se destacando em âmbito nacional, contando atualmente com cinco grandes fabricantes, que juntos, inicialmente, criaram a BlocoSul (Associação dos produtores de blocos da região sul), e posteriormente, incentivaram a criação da BlocoBrasil (Associação dos produtores de blocos do Brasil), visando uma padronização e conformação dos seus produtos de acordo com as normas vigentes, com o intuito de obtenção do selo de qualidade. Para se ter uma idéia do constante crescimento do número de fabricantes, somente em Santa Catarina, o número de fábricas no estado chegou à casa de 80 unidades fabris no ano de 2002 (Figura 1.3).

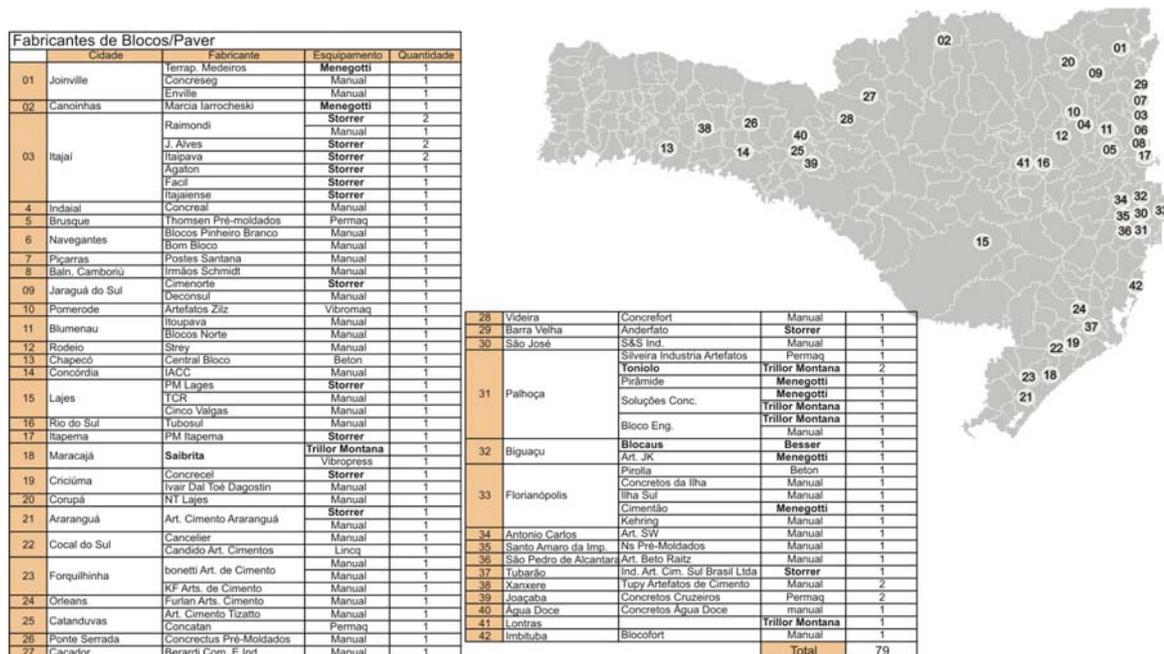


Figura 1.3 – Mapa dos fabricantes de blocos e PCP em Santa Catarina (Fonte: Votorantim Cimentos – 2002)

Apesar desse panorama favorável com relação às PCP, poucas são as fábricas que conseguem garantir as resistências características estipuladas pela NBR 9781 (ABNT, 1987) e

com um proporcionamento econômico. Isso é facilmente constatado pelo número de fabricantes no Brasil que possuem o selo de qualidade para as referidas peças (15 fábricas com o selo de 35 MPa e 2 fábricas com o selo de 50 MPa - Tabela 1.1).

Tabela 1.1 – Número de fabricantes que possuem o selo de qualidade para as PCP (Fonte: Revista Prisma – nov/dez 2003)

| Selo | Nº de fabricantes | Região |
|-----------------|-------------------|----------|
| Peças de 35 MPa | 6 | Sul |
| | 8 | Sudeste |
| | 1 | Nordeste |
| Peças de 50 MPa | 1 | Sul |
| | 1 | Sudeste |

As causas da falta de qualidade quanto à produção das peças são, na maioria das vezes, provenientes do desconhecimento sobre o assunto. Segundo RODRIGUES (1984), são poucos os dados e trabalhos disponíveis sobre a tecnologia de concreto para fabricação de PCP. Essa aparente falta de interesse dos pesquisadores se deve pela dificuldade de acesso aos equipamentos de vibro-compressão e pelo fato dos concretos secos (tipo de concreto empregado na produção das peças para pavimentação) não outorgarem o mesmo *status* dos concretos convencionais e de alto-desempenho.

Para piorar ainda mais esse contexto, os métodos de dosagem existentes são bastante incipientes, dependendo, fundamentalmente, de ajustes e testes no próprio equipamento de vibro-compressão, o que torna o processo de dosagem oneroso. De acordo com RODRIGUES (1984), o que pode ser efetivamente feito para o proporcionamento dos materiais são apenas recomendações gerais, pois as operações de dosagem assumem caráter específico, condicionado ao equipamento empregado na produção das peças.

1.1 – OBJETIVOS DO TRABALHO

Em virtude do exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral propor um método de dosagem experimental para PCP, capaz de prever, antecipadamente, características finais das peças, tais como resistência à compressão e textura superficial, evitando-se testes excessivos no próprio equipamento, o que torna uma dosagem trabalhosa, demorada e anti-econômica. Para tal, primeiramente, foram avaliadas as metodologias de dosagem existentes (capítulo 5), para

posterior definição do programa experimental e, conseqüentemente, definição dos objetivos específicos, que serão apresentados mais adiante no início do capítulo 6.

1.2 – CONTEÚDO E DIVISÃO DO TRABALHO

Para atingir tal objetivo, o trabalho está dividido em 7 capítulos.

No capítulo 1, é apresentada uma revisão da evolução da pavimentação segmentada até a chegada das PCP, seu desenvolvimento em nível mundial e a situação problemática atual com relação ao referido artefato no Brasil. Além disso, essa primeira parte inclui o objetivo geral, o conteúdo e estrutura do trabalho.

No capítulo 2, é feito um paralelo entre as características e propriedades dos concretos plásticos e secos, mostrando as particularidades que diferem esses tipos de concreto, bem como um resumo das prescrições das principais normas nacionais e internacionais vigentes com relação aos critérios de desempenho das PCP.

Já no capítulo 3 e 4 são apresentados, respectivamente, os materiais comumente empregados na confecção dos concretos secos para a produção das PCP e uma revisão detalhada sobre os equipamentos de vibro-compressão.

O capítulo 5 trata dos principais métodos de dosagem existentes, enfatizando as peculiaridades de cada método e suas deficiências.

A descrição do programa experimental deste trabalho é apresentada no capítulo 6. Nele, são descritos e apresentados os equipamentos propostos e os ensaios desenvolvidos, bem como seus resultados e análises, visando alcançar o objetivo principal do trabalho. Maiores detalhes da estrutura do programa experimental serão apresentados no início do referido capítulo.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões finais e recomendações para estudos complementares ao trabalho realizado.

2 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO CONCRETO E DAS PEÇAS PARA PAVIMENTAÇÃO

2.1 – CONCRETO PLÁSTICO x CONCRETO SECO

O concreto de cimento Portland é um material para construção, constituído da mistura de agregados graúdo e miúdo, cimento, água e eventuais aditivos químicos e adições minerais. Este material endurece devido à reação do cimento com a água (hidratação), apresentando várias propriedades atrativas, tanto no estado fresco como no endurecido, tornando-o, dentre os materiais utilizados na construção civil, o mais empregado em todo o mundo. Segundo METHA & MONTEIRO (1994), além da água, o homem não consome nenhum outro material em tal quantidade, estimando-se que o atual consumo mundial de concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano. Os autores afirmam, ainda, que, apesar do concreto não ser tão resistente e tenaz quanto o aço, o mesmo apresenta: excelente resistência à água; facilidade de execução dos elementos estruturais numa variedade de formas e tamanhos; normalmente é o material estrutural mais barato e mais facilmente disponível no canteiro; requer menor consumo de energia para produção, comparado com a maioria dos outros materiais de engenharia, e, além disso, possibilita a reciclagem de grande quantidade de restos industriais, em substituição à parte do cimento ou agregados, diminuindo os custos e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

Os concretos estruturais normais, ou também chamados plásticos, caracterizam-se pelo elevado consumo de água, além da quantidade necessária à hidratação do cimento, para obtenção de uma mistura plástica e com consistência conveniente, capaz de ser, perfeitamente, adensada. Essa característica permite que esses concretos sejam aplicados com certa facilidade, sendo que a retirada do ar aprisionado às misturas, geralmente, é feita mediante equipamentos simples, tais como vibradores de imersão.

O excesso de água, empregado para obtenção de uma trabalhabilidade adequada, resulta em poros na pasta de cimento, implicando na perda de resistência, após o completo endurecimento. Para concretos plenamente adensados, consideram-se suas resistências como inversamente proporcional à relação água/cimento (a/c). Essa relação foi estabelecida por Duff Abrams, em 1919, e denominada “lei”, mas, na realidade, é uma regra (NEVILLE, 1997), normalmente, expressa pela seguinte função:

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (1)$$

Onde: f_{cj} = Resistência do concreto na idade j dias;

k_1 e k_2 = Constantes que dependem dos materiais empregados;

a/c = Relação água/cimento do concreto.

Hoje, após os trabalhos de Powers, sabe-se que a relação a/c explica a resistência dos concretos plásticos, devido ao fato de ser responsável pela maior parte da porosidade da pasta de cimento a uma certa idade. Entretanto, pela simplicidade do conceito introduzido por Abrams, a relação a/c continua sendo o parâmetro mais importante numa dosagem (DAFICO, 1997).

Outro parâmetro valioso, empregado na obtenção dos traços quando da dosagem dos concretos plásticos, é a percentagem de água/materiais secos (H). Inge Lyse publicou, em 1931, sua contribuição ao estudo da dosagem dos concretos, demonstrando que, dentro de certos limites, pode-se considerar constante a quantidade de água total empregada por unidade de volume de concreto, para uma dada consistência (PETRUCCI, 1993). Na prática, considera-se que a relação água/materiais secos não sofre alteração com a variação dos traços, desde que sejam mantidos a mesma consistência, os mesmos materiais, e que as proporções entre os agregados miúdos e graúdos não sofram grandes alterações. Na Figura 2.1, é reproduzido um gráfico apresentado por PETRUCCI (1993), onde mostra que, variando-se o traço de 1: 3 a 1: 9, para uma determinada trabalhabilidade, a quantidade de água mantém-se, praticamente, constante.

Apesar das inúmeras vantagens, o concreto plástico apresenta, em alguns casos, certas deficiências, dificultando ou até mesmo inviabilizando a sua aplicação. Assim, surgiram os chamados concretos especiais, com propriedades distintas e bem definidas e, dentre eles, o concreto seco, empregado na produção de PCP, blocos de alvenaria estrutural, tubos, concreto compactado a rolo, concreto projetado via seca, entre outros.

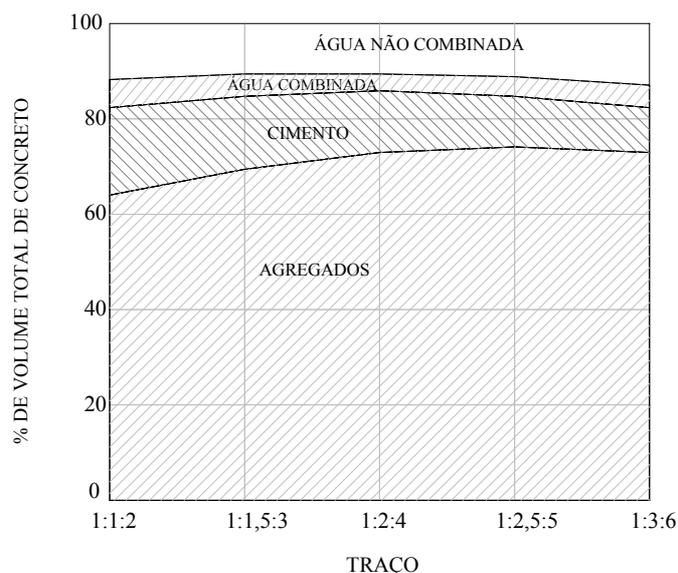


Figura 2.1 – Percentagem de água/materiais secos (H) em função do traço para uma certa consistência (PETRUCCI,1993)

Esse tipo peculiar de concreto caracteriza-se pela baixa relação água/materiais secos, grande consistência, alta coesão e pela forma com que o ar aprisionado é retirado. Segundo MARCHAND et al. (1996), concreto seco pode ser definido como um concreto com consistência significativamente superior aos concretos usuais (concretos plásticos), devido a menor quantidade de água empregada, geralmente, por causa da necessidade de desforma imediata. Essa característica, em particular, o torna um concreto levemente umedecido, também conhecido como concreto de slump-zero ou concreto com consistência de terra úmida, sendo necessário o emprego de equipamentos especiais para compactação (JUVAS, 1993). No caso das PCP, são utilizados equipamentos capazes de vibrar e comprimir simultaneamente (máquinas vibroprensas), com o objetivo de conferir às misturas alta compactidade.

De acordo com RODRIGUES (1984), as leis que explicam as propriedades mecânicas dos concretos secos, nem sempre se assemelham ou condizem com as do concreto estrutural de consistência plástica. Via de regra, o concreto seco não segue a risca a “Lei de Abrams”, uma vez que reduções na relação água/cimento não melhoram a resistência à compressão (Figura 2.2). Por tratar-se de um concreto com baixo teor de água, a relação água/cimento não é o fator determinante da porosidade das peças, sendo que, quantidades maiores de água, melhoram, consideravelmente, a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito interno entre os grãos e facilitando a compactabilidade da mesma. Em outras palavras, fixados um traço e uma energia de

compactação, com o aumento da quantidade de água da mistura, consegue-se uma redução na porosidade total, aumentando-se, assim, a resistência à compressão.

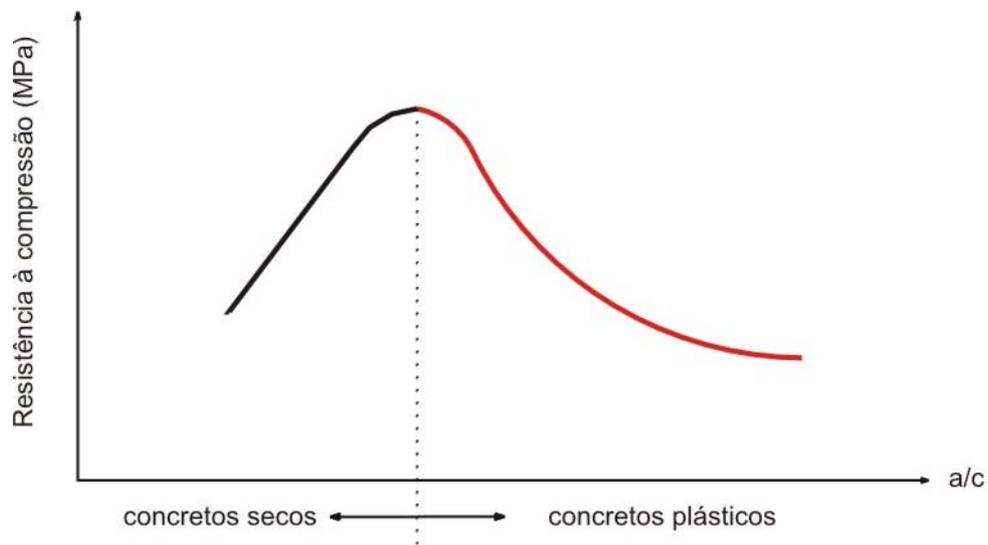


Figura 2.2 – Resistência à compressão em função da relação água/cimento (a/c) para uma mesma proporção agregados/cimento (traço fixo)

As propriedades do concreto seco, no estado endurecido, estão intimamente ligadas às do estado fresco, de maneira muito mais pronunciada do que no concreto plástico (RODRIGUES, 1984). O concreto seco deve apresentar trabalhabilidade adequada à ser moldado com o equipamento disponível, além de possuir uma elevada coesão para que as peças mantenham-se inalteradas imediatamente após a desforma. Em se tratando de PCP, as principais propriedades requeridas no estado endurecido são: textura superficial, que está relacionada com a composição granulométrica da mistura; resistência à compressão; e durabilidade, normalmente avaliada pela resistência à abrasão. Além dos materiais utilizados, essas propriedades estão muito relacionadas com o tipo e regulagem do equipamento (máquina vibro-prensa). Por isso, nos capítulos seguintes (capítulos 3 e 4), serão abordados esses dois temas mais a fundo (materiais constituintes e equipamentos de vibro-compressão), ressaltando as influências dos mesmos nas propriedades finais das peças.

Essas diferenças tornam as metodologias de dosagem, aplicadas ao concreto seco, bem distintas, em comparação às empregadas em concretos plásticos. Em se tratando de concretos estruturais de consistência plástica, existem métodos consolidados, baseados nas teorias de Abrams e Lyse, capazes de preverem, com uma boa confiança, propriedades importantes como resistência à compressão e trabalhabilidade. Já no caso dos concretos secos empregados na

produção das peças para pavimentação, existem algumas propostas de metodologias que possuem certas imprecisões por não levarem em consideração uma série de fatores intervenientes no processo de produção, principalmente com relação ao equipamento de vibro-compressão e, em alguns casos, conceitos fundamentais sobre os concretos secos.

Antes de se abordar os métodos de dosagem existentes para as PCP, que serão vistos mais a frente no capítulo 5, serão apresentadas, primeiramente, as prescrições das principais normas vigentes, referentes às peças para pavimentação.

2.2 – PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DAS PCP

2.2.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão das PCP é o principal parâmetro de controle de qualidade das peças, sendo que esse valor não exerce grande influência no comportamento estrutural dos pavimentos, quando dentro de certos limites (20 a 60 MPa – SHACKEL, 1980). Segundo RODRIGUES (1986), fatores referentes à durabilidade são os que influenciam a fixação da resistência mínima das peças, onde regiões de baixa temperatura com problemas de gelo e degelo, normalmente especificam resistências mais elevadas.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as resistências especificadas pelas principais normas vigentes, para as PCP. Através da mesma, é possível perceber que não existe um consenso mundial sobre os limites de resistência e o tipo de ensaio empregado.

A seguir é feita uma descrição sucinta dos tipos de ensaios apresentados na Tabela 2.1

- Carregamento total: consiste na aplicação da carga em toda a superfície da peça. A resistência à compressão é dada pela relação entre a carga aplicada e a área de carregamento da peça;
- Extração de corpos-de-prova: o ensaio de compressão é feito em pequenos corpos-de-prova cilíndricos ou cúbicos, extraídos das PCP. A determinação da resistência é feita de forma semelhante ao ensaio de carregamento total, onde a resistência à compressão é dada pela relação entre a carga aplicada e a área de carregamento da peça;
- *Split test*: o ensaio é feito aplicando-se o carregamento em duas barras cilíndricas metálicas justapostas em contato com a peça (Figura 2.3a). Essas barras geram um esforço de tração na peça que pode ser calculado, segundo PETRUCCI (1993), como sendo:

$$\text{Resistência à tração} = \frac{2P}{\pi \times h \times l} \quad (2)$$

Onde: P= carga linear aplicada;
h = altura da peça;
l = largura da peça.

- Flexão: o ensaio de flexão para as PCP é feito apoiando-se a peças em dois cilindros metálicos com comprimento igual ou superior a largura da mesma, e, aplicando-se uma carga centrada (Figura 2.3b). O resultado pode ser dado em termos da carga de rompimento da peça ou em termos da resistência à tração (AS/NS 4555/1997), que segundo PETRUCCI (1997), pode ser calculada como sendo:

$$\text{Resistência à tração} = \frac{3PL}{2 \times l \times h^2} \quad (3)$$

Onde: P= carga linear aplicada;
h = altura da peça;
l = largura da peça;
L = distância entre os apoios.

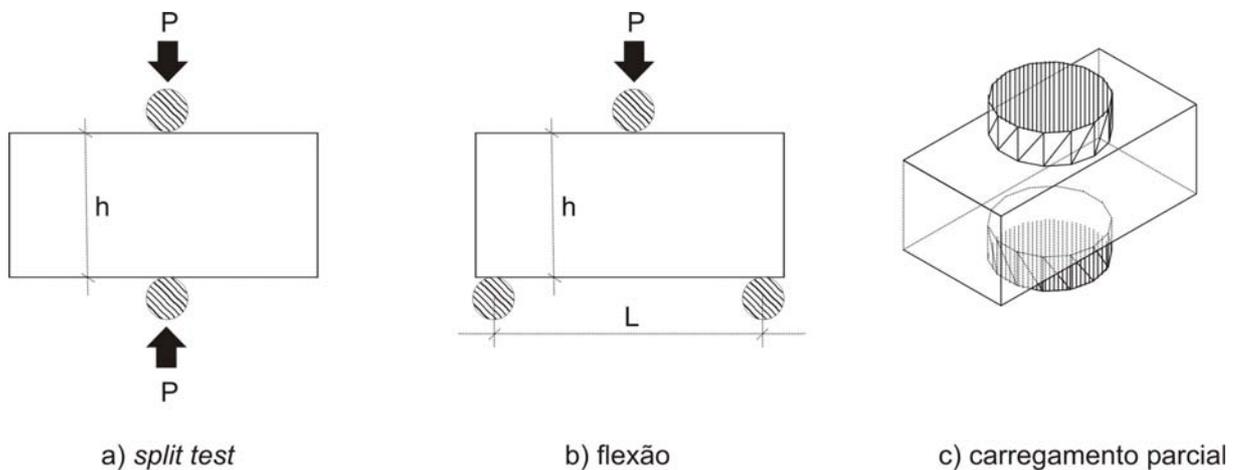


Figura 2.3 – Detalhe dos ensaios de resistência à compressão: a) *split test*; b) flexão; c) carregamento parcial

- Carregamento parcial: é feito um carregamento parcial da peça por meio de pastilhas auxiliares (quadradas – DIN 18501 (1978) ou circulares – NBR 9780 (1987)), colocadas em contato com as duas faces da peça e perfeitamente alinhadas, simulando um “puncionamento duplo” (Figura 2.3c).

Tabela 2.1 – Resistências à compressão especificadas pelas principais normas vigentes (Fonte: Third International Conference on Concrete Block Paving - Rome, Italy – 1988)

| Norma | Resistência | Tipo | Método de ensaio |
|------------------------------|---|----------------|---|
| ASTM C936 EUA | > 55 MPa | média | carregamento total |
| NBN B21-311 Bélgica | ≥ 60 MPa | média | carregamento total ou extração de corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos |
| | > 4,5 MPa | média | <i>split test</i> |
| AFNOR – EN 1338 França | ≥ 4,0 MPa | característica | <i>split test</i> |
| BS 6717 Inglaterra | ≥ 49 MPa | média | carregamento total |
| AS/NZ 4455/4456 Austrália | ≥ 2 MPa ¹ (≥ 2 kN ¹) | característica | flexão (<i>breaking load</i>) |
| | ≥ 3 MPa ² (≥ 5 kN ²) | | |
| | ≥ 4 MPa ² (≥ 10 kN ³) | | |
| DIN 18501 Alemanha | > 63,6 MPa ⁴ | média | carregamento total |
| | | | extração de corpos-de-prova cúbico |
| NBR 9780/9781 Brasil | ≥ 35 MPa ⁵ | característica | carregamento parcial (punção dupla) |
| | ≥ 50 MPa ⁶ | | carregamento parcial (punção dupla) |

OBS: a Norma AS/NZ 4455 especifica também a carga de ruptura à flexão como parâmetro de resistência;

1 – aplicação residências;

2 – passeios públicos e vias de tráfego leve;

3 – áreas industriais;

4 – resistência à compressão dependente da altura da peça (h = 80 mm – 63,6 MPa; h = 200 mm – 60,0 MPa);

5 – solicitação de veículos comerciais de linha;

6 – tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuado efeito abrasivo.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adotou o ensaio de carregamento parcial como sendo o método de ensaio normalizado para a determinação da resistência à compressão das peças empregadas em pavimentação, em função de questões técnicas, econômicas e até mesmo culturais, devido à falta de hábito em se trabalhar com valores de resistência à tração. Contudo, Rodrigues, já em 1982, destacava a necessidade de maiores estudos para avaliação da influência da largura e da relação h/d (altura / diâmetro do disco de

aplicação de carga) das peças no resultado de resistência à compressão, referenciando, respectivamente, os trabalhos conduzidos por LANGENDONCK (1952) e TUCKER (1945).

Quando da definição do método de ensaio de resistência à compressão das peças para pavimentação, a comissão de estudos tomou as seguintes providências para tentar minimizar as influências das dimensões das peças no resultado do ensaio (RODRIGUES, 1986):

- A largura máxima das peças foi limitada em 140 mm, pois o carregamento parcial das peças faz com que a área não carregada exerça um esforço de cintamento sobre a região central;
- Foram adotados fatores de correção dos resultados do ensaio, em função da altura das peças. As peças com 80 mm de altura foram tomadas como padrão (fator de correção igual a 1,0) e para as peças com altura de 60 e 100 mm, foram aplicados fatores de minoração e majoração, respectivamente. Esses fatores de correção são apresentados na Tabela 2.2 em função das alturas especificadas pela NBR 9780 (1987).

Tabela 2.2 – Fatores de correção das peças em função das alturas especificadas pela NBR 9780 (1987)

| Altura das peças (mm) | Fator de correção |
|-----------------------|-------------------|
| 60 | 0,95 |
| 80 | 1,00 |
| 100 | 1,05 |

2.2.2 – RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Semelhante à questão do ensaio de resistência à compressão, existem vários métodos de ensaios diferentes para a determinação da resistência à abrasão das peças para pavimentação, cada qual com suas especificações quanto a limites de aceitação (ASTM C418, 1996; AFNOR NF P98-303, 1988; AS/NZ 4456, 1997). Nesse contexto, vale a pena destacar o trabalho recente desenvolvido por PETTIT (2003). O referido autor avaliou uma série de ensaios, a fim de propor uma metodologia universal, a ser publicada futuramente como recomendação do Eurocode, para a determinação da resistência à abrasão tanto de PCP como peças cerâmicas para pavimentação. Por questões técnicas e econômicas, PETTIT (2003) recomenda o método denominado *wide wheel method*, que consiste no emprego de um disco de aço de 200 mm de diâmetro, girando a uma velocidade de 75 rpm, durante 60 segundos, utilizando-se um material abrasivo

(carburundum) entre o referido disco de aço e a peça a ser ensaiada. O resultado do ensaio é expresso em função da profundidade de penetração do disco.

Em se tratando de resistência à abrasão das PCP para pavimentação, vale ressaltar que as normas brasileiras não preconizam limites de aceitação e métodos de ensaio para avaliação dessa propriedade.

2.2.3 – ABSORÇÃO

Com relação à absorção das peças para pavimentação, existem algumas normas (Tabela 2.3) que especificam limites para valores médios e individuais visando a durabilidade das referidas peças. As normas que especificam limites para essa propriedade são normalmente normas de países que possuem clima muito frio, e sofrem a ação do gelo e degelo. Vale ressaltar que as normas brasileiras não especificam limites de absorção para as PCP empregadas em pavimentação.

Tabela 2.3 – Especificações quanto à absorção das peças para pavimentação (Fonte: Third International Conference on Concrete Block Paving - Rome, Italy – 1988)

| Norma | Absorção (%) | Tipo |
|---------------------------|--------------|----------------------|
| ASTM C936 EUA | ≤ 5,0 | valor médio |
| | ≤ 7,0 | individual |
| NBN B21-311 Bélgica | ≤ 5,0 | valor médio |
| | ≤ 5,5 | individual |
| AFNOR – EN 1338 França | ≤ 5,4 | valor característico |
| | ≤ 5,7 | individual |

2.2.4 – AVALIAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL DAS PEÇAS

Apesar da textura superficial das peças ser uma propriedade importante, não existe nenhuma metodologia para avaliação quantitativa das condições superficiais das peças e limites de aceitação para as mesmas. O que se tem são recomendações para realização de inspeção visual, objetivando a identificação de defeitos que possam prejudicar o assentamento das peças, o desempenho estrutural e a estética do pavimento (NBR 9781, 1987; ASTM C936, 1996).

A ASTM E 965 (1987) preconiza um procedimento para avaliação da macrot textura em campo, dos revestimentos de um modo geral. O teste consiste basicamente em se colocar um volume conhecido (cerca de 25.000 mm^3) de pequenas esferas sólidas de vidro (material passante na peneira nº 60 (0,25 mm) e retido na peneira de nº 80 (0,18 mm)) sobre o pavimento, espalhando-as, posteriormente, empregando-se movimentos circulares, fazendo com que essas esferas penetrem nos poros superficiais do pavimento. Ao término do espalhamento das esferas, deve-se determinar o diâmetro médio da área circular coberta pelas esferas de vidro. O resultado do ensaio é dado em termos da profundidade de penetração das esferas de vidro, calculada pela relação entre o volume unitário de material empregado e a área final da circunferência coberta pelas referidas esferas.

Outra forma de avaliação que vem sendo empregada na indústria cerâmica e parece ser uma tendência atual no ramo dos concretos e materiais porosos, é a caracterização através de análise de imagens digitais. Em função disso e devido ao particular interesse em se utilizar essa técnica no programa experimental deste trabalho, será feita uma breve revisão sobre imagens digitais, dando ênfase à parte de histogramas de frequências de imagens em tons de cinza e equipamentos de aquisição de imagens.

2.2.4.1 – Imagens digitais

Uma imagem digital nada mais é do que a conversão de uma imagem visual de um objeto físico e suas características em um formato numérico, possível de ser manipulado por computador. Esse processo de conversão é chamado de digitalização, onde a imagem é dividida em pequenos elementos comumente conhecidos por *pixels* (Figura 2.4) (CASTLEMAN, 1996).

Cada *pixel* possui um valor associado, que contém a informação de luminosidade correspondente à imagem naquele ponto. Essa informação da intensidade luminosa do *pixel* é armazenada em *bits*, que são áreas de memória que podem conter o valor “0” indicando que o *bit* está desligado ou “1” para ligado. Dependendo do número de *bits/pixel* ter-se-á as imagens em tons de cinza – 8 *bits/pixel*; imagens coloridas do tipo RGB (*red, green and blue*) – 24 *bits/pixel*, sendo 8 *bits* para representar a intensidade do vermelho, 8 *bits* para o verde e 8 *bits* para o azul; e as imagens coloridas do tipo CMYK (*cian, magenta, yellow and black*) – 32 *bits/pixel*, 8 *bits* para cada um dos quatro canais (CMYK) (SCURI, 1999). Como existe somente a possibilidade de se armazenar o valor “0” ou o valor “1” em cada *bit*, tem-se que o tamanho do espectro de cores de cada tipo de imagem é dado por:

Tamanho do espectro = 2^m (4)

Onde: m = quantidade de *bits/pixel*

Dessa forma, tem-se que cada *pixel* de uma imagem em tons de cinza pode apresentar uma variação de tonalidade que vai do “0” (preto) ao “255” (branco), o que representa um espectro de 256 tonalidades (Figura 2.4), enquanto que as imagens coloridas do tipo RGB e CMYK, apresentam, respectivamente, espectros de 16,7 milhões e 4,3 bilhões de cores.

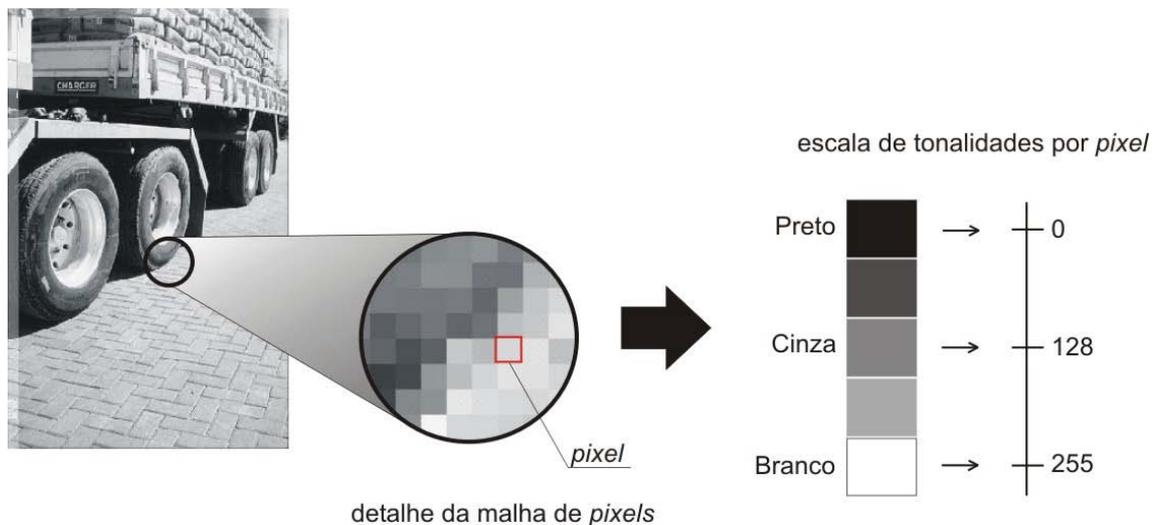


Figura 2.4 – Detalhe de uma imagem digitalizada

HISTOGRAMA DE FREQUÊNCIAS DE IMAGENS EM TONS DE CINZA

Segundo CASTLEMAN (1996), uma das formas mais simples e usuais de caracterização de uma imagem em tons de cinza é através de seu histograma de frequências. Esse histograma é uma função que mostra, para cada nível do espectro de tonalidade, o número de *pixels* existentes dentro da imagem analisada (Figura 2.5). CASTLEMAN (1996) destaca ainda que algumas imagens são facilmente caracterizadas e representadas pelo seu histograma de frequências; enquanto para outras, o uso do histograma de frequências é inviável, devido à perda de informação espacial. Em outras palavras, ao se condensar todas as informações da imagem em seu histograma, a posição espacial de cada *pixel* é descartada. Por isso, costuma-se dizer que existe um único histograma para cada imagem, porém o inverso não é verdadeiro; cada histograma pode dar origem a infinitas imagens, devido à perda da posição espacial dos *pixels*.

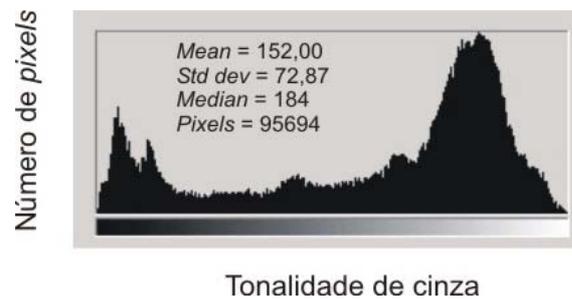


Figura 2.5 – Detalhe do espectro de frequências de uma imagem em tons de cinza

EQUIPAMENTOS DE AQUISIÇÃO DE IMAGEM

Existem diversos equipamentos de aquisição, dentre os quais merecem destaque as câmeras digitais e os *scanners*, por serem os mais empregados atualmente para a digitalização das imagens. O princípio de funcionamento desses equipamentos consiste na exposição do objeto real à luz e posterior determinação da quantidade de luz refletida por meio dos sensores CCDs (*charge-coupled devices*), que são os dispositivos responsáveis por medir a intensidade de luz (ASHFORD & ODAM, 1996). Em função disso, os referidos equipamentos tornam-se muito susceptíveis às condições ambientais no momento da fase de digitalização, sendo que as câmeras digitais sofrem muito mais influência de fatores externos como a intensidade de luz sobre o objeto, por não disporem de fontes de luz própria como os *scanners* (SCURI, 1999).

Apesar de serem um pouco mais caros, os *scanners* permitem que as imagens sejam digitalizadas com resoluções bem mais altas, implicando em maior qualidade das imagens. Segundo SCURI (1999), a resolução pode ser definida como sendo a relação entre o número de *pixels* de uma determinada imagem e o tamanho real da mesma, sendo normalmente representada pela unidade *dpi* (*dots per inch*).

SCURI (1999), ressalta ainda a necessidade de calibração dos equipamentos de aquisição (câmeras digitais e *scanners*), pois os mesmos respondem de forma diferente a uma mesma informação de cor, em função de desgaste dos sensores de leituras (CCDs), tipos de filtro e os diferentes caminhos ópticos ao longo da qual a imagem é digitalizada. Normalmente essa calibração é feita empregando-se padrões impressos juntamente com programas de calibração ou de tratamento de imagens. Esses padrões impressos possuem uma série de tonalidades dentro do espectro de interesse (tons de cinza, RGB, CMYK) que são capturadas e reconhecidas pelo programa, que posteriormente faz uma comparação entre os valores obtidos e os esperados, gerando assim um perfil de correção do equipamento.

3 – MATERIAIS CONSTITUINTES EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DE PCP

Os principais materiais constituintes das PCP são o cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, água e eventuais aditivos químicos e adições minerais. Normalmente, os materiais adequados à aplicação em concretos convencionais (concretos plásticos) podem ser empregados na fabricação de PCP, salvo algumas particularidades com relação aos agregados. A seguir, descrever-se-ão as principais características desses materiais e suas influências nas propriedades finais das peças.

3.1 – CIMENTO PORTLAND

A NBR 9781 (ABNT, 1987) especifica que os cimentos, para aplicação em PCP, independente do tipo, devem, apenas, obedecer suas respectivas normas. Porém, atualmente, a indústria cimenteira vem produzindo e fornecendo, sistematicamente, para o mercado da região sul do país, basicamente, três tipos de cimento: o de alta resistência inicial resistente a sulfato (CP V-ARI-RS), o pozolânico (CP IV) e o composto com pozolana (CP II – Z).

Para a indústria de pré-moldados em geral, os cimentos de alta resistência inicial (CP V – ARI e o CP V-ARI-RS), como o próprio nome indica, alcançam níveis de resistência mecânica, nas primeiras idades, bastante elevados, sendo o mais recomendado para esses fins. As principais vantagens, quando empregados, são as rápidas liberações das grades e das câmaras de cura, possibilitando a desforma e paletização com um baixo índice de quebra, geralmente com menos de 24 horas após a produção, bem como as resistências elevadas a baixas idades, reduzindo o tempo de entrega dos produtos aos clientes e diminuindo, assim, a necessidade de estoques elevados no pátio das fábricas.

Os demais tipos de cimento (comum (CP I e CP I –S), composto (CP II – E, CP II – Z, CP II – F) e com adições (CP III e CP IV)), têm, como principal desvantagem, as baixas resistências iniciais alcançadas. Entretanto, não devem ser completamente excluídos das indústrias de pré-fabricados, desde que sejam tomadas certas precauções, como a aplicação de cura térmica e o emprego de estoques, imprescindíveis em se tratando de produtos de alta resistência (RODRIGUES, 1984).

Algumas fábricas empregam ainda o cimento portland branco para a produção de peças para pavimentação pigmentadas, principalmente quando as cores desejadas são em tons pastéis. Porém, independente do tipo de cimento (cimento portland ou branco), CARTER (1996) recomenda que variações na coloração do lote de cimento para a produção de peças coloridas sejam evitadas, pois essas variações podem influenciar na tonalidade final das peças.

Devido aos níveis de resistência especificados pela NBR 9781 (1987)- 35 e 50 MPa, o consumo de cimento nas peças pré-moldadas para pavimentação é relativamente elevado (traços variando de 1:3 a 1: 7 em massa), comparando-se com blocos de alvenaria (traços entre 1: 7 a 1: 14); com isso, o cimento passa a ser um forte determinante no custo final do produto. BERGERHOF (1981) recomenda que o consumo de cimento, para produção das PCP, esteja entre 250 e 300 Kg/m³ de concreto. Porém, a determinação desse consumo está muito ligada ao equipamento empregado e a sua regulagem, tornando-se difícil estabelecer um valor ou uma faixa de consumo de cimento por metro cúbico de concreto, em função da resistência especificada. Com um mesmo traço, pode-se produzir peças com diferentes resistências mecânicas, variando-se apenas o tempo de alimentação da máquina vibro-prensa. Com isso, as peças apresentam um grau de compactidade bem mais elevado, resultando, conseqüentemente, em peças com resistências mais altas para um mesmo consumo de cimento (maiores detalhes sobre a influência do equipamento de vibro-compressão nas propriedades das peças serão vistos no capítulo 4).

Em função desse maior consumo de cimento para a produção das peças empregadas em pavimentação, as misturas possuem uma boa coesão, evitando problemas de segregação e desagregação durante a produção, além de contribuir para a trabalhabilidade das mesmas, facilitando a etapa de compactação. No entanto, um consumo muito elevado de cimento pode dificultar bastante a produção das peças, em função da alta coesão das misturas (ver capítulo 4).

3.2 – AGREGADOS GRAÚDOS

Os agregados graúdos empregados podem ser naturais (seixo rolado) ou artificiais (britas “0” ou “I”), provenientes do britamento de rochas estáveis. Estes últimos são mais indicados por apresentarem, geralmente, uma melhor aderência com a pasta de cimento, favorecendo a obtenção de resistências mecânicas mais elevadas. Quanto à dimensão máxima característica, usualmente, empregam-se agregados com diâmetros inferiores a 9,5 mm (brita “0”), a fim de se evitar danos no equipamento, além de contribuir para a melhoria da textura superficial das peças (RODRIGUES, 1984). Segundo o referido autor, além das restrições granulométricas, os

agregados graúdos devem cumprir com os requisitos básicos de qualidade, estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 1983), resumidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características recomendadas para agregados graúdos empregados na produção de PCP

| Características | Tolerância |
|-----------------------|------------|
| Material pulverulento | < 1,0 % |
| Partículas friáveis | < 2,0 % |
| Material carbonoso | < 1,0 % |
| Índice de forma | < 3,0 |
| Abrasão “Los Angeles” | < 50 % |

3.3 – AGREGADOS MIÚDOS

Os agregados miúdos, para emprego em PCP, poderão ser naturais (de rio ou de cava) ou artificiais (pó-de-pedra in natura ou beneficiado -areia artificial), proveniente do britamento de rochas estáveis. As areias naturais são mais utilizadas, devido à grande disponibilidade em algumas regiões e forma mais arredondada que facilita a moldagem das peças.

Em se tratando de distribuição granulométrica das areias, RODRIGUES (1984) faz sérias restrições quanto ao uso de areias grossas, como as da zona 4 da NBR 7211 (ABNT, 1983), devido ao fenômeno de interferência entre as partículas, que dificulta a compactação. O referido autor recomenda que a granulometria das areias seja estudada adequadamente, pois sua influência sobre as propriedades reológicas do concreto no estado fresco mostra-se mais pronunciada do que a granulometria do agregado graúdo. Geralmente, os fabricantes de PCP utilizam areias classificadas como média (zona 3), segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983), com módulos de finura variando entre 2,5 e 3,2. Estas areias devem apresentar uma distribuição granulométrica contínua, pois, de acordo com FERREIRA (1991) e MEDEIROS (1993), a falta de continuidade desse material pode comprometer seriamente a qualidade final das peças.

RODRIGUES (1984) ressalta ainda que as areias empregadas na produção de PCP devem cumprir com outros requisitos de qualidade resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características recomendadas para agregados miúdos empregados na produção de PCP

| Características | Tolerância |
|-----------------------|-------------|
| Material pulverulento | < 3,0 % |
| Teores de argila | < 1,5 % |
| Material carbonoso | < 1,0 % |
| Impurezas orgânicas | < 300 ppm * |

* Areias com impurezas orgânicas superior a 300 ppm deverão ser submetidas a ensaios mais conclusivos.

3.4 – ÁGUA

Assim como as recomendações para concretos convencionais (plásticos), a água para produção de PCP deve ser isenta de substâncias que possam vir a prejudicar as reações de hidratação do cimento, sendo que, geralmente, a água potável, fornecida pela rede normal de abastecimento, é satisfatória. No caso do uso de águas não tratadas, estas devem ser analisadas antes do seu emprego, para evitar problemas futuros (RODRIGUES, 1984).

A quantidade de água empregada em um concreto seco gira em torno de 5 a 7,5 %; valores estes inferiores, quando comparados com as quantidades utilizadas na confecção de concretos plásticos (8 a 12%). Porém, pequenas variações nestas quantidades, durante a produção, são responsáveis por mudanças consideráveis nas propriedades das misturas, principalmente quanto à coesão e a facilidade à compactação. Segundo FERREIRA (1991), quando são utilizadas misturas mais secas, as máquinas vibro-prensas apresentam um falso rendimento, por serem estas mais soltas e encherem as formas com mais facilidade. No entanto, misturas neste estado oferecem grande resistência à compactação, sendo necessário o emprego de equipamentos capazes de imprimir uma alta energia, pois, caso contrário, as peças apresentarão uma porosidade acentuada e, conseqüentemente, baixos níveis de resistências mecânicas.

TANGO (1994) recomenda que a quantidade de água ideal para produção de blocos seja a máxima possível, desde que não prejudique a desforma dos produtos. O mesmo deve ser aplicado às PCP, sendo que a quantidade de água deve ser a máxima possível, compatível com o equipamento de vibro-compressão empregado (RODRIGUES, 1995a).

3.5 – ADITIVOS

A NBR 11768 (ABNT, 1992) define os aditivos como *“produtos que adicionados em pequenas quantidades a concretos e argamassas de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”*.

No caso específico de fabricação de peças para pavimentação, os aditivos que podem interessar são os incorporadores de ar e os pigmentos (RODRIGUES, 1984). Apesar do uso corrente de aditivos plastificantes e superplastificantes na confecção de concretos plásticos, esses não são empregados na indústria das PCP, pois para o funcionamento desse tipo de aditivo, o

concreto necessita de uma quantidade mínima de água, superior a quantidade empregada nos concretos secos utilizados para a produção das referidas peças.

De acordo com MEDEIROS (1993), no Brasil, não existe tradição em se empregar aditivos para a produção de artefatos vibro-prensados de concreto, sendo que vários fabricantes, que se preocupam com trabalhabilidade da mistura, utilizam produtos químicos com efeitos ainda desconhecidos em relação às características do concreto.

3.5.1 – ADITIVOS INCORPORADORES DE AR

Os aditivos incorporadores de ar são substâncias orgânicas em solução aquosa que, adicionadas ao concreto, introduzem uma quantidade limitada de minúsculas bolhas de ar (RODRIGUES, 1984). Geralmente, constituem-se de sais de resinas de madeira, materiais proteicos, ácidos graxos, além de alguns detergentes sintéticos (MEHTA & MONTEIRO, 1994), sendo utilizados em quantidades que variam de 100 a 500 ml/50 Kg de cimento, dependendo da mistura e do tipo de aditivo empregado (LEVITT, 1982).

Quando adicionados aos concretos plásticos, estes aditivos melhoram a trabalhabilidade e a coesão, além de facilitar a compactação das misturas, devido ao papel simultâneo de fluido e agregado fino, desempenhado pelas bolhas de ar. No estado endurecido, a perda de resistência à compressão por causa do ar incorporado, é, em parte, amenizada pelas reduções da relação água/cimento e da porosidade do concreto, devido, respectivamente, ao efeito plastificante e à diminuição do atrito interno, causados pelo aditivo. Porém, MARCHAND (1998) afirma que para o funcionamento dos aditivos incorporadores de ar, deve haver uma quantidade suficiente de água para que se consiga formar um filme ao redor de cada bolha. Quando a quantidade de água adicionada à mistura é significativamente reduzida, como no caso dos concretos secos, a água tende, primeiramente, a envolver a superfície dos sólidos, prejudicando o funcionamento do aditivo. Segundo o referido autor, a única maneira de incorporar e estabilizar as bolhas de ar dentro de concretos secos é alterando a seqüência de mistura, o que resulta em perda de eficiência na produção, ou empregando-se misturadores de alta eficiência. Caso contrário, os aditivos incorporadores de ar conseguem estabilizar apenas micro-bolhas (entre 2 e 10 μm).

3.5.2 – PIGMENTOS

LEVITT (1982) define pigmentos como pós extremamente finos ou em suspensão aquosa, inertes aos materiais constituintes do concreto que, ao serem aplicados, proporcionam aos produtos uma coloração específica (substâncias corantes). Segundo ELLIS *et al.* (1996), geralmente, os pigmentos usados são divididos em duas categorias: Naturais e sintéticos.

- Pigmentos naturais: São provenientes dos óxidos de ferro vermelho e amarelo da Espanha, Índia e China; do óxido de ferro marrom de Chipre; e do dióxido de manganês preto da Rússia, China e da África do Norte;
- Pigmentos sintéticos: São, usualmente, produzidos a partir de sais de ferro nas cores vermelho, amarelo e preto, sendo que, a cor marrom, pode ser obtida através da mistura das três.

De acordo com CARTER (1996), os pigmentos sintéticos são os mais empregados em função do seu maior controle de qualidade durante a fabricação e conseqüente aumento da resistência tonalizante, comparado com os pigmentos naturais. Segundo o referido autor, esse tipo de pigmento (sintético) pode ser encontrado em pó ou na forma líquida, sendo normalmente o resultado da mistura de óxido de ferro sintético em pó, água e agentes dispersores.

As proporções de pigmento empregadas podem variar de 1 a 10% em relação à massa de cimento, sendo comumente adotados valores entre 3 a 6 % (CARTER, 1998), dependendo da qualidade do pigmento, do tipo de pigmento e da intensidade desejada na coloração.

Segundo DOWSON (1998), o princípio de funcionamento dos pigmentos consiste em recobrir as partículas de cimento; uma vez adicionada uma quantidade de pigmento tal que tenha envolvido todas as partículas de cimento, aumentos no teor desse produto não implicaram em incremento na profundidade da cor.

Apesar destas substâncias corantes não interferirem nas reações de hidratação do cimento, elas afetam, consideravelmente, a trabalhabilidade das misturas, devido à elevada finura, refletindo nas propriedades mecânicas finais (RODRIGUES, 1984). Segundo DOWSON (1981), devido à forma das partículas dos pigmentos, diferentes cores requerem quantidades de água distintas para que seja atingida a mesma trabalhabilidade (Figura 3.1), podendo influenciar consideravelmente as resistências das peças.

Quando empregados em PCP, alguns cuidados devem ser tomados a fim de garantir a qualidade e homogeneidade dos produtos. CARTER (1998) cita que, durante o processo de produção, as condições e os procedimentos de mistura e cura afetam, sensivelmente, a aparência

final dos produtos devendo-se, preferencialmente, mantê-los fixos para que se obtenha uma maior uniformidade. Além disso, cuidados especiais devem ser tomados quanto à dosagem dos pigmentos, quantidade de água adicionada por virada e uniformidade dos materiais empregados (cimento e agregados), por exercerem influência significativa na coloração das peças.

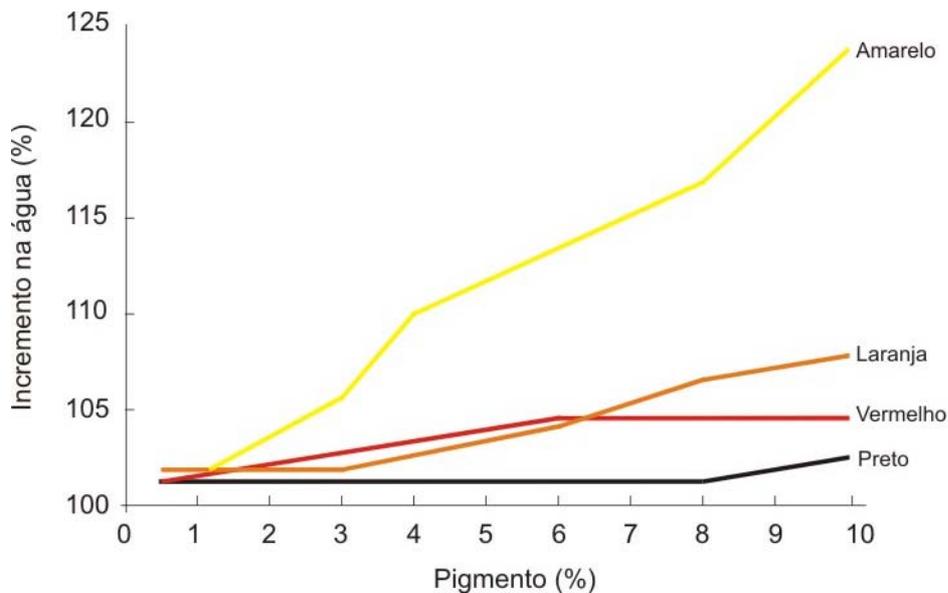


Figura 3.1 – Demanda de água para as diferentes cores (DOWSON, 1981)

3.6 – ADIÇÕES

As adições minerais, comumente empregadas na fabricação de PCP, são as cinzas volantes e as escórias de alto-forno, provenientes, respectivamente, da queima do carvão nas usinas termoelétricas e da fabricação de ferro fundido, também conhecido como ferro-gusa. São utilizados, geralmente, em substituição parcial ao cimento ou como agregados finos, a fim de proverem uma melhor trabalhabilidade e coesão às misturas. Além disso, uma das principais vantagens do uso destas adições é o efeito pozolânico, capaz de reduzir, consideravelmente, a deterioração das peças sob ação de ácidos, além de reduzir o surgimento de eflorescências. Segundo DOWSON (1998), as adições minerais apresentam suas vantagens quando empregadas na produção de artefatos de concreto, contudo deve-se cuidar, pois os referidos produtos apresentam uma variação muito alta de coloração, podendo afetar a tonalidade das peças empregadas em pavimentação, principalmente, as peças coloridas.

4 – MOLDAGEM DAS PCP

A produção das PCP envolve algumas etapas, quais sejam:

- Proporcionamento dos materiais;
- Mistura;
- Moldagem (vibro-prensagem);
- Cura das peças.

Dentre essas etapas apresentadas, uma das que exerce mais influência nas propriedades finais das peças é a etapa de moldagem (vibro-prensagem). Devido à baixa quantidade de água utilizada no concreto, a referida etapa caracteriza-se pelo emprego dos chamados equipamentos de vibro-compressão, que são conhecidos por esse nome, por causa do mecanismo empregado para compactação do material (compressão e vibração simultânea – RODRIGUES, 1995a). Para se entender melhor o funcionamento desses equipamentos e a influência dos mesmos nas propriedades finais das peças, esse capítulo é dedicado a apresentação das principais características dos equipamentos de vibro-compressão, as fases que compõem a etapa de moldagem e algumas particularidades com relação à produção de peças pré-moldadas para pavimentação com este tipo de equipamento

4.1 – EQUIPAMENTOS DE VIBRO-COMPRESSÃO

Uma máquina vibro-prensa, como é comumente chamado o equipamento de vibro-compressão, constitui-se, basicamente, das seguintes partes (Figura 4.1):

- Silo de armazenamento;
- Gaveta;
- Sistema de compressão;
- Forma (ou molde);
- Sistema de vibração.

4.1.1 – SILO DE ARMAZENAMENTO

É o compartimento localizado na parte superior do equipamento de vibro-compressão, responsável pelo armazenamento do concreto proveniente do misturador para posterior enchimento da gaveta. O volume do silo de armazenamento varia bastante, dependendo do

fabricante. Alguns desses fabricantes, como é o caso da Columbia, alegam que silos de armazenamentos muito grandes podem resultar em enchimentos diferenciados da forma durante a produção. Quando o silo de armazenamento encontra-se completamente cheio, em função do seu grande volume e, conseqüentemente, grande massa de concreto, ocorre uma maior compactação das camadas inferiores do silo (gaveta fica preenchida por uma camada de concreto mais compacta). Ao ser esvaziado, o concreto fica mais solto, resultando em uma menor quantidade de material dentro da gaveta para o enchimento da forma (ver Figura 4.3).

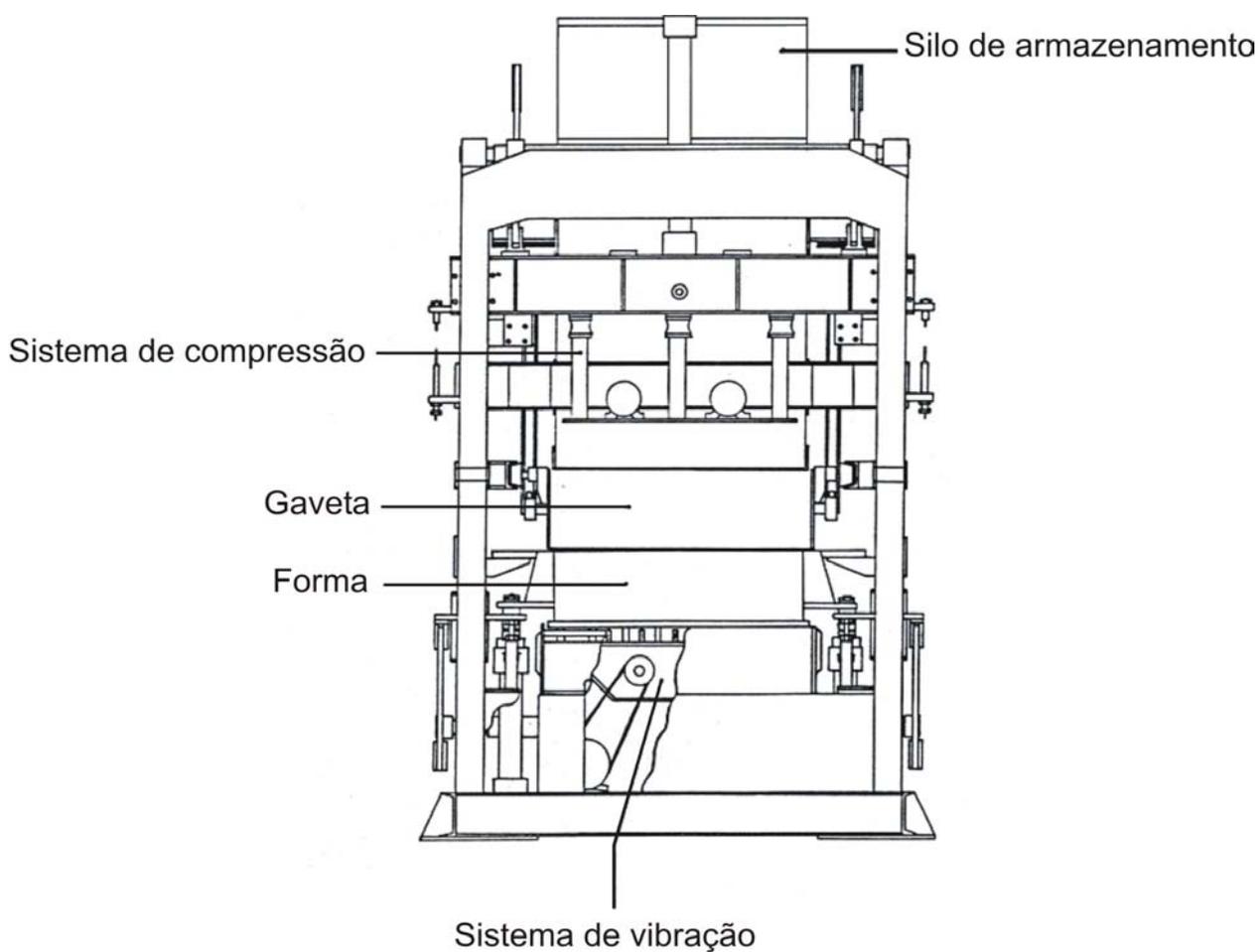


Figura 4.1 – Principais partes de uma máquina vibro-prensa

4.1.2 – GAVETA

Gaveta é o nome dado ao compartimento móvel, responsável pelo transporte de concreto do silo de armazenamento à forma, sendo constituído por duas partes principais: compartimentos do concreto e do motor (Figura 4.2).

Quando a gaveta encontra-se na posição recuada, ou seja, compartimento de concreto sob o silo de armazenamento, ocorre o enchimento deste (Figura 4.3a). Ao ser acionada, a gaveta desloca-se para cima da forma, para a sua alimentação (enchimento dos septos da forma com concreto), ficando o silo de armazenamento fechado pelo compartimento do motor (Figura 4.3b).

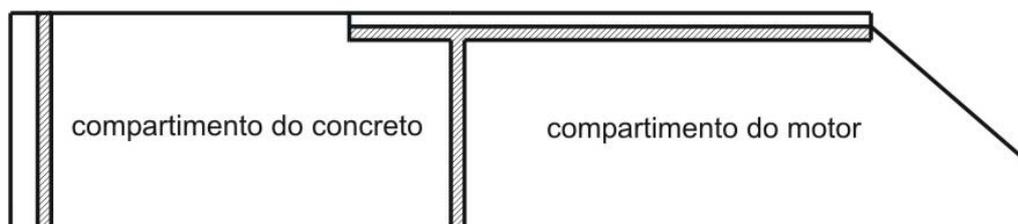


Figura 4.2 – Corte longitudinal da gaveta (detalhe dos compartimentos)

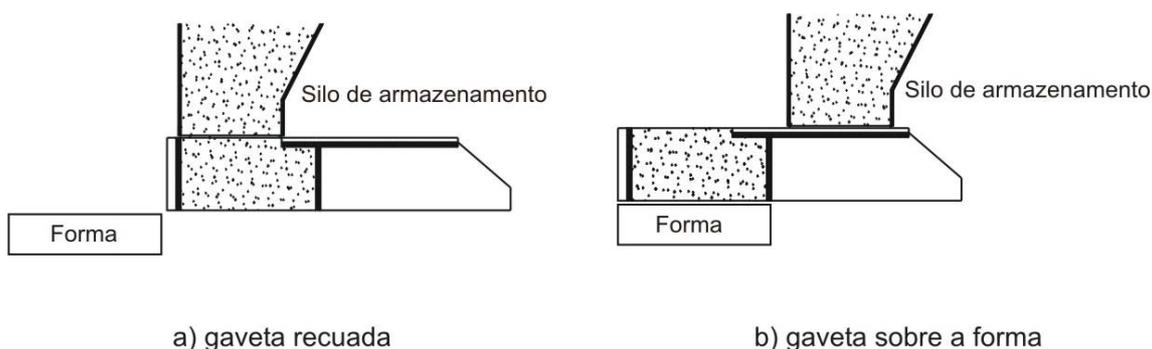


Figura 4.3 – Mecanismo de funcionamento da gaveta: a) gaveta recuada; b) gaveta sobre a forma

Além dos compartimentos mencionados anteriormente, a gaveta possui outros dispositivos essenciais à produção das peças pré-moldadas:

- Conjunto de agitadores: são barras metálicas localizadas dentro da gaveta, mais precisamente no compartimento do concreto, com a função de revolver o referido material para facilitar o enchimento da forma. Os agitadores possuem movimentos pendulares ou movimentos horizontais no sentido frente-fundo da gaveta, acionados por um motor (posicionado no compartimento do motor), através de um sistema biela-virabrequim (Figura 4.4);

- Raspador da forma: o raspador da forma consiste de uma placa de material plástico, posicionada na parte frontal inferior da gaveta, responsável pela raspagem do excesso de concreto sobre a forma, no momento do retorno da gaveta (Figura 4.5);
- Raspador das sapatas: o raspador das sapatas consiste de uma placa de borracha, posicionada na parte frontal superior da gaveta, que tem como função limpar as sapatas, no momento do retorno da gaveta (Figura 4.5).

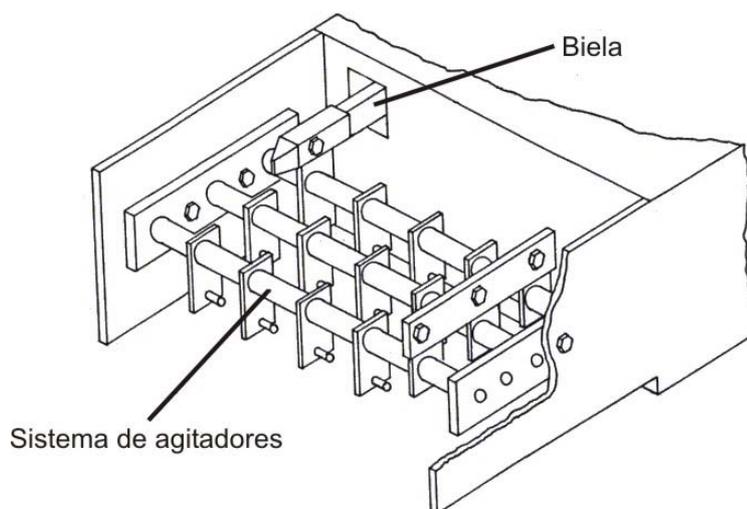


Figura 4.4 – Detalhe do conjunto de agitadores

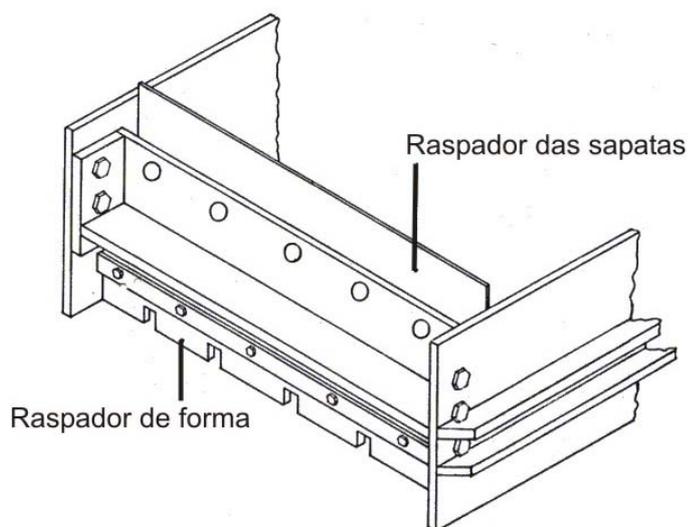


Figura 4.5 – Detalhes da parte frontal da gaveta com os raspadores de forma e das sapatas

4.1.3 – SISTEMA DE COMPRESSÃO

Como o próprio nome já diz, esse sistema é responsável pela aplicação da carga de compressão no concreto no momento da moldagem, sendo formado, normalmente, pelas sapatas, viga flutuante e pelo pistão hidráulico ou pneumático.

4.1.3.1 – Sapatas

Também chamadas de contra molde (Figura 4.6), as sapatas são a extremidade inferior do sistema de compressão, responsáveis pela transferência direta da carga da viga flutuante e eventualmente, dependendo do tipo de equipamento, da carga do pistão hidráulico ou pneumático para o concreto, durante a fase de vibro-prensagem das peças.

Normalmente, as sapatas apresentam as superfícies tratadas termicamente (tempera), ou confeccionadas com material de maior dureza, a fim de diminuir o desgaste por atrito lateral às formas. Nos equipamentos mais modernos, as sapatas são dotadas de sistemas de aquecimento, com controladores térmicos, capazes de mantê-las aquecidas a mesma temperatura durante toda a produção. Este sistema de aquecimento, evita a aderência das PCP às sapatas, reduzindo-se as constantes paradas durante a produção para limpeza das mesmas.

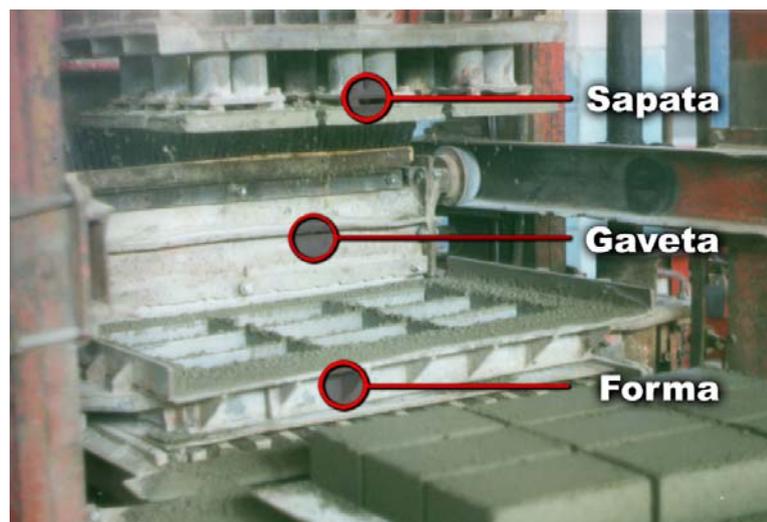


Figura 4.6 – Detalhe típico de um conjunto pente – forma para a produção de peças para pavimentação

4.1.3.2 – Viga flutuante

Em alguns tipos de equipamento, a viga flutuante é o único dispositivo responsável pela aplicação da carga em função do seu peso próprio, sendo normalmente formada por dois perfis “Us” perfeitamente solidarizados, fixados em suas extremidades às hastes laterais do equipamento de vibro-compressão (tubos verticais que servem de guia para a viga flutuante e para a forma).

4.1.3.3 – Pistão hidráulico ou pneumático

O pistão hidráulico ou pneumático é o dispositivo responsável por suspender a viga flutuante e as sapatas, sendo que em alguns equipamentos, esse pistão, auxilia na aplicação da carga de compressão sobre o concreto, aumentando consideravelmente o nível de carregamento. Para se ter uma idéia, nos equipamentos em que o esforço de compressão é função apenas da viga flutuante, o nível de carga aplicado varia entre 0,5 e 1,0 kg/cm². Já para os equipamentos onde o pistão funciona como aplicador de carga, os níveis aumentam para a casa de 2,0 a 3,0 kg/cm². Esses níveis de carga foram determinados diretamente em alguns equipamentos e junto a alguns fabricantes de máquinas vibro-prensas.

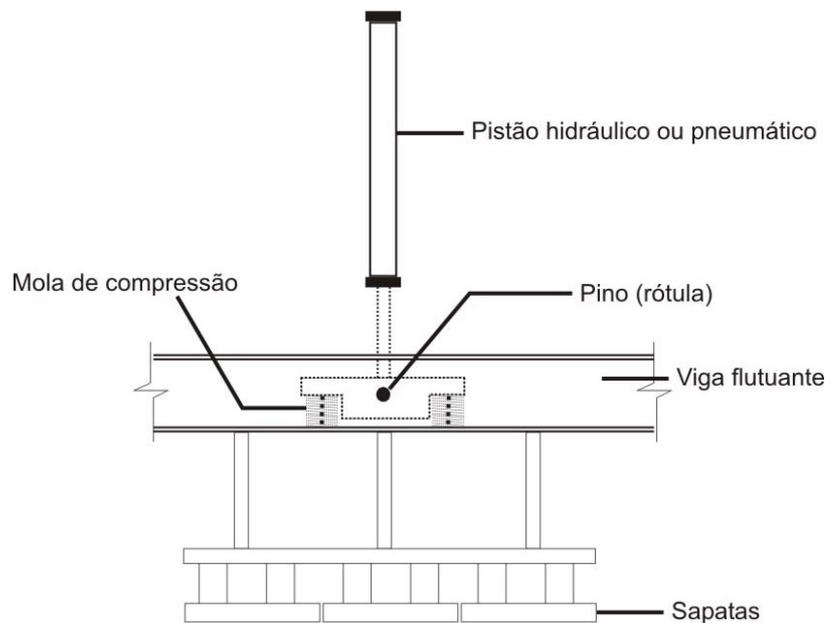


Figura 4.7 – Esquema da ligação entre o pistão e a viga flutuante (pistão atuando como aplicador de carga)

Nos equipamentos de vibro-compressão em que o pistão atua como aplicador de carga, a ligação entre o mesmo e a viga flutuante é feita, normalmente, conforme o esquema apresentado na Figura 4.7. Na extremidade do êmbolo do pistão existe um pino de aço que tem a função de trabalhar como uma rótula, a fim de se eliminar qualquer esforço residual de flexão no pistão. No contato pistão-viga flutuante são colocadas duas molas de compressão que trabalham como amortecedores, evitando que a vibração seja transmitida integralmente ao pistão.

4.1.4 – FORMA

A forma, ou também conhecida como molde, é a responsável direta pela definição geométrica e precisão dimensional das peças (Figura 4.6). Semelhante à superfície das sapatas, as paredes laterais internas da forma, normalmente, são tratadas termicamente (tempera), para aumento da dureza superficial.

O tamanho das formas é função do porte de cada equipamento de vibro-compressão, sendo que PAGE (1998) recomenda o emprego de larguras (dimensão no sentido frente-fundo do equipamento) inferiores a 50 cm, a fim de se evitar problemas de enchimentos diferenciais da forma durante a produção.

4.1.5 – VIBRAÇÃO

Dentre os componentes de uma máquina vibro-prensa, o sistema de vibração é um dos mais importantes, pois o efeito da vibração influencia diretamente a qualidade dos artefatos e a produtividade da máquina. Segundo NEVILLE (1988), a vibração fluidifica a componente argamassa da mistura, diminuindo o atrito interno e acomodando melhor os agregados.

De acordo com BRESSON (1981), basicamente os parâmetros que caracterizam a vibração são:

- Direção: É possível obter-se diferentes direções de vibração (unidirecionais vertical e horizontal, circulares no plano horizontal e vertical) alterando-se os tipos e arranjos de vibradores. Entretanto, a direção mais comumente empregada em máquinas vibro-prensas para produção de peças pré-moldadas é a unidirecional vertical, obtida através da rotação de duas massas excêntricas, sincronizadas e, em sentidos opostos, a fim de neutralizar as forças horizontais centrífugas (BRESSON, 2001).

- Frequência: A frequência de uma vibração é dada pelo número de ciclos na unidade de tempo, sendo normalmente indicada em Hertz (número de ciclos por segundo). De acordo com BRESSON (2001) e FIOLA & TARDINI (1988) as máquinas vibro-prensas sem efeito de choque trabalham com frequências variando entre 40 e 80 Hz.
- Amplitude: A amplitude de uma vibração é igual ao deslocamento máximo de um ponto em relação a sua posição média. Em se tratando de uma vibração harmônica, o deslocamento pode ser expresso como uma função senoidal do tempo, através da seguinte expressão:

$$X = X_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t) \quad (5)$$

Onde: X = Deslocamento;
 $X_{\text{máx}}$ = Deslocamento máximo (amplitude);
 f = Frequência;
 t = Tempo.

BRESSON (1993) estima um limite máximo para amplitude em vibrações verticais como sendo de 2mm, em função da necessidade de precisão dimensional na altura das peças.

- Velocidade: A velocidade de uma vibração representa a velocidade de deslocamento, não devendo ser confundida com a velocidade de rotação dos excêntricos. Em uma vibração harmônica, a velocidade é uma função senoidal do tempo, expressa pela seguinte expressão:

$$V = \frac{dX}{dt} = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}\left(2\pi f \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

Sendo que a velocidade máxima ($V_{\text{máx}}$) está ligada à frequência e à amplitude máxima, como se verifica a partir da expressão abaixo:

$$V_{\text{máx}} = 2\pi f \cdot X_{\text{máx}} \quad (7)$$

- Aceleração: Para vibrações harmônicas, a aceleração é também uma função senoidal do tempo, expressa por:

$$A = A_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \pi) \quad (8)$$

A aceleração máxima está ligada à frequência e à amplitude máxima pela expressão:

$$A_{\text{máx}} = (2\pi f)^2 \cdot X_{\text{máx}} \quad (9)$$

As curvas de deslocamento, velocidade e aceleração em função do tempo, para uma vibração harmônica, são apresentadas na Figura 4.8.

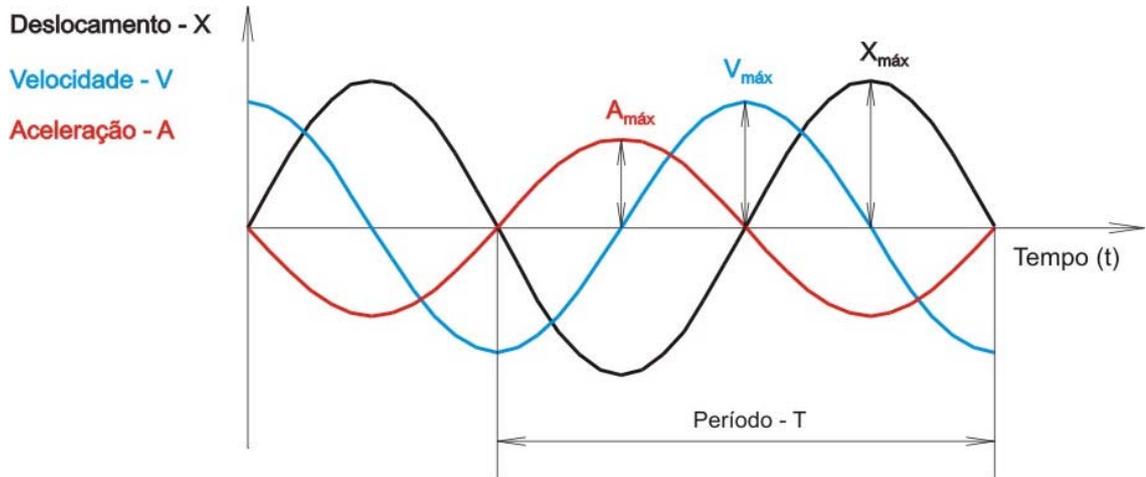


Figura 4.8 – Curvas de deslocamento, velocidade e aceleração para uma vibração harmônica

FIOLA & TARDINI (1988) apresentam um diagrama (Figura 4.9), construído a partir das expressões matemáticas vistas anteriormente, onde a parte hachurada, indica o domínio dos parâmetros empregados em máquinas vibro-prensas para produção de peças pré-moldadas (peças para pavimentação e blocos de concreto). De acordo com os referidos autores, a parte direita inferior da área hachurada representa a região dos valores ótimos para produção das peças empregadas em pavimentação, com valores de aceleração variando entre 15 a 20 vezes a aceleração da gravidade (g), frequência entre 70 a 85 Hz e amplitude entre 0,5 a 0,8 mm.

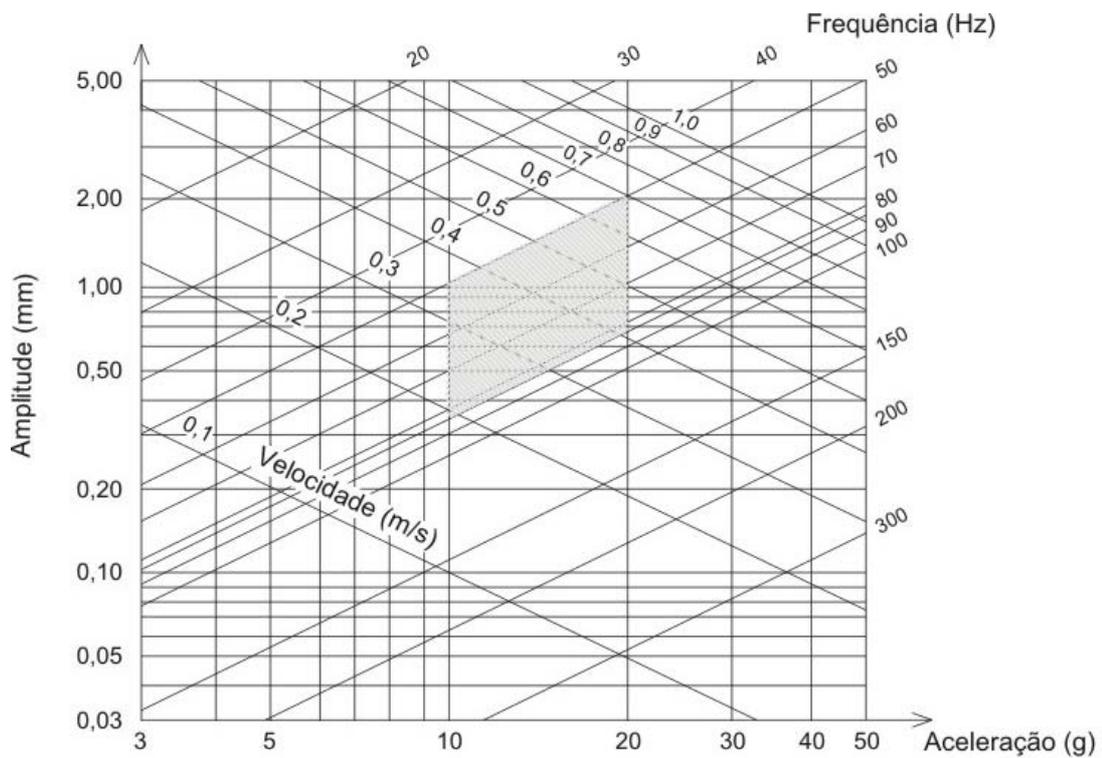


Figura 4.9 – Diagrama que correlaciona amplitude, velocidade, aceleração e frequência (FIOLA & TARDINI, 1988)

Dentro dessa área de estudo da inter-relação entre concreto e parâmetros de vibração, merece destaque o trabalho desenvolvido por BRESSON & BRUSIN (1977). Os referidos autores estudaram alguns tipos diferentes de mistura, dentre elas, uma mistura bastante similar à empregada para a produção de blocos de concreto, utilizando um vibrador eletro-magnético, para simular o efeito de vibração e um nível de carregamento de $0,04 \text{ kg/cm}^2$, para evitar a segregação dos agregados graúdos. Como conclusões mais significativas, BRESSON & BRUSIN (1977), afirmam que:

- Cada aceleração possui uma frequência ótima, onde se consegue graus de compactidade mais elevados, para um dado tempo de vibração;
- A relação entre o valor de aceleração e sua respectiva frequência ótima permanece sempre constante sendo que, para o caso das misturas empregadas na produção de blocos, essa relação girou em torno de $2,0 \text{ m/s}^2\text{Hz}$;
- Como a energia mecânica de vibração é definida como sendo:

$$E = \frac{1}{2} m \times v^2 \quad (10)$$

Onde: m = massa de vibração
 v = velocidade de vibração

Como:

$$a_{m\acute{a}x} = (2\pi f)^2 X_{m\acute{a}x} \quad (11)$$

$$v_{m\acute{a}x} = 2\pi f X_{m\acute{a}x} \quad (12)$$

Tem-se que:

$$v_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{a_{m\acute{a}x}}{f} \quad (13)$$

Dessa forma, pode-se representar a energia com sendo função da relação entre aceleração/freqüência (substituindo (4.9) em (4.6)):

$$E = \frac{m}{8\pi^2} \times \left(\frac{a_{m\acute{a}x}}{f}\right)^2 \quad (14)$$

Dessa forma, pode-se afirmar que existe uma quantidade de energia de vibração ótima para cada mistura, podendo ser satisfatório o emprego de várias combinações de freqüência e aceleração.

Apesar da grande contribuição de BRESSON & BRUSIN (1977), o trabalho desenvolvido por eles apresentou algumas deficiências em se tratando de equipamentos de vibro-compressão para a produção de peças para pavimentação:

- O nível de carga empregado não representou o carregamento aplicado por uma máquina vibro-prensa;
- As freqüências empregadas foram relativamente elevadas (50, 100, 150 e 200 Hz), com exceção da freqüência de 50 Hz, haja vista que as freqüências das máquinas vibro-prensas giram em torno de 40 a 80 Hz, conforme mencionado anteriormente;
- As amplitudes de vibração, principalmente para as freqüências de 100, 150 e 200 Hz, ficaram muito abaixo dos valores empregados nos equipamentos de vibro-compressão.

4.1.5.1 – Medição de vibração

O método mais moderno para medição de vibração é através do emprego dos acelerômetros piezelétricos. Esses transdutores possuem materiais piezelétricos em sua construção, gerando cargas elétricas quando submetidos a choques mecânicos ou vibrações (BRÜEL & KJÆR, 1978). Segundo TRICHÊS & JORDAN (2002), apresentam como principais vantagens a autogeração de carga (eliminando a necessidade de alimentação externa), robustez, grande faixa dinâmica, larga faixa de frequência de medição, tamanho reduzido, baixo peso, alta estabilidade de funcionamento e possibilidade de montagem em qualquer direção.

A carga elétrica de resposta dos acelerômetros é convertida em diferença de potencial e amplificada, através de pré-amplificadores. Esse sinal pode ser posteriormente captado por analisadores, que executam a análise digital dos sinais através da Transformada de Fourier. Essa ferramenta matemática é capaz de transformar um sinal randômico, periódico ou transitório, numa série de Fourier equivalente, que é denominada espectro de frequência (TRICHÊS & JORDAN, 2002). Esse espectro de frequência pode ser representado em forma de gráfico (Figura 4.10), normalmente em escalas lineares, onde no eixo das abscissas são colocados os valores de frequência e no eixo das ordenadas os valores de aceleração.

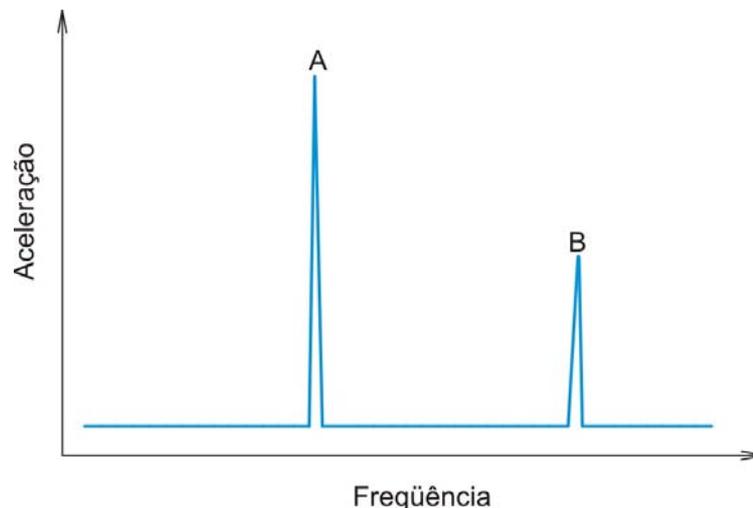


Figura 4.10 – Espectro de frequência

4.1.5.2 – Sistemas de vibração empregados em máquinas de vibro-compressão

Basicamente, os sistemas de vibrações unidirecionais verticais empregados em máquinas vibro-prensas são as mesas vibratórias e os sistemas de vibrações aplicados diretamente ao molde.

O sistema de mesa vibratória, normalmente, possui dois eixos com massas excêntricas, movidos por motores elétricos, sincronizados e girando em sentidos inversos, a fim de se eliminar o movimento no plano horizontal (Figura 4.11). Segundo HOLTHAUS (1988), os sistemas com mesa vibratória podem trabalhar com quatro eixos excêntricos (dois eixos sincronizados no sentido horário e dois eixos sincronizados no sentido anti-horário), sendo que nesses casos, os motores elétricos, responsáveis pelo giro das massas excêntricas, permanecem ligados (girando) durante toda a produção. O desbalanceamento do sistema é feito através de um inversor de frequência, que retarda e acelera os pares de eixos excêntricos, de tal forma que ora os dois pares de eixos encontram-se sincronizados e alinhados na mesma posição (mesa com amplitude máxima – Figura 4.12a), e ora os pares encontram-se sincronizados e em posições opostas (mesa parada – Figura 4.12c).

Este sistema caracteriza-se por trabalhar com efeito de choque, uma vez que a mesa vibratória golpeia a chapa de apoio das peças na parte inferior, causando o referido efeito. De acordo com BRESSON (1981), sistemas com efeito de choque podem alcançar frequências de vibração da ordem de 1500 Hz, quando em ressonância. Contudo, o sistema de vibração com mesa vibratória empregado nos equipamentos de vibro-compressão, normalmente, produz vibrações unidirecionais verticais com frequência na ordem de 50 Hz e amplitudes variando entre 1 a 2 mm.

A mesa vibratória apresenta a vantagem de empregar formas menos robustas, conseqüentemente mais leves, o que facilita a instalação. Além disso, esse sistema caracteriza-se por transmitir, uniformemente, a vibração por toda a extensão da forma. Para que o mesmo mantenha sempre uma boa eficiência na vibração, deve-se, cuidar com o estado dos coxins (amortecedores de borracha), o sentido de rotação dos excêntricos e a regulagem da mesa vibratória em relação à grade fixa onde, no estado de repouso, devem diferir em 1,5 a 2,0 mm na altura (Figura 4.11). Entretanto, devido à dificuldade de acesso à mesa vibratória, quando ocorrem problemas no motor, correias ou nos excêntricos, o tempo de parada para manutenção é longo, pois, para se ter acesso ao sistema de vibração, é necessária a remoção da forma.

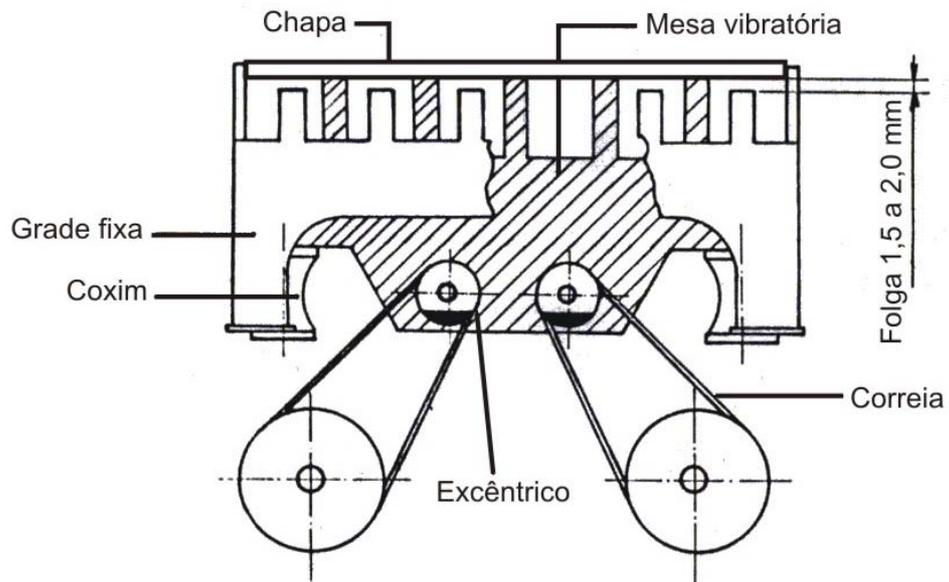


Figura 4.11 – Detalhe de um sistema de mesa vibratória

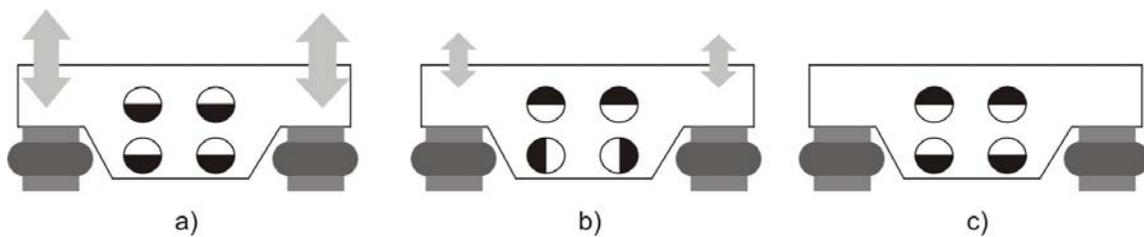


Figura 4.12 – Detalhe de funcionamento de um sistema de mesa vibratória com quatro eixos excêntricos

Os sistemas de vibração que atuam diretamente sobre as formas podem ser obtidos através de vibradores excêntricos, sincronizados, ligados diretamente às laterais das mesmas e movidos através de dois motores independentes, onde a transmissão da rotação dos motores ao eixo excêntrico é feita por polias e correias (Figura 4.13) – sistema empregado nos equipamentos da Besser; por vibradores excêntricos ligados às laterais das formas, porém, posicionados sob as mesmas (Figura 4.14); ou por sistemas tipo biela-virabrequim (Figura 4.15), onde a forma é fixada rigidamente sobre as cabeças das bielas (BRESSON, 1981), sendo sistemas característicos das máquinas Columbia.

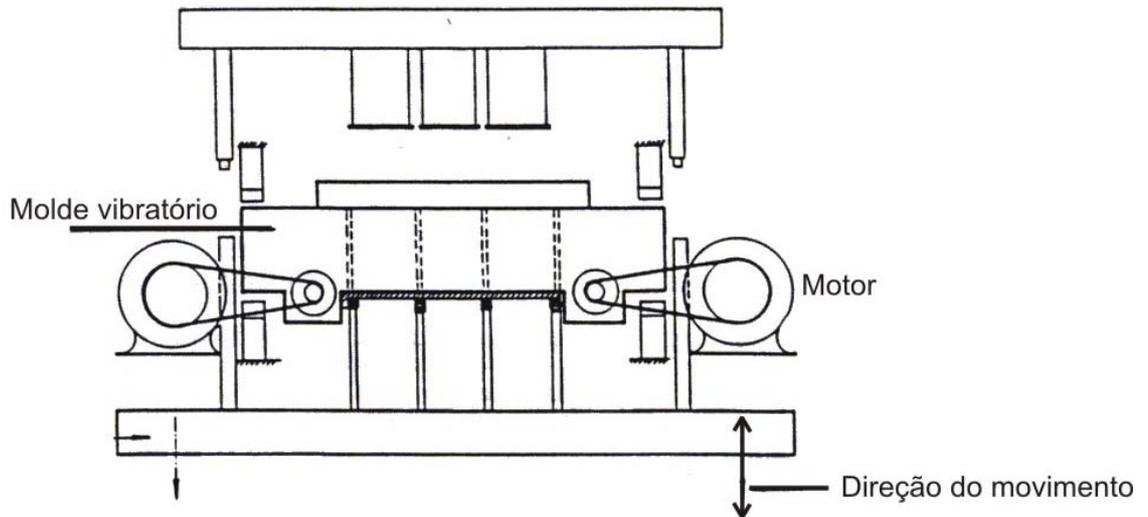


Figura 4.13 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos fixados nas laterais da forma (BRESSION, 1981)

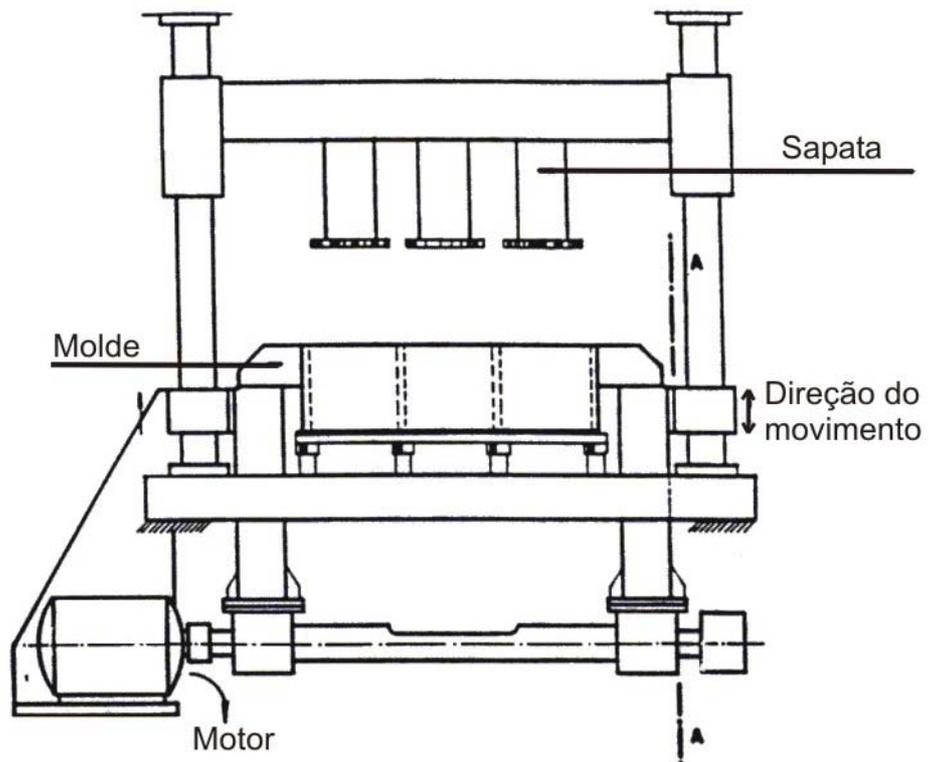


Figura 4.14 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por excêntricos sob a forma (BRESSION, 1981)

Devido à aplicação direta dos esforços e para que a vibração possa ser transmitida de forma homogênea, as formas são bastante robustas e pesadas, havendo limitações com relação ao

seu tamanho. Entretanto, esses sistemas caracterizam-se pelos baixos índices de manutenção comparados aos equipamentos com mesa vibratória.

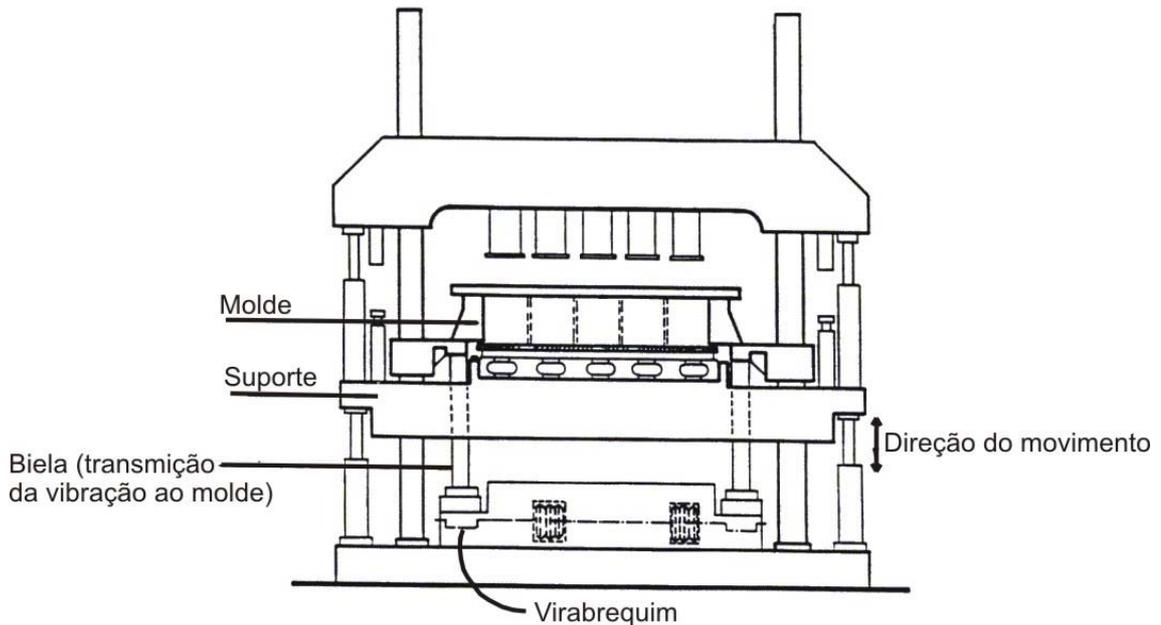


Figura 4.15 – Detalhe de um sistema de vibração produzido por biela-virabrequim (BRESSION, 1981)

4.2 – CICLO DE PRODUÇÃO DAS MÁQUINAS VIBRO-PRENSAS

Antes de entrar no ciclo de produção das máquinas vibro-prensas, é preciso entender a importância dos chamados tempos de produção de um equipamento de vibro-compressão (tempos de alimentação e vibro-compressão), quais as possíveis regulagens, suas influências na qualidade final do produto e os cuidados quando da adoção como parâmetro de controle.

- Tempo de alimentação: É o tempo em que a gaveta permanece sobre a forma, com os agitadores ligados para enchimento dos vazados, sendo acionado, simultaneamente, o sistema de vibração para facilitar o preenchimento da forma pelo concreto. Normalmente o tempo em que o sistema de vibração permanece ligado, durante a fase de alimentação, é ajustado para que a gaveta retorne com o sistema de vibração desligado, a fim de se evitar enchimentos diferenciados no sentido frente-fundo da máquina, bem como a segregação do agregado gráudo.

Deve-se ter em mente que esse tempo é o único tempo regulável de um equipamento de vibro-compressão e o principal responsável pelo grau de compacidade dos artefatos, pois, quanto

maior o tempo de alimentação, maior será a quantidade de concreto nos vazados da forma, diminuindo o volume de vazios das peças e aumentando, conseqüentemente, a resistência final das mesmas.

- Tempo de vibro-compressão: O tempo de vibro-compressão é o tempo de descida das sapatas com o sistema de vibração acionado, compreendido desde o contato das mesmas com o concreto, até que se atinja a altura final da peça. Normalmente, o tempo de vibro-compressão gira em torno de 3 a 6 segundos, sendo função exclusiva do equipamento e dos materiais utilizados, bem como do tempo de alimentação empregado.

Inúmeras fábricas utilizam o tempo de vibro-compressão como parâmetro de controle de produção. Entretanto, deve-se ressaltar que este tempo é muito susceptível a variações de umidade e granulometria dos agregados¹. O funcionário encarregado do equipamento de vibro-compressão, geralmente, reduz o tempo de alimentação, quando uma mistura apresenta uma maior dificuldade na etapa de vibro-prensagem, pois, à primeira vista, como os tempos de vibro-compressão aumentam consideravelmente, parece que há um melhor enchimento da forma. No entanto, o que ocorre é um aumento no tempo de vibro-compressão em função da maior dificuldade de compactação (elevado atrito interno).

O melhor parâmetro de controle de uma produção é, sem dúvida, o peso dos artefatos recém produzidos, devido à facilidade de determinação e à boa correlação com a resistência à compressão dos mesmos.

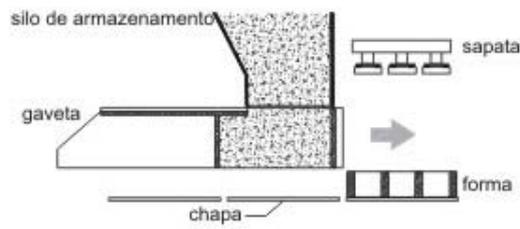
Em se tratando de produção de PCP, basicamente, o ciclo de uma máquina vibro-prensa (Figura 4.16) consiste nas seguintes fases:

- Posicionamento da forma e avanço da gaveta: O ciclo tem início com o posicionamento da forma sobre a chapa onde serão moldadas as peças e o posterior avanço da gaveta (compartimento do concreto) sobre a forma (Figura 4.16a);
- Alimentação: É a fase em que a gaveta permanece sobre a forma com os agitadores ligados, sendo acionado, simultaneamente, o sistema de vibração (Figura 4.16b). Conforme mencionado anteriormente, esta fase é de grande importância na produção das peças, pois possui uma estreita relação com a compacidade final dos produtos;

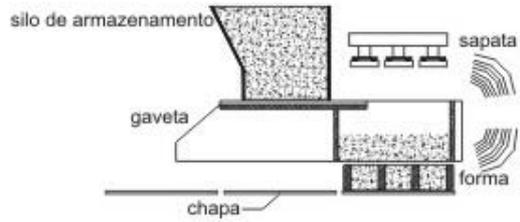
¹ As misturas podem facilmente apresentar variações na trabalhabilidade quando ocorrem mudanças na umidade e granulometria dos agregados, principalmente dos agregados miúdos, de um lote para outro, acarretando em variações no tempo de vibro-compressão.

- Recuo da gaveta: Terminada a fase de alimentação, ocorre o recuo da gaveta com o sistema de vibração desligado, sendo a gaveta, novamente, preenchida pelo silo de armazenamento do concreto (Figura 4.16c).
- Vibro-compressão: Após o recuo da gaveta, inicia a etapa de vibro-compressão. As sapatas são acionadas, juntamente com o sistema de vibração, vibro-prensando o concreto dentro da forma, até que seja atingida a altura final das peças (Figura 4.16d);
- Desforma: Atingida a altura final desejada, o sistema de vibração é desligado, ocorrendo a subida da forma juntamente com as sapatas (Figura 4.16e). Então, uma nova chapa é posicionada sob a forma, dando início a outro ciclo.

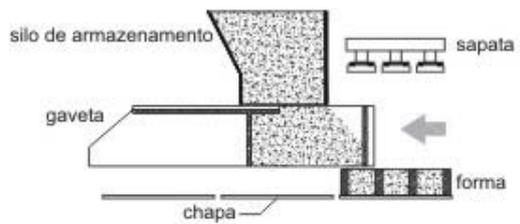
Para os equipamentos de vibro-compressão encontrados atualmente no mercado, os tempos de ciclo variam de 8 a 25 segundos, dependendo do tipo e porte do maquinário empregado. Algumas fábricas utilizam este tempo como parâmetro de controle, no entanto, cabem, aqui, as mesmas ressalvas quanto ao emprego do tempo de vibro-compressão como parâmetro de controle.



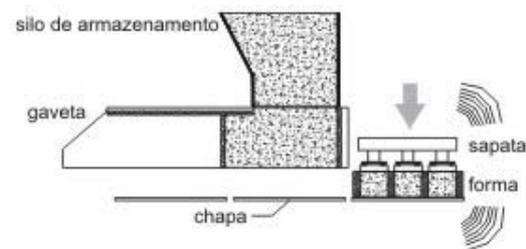
a



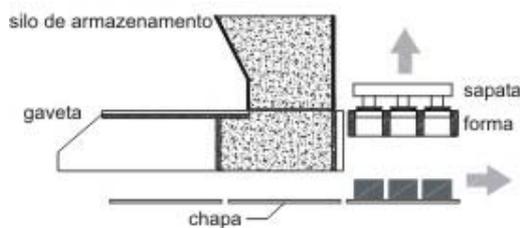
b



c



d



e

Figura 4.16 – Esquema do ciclo de produção das máquinas vibro-prensas

Alguns equipamentos de vibro-compressão são dotados de sistemas de alimentação com duas cubas e gavetas, possibilitando a moldagem de peças de dupla camada (*double-cap*). Este sistema apresenta a vantagem de produzir peças com camadas inferiores e superiores, empregando-se, respectivamente, misturas mais grossas e mais finas, resultando em peças com excelente acabamento superficial e elevada resistência à compressão (BARFOOT, 1988). Quando são produzidas peças coloridas nesses equipamentos, normalmente, emprega-se pigmento apenas na mistura fina utilizada na camada superior, diminuindo o consumo deste material e reduzindo a perda de resistência, característica comum das peças pigmentadas em função do excesso de finos.

O funcionamento destes equipamentos é semelhante às máquinas que produzem peças em apenas uma camada. Inicialmente, ocorre o posicionamento do molde sobre a chapa e a alimentação do mesmo com o avanço da gaveta contendo a mistura empregada na primeira camada (Figuras 4.17a e 4.17b). Posteriormente, ocorre o recuo da gaveta com o sistema de vibração desligado (figura 4.17c). Ao término dessa etapa existem equipamentos que realizam apenas uma pequena pré-vibração para acomodação da camada inferior, iniciando-se, posteriormente, o avanço do segundo silo (Figura 4.17d), contendo o material mais fino. Porém, existem alguns equipamentos que executam uma pequena etapa de vibro-compressão entre o recuo da gaveta com o material mais grosso e o avanço da gaveta com o material mais fino.

Quando a gaveta contendo o material mais fino encontra-se posicionada sobre o molde (Figuras 4.17e), ocorre a etapa de alimentação com a camada mais fina (segunda camada). Após o recuo da referida gaveta (Figura 4.17f), inicia-se a etapa de vibro-compressão (Figura 4.17g), até que as peças atinjam a altura desejada. Na seqüência, ocorre a desforma dos produtos (Figura 4.17h) e o posicionamento de uma nova chapa sob a forma para início de um novo ciclo (Figura 4.17i).

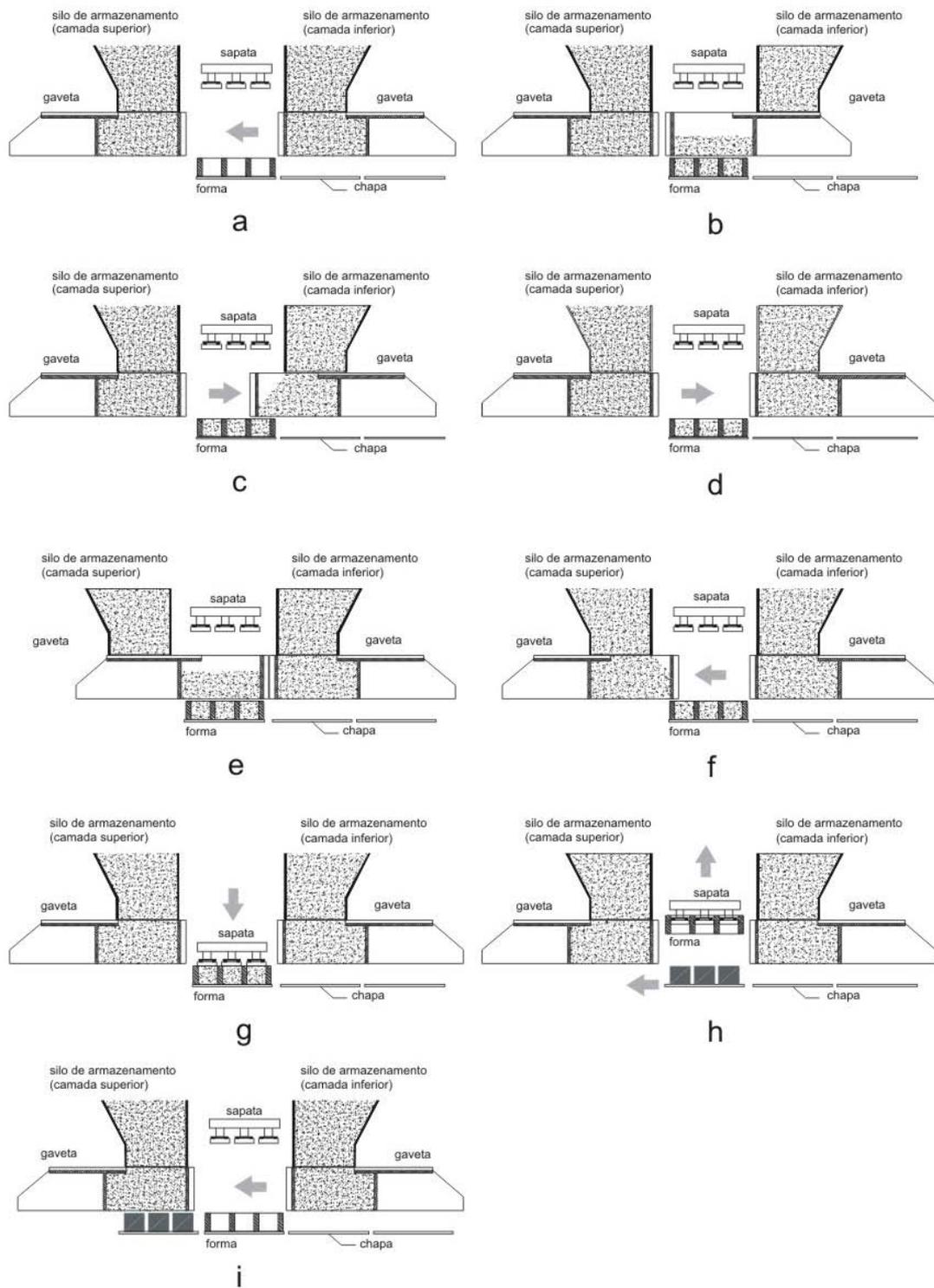


Figura 4.17 – Esquema de produção de peças com duas camadas (*double-cap*)

4.3 – PARTICULARIDADES QUANTO À PRODUÇÃO DE PCP

A seguir serão apresentadas algumas particularidades com relação à produção de PCP, de modo a obter-se artefatos com baixa variabilidade e qualidade.

4.3.1 - DISTRIBUIÇÃO DE PESOS NA CHAPA

Em função da falta de ajuste dos tempos de alimentação e regulagens adequadas da gaveta, da mesa vibratória ou da mesa de apoio das chapas, podem ocorrer variações sistemáticas de pesos das peças em uma mesma virada, podendo, em alguns casos, influenciar, significativamente, a resistência característica final dos produtos. Na Figura 4.18 é apresentado um exemplo de problema de distribuição de pesos nas chapas para um equipamento da Columbia. No quadro apresentado na referida figura, encontram-se os pesos das PCP em função da posição das mesmas na chapa, e, ao lado, é apresentado um gráfico de barras para melhor visualização das diferenças de peso.

Em algumas fábricas da região sul, onde foram implantados programas internos de qualidade, são realizados, periodicamente, controles de distribuição de pesos das peças por chapa, a fim de se efetuar as devidas regulagens e não comprometer a qualidade final do produto.

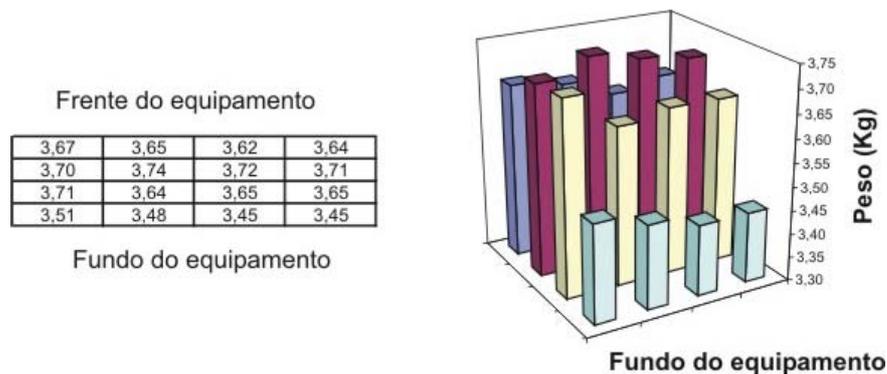


Figura 4.18 – Problema sistemático de distribuição de peso por chapa devido à má regulagem da gaveta e da mesa de apoio da chapa em uma máquina Columbia

4.3.2 – VARIAÇÕES DE PESO NO DECORRER DA PRODUÇÃO

Outro problema constante em algumas fábricas, tanto na produção de peças para pavimentação como na produção de blocos de concreto, é a questão da variação de peso no decorrer da produção. Isso se deve a alterações na umidade das misturas, em virtude da falta de

equipamentos adequados (sensores de umidade) ou de constantes variações na granulometria dos agregados, principalmente, os agregados miúdos.

Acompanhamentos feitos em algumas fábricas da região sul do país, mostraram variações de cerca de 15% em relação ao peso médio das peças. A fim de se evitar este tipo de problema, alguns fabricantes adotam, como parâmetro de controle interno de produção, o peso úmido das peças recém produzidas. Normalmente, é determinado um peso ideal ou uma faixa restrita de peso de modo a limitar a variabilidade do mesmo no decorrer da produção, bem como assegurar os níveis de resistência especificados.

4.3.3 – CUIDADOS COM A VELOCIDADE DE RECUO DA GAVETA E O RASPADOR DE PENTE

Como o concreto empregado para a produção das peças possui uma maior coesão, comparando-se com o concreto utilizado em bloco (maior consumo de cimento e maior umidade), a gaveta deve ser regulada de modo a recuar de forma lenta e com o sistema de vibração desligado. Esse cuidado evita uma má distribuição do concreto na forma, amenizando os problemas de distribuição diferencial de peso nas chapas, além de evitar acúmulos de agregado graúdo na superfície, melhorando, assim, o acabamento das peças.

4.3.4 – QUANTIDADE IDEAL DE ÁGUA DAS MISTURAS PARA A PRODUÇÃO DAS PEÇAS PARA PAVIMENTAÇÃO

Em se tratando de produção de blocos de concreto para alvenaria, alguns pesquisadores como TANGO (1994) e FERREIRA (1995), recomendam que seja adicionada a maior quantidade de água possível na mistura, desde que não prejudique a produção desses artefatos. De acordo com os referidos pesquisadores, quanto maior a quantidade de água em uma mistura, maior é o grau de compacidade alcançado, e conseqüentemente, maior é a resistência, para uma dada regulagem de equipamento. Entretanto, misturas com excesso de água tendem a resultar em blocos com problemas dimensionais, ou em alguns casos extremos, impedem a desforma dos mesmos, devido à tensão que se cria na interface molde / concreto.

Quando o assunto é a produção de peças para pavimentação, muitos afirmam que as recomendações feitas para a produção de blocos são válidas para as referidas peças (colocar a maior quantidade de água possível, desde que não prejudique a produção). Porém, uma mistura com excesso de água, quando se trata da produção dos referidos artefatos, tem como seu maior limitante, durante a fase de produção, a aderência da peça na sapata de compressão da máquina,

o que prejudica a textura final das mesmas e a produtividade desses equipamentos em função das inúmeras paradas para limpeza das sapatas. Por isso, é prática comum entre os fabricantes trabalharem com uma quantidade de água tal na mistura, que após a moldagem das peças, essas se encontrem levemente umedecidas em suas faces laterais e principalmente nas superfícies de contato com as sapatas. Na Figura 4.19 é apresentado um detalhe da superfície de uma peça para pavimentação produzida em um equipamento MONTANA – MBX975, com o teor de umidade ótimo para o referido equipamento ($H \approx 7,0\%$). Vale a pena ressaltar o detalhe das pequenas manchas de água (partes mais brilhantes) na superfície da peça mostrada nessa Figura.



Figura 4.19 – Detalhe da superfície de uma peça produzida em um equipamento de vibro-compressão MONTANA – MBX975 com um teor de umidade ótimo ($H \approx 7,0\%$)

Outra forma empregada para a verificação das condições das misturas, com relação à umidade, é o chamado “ponto de pelota” (TANGO, 1994). Esse método empírico consiste na moldagem de uma pelota com as próprias mãos, empregando-se a mistura em questão, avaliando-se, posteriormente, as condições das palmas das mãos com relação à umidade. Caso as palmas fiquem levemente umedecidas pela água do concreto, essa quantidade é tida como adequada (umidade ótima). Caso as palmas das mãos apresentem-se muito secas ou muito úmidas (sujas de cimento), deve-se, respectivamente, aumentar ou reduzir a quantidade de água da mistura.

É importante salientar que o teor de umidade ótima é função direta da mistura empregada e principalmente do tipo de máquina vibro-prensa utilizada. Máquinas com sistemas de aquecimento de sapata ou “*double-cap*”, permitem o emprego de teores de água mais elevados.

5 – MÉTODOS DE DOSAGEM PARA PCP

Basicamente, quando se dosa um concreto para a produção de peças empregadas em pavimentação, busca-se atingir os critérios de desempenho exigidos pelas normas vigentes (resistências à compressão das peças especificadas pela NBR 9781 (1987)), além de um bom acabamento superficial para o referido produto. Apesar da inexistência de prescrições normativas e métodos de ensaios para a avaliação da textura das peças, essa é um parâmetro importante na hora da dosagem, pois o cliente, de certa forma, avalia a qualidade das peças, em função do seu acabamento superficial.

Pelo fato dos critérios de desempenho estarem intimamente ligados ao tipo e regulagem do equipamento de vibro-compressão empregado e, devido à dificuldade de se avaliar as condições superficiais que as misturas proporcionarão às peças, os métodos de dosagem existentes baseiam-se em testes e ajustes excessivos nos referidos equipamentos, tornando-os demorados e onerosos.

A seguir, serão descritos os principais métodos de dosagem empregados para PCP e blocos de concreto, sugeridos por pesquisadores e por fabricantes de máquinas vibro-prensas, bem como comentários gerais apontando as principais vantagens e limitações dos mesmos. Optou-se por apresentar os métodos de dosagem mais empregados para blocos de concreto, pois, no entender do autor, as filosofias de dosagem e de produção, tanto de PCP como de blocos de concreto apresentam a mesma concepção. Além disso, no presente trabalho, aproveitou-se algumas das particularidades dos métodos de dosagem existentes para blocos de concreto para a proposição da metodologia sugerida para PCP.

5.1 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA COLUMBIA (COLUMBIA, 1986)

A presente metodologia de dosagem proposta pelo fabricante de máquinas vibro-prensas, COLUMBIA, para as PCP baseia-se, praticamente, no ajuste dos agregados graúdo e miúdo, de maneira que a mistura resultante enquadre-se em uma faixa pré-estabelecida.

Segundo o fabricante, a faixa granulométrica recomendada (Figura 5.1) provém de anos de experiência em seus próprios equipamentos, obtendo-se bons resultados quanto à trabalhabilidade, textura superficial e resistências mecânicas. Este recomenda ainda que os agregados empregados não devem apresentar alterações, principalmente quanto à granulometria, pois podem comprometer sensivelmente a qualidade final e a produtividade das peças.

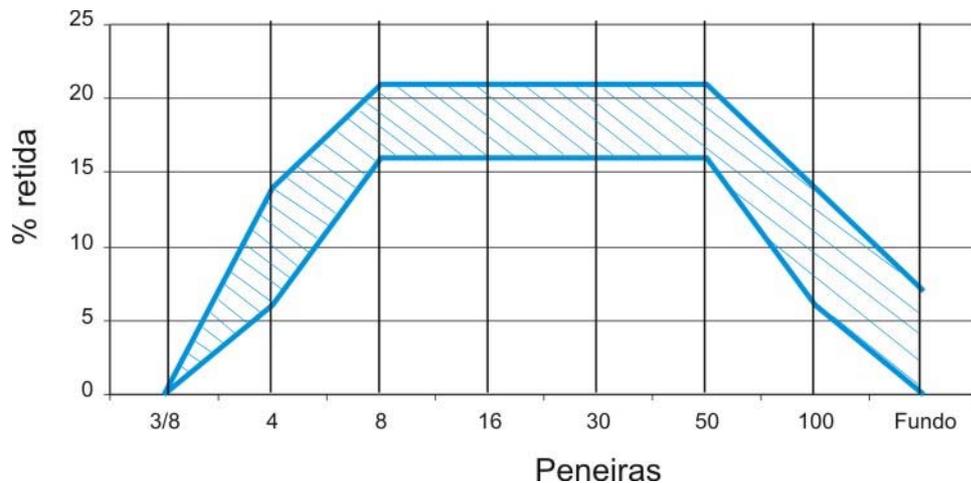


Figura 5.1 – Faixa granulométrica recomendada para produção de pavimentos pré-moldados de concreto (COLUMBIA, 1986)

Definidas as proporções entre os agregados, são feitos testes no próprio equipamento, empregando-se, inicialmente, quantidades de cimento de 14 a 15%, o que resulta em traços variando entre 1: 5,5 a 1: 6,0 (cimento: agregados). Em função dos níveis de resistência desejados e dependendo dos resultados de resistência à compressão alcançados, estas quantidades poderão sofrer alterações (reduções ou aumentos).

A quantidade de água inicial a ser empregada nos testes no próprio equipamento de vibro-compressão varia de 5,0 a 5,5 %, dependendo fundamentalmente dos agregados utilizados na produção.

5.2 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR DOWSON (1981)

DOWSON (1981) propõe uma metodologia de dosagem para PCP, semelhante à metodologia proposta pela COLUMBIA, ajustando-se as proporções entre os agregados para que a mistura aproxime-se ao máximo da curva granulométrica de referência.

Abaixo são descritas as etapas sugeridas pelo referido autor, para a determinação do proporcionamento adequado dos materiais constituintes, de modo a se obter peças com baixo custo e resistência à compressão desejada.

Definição da resistência de dosagem:

A resistência de dosagem é definida através da seguinte expressão:

$$f_{pd} = f_{pk} + 1,64 \cdot Sd \quad (15)$$

Onde: f_{pd} = Resistência média de dosagem dos pavimentos;

f_{pk} = Resistência característica especificada para o pavimento;

Sd = Desvio padrão das PCP. Quando não se dispuser de dados suficientes, DOWSON (1981) sugere a adoção dos valores encontrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de desvio padrão sugeridos em função do tipo de equipamento

| Equipamento | Desvio padrão (MPa) |
|--|---------------------|
| Máquina de compressão, baixo número de peças por ciclo | 3,5 |
| Máquina de vibração, grande número de peças por ciclo | 7,0 |

Determinação da proporção entre os agregados:

Os agregados devem ser combinados de tal maneira que a mistura resultante se aproxime, ao máximo possível da curva de referência apresentada na Figura 5.2. Esta curva granulométrica foi determinada, experimentalmente, com o auxílio do equipamento denominado “void meter”, resultando em uma composição com um menor volume de vazios. Segundo DOWSON (1981), esta curva propicia aos concretos uma boa trabalhabilidade e coesão, além de produzir peças com excelente textura superficial.

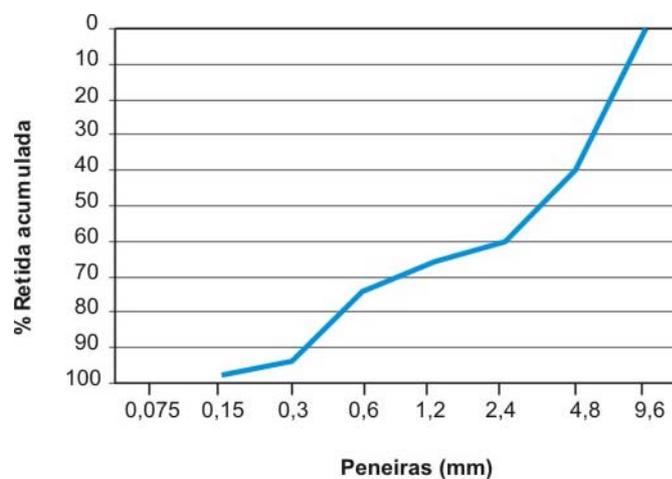


Figura 5.2 – Curva granulométrica de referência (DOWSON, 1981)

Quantidades de cimento e água a serem empregados na produção:

Deve-se testar, na máquina vibro-prensa, proporções variando entre 1: 3 a 1: 6 (cimento: agregados), definindo-se, após ensaios de resistência à compressão das peças, as devidas proporções em função dos níveis de resistência especificados.

A quantidade de água ideal a ser utilizada na produção das PCP deve ser definida no próprio equipamento, sendo, normalmente, empregados valores entre 5 a 7% em relação à massa da mistura seca.

5.3 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA BESSER COMPANY E ADAPTADO POR MEDEIROS (PFEIFFENBERGER, 1985; MEDEIROS, 1993)

O presente método de dosagem foi desenvolvido por Lucas E. Pfeiffenberger, para blocos de concreto empregados em alvenaria e adotado pelo fabricante de máquinas vibro-prensas, BESSER COMPANY. No entanto, MEDEIROS (1993), em usinas e com equipamentos nacionais, elaborou um procedimento sistemático mais adequado à situação específica dos fabricantes brasileiros.

Proporcionamento entre os agregados:

Os agregados devem ser proporcionados de tal forma que a mistura resultante enquadre-se nos limites práticos sugeridos por Pfeiffenberger, em função do tipo de bloco a ser produzido (Figura 5.3).

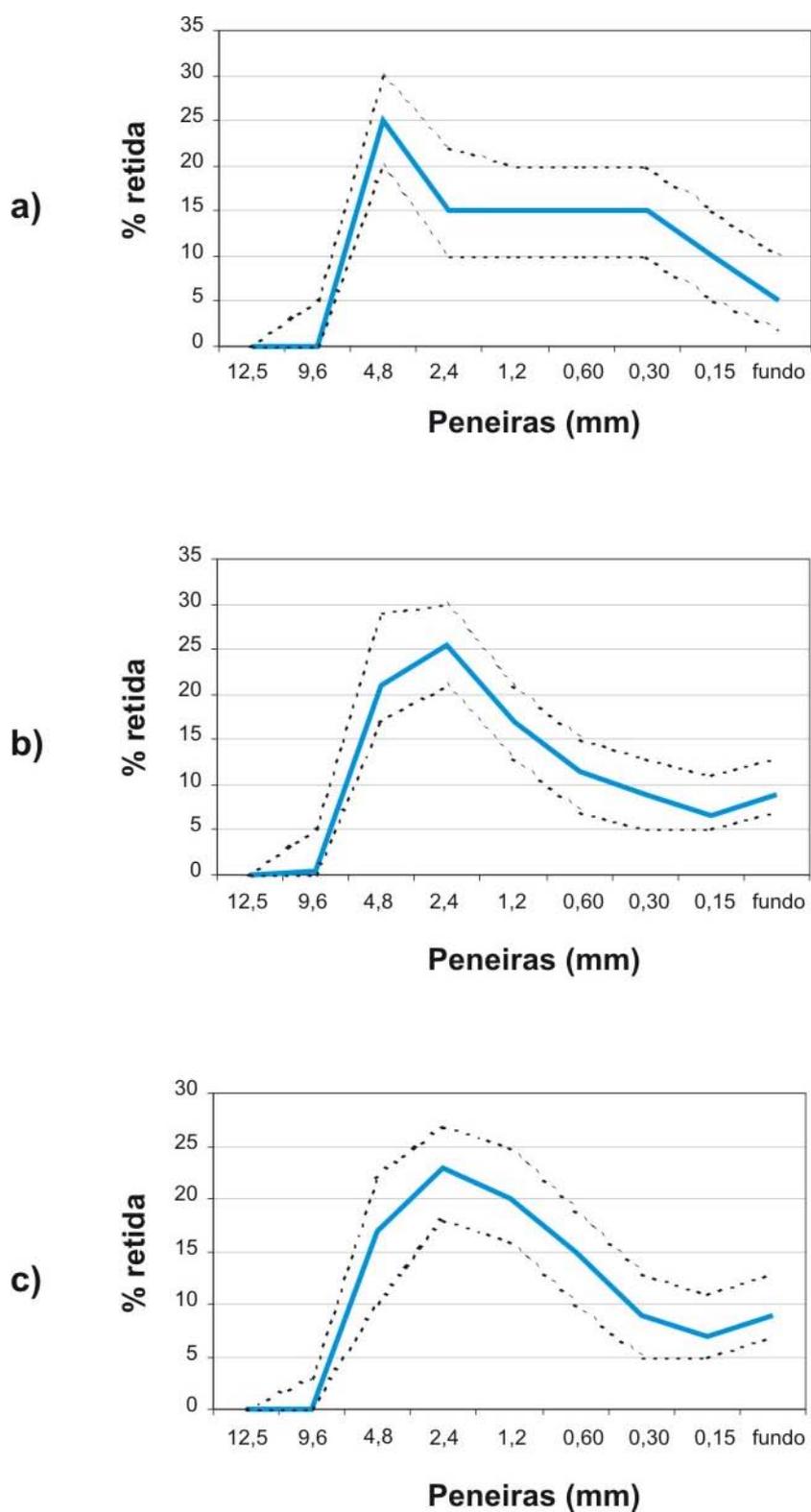


Figura 5.3 – Curva granulométrica de referência em função do tipo de bloco a ser produzido: a) bloco de densidade normal b) bloco leve c) bloco leve de textura lisa e bloco de densidade mediana (PFEIFFENBERGER, 1985)

Determinação do traço piloto:

Definidas as proporções entre os agregados, deve-se determinar o traço piloto a ser empregado no próprio equipamento, em função da resistência à compressão requerida. Na Tabela 5.2, são apresentados valores sugeridos por MEDEIROS (1993), como um primeiro indicativo do traço a ser utilizado, em função da resistência média dos blocos.

Tabela 5.2 – Traços sugeridos em função da resistência à compressão média aos 28 dias para blocos de 14,5 x 19,0 x 29,5 cm (MEDEIROS, 1993)

| Resistência à compressão média | 4,5 MPa | 6,0 MPa | 8,0 MPa | 9,0 MPa |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Traço seco | 1: 9 | 1: 8 | 1: 7 | 1: 6 |
| (cimento: | a | a | a | a |
| agregados) | 1: 12 | 1: 10 | 1: 9 | 1: 8 |

Segundo MEDEIROS, os traços propostos estão sujeitos a influências de inúmeros fatores, tais como: o tipo de máquina vibro-prensa, as características dos materiais utilizados (cimento, areia e pedrisco), o emprego de cura a vapor, entre outros.

Quantidade de água a ser empregada:

A quantidade de água utilizada na produção de blocos de concreto gira em torno de 6,0 a 7,5%, devendo ser definida na própria máquina vibro-prensa, quando da produção do traço piloto, dependendo dos materiais utilizados, do equipamento e do uso ou não de aditivos.

5.4 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO PELA ABCP (RODRIGUES, 1995a; PIOROTTI, 1989)

O método desenvolvido por Públio Pena Firme Rodrigues e publicado pela ABCP, para PCP, baseia-se na determinação das proporções ideais entre os agregados, através do ensaio de massa unitária compactada. A dosagem é executada através das três etapas consecutivas, a saber:

Determinação da melhor mistura pedrisco-areia:

Inicialmente, são feitas várias misturas contendo pedrisco e areia em proporções variadas (por exemplo, 20%, 40%, 60% e 80% de areia em massa). Para cada mistura deve-se determinar a massa unitária compactada, através do enchimento de um recipiente cilíndrico, em três camadas iguais, socadas com 25 golpes cada, empregando-se uma haste metálica, segundo especificações da NBR 7810 (ABNT, 1983).

Com base nos resultados encontrados no referido ensaio, pode-se traçar uma curva semelhante à apresentada na Figura 5.4, determinando-se o ponto ótimo entre os dois agregados (ponto da mistura que apresenta o menor volume de vazios).



Figura 5.4 – Proporcionamento pedrisco-areia para obtenção do menor volume de vazios

PIOROTTI (1989) comenta que, na hipótese de serem utilizados mais de dois agregados, este método continua sendo válido. Neste caso, o ensaio é feito primeiramente com dois agregados mais grossos; uma vez determinada a proporção ideal entre eles, realiza-se um segundo ensaio, agora entre a mistura ideal dos dois primeiros com o terceiro agregado mais fino.

Escolha da relação agregado/cimento (m):

Uma vez fixada a relação entre os agregados, deve-se determinar a relação entre as massas de agregado e cimento. Segundo RODRIGUES (1995a), a maneira mais eficiente de determinar essa relação é fazendo-se testes no próprio equipamento, produzindo-se lotes de peças com diversos consumos de cimento. O referido autor cita, ainda, que o valor do traço a ser utilizado é

função do tipo de equipamento disponível, em que máquinas com elevado grau de compactação exigirão consumos mais baixos de cimento.

Escolha do teor de umidade da mistura:

Por este método, a determinação do teor de água deve ser feita no próprio equipamento de moldagem, fabricando-se peças com teores crescentes de umidade. Quanto maior a quantidade de água, mais compactas e resistentes serão as peças. Portanto, deve-se colocar a maior quantidade de água possível, desde que após a moldagem as peças não percam a forma original ou grudem nas sapatas e nos moldes.

5.5 – MÉTODO DE DOSAGEM DO IPT/EPUSP ADAPTADO (TANGO, 1994)

Este método foi proposto por Carlos E. de S. Tango, com base no consagrado método de dosagem do IPT/EPUSP, adaptado, entretanto, para blocos de concreto produzidos em máquinas vibro-prensas. O método de dosagem resume-se, basicamente, nos seis passos descritos abaixo.

1º- PASSO – Ajuste dos agregados

A dimensão máxima característica do agregado graúdo deve ser inferior a ½ da menor espessura dos vazados da forma, salvo verificação experimental comprovando a viabilidade de outras dimensões.

Quanto ao proporcionamento ideal entre os agregados, o método prevê que o ajuste seja realizado durante a determinação do teor de argamassa, descrito no 4º passo. Este ajuste pode ser definido, ainda, através de curvas e faixas granulométricas pré-estabelecidas ou através do ensaio de massa unitária, sendo que, normalmente, os referidos métodos são empregados no momento da escolha dos fornecedores.

2º- PASSO – Estabelecimento da resistência média

A resistência média visada ou resistência de dosagem deverá enquadrar-se no seguinte critério:

$$f_{bd,j} = f_{bk,j} + k_{nt} \cdot s \quad (16)$$

Onde: $f_{bd,j}$ = Resistência média visada ou de dosagem à idade de j dias;

$f_{bk,j}$ = Resistência característica requerida à idade de j dias;

k_{nt} = Coeficiente definido na Tabela 5.3;

s = Estimativa do desvio-padrão da produção obtidos através de “n” exemplares em experiências anteriores, com resistência média dos blocos, materiais e processos empregados similares.

Tabela 5.3, – Valores de k_{nt} em função do número de exemplares (n)

| N | < 20 | 20 | 25 | 30 | 50 | > 200 |
|----------|------|------|------|------|------|-------|
| k_{nt} | * | 2,23 | 2,15 | 2,06 | 1,98 | 1,82 |

* Adotar ($k_{nt} \cdot s$) conforme Tabela 5.4 durante a primeira fase de produção.

Tabela 5.4 – Valores sugeridos para ($k_{nt} \cdot s$) durante a primeira fase de produção

| Medida dos materiais no traço | Umidade dos agregados | Controle de massa dos blocos | Controle dos tempos na betoneira | Conceito do controle | | |
|---|---|------------------------------|----------------------------------|----------------------|-------|---------|
| Todos medidos em massa. | Umidade dos agregados ⁽¹⁾ considerada nas medidas dos agregados e água. | Sim | Sim | Rigoroso | | |
| Cimento em massa ou em nº inteiro de sacos, demais materiais em volume. | Curva de inchamento ⁽²⁾ e umidade dos agregados ⁽¹⁾ consideradas nas medidas de agregados e água. | Sim | Sim | Razoável | | |
| Conceito do controle | ($k_{nt} \cdot s$) em MPa, para f_{bk} | | | | | |
| | 10 MPa | 9 MPa | 8 MPa | 7 MPa | 6 MPa | 4,5 MPa |
| Rigoroso | 3,5 | 3,2 | 2,8 | 2,4 | 2,1 | 1,6 |
| Razoável | 4,5 | 4,2 | 3,8 | 3,4 | 3,1 | 2,6 |

OBS: Ao iniciar a fabricação dos blocos, avaliar o valor de “s”, assim que possível, e passar a usar a tabela 8, recalculando-se o traço com o auxílio do diagrama de dosagem.

1 – Medida pelo menos 1 vez por período de até 4 horas de trabalho ininterrupto;

2 – Determinada para amostra representativa do fornecimento de agregado em questão.

3º- PASSO – Estimativa dos teores agregado/cimento (m)

Para a execução dos passos seguintes, é preciso definir, pelo menos, três traços de concreto, um “rico”, um “médio” e um “pobre”, com a preocupação de que a resistência média de dosagem na idade de interesse esteja dentro do campo de variação das resistências obtidas com esses traços.

Na tabela 5.5 são apresentados valores de “m”, como sugestão inicial.

Tabela 5.5 – Sugestões de faixas de teores de agregado/cimento (m)

| $f_{bd,28}$ (MPa) | M_{b15} | m_{rico} | $m_{médio}$ | m_{pobre} | Relação mínima A_{liq}/A_{bruta} |
|-------------------|-----------|------------|-------------|-------------|---------------------------------------|
| 5,0 | 12,6 | 6,6 | 8,6 | 10,6 | 0,50 |
| 7,0 | 13,4 | 5,6 | 7,6 | 9,6 | 0,50 |
| 9,0 | 14,0 | 4,6 | 6,6 | 8,6 | 0,50 |
| 11,0 | 14,5 | 4,1 | 6,1 | 8,1 | 0,50 |
| 13,0 | 15,1 | 3,5 | 5,5 | 7,5 | 0,50 |
| 15,0 | 15,6 | 3,0 | 5,0 | 7,0 | 0,50 |
| 17,0* | 16,2* | 3,0* | 5,0* | 7,0* | 0,56 |
| 19,0* | 16,8* | 3,0* | 5,0* | 7,0* | 0,63 |
| 21,0* | 17,4* | 3,0* | 5,0* | 7,0* | 0,70 |

$f_{bd,28}$ = Resistência de dosagem ou resistência média visada aos 28 dias;

M_{b15} = Massa média esperada para cada bloco M_{15} ;

m = Teor de argamassa/cimento;

A_{liq} = Área líquida da seção transversal do bloco (sem contar os vazios);

A_{bruta} = Área bruta da seção transversal do bloco (incluindo os vazios);

* Indica necessidade provável aumento na relação A_{liq}/A_{bruta} ou uso de equipamento de elevada capacidade de compactação.

4º- PASSO – Determinação da proporção de argamassa (α) e da umidade ótima ($h_{ót}$)

Empregando-se o traço médio, devem ser confeccionados blocos de concreto, no próprio equipamento, variando-se o teor de argamassa seco (α). O teor de argamassa ideal será aquele que apresentar no estado fresco:

- Bom aspecto superficial;
- Massa unitária elevada;
- Trabalhabilidade.

A quantidade de água de cada mistura experimental deve ser a maior possível, suficiente para que as peças não se desmanchem pela falta de coesão, e não muito elevada, a ponto de dificultar a desforma por aderência do concreto aos moldes ou perda do formato. Normalmente, a quantidade de água ideal ou umidade ótima ($h_{ót}$) é aquela que permite moldar-se uma pelota de concreto com as mãos, sem que essa se desmanche (falta de água) ou suje excessivamente as mãos (excesso de água); esse ponto é comumente chamado de “ponto de pelota”.

5º- PASSO – Confeção das misturas experimentais

De posse dos elementos numéricos necessários, os traços rico, médio e pobre podem ser devidamente confeccionados empregando-se:

- Teor de argamassa seco ideal (α) definido no 4º passo;
- Teores de agregado/cimento definidos no 3º passo;

- Umidade ótima próxima ao valor definido no 4º passo, sendo que, de preferência, deve-se determinar a umidade ideal de cada um dos traços experimentais a serem produzidos.

6º - PASSO – Traçado e emprego do diagrama de dosagem

Com os resultados de resistência à compressão das peças confeccionadas no passo anterior, pode-se traçar o diagrama de dosagem adaptado (Figura 5.5) para determinação dos traços desejados em função das resistências características, ou determiná-los, empregando-se o método de mínimos quadrados, através das seguintes expressões genéricas:

$$f_{cb} = \frac{k_1}{k_2^x} \quad (17)$$

$$m = k_3 + k_4 \cdot x \quad (18)$$

$$c_c = \frac{1}{(k_5 + k_6 \cdot m)} \quad (19)$$

$$c_c = \frac{1}{(k_7 + k_8 \cdot \log(f_{cb}))} \quad (20)$$

Onde: k_1 a k_8 = Constantes inferidas a partir dos resultados experimentais;

m = Relação agregado/cimento;

x = Relação água/cimento;

f_{cb} = Resistência média dos blocos.

Pode-se calcular ou determinar graficamente o valor de “ m ” e de “ x ” necessários para a obtenção de qualquer resistência, dentro do campo pesquisado, e, a partir do teor de argamassa (α), definir o traço a ser utilizado.

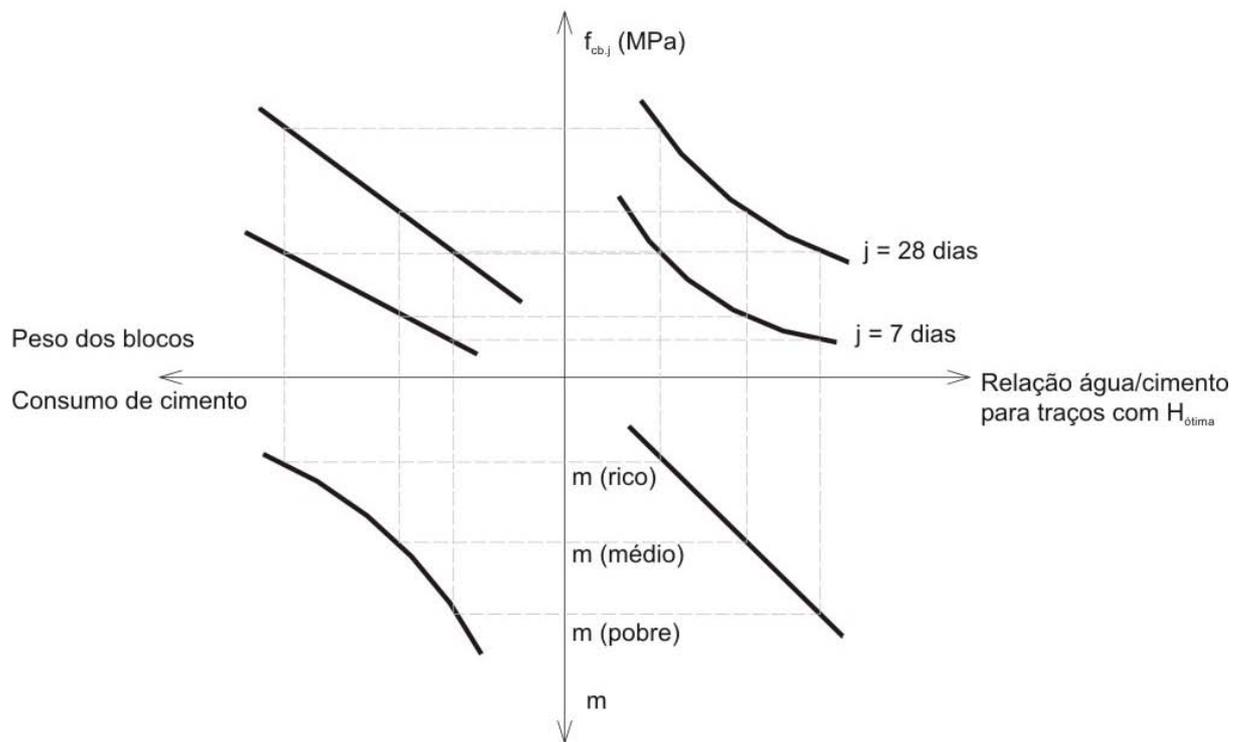


Figura 5.5 – Diagrama de dosagem IPT adaptado para peças estruturais de concreto

5.6 – MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR FRASSON (2000)

FRASSON (2000) propõe uma metodologia de dosagem para blocos de concreto com base na moldagem, em laboratório, de corpos-de-prova cilíndricos 5 x 10 cm, buscando-se alcançar a mesma massa específica (volume de vazios) dos blocos moldados no próprio equipamento de vibro-compressão. Segundo o referido autor, através destes corpos-de-prova, consegue-se prever, com boa segurança, características importantes como coesão, textura superficial e, até mesmo, resistência à compressão.

A seguir, serão descritos os procedimentos básicos para aplicação da referida metodologia.

Proporcionamento entre os agregados:

O agregado miúdo a ser empregado ou o proporcionamento entre agregados miúdos deve apresentar um módulo de finura entre 2,20 a 2,80 e uma percentagem passante na peneira 0,3 mm em torno de 25 a 35%, para obter uma coesão adequada à produção.

As proporções entre agregados graúdo e miúdo são definidas por tentativas, mediante a moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm, empregando-se um traço médio (1: 9), avaliando-se as características superficiais dos corpos-de-prova e determinado-se seus respectivos valores de coesão, segundo o ensaio proposto por FRASSON (2000). Geralmente, as proporções entre agregados encontram-se por volta de 20 a 40% de agregado graúdo para 80 a 60% de agregado miúdo, dependendo dos materiais empregados, das características superficiais exigidas pelo mercado e do tipo de equipamento de vibro-compressão empregado.

Moldagem dos corpos-de-prova empregando-se traços com diferentes consumos de cimento:

Após a determinação do proporcionamento entre os agregados, deve-se definir uma umidade média a ser empregada (entre 6 e 7%) na moldagem dos corpos-de-prova. Estes são moldados em quatro camadas equivalentes, em um molde tripartido de 5 x 13 cm, empregando-se 20 golpes por camada com auxílio de um martelo de borracha, de modo que a altura fique em torno de 10,3 cm. O acabamento e compactação final dos corpos-de-prova, para que os mesmos alcancem a altura de 10 cm, é feito através de um tarugo de nylon, comprimido por golpes empregando-se um martelo de borracha. O valor da massa dos corpos-de-prova, segundo o método proposto, é definido antecipadamente para que, após a compactação, consiga-se um concreto com uma dada massa específica.

A fim de se abranger a faixa de resistência comumente empregada para blocos de concreto (4,5 a 12 MPa), a metodologia preconiza que sejam moldados 4 corpos-de-prova para três massas específicas distintas, compreendidas entre 1,9 a 2,25 Kg/m³, e nas proporções de 1:7, 1:9 e 1:11 (cimento: agregados), resultando em um total de 36 corpos-de-prova.

Cura dos corpos-de-prova:

A cura dos corpos-de-prova pode ser executada juntamente com os blocos (câmara de cura), quando o estudo de dosagem for realizado na própria fábrica, ou em caixas de isopor, para evitar a perda excessiva de umidade, o que comprometeria a hidratação do cimento. Após 24 horas, os corpos-de-prova são retirados para identificação e devidamente armazenados (cura ao ar) até o momento do ensaio.

Estimativa da resistência média dos blocos em função da resistência característica:

Quando não se dispuser de valores de coeficiente de variação para a fábrica em questão, FRASSON (2000) propôs alguns coeficientes, apresentados na Tabela 5.6, em função do tipo de proporcionamento (massa, vazão ou volume), dos equipamentos disponíveis, do controle do processo produtivo e da experiência do pessoal encarregado da produção.

Tabela 5.6 – Condição e tipo de controle a ser avaliado para encontrar o provável coeficiente de variação de uma fábrica

| Tipo de controle / equipamento no produção | Condição (valores de coeficiente de variação %) | | |
|--|---|-------|------|
| | Bom | Médio | Ruim |
| 1 - Controle do processo e pessoal treinado | 5 | 15 | 25 |
| 2 – Equipamentos: máquinas vibro-prensas e sensores de umidade | 5 | 15 | 25 |
| 3 – Dosagem em massa | 5 | 10 | 15 |
| 4 – Dosagem em volume | 10 | 15 | 20 |

Definidos os valores de cada item apresentado na Tabela 5.6, é feita uma média aritmética para determinação do coeficiente de variação a ser aplicado na expressão abaixo:

$$F_{bm} = F_{bk} / (1 - 1,65.CV) \quad (21)$$

Onde: F_{bm} = Resistência média dos blocos na idade de interesse (considerando a área bruta);
 F_{bk} = Resistência característica na idade de interesse;
 CV = Coeficiente de variação.

Determinação do traço a ser empregado:

Com os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm, são traçadas curvas de resistência em função das massas específicas, para cada proporção empregada (1:7, 1:9 e 1:11), conforme apresentado na Figura 5.6.

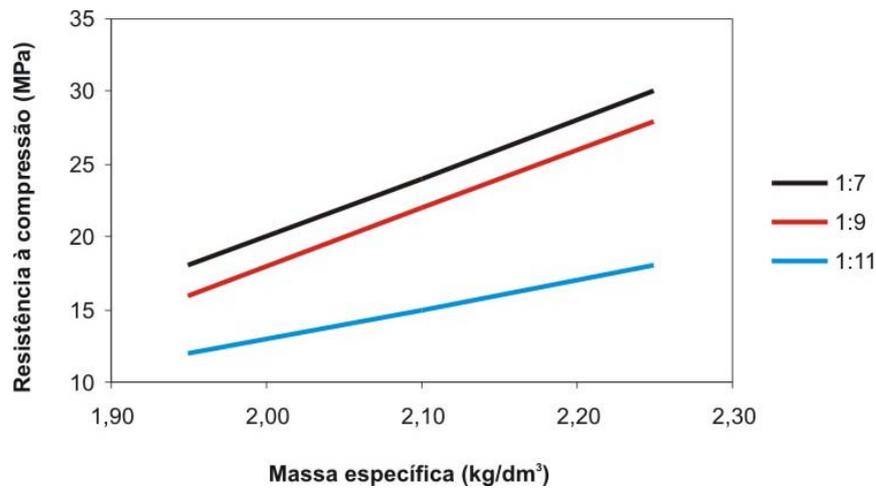


Figura 5.6 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos (5 x 10 cm) x peso específico no estado verde para as diferentes proporções empregadas

Determinando-se a massa específica, alcançada para os blocos de concreto no próprio equipamento de vibro-compressão, e com auxílio das curvas de resistência x massa específica referidas anteriormente (Figura 5.6), consegue-se definir o nível de resistência dos corpos-de-prova cilíndricos (5 x 10 cm). Com a resistência dos corpos-de-prova cilíndricos, consegue-se prever a resistência média dos blocos através da seguinte expressão:

$$F_{bm} = \frac{f_{cp}}{\beta} \cdot \frac{A_{liq.}}{A_{brut.}} \quad (22)$$

Onde: f_{cp} = Resistência média dos corpos-de-prova cilíndricos 5 x 10 cm;
 $A_{liq.}$ = Área líquida dos blocos;
 $A_{brut.}$ = Área bruta dos blocos;
 β = Coeficiente de proporcionalidade = 0,8 para blocos de 14x19x39 cm.

Em função da resistência característica desejada e, conseqüentemente, da resistência média definida anteriormente, define-se o traço a ser empregado em escala real de produção, avaliando-se, posteriormente, a resistência à compressão real dos blocos para eventuais ajustes.

5.7 – COMENTÁRIOS SOBRE OS MÉTODOS DE DOSAGEM

- **Métodos propostos pela COLUMBIA, por DOWSON e pela BESSER COMPANY:**

Estes métodos apresentam-se sob forma bastante simples de utilização, necessitando, basicamente, das curvas granulométricas dos agregados empregados, para o proporcionamento ideal entre os mesmos. Entretanto, este enfoque de ajuste, em função de curvas ou faixas granulométricas pré-estabelecidas, nem sempre é viável de ser aplicado.

Os referidos métodos necessitam de agregados com granulometrias específicas, de modo que a composição entre os mesmos, ajuste-se, o mais próximo possível, dos padrões recomendados. Porém, em alguns casos, quando não se dispõem destes agregados e a região carece de uma diversidade dos mesmos, principalmente miúdos, não há como compor misturas que se enquadrem ou aproximem-se das curvas e faixas pré-estabelecidas.

Nenhuma destas curvas de referência levam em consideração a forma dos grãos, sendo que agregados graúdos lamelares e agregados miúdos com formato irregular (areias artificiais) podem resultar em misturas perfeitamente adequadas às faixas recomendadas. Entretanto, os concretos produzidos com esses materiais tornam-se bastante ásperos, dificultando a compactação das peças e, muitas vezes, resultando em texturas superficiais fora dos padrões desejados.

Outro fator importante que se tem constatado é que cada mercado possui uma exigência específica quanto ao acabamento das PCP, principalmente em relação à textura e à uniformidade da superfície. Um exemplo claro disso é o que ocorre no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. No primeiro estado, os clientes exigem uma textura mais fina e bem uniforme, enquanto que em Santa Catarina uma textura média, é facilmente aceita. Este fato, muitas vezes inviabiliza a aplicação de curvas e faixas pré-estabelecidas, devido a uma exigência de mercado, característica particular de cada região.

- **Métodos propostos pela ABCP:**

O ajuste entre os agregados, proposto por este método de dosagem, é relativamente fácil e prático de ser aplicado, resultando em misturas com uma máxima compacidade. Porém, em

alguns casos, as misturas resultantes nem sempre apresentam uma boa trabalhabilidade, dificultando ou até mesmo inviabilizando a produção dos artefatos.

Pelo fato do referido método não levar em consideração a granulometria e a forma dos agregados, muitas vezes, as misturas não propiciam às peças uma textura superficial adequada, sendo necessário ajustes de proporcionamento dos agregados durante a própria produção.

Outro caso onde a metodologia torna-se falha é quando se emprega um terceiro agregado para suprir a deficiência de finos da mistura. Em trabalhos de dosagem já realizados em fábricas de Santa Catarina, quando houve a necessidade de se utilizar uma areia fina ($MF \approx 0,9$), o ensaio de massa unitária conduziu a um consumo excessivo desse material para obtenção do menor volume de vazios. Nestes estudos, o consumo de agregado miúdo foi reduzido em função do grande incremento de finos à mistura, que poderia interferir de forma negativa nas resistências finais devido ao aumento da superfície específica da mistura.

- **Métodos do IPT/EPUSP adaptado:**

O método do IPT/EPUSP adaptado apresenta algumas particularidades interessantes, como a fixação de um teor de água ótimo ($H_{ót}$) para o traçado de uma curva prática de resistência em função da relação água/cimento e a correlação entre os pesos e as resistências dos blocos.

Segundo FRASSON (2000), com base em valores experimentais, correlacionando peso dos blocos e suas respectivas resistências, incrementos de peso na ordem de 10%, podem aumentar as resistências em cerca de 20 a 60%. Isso mostra a importância de se analisar e estudar mais a fundo esse parâmetro (peso dos artefatos), que é função não só da qualidade e proporcionamento ideal entre os agregados, mas da regulagem e capacidade do equipamento de vibro-compressão.

Apesar do método proposto por TANGO (1994) dar um grande passo quanto a esse enfoque, a referida metodologia não faz nenhum tipo de comentário ou recomendação sobre como os fatores relacionados aos equipamentos e regulagens dos mesmos podem influenciar no incremento de peso dos produtos e, conseqüentemente, nas resistências finais alcançadas.

Outro fato que diz respeito não somente ao método de dosagem do IPT/EPUSP adaptado, mas a todos os métodos descritos anteriormente, é que dependem, fundamentalmente, de testes e

ajustes no próprio equipamento de vibro-compressão, o que torna a metodologia, muitas vezes, demorada e onerosa.

Quando uma fábrica de PCP está em fase de implantação e as metodologias referidas anteriormente são aplicadas, os resultados, quanto à resistência à compressão, só serão avaliados 28 dias após a moldagem das peças. Em se tratando de máquinas modernas, com capacidade de produção diária de 20.000 a 30.000 peças, num período de 28 dias, serão produzidas, aproximadamente, 700.000 PCP, sem a garantia de que as resistências estarão dentro dos limites prescritos pela NBR 9781 (ABNT, 1987), ou com um proporcionamento econômica. No caso de fábricas já implantadas, que resolvem fazer novos estudos de dosagem devido à troca de fornecedores ou a mudanças no próprio equipamento, o problema se torna maior, pois paradas para testes no próprio equipamento implicam custos para a empresa além de atrasos na sua produção e entrega.

- **Método proposto por Frasson (2000)**

Devido aos inúmeros problemas com relação aos métodos de dosagem, expostos anteriormente, FRASSON (2000) propõe uma metodologia para blocos de concreto inovadora, possibilitando prever uma série de características antecipadamente, reduzindo, consideravelmente, o tempo de realização do estudo de dosagem na própria fábrica.

Para que essa metodologia seja também aplicada em PCP para pavimentação, são necessários alguns ajustes, principalmente com relação às especificações dos agregados miúdos, traços empregados e correlação entre as resistências dos corpos-de-prova e dos blocos produzidos no equipamento de vibro-compressão.

Agregados miúdos:

FRASSON (2000) recomenda que o agregado miúdo empregado ou a composição resultante de dois ou mais agregados miúdos apresente uma percentagem passante na peneira 0,3 mm entre 25 e 35%, para que a mistura possua uma certa coesão, evitando quebras excessivas após a moldagem dos blocos e transporte dos mesmos até a câmara de cura. Entretanto, em se tratando de peças para pavimentação, essa quantidade de finos não é necessária, pois se trabalha com traços muito mais ricos, onde o cimento realiza esse papel e o formato das peças (baixa altura em relação ao comprimento e largura) possibilita o emprego de misturas com menor coesão. Em se tratando de produção de peças para pavimentação, os agregados empregados devem apresentar uma granulometria tal que facilite a moldagem das peças, de modo a produzi-las com alta

compacidade, em função dos níveis de resistência especificados. Por isso, acredita-se que uma curva ou faixa granulométrica ideal empregada na produção de blocos de concreto pode não ser ideal para a produção de pavimentos.

Traços recomendados:

A metodologia proposta sugere que sejam empregados traços nas proporções 1:7, 1:9 e 1:11 (cimento: agregados). Porém, em peças para pavimentação, devido ao nível de resistência especificado pela NBR 9781 (ABNT, 1987), os traços empregados apresentam consumos de cimento muito mais elevados, variando entre 1:3 a 1:7, em função dos níveis de resistência desejados e do equipamento de vibro-compressão disponível.

Correlação entre resistências à compressão dos corpos-de-prova e dos blocos:

Segundo FRASSON (2000), a relação entre as resistências à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos e dos blocos de 14x19x39 cm na área líquida gira em torno de 0,8. No caso particular das peças para pavimentação, essa correlação pode diferir consideravelmente, pois as dimensões das peças comparadas com a dos blocos e a maneira como é realizado o ensaio de resistência à compressão dos pavimentos são bastante distintas.

FRASSON (2000) empregou, em seus estudos, corpos-de-prova 5 x 10 cm por aproximarem-se das dimensões encontradas nos blocos ($\approx 3,0$ cm de espessura). Como as peças empregadas em pavimentação são maciças, com alturas variando de 6 a 10 cm e larguras entre 10 e 14 cm, acredita-se haver a necessidade de utilizar-se corpos-de-prova com dimensões mais representativas (próximo das dimensões das PCP), a fim de reproduzir, com mais fidelidade, condições como: perda de água com o tempo e mecanismos de ruptura.

Além dos fatores mencionados acima, a moldagem dos corpos-de-prova constante na referida metodologia, depende muito do operador e da sua experiência. Se não forem tomados os devidos cuidados, os corpos-de-prova poderão apresentar falhas na parte inferior durante a moldagem, influenciando, significativamente, nos resultados de resistência à compressão e, conseqüentemente, acarretando em erros grosseiros na determinação do traço ideal em função do nível de resistência especificado.

Cabe ressaltar que nenhuma das metodologias existentes, tanto para PCP como para blocos de concreto consideram a energia dispendida na moldagem como parâmetro de dosagem, ou de qualificação de agregados e proporcionamento entre os mesmos.

6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo de um estudo de dosagem para PCP é encontrar um proporcionamento econômico entre os materiais constituintes que resulte em um concreto adequado ao tipo de máquina vibro-prensa disponível e que a interação entre os mesmos (equipamento e concreto), propicie às peças qualidade, produtividade e resistência à compressão dentro das especificações normativas vigentes. Através da revisão bibliográfica apresentada anteriormente, no Capítulo 5, pôde-se perceber que, com exceção do método proposto por FRASSON (2000), os métodos de dosagem existentes, tanto para PCP, como para blocos de concreto são bastante incipientes, baseando-se em testes e ajustes excessivos nos equipamentos de vibro-compressão. Além disso, todos os métodos apresentados, não dispõem de procedimentos capazes de avaliar, direta ou indiretamente, a facilidade ou a velocidade de produção das peças, quando do emprego de diferentes tipos de agregados e misturas. Se uma metodologia de dosagem buscasse encontrar, além de um proporcionamento econômico, misturas ou agregados que demandassem um menor tempo de vibro-prensagem para a produção das PCP, poder-se-ia aumentar consideravelmente a produtividade da fábrica, diminuindo-se o tempo de vibro-prensagem, obtendo-se um retorno muito mais significativo do que a simples redução do consumo de cimento.

Para a proposição de uma metodologia de dosagem funcional para PCP, que demandasse poucos testes no próprio equipamento de vibro-compressão e levasse em consideração esse conceito de produtividade, houve a necessidade de se desenvolver equipamentos e procedimentos capazes de avaliar antecipadamente, em laboratório, o desempenho das peças (resistência à compressão e textura), bem como medir a facilidade de compactação das misturas. Para tal, o programa experimental do presente trabalho foi focado em alguns pontos específicos, que no entender do autor, eram de suma importância em se tratando de dosagem de PCP, quais sejam:

- Avaliação, numérica e experimentalmente, da influência do efeito de confinamento lateral das peças, quando submetidas ao ensaio de resistência à compressão prescrito pela NBR 9780 (1987);
- Desenvolvimento de um equipamento para moldagem de corpos-de-prova a serem empregados em uma eventual metodologia de dosagem, com o intuito de amenizar a influência do operador e que fosse capaz de avaliar,

quantitativamente, a facilidade de compactação das misturas (energia necessária para moldagem dos corpos-de-prova);

- Correlação entre as resistências à compressão obtidas nos corpos-de-prova moldados em laboratório e as peças pré-moldadas de diferentes formatos disponíveis na região sul do país;
- Avaliação da influência do teor de água na resistência à compressão e na compactabilidade de diferentes misturas, através de corpos-de-prova moldados em laboratório, com o intuito de se propor uma metodologia para determinação da quantidade ideal de água a ser empregada na produção;
- Desenvolvimento de um equipamento capaz de simular o efeito de vibro-compressão das máquinas vibro-prensas a fim de se avaliar, em laboratório, a influência de diferentes parâmetros de equipamento e misturas nas etapas de vibro-compressão e nas resistências à compressão das peças;
- Proposição de uma metodologia para a avaliação das condições superficiais das peças (textura) que não sofra influência do operador, bem como desenvolvimento de um procedimento laboratorial que simule a textura superficial das peças quando produzidas no próprio equipamento de vibro-compressão.

Para que os objetivos específicos mencionados acima fossem atingidos e, que o resultado final do trabalho culminasse em uma proposta de metodologia de dosagem experimental para as PCP, o programa experimental foi dividido em cinco etapas seqüenciais, descritas a seguir. Cabe salientar que a estrutura do programa experimental foi apresentada de forma diferente das estruturas convencionais de dissertações de mestrado e teses de doutorado de modo a facilitar o entendimento dos leitores, pois, conforme mencionado anteriormente, o presente programa, abrangeu pontos bem específicos e distintos.

1ª Etapa: foram feitos estudos para a validação do método de ensaio proposto pela NBR 9780 (1987). Uma vez que a resistência á compressão é o principal parâmetro de dosagem e, como a determinação dessa propriedade através do referido método (ensaio de punção dupla), levanta a questão da influência da largura das peças nos resultados de resistência à compressão, foram feitas avaliações numéricas, empregando-se o método de elementos finitos, e um estudo

experimental para avaliação de diferentes larguras nos resultados obtidos quando da aplicação do método preconizado pela NBR 9780 (1987);

2ª Etapa: definiu-se um formato de corpo-de-prova que fosse mais condizente para a previsão da resistência à compressão das PCP, ao invés de se adotar o formato utilizado por Frasson (2000). Além disso, foi proposto um equipamento para moldagem dos corpos-de-prova que eliminasse a influência do operador, no momento da moldagem e possibilitasse a determinação da quantidade de energia necessária para a compactação dos corpos-de-prova. Dentro dessa segunda parte do programa experimental foram feitos alguns estudos para a determinação da correlação entre a resistência das PCP (NBR 9780, 1987) e do corpo-de-prova proposto, e para a proposição de uma metodologia que possibilitasse a definição da quantidade ideal de água de uma mistura;

3ª Etapa: como os estudos desenvolvidos na segunda etapa não levaram em consideração o efeito da vibração, quando da moldagem dos corpos-de-prova, houve a necessidade de se avaliar a influência da vibração na compactabilidade das misturas e nas resistências à compressão das peças. Para tal, foi desenvolvido um equipamento protótipo de vibro-compressão, capaz de simular o efeito vibratório das máquinas vibro-prensas e que permitisse variar os parâmetros de vibração (frequência e amplitude) e o nível de carregamento de compressão;

4ª Etapa: foi desenvolvido um estudo para avaliar a correlação entre os tempos de vibro-compressão de uma máquina vibro-prensa real com a energia de compactação despendida para a moldagem dos corpos-de-prova e o tempo de vibro-compressão necessário para a moldagem das peças no equipamento protótipo;

5ª Etapa: em função da falta de uma metodologia para avaliação quantitativa da textura das PCP, foi proposto, nessa etapa do trabalho, um método que se baseia no emprego do desvio padrão do histograma de frequências de imagens em tons de cinza.

Por último, no item 6.6 é apresentada uma proposta de metodologia de dosagem para as PCP, com base nos resultados obtidos no referido programa experimental. Além da proposta de metodologia de dosagem, dentro dessa última parte, é apresentado um exemplo ilustrativo empregando-se o referido método.

6.1 – AVALIAÇÃO DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PRESCRITO PELA NBR 9780 (1987) PARAS AS PCP

6.1.1 – AVALIAÇÃO NUMÉRICA EMPREGANDO-SE O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

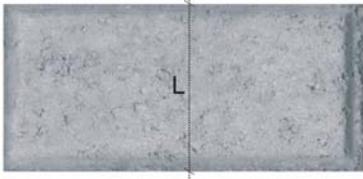
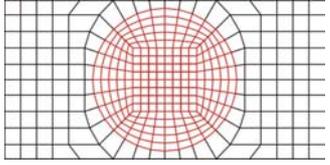
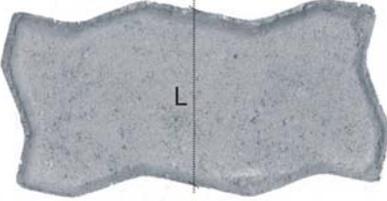
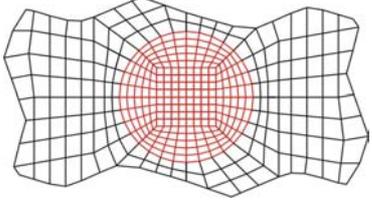
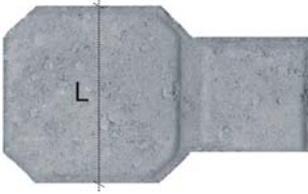
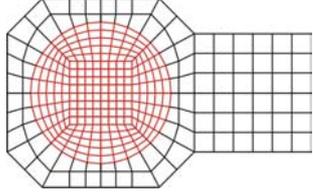
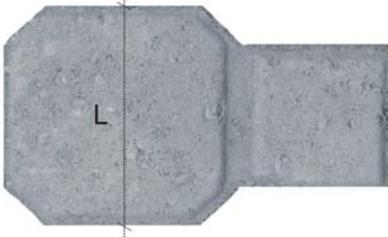
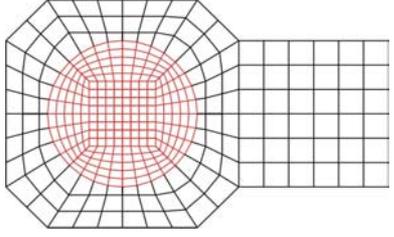
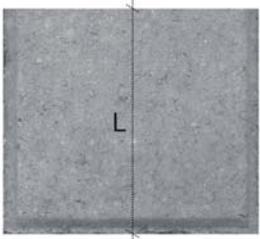
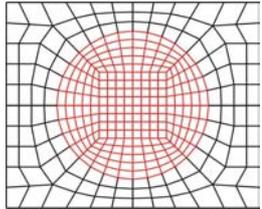
Conforme citado anteriormente, a determinação da resistência à compressão das PCP pelo método preconizado pela NBR 9780 (1987) – (compressão por punção dupla), levanta algumas questões quanto à influência da altura e, principalmente, da largura das peças nos resultados de resistência (TUCKER, 1945; LANGENDONCK, 1952; RODRIGUES, 1982). Acredita-se que, quando as peças são carregadas parcialmente, as áreas não carregadas que circundam a pastilha de aplicação de carga, exercem um esforço de confinamento na região central da peça, majorando-se os resultados de resistência. Devido a isso, a referida norma recomenda que peças com larguras superiores a 140 mm sejam cortadas de modo que a nova largura não exceda esse limite. Essa prescrição foi adotada em função de uma série de pesquisas desenvolvidas pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) em 1982 (RODRIGUES, 1986). Contudo, a faixa de largura recomendada pela norma, resulta em espessuras excedentes à largura da pastilha de carregamento (90mm) variando entre 5 a 25 mm, o que representa uma faixa relativamente ampla.

Em função disso, nesta parte inicial do trabalho, foi feita uma avaliação da influência da forma das peças nos níveis de tensões gerados nas mesmas, através de análises numéricas no regime elástico-linear, empregando-se o método de elementos finitos. Estas análises numéricas foram realizadas através do Programa SAP 2000, para as diferentes formas de peças encontradas no mercado da Grande Florianópolis com alturas de 60 e 80 mm. Cabe ressaltar que não foram estudadas aqui as peças com 100 mm de altura por não serem fornecidas por nenhum fabricante da região.

Para a modelagem das PCP, empregou-se o elemento sólido hexaédrico de 8 nós (24 graus de liberdade por elemento, sendo três graus de liberdade por nó - translação em x, y e z). Primeiramente as malhas foram geradas com o auxílio do programa AutoCad, para a determinação das coordenadas cartesianas dos nós, em relação a um ponto definido como zero/zero (origem). Durante essa fase foi feito um estudo de malhas, sendo que as mesmas foram definidas de forma a evitar descontinuidades significativas nas tensões entre os elementos adjacentes (LA ROVERE, 2001). Procurou-se também, manter uma relação entre a menor e a maior dimensão de cada elemento inferior a 1/3, para que não houvesse distorções de

cisalhamento parasita no elemento que pudessem gerar problemas na análise numérica. Na Tabela 6.1 são apresentados as formas das peças e os detalhes das malhas empregadas nas análises numéricas. É importante salientar que juntamente com as peças foram modeladas as pastilhas de aplicação de carga (pastilhas de aço) com diâmetro de 90 mm e altura de 35 mm.

Tabela 6.1 – Detalhe das formas das peças encontradas no mercado da Grande Florianópolis e estudadas neste trabalho

| Identificação | Altura / Largura (L) (mm) | Forma da peça | Malha empregada na análise numérica |
|----------------------|---------------------------------|--|---|
| PAV1-60 PAV1-80 | 60/100 80/100 |  |  |
| PAV2-60 PAV2-80 | 60/115 80/115 |  |  |
| PAV3-60 PAV3-80 | 60/120 80/120 |  |  |
| PAV4-60 PAV4-80 | 60/140 80/140 |  |  |
| PAV5-80 ² | 80/125 |  |  |

OBS: Os detalhes centrais em vermelho nos esquemas das malhas das peças indicam a posição da pastilha circular de aplicação de carga (ϕ 90 mm).

1 – O PAV4-60 possui a mesma forma que o PAV3-60, porém as dimensões são maiores;

2 – O PAV5-80 é proveniente do corte de uma peça retangular de 150 x 250 mm, em virtude das prescrições normativas da NBR 9780 (1987)

As condições de contorno dos apoios adotadas na presente análise foram as seguintes:

- Superfície da pastilha de aço superior em contato com o prato da prensa (Figura 6.1a): Todos os nós dessa superfície foram considerados completamente restringidos nas três direções (x, y e z);
- Superfície da pastilha de aço inferior em contato com a mesa da prensa (Figura 6.1a): Todos os nós dessa superfície foram considerados completamente restringidos nas direções x e y, possibilitando deslocamentos apenas na direção z.

Essas condições de contorno foram adotadas para tentar representar o mais fielmente possível o efeito de confinamento dos pratos da prensa e o mecanismo de aplicação de carga da prensa utilizada neste trabalho (Shimadzu modelo UH-2000KNA), onde a mesa inferior desloca-se aplicando a carga de baixo para cima.

Cabe ressaltar que a discretização da pastilha foi feita com o intuito de tentar simular a condição real de ensaio na interface pastilha / PCP. Caso a pastilha não fosse discretizada, não se saberia ao certo quais restrições de deslocamentos deveriam ser empregadas nessa interface (restrição completa ou existência de algum deslocamento no plano dependendo do atrito).

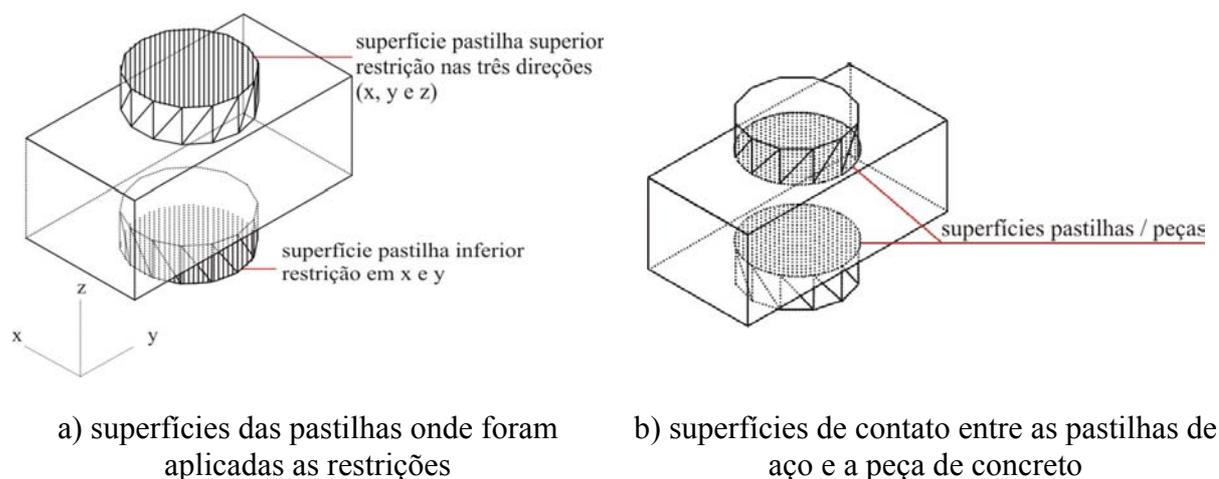


Figura 6.1 – a) superfícies das pastilhas onde foram aplicadas as restrições; b) superfícies de contato entre as pastilhas de aço e a peça de concreto

As propriedades dos materiais empregadas nas análises numéricas foram as seguintes:

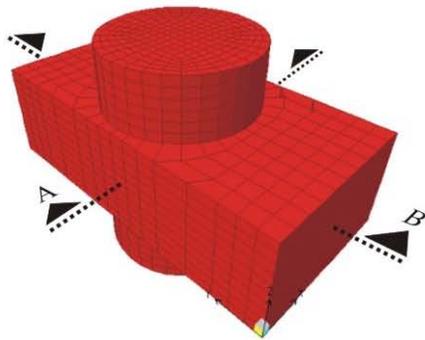
- Aço: $\nu = 0,3$
 $E = 20.10^4 \text{ MPa}$
- Concreto: $\nu = 0,2$
E: considerando uma resistência característica de 35 MPa e adotando-se a expressão prescrita pela NBR 6118 (2003), tem-se:
$$E = 0,85 \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (23)$$

$$E = 4760 \times \sqrt{35} = 28160 \text{ MPa} \Rightarrow E_{\text{adotado}} = 3.10^4 \text{ MPa}$$

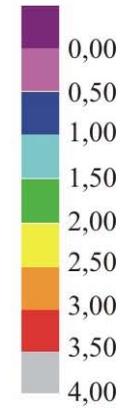
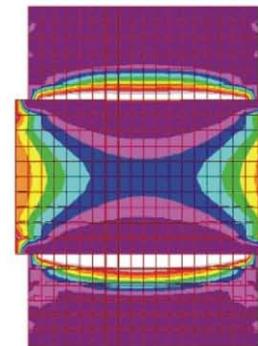
Para garantir uma análise no regime elástico linear, utilizou-se uma carga de aproximadamente 30% da carga de ruptura. Admitindo-se que um lote com $F_{pk} = 35 \text{ MPa}$ possui uma resistência média de aproximadamente 43 MPa, obtém-se:

$$\begin{aligned} 30\% \text{ da tensão de ruptura} &= 0,3 \cdot 43 = 12,9 \text{ MPa} \\ \text{tensão adotada na análise para aplicação da carga} &= 15 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Nas Figuras 6.2 a 6.10 são apresentados os resultados numéricos encontrados na presente análise. Em cada figura é apresentado um detalhe da malha gerada no programa SAP 2000 e dois cortes, um transversal (corte – A) e outro longitudinal (corte – B) mostrando as tensões principais máximas (de tração) encontradas.

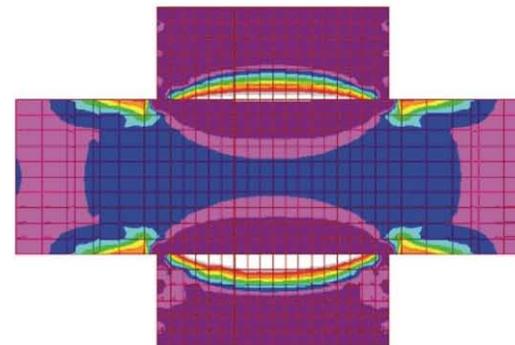


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



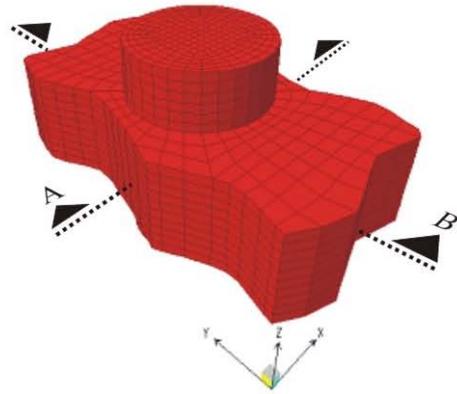
b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV1-60

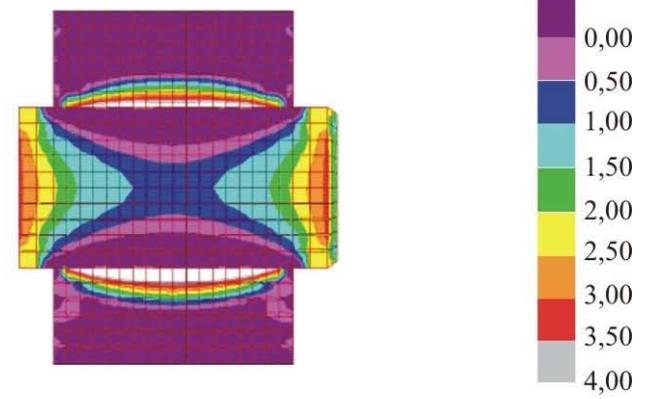


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.2 – Resultados da análise numérica PAV1-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

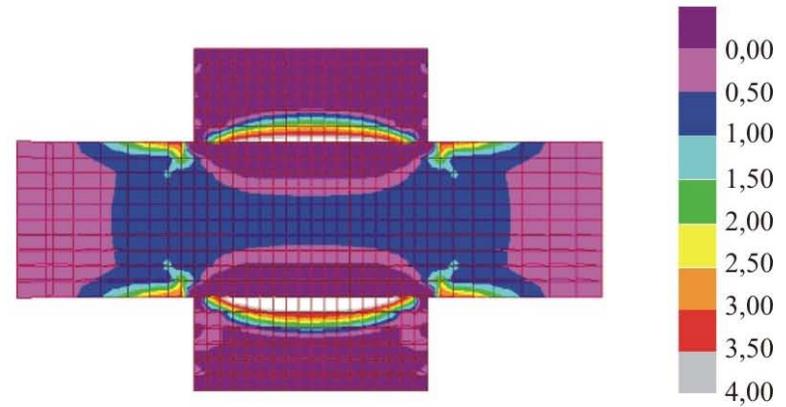


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



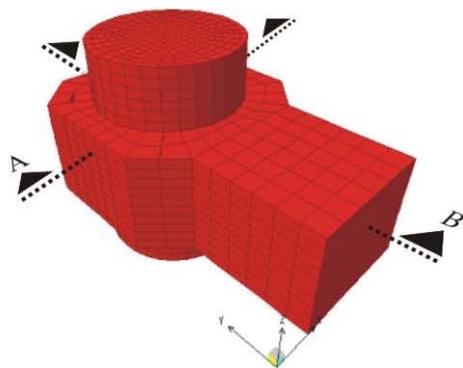
b) tensões principais máximas (Mpa) - corte A

PAV2-60

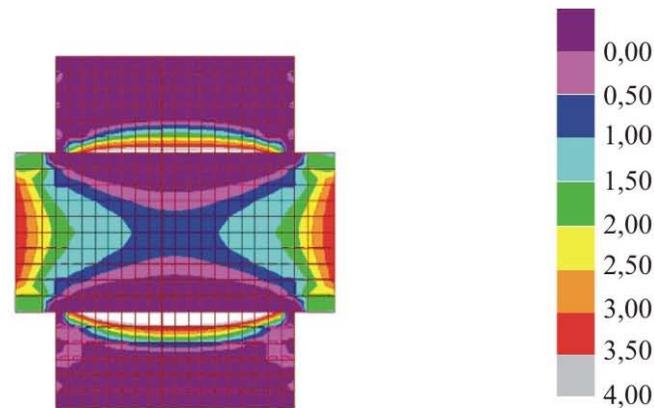


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.3 – Resultados da análise numérica PAV2-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

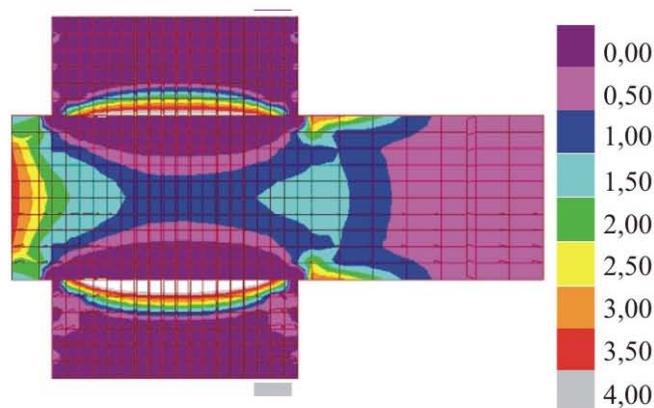


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



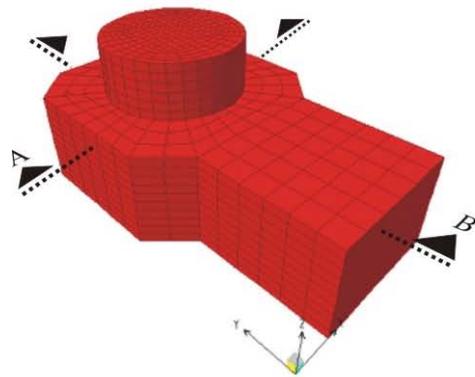
b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV3-60

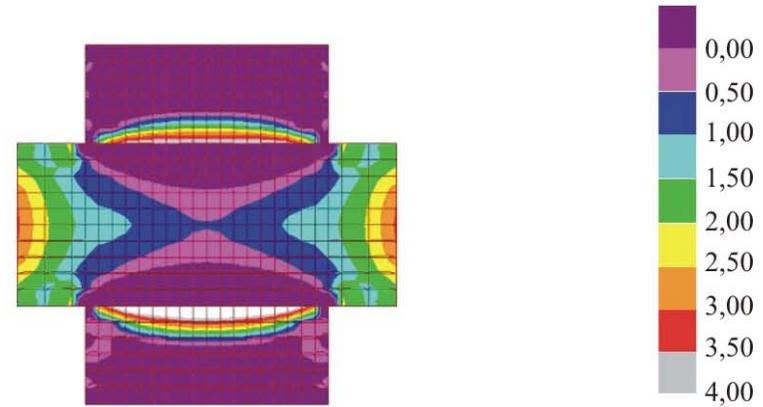


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.4 – Resultados da análise numérica PAV3-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

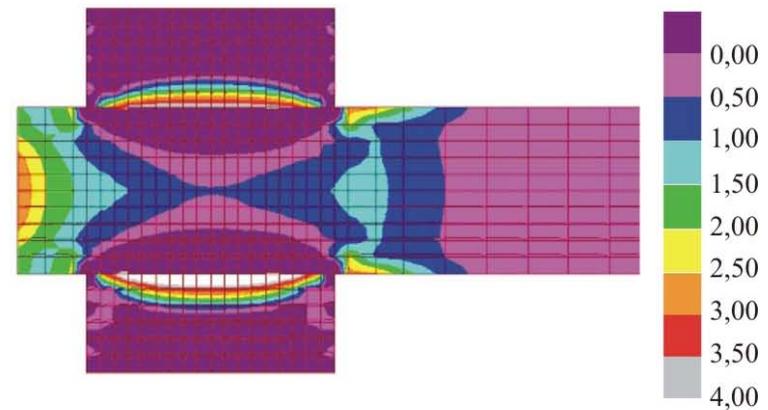


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



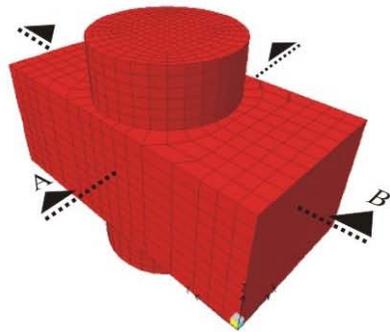
b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV4-60

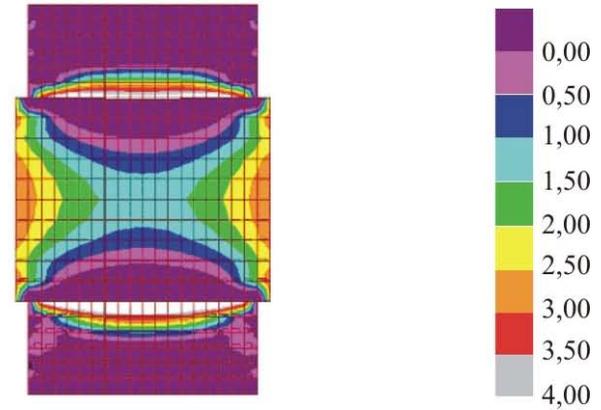


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.5 – Resultados da análise numérica PAV4-60: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

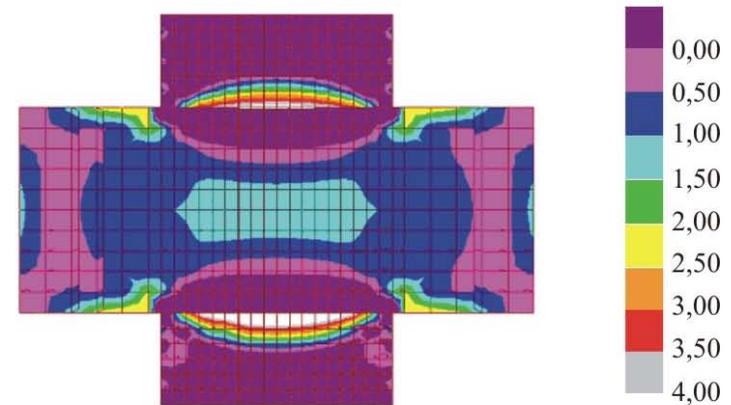


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



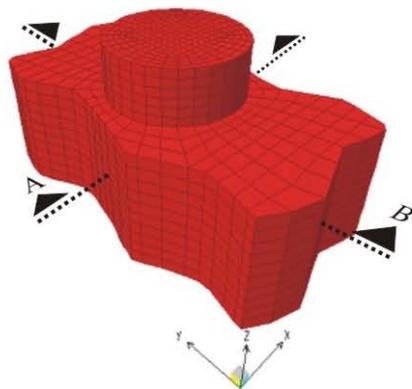
b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV1-80

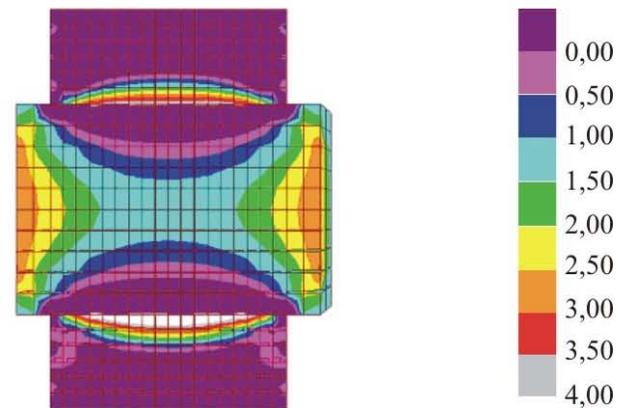


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.6 – Resultados da análise numérica PAV1-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

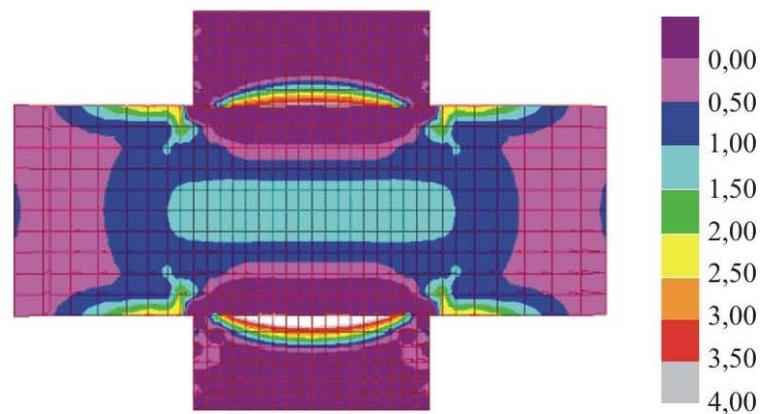


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



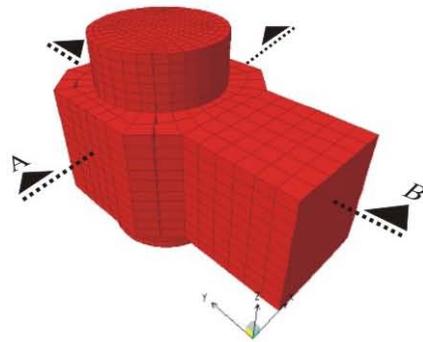
b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV2-80

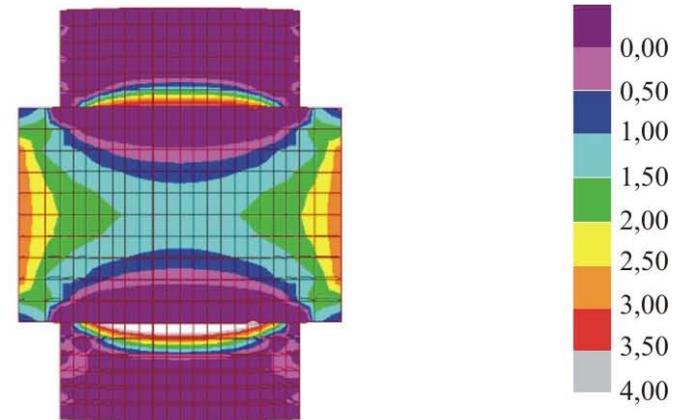


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.7 – Resultados da análise numérica PAV2-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

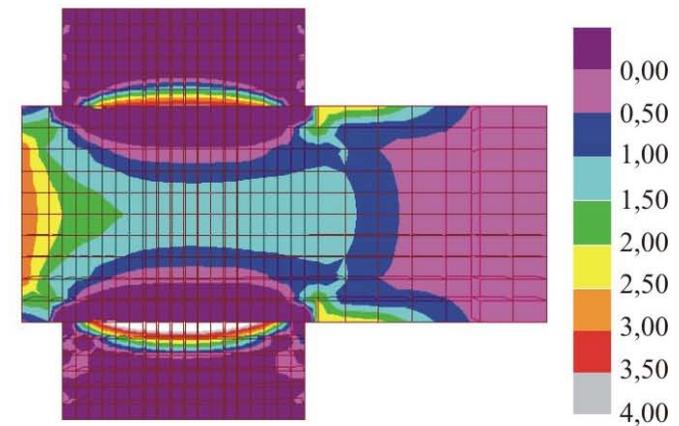


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



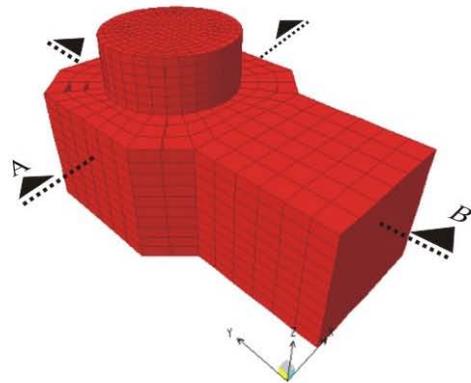
b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV3-80

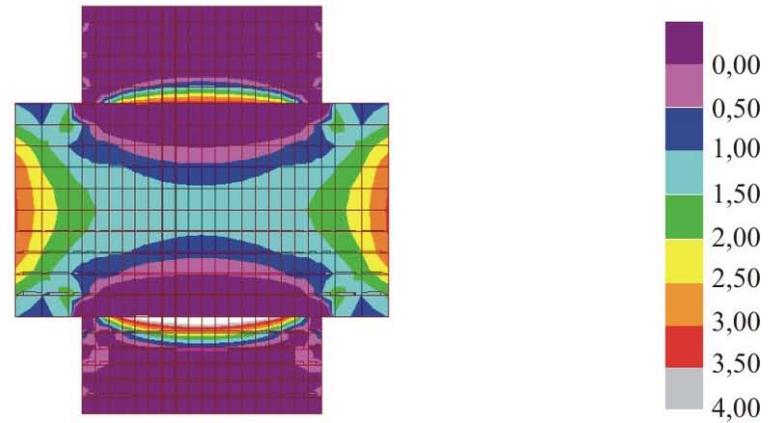


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.8 – Resultados da análise numérica PAV3-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

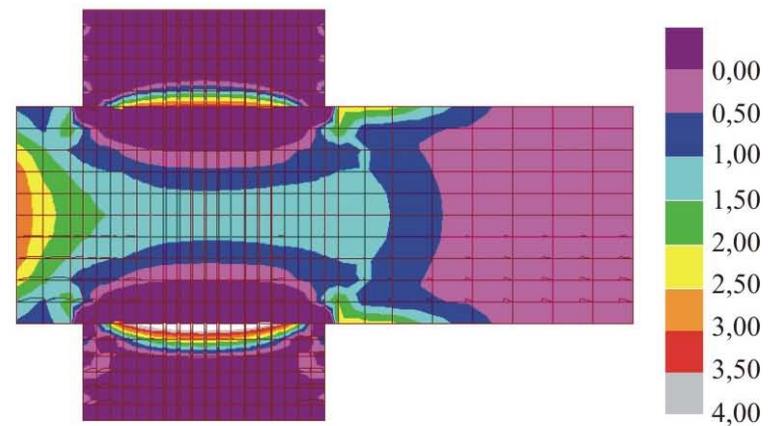


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



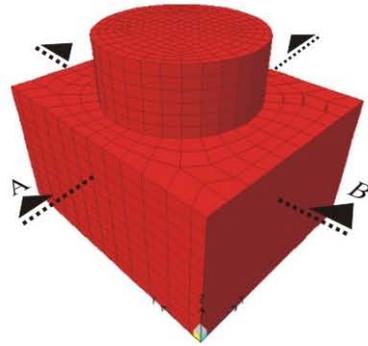
b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV4-80

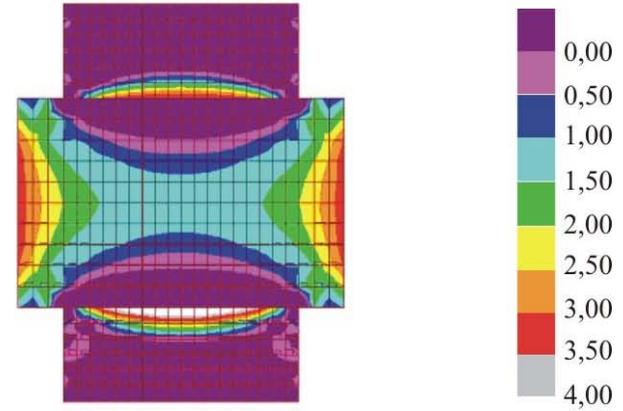


c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.9 – Resultados da análise numérica PAV4-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

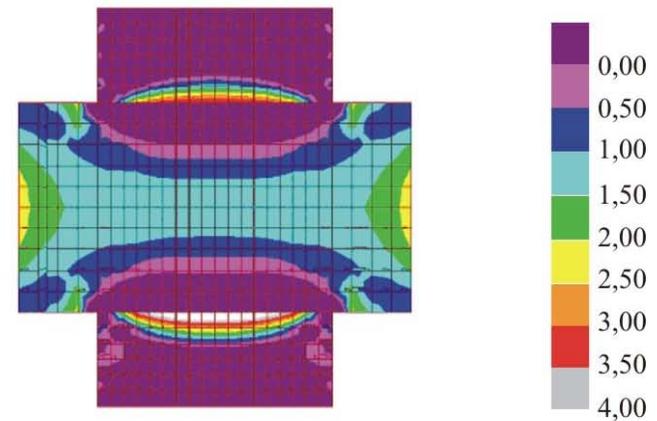


a) detalhe da malha gerada no SAP 2000



b) tensões principais máximas (MPa) - corte A

PAV5-80



c) tensões principais máximas (MPa) - corte B

Figura 6.10 – Resultados da análise numérica PAV5-80: a) detalhe da malha gerada no SAP 2000; b) b) tensões principais máximas – corte A; c) tensões principais máximas– corte B

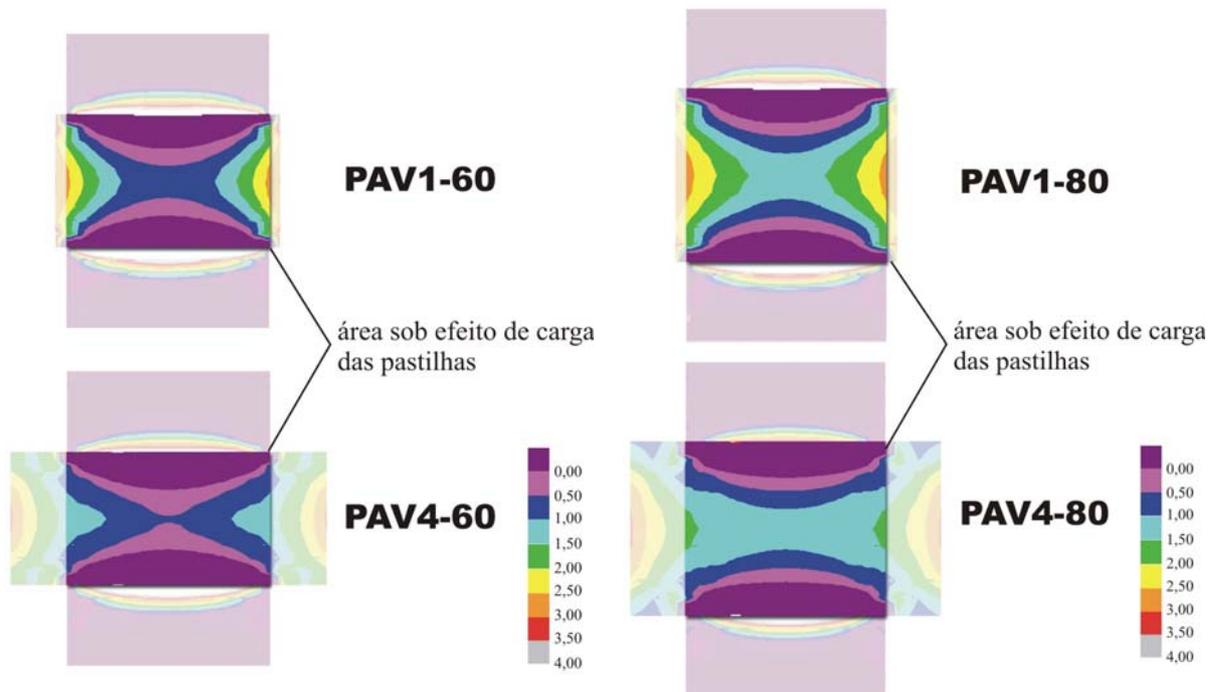
Analisando-se as figuras apresentadas (Figuras 6.2 a 6.10), percebe-se bem a influência do efeito de confinamento lateral quando se comparam as distribuições de tensões vistas através dos cortes transversais (Figuras 6.2b a 6.10b) e longitudinais (Figuras 6.2c e 6.10c). Devido a maior dimensão no sentido longitudinal, as tensões principais máximas (de tração) nesse sentido são ligeiramente inferiores às tensões máximas de tração no sentido transversal.

Comparando-se os diferentes formatos de peças com a mesma altura ($h=60\text{mm}$ – Figuras 6.2 a 6.5; $h=80\text{mm}$ – Figuras 6.6 a 6.10), com relação às tensões máximas de tração no sentido transversal, por ser o caso mais desfavorável, verificou-se que em praticamente todos os casos não houve diferenças significativas nos níveis de tensões alcançados. Porém, o aspecto das regiões com mesmo nível de tensões (regiões representadas por uma mesma cor) sofreram pequenas alterações a medida que aumentou-se a largura das peças. Isso pode se mais facilmente visualizado através da Figura 6.11, onde são apresentadas as distribuições de tensões ao longo da seção transversal, das peças com menor largura (PAV1-60 e PAV1-80), juntamente com as de maior largura (PAV4-60 e PAV4-80). Para a altura de 60 mm percebe-se que no PAV4-60 a região em azul (0,5 a 1,0 MPa) é quase que seccionada pela área em rosa (0,0 a 0,5 MPa), o que não ocorre no PAV1-60. Já nas peças com 80 mm, a região central do PAV4-80 quase não possui regiões de tensão na cor verde (1,5 a 2,0 MPa); diferente do PAV1-80 que apresenta regiões de tensões nas cores verde (1,5 a 2,0 MPa), amarela (2,0 a 2,5 MPa) e uma pequena parte das isostáticas em laranja (2,5 a 3,0 MPa).

Com relação à influência da altura das peças nos níveis de tensões máximas de tração alcançadas, constatou-se que as peças com 60 mm de altura apresentaram níveis de tensão de tração significativamente inferiores às peças com 80 mm. Como as peças de 60 mm apresentam uma menor altura, provavelmente as tensões de tração na parte central das referidas peças foram mais influenciadas pelo atrito existente na interface de contato disco de aplicação de carga / peça de concreto, gerando as referidas reduções.

Através dos resultados numéricos conclui-se que, para peças de mesma altura, o efeito de confinamento lateral parece exercer uma pequena influência na distribuição de tensões de tração das peças, com o aumento da largura das mesmas. Porém, não se pode afirmar se essas diferenças podem influenciar significativamente o resultado de resistência à compressão, pois as análises aqui empregadas se deram no regime elástico linear. O mesmo se aplica quando se avalia a influência da altura das peças. Os resultados numéricos mostram que existe uma diferença significativa nos níveis de tensão de tração encontrados para as peças de 60 e 80 mm;

porém, não se pode afirmar o quanto essas diferenças influenciam no resultado de resistência à compressão.



a) peças de menor e maior largura – $h=60$ mm b) peças de menor e maior largura – $h=80$ mm

Figura 6.11 – Detalhe das tensões principais máximas de tração (MPa) – corte transversal: a) peças de menor e maior largura com 60 mm de altura; b) peças de menor e maior largura com 80 mm de altura

6.1.2 – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA LARGURA DE PEÇAS DE CONCRETO NO RESULTADO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

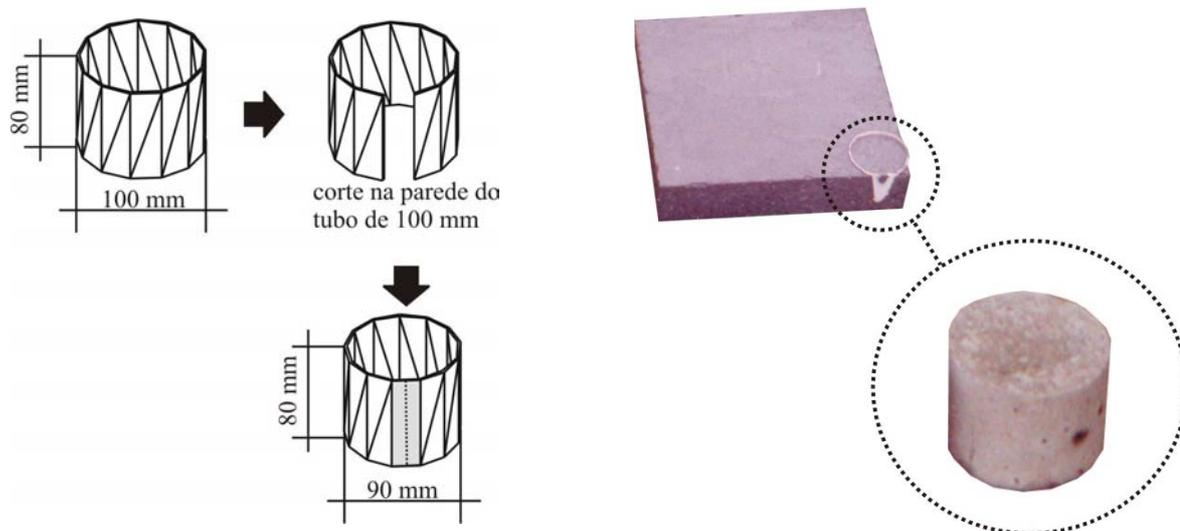
Para determinar a real influência do efeito de confinamento devido à largura das peças no ensaio de punção dupla, foram confeccionadas 5 placas de concreto com 40 x 40 x 8 cm (largura x comprimento x altura) para a posterior extração, com o auxílio de serra diamantada, de pequenas peças com as seguintes dimensões: 10 x 10 cm; 12 x 12 cm; 14 x 14 cm; 16 x 16 cm; 18 x 18 cm e 20 x 20 cm (3 peças para cada situação – Figura 6.12). Além das referidas dimensões, foram serradas peças de 10 x 20 cm e 12,5 x 15 cm (3 peças para cada situação – Figura 6.12). Essas últimas foram ensaiadas para avaliar a influência do efeito de confinamento

em peças retangulares, com formato semelhante as PCP encontradas no mercado (PAV1-80 e PAV 5-80 – ver Tabela 6.1). Cabe salientar que as placas de concreto foram moldadas com 8 cm de altura, por ser a altura intermediária e ao mesmo tempo a altura de referência com relação à resistência à compressão, segundo a NBR 9780 (1987).



Figura 6.12 – Detalhe dos blocos de concreto serrados para ensaio de punção dupla

Além das referidas peças, foram extraídos das placas de concreto, 3 corpos-de-prova cilíndricos de 9 x 8 cm (diâmetro x altura) para a avaliação da resistência à compressão sem que houvesse o efeito de confinamento. Foram adotadas essas dimensões em função do diâmetro da pastilha de aplicação de carga preconizado pela NBR 9780 (1987) e da altura da placa. Para a obtenção dos corpos-de-prova cilíndricos foram serrados tubos de PVC com diâmetro de 100 mm de forma a reduzi-los para 90 mm (Figura 6.13a). Logo após a concretagem, esses tubos de 90 mm de diâmetro eram inseridos nas placas para a obtenção dos referidos corpos-de-prova. Na Figura 6.13b é apresentado um detalhe da obtenção dos corpos-de-prova cilíndricos.



a) corte no tubo de PVC (ϕ 100 mm) para a obtenção do molde empregado – corpos-de-prova 9 x 8 cm

b) detalhes da placa de 40 x 40 x 8 cm com o molde de PVC (ϕ 90 mm) e corpo-de-prova pronto para o capeamento

Figura 6.13 – a) corte no tubo de PVC - ϕ 100 mm; b) detalhe da obtenção dos corpos-de-prova - ϕ 90 mm

O traço adotado e as quantidades dos materiais empregados para a confecção do concreto utilizado na moldagem das placas, são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Proporções dos materiais empregadas na confecção do concreto

| Materiais | Traço unitário | Quantidade de material empregado (kg) |
|--------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Cimento | 1,00 | 50,0 |
| Brita “0” | 2,00 | 100,0 |
| Areia média ¹ | 2,00 | 100,0 |
| Água | 0,55 | 27,5 |
| Aditivo plastificante | 0,4% ² | 200 gramas |

OBS: abatimento do concreto medido através do Slump foi de 100 ± 20 mm de acordo com a NBR 7223 (1993)

1 – areia média proveniente de rio com módulo de finura igual a 3,0;

2 – porcentagem de aditivo em relação à massa de cimento.

Todo o volume de concreto necessário para a moldagem das 5 placas de 40 x 40 x 8 cm foi produzido em uma única virada, utilizando-se uma betoneira de 250 litros. Para a moldagem das referidas placas empregou-se inicialmente um vibrador de agulha para um adensamento preliminar do concreto e, posteriormente, uma mesa vibratória para o acabamento final.

As placas foram desmoldadas com 1 dia e mantidas imersas em água até a data da extração das peças e dos corpos de prova (3 dias). Logo após a extração das referidas peças,

procedeu-se a conferência das alturas e eventuais ajustes na própria serra diamantada e o posterior capeamento das mesmas com pasta de cimento. Ao término da fase de capeamento todas as peças, juntamente com os corpos-de-prova cilíndricos de 9 x 8 cm foram colocados novamente na água até a data de rompimento (28 dias). Na Tabela 6.3 são apresentados os resultados de resistência à compressão das peças, empregando-se o ensaio de punção dupla, e os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos.

Tabela 6.3 – Resultados de resistência à compressão dos blocos e dos corpos-de-prova cilíndricos

| Identificação | Resistência à compressão (MPa) | Resistência média (MPa) | Desvio padrão (MPa) |
|---------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 10 x 10 - 1 | 45,03 | 43,23 | 2,14 |
| 10 x 10 - 2 | 43,78 | | |
| 10 x 10 - 3 | 40,87 | | |
| 12 x 12 - 1 | 45,43 | 43,70 | 1,66 |
| 12 x 12 - 2 | 43,54 | | |
| 12 x 12 - 3 | 42,13 | | |
| 14 x 14 - 1 | 41,81 | 42,73 | 1,87 |
| 14 x 14 - 2 | 41,50 | | |
| 14 x 14 - 3 | 44,88 | | |
| 16 x 16 - 1 | 45,27 | 45,85 | 1,57 |
| 16 x 16 - 2 | 47,63 | | |
| 16 x 16 - 3 | 44,64 | | |
| 18 x 18 - 1 | 44,41 | 45,48 | 1,00 |
| 18 x 18 - 2 | 45,66 | | |
| 18 x 18 - 3 | 46,37 | | |
| 20 x 20 - 1 | 46,61 | 46,21 | 0,44 |
| 20 x 20 - 2 | 46,29 | | |
| 20 x 20 - 3 | 45,74 | | |
| 10 x 20 - 1 | 41,73 | 43,28 | 1,35 |
| 10 x 20 - 2 | 43,86 | | |
| 10 x 20 - 3 | 44,25 | | |
| 12,5 x 15 - 1 | 42,99 | 43,91 | 0,99 |
| 12,5 x 15 - 2 | 43,78 | | |
| 12,5 x 15 - 3 | 44,96 | | |
| φ 90 - 1 | 43,74 | 44,17 | 0,77 |
| φ 90 - 2 | 43,70 | | |
| φ 90 - 3 | 45,06 | | |

Fazendo-se uma comparação múltipla de média (Tabela 6.4), verifica-se que, apesar do pequeno aumento nas resistências à compressão, quando as larguras empregadas nas peças foram superiores a 14 cm, não houve uma diferença significativa na resistência à compressão das

mesmas (peças quadradas, retangulares e corpos-de-prova cilíndricos) com um nível de confiabilidade de 95% ($F_{\text{observado}} < F_{\text{crítico}}$).

Tabela 6.4 – Resultados da análise estatística – comparação múltipla de média para fator único

| Fonte de variação | Somatória dos quadrados dos desvios | Graus de liberdade | Médias quadradas | $F_{\text{observado}}$ | $F_{\text{crítico}}$ |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------|------------------|------------------------|----------------------|
| Entre grupos | 37,91 | 8 | 4,74 | 2,39 | 2,51 |
| Dentro dos grupos | 35,72 | 18 | 1,98 | | |
| Total | 73,63 | 26 | | | |

Mediante os testes conduzidos nessa primeira parte do trabalho, pode-se concluir que:

- Apesar do pequeno aumento de resistência das peças quando as larguras empregadas foram superiores a 140 mm, conforme visto nos resultados de resistência à compressão das peças serradas, esse aumento não foi significativo, para um grau de confiabilidade de 95 %. Em outras palavras, o ensaio preconizado pela NBR 9780 (1987), para a determinação da resistência à compressão das PCP através do método de punção dupla, não é influenciado pelo efeito de confinamento lateral exercido pela largura excedente ao diâmetro da pastilha de aplicação de carga;
- As resistências à compressão obtidas para os corpos-de-prova cilíndricos de 9 x 8 cm foram semelhantes às resistências das peças quadradas e retangulares, reafirmando que o efeito de confinamento lateral exercido pela região excedente a largura da pastilha de aplicação de carga não influencia o resultado de resistência à compressão;
- O formato do corpo-de-prova cilíndrico 9 x 8 cm mostrou-se potencialmente aplicável para previsão da resistência à compressão das PCP, haja vista que não houve diferenças significativas nos resultados de resistência à compressão do referido corpo-de-prova e das peças serradas (quadradas e retangulares) e, ao mesmo tempo, o corpo-de-prova cilíndrico 9 x 8 cm possui um volume condizente com o tamanho das PCP, o que pode representar com fidelidade as condições com relação a calor de hidratação, perda de água ao longo do tempo, etc;
- Mediante os resultados obtidos na parte experimental, pode-se afirmar que as diferenças nas distribuições de tensões obtidas nas análises numéricas, devido as diferenças nas larguras das peças, não influenciaram os resultados de resistência à compressão quando do emprego do ensaio de punção dupla.

6.2 – EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA – PREVISÃO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP, DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, AVALIAÇÃO DA TEXTURA E DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE IDEAL DE ÁGUA DA MISTURA

6.2.1 – CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO

6.2.1.1 – Definição do formato do corpo-de-prova

Quando definiu sua metodologia de dosagem para blocos de concreto, FRASSON (2000) empregou um corpo-de-prova cilíndrico de 5 x 10 cm pelo fato do diâmetro do mesmo ser da mesma ordem de grandeza das paredes laterais dos blocos (aproximadamente 3 cm).

Inicialmente, pensou-se em empregar o mesmo corpo-de-prova adotado por FRASSON (2000) para dosagem das PCP. Entretanto, esse corpo-de-prova (5 x 10 cm) não representa bem as condições volumétricas e de ensaio das PCP. A relação h/d (altura/diâmetro) do referido corpo-de-prova é igual a 2, amenizando o efeito de restrição dos pratos da prensa. No caso das PCP essa relação h/d varia de 0,67 a 1,11 (peças de 60 e 100 mm), considerando “d” igual ao diâmetro do disco de aplicação de carga, fazendo com que haja um efeito de restrição por atrito dos pratos da prensa, que segundo GONNERMAN (1925), pode majorar a resistência à compressão de 10 a 40%, tomando-se a relação h/d = 2 como referência. Em função disso e dos resultados apresentados anteriormente no item 6.1.2, foi adotado o corpo-de-prova cilíndrico de 9 x 8 cm (diâmetros x altura) como corpo-de-prova padrão para previsão da resistência à compressão das PCP. O diâmetro adotado é igual ao diâmetro da pastilha empregada no ensaio das PCP e a altura do referido corpo-de-prova, é igual à altura intermediária dentre as alturas prescritas pela NBR 9780 (1987) – Figura 6.14.

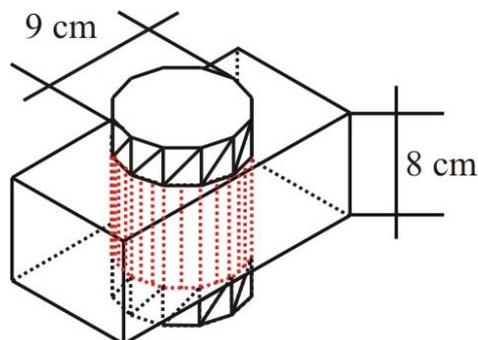


Figura 6.14 – Formato do corpo-de-prova para previsão da resistência das PCP – diâmetro igual ao das pastilhas de aplicação de carga e altura igual a altura intermediária dentre as prescritas pela NBR 9780 (1987)

6.2.1.2 – Equipamento de moldagem dos corpos-de-prova (9 x 8 cm)

Um dos problemas existentes na metodologia de dosagem proposta por FRASSON (2000) é a influência do operador na moldagem dos corpos-de-prova. Se o operador for inexperiente e não tomar os devidos cuidados, poderão ocorrer falhas na parte inferior dos corpos-de-prova 5 x 10 cm, que influenciarão significativamente os resultados de resistência à compressão dos referidos corpos-de-prova.

A fim de eliminar esse problema na moldagem dos corpos-de-prova de 9 x 8 cm e avaliar, quantitativamente, a energia necessária para moldagem dos mesmos, concebeu-se, no presente trabalho, um equipamento de moldagem semelhante ao equipamento de Marshall para confecção de corpos-de-prova de misturas asfálticas, com algumas alterações com relação às dimensões do molde e do soquete de compactação, bem como nos mecanismos de moldagem e desmoldagem dos corpos-de-prova.

O referido equipamento (Figura 6.15) consiste, basicamente, das seguintes partes:

- Soquete de compactação: é um soquete de aço, que dispõe de uma massa deslizante de 5,8 kg com uma altura de queda útil de 53 cm, o que possibilita a aplicação de até 30 joules / golpe. A ponta do soquete possui uma altura de penetração no molde de 4 cm, para que a superfície do corpo-de-prova fique horizontal, e um batente para visualizar o término da compactação dos corpos-de-prova (Figura 6.15a);
- Molde metálico: molde cilíndrico metálico com 9 cm de diâmetro interno e 16 cm de altura. Possui duas abas laterais que permitem a fixação do mesmo à base, no momento da moldagem dos corpos de prova (Figura 6.15b);
- Base suporte para o molde: a base de suporte para o molde é formada por uma chapa metálica quadrada de 250 x 250 x 3 mm e duas hastes com roscas e borboletas, para a fixação do molde durante a etapa de moldagem (Figura 6.15c);
- Pastilhas de náilon: o equipamento possui duas pastilhas de náilon com 90 mm de diâmetro e alturas de 35 e 40 mm, para a definição da altura dos corpos-de-prova no momento da moldagem (ver procedimento descrito no item 6.2.1.3);
- Cilindro de náilon: Além das partes descritas até aqui, o equipamento dispõem de um cilindro maciço de náilon de 9 x 18 cm (diâmetro x altura), para a desmoldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (ver esquema de moldagem – Figura 6.16).

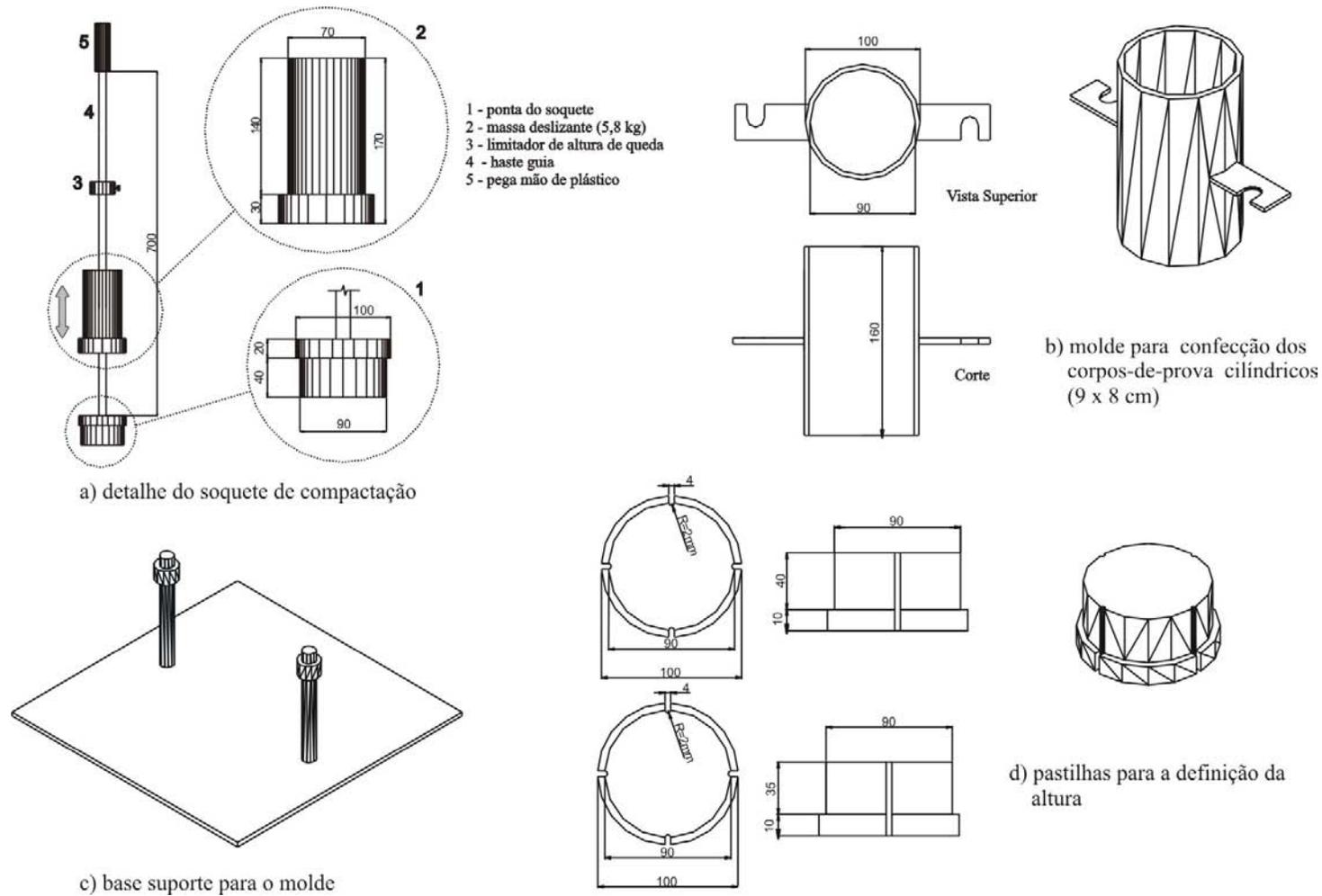


Figura 6.15 – Equipamento para moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos 9 x 8 cm – a) soquete de compactação; b) molde cilíndrico; c) base de suporte para o molde; d) pastilhas de náilon para definição da altura dos corpos-de-prova

6.2.1.3 – Moldagem dos corpos-de-prova (9 x 8 cm)

Para a moldagem dos corpos-de-prova, previamente, determina-se a quantidade necessária de material para que se atinja a porcentagem de volume de sólidosⁱⁱ ou a massa específica desejada. A moldagem se inicia com o posicionamento da pastilha de náilon de 35 mm na parte inferior do molde e o acoplamento do conjunto (molde + pastilha de náilon de 35 mm) na base de apoio, despejando-se, posteriormente, dentro do molde, a quantidade de material (concreto) pré-determinada (Figura 6.16a). Após a perfeita fixação do molde na base de apoio, encaixa-se a pastilha de 40mm na parte superior do mesmo (Figura 6.16b) e, com o auxílio de uma marreta, realiza-se a compactação manual até que o batente da pastilha de náilon atinja o topo do molde (Figura 6.16c). Pelo fato do molde possuir um comprimento de 160 mm e as pastilhas de regulagem de altura 35 e 40 mm, o corpo-de-prova apresenta, nesta fase de compactação, uma altura de 85 mm.

Para que se tenha início a segunda fase da moldagem do corpo-de-prova, inverte-se o molde (giro de 180 graus – parte que anteriormente estava voltada para cima fica apontada para baixo), retira-se a pastilha de 35 mm (Figura 6.16d) e acopla-se a ponta do soquete de compactação no topo do molde (Figura 6.16e). Como esta ponta apresenta um comprimento de 40mm, é necessário que sejam compactados os últimos 5 mm, aplicando-se uma energia constante por golpe. Quando o batente da ponta do soquete atinge o topo do molde cilíndrico (altura do corpo-de-prova = 80 mm), conforme apresentado na Figura 6.16f, encerra-se a fase de compactação, executando-se, então, a desmoldagem do corpo-de-prova com o auxílio de um cilindro maciço de náilon. Para tal, o molde é desprendido da base de apoio, sendo removida a pastilha de 40 mm localizada na parte inferior do mesmo. Posicionando-se o conjunto (molde + corpo-de-prova) sobre o cilindro de náilon, pressiona-se levemente as abas do molde para que o mesmo deslize por fora do cilindro de náilon, liberando o corpo de prova (Figuras 6.16g e 6.16h).

Com base em uma série de testes preliminares conduzidos em algumas fábricas da Região Sul do Brasil, empregando-se diferentes misturas e porcentagens de volume de sólidos, foram estabelecidas as energias por golpe e respectivas alturas de queda apresentadas na Tabela 6.5.

ⁱⁱ Neste trabalho define-se porcentagem de volume de sólidos com sendo a relação percentual entre o volume de material sólido da mistura (cimento e agregados) pelo volume de concreto; neste caso o volume do corpo-de-prova cilíndrico 9 x 8 cm.

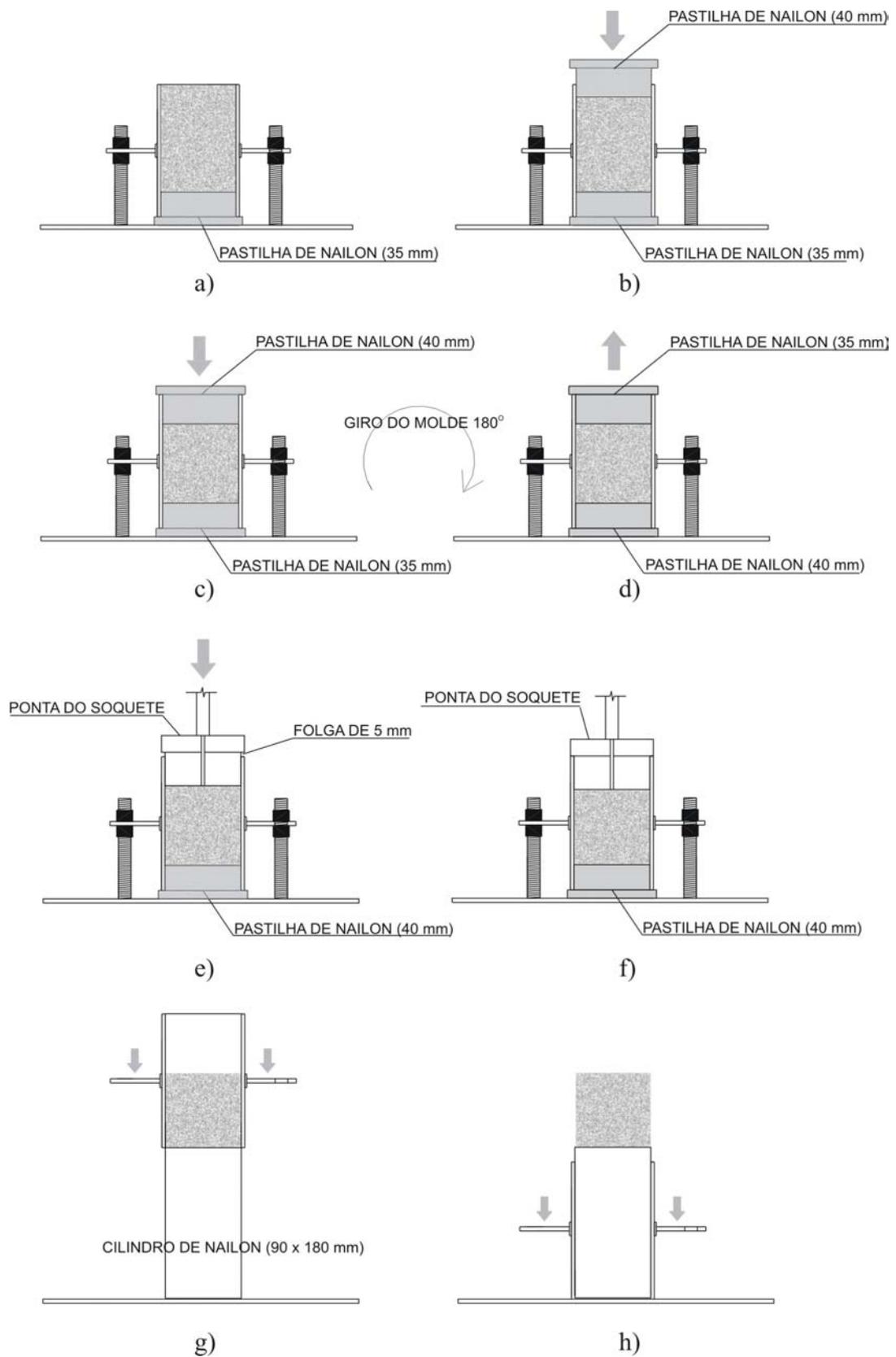


Figura 6.16 – Sequência de moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 9 x 8 cm

Tabela 6.5 – Energias por golpe e respectivas alturas de queda em função da porcentagem de volume de sólidos empregadas na moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Porcentagem de volume de sólidos | Energia / golpe (Joules) | Altura de queda (cm) ¹ |
|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| < 70 % | 5 | 8,8 |
| 70 – 75 % | 10 | 17,7 |
| 75 – 80 % | 20 | 35,3 |
| > 80 % | 30 | 53,0 |

¹ – Altura de queda definida em função do peso da massa deslizando (5,78 kg).

É importante ressaltar que essas energias, foram definidas de forma a não demandarem um número de golpes muito elevados ($n > 30$), nem muito menos um número de golpes muito pequeno ($n < 3$).

No ANEXO A, encontra-se detalhado o procedimento para a definição da massa de concreto necessária para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, em função da porcentagem de volume de sólidos, e dos parâmetros da mistura.

6.2.2 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA 9 x 8 cm

Com o intuito de se prever as resistências à compressão das PCP através da resistência dos corpos-de-prova cilíndricos de 9 x 8 cm, nesta fase do trabalho foram avaliadas as correlações existentes entre o referido corpo-de-prova e a PCP de 60 e 80 mm de altura, encontradas no mercado da Grande Florianópolis. Conforme salientado anteriormente, não foram estudadas peças com 100 mm, por não serem fornecidas por fabricantes da região.

Para a determinação dessas correlações, foram traçadas curvas de resistência à compressão em função da massa específica para os diferentes formatos e altura das PCP e para os corpos-de-prova 9 x 8 cm. Através dessas curvas foram determinadas as relações entre a resistência à compressão do corpo-de-prova 9 x 8 cm e a resistência à compressão das PCP. A seguir é apresentado, com mais detalhe, a metodologia empregada na presente fase do trabalho, bem como os resultados encontrados e as análises dos mesmos.

6.2.2.1 – Moldagem das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Toda a parte de moldagem e cura inicial dos corpos-de-prova e das PCP foram realizadas dentro das instalações de uma empresa de médio porte, fabricante de artefatos pré-moldados de concreto, localizada na Região da Grande Florianópolis.

As PCP eram produzidas em uma máquina vibro-prensa hidráulica automática da MONTANA, modelo MULTIBLOC MBX-975. Em função da impossibilidade de se pré-definir as massas específicas verdes desejadas para as referidas peças, essas eram produzidas regulando-se o tempo de alimentação para a obtenção de peças com diferentes graus de compacidade. Normalmente, essas massas específicas verdes variavam de 2,00 a 2,30 kg/dm³. Cabe ressaltar que a dificuldade de coleta e escolha das PCP no estado verde, principalmente, das peças com massa específica verde baixa (inferior a 2,10 kg/dm³), fez com que as mesmas fossem coletadas 24 horas após a moldagem.

Com a mesma mistura utilizada na produção das PCP, eram moldados os corpos-de-prova cilíndricos (9 x 8 cm), empregando-se o soquete de compactação e a seqüência de moldagem apresentada no item 6.2.1.3. Vale salientar que para cada tipo de PCP era moldada uma série de corpos-de-prova 9 x 8 cm. Cada série era composta por 16 corpos-de-prova, sendo moldados 4 corpos-de-prova para cada uma das seguintes massas específicas no estado verdeⁱⁱⁱ: 1,80; 2,00; 2,20 e 2,40 kg/dm³. Na Tabela 6.6, encontram-se os traços empregados na produção das PCP com 60 e 80 mm de altura e sua respectiva série de corpos-de-prova 9 x 8 mm.

Tabela 6.6 – Traços empregados na produção dos PCP com 60 e 80 mm de altura e sua respectiva serie de corpos-de-prova 9 x 8 cm

| PCP | Quantidade de material por virada (kg) | | | |
|-----------|--|-----------|--------------------------|-------------------------|
| | Cimento | Brita “0” | Areia média ¹ | Areia fina ² |
| PCP 60 mm | 160 | 210 | 720 | 100 |
| PCP 80 mm | 175 | 210 | 720 | 100 |

1 – areia média MF = 3,00

2 – areia fina MF = 0,90

Obs: Os materiais utilizados foram os materiais disponíveis na fábrica onde os estudos foram conduzidos;

Os traços adotados foram os traços efetivamente empregados pelo fabricante para a produção das suas PCP;

As proporções de areia média e fina na tabela acima são em massa úmida.

ⁱⁱⁱ Como se tratava de um estudo comparativo entre as resistências à compressão das PCP e dos cps 9 x 8 cm e as misturas empregadas nas moldagens das referidas peças eram as mesmas, nesta fase do trabalho, fixou-se diretamente a massa específica verde para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (relação entre a massa de concreto no estado fresco e seu volume – neste caso o volume do cp 9 x 8 cm).

6.2.2.2 – Cura das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Cerca de 100 PCP, com diferentes massas específicas verdes, eram separadas e levadas à câmara de cura a vapor, juntamente com a sua respectiva série de corpos-de-prova 9 x 8 cm. Tanto as PCP como os corpos-de-prova cilíndricos eram submetidos à mesma marcha de cura, que normalmente englobava as seguintes fases:

- 1 hora de espera com a câmara fechada para se processar as reações iniciais;
- 1 hora de aplicação de vapor, onde a temperatura média dentro da câmara atingia 70°C;
- 1 hora de descanso, sem aplicação de vapor e com a câmara fechada;
- ± 1 hora com a câmara aberta para se processar o resfriamento das peças. Essa última fase dependia do ritmo de produção da fábrica.

6.2.2.3 – Seleção das PCP e coleta dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Cerca de 24 horas após a moldagem das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm efetuava-se a seleção, identificação e transporte das referidas peças para o Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (LMCC – UFSC), onde foram conduzidos todos os ensaios.

Como os corpos-de-prova 9 x 8 cm eram moldados com massas específicas verdes pré-definidas, os mesmos eram levados para a cura com identificações prévias, o que facilitava a presente etapa.

Já para as PCP, normalmente eram selecionadas cerca de 20 a 30 peças, dentre as 100 peças separadas anteriormente. Para proceder-se a seleção, primeiramente definia-se qual era a peça mais leve e mais pesada dentre as peças disponíveis. Essa determinação era feita pesando-se, respectivamente, todas as peças da chapa produzida com o menor e com o maior tempo de alimentação. Definidos esses dois extremos, eram selecionadas as demais peças de modo a se obter uma faixa de pesos bem distribuídos.

6.2.2.4 – Determinação da massa específica saturada das peças

Conforme mencionado anteriormente, havia uma certa dificuldade para selecionar as PCP no estado verde sem danificá-las, principalmente as peças que apresentavam uma massa específica inferior a 2,10 kg/dm³. Esse procedimento acarretava em riscos de fissuração prévia das peças e, conseqüentemente, comprometimento na determinação da resistência à compressão.

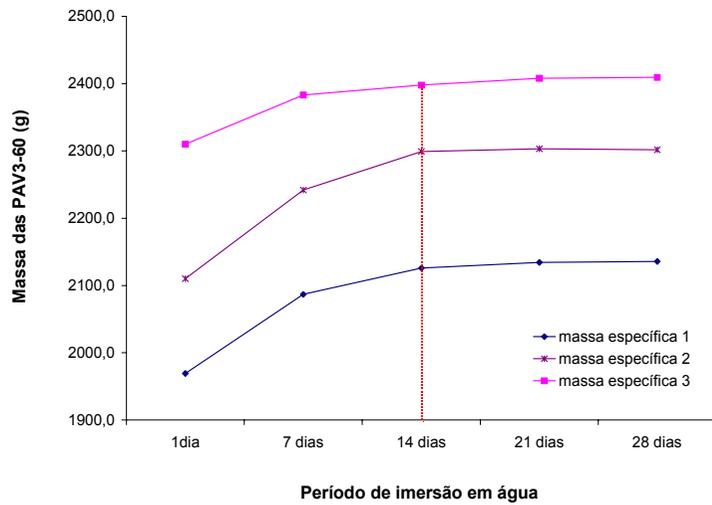
Por isso, optou-se por trabalhar com a massa específica saturada, tanto das PCP como dos corpos-de-prova 9 x 8 cm.

Logo após a chegada ao LMCC – UFSC as peças (PCP e corpos-de-prova 9 x 8 cm) eram colocadas em um tanque com água saturado com cal, onde permaneciam por um período de 14 dias, para a determinação da massa específica saturada. Esse período de 14 dias de imersão em água foi determinado em função de alguns estudos preliminares, avaliando-se o tempo necessário para a constância de massa das peças (PAV3-60 e PAV1-80) e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm com diferentes graus de compacidade. Os resultados do referido estudo são apresentados na Figura 6.17, onde se percebe que em alguns casos a constância de peso ocorreu logo aos 7 dias de imersão (PAV1-80 e corpos-de-prova 9 x 8 cm). Contudo, os PAV3-60 com baixo grau de compacidade (massa específica mais baixa) alcançaram a constância de peso somente aos 14 dias. Em função disso, foi adotado o período de 14 dias de imersão em água, garantindo a saturação das peças independente do grau de compacidade das mesmas.

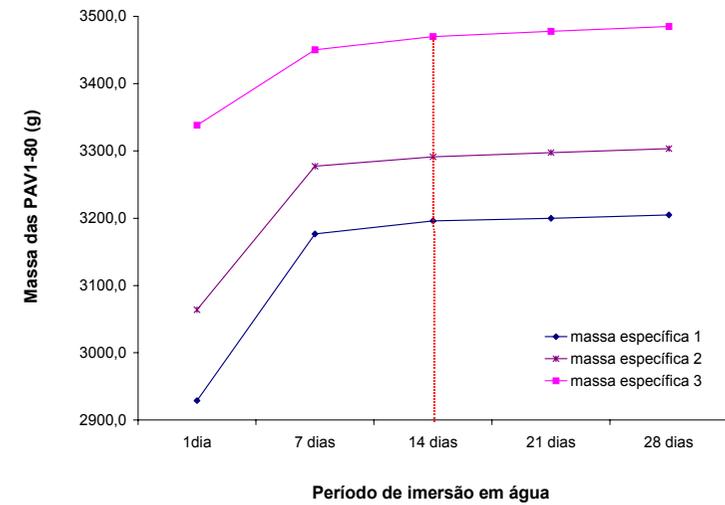
Ao término do período de imersão em água, eram determinadas:

- PCP = massas saturadas, alturas e o volume médio empregando-se o ensaio da caixa metálica apresentado por Frasson (2000) – ver detalhe apresentado na Figura 6.18;
- Corpos-de-prova 9 x 8 cm = massas saturadas, alturas e diâmetros.

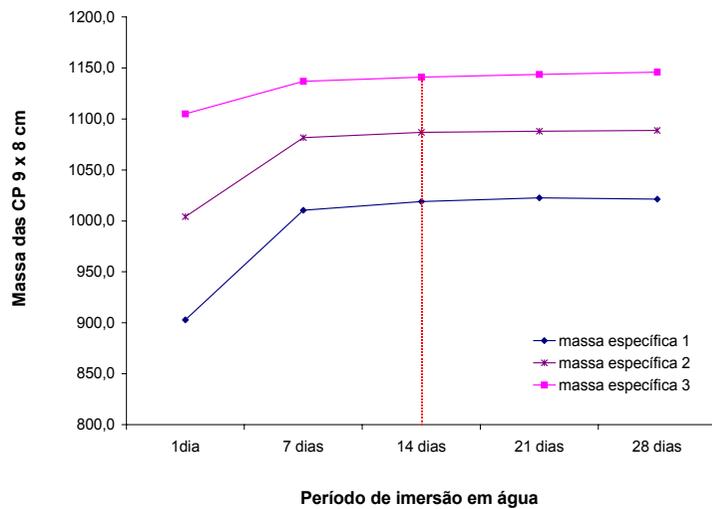
Para a determinação do volume médio, enchia-se primeiramente a caixa metálica com água, de tal forma que o nível de água dentro da mesma ficasse acima do bico extravasor (Figura 6.18b). Colocando-se um recipiente para a coleta do excesso de água, aguardava-se até o momento em que ocorresse o equilíbrio do nível de água na altura do bico extravasor (não escorria mais água pelo bico – Figura 6.18c). Nesta etapa, o bico extravasor era fechado, trocava-se o recipiente de coleta de água e colocavam-se as PCP saturadas (entre 15 a 18 peças) dentro da caixa metálica (Figura 6.18d). O bico extravasor era então liberado (Figura 6.18e) e aguardava-se até que o nível de água entrasse em equilíbrio novamente na referida altura (Figura 6.18f). Ao término do ensaio, determinava-se a massa de água acumulada dentro do recipiente. Como o volume de água deslocado dentro da caixa equivale ao volume das peças e a massa específica da água é aproximadamente igual a 1 kg/dm^3 , tinha-se que a massa de água dentro do recipiente equivalia ao volume das PCP dentro da caixa. Conseqüentemente, o volume médio das referidas peças era o resultado da divisão da massa de água dentro do recipiente pelo número de PCP dentro da caixa.



a) PAV3-60



b) PAV1-80



c) CP 9 x 8 cm

Figura 6.17 – Massa específica em função do tempo de imersão: a) PAV3-60; b) PAV1-80; c) CP 9 x 8 cm

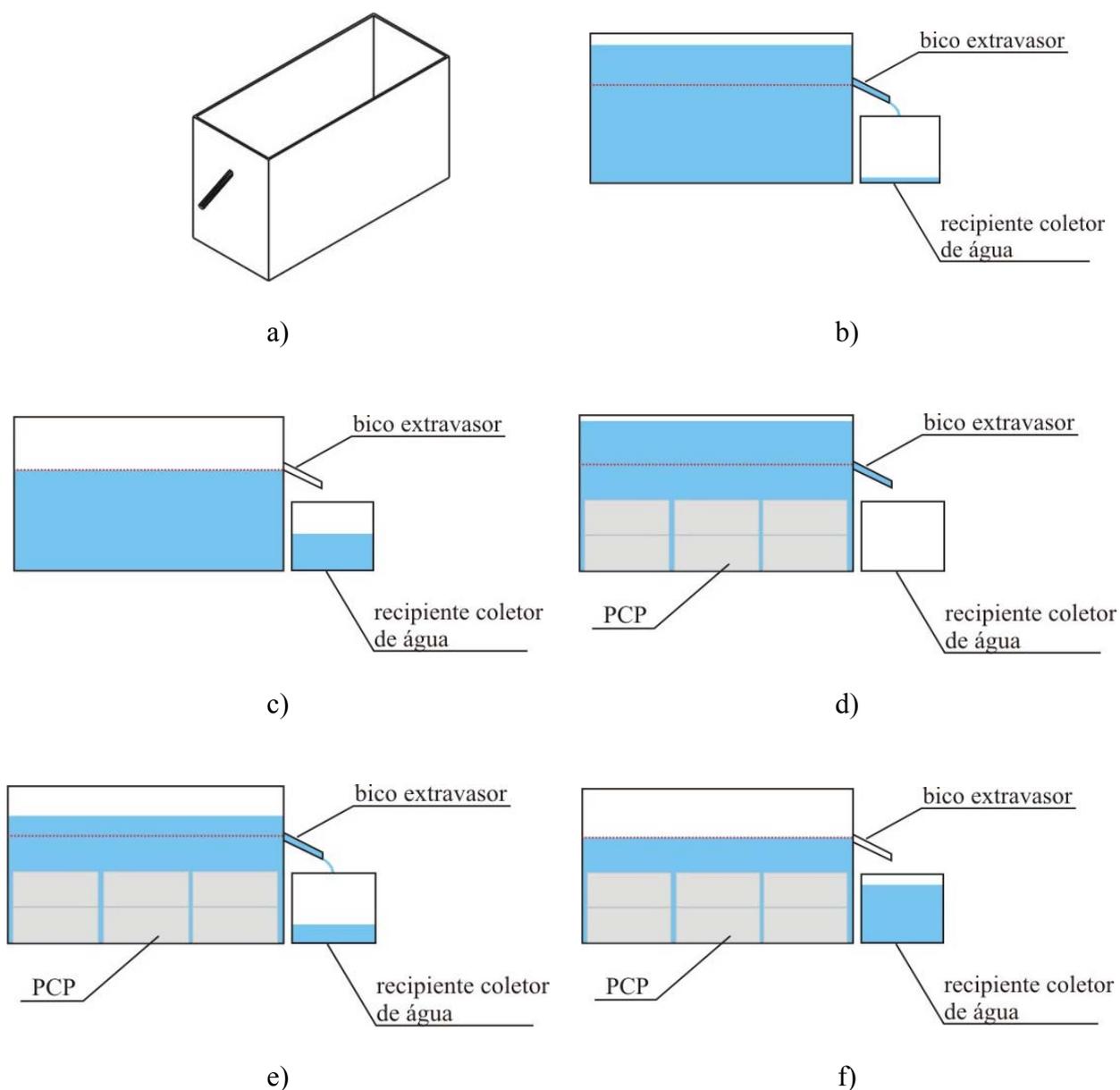


Figura 6.18 – Seqüência de determinação do volume médio das PCP

De posse do volume médio, das massas saturadas e respectivas alturas das PCP, eram determinadas as massas específicas saturadas da seguinte forma:

$$\text{área média PCP} = \frac{\text{volume médio}}{\text{altura média}} \quad (24)$$

Onde a altura média era definida como sendo a média das alturas das peças colocadas dentro da caixa metálica para a determinação do volume médio.

Para a determinação da massa específica de cada PCP, empregava-se a expressão (25).

$$massa\ específica\ saturada_{PCP} = \frac{massa\ saturada_{PCP}}{\overline{área\ média\ PCP} \times altura_{PCP}} \quad (25)$$

Para os corpos-de-prova 9 x 8 cm, a massa específica saturada era determinada diretamente através da expressão (26).

$$massa\ específica\ saturada_{cp} = \frac{massa\ saturada_{cp}}{\frac{\pi \times diâmetro_{cp}^2}{4} \times altura_{cp}} \quad (26)$$

Uma questão importante levantada quando se optou pela adoção da massa específica saturada ao invés da massa específica verde, era a possibilidade das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm com mesma massa específica verde, saturarem de maneira diferente.

Para se avaliar essa questão, foram determinadas as correlações existentes entre as massas específicas verdes e saturadas das PCP do tipo PAV3-60 e PAV2-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. As PCP foram produzidas conforme mencionado anteriormente, empregando-se os traços apresentados na Tabela 6.6.

Para cada tipo de PCP foi moldado uma série de corpos-de-prova 9 x 8 cm conforme os procedimentos descritos anteriormente, sendo essas séries produzidas com os mesmos traços utilizados para a produção das PCP e com massas específicas verdes variando entre 1,90 e 2,40 kg/dm³.

Imediatamente após a produção das PCP no equipamento de vibro-compressão, foram selecionadas, com todo o cuidado, cerca de 15 PCP, em função da massa verde das mesmas, a fim de se obter uma faixa ampla com relação à massa específica verde (entre 2,0 e 2,40 kg/dm³).

Tanto as PCP como seus respectivos corpos-de-prova 9 x 8 cm foram curados na mesma condição e colocados na água 24 horas após a produção. Após 14 dias de imersão, foram determinadas as massas específicas saturadas das referidas peças. Esses resultados encontram-se apresentados no ANEXO – I.

Nas Figuras 6.19 e 6.20, são apresentadas as curvas de correlação entre as massas específicas verde e saturada, obtidas, respectivamente, para os PAV3-60 e PAV2-80, juntamente com os corpos-de-prova 9 x 8 cm moldados com o mesmo traço. Através da análise desses gráficos e dos resultados obtidos no estudo estatístico (Tabela 6.7) percebe-se que a correlação existente entre as variáveis estudadas é altamente significativa para todos os casos, a um nível de confiabilidade de 100 % e, a dispersão dos pontos em relação às curvas ajustadas é baixa (valores de R² superiores a 0,98).

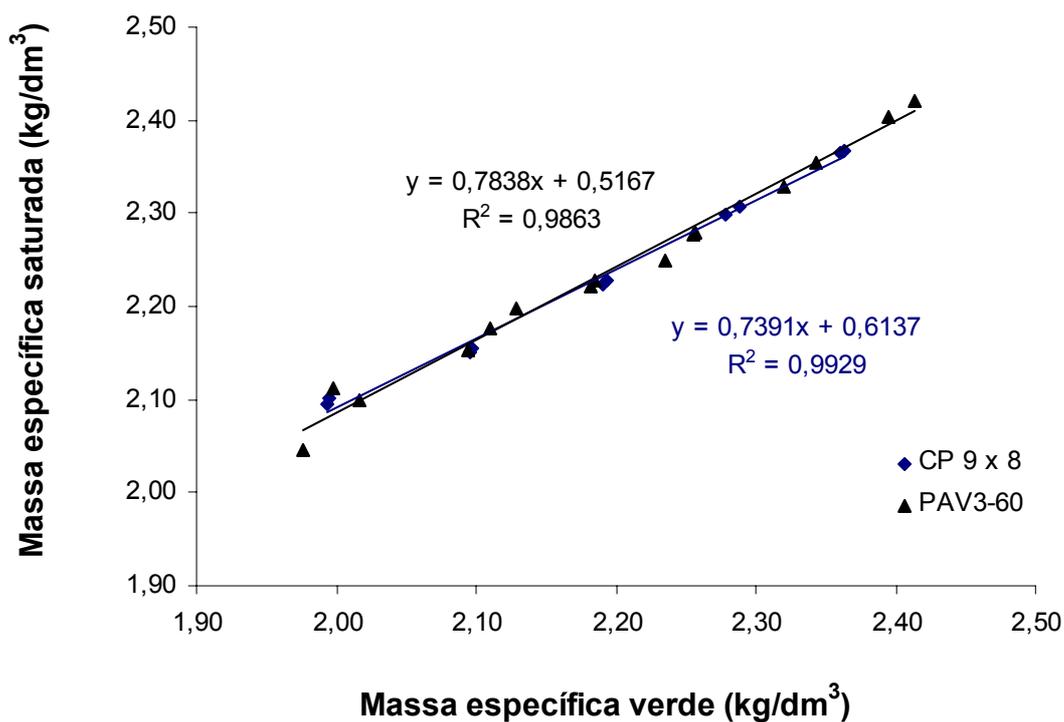


Figura 6.19 – Massa específica verde x massa específica saturada – PAV3-60

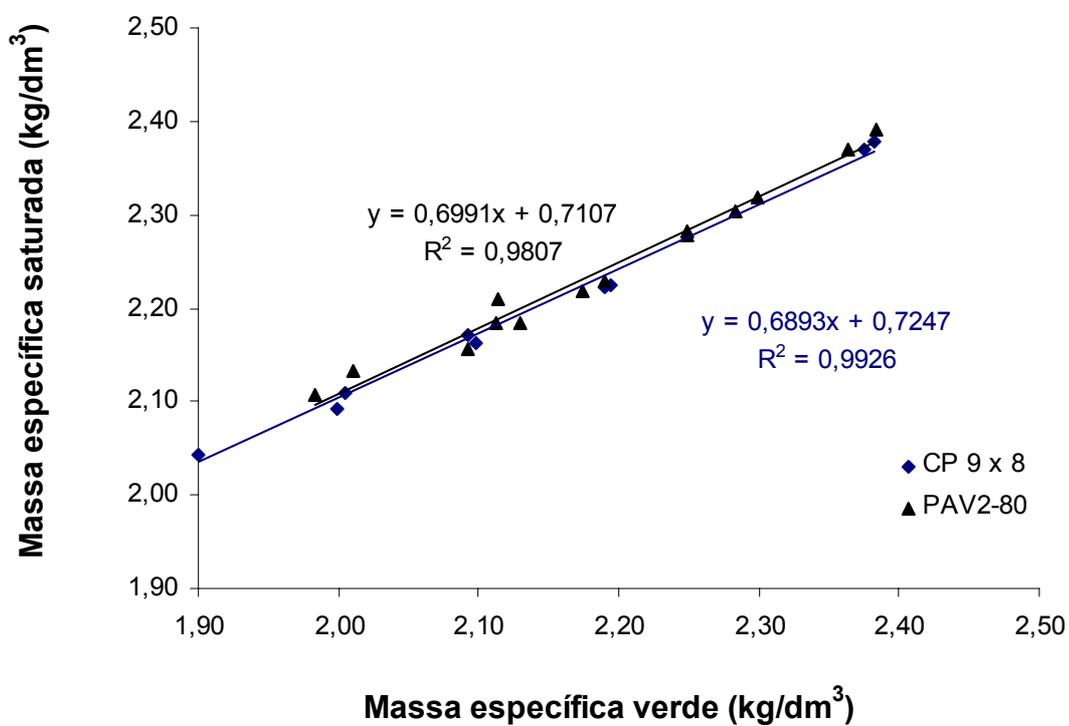


Figura 6.20 – Massa específica verde x massa específica saturada – PAV2-80

Tabela 6.7 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas

| Peças | | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|---------|-------|-------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|--------------------|----|----------------|
| | | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R ² |
| PAV3-60 | CP9x8 | 0,6137 | 0,7391 | 0,0482 | 0,02204 | 0,0091 | 33,5409 | 100,00 | 10 | 0,9929 |
| | PCP | 0,5167 | 0,7838 | 0,0563 | 0,02561 | 0,0134 | 30,6126 | 100,00 | 15 | 0,9863 |
| PAV2-80 | CP9x8 | 0,7247 | 0,6893 | 0,0447 | 0,02109 | 0,0110 | 32,6862 | 100,00 | 10 | 0,9926 |
| | PCP | 0,7107 | 0,6991 | 0,0621 | 0,02832 | 0,0125 | 24,6859 | 100,00 | 14 | 0,9807 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Fazendo-se uma comparação de funções lineares (Tabela 6.8) entre os resultados obtidos para as PCP e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm pode-se concluir que não existe diferença significativa entre as referidas curvas, tanto para as peças com 60 mm como para as de 80 mm ($F \ll F_{0,05(a,b)}$). Com isso, a opção de se trabalhar com as massas específicas saturadas ao invés das massas específicas verdes, conforme exposto anteriormente, é válida, pois qualquer alteração que ocorra na curva de correlação entre a resistência à compressão das PCP e suas respectivas massas específicas saturadas, ocorrerá em igual magnitude na correlação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, não influenciando na correlação entre as resistências à compressão das referidas peças.

Tabela 6.8 – Resultados da análise de comparação de funções lineares

| Peças | | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|---------|----------|---|----|---|----|------|------------------------|
| | | SQR | GL | a | b | F | F _{0,05(a,b)} |
| PAV3-60 | PCP | 0,0023 | 13 | 2 | 21 | 0,76 | 3,47 |
| | CP9x8 | 0,0007 | 8 | | | | |
| | PCP + CP | 0,0032 | 23 | | | | |
| PAV2-80 | PCP | 0,0019 | 12 | 2 | 20 | 0,98 | 3,49 |
| | CP9x8 | 0,0010 | 8 | | | | |
| | PCP + CP | 0,0031 | 22 | | | | |

6.2.2.5 – Determinação da resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Dando continuidade ao trabalho para a determinação da correlação entre a resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, após a determinação de suas respectivas massas específicas saturadas, as referidas peças eram capeadas com nata de cimento, sobre uma pedra de granito perfeitamente nivelada, para eliminação de eventuais imperfeições que pudessem comprometer o ensaio de resistência à compressão.

Ao término do capeamento (2 dias – 1 dia para cada lado), todas as peças eram colocadas novamente na água, onde permaneciam até a data de ensaio (28 dias).

As peças foram ensaiadas em uma prensa hidráulica de 200 toneladas, Shimadzu modelo UH-2000KNA, sendo que as PCP foram ensaiadas segundo as recomendações da NBR 9780 (1987). Os resultados do presente estudo (massas saturadas, volumes, alturas, massas específicas saturadas e resistências à compressão das PCP de 60 e 80 mm e seus respectivos corpos-de-prova) encontram-se no ANEXO – II.

6.2.2.6 – Correlação entre massa específica saturada e resistência à compressão – PCP 60 mm

Nas Figuras 6.21 a 6.24, são apresentadas as curvas de correlação entre a massa específica saturada e a resistência à compressão para as PCP de 60 mm (PAV1-60; PAV2-60; PAV3-60 e PAV4-60), com suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm.

Fazendo-se uma análise estatística dos resultados obtidos (Tabela 6.9) percebe-se que existe uma correlação significativa, a um nível de confiabilidade de 100 % entre as variáveis estudadas (massa específica saturada e resistência à compressão) e, a dispersão dos pontos em relação às curvas ajustadas é baixa (valores de R^2 superiores a 0,91).

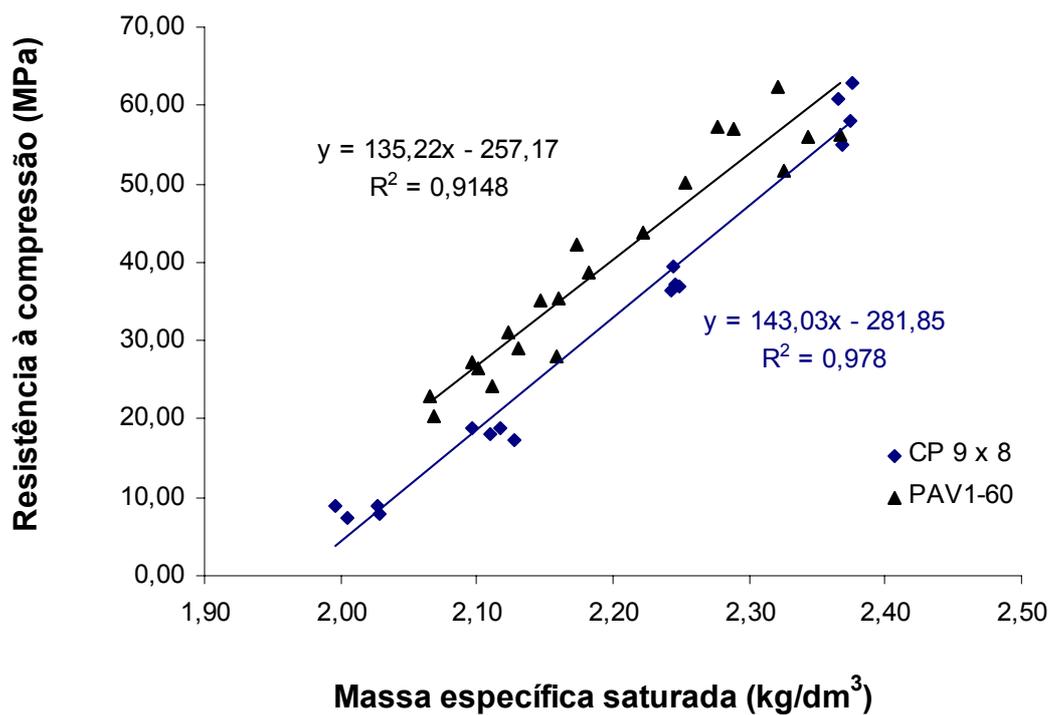


Figura 6.21 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV1-60

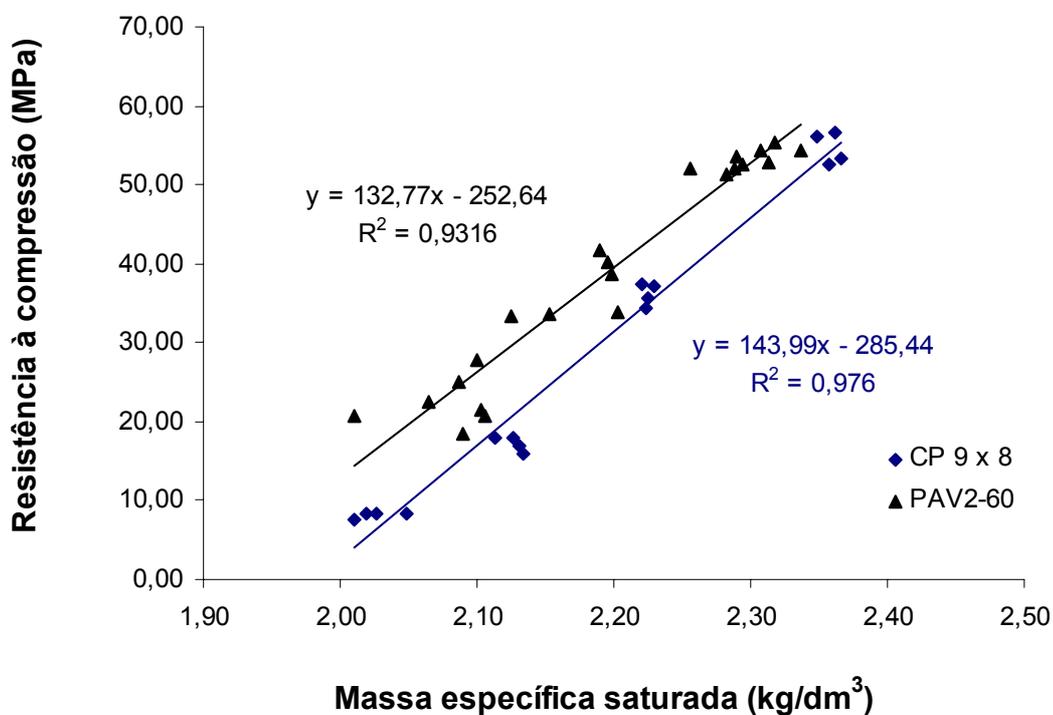


Figura 6.22 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV2-60

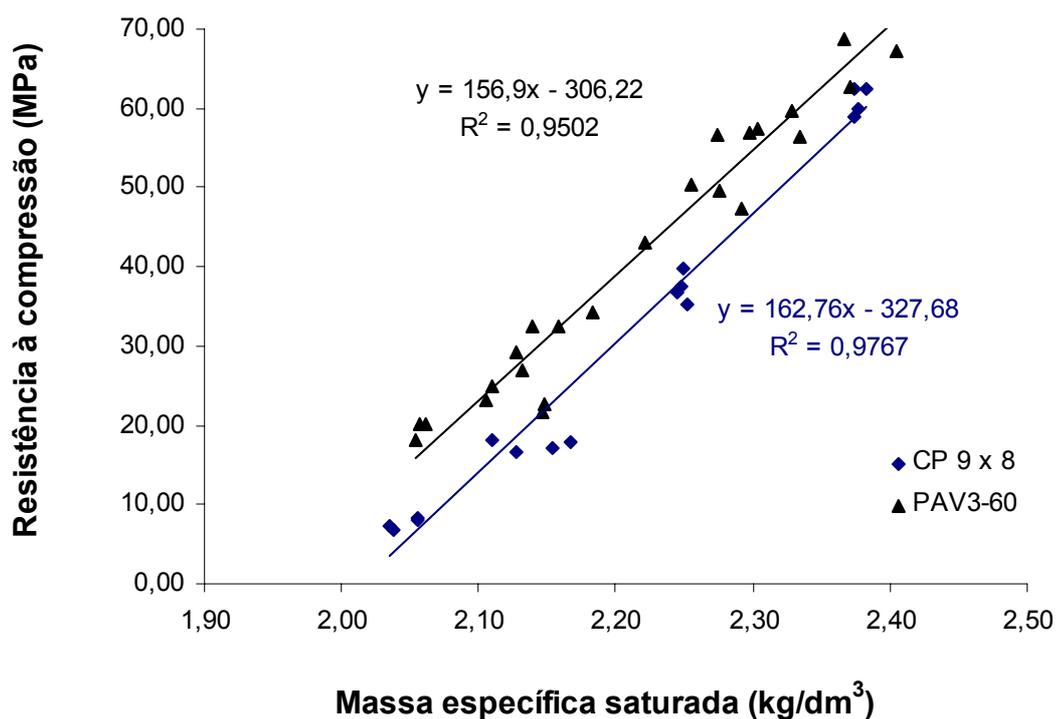


Figura 6.23 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV3-60

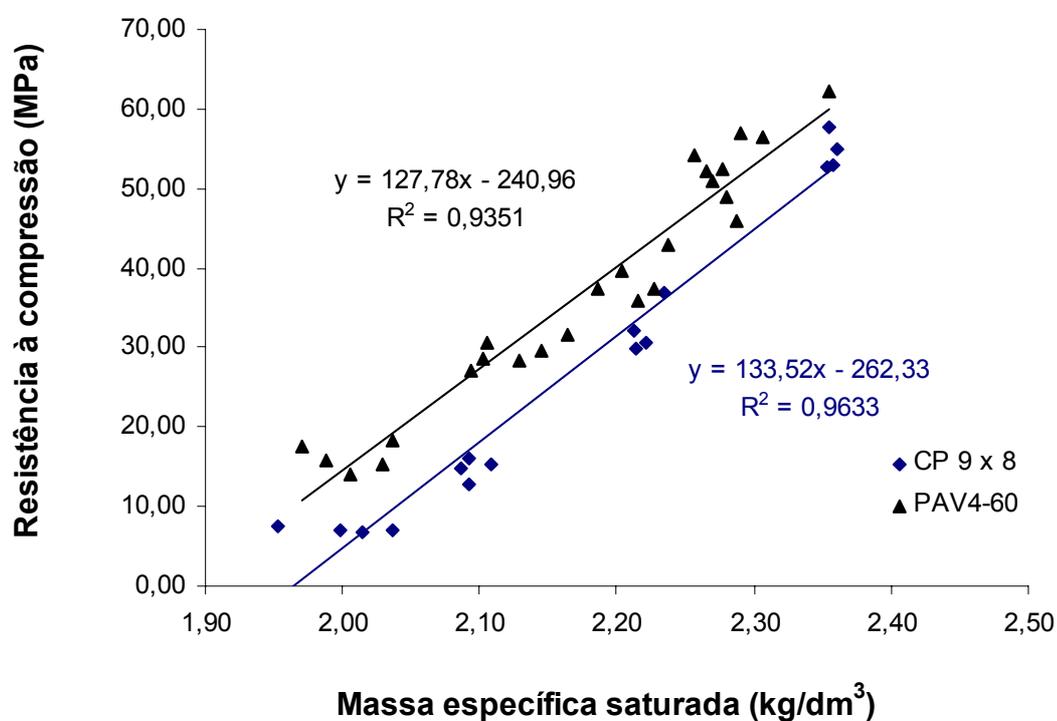


Figura 6.24 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV4-60

Tabela 6.9 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 60 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Peças | | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|---------|-------|-------------------------|--------|-------|------|------|-------|--------------------|----|----------------|
| | | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R ² |
| PAV1-60 | CP9x8 | -281,85 | 143,03 | 12,56 | 5,74 | 3,10 | 24,93 | 100,00 | 16 | 0,9780 |
| | PCP | -257,17 | 135,22 | 21,38 | 9,73 | 4,09 | 13,90 | 100,00 | 20 | 0,9148 |
| PAV2-60 | CP9x8 | -285,44 | 143,99 | 13,21 | 6,04 | 2,97 | 23,85 | 100,00 | 16 | 0,9760 |
| | PCP | -252,64 | 132,77 | 17,68 | 8,04 | 3,65 | 16,51 | 100,00 | 22 | 0,9316 |
| PAV3-60 | CP9x8 | -327,68 | 162,76 | 14,83 | 6,72 | 3,34 | 24,21 | 100,00 | 16 | 0,9767 |
| | PCP | -306,22 | 156,90 | 16,65 | 7,49 | 4,08 | 20,95 | 100,00 | 25 | 0,9502 |
| PAV4-60 | CP9x8 | -262,33 | 133,52 | 15,12 | 6,96 | 3,76 | 19,18 | 100,00 | 16 | 0,9633 |
| | PCP | -240,96 | 127,78 | 15,29 | 7,02 | 3,82 | 18,21 | 100,00 | 25 | 0,9351 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Tabela 6.10 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 60 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Peças | | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | confiabilidade (%) |
|---------|----------|---|----|---|----|-------|--------------------|
| | | SQR | GL | a | b | F | |
| PAV1-60 | PCP | 300,82 | 18 | 2 | 32 | 18,86 | 100,00 |
| | CP9x8 | 134,52 | 14 | | | | |
| | PCP + CP | 948,41 | 34 | | | | |
| PAV2-60 | PCP | 266,72 | 20 | 2 | 34 | 27,81 | 100,00 |
| | CP9x8 | 123,66 | 14 | | | | |
| | PCP + CP | 1029,01 | 36 | | | | |
| PAV3-60 | PCP | 382,76 | 23 | 2 | 37 | 24,22 | 100,00 |
| | CP9x8 | 155,87 | 14 | | | | |
| | PCP + CP | 1243,86 | 39 | | | | |
| PAV4-60 | PCP | 335,43 | 23 | 2 | 37 | 26,92 | 100,00 |
| | CP9x8 | 197,54 | 14 | | | | |
| | PCP + CP | 1308,50 | 39 | | | | |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Quando são comparadas as curvas obtidas para as PCP com as curvas dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (Figuras 6.21 a 6.24), percebe-se que existe uma diferença significativa (Tabela 6.10) a um nível de confiabilidade de 100 %, ou seja, para um dado valor de massa específica saturada, a resistência à compressão das PCP é sistematicamente superior ao resultado de resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Em princípio, essa diferença ocorreu em função da maior relação h/d existente para os corpos-de-prova 9 x 8 cm.

6.2.2.7 – Correlação entre massa específica saturada e resistência à compressão – PCP 80 mm

Nas Figuras 6.25 e 6.26, são apresentadas as curvas de correlação entre a massa específica saturada e a resistência à compressão das PCP de 80 mm (PAV1-80 e PAV2-80). Não foi possível estudar os PAV3-80, PAV4-80 e PAV5-80, por serem peças de pouca saída no mercado da Grande Florianópolis.

Fazendo-se uma análise estatística dos resultados obtidos (Tabela 6.11) percebe-se que existe uma correlação significativa, a um nível de confiabilidade de 100 % entre as variáveis estudadas (massa específica saturada e resistência à compressão). Com relação à dispersão dos pontos em relação as curvas ajustadas, houve uma maior dispersão no caso do PAV1-80 (valor de $R^2 = 0,85$). Já para o PAV2-80 e para as séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm, as dispersões obtidas foram baixas (valores de R^2 superiores a 0,92).

Tabela 6.11 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 80 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Peças | | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|---------|-------|-------------------------|--------|-------|-------|------|-------|--------------------|----|--------|
| | | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R^2 |
| PAV1-80 | CP9x8 | -240,08 | 122,99 | 11,10 | 5,07 | 2,67 | 24,25 | 100,00 | 16 | 0,9768 |
| | PCP | -245,63 | 127,45 | 24,70 | 11,03 | 4,96 | 11,56 | 100,00 | 25 | 0,8539 |
| PAV2-80 | CP9x8 | -279,06 | 142,06 | 14,45 | 6,77 | 2,28 | 20,99 | 100,00 | 12 | 0,9778 |
| | PCP | -256,32 | 133,19 | 17,21 | 8,04 | 2,73 | 16,58 | 100,00 | 24 | 0,9259 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

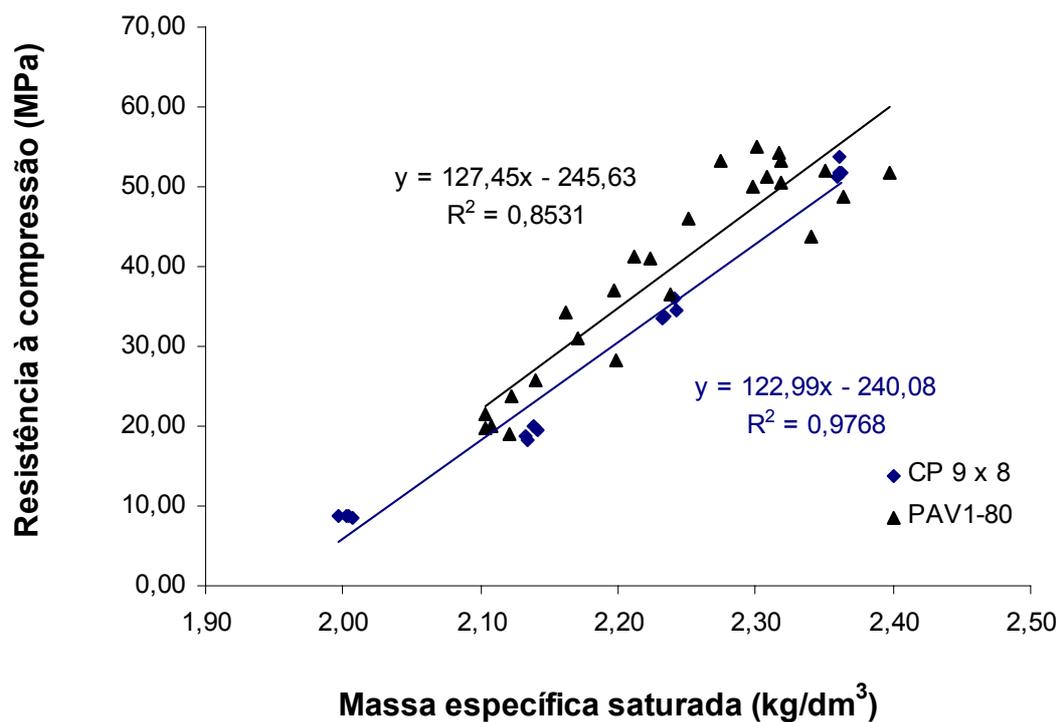


Figura 6.25 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV1-80

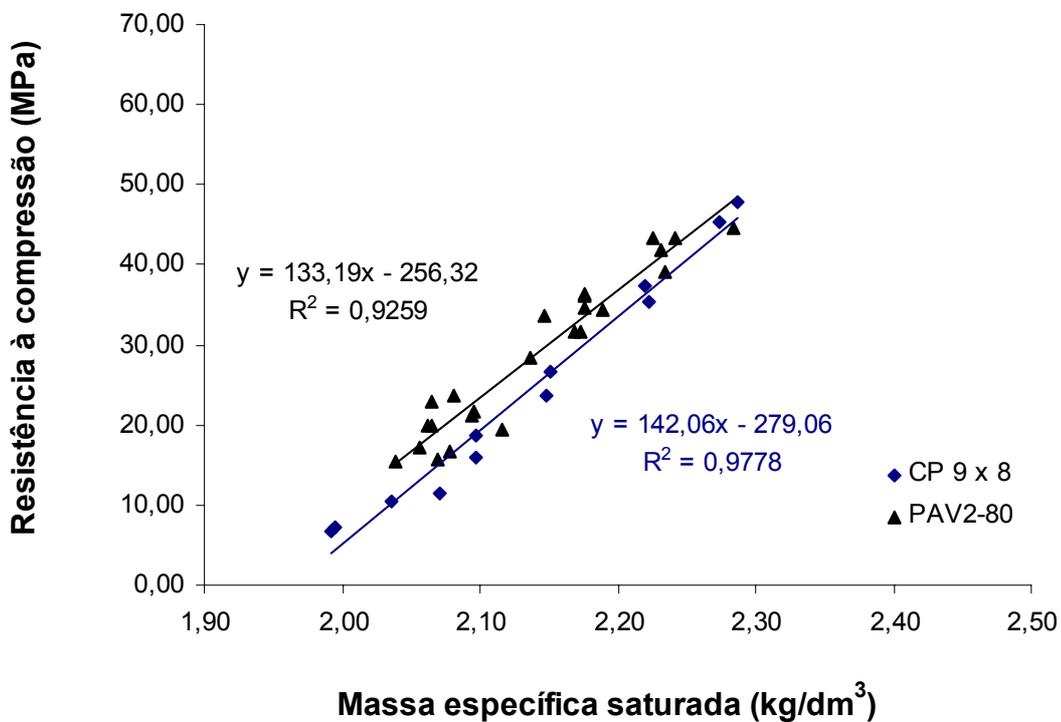


Figura 6.26 – Resistência à compressão x massa específica saturada – PAV2-80

Fazendo-se um estudo estatístico de comparação de funções lineares (Tabela 6.12) verifica-se que apesar da menor diferença entre as curvas das PCP de 80 mm e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, se comparado aos resultados obtidos para as peças de 60 mm de altura, ainda existe uma diferença significativa entre as mesmas, com um grau de confiabilidade superior a 98 %, ou seja, para uma mesma massa específica saturada, as resistências obtidas para os corpos-de-prova 9 x 8 cm e para as PCP com 80 mm de altura, diferem significativamente.

Tabela 6.12 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 80 mm de altura e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Peças | | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|---------|----------|---|----|---|----|------|--------------------|
| | | SQR | GL | a | b | F | confiabilidade (%) |
| PAV1-80 | PCP | 565,07 | 23 | 2 | 37 | 4,90 | 98,71 |
| | CP9x8 | 100,13 | 14 | | | | |
| | PCP + CP | 841,56 | 39 | | | | |
| PAV2-80 | PCP | 163,92 | 22 | 2 | 32 | 8,89 | 99,91 |
| | CP9x8 | 52,08 | 10 | | | | |
| | PCP + CP | 335,97 | 34 | | | | |

confiabilidade = 1 – significância (α)

6.2.2.8 – Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP de 60 e 80 mm de altura

Como houve uma diferença significativa nas regressões vistas anteriormente (Figuras 6.21 a 6.26), não se pode prever a resistência à compressão das PCP diretamente através da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Em função disso, foram determinadas as correlações entre a resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP com 60 e 80 mm de altura, apresentadas nas Figuras 6.27 e 6.28, respectivamente.

Essas curvas de correlação foram definidas tomando-se os valores de resistência à compressão das PCP e seus respectivos valores de massas específicas saturadas para a determinação da resistência à compressão equivalente dos corpos-de-prova, através das correlações de resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da massa específica saturada, apresentadas anteriormente nas Tabelas 6.9 e 6.11.

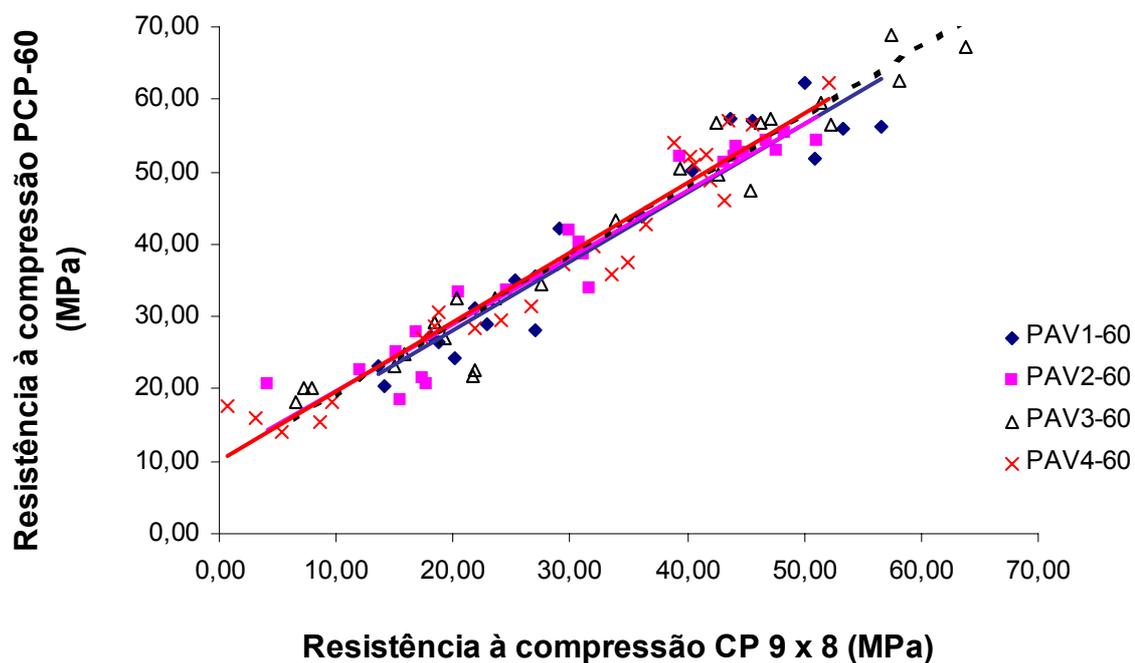


Figura 6.27 – Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova e das PCP com 60 mm de altura

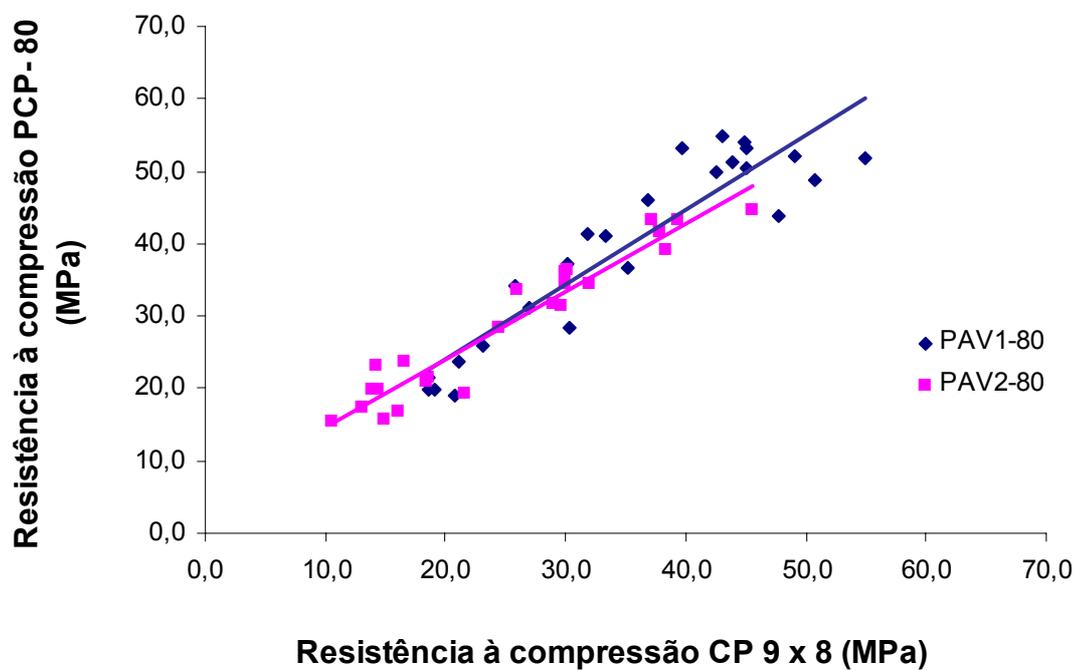


Figura 6.28 – Correlação entre a resistência à compressão dos corpos-de-prova e das PCP com 80 mm de altura

Fazendo-se uma análise estatística dos resultados obtidos (Tabela 6.13 e 6.14) pode-se verificar que existe uma correlação significativa, a um nível de confiabilidade de 100 % entre as variáveis estudadas (resistência à compressão das PCP pela resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm) e, as dispersões dos pontos em relação às curvas ajustadas foram baixas (valores de R^2 superiores a 0,91), com exceção da correlação obtida para o PAV1-80 onde o valor de R^2 foi de 0,85.

Tabela 6.13 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 60 mm de altura

| Peças | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|---------|-------------------------|------|------|------|------|-------|--------------------|----|--------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R^2 |
| PAV1-60 | 9,30 | 0,95 | 2,37 | 0,07 | 4,09 | 13,90 | 100,00 | 20 | 0,9148 |
| PAV2-60 | 10,56 | 0,92 | 1,89 | 0,06 | 3,65 | 16,51 | 100,00 | 22 | 0,9316 |
| PAV3-60 | 9,66 | 0,96 | 1,76 | 0,05 | 4,08 | 20,95 | 100,00 | 25 | 0,9502 |
| PAV4-60 | 10,09 | 0,96 | 1,67 | 0,05 | 3,82 | 18,21 | 100,00 | 25 | 0,9351 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Tabela 6.14 – Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP com 80 mm de altura

| Peças | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|---------|-------------------------|------|------|------|------|-------|--------------------|----|--------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R^2 |
| PAV1-80 | 3,16 | 1,04 | 3,30 | 0,09 | 4,96 | 11,56 | 100,00 | 25 | 0,8531 |
| PAV2-80 | 5,32 | 0,94 | 1,52 | 0,06 | 2,73 | 16,58 | 100,00 | 24 | 0,9259 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Através de estudos de comparação de funções lineares (Tabela 6.15 e 6.16), pode-se afirmar que, tanto para as peças com 60 mm como para as de 80 mm de altura, não existe diferença significativa entre os formatos de peças estudados com relação à resistência à compressão ($F < F_{0,05(a,b)}$). Neste caso, a função média obtida utilizando-se todos os pontos, pode ser empregada para estimativa da resistência das PCP em função da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, moldados com a mesma mistura. Nas Figuras 6.29 e 6.30, são apresentadas, respectivamente, as curvas médias para as PCP com 60 e 80 mm de altura, juntamente com os limites para previsão de valores médios e individuais para um grau de confiabilidade de 95%.

Tabela 6.15 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 60 mm

| Peças | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|-----------------|---|----|---|----|------|-----------------|
| | SQR | GL | a | b | F | $F_{0,05(a,b)}$ |
| PAV1-60 | 300,82 | 18 | 6 | 84 | 0,24 | 2,21 |
| PAV2-60 | 266,72 | 20 | | | | |
| PAV3-60 | 382,76 | 23 | | | | |
| PAV4-60 | 335,43 | 23 | | | | |
| TODAS AS PCP-60 | 1307,90 | 90 | | | | |

Tabela 6.16 – Resultados da análise de comparação de funções lineares para as PCP com 80 mm

| Peças | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|-----------------|---|----|---|----|------|-----------------|
| | SQR | GL | a | b | F | $F_{0,05(a,b)}$ |
| PAV1-80 | 565,07 | 23 | 2 | 45 | 0,57 | 3,20 |
| PAV2-80 | 163,92 | 22 | | | | |
| TODAS AS PCP-80 | 747,31 | 47 | | | | |

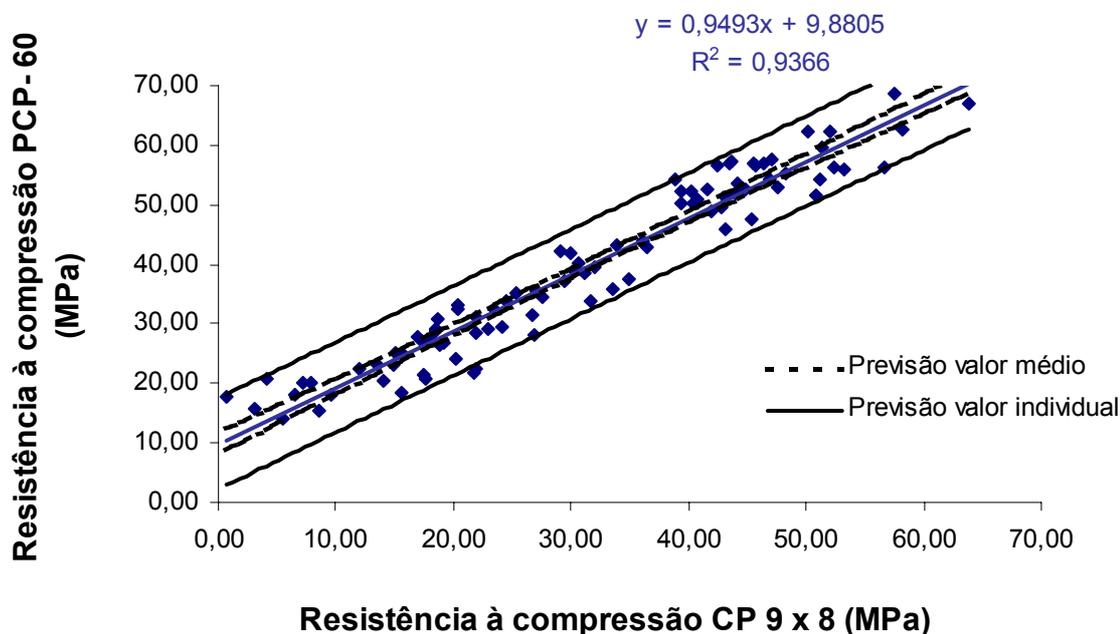


Figura 6.29 – Resistência à compressão das PCP – 60 mm – previsão de valores médio e individual

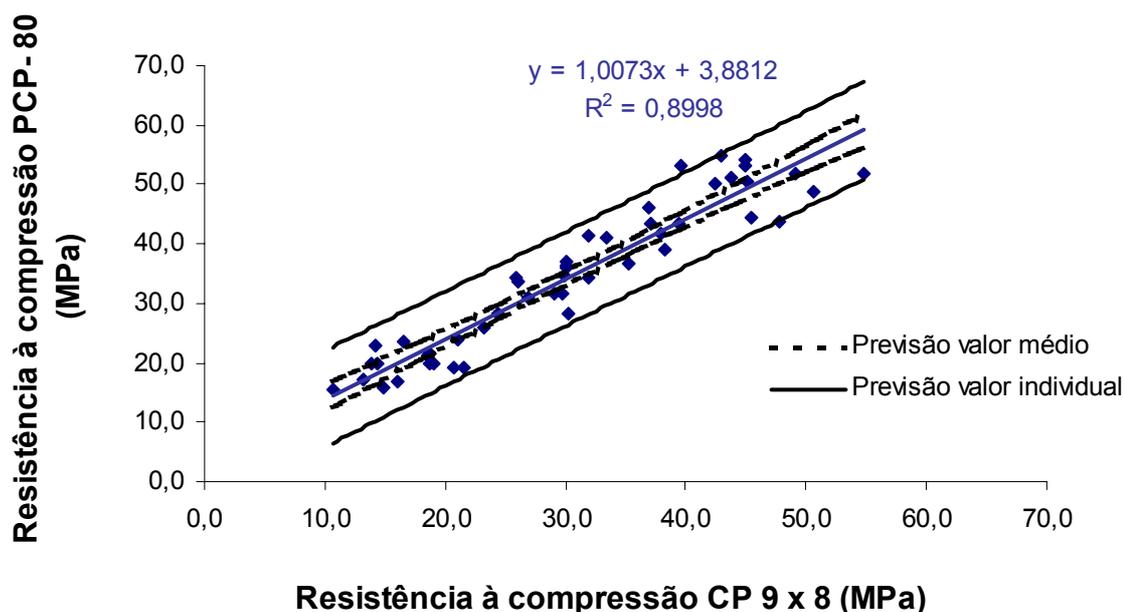


Figura 6.30 – Resistência à compressão das PCP – 80 mm – previsão de valores médio e individual

Fazendo-se uma análise de comparação de funções lineares entre as curvas de correlação de resistência à compressão das PCP em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, para as alturas de 60 e 80 mm, verifica-se que as referidas curvas diferem significativamente, com um grau de confiabilidade de 100 %. Na Tabela 6.17 e na Figura 6.31 são apresentados os resultados da análise estatística e as duas curvas de correlação para as PCP com 60 e 80 mm.

Tabela 6.17 – Resultados da análise de comparação de funções lineares - PCP de 60 e 80 mm

| Peças | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|---------------|---|-----|---|-----|-------|--------------------|
| | SQR | GL | a | b | F | confiabilidade (%) |
| PCP - 60 | 1307,90 | 90 | 2 | 137 | 19,63 | 100,00 |
| PCP - 80 | 747,31 | 47 | | | | |
| PCP - 60 + 80 | 2644,12 | 139 | | | | |

confiabilidade = 1 – significância (α)

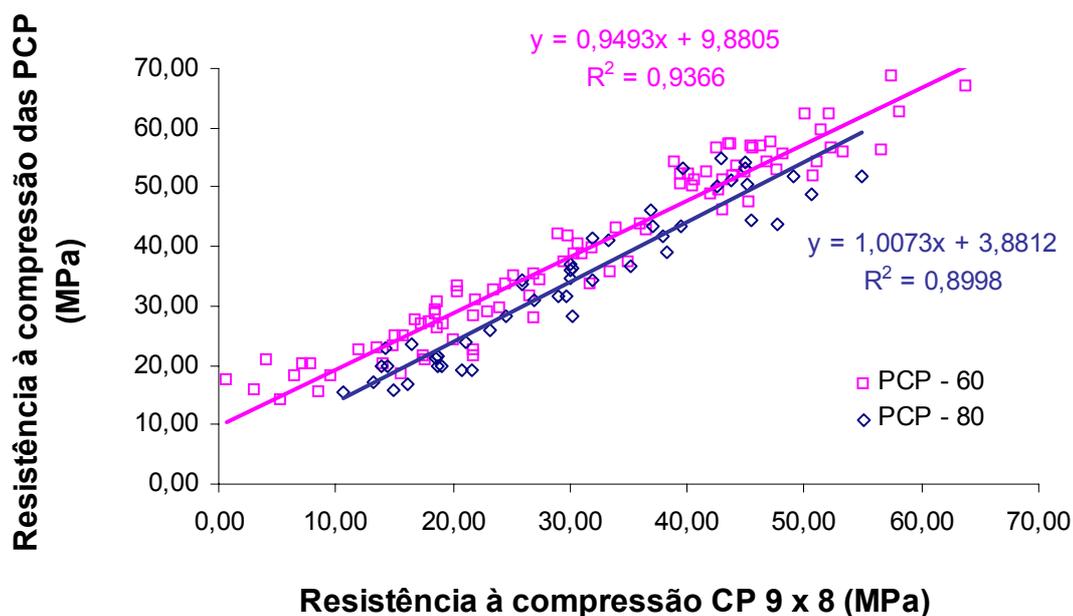


Figura 6.31 – Resistência à compressão das PCP de 60 e 80 mm em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

6.2.2.9 – Influência do consumo de cimento nas correlações obtidas para as PCP de 60 e 80 mm e os corpos-de-prova 9 x 8 cm

Conforme mencionado anteriormente, as PCP e os seus respectivos corpos-de-prova 9 x 8 cm foram moldados empregando-se dois traços apresentados na Tabela 6.6. Os diferentes níveis de resistência obtidos foram conseguidos a base de variações nos graus de compactação das referidas peças. Por isso, nesta parte do trabalho, foi avaliada a influência do consumo de cimento (traços mais ricos), nas correlações obtidas para previsão de resistência à compressão das PCP em função da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Foram produzidas duas séries de PCP (PAV2-60 e PAV2-80), com suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm, conforme descrito anteriormente, empregado-se a proporção apresentado na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Proporção em massa dos materiais (kg) utilizados para o presente teste

| Cimento | Brita "0" | Areia média | Areia fina |
|---------|-----------|-------------|------------|
| 210 | 210 | 720 | 80 |

Utilizando-se os mesmos procedimentos descritos nos itens anteriores, foram traçadas as curvas de resistência à compressão das PCP em função da resistência dos corpos-de-prova, apresentadas nas Figuras 6.32 e 6.33, juntamente com as curvas médias de correlação, mostradas anteriormente nas Figuras 6.29 e 6.30. Os resultados do presente estudo podem ser encontrados no ANEXO – III.

Fazendo-se uma comparação de funções lineares (Tabelas 6.19 e 6.20), pode-se concluir que o consumo de cimento não influencia nas correlações obtidas para a previsão das resistências das PCP de 60 e 80 mm em função da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm ($F < F_{0,05(a,b)}$).

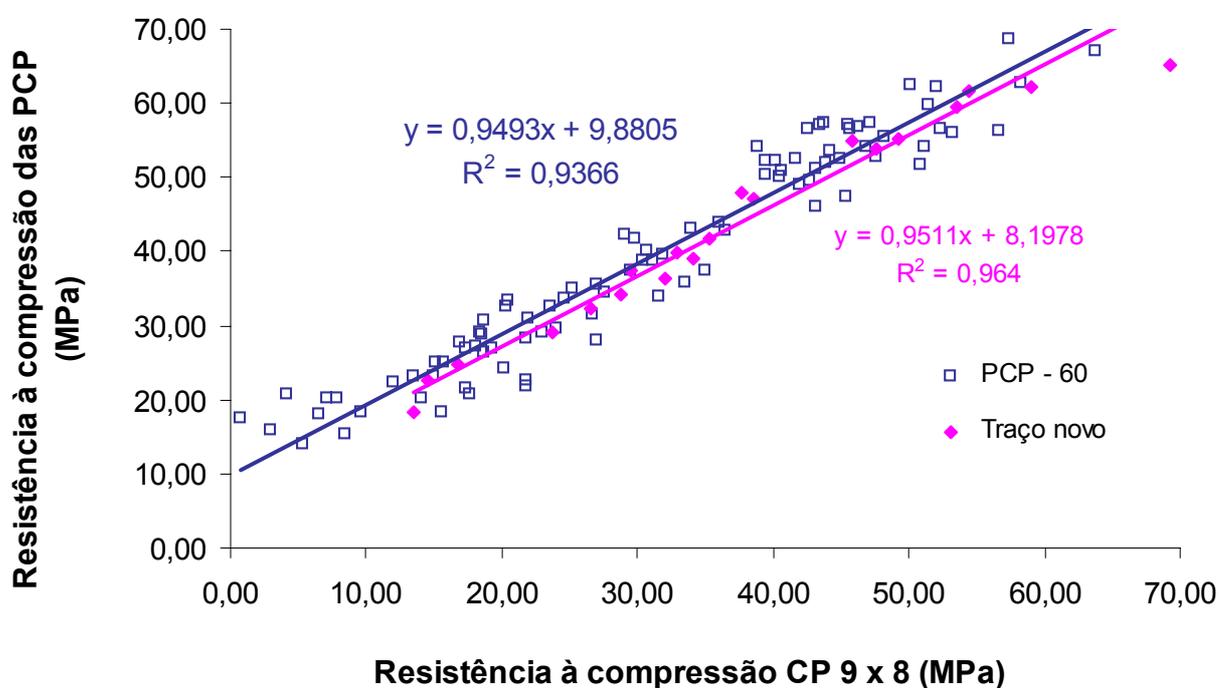


Figura 6.32 – Resistência à compressão das PCP de 60 mm em função da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – curva média das PCP - 60 e curva com traço mais rico em cimento

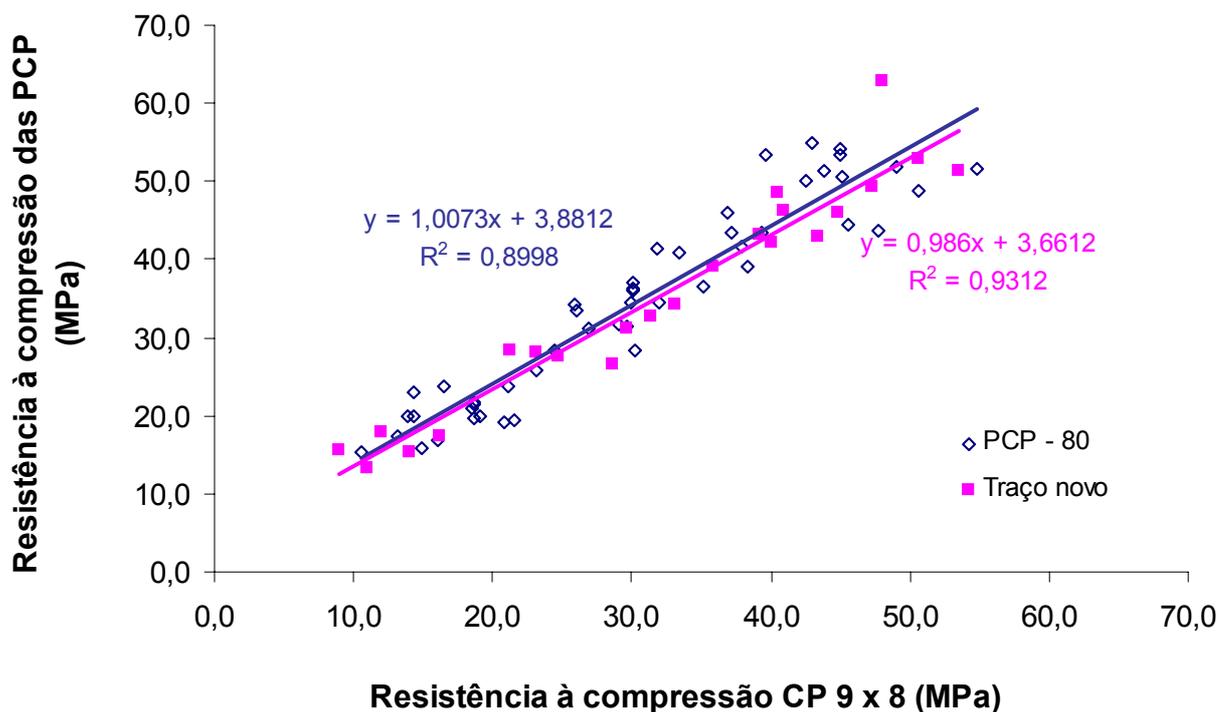


Figura 6.33 – Resistência à compressão das PCP de 80 mm em função da resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – curva média das PCP - 80 e curva com traço mais rico em cimento

Tabela 6.19 – Resultados da análise de comparação de funções lineares - PCP - 60 e Traço novo (consumo maior de cimento)

| Peças | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|-----------------------|---|-----|---|-----|------|-----------------|
| | SQR | GL | a | b | F | $F_{0,05(a,b)}$ |
| PCP - 60 | 1307,90 | 90 | 2 | 110 | 1,62 | 3,08 |
| Traço novo | 195,33 | 20 | | | | |
| PCP - 60 + Traço novo | 1547,42 | 112 | | | | |

Tabela 6.20 – Resultados da análise de comparação de funções lineares - PCP - 80 e Traço novo (consumo maior de cimento)

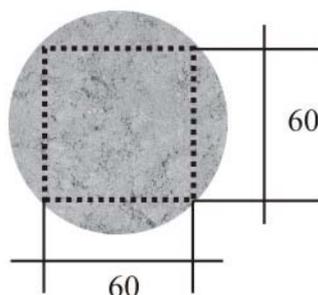
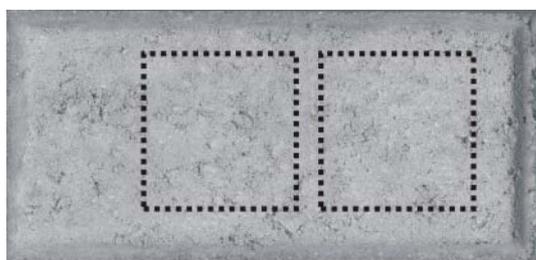
| Peças | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|-----------------------|---|----|---|----|------|-----------------|
| | SQR | GL | a | b | F | $F_{0,05(a,b)}$ |
| PCP - 80 | 747,31 | 47 | 2 | 68 | 0,44 | 3,13 |
| Traço novo | 293,35 | 21 | | | | |
| PCP - 80 + Traço novo | 1054,08 | 70 | | | | |

6.2.2.10 – Avaliação da resistência de prismas serrados provenientes das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Conforme apresentado anteriormente nas Figuras 6.21 a 6.24 para as PCP com 60 mm de altura e, nas Figuras 6.25 e 6.26 para as PCP com 80 mm de altura, houve uma diferença significativa entre as curvas de resistência à compressão em função da massa específica saturada das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Acredita-se que essas diferenças possam ter sido ocasionadas pela diferença no formato das peças, ou em função da diferença do sistema de moldagem (eliminação dos vazios); as PCP eram submetidas a um efeito de vibração e os corpos-de-prova 9 x 8 cm compactados sem o referido efeito.

Em função disso, foram produzidas uma série de PCP do tipo PAV1-80, juntamente com uma série de corpos-de-prova 9 x 8 cm, empregando-se os procedimentos apresentados anteriormente, para a moldagem das referidas peças, objetivando a extração de pequenos prismas de 60 x 60 x 80 mm, para a verificação da possível causa das diferenças nas resistências.

Quando as peças chegaram ao LMCC – UFSC, 24 horas após a moldagem, foram serrados, com o auxílio de uma serra diamantada, refrigerada a água, os prismas de 60 x 60 x 80 mm, sendo 2 prismas para cada PCP e um prisma para cada corpo-de-prova 9 x 8 cm (Figura 6.34a).



a) esquema de extração dos prismas



b) detalhe do ensaio de compressão

Figura 6.34 – a) esquema dos prismas de 60 x 60 x 80 mm serrados dos PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm; b) detalhe do rompimento dos prismas

Imediatamente após a extração, as peças foram imersas em água por 14 dias, quando então foram determinadas as massas específicas saturadas das mesmas. Logo após essa etapa, os prismas foram capeados com pasta de cimento e colocados novamente na água até a data do rompimento (28 dias). Na Figura 6.34b é apresentado um detalhe do rompimento dos prismas de 60 x 60 x 80 mm.

Na Figura 6.35 encontra-se o gráfico de resistência à compressão por massa específica saturadas para os prismas de 60 x 60 x 80 mm extraídos dos PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Fazendo-se uma comparação de funções lineares (Tabela 6.21) pode-se afirmar que as curvas de resistência dos prismas de 60 x 60 x 80 mm, extraídos dos PAV1-80 e corpos-de-prova 9 x 8 cm, em função da massa específica saturada diferem significativamente a um grau de confiabilidade de 99,9 %, ou seja, a diferença na resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm não é causada pela diferença no formato das referidas peças, pois ao serem extraídos prismas de iguais dimensões, as diferenças encontradas anteriormente nas resistências se mantiveram.

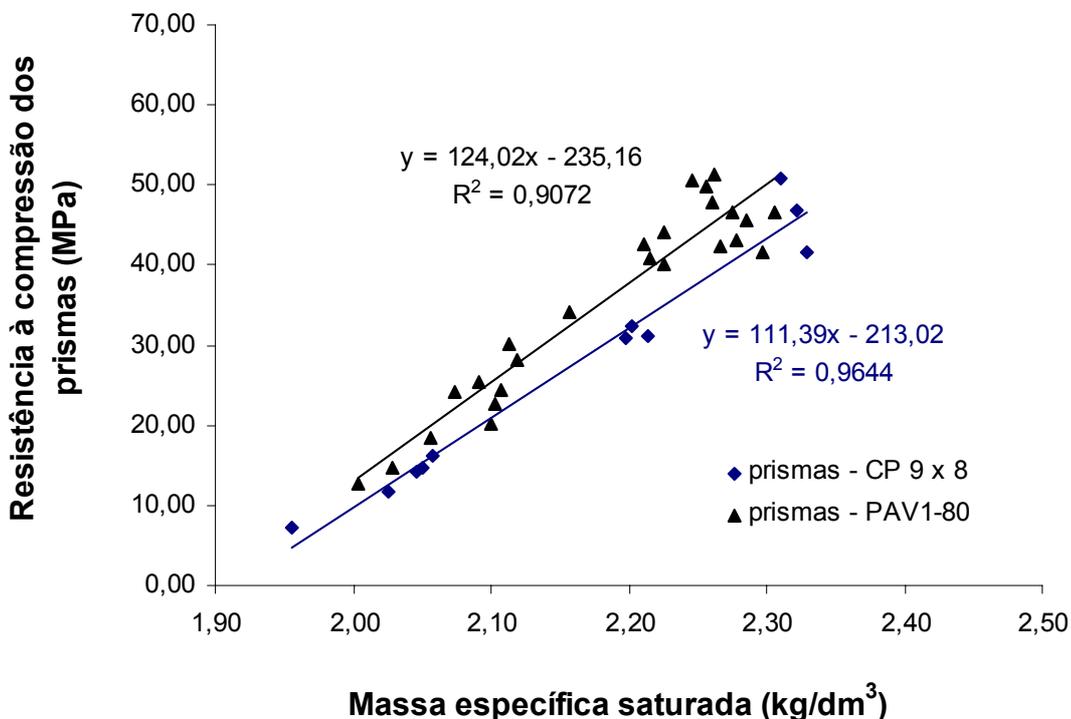


Figura 6.35 – Resistência à compressão dos prismas de 60 x 60 x 80 mm obtidos dos PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Tabela 6.21 – Resultados da análise de comparação de funções lineares – prismas extraídos dos PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Prismas | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | confiabilidade (%) |
|--------------------|---|----|---|----|------|--------------------|
| | SQR | GL | a | b | F | |
| PAV1-80 | 81,77 | 9 | 2 | 32 | 8,63 | 99,90 |
| CP 9 x 8 | 331,77 | 23 | | | | |
| PAV1-80 + CP 9 x 8 | 636,49 | 34 | | | | |

confiabilidade = 1 – significância (α)

6.2.3 – ESTUDOS DE CASO EMPREGANDO-SE O EQUIPAMENTO DE MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA 9 X 8 cm

Para avaliar a sensibilidade do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm na determinação da energia de compactação e a potencialidade do mesmo na previsão da textura das PCP, foram estudados três diferentes traços:

- Traço 1 – Traço empregado pelo fabricante onde os estudos da presente tese foram desenvolvidos. Optou-se por empregar esse traço por ser um traço consagrado regionalmente e pela familiaridade do autor com relação ao desempenho da referida proporção;
- Traço 2 – Esse traço foi definido mediante a substituição volumétrica dos agregados miúdos naturais do Traço 1, por uma areia artificial fornecida por uma pedreira local. O emprego de areia artificial como agregado miúdo já é uma realidade no estado de Santa Catarina, tendendo a aumentar cada vez mais em função das leis ambientais que vêm sendo aprovadas; por isso a adoção do referido material no presente trabalho;
- Traço 3 – O Traço 3 foi definido substituindo-se volumetricamente todos os agregados do Traço 1, por uma mistura que se enquadrava dentro da faixa recomendada pela Columbia (Figura 5.1). Por ser um dos maiores fabricantes de equipamentos de vibro-compressão.

Além dos testes para avaliação do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, o presente estudo teve como objetivo avaliar também a influência do teor de umidade das misturas na resistência à compressão, na energia de compactação e na condição superficial dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, com relação à umidade superficial, na tentativa de propor uma metodologia para a determinação da quantidade ideal de água de uma mistura.

6.2.3.1 – Caracterização dos materiais

Cimento

O cimento empregado foi o CPV ARI-RS, cimento esse comumente utilizado pelos fabricantes de artefatos de concreto. A caracterização desse material foi fornecida pelo próprio fabricante e encontra-se apresentada na Tabela 6.22.

Tabela 6.22 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CPV – ARI-RS utilizado no trabalho

| | Item de controle | Unid. | Média | Desvio | Mínimo | Máximo |
|-----------------|--------------------------------|--------------------|-------|--------|--------|--------|
| Ensaio físicos | Material Retido #200 (mesh) | % | 0,10 | 0,03 | 0,00 | 0,20 |
| | Material Retido #325 (mesh) | % | 1,10 | 0,22 | 0,50 | 1,80 |
| | Blaine | cm ² /g | 5109 | 378 | 3250 | 5340 |
| | Água de Consistência | % | 31,40 | 0,24 | 31,00 | 31,90 |
| | Início de Pega | Horas | 3:51 | 0:22 | 3:20 | 5:10 |
| | Fim de Pega | Horas | 4:58 | 0:27 | 3:40 | 6:20 |
| | Expansibilidade a Quente | mm | 0,21 | 0,28 | 0,00 | 1,00 |
| | Resistência R1 | MPa | 26,36 | 1,00 | 24,60 | 28,00 |
| | Resistência R3 | MPa | 34,81 | 0,73 | 32,70 | 35,80 |
| | Resistência R7 | MPa | 39,45 | 1,01 | 37,20 | 40,90 |
| Resistência R28 | MPa | 50,34 | 1,45 | 47,70 | 52,40 | |
| Ensaio químicos | Perda ao Fogo | % | 3,18 | 0,21 | 2,69 | 3,50 |
| | SiO ₂ | % | 23,79 | 0,30 | 23,13 | 24,34 |
| | AL ₂ O ₃ | % | 7,44 | 0,13 | 7,08 | 7,73 |
| | Fe ₂ O ₃ | % | 3,15 | 0,12 | 2,92 | 3,36 |
| | CaO | % | 51,08 | 0,30 | 50,48 | 51,77 |
| | MgO | % | 5,38 | 0,05 | 5,30 | 5,47 |
| | K ₂ O | % | 1,19 | 0,02 | 1,15 | 1,21 |
| | Na ₂ O | % | 0,17 | 0,01 | 0,15 | 0,18 |
| | SO ₃ | % | 3,62 | 0,08 | 3,47 | 3,77 |
| | Resíduo Insolúvel | % | 13,08 | 0,47 | 11,80 | 14,25 |
| CO ₂ | % | 2,19 | 0,17 | 1,94 | 2,49 | |

Massa específica do cimento = 2,97 kg/dm³

Agregados

Para o presente estudo, foram empregadas três areias naturais, provenientes de rio, uma areia artificial, um brita zero granítica e um agregado basáltico, com grãos retido na peneira ¼”, que não se enquadrava nas classes estabelecidas pela NBR 7211 (1983). Na Tabela 6.23 são apresentadas as porcentagens retidas acumuladas e módulos de finura, definidos de acordo com a NBR 7217 (1992), bem como a porcentagem de material pulverulento dos referidos agregados.

Tabela 6.23 – Composição granulométrica dos agregados empregados no estudo

| # (mm) | Porcentagens retidas acumuladas | | | | | |
|--------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| | Areia natural 1 (AN1) | Areia natural 2 (AN2) | Areia natural 3 (AN3) | Areia artificial (AA) | Brita “0” (B0) | Material ¼” (A¼”) |
| 9,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37 | 0 |
| 4,8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 77 | 39 |
| 2,4 | 13 | 0 | 4 | 5 | 98 | 99 |
| 1,2 | 38 | 0 | 19 | 34 | 98 | 100 |
| 0,6 | 65 | 0 | 47 | 59 | 98 | 100 |
| 0,3 | 86 | 4 | 73 | 76 | 98 | 100 |
| 0,15 | 96 | 89 | 90 | 86 | 99 | 100 |
| Fundo | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| MF | 2,99 | 0,93 | 2,33 | 2,60 | 5,70 | 5,38 |
| % pul. | 2,00 | 2,15 | 3,53 | 7,91 | 1,19 | 0,13 |

MF = módulo de finura

% Pul = porcentagem de material pulverulento

Cabe salientar que para a composição da curva granulométrica empregada no Traço 3, foi utilizado uma pequena quantidade de material retido na #1,2 mm, proveniente da AN1.

Na Tabela 6.24 são apresentadas as massas específicas, determinadas pelo processo de picnômetro, dos agregados utilizados no presente trabalho.

Tabela 6.24 – Massas específicas dos agregados empregados

| | Areia natural 1 (AN1) | Areia natural 2 (AN2) | Areia natural 3 (AN3) | Areia artificial (AA) | Brita “0” (B0) | Material ¼” (A¼”) |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| Massa específica (kg/dm ³). | 2,62 | 2,64 | 2,61 | 2,63 | 2,62 | 2,74 |

No entender do autor, a forma do agregado é um parâmetro importante a ser determinado, principalmente, quando estão envolvidos agregados bastante distintos com relação ao formato do grão. Em função da inexistência de um método de ensaio prático e consagrado para se avaliar quantitativamente a forma do agregado, principalmente em se tratando de agregados miúdos, foi proposto neste trabalho um método para avaliação dessa propriedade, com base na AFNOR XP P18-540 (1997) e com auxílio de ferramentas computacionais (scanner e programas de tratamento de imagem). O método sugerido e aplicado aqui se encontra detalhado no ANEXO B.

Na Tabela 6.25 são apresentados os resultados de coeficiente de forma dos agregados utilizados no presente trabalho.

Tabela 6.25 – Coeficiente de forma dos agregados empregados

| | Areia natural 1 (AN1) | Areia natural 2 (AN2) | Areia natural 3 (AN3) | Areia artificial (AA) | Brita “0” (B0) | Material ¼” (A¼”) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| Coeficiente de forma | 0,225 | 0,203 | 0,185 | 0,116 | 0,164 | 0,138 |

6.2.3.2 – Traços empregados

As porcentagens em massa dos agregados empregados nos três traços citados anteriormente são apresentadas na Tabela 6.26.

Tabela 6.26 – Porcentagem em massa dos agregados empregados para a confecção dos traços

| Agregados | Traço 1 | Traço 2 | Traço 3 |
|-------------------|---------|---------|---------|
| AN1 | 69 % | - | 33 % |
| AN2 | 10 % | - | - |
| AN3 | - | - | 38 % |
| AA | - | 80 % | - |
| B0 | 21 % | 20 % | - |
| A¼” | - | - | 23 % |
| #1,2 ¹ | - | - | 6 % |

1 – Material retido na # 1,2 mm, proveniente da areia natural 1, para o ajuste da curva granulométrica proposta pela Columbia.

Nas Figuras 6.36 e 6.37 são apresentados, respectivamente, os gráficos das curvas granulométricas resultantes para três traços empregados no presente trabalho e a curva granulométrica resultante do Traço 3 em relação aos limites prescritos pela Columbia. Vale ressaltar a necessidade do material retido na # 1,2 mm para o ajuste da curva do Traço 3, pois somente com os agregados disponíveis na região da grande Florianópolis não era possível o ajuste da curva dentro destes limites.

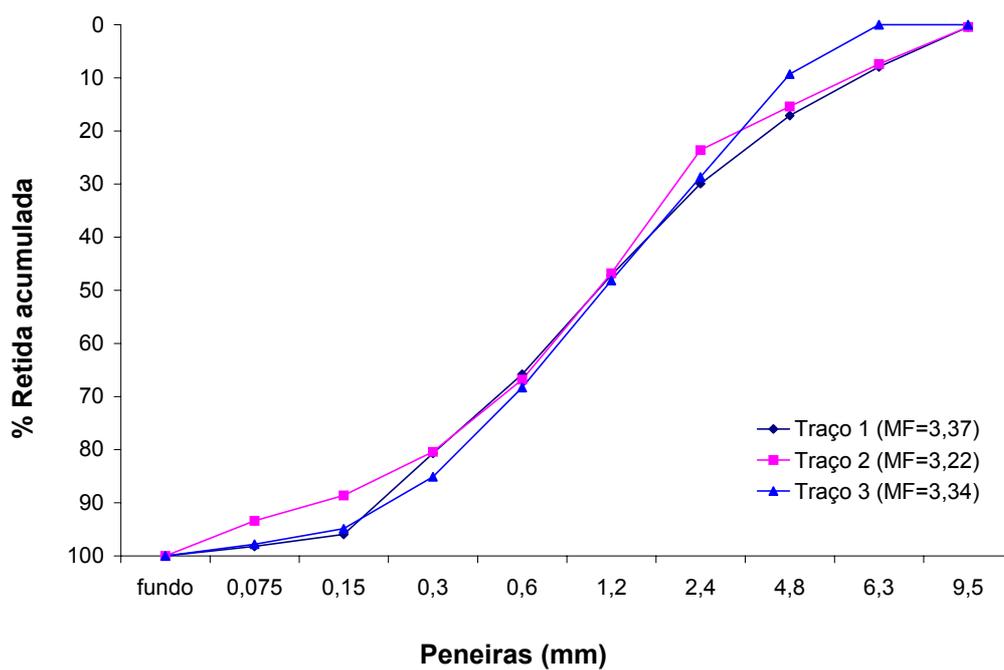


Figura 6.36 – Curvas granulométricas resultantes empregadas nos Traços 1, 2 e 3

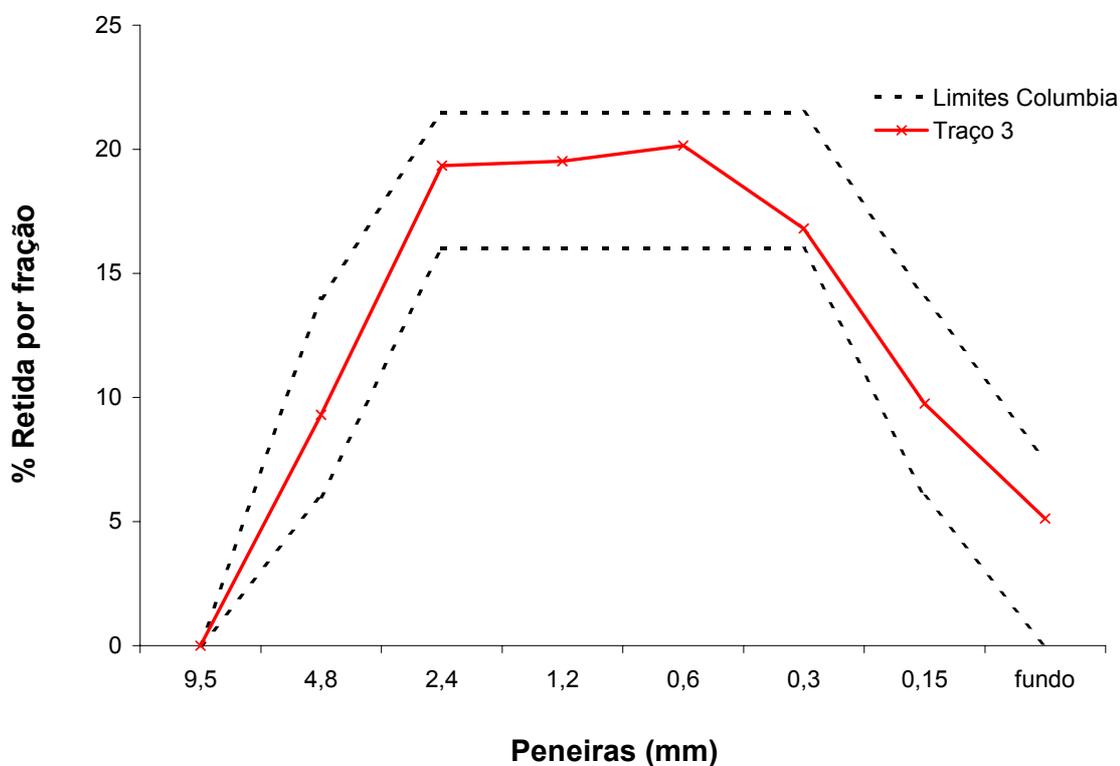


Figura 6.37 – Curva granulométrica resultante empregada no Traço 3 juntamente com os limites prescritos pela Columbia

Considerando-se os coeficientes de forma apresentados na Tabela 6.25 e as porcentagens em massa dos agregados empregados em cada traço (Tabela 6.26) foram determinados os coeficientes de forma dos três traços utilizados no presente estudo (Tabela 6.27).

Tabela 6.27 – Coeficiente de forma dos traços utilizados no presente estudo

| | Traço 1 | Traço 2 | Traço 3 |
|----------------------|---------|---------|---------|
| Coeficiente de forma | 0,210 | 0,126 | 0,190 |

Para os três traços empregados foi adotada uma proporção volumétrica fixa de 1: 6,42 (cimento : agregados), por ser essa a proporção volumétrica equivalente aos traços utilizados pela fábrica onde os trabalhos foram desenvolvidos.

6.2.3.3 – Moldagem das peças

Corpos-de-prova 9 x 8 cm

Os corpos-de-prova 9 x 8 cm foram moldados empregando-se o equipamento e a seqüência de moldagem descrita anteriormente no item 6.2.1, utilizando-se as proporções apresentadas na Tabela 6.28.

Tabela 6.28 – Proporções em massa dos materiais empregados na confecção dos Traços 1, 2 e 3

| Materiais | Traço 1 | | Traço 2 | | Traço 3 | |
|----------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|
| | Unitário | Qtd. por virada (g) | Unitário | Qtd. por virada (g) | Unitário | Qtd. por virada (g) |
| Cimento | 1,00 | 1850 | 1,00 | 1850 | 1,00 | 1850 |
| AN1 | 3,88 | 7181 | - | - | 1,87 | 3456 |
| AN2 | 0,54 | 997 | - | - | - | - |
| AN3 | - | - | - | - | 2,15 | 3980 |
| AA | - | - | 4,50 | 8324 | - | - |
| B0 | 1,20 | 2220 | 1,12 | 2081 | - | - |
| A ^{1/4} '' | - | - | - | - | 1,30 | 2409 |
| #1,2 ¹ | - | - | - | - | 0,34 | 628 |
| Aditivo ¹ | 0,35% | 6,5 | 0,35% | 6,5 | 0,35% | 6,5 |

¹ – Aditivo incorporador de ar que era empregado pela fábrica – (0,35% - proporção média indicada pelo fabricante do aditivo).

Os concretos foram produzidos em um misturador com capacidade de mistura de 12 litros (volume da cuba igual a 20 litros) obedecendo-se a seguinte seqüência:

- mistura a seco de todos os materiais (cimento + agregados) por 1 minuto e 30 segundos

- parada para adição da água e aditivo
- mistura por mais 1 minuto e 30 segundos

Em função das diferenças nas massas específicas dos agregados, nesta fase do trabalho optou-se por trabalhar com relações a/c fixas, variando entre 0,40 e 0,53, ao invés de se manter fixas as relações água / materiais secos. Esse procedimento foi adotado para que o volume de água dentro dos diferentes traços se mantivesse constante.

Para cada virada eram moldados 6 corpos-de-prova, mantendo-se fixa a porcentagem de volume de sólidos, e igual a 78,6%. Essa porcentagem de volume de sólidos foi definida em função de testes realizados no próprio equipamento de vibro-compressão. Com o mesmo traço utilizado na produção das PCP com 80 mm de altura (Tabela 6.6), foram moldadas PCP do tipo PAV1-80, variando-se o tempo de alimentação e determinando-se o tempo de vibro-compressão resultante. Após a etapa de moldagem das peças foram determinados os pesos verdes, alturas e volume médio das mesmas, permitindo a definição da curva de porcentagem de volume de sólidos em função do tempo de vibro-compressão para o equipamento da Montana MBX – 975 (Figura 6.38).

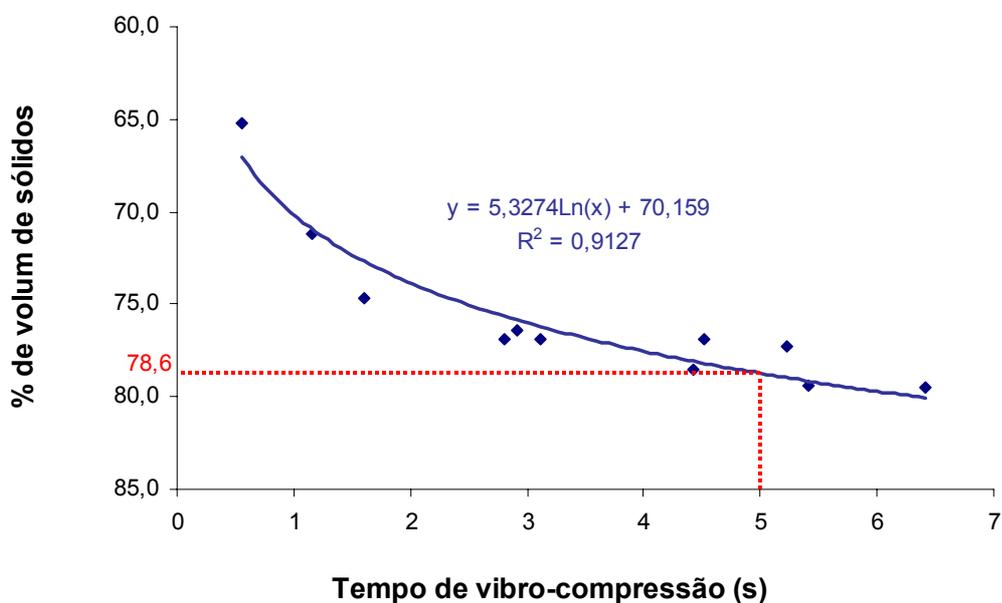


Figura 6.38 – Definição da porcentagem de volume de sólidos em função dos resultados encontrados na produção dos PAV1-80 no equipamento da Montana MBX 975

Como o tempo usual de vibro-compressão das PCP com 80 mm de altura gira em torno de 5 segundos para o equipamento citado, verifica-se, através da curva apresentada na Figura 6.38, que a porcentagem de volume de sólidos resultante obtida para as PCP fica em torno de 78,6 %.

Na Tabela 6.29 encontram-se as relações água / cimento adotadas e as quantidades de água adicionada em cada mistura, bem como as massas dos corpos-de-prova 9 x 8 cm para a porcentagem de volume de sólidos de 78,6%, em função dos traços empregados.

Tabela 6.29 – Relações água / cimento, quantidades de água e massa dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, para uma porcentagem de volume de sólidos de 78,6%, em função dos traços adotados

| a/c | Água/virada (g) | Massa cp 9x 8 cm por virada (g) | | |
|------|-----------------|---------------------------------|---------|---------|
| | | Traço 1 | Traço 2 | Traço 3 |
| 0,40 | 735 | 1134 | 1135 | 1141 |
| 0,43 | 796 | 1140 | 1140 | 1146 |
| 0,46 | 857 | 1145 | 1146 | 1152 |
| 0,50 | 919 | 1150 | 1151 | 1157 |
| 0,53 | 980 | 1156 | 1156 | 1162 |

Durante a moldagem dos corpos-de-prova, eram determinados os números de golpes para a compactação dos mesmos, bem como verificadas as condições dos referidos corpos-de-prova, com relação a umidade superficial.

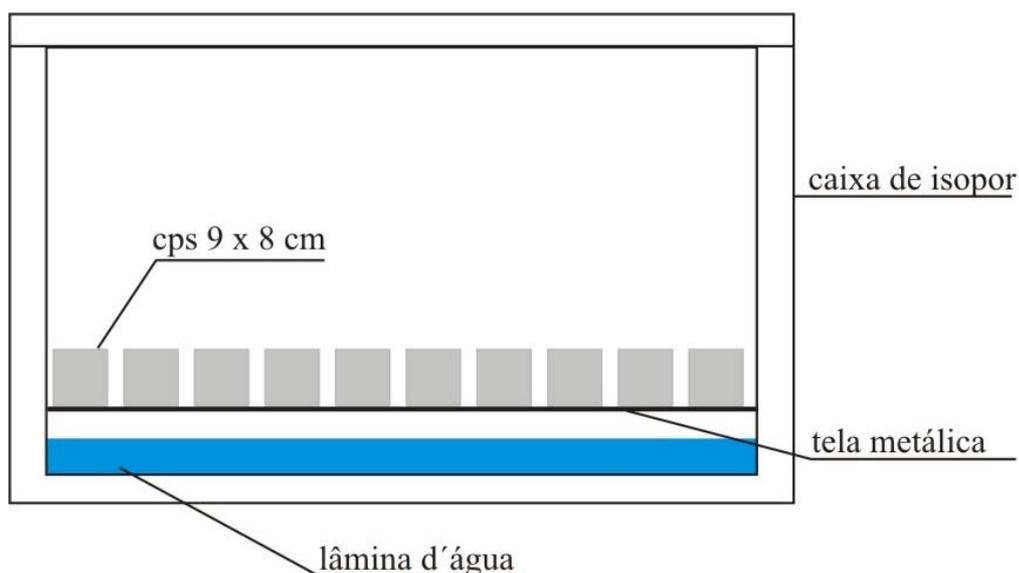


Figura 6.39 – Esquema do procedimento de cura dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Depois da moldagem, os corpos-de-prova 9 x 8 cm eram conduzidos a uma caixa de isopor, com uma lâmina de água no fundo (Figura 6.39) para que fosse realizada a cura nas primeiras 24 horas. Após esse período, os mesmos eram imersos em um tanque com água, por um período de 14 dias, quando então eram retirados para que fossem capeados com pasta de cimento. Terminada a fase de capeamento, os corpos-de-prova eram imersos novamente na água até a data de rompimento (28 dias).

PCP e corpos-de-prova 9 x 8 cm – avaliação da textura

Para avaliar a potencialidade da previsão da textura das PCP através dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, foram moldadas algumas PCP do tipo PAV1-80, no próprio equipamento de vibro-compressão (MONTANA MBX-975), utilizando-se o traço apresentado na Tabela 6.6 para a produção das PCP com 80 mm de altura e, variando-se o grau de compacidade, através de variações no tempo de alimentação do equipamento, para a obtenção de peças com diferentes texturas (peças com grau de compacidade mais elevado \Rightarrow texturas mais fechadas – Figura 6.40).

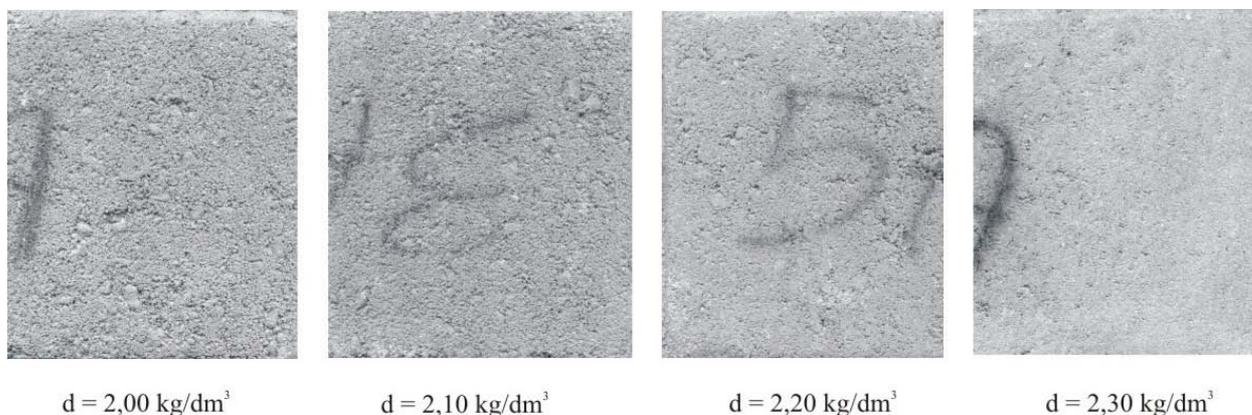


Figura 6.40 – Detalhe das texturas dos PAV1-80 em função do aumento do grau de compacidade (massa específica no estado verde)

Simultaneamente à moldagem das PCP, foram moldados corpos-de-prova 9 x 8 cm, empregando-se a mesma mistura e variando-se os graus de compacidade de forma a obter valores de massa específica verde da mesma ordem dos valores obtidos para as PCP, produzidas no equipamento de vibro-compressão.

Ambas as peças (PCP e corpos-de-prova 9 x 8 cm) foram submetidas à cura a vapor, que englobava as seguintes fases:

- 1 hora de descanso após a moldagem das peças, com a câmara fechada, para se processar as reações iniciais;
- 1 hora de aplicação de vapor, onde a temperatura média dentro da câmara atingia 70°C;
- 1 hora de descanso, sem aplicação de vapor e com a câmara fechada;
- 1 hora com a câmara aberta para o resfriamento das peças.

Cerca de 24 horas após a moldagem das peças (PCP e corpos-de-prova 9 x 8 cm) procedeu-se a coleta das mesmas e o transporte ao LMCC-UFSC. Ao chegarem ao laboratório, todas as peças tiveram suas superfícies superiores lavadas e escovadas, para a remoção da sujeira. Após essa etapa, as mesmas foram secas ao ar por um período de aproximadamente 7 dias, para posterior avaliação da textura. Essa avaliação foi feita de forma visual e empregando-se o ensaio prescrito pela ASTM E 965 – 87, com algumas modificações. Como o tamanho dos poros superficiais das PCP é menor do que os poros superficiais dos outros tipos de revestimentos, o material empregado no presente trabalho foi a fração retida na # 0,15 mm da AN-2, utilizada na composição do traço 1 para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Além da alteração do material, a quantidade utilizada foi reduzida de 25.000 mm³ para 500 mm³, em função da dimensão disponível para ensaio, principalmente em se tratando dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Para o espalhamento desse material era utilizado um dedal de plástico, procedendo-se movimentos circulares no sentido horário, com velocidade constante e aplicando-se sempre um mesmo nível de pressão. A etapa de espalhamento da areia terminava quando a mancha não sofria mais alterações de dimensão; após a fase de espalhamento da areia, determinavam-se as dimensões de duas diagonais, perpendiculares entre si, para o cálculo da área média de espalhamento. Esse método foi empregado em função da carência de ensaios específicos para o fim proposto.

6.2.3.4 – Apresentação e análise dos resultados

Corpos-de-prova 9 x 8 cm

Na Tabela 6.30 são apresentados os resultados médios de energia de compactação e resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm para os três traços estudados (todos os resultados dessa fase do trabalho encontram-se apresentados no ANEXO IV).

Tabela 6.30 – Resultados obtidos no presente estudo de caso para os três traços estudados

| a/c | Traço 1 | | Traço 2 | | Traço 3 | |
|------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| | Energia (J) | Resistência média (MPa) | Energia (J) | Resistência média (MPa) | Energia (J) | Resistência média (MPa) |
| 0,40 | 354 | 37,36 | 450 | 39,93 | 560 | 38,17 |
| 0,43 | 234 | 40,97 | 340 | 41,88 | 407 | 41,39 |
| 0,46 | 150 | 42,49 | 297 | 44,36 | 303 | 43,78 |
| 0,50 | 140 | 43,95 | 207 | 45,17 | 243 | 43,88 |
| 0,53 | 126 | 41,26 | 193 | 43,51 | 223 | 42,76 |

OBS - Foi utilizada uma altura de queda de 35,3 cm, que equivale a 20 J/golpe.

1 - Energia de compactação

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 6.30 e no gráfico da Figura 6.41, verifica-se que, para todos os traços estudados, quando se aumenta a quantidade de água na mistura, diminui-se a energia necessária para a compactação dos corpos-de-prova. Para todos os traços estudados, parece existir um ponto, dentro da faixa de relação água / cimento estudada, onde a energia tende a se estabilizar (Traço 1 \approx 0,46, Traço 2 \approx 0,50 – 0,55 e Traço 3 \approx 0,50). Acredita-se que, com o aumento da quantidade de água na mistura, aumenta-se o volume de pasta (cimento + água), material esse que funciona como lubrificante, reduzindo o atrito interno entre os grãos na fase de compactação dos corpos-de-prova. Porém, acima de um certo limite, a quantidade de água não reduz substancialmente a energia necessária para a eliminação dos vazios, pelo fato de todos os grãos já se encontrarem envolvidos pelo material lubrificante (pasta de cimento).

Fazendo-se uma comparação entre os três traços, percebe-se que o Traço 1 é o melhor traço com relação a compactabilidade, dentre as misturas estudadas, sendo também a mistura que apresentou o melhor coeficiente de forma (Tabela 6.27). Já o Traço 2, apesar de possuir areia artificial em sua composição, o que teoricamente é um material mais anguloso e difícil de se trabalhar, haja vista o baixo valor obtido para o coeficiente de forma, apresentou resultados melhores do que o Traço 3, analisando-se do ponto de vista da facilidade de compactação. Acredita-se que o pior desempenho do Traço 3 ocorreu pelo fato do mesmo apresentar uma menor quantidade de agregado graúdo em sua composição, o que resulta em um aumento da superfície específica da mistura, e, além disso, essa fração graúda possui uma forma mais

angulosa (menor valor de coeficiente de forma) do que a forma do agregado graúdo empregado nos demais traços (ver Tabela 6.25).

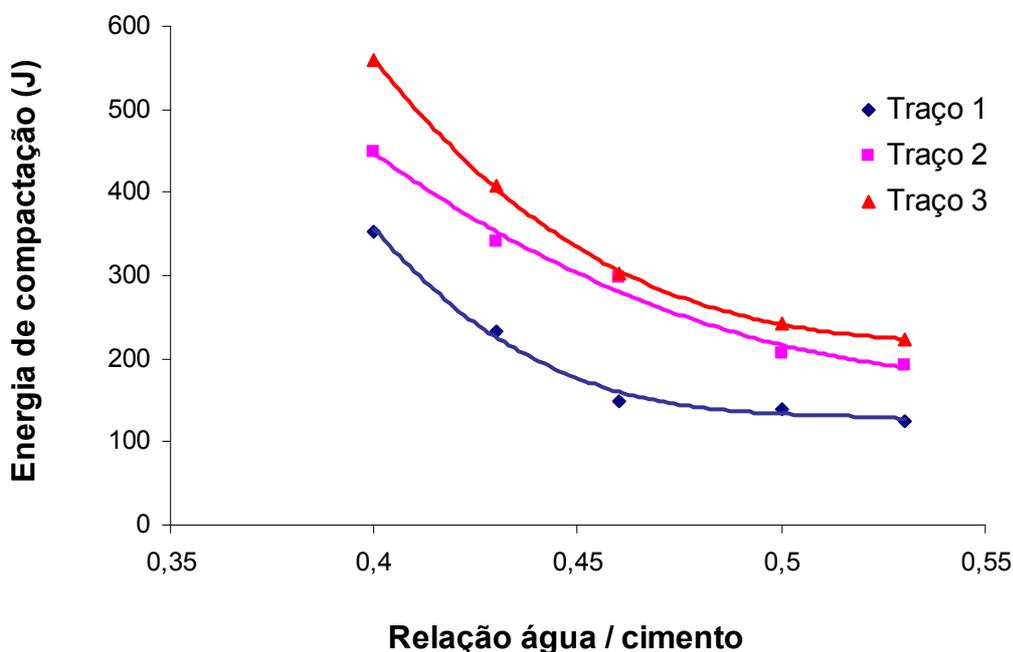


Figura 6.41 – Energia de compactação em função da relação água / cimento

2 - Resistência à compressão

Diferente dos resultados obtidos por Frasson (2000), onde o aumento da quantidade de água nas misturas não influenciou significativamente os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova 5 x 10 cm, no presente trabalho, houve um aumento significativo da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, com o aumento do teor de água das misturas. Analisando-se o gráfico apresentado na Figura 6.42, percebe-se que o aumento da resistência à compressão dos corpos-de-prova ocorreu até uma relação a/c limite igual a 0,50, para todos os traços estudados. Relações a/c acima desse valor apresentaram um decréscimo na resistência à compressão dos referidos corpos-de-prova.

Acredita-se que o aumento da resistência à compressão com o aumento da relação a/c tenha ocorrido por causa da redução dos macroporos, com o aumento do volume de pasta. Quando se empregou uma relação a/c = 0,40 a porosidade da pasta de cimento era baixa e esta, por sua vez, apresentava uma resistência elevada. Contudo, como o volume de pasta não era suficiente para envolver todos os grãos, a mistura como um todo, apresentou uma resistência

mais baixa devido a grande quantidade de macroporos. Com o aumento da quantidade de água da mistura, ocorreu um aumento do volume de pasta, conseguindo-se um maior e melhor envolvimento dos grãos de agregados, ou seja, uma redução no volume de macroporos e um aumento de resistência da mistura, apesar da maior porosidade da pasta de cimento. Esse aumento de resistência ocorreu até um certo limite, conforme apresentado na Figura 6.42, a partir do qual o concreto passou a trabalhar como um concreto plástico, seguindo a Teoria de Abrams (os microporos da pasta de cimento começaram a governar a resistência à compressão do concreto).

Fazendo-se uma comparação entre os traços empregados, observa-se que o Traço 2 apresentou um melhor desempenho quanto à resistência, provavelmente, pelo fato da forma angulosa e da textura superficial mais rugosa dos grãos melhorarem a aderência com a pasta de cimento. Já o Traço 1, no tocante a resistência à compressão, apresentou o pior desempenho dentre os traços estudados. Cabe ressaltar que todos os corpos-de-prova 9 x 8 cm foram moldados com uma porcentagem de volume de sólidos fixa de 78,6%.

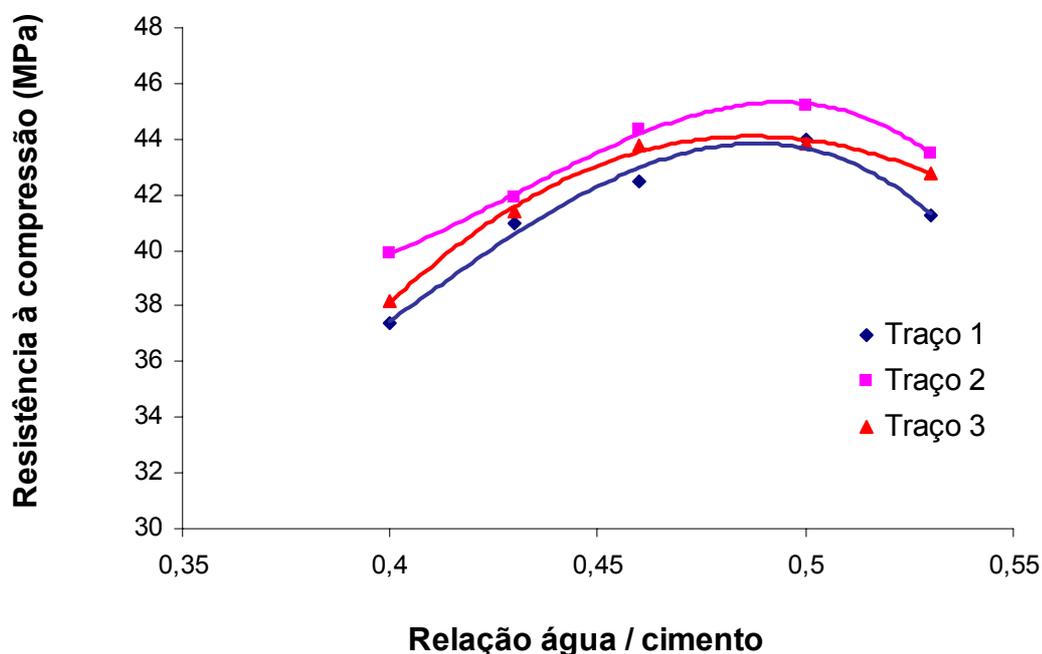


Figura 6.42 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da relação água / cimento

3 - Umidade superficial dos corpos-de-prova 9 x 8 cm após a moldagem

Conforme visto anteriormente, em se tratando de produção de PCP, é prática corrente entre os fabricantes trabalhar com a maior quantidade de água possível na mistura, desde que essa quantidade de água não prejudique a produção das peças. Misturas com excesso de água caracterizam-se pela aderência excessiva das peças às sapatas de compressão da máquina, prejudicando a textura final das mesmas e a produtividade do equipamento, em função das inúmeras paradas para limpeza.

Quando o equipamento de vibro-compressão não dispõe de sistemas de aquecimento de sapata ou “*doublecap*”, as misturas devem conter uma quantidade de água tal que, após a moldagem das peças, essas se encontrem levemente umedecidas em suas faces laterais e, principalmente, na superfície de contato com a sapata.

Pensando nisso, nesta fase avaliou-se a quantidade de água máxima que se conseguia incorporar nas misturas até o ponto onde toda a área do topo dos corpos-de-prova apresentasse pequenos sinais de água, semelhante às condições superficiais das PCP, quando produzidas em um equipamento de vibro-compressão real.

Nas Figuras 6.43 a 6.45 são apresentadas as fotos dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (topo dos corpos-de-prova), para os traços estudados (Traço 1, 2 e 3) em função da relação água / cimento empregada.

Através da avaliação visual do topo dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, verificou-se que para o Traço 1 e 2 a relação água / cimento limite encontrada foi de 0,46. Já para o Traço 3 esse limite ficou entre 0,46 e 0,50 (com $a/c = 0,46$ começou a aparecer água no topo do corpo-de-prova, porém esse vestígio de água não tomava toda a superfície). Valores acima desses limites resultaram em superfícies superiores muito úmidas para os corpos-de-prova, indicando um possível problema de excesso de umidade das misturas, caso essas venham a ser empregadas na produção das PCP.



a) $a/c = 0,40$



b) $a/c = 0,43$



c) $a/c = 0,46$



d) $a/c = 0,50$



e) $a/c = 0,53$

Figura 6.43 – Condições superficiais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (presença e quantidade de água no topo das peças) – Traço 1



a) $a/c = 0,40$



b) $a/c = 0,43$



c) $a/c = 0,46$



d) $a/c = 0,50$



e) $a/c = 0,53$

Figura 6.44 – Condições superficiais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (presença e quantidade de água no topo das peças) – Traço 2



a) $a/c = 0,40$



b) $a/c = 0,43$



c) $a/c = 0,46$



d) $a/c = 0,50$



e) $a/c = 0,53$

Figura 6.45 – Condições superficiais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm (presença e quantidade de água no topo das peças) – Traço 3

Analisando-se os resultados obtidos nos ensaios apresentados anteriormente para os corpos-de-prova 9 x 8 cm, com relação à influência do aumento da quantidade de água nas misturas, verifica-se que para todos os casos, houve uma redução considerável na energia necessária para a compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e um aumento de resistência até um certo teor de água. Contudo, o fator determinante da quantidade de água das misturas ficou sendo a condição superficial das peças (Tabela 6.31).

Tabela 6.31 – Teores de água obtidos nos ensaios de resistência, compactação e em função da condição superficial dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Parâmetro | Traço 1 | Taco 2 | Traço 3 |
|----------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| Compactação | 0,46 ¹ | 0,50 – 0,55 ¹ | 0,50 ¹ |
| Resistência | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| Condição superficial | 0,46 | 0,46 | 0,46 – 0,50 |

1 – Quanto mais água adicionada a mistura, menor é a energia necessária. Porém valores acima desses limites não implicaram em reduções significativas na energia de compactação.

Conforme mencionado anteriormente, para os Traços 1 e 2, a relação a/c ideal girou em torno de 0,46, o que equivale a uma relação água / materiais secos igual a 6,95%, valor esse muito próximo dos valores obtidos no próprio equipamento Montana MBX 975, que foram de 6,80 % e 6,98 % para os Traços 1 e 2, respectivamente.

Avaliando-se o desempenho dos três traços estudados (Tabela 6.32), considerando-se apenas a resistência à compressão, o Traço 2 seria o mais recomendado, em função do desempenho apresentado anteriormente. Porém, com relação à energia necessária para compactação das peças, o Traço 1 apresentou uma energia bem inferior, mostrando ser um traço com potencial para aumentar o ritmo de produção ou alcançar compacidades e, conseqüentemente, resistências maiores para uma energia fixa de compactação, haja vista que o aumento da compacidade das peças melhora consideravelmente a resistência à compressão das mesmas (ver Figuras 6.21 a 6.26). Vale ressaltar que, apesar do Traço 3 ter apresentado um pior desempenho com relação à compactação, ao final, esse superou o Traço 2 no referido quesito, em função da maior quantidade de água que a mistura suporta com relação a condição superficial.

Tabela 6.32 – Resistência à compressão e energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da relação a/c ideal

| | Traço 1 | Traço 2 | Traço 3 |
|-------------------------|---------|---------|-------------------|
| a/c | 0,46 | 0,46 | 0,50 ¹ |
| Resistência média (MPa) | 42,49 | 44,36 | 43,88 |
| Energia (J) | 150 | 297 | 243 |

1 – Adotando-se a maior relação a/c com relação à condição superficial do corpo-de-prova, devido à melhora na resistência e na redução da energia de compactação.

PCP e corpos-de-prova 9 x 8 cm – avaliação da textura

Na Figura 6.46 são apresentados os detalhes das superfícies superiores (topos) das PCP e seus respectivos corpos-de-prova 9 x 8 cm, em função do grau de compactação empregado (massa específica verde). Através das referidas imagens e dos resultados obtidos no ensaio de mancha de areia, percebe-se que as texturas obtidas para os corpos-de-prova 9 x 8 cm são sensivelmente mais fechadas dos que as texturas obtidas para as PCP, haja vista a maior área de espelhamento obtida para os corpos-de-prova 9 x 8 cm, independente do grau de compactação empregado.

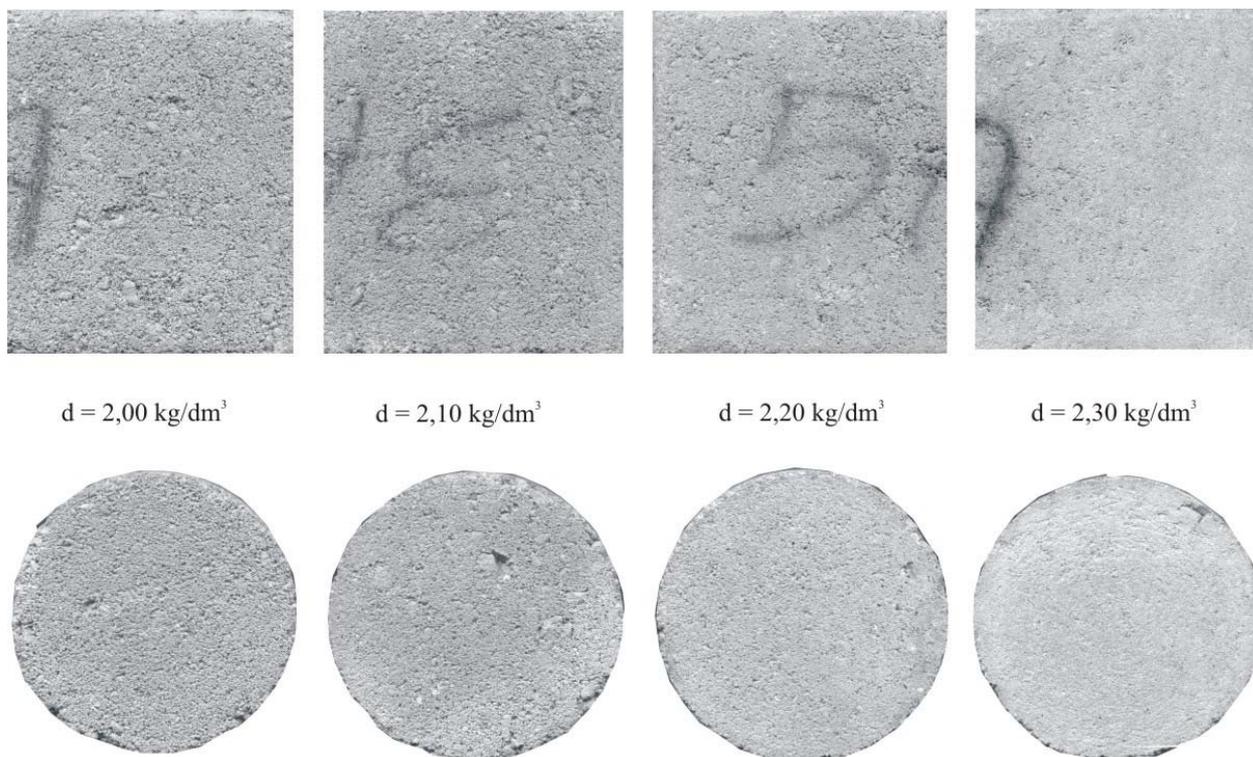


Figura 6.46 – Detalhe das superfícies superiores das PCP tipo PAV1-80 e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da massa específica verde

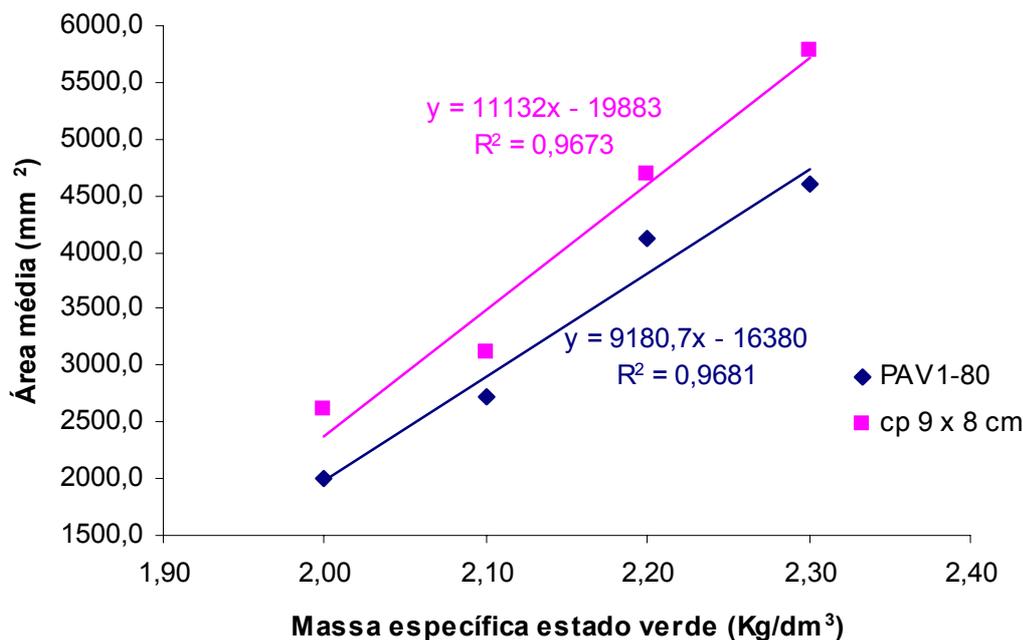


Figura 6.47 – Resultados obtidos através do ensaio de mancha de areia para as PCP e os corpos-de-prova 9 x 8 cm em função do grau de compactação (massa específica no estado verde)

6.2.4 – CONCLUSÕES

Previsão de resistência à compressão das PCP em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

- Através dos resultados apresentados no item 6.2.2, pode-se verificar que existe uma boa correlação entre a massa específica saturada e a resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Porém, quando são comparadas as referidas curvas, percebe-se que existe uma diferença significativa entre as mesmas. Acredita-se que isso se deva a aplicação da vibração na moldagem das PCP. Quando o efeito vibratório é aplicado, pode ocorrer uma melhor distribuição dos vazios dentro das peças, ou uma melhor distribuição da pasta de cimento por entre os agregados, promovendo uma melhora na resistência à compressão.
- Apesar da diferença na resistência à compressão mencionada, os estudos mostraram que existe uma boa correlação entre as resistências à compressão das PCP e dos corpos-de-

prova 9 x 8 cm, independente do formato das PCP e do proporcionamento da mistura (traço).

- As correlações encontradas para as duas alturas de PCP estudadas no presente trabalho (60 e 80 mm), apresentaram uma diferença significativa; as resistências à compressão das PCP com 60 mm foram sistematicamente superiores às peças com 80 mm de altura. De acordo com Rodrigues (1982), essa diferença se deve ao fato da relação h/d das PCP com 60 mm de altura, ser inferior a relação existente para as peças com 80 mm. Através das curvas apresentadas no gráfico da Figura 6.31, pode-se constatar que o fator de correção médio (resistência à compressão das PCP de 80 mm / PCP de 60 mm) obtido no presente trabalho, considerando-se valores de resistências próximos dos valores recomendados pela NBR 9781 (1987), gira em torno de 0,93, valor esse, condizente com o valor estabelecido pela NBR 9780 (1987) que é de 0,95.

Determinação da energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

- Os ensaios conduzidos no presente trabalho mostraram a sensibilidade do equipamento de moldagem, quando da determinação da energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, haja vista as diferenças obtidas entre os traços estudados (Traços 1, 2 e 3) e com o aumento da quantidade de água dos mesmos.
- Acredita-se que a energia despendida na moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, seja um indicativo da facilidade ou dificuldade de vibro-prensagem da mistura no próprio equipamento de vibro-compressão, tornando-se um parâmetro importante para a qualificação das misturas em testes laboratoriais. No item 6.3, serão apresentados alguns estudos que avaliam a influência dos parâmetros do equipamento de vibro-compressão e de diferentes misturas, no tempo de vibro-compressão das PCP, a fim de se validar a energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm como parâmetro indicativo da compactabilidade das misturas.

Determinação da umidade ideal das misturas

- A quantidade de água empregada na mistura exerce uma grande influência na energia necessária para a compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e na resistência à

compressão dos mesmos. Contudo, o fator limitante da quantidade de água parece ser a condição superficial das peças, com relação à umidade.

- Em função dos resultados encontrados no presente trabalho e devido aos procedimentos empíricos empregados nas fábricas para ajuste da quantidade ideal de água das misturas, acredita-se que o procedimento utilizado aqui, determinando-se a maior quantidade de água possível, até que o topo dos corpos-de-prova comece a apresentar vestígios de umidade, é um procedimento prático e de boa precisão para a determinação da umidade ideal das misturas. Cabe ressaltar que, quando da determinação da quantidade de água ideal de uma mistura, é importante avaliar também a curva de evolução de resistência com o aumento do teor de umidade da mistura, pois podem ocorrer situações, dependendo do consumo de cimento, granulometria dos agregados e grau de compactação avaliado, onde o fator limitante da quantidade de água da mistura seja a resistência à compressão ao invés da umidade superficial dos corpos-de-prova.

Previsão da textura das PCP através dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

- A textura obtida nos corpos-de-prova 9 x 8 cm não representa com uma boa fidelidade a textura das PCP, sendo que, via de regra, a textura dos corpos-de-prova apresenta-se mais fechada do que a das PCP.
- O que se pode verificar com relação ao ensaio prescrito pela ASTM E 965 – 87 e adaptado no presente trabalho para as condições das PCP, é que o mesmo sofre grande influência do operador, inviabilizando, de certa forma, o emprego do referido método para caracterização das texturas superficiais das PCP. Devido a isso foi proposto um método para avaliação da textura das peças que será apresentada no item 6.5.

6.3 – AVALIAÇÃO DA INTER-RELAÇÃO EQUIPAMENTO DE VIBRO-COMPRESSÃO x CONCRETO

Quando se fala em estudo de dosagem para artefatos de concreto produzidos em equipamentos de vibro-compressão, é quase que consenso entre os pesquisadores e tecnólogos de concreto, que trabalham nessa área, que não se pode pensar apenas na mistura; o equipamento (máquina vibro-prensa) a ser utilizado é de fundamental importância. Quando são produzidas PCP sem o emprego de um bom equipamento e sua devida regulagem, não se consegue peças com um grau de compacidade adequado e, conseqüentemente, boa resistência. Por mais que se tente aumentar o consumo de cimento, a resistência à compressão das peças não sofre um aumento proporcional. Por isso, em um estudo de dosagem para PCP, deve-se levar em conta a inter-relação entre o equipamento e a mistura, tentando-se aproveitar o potencial máximo da máquina, e ajuste da mistura, para que o desempenho quanto aos critérios de resistência, prescritos pelas normas, aliado, a uma alta produtividade, sejam alcançados. Em função do exposto, o objetivo dessa parte do trabalho foi avaliar a influência dos parâmetros de máquina e de diferentes misturas no tempo de moldagem e na resistência à compressão das PCP.

Inicialmente, a idéia do autor era conduzir estes estudos dentro de duas fábricas da região Sul, empregando-se os próprios equipamentos de vibro-compressão, que permitiam ajustes de amplitude e frequência (duas máquinas Columbia). Esses equipamentos possuem um sistema pneumático de apoio para a mesa (coxins em forma de câmaras de ar) onde, se regulando a pressão dos mesmos, altera-se a amplitude de vibração. Para alcançar variações na frequência do movimento vibratório, os referidos equipamentos dispõem de motores hidráulicos, que podem variar de 1800 a 3000 rpm (30 a 50 Hz). Entretanto, notou-se que era praticamente inviável a condução dos referidos estudos dentro dessas fábricas, pois elas localizavam-se distantes de Florianópolis (uma no Rio Grande do Sul e outra no Paraná) e pelo fato dos custos envolvidos ao se mobilizar um equipamento desse porte para testes.

Em função dessas dificuldades, decidiu-se por construir um protótipo de um equipamento de vibro-compressão, em parceria com a fábrica de pré-moldados onde os estudos iniciais desse trabalho foram conduzidos. A concepção do referido equipamento, seu funcionamento e os estudos realizados são apresentados nos itens a seguir.

6.3.1 – CONCEPÇÃO DO EQUIPAMENTO PRÓTOTIPO DE VIBRO-COMPRESSÃO

Para que esse equipamento protótipo fosse adequado aos propósitos do presente trabalho, era necessário que o mesmo contemplasse alguns dispositivos que permitissem variações nos parâmetros de vibração. Optou-se aqui por trabalhar com variações de frequência e amplitude, sem efeito de choque, pela maior facilidade de controle desses parâmetros.

Para facilitar a concepção do equipamento, sua construção foi dividida em duas fases:

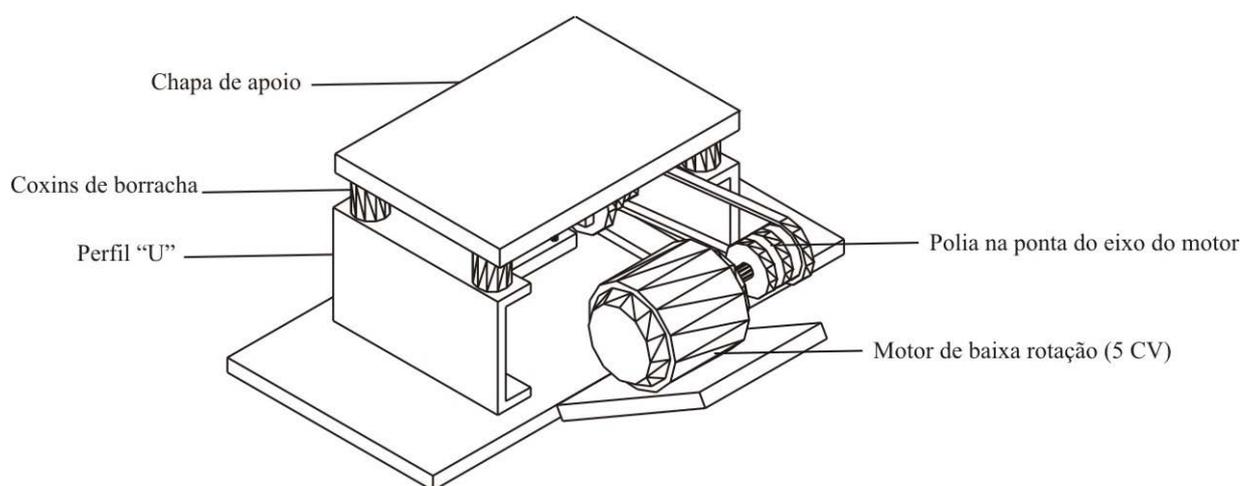
- 1 – Projeto e execução do sistema de vibração
- 2 – Projeto e execução do sistema de compressão

6.3.1.1 – Projeto e execução do sistema de vibração

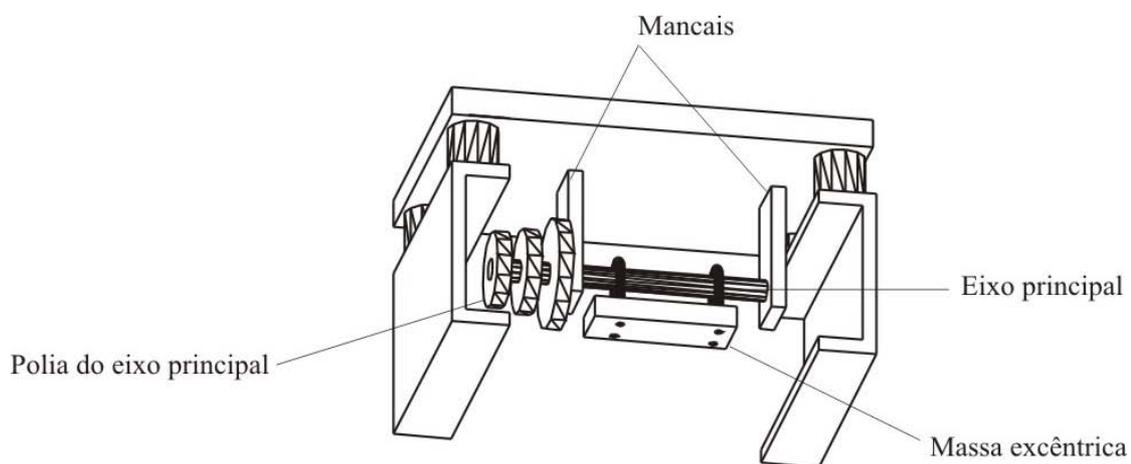
Como a maioria dos equipamentos de vibro-compressão trabalham com sistema de vibração com massas excêntricas e a experiência do pessoal da fábrica onde o equipamento foi construído é com esse sistema, a primeira versão do protótipo (Figura 6.48) foi concebida com um eixo principal, fixado por dois mancais à chapa de apoio que, por sua vez, era fixada por coxins de borracha a dois perfis “Us” responsáveis pela fixação da mesa (Figura 6.48b). No eixo principal eram presas a massa excêntrica, responsável pelo desbalanceamento do sistema, e uma polia de redução. Empregando-se um motor de baixa rotação de 5 CV e um sistema de polias (uma acoplada no eixo do motor e outra no eixo principal), era possível alterar a velocidade de giro do referido eixo, que por sua vez, alterava a frequência de vibração da mesa.

Esse sistema de vibração com eixo único (Figura 6.48) foi concebido pela simplicidade, porém, testes realizados após a construção do referido equipamento, mostraram problemas devido ao forte movimento horizontal causado pelo emprego de apenas uma massa excêntrica.

Como o movimento horizontal da chapa de apoio era um movimento indesejável, pelo fato de não se ter controle sobre o mesmo, optou-se por alterar o sistema da vibração com eixo único para um sistema com dois eixos e, conseqüentemente, duas massas excêntricas. Esse novo sistema apresentado na Figura 6.49 funcionaria como o sistema de uma máquina vibro-prensa com mesa vibratória, sendo que os dois eixos seriam movimentados por dois motores sincronizados e girando em sentidos opostas.

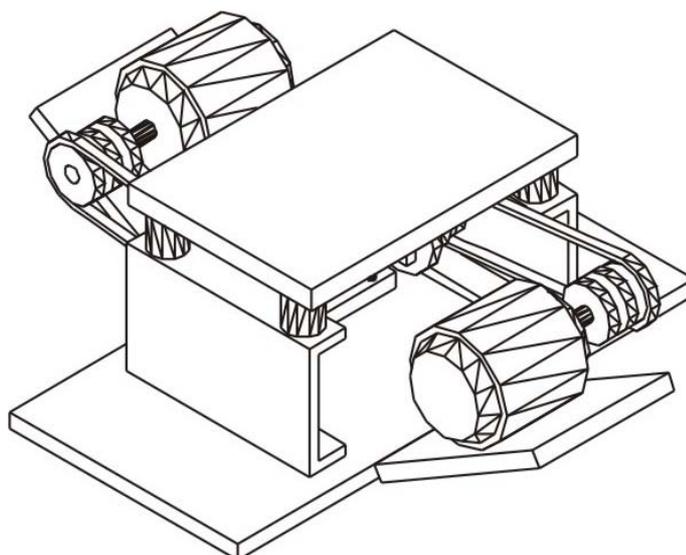


a) detalhe do sistema de vibração com eixo único

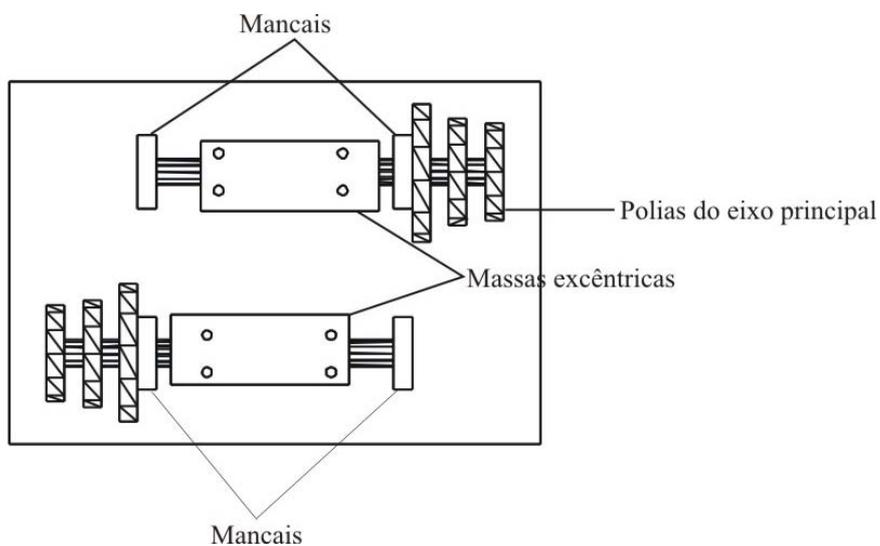


b) vista inferior do sistema de vibração com eixo único

Figura 6.48 – Detalhe do sistema de vibração com eixo único



a) detalhe do sistema de vibração com dois eixos



b) vista inferior da chapa de apoio com os dois eixos e suas massas excêntricas

Figura 6.49 – Detalhe do sistema de vibração com dois eixos e duas massas excêntricas

Após a construção do sistema de vibração com dois eixos (Figura 6.49), verificou-se que o sincronismo dos motores era um fator preponderante para o funcionamento do equipamento e de difícil execução. Alguns segundos após o acionamento dos motores, a chapa de apoio

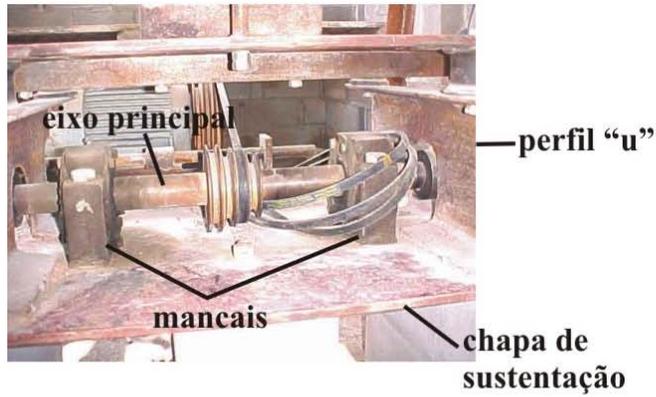
começava a perder amplitude, pelo fato dos motores perderem o sincronismo. Para a correção desse problema era necessária a aquisição de equipamentos de controle de partida, que apresentavam custos elevados.

Avaliando-se todos os sistemas de vibração empregados em máquinas vibro-prensas, constatou-se que o sistema biela-virabrequim, empregado nos equipamentos da Columbia, é um sistema que se caracteriza por converter movimentos circulares em movimentos retilíneos, sendo capaz de eliminar o movimento horizontal da mesa vibratória. Somado a isso, esse sistema pode funcionar com apenas um motor elétrico, eliminando a questão de sincronismo de motores.

Em função disso, o novo sistema de vibração do equipamento protótipo foi desenvolvido; esse sistema é formado basicamente por uma chapa de sustentação a qual são fixados os mancais de suporte do eixo principal e os perfis “Us” (Figura 6.50a). Esse eixo principal possui um comprimento maior do que a chapa de apoio, ficando com suas duas extremidades para fora dos dois perfis “U”. Nas pontas desse eixo são fixadas as pontas excêntricas (Figura 6.50b), por meio de chavetas e parafusos. Essas pontas excêntricas apresentam um furo a centro, para engate no eixo principal, e uma ponta de eixo fora de centro, responsável pelo desbalanceamento do sistema. Para alterações na amplitude do movimento, foram usinados vários pares de pontas de eixo, com excentricidades variando de 0,5 a 2,5 mm (Figura 6.50c).

Semelhante aos sistemas apresentados anteriormente, sobre os perfis “Us” são fixados os coxins de borracha (4 coxins) que, por sua vez, sustentam a chapa de apoio. Essa chapa de apoio possui uma barra rígida centrada, fixada na parte inferior da mesma, com o comprimento igual ao do eixo principal (Figura 6.50d). A ligação das pontas excêntricas do eixo principal com a barra rígida, fixada sob a chapa de apoio, é feita por duas bielas (uma de cada lado – Figura 6.50e). Essas bielas possuem roscas para regulagem de altura, caso seja alterada a excentricidade da ponta de eixo, e de rolamentos nas caixas superiores e inferiores, de forma a trabalhar como engates rotulados, eliminando assim o movimento na horizontal.

As alterações de frequência são possíveis pela existência de polias de diâmetros distintos, acopladas à ponta do eixo do motor e ao eixo principal (Figura 6.50f). Na Tabela 6.33 é apresentada a faixa teórica de variação de frequência em função da combinação entre as polias do motor e do eixo principal. Vale a pena ressaltar que foi utilizado um motor de 5 CV, de baixa rotação (1700 rpm), pelo fato dos motores de alta rotação não suportarem o ritmo de trabalho exigido por um equipamento de vibro-compressão (constantes arranques e paradas).



a)



b)



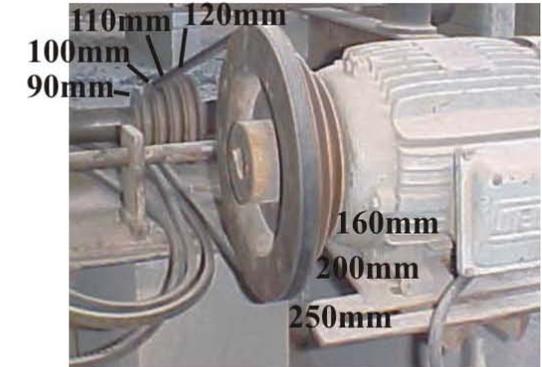
c)



d)



e)



f)

Figura 6.50 – Detalhe do sistema de vibração construído para a máquina vibro-prensa protótipo

Tabela 6.33 – Faixas teóricas de frequência (Hz) possíveis de serem empregadas no equipamento

| Polias do motor (mm) | Polias do eixo principal (mm) | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|
| | 90 | 100 | 110 | 120 |
| 160 | 50 | 45 | 41 | 38 |
| 200 | 63 | 57 | 52 | 47 |
| 250 | 79 | 71 | 64 | 59 |

Obs: Essas frequências foram definidas considerando-se um motor de 1700 rpm (28,3 Hz).

6.3.1.2 – Projeto e execução do sistema de compressão

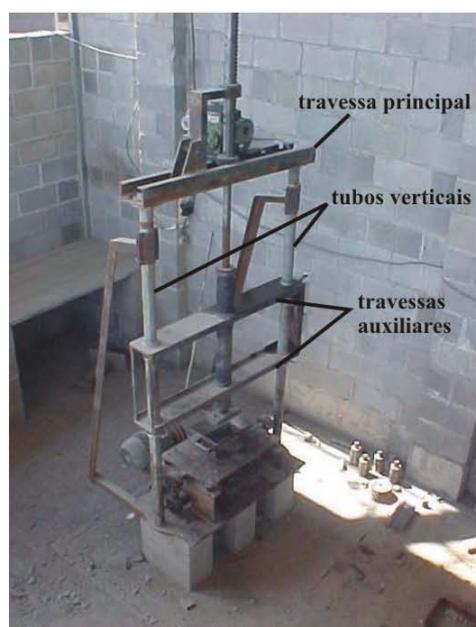
Analisando o funcionamento da maioria dos sistemas de compressão das máquinas vibroprensas disponíveis no mercado (ver capítulo sobre equipamento de vibro-compressão), definiu-se o sistema de compressão a ser empregado na máquina protótipo. Esse sistema é composto pela estrutura de sustentação, pelo êmbolo de compressão e pelo dispositivo de aplicação de carga (Figura 6.51).

A estrutura de sustentação é formada pelos tubos verticais presos à chapa de sustentação, pela travessa principal, localizada na parte superior da estrutura, e pelas travessas auxiliares, situadas na parte central da estrutura de sustentação (Figura 6.51a). Os tubos verticais funcionam como apoio para todo o sistema de compressão e, ao mesmo tempo, como tirantes de reação, quando da aplicação da carga de compressão na peça. A travessa principal é responsável por sustentar o dispositivo de aplicação de carga e transmitir os esforços desse dispositivo para os tubos verticais. Já as travessas auxiliares, servem apenas para dar um melhor travamento, direcionando o embolo de compressão perfeitamente à forma.

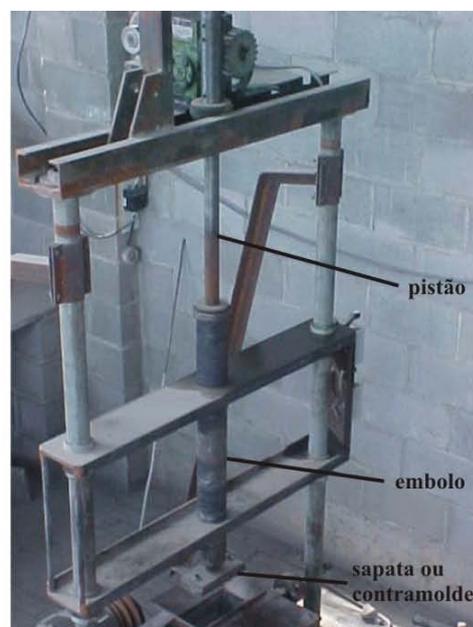
O êmbolo de compressão (Figura 6.51b) é a parte responsável por transmitir a carga do dispositivo de compressão ao concreto. Esse êmbolo possui, em sua base, uma sapata (contramolde) que fica em contato com o concreto na hora da moldagem das peças. Imediatamente acima, encontra-se o embolo propriamente dito, com uma mola de compressão interna de constante (k) conhecida (Figura 6.51c). Com isso, consegue-se determinar o nível de carregamento aplicado ao concreto em função da deformação imposta a mola. Para a compressão da mola, há um pistão de aço, com uma cremalheira na sua parte superior, que trabalha com adaptador para o sistema de aplicação de carga.

Para agilizar a moldagem das peças, o dispositivo de aplicação de carga (Figura 6.51d) possui um motor de baixa rotação de 2 HP, juntamente com uma caixa de redução, responsável

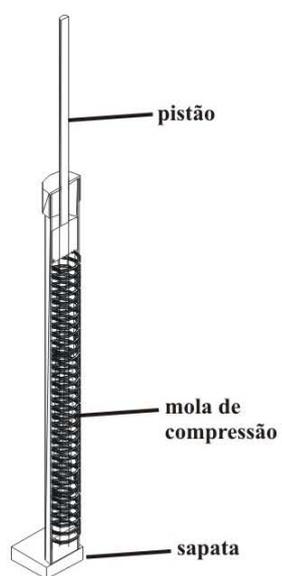
por diminuir a velocidade de subida e descida do pistão e, ao mesmo tempo, permitir a aplicação de cargas mais elevadas, sem danificar o motor.



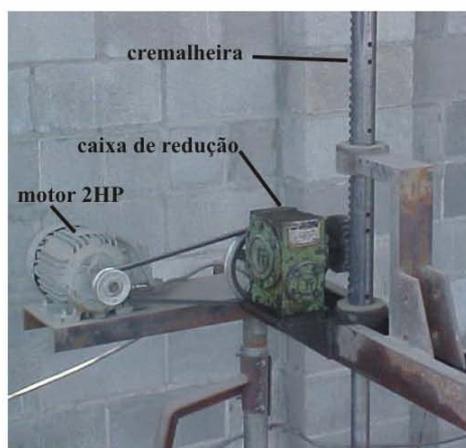
a)



b)



c)



d)

Figura 6.51 – Detalhe do sistema de compressão construído para a máquina vibro-prensa protótipo

Para evitar que a vibração seja transmitida à caixa de redução durante a fase de vibro-compressão das peças (mola comprimida), foram feitos furos no pistão para aplicação de cargas de 50, 100, 150 e 200^{iv} kg, onde se coloca um pino de aço de travamento, transferindo eventuais esforços diretamente para a travessa principal. Esse pino é colocado antes da moldagem das peças e fica apoiado na parte inferior da travessa principal, conforme detalhe apresentado na Figura 6.52.

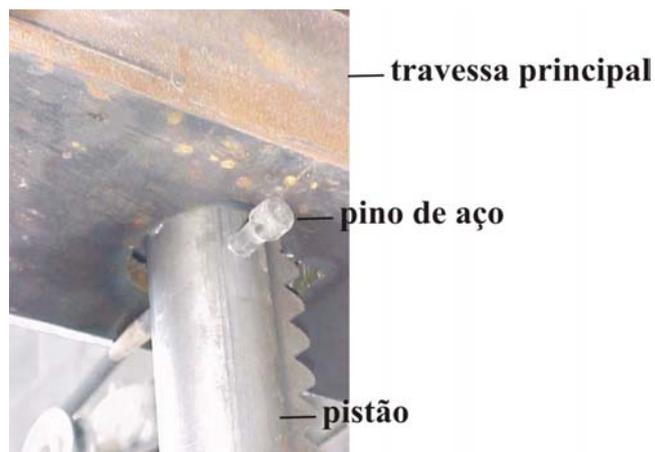


Figura 6.52 – Detalhe do pino de aço colocado para evitar a transmissão de vibração para a caixa de redução

Para a determinação do tempo de vibro-compressão e controle da altura final das peças, existe uma marcação no embolo, mostrando o ponto onde se começa a medir o tempo e o ponto onde se finaliza a operação de cronometragem, indicando que a altura da peça atingiu 80 mm (Figura 6.53). Essa marcação equivalia ao último 1 cm da peça.



Figura 6.53 – Detalhe da marcação no embolo indicando o ponto inicial e final da fase de vibro-compressão cronometrada

^{iv} A capacidade limite do sistema de compressão é de 200 kg; limite esse definido pela capacidade de compressão da mola.

Os controles dos sistemas de vibração e compressão se davam através de duas chaves elétricas, localizadas na lateral da máquina protótipo (Figura 6.54).

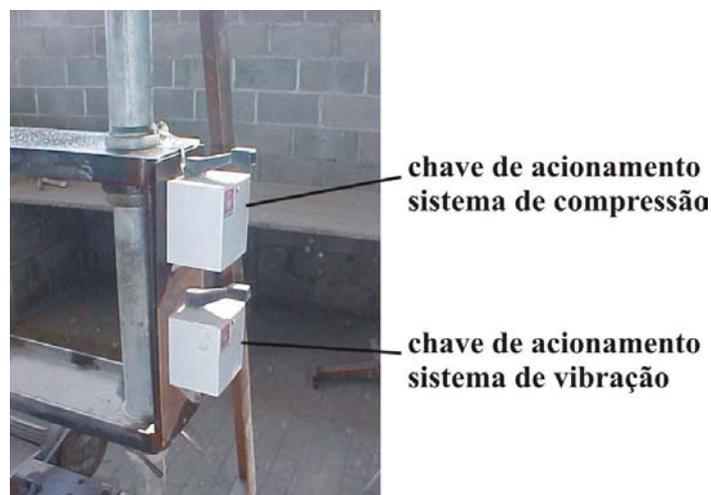


Figura 6.54 – Chaves elétricas para controle dos sistemas de vibração e compressão da máquina protótipo

6.3.2 – MOLDAGEM DAS PCP

Por uma questão de facilidade, foi adotado o formato do PAV1, peça retangular de 10 x 20 cm (largura x comprimento), como formato padrão para a moldagem na máquina protótipo. Para tal, o molde desenvolvido para a confecção das peças apresentava as dimensões de 10 x 20 x 10 cm (largura x comprimento x altura). Esse molde possuía em suas laterais duas abas furadas para a fixação do mesmo a mesa de apoio, bem como dois pegadores para facilitar o manuseio e a desmoldagem das peças (Figura 6.55).

O molde foi concebido com uma altura de 10 cm para permitir a moldagem das peças com todas as alturas preconizadas pela NBR 9780 (1987) – 6, 8 e 10 cm de altura.

Para eliminar eventuais influências de moldagem nos resultados de resistência, tempo de vibro-compressão e textura das PCP produzidas na máquina protótipo, foram definidos procedimentos de moldagem, que serão descritos a seguir.



Figura 6.55 – Detalhe do molde empregado para a confecção das PCP na máquina protótipo

6.3.2.1 – Procedimentos para a moldagem das PCP – Determinação da resistência à compressão e tempo de vibro-compressão

Para iniciar a moldagem das PCP na máquina protótipo, primeiramente, definia-se a porcentagem de volume de sólidos ou a massa específica verde das peças, obtendo-se a massa verde de concreto a ser pesada (Figura 6.56a).

O preparo da máquina protótipo para a moldagem das peças iniciava-se com a fixação do molde à chapa de apoio. Eram colocadas duas molas de aço nos pinos existentes na chapa de apoio, para auxiliar a posterior etapa de desforma e para evitar impactos excessivos do molde na mesa vibratória. O molde era então pressionado contra as molas e preso com o auxílio de dois pinos de pressão (Figura 6.56b). Para evitar a perda de material, era colocado um prolongador sobre a forma (Figura 6.56c), sendo que o mesmo era fixado por extensores, presos aos pegadores do molde (Figura 6.56d).

Ao término da fixação do molde e do seu prolongador, era despejada toda a mistura previamente pesada (Figura 6.56e). Esse concreto dentro do molde era ajeitado com a mão (Figura 6.56f) e então acionado o sistema de compressão (Figura 6.56g). Aplicando-se uma pequena carga (≈ 50 kg), acionava-se o sistema de vibração por 1 a 2 segundos, para acomodação do concreto dentro do molde e remoção do prolongador (Figura 6.56h).

Para dar início à fase de vibro-compressão propriamente dita, o sistema de compressão era acionado novamente, pressionando-se a mola até o nível de carga desejado (Figura 6.56i) e colocando-se o pino de aço para travamento na correspondente furação (Figura 6.56j). Para garantir que a caixa de redução juntamente com o motor de 2 HP ficassem livres do efeito de vibração, subia-se o pistão alguns centímetros manualmente, de modo que o pino de aço apresentado na Figura 6.56j, ficasse perfeitamente em contato com a parte inferior da travessa principal. Após o ajuste do sistema de compressão no nível de carga desejado, acionava-se o sistema de vibração até que a parte inferior da marcação apresentada na Figura 6.53 estivesse perfeitamente em cima da travessa auxiliar inferior (Figura 6.56k). Com todo o conjunto ajustado, acionava-se simultaneamente o sistema de vibração e um cronômetro manual, para determinação do tempo necessário para compactar o último 1,0 cm da peça (parte superior da marca apresentada na Figura 6.53 perfeitamente em cima da travessa auxiliar inferior – Figura 6.56l). Esse tempo foi denominado tempo de vibro-compressão para a máquina protótipo.

Ao término da fase de vibro-compressão, reduzia-se o nível de carregamento aplicado para aproximadamente 50 kg, para facilitar a etapa de desmoldagem das peças. Para tal eram retirados os pinos de pressão que travavam o molde à mesa (Figura 6.56m) para liberação do mesmo, sendo o molde, posteriormente, levantado com as mãos para liberação da peça (Figura 6.56n). Após a retirada do molde, o sistema de compressão era suspenso, deixando-se a peça livre para ser encaminhada à cura (Figura 6.56o).

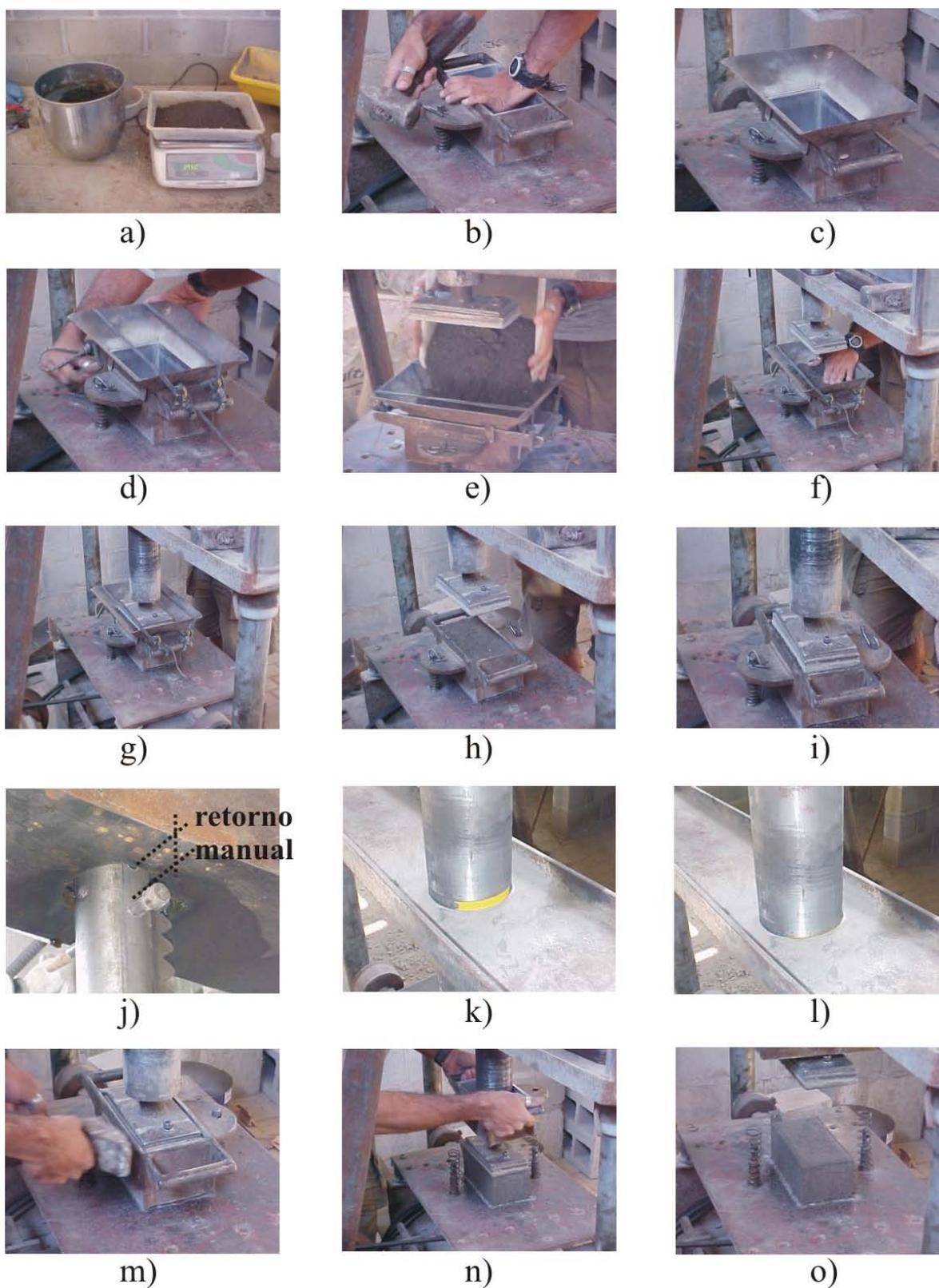


Figura 6.56 – Sequência de moldagem das peças na máquina protótipo – determinação da resistência à compressão e tempo de vibro-compressão

6.3.2.2 – Procedimentos para a moldagem das PCP – Avaliação da textura

Apesar da máquina vibro-prensa protótipo desenvolvida para o presente trabalho não possuir um sistema de gaveta com agitadores internos, o procedimento desenvolvido para a avaliação da textura foi baseado na seqüência de produção de uma máquina vibro-prensa real (ver Figura 4.16). Na Figura 6.57 é apresentada uma seqüência esquemática do procedimento, adotado para a moldagem das peças na máquina protótipo.

Após a fixação do molde à chapa de apoio (Figura 6.57a), e a colocação do prolongador (Figura 6.57b), despejava-se cerca de 4,5 kg dentro do conjunto molde + prolongador (Figura 6.57c). Para simular a etapa de alimentação e pré-vibração que existe no processo de produção das peças em uma máquina real, acionava-se o sistema de vibração da máquina protótipo por cerca de 2 a 3 segundos (Figura 6.57d). Semelhante a uma máquina vibro-prensa, depois de desligado o sistema de vibração, o prolongador era desprendido da forma (retirada dos extensores), e o mesmo era removido horizontalmente (Figura 6.57e), de forma a raspar o excesso de mistura.

Ao término do enchimento da forma tinha-se início a fase de vibro-prensagem da peça. Para tal, o sistema de compressão era acionado e aplicava-se uma carga de 100 kg, de modo a evitar que a sapata ficasse pulando excessivamente sobre a peça (Figura 6.57f). O tempo de vibro-compressão dependia do tipo de mistura e da quantidade de material que caía dentro do molde na etapa de alimentação, girando em torno de 2 a 5 segundos. O que se fixava era a porcentagem de volume de sólidos final da peça em cerca de 76,8%. Ao término da etapa de vibro-compressão (Figura 6.57g), procedia-se a desmoldagem da peça (Figura 6.57h) e determinava-se o peso e a altura final da mesma, para avaliar a porcentagem de volume de sólidos alcançada. Caso essa estivesse longe do valor fixado (76,8%), procedia-se uma nova moldagem, alterando o tempo de vibro-compressão para se alcançar o referido grau de compactidade. Cabe ressaltar que essa porcentagem de volume de sólidos foi fixada por ser considerada um valor próximo do valor médio para os equipamentos de vibro-compressão.

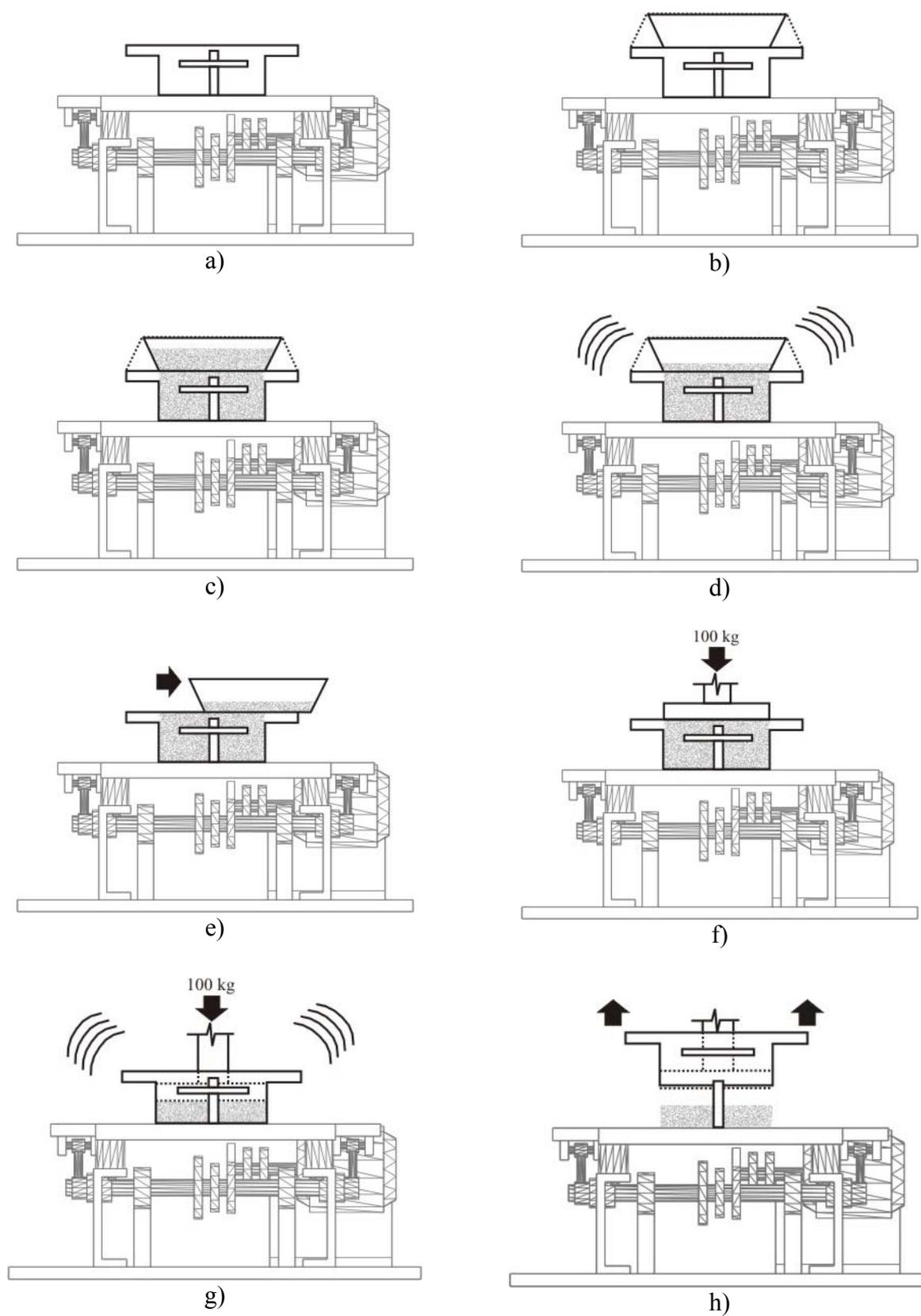


Figura 6.57 – Seqüência de moldagem das peças na máquina protótipo – avaliação da textura

6.3.3 – INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE MÁQUINA NO TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO E NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP – ESTUDOS DE CASO

6.3.3.1 – Metodologia empregada

Misturas

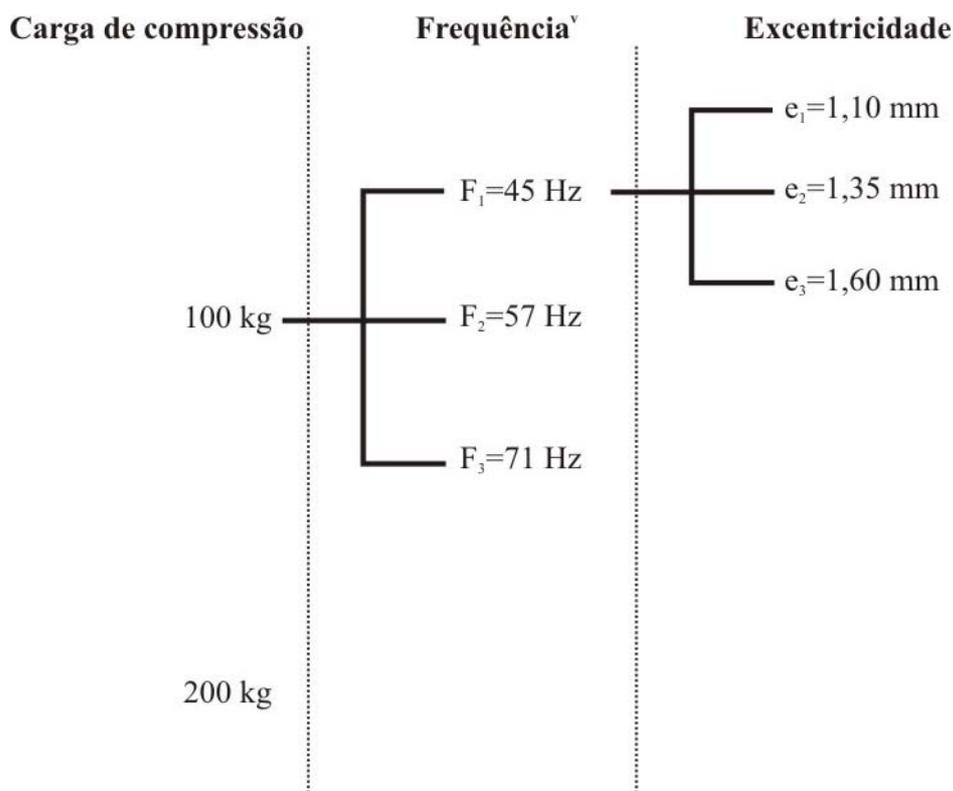
Para o presente estudo, foram utilizados os mesmos três traços empregados no estudo de caso apresentado no item 6.2.3, para o equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm.

Com o intuito de reduzir as variáveis de estudo desta fase do trabalho foram fixadas:

- Porcentagem de volume de sólidos: foi fixada a mesma porcentagem de volume de sólidos empregada no estudo apresentado no item 6.2.3, por ser um valor que equivale a um grau de compactidade adequado para as PCP e, ao mesmo tempo, não é baixo a ponto de se perder a precisão nas tomadas de tempo de vibro-compressão, nem muito elevado, que inviabilize a compactação das peças;
- Umidade ótima das misturas: os valores adotados de umidade ótima para as misturas foram os valores encontrados no estudo de caso apresentado no item 6.2.3. Esses valores foram empregados para avaliar se o efeito da vibração e dos diferentes parâmetros de máquina estudados influenciariam na umidade ideal da mistura, determinada pelo equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Essa avaliação foi feita de forma subjetiva, analisando-se as condições superficiais das peças após a moldagem no equipamento protótipo.

Parâmetros de máquina

A fim de se fazer uma análise estatística através de experimentos fatoriais, para avaliação da influência dos parâmetros de equipamento nos resultados de tempo de vibro-compressão e resistência à compressão das peças, foram estudados os parâmetros a seguir:



- Carga de compressão: as cargas de compressão empregadas foram limitadas pela capacidade de compressão da mola. Contudo, esses valores abrangem o espectro inferior dos equipamentos de vibro-compressão reais, que empregam cargas variando de 100 kg a 600 kg por peça, dependendo do tipo de equipamento (ver item 4.1.3.3 – equipamento de vibro-compressão);
- Frequência : os valores de frequência adotados no presente trabalho foram definidos em função dos limites encontrados na literatura para os equipamentos de vibro-compressão (40 a 80Hz - BRESSON (2001) e FIOLA & TARDINI (1988));
- Excentricidades: as excentricidades definidas e apresentadas aqui são relativas as defasagens, em milímetros, entre o eixo principal e as pontas de eixo. As amplitudes de vibração utilizadas no presente trabalho foram funções dessas excentricidades, sendo determinadas com o auxílio de acelerômetro piezoelétrico juntamente com um analisador de vibração. Vale a pena ressaltar que os valores de amplitude de vibração obtidos para as referidas excentricidades encontram-se dentro das faixas das máquinas vibro-prensas (0,5 a 2 mm - BRESSON (1981) e FIOLA & TARDINI (1988));

^v Os valores apresentados para frequência correspondem aos valores teóricos, considerando um motor de baixa rotação (1700 rpm) e a combinação de polias apresentadas na Tabela 6.33.

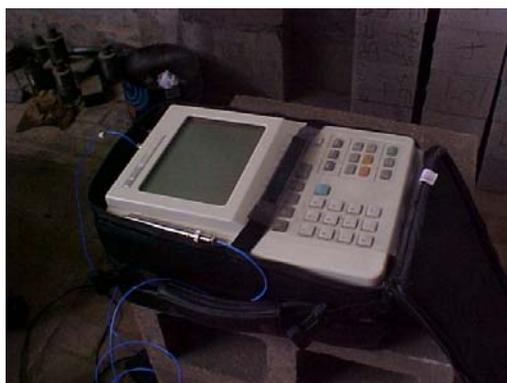
Medições de vibração

Para as medições de vibração e determinações dos parâmetros reais do equipamento protótipo, empregou-se um equipamento composto por um acelerômetro piezoelétrico e um analisador de vibrações (Figura 6.58a) do Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina (LVA-UFSC) As especificações desse equipamento são apresentadas a seguir:

- Acelerômetro piezoelétrico da marca Bruel & Kjaer tipo 4375;
- Analisador de vibração digital de dois canais da marca Hewlett-Packard tipo 3560A;
- Condicionador de carga em linha da marca PCB tipo 422E12;
- Calibrador de vibrações da marca Bruel & Kjaer tipo 4294.

Para proceder às medições de vibração, inicialmente o equipamento era calibrado, (Figura 6.58b), empregando-se um aparelho calibrador (Figura 6.58c), aparelho esse que apresentava parâmetros de vibração fixos e conhecidos (frequência e aceleração). Após a calibração, o acelerômetro era fixado por meio de parafuso, para impedir o movimento relativo entre o mesmo e a mesa vibratória, na parte central inferior da chapa de apoio (Figura 6.58d). Optou-se por fixar o acelerômetro nessa posição para a determinação dos parâmetros de vibração no centro da mesa.

As medições eram feitas sempre no início e no final de cada teste onde era variada a excentricidade. Esse procedimento foi adotado para avaliar se havia alterações na vibração em função de eventuais quebras de rolamento ou coxins durante a moldagem das peças e pelo fato de não se dispor do equipamento para a medição por período integral, durante todo estudo. Vale ressaltar que, para cada situação (frequência, carregamento e excentricidade), eram feitas três medições para a determinação do valor médio.



a) equipamento para medição de vibração



b) calibração



c) calibrador empregado



d) fixação do acelerômetro na parte central inferior da chapa de apoio

Figura 6.58 – Equipamento para medição de vibração

O analisador de vibrações empregado para as medições possuía um visor digital com o recurso de saída gráfica, onde se obtinha o espectro de frequências da medição realizada (Figura 6.59). Através desse espectro, determinava-se a frequência de vibração (f) no eixo “x” e a intensidade da aceleração (a) no eixo “y”.

Cabe ressaltar que, durante as medições de vibração, foi empregado o mesmo procedimento apresentado no item 6.3.2.1, para a moldagem das PCP no equipamento protótipo para avaliação do tempo de vibro-compressão e da resistência à compressão.

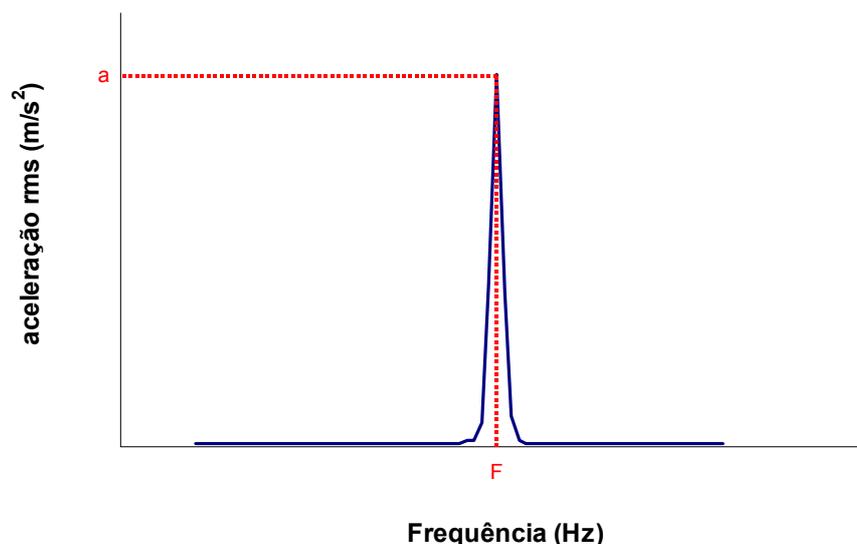


Figura 6.59 – Espectro de frequência obtido através do analisador de vibrações

Na Tabela 6.34 são apresentados os parâmetros reais de vibração determinados através das medições no próprio equipamento protótipo.

Tabela 6.34 – Valores reais para os parâmetros de vibração empregados no presente estudo

| Carga | Frequência (Hz) | | Excentricidade | Aceleração (m/s ²) | Amplitude (mm) | Velocidade (mm/s) | |
|--------|-----------------|------|----------------|--------------------------------|----------------|-------------------|--------|
| | teórica | real | | | | | |
| 100 kg | F ₁ | 45 | 46,8 | e ₁ =1,10 mm | 62,10 | 0,72 | 211,42 |
| | | | | e ₂ =1,35 mm | 78,34 | 0,91 | 266,70 |
| | | | | e ₃ =1,60 mm | 88,67 | 1,03 | 301,87 |
| | F ₂ | 57 | 58,5 | e ₁ =1,10 mm | 69,53 | 0,51 | 189,16 |
| | | | | e ₂ =1,35 mm | 68,98 | 0,51 | 187,67 |
| | | | | e ₃ =1,60 mm | 159,08 | 1,18 | 432,80 |
| | F ₃ | 71 | 73,0 | e ₁ =1,10 mm | 56,41 | 0,27 | 122,99 |
| | | | | e ₂ =1,35 mm | 162,63 | 0,77 | 354,58 |
| | | | | e ₃ =1,60 mm | - | - | - |
| 200 kg | F ₁ | 45 | 46,8 | e ₁ =1,10 mm | 70,71 | 0,82 | 240,73 |
| | | | | e ₂ =1,35 mm | 87,99 | 1,02 | 299,54 |
| | | | | e ₃ =1,60 mm | 109,14 | 1,26 | 371,57 |
| | F ₂ | 57 | 58,5 | e ₁ =1,10 mm | 73,40 | 0,54 | 199,69 |
| | | | | e ₂ =1,35 mm | 69,30 | 0,51 | 188,53 |
| | | | | e ₃ =1,60 mm | 109,42 | 0,81 | 297,69 |
| | F ₃ | 71 | 73,0 | e ₁ =1,10 mm | 68,11 | 0,32 | 148,50 |
| | | | | e ₂ =1,35 mm | 73,34 | 0,35 | 159,89 |
| | | | | e ₃ =1,60 mm | 217,79 | 1,04 | 474,82 |

Obs: Problemas técnicos impossibilitaram a determinação do nível de vibração quando do emprego da carga de 100 kg, com a frequência de 73,0 Hz e a excentricidade de 1,60 mm;

Os valores de amplitude e velocidade, foram determinados através das fórmulas de aceleração máxima e velocidade máxima para movimento harmônicos (ver item 4.1.5).

Procedimentos para mistura, moldagem e cura das peças

Para garantir uma perfeita homogeneização da umidade dos agregados miúdos empregados para a confecção dos traços adotados no presente estudo, os mesmos eram colocados individualmente, dentro de uma betoneira de 500 litros, onde permaneciam por cerca de 5 minutos. Após a perfeita homogeneização, os agregados eram armazenados em tambores plásticos, cobertos com saco plástico, enquanto eram determinadas suas umidades.

De posse da umidade dos agregados, eram feitas as correções das massas apresentadas na Tabela 6.35, sendo os referidos agregados, juntamente com o cimento e os agregados graúdos, pesados e armazenados em sacos plásticos individuais, perfeitamente fechados, até o momento de serem encaminhados ao misturador.

Tabela 6.35 – Proporções em massa dos materiais empregados na confecção dos Traços 1, 2 e 3

| Materiais | Traço 1 | | Traço 2 | | Traço 3 | |
|----------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|
| | Unitário | Qtd. por virada (g) | Unitário | Qtd. por virada (g) | Unitário | Qtd. por virada (g) |
| Cimento | 1,00 | 1850 | 1,00 | 1850 | 1,00 | 1850 |
| AN1 | 3,88 | 7181 | - | - | 1,87 | 3456 |
| AN2 | 0,54 | 997 | - | - | - | - |
| AN3 | - | - | - | - | 2,15 | 3980 |
| AA | - | - | 4,50 | 8324 | - | - |
| B0 | 1,20 | 2220 | 1,12 | 2081 | - | - |
| A ^{1/4} " | - | - | - | - | 1,30 | 2409 |
| #1,2 ² | - | - | - | - | 0,34 | 628 |
| Aditivo ¹ | 0,35% | 6,5 | 0,35% | 6,5 | 0,35% | 6,5 |
| Água | 0,46 | 851 | 0,46 | 851 | 0,50 | 925 |

1 – Aditivo incorporador de ar que era empregado pela fábrica onde os trabalhos foram conduzidos – (0,35% - proporção média indicada pelo fabricante do aditivo);

2 – Fração retida na # 1,2 mm, proveniente da AN1.

Para cada combinação dos parâmetros de máquina adotados, era confeccionada uma mistura, o que resultou em 18 misturas por traço (2 níveis de carga, 3 frequências e 3 amplitudes), totalizando 54 misturas. Essas misturas foram produzidas empregando-se o mesmo misturador e procedimento de mistura apresentado no item 6.2.3.3.

Para cada mistura, foram moldadas três peças do tipo PAV1-80, conforme mencionado anteriormente, empregando-se o procedimento descrito no item 6.3.2.1. Por questão de

imprecisão na tomada dos tempos, foram desconsideradas as situações onde os tempos de vibro-compressão foram superiores a 60 segundos.

Como um dos objetivos dessa parte do trabalho era validar as curvas de correlação apresentadas no item 6.2, foram confeccionados corpos-de-prova 9 x 8 cm para os três traços adotados, empregando-se o equipamento e os procedimentos apresentados anteriormente (item 6.2). Foram moldados três corpos-de-prova, empregando-se algumas misturas aleatórias dentre as utilizadas para a moldagem das PCP, para as porcentagens de volume de sólidos de 76,8; 78,6; e 80,3 %. Na Tabela 6.36 são apresentadas as massas para as PCP produzidas no equipamento protótipo e para os corpos-de-prova 9 x 8 cm em função dos traços e das porcentagens de volume de sólidos adotadas.

Tabela 6.36 – Massas verdes empregadas para a moldagem das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Tipo de peça | Porcentagem de volume de sólidos | Massa verde (g) | | |
|--------------|----------------------------------|-----------------|---------|---------|
| | | Traço 1 | Traço 2 | Traço 3 |
| PCP | 78,6 | 3600,0 | 3600,2 | 3639,5 |
| CP 9x8 | 76,8 | 1119,7 | 1119,7 | 1131,9 |
| | 78,6 | 1145,1 | 1145,2 | 1157,7 |
| | 80,3 | 1170,6 | 1170,6 | 1183,4 |

Ao término da moldagem, as peças eram colocadas em uma caixa de isopor, com uma lâmina de água no fundo (ver Figura 6.39) para que fosse realizada a cura nas primeiras 24 horas. Após esse período, as mesmas eram levadas ao LMCC-UFSC e imersas em um tanque com água, por um período de 14 dias, quando então eram retiradas para a determinação dos seus pesos saturados e alturas, procedendo-se posteriormente o capeamento com pasta de cimento. Terminada a fase de capeamento, as peças eram imersas novamente na água até a data de rompimento (28 dias).

6.3.3.2 – Apresentação e análise dos resultados

Tempo de vibro-compressão

Na Tabela 6.37 são apresentados os resultados referentes aos tempos de vibro-compressão encontrados para os três traços estudados em função dos parâmetros de máquina adotados. Os pontos onde são apresentados os símbolos “> 60” indicam que o tempo necessário para a moldagem das peças foi superior a 60 segundos, sendo desconsiderados na presente avaliação pela imprecisão na tomada de tempo, conforme mencionado anteriormente. Essas lacunas nos resultados apresentados na Tabela 6.37 inviabilizaram uma análise estatística mais aprimorada, através de experimentos fatoriais, para a avaliação dos parâmetros de máquina influenciáveis no tempo de vibro-compressão. Em função disso, foram realizadas análises fatoriais utilizando-se apenas parte dos resultados (pequenos grupos) descritos abaixo:

- 1ª análise: a primeira análise abrangeu todos os resultados de tempo de vibro-compressão obtidos para as peças produzidas com o Traço 1, para uma carga de compressão de 100 kg. Com isso, pode-se verificar a influência da frequência, da amplitude e da inter-relação entre as mesmas na resistência à compressão das referidas peças.
- 2ª análise: a segunda análise envolveu os resultados de tempo de vibro-compressão das peças produzidas com os Traços 1, 2 e 3, para as cargas de 100 e 200 kg, as três excentricidades e a frequência 1 (46,8 Hz). O objetivo foi avaliar a influência da carga, da amplitude, dos traços e da inter-relação entre os mesmos na resistência à compressão das peças.

Na Tabela 6.38 são apresentados os parâmetros estatísticos das referidas análises. Em ambos os casos, todos os fatores influenciaram significativamente, com um nível de confiabilidade de 95 %, o tempo de vibro-compressão das peças.

Avaliando-se mais cuidadosamente a 1ª análise, verifica-se que a influência da frequência no tempo de vibro-compressão das peças é questionável, pois o referido parâmetro exerceu uma influência considerável na amplitude de vibração. Durante a fase de desenvolvimento do equipamento e execução do experimento, acreditava-se que ao se fixar a excentricidade da máquina, ter-se-ia amplitudes fixas, independente da frequência empregada. Porém, o que ocorreu foi que com o aumento da frequência, houve uma redução na amplitude do movimento vibratório, para uma mesma excentricidade (ver Tabela 6.34).

Tabela 6.37 – Resultados encontrados quanto ao tempo de vibro-compressão

| Frequência | e (mm) | x (mm) | Tempo de vibro-compressão (s) | | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|--------|-------------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|-------|
| | | | Carga de compressão = 100Kg | | | | | | Carga de compressão = 200 kg | | | | | | |
| | | | Traço 1 | | Traço 2 | | Traço 3 | | Traço 1 | | Traço 2 | | Traço 3 | | |
| | | | individual | médio | individual | médio | individual | médio | individual | médio | individual | médio | individual | médio | |
| F1 | 1,10 | 0,72 | 7,58 | 7,76 | 29,39 | 31,64 | 18,22 | 21,49 | 9,03 | 9,93 | 44,33 | 45,32 | 19,98 | 20,15 | |
| | | | 7,75 | | 34,28 | | 26,23 | | 10,74 | | 43,01 | | 17,23 | | |
| | | | 7,96 | | 31,26 | | 20,03 | | 10,03 | | 48,62 | | 23,25 | | |
| | 1,35 | 0,91 | 4,77 | 3,83 | 7,19 | 7,03 | 7,19 | 5,02 | 5,71 | 3,35 | 3,55 | 9,66 | 9,32 | 8,22 | 7,33 |
| | | | | 5,41 | | 7,22 | | 6,27 | | 3,52 | | 9,76 | | 7,01 | |
| | | | | 5,08 | | 7,33 | | 5,83 | | 3,79 | | 8,54 | | 6,76 | |
| | 1,60 | 1,03 | 2,20 | 2,23 | 5,08 | 5,00 | 5,08 | 3,10 | 3,32 | 2,33 | 2,17 | 3,96 | 4,22 | 2,60 | 2,46 |
| | | | | 2,11 | | 5,01 | | 3,79 | | 1,98 | | 4,89 | | 2,45 | |
| | | | | 2,26 | | 5,22 | | 3,08 | | 2,20 | | 3,80 | | 2,33 | |
| F2 | 1,10 | 0,51 | 13,54 | 17,20 | > 60 | | 39,64 | 35,26 | > 60 | | > 60 | | > 60 | | |
| | | | 18,42 | | 31,08 | > 60 | | | > 60 | | > 60 | | | | |
| | | | 19,64 | | 35,05 | > 60 | | | > 60 | | > 60 | | | | |
| | 1,35 | 0,51 | 13,98 | 10,29 | > 60 | | 34,14 | 37,42 | 36,01 | 49,54 | > 60 | | > 60 | | |
| | | | | 14,40 | 37,36 | 56,02 | > 60 | | > 60 | | | | | | |
| | | | | 17,26 | 40,77 | 56,58 | > 60 | | > 60 | | | | | | |
| | 1,60 | 1,18 | 1,79 | 1,71 | 4,77 | 4,33 | 4,77 | 2,31 | 2,43 | 8,42 | 9,01 | 33,89 | 37,48 | 12,29 | 13,19 |
| | | | | 2,00 | | 4,72 | | 2,39 | | 9,60 | | 38,02 | | 13,68 | |
| | | | | 1,65 | | 5,26 | | 2,58 | | - | | 40,53 | | 13,60 | |
| F3 | 1,10 | 0,27 | 39,40 | 37,62 | > 60 | | > 60 | | > 60 | | > 60 | | > 60 | | |
| | | | 35,16 | | > 60 | | > 60 | | > 60 | | > 60 | | | | |
| | | | 38,29 | | > 60 | | > 60 | | > 60 | | > 60 | | | | |
| | 1,35 | 0,77 | 4,50 | 4,58 | 25,95 | - | 25,95 | 7,42 | 10,30 | > 60 | | > 60 | | > 60 | |
| | | | | 4,15 | | 25,66 | | 10,52 | | > 60 | | > 60 | | | |
| | | | | 4,76 | | 26,23 | | 12,95 | | > 60 | | > 60 | | | |
| | 1,60 | - | 1,27 | 1,40 | 2,39 | 2,70 | 2,39 | 1,39 | 1,61 | 6,70 | 4,28 | 12,16 | 14,01 | 5,23 | 6,74 |
| | | | | 1,33 | | 2,21 | | 1,60 | | 3,22 | | 19,92 | | 8,39 | |
| | | | | 1,08 | | 2,25 | | 1,85 | | 2,91 | | 9,95 | | 6,59 | |

e = excentricidade;

x = amplitude de vibração – Tabela 6.34.

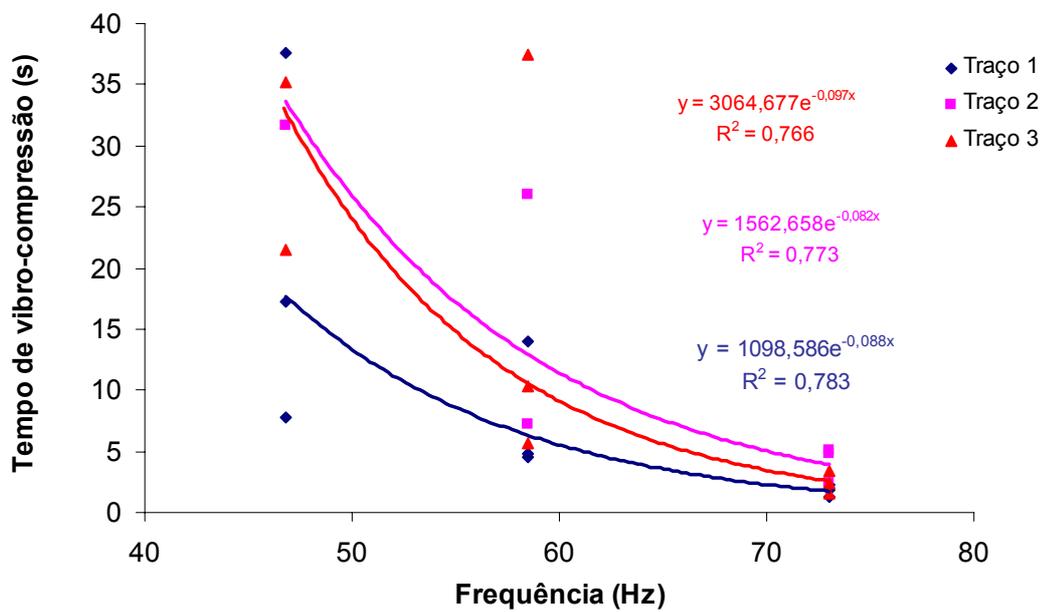
Tabela 6.38 – Parâmetros estatísticos obtidos nas análises fatoriais – tempo de vibro-compressão

| Fonte | | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | |
|-----------|-------------|---|----|---------|--------|-----------------------------------|
| | | SQ | GL | MQ | F | $F_{0,05}(\text{fonte,residual})$ |
| Análise 1 | F | 420,51 | 2 | 210,25 | 66,57 | 3,55 |
| | e | 1718,81 | 2 | 859,41 | 272,08 | 3,55 |
| | $f_x e$ | 1152,80 | 4 | 288,20 | 91,24 | 2,93 |
| | residual | 56,85 | 18 | 3,16 | | |
| Análise 2 | T | 1322,06 | 2 | 661,03 | 264,34 | 3,26 |
| | e | 3947,40 | 2 | 1973,70 | 789,25 | 3,26 |
| | C | 38,93 | 1 | 38,93 | 15,57 | 4,11 |
| | $T_x e$ | 1414,57 | 4 | 353,64 | 141,42 | 2,63 |
| | $T_x C$ | 73,31 | 2 | 36,66 | 14,66 | 3,26 |
| | $C_x e$ | 71,03 | 2 | 35,51 | 14,20 | 3,26 |
| | $T_x e_x C$ | 122,26 | 4 | 30,56 | 12,22 | 2,63 |
| | residual | 90,03 | 36 | 2,50 | | |

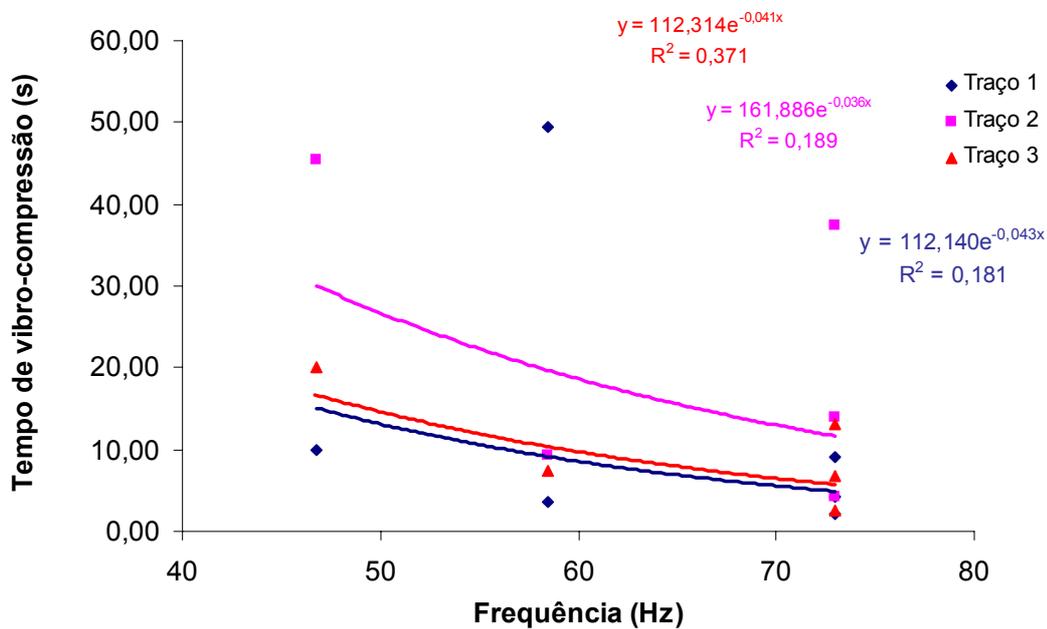
F = frequência
e = excentricidade
T = traço
C = carga

Fazendo-se uma análise da influência da frequência no tempo de vibro-compressão (Figura 6.60), verifica-se que as dispersões obtidas são muito altas, haja vista os valores de R^2 encontrados. No caso da carga de 100 kg (Figura 6.60a), o valor de R^2 ficou na casa de 0,77; já para o caso da carga de 200 kg, as dispersões foram altíssimas, sendo que os valores de R^2 ficaram na casa de 0,18 para os traços 1 e 2.

Quando se analisa o tempo de vibro-compressão em função da amplitude de vibração (Figura 6.61) verifica-se que as dispersões encontradas em relação às expressões ajustadas são baixas (valores de R^2 superiores a 0,95; com exceção do Traço 2 - carga de 100 kg onde o valor de R^2 foi de 0,86). Através dos parâmetros estatísticos das regressões lineares resultantes da linearização das funções exponenciais apresentadas na Figura 6.61, pode-se afirmar que existe uma correlação significativa entre as variáveis estudadas (tempo de vibro-compressão e amplitude de vibração) a um nível de confiabilidade de 98% (Tabela 6.39). Em outras palavras, os gráficos apresentados nas Figuras 6.60 e 6.61 dão um indicativo de que a amplitude é o parâmetro que governa o tempo de vibro-compressão, independente da frequência de vibração.

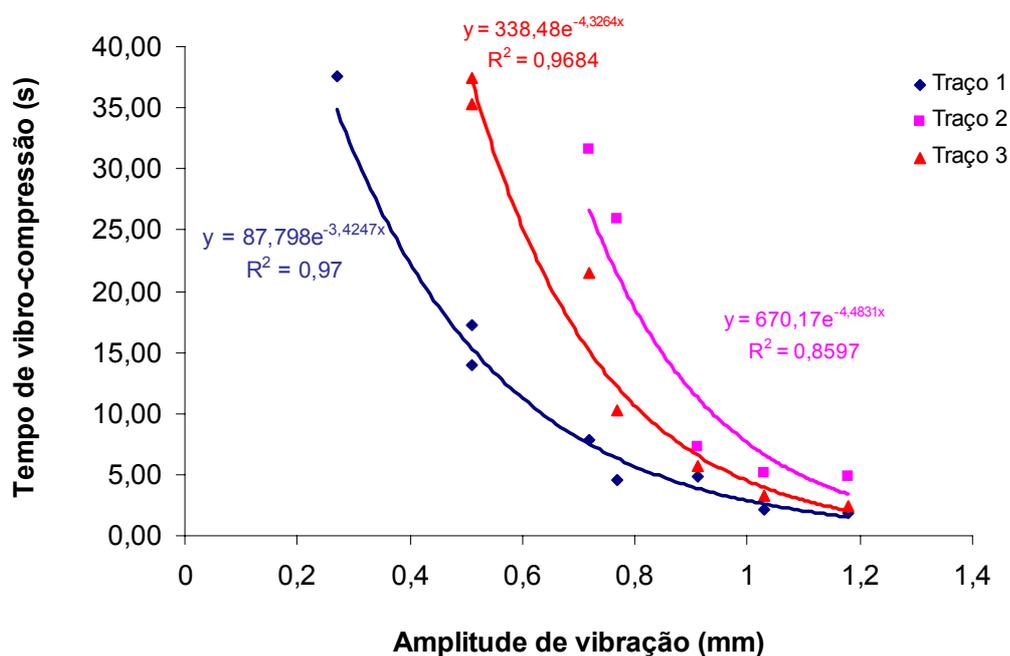


a) carga de 100 kg

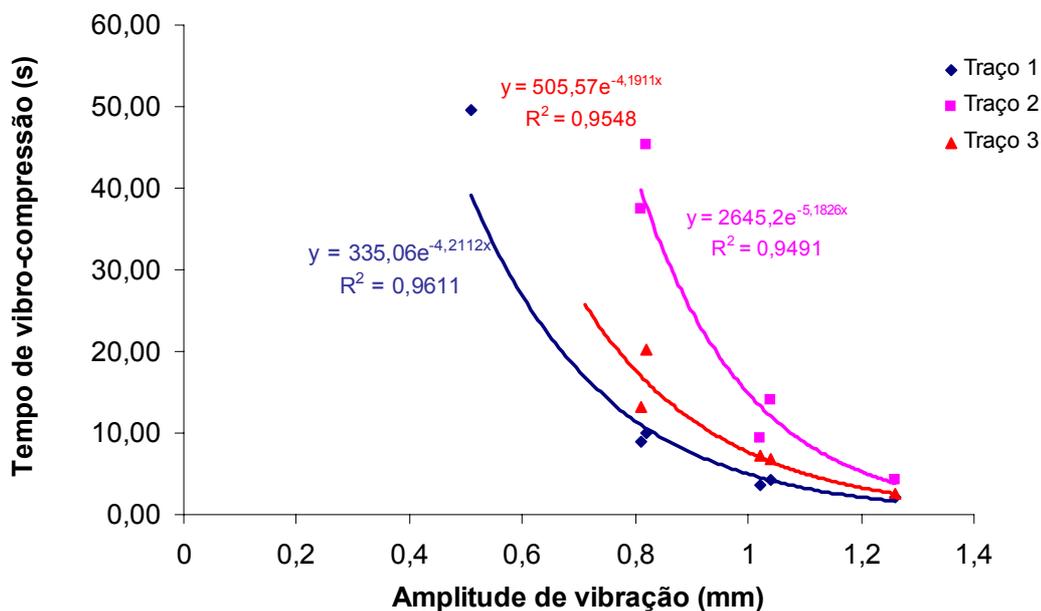


b) carga de 200 kg

Figura 6.60 – Tempo de vibro-compressão em função da frequência de vibração: a) carga de 100 kg; b) carga de 200 kg



a) carga de 100 kg



b) carga de 200 kg

Figura 6.61 – Tempo de vibro-compressão em função da amplitude de vibração: a) carga de 100 kg; b) carga de 200 kg

Tabela 6.39 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.61

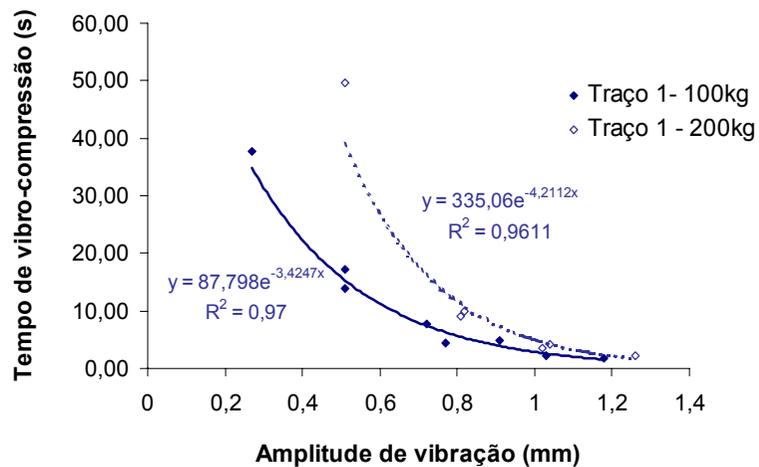
| Carga | Traço | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------|-------|-------------------------|-------|------|------|------|-------|--------------------|---|----------------|
| | | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R ² |
| 100kg | 1 | 4,48 | -3,42 | 0,19 | 0,25 | 0,20 | 13,94 | 100,00 | 8 | 0,9700 |
| | 2 | 6,51 | -4,48 | 0,98 | 1,05 | 0,39 | 4,29 | 97,67 | 5 | 0,8597 |
| | 3 | 5,82 | -4,33 | 0,29 | 0,35 | 0,22 | 12,39 | 99,99 | 7 | 0,9684 |
| 200kg | 1 | 5,81 | -4,21 | 0,40 | 0,42 | 0,24 | 9,95 | 99,94 | 6 | 0,9611 |
| | 2 | 7,88 | -5,18 | 0,70 | 0,69 | 0,26 | 7,48 | 99,51 | 5 | 0,9491 |
| | 3 | 6,23 | -4,19 | 0,53 | 0,53 | 0,20 | 7,96 | 99,59 | 5 | 0,9548 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

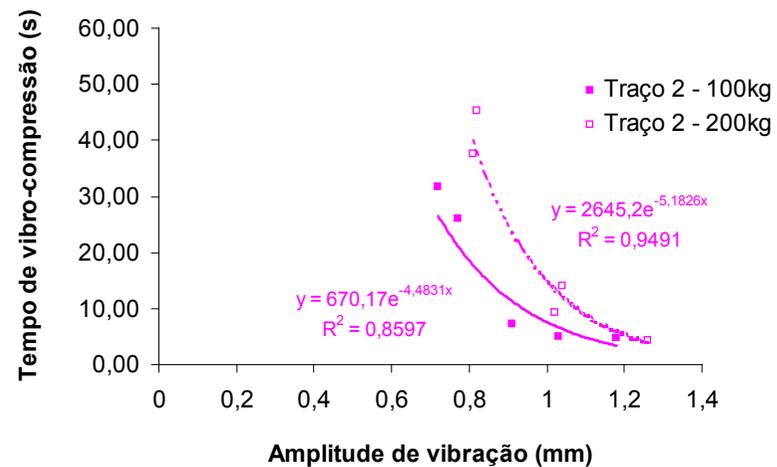
Através dos gráficos apresentados na Figura 6.61, pode-se verificar também que quanto maior a amplitude de vibração, menor é o tempo necessário para compactar as peças. Porém amplitudes de vibração acima de 1,0 mm não resultaram em reduções significativas no tempo de vibro-compressão para o grau de compacidade empregado (porcentagem de volume de sólido= 78,6%).

No que tange à influência da carga de compressão no tempo necessário para a moldagem das peças quando são comparadas as curvas apresentadas na Figura 6.62, onde se encontram, isoladamente, em função do traço utilizado, as curvas de tempo de vibro-compressão pela amplitude de vibração, percebe-se que existe uma diferença significativa a um nível de confiabilidade de 95 % (Tabela 6.40), ou seja, com o aumento da carga de compressão, houve um aumento no tempo de vibro-compressão das peças. Acredita-se que ao se elevar o nível de carga houve um aumento do atrito interno entre os grãos da mistura, dificultando a acomodação dos mesmos, o que resultou em um aumento no tempo necessário para a compactação das peças.

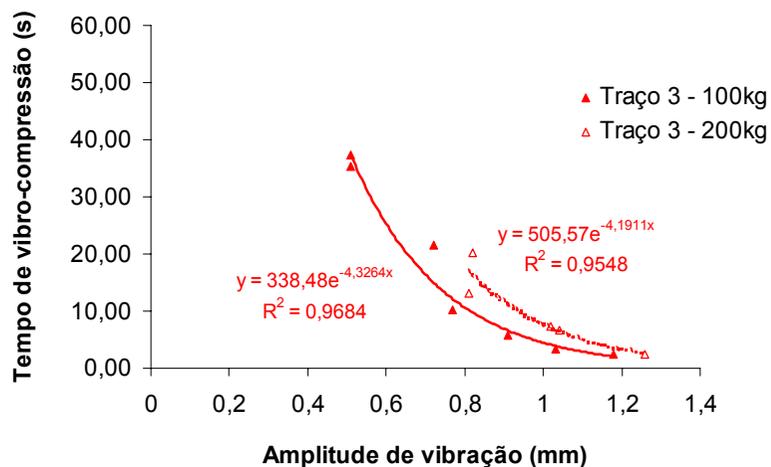
Com relação aos traços estudados, houve uma diferença significativa entre as curvas de tempo de vibro-compressão pela amplitude de vibração apresentadas na Figura 6.61 a um nível de confiabilidade de 99,97 % (Tabela 6.41). Vale ressaltar que, independente dos parâmetros de máquina (frequência, amplitude e carga de compressão) não houve alterações quanto ao desempenho dos traços no que tange ao tempo de vibro-compressão, ou seja, para todas as situações, o Traço 1 apresentou um desempenho superior ao Traço3, que por sua vez, foi mais eficiente que o Traço 2.



a) Traço 1



b) Traço 2



c) Traço 3

Figura 6.62 – Tempo de vibro-compressão x amplitude de vibração – cargas de 100 e 200 kg: a) Traço 1; b) Traço 2; c) Traço 3

Tabela 6.40 – Comparação de funções lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.62

| | Carga (kg) | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|---------|------------|---|----|---|----|-------|--------------------|
| | | SQR | GL | a | b | F | confiabilidade (%) |
| Traço 1 | 100 | 0,23 | 6 | 2 | 11 | 11,94 | 99,82 |
| | 200 | 2,40 | 5 | | | | |
| | Todas | 8,34 | 13 | | | | |
| Traço 2 | 100 | 0,47 | 3 | 2 | 6 | 5,52 | 95,63 |
| | 200 | 0,20 | 3 | | | | |
| | Todas | 1,89 | 8 | | | | |
| Traço 3 | 100 | 0,23 | 5 | 2 | 8 | 7,85 | 98,70 |
| | 200 | 0,11 | 3 | | | | |
| | Todas | 1,03 | 10 | | | | |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Tabela 6.41 – Comparação de funções lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.61

| Carga | Traço | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|--------|-------|---|----|---|----|-------|--------------------|
| | | SQR | GL | a | b | F | confiabilidade (%) |
| 100 kg | 1 | 0,23 | 6 | 4 | 14 | 15,46 | 100,00 |
| | 2 | 0,47 | 3 | | | | |
| | 3 | 0,23 | 5 | | | | |
| | Todos | 5,05 | 18 | | | | |
| 200 kg | 1 | 0,24 | 4 | 4 | 10 | 15,75 | 99,97 |
| | 2 | 0,20 | 3 | | | | |
| | 3 | 0,11 | 3 | | | | |
| | Todos | 4,01 | 14 | | | | |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão encontrados para as PCP produzidas no equipamento protótipo e suas massas saturadas são apresentados nas Tabelas 6.42, 6.43 e 6.44, respectivamente, Traço 1, 2 e 3. Semelhante ao estudo da influência dos parâmetros de máquina no tempo de vibro-compressão, houve situações onde não foi possível a moldagem das peças, inviabilizando uma análise estatística mais aprimorada, através de experimentos fatoriais. Nesse caso em particular não existe nenhum indício direto da influência de algum parâmetro de máquina no resultado de resistência à compressão. Em função disso, foram realizadas análises fatoriais utilizando-se apenas parte dos resultados (pequenos grupos) descritos abaixo:

- 1ª análise: a primeira análise abrangeu todos os resultados de resistência à compressão obtidos para as peças produzidas com o Traço 1, para uma carga de compressão de 100 kg. Com isso, pode-se verificar a influência da frequência, da amplitude e da inter-relação entre as mesmas na resistência à compressão das referidas peças.
- 2ª análise: a segunda análise envolveu os resultados de resistência à compressão das peças produzidas com os Traços 1, 2 e 3, para as cargas de 100 e 200 kg, as três excentricidades e a frequência 1 (46,8 Hz). O objetivo foi avaliar a influência da carga, da amplitude, dos traços e da inter-relação entre os mesmos na resistência à compressão das peças.

Na Tabela 6.45 são apresentados os parâmetros estatísticos das referidas análises. Em ambos os casos, o fator que influenciou com um nível de confiabilidade de 95 % foi a excentricidade ($F > F_{0,05(\text{fonte}, \text{residual})}$), sendo que, na análise 2, houve uma pequena influência da inter-relação entre o traço e a excentricidade.

Devido à influência significativa da excentricidade nos resultados apresentados, foi feita uma análise da amplitude na resistência à compressão das peças. Na Figura 6.63 são apresentados os gráficos de resistência à compressão das peças em função da amplitude de vibração para os Traços 1, 2 e 3. Através dos referidos gráficos e dos resultados obtidos nas análises estatísticas, apresentados na Tabela 6.46, verifica-se que existe uma relação significativa, com um nível de confiabilidade de 95% ($t > t_{0,025}$), entre as variáveis estudadas, para os Traços 1 e 2. Porém as dispersões encontradas foram muito altas (valores de $R^2 < 0,37$), inviabilizando qualquer inferência ou previsão de resistência em função da amplitude do movimento de vibração. As análises estatísticas mostraram que, para o Traço 3, não houve uma relação significativa entre as variáveis estudadas para um nível de confiabilidade de 95%.

Tabela 6.42 – Resistências à compressão e massas específicas saturadas - Traço 1

| Frequência | Excentricidade | 100 kg | | | | 200 kg | | | |
|------------|-------------------------|---|-------|--------------------------------|-------|---|-------|--------------------------------|-------|
| | | Massa específica saturada (kg/dm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | | Massa específica saturada (kg/dm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | |
| | | individual | médio | individual | médio | individual | médio | individual | médio |
| F1 | e ₁ =1,10 mm | 2,256 | 2,26 | 40,87 | 39,72 | 2,239 | 2,24 | 36,78 | 37,73 |
| | | 2,256 | | 37,57 | | 2,247 | | 38,75 | |
| | | 2,261 | | 40,71 | | 2,243 | | 37,65 | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,249 | 2,25 | 38,59 | 41,00 | 2,227 | 2,24 | 40,63 | 40,66 |
| | | 2,254 | | 41,66 | | 2,239 | | 41,50 | |
| | | 2,258 | | 42,76 | | 2,249 | | 39,85 | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,252 | 2,26 | 41,89 | 42,94 | 2,257 | 2,25 | 42,99 | 42,44 |
| | | 2,278 | | 42,52 | | 2,247 | | 42,05 | |
| | | 2,262 | | 44,41 | | 2,253 | | 42,28 | |
| F2 | e ₁ =1,10 mm | 2,234 | 2,23 | 39,22 | 37,83 | não foram moldadas | | | |
| | | 2,225 | | 37,96 | | | | | |
| | | 2,243 | | 36,31 | | | | | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,242 | 2,25 | 39,77 | 41,13 | 2,241 | 2,24 | 40,79 | 41,68 |
| | | 2,242 | | 41,42 | | 2,238 | | 41,34 | |
| | | 2,251 | | 42,21 | | 2,255 | | 42,91 | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,249 | 2,25 | 41,18 | 40,53 | 2,248 | 2,25 | 39,06 | 39,69 |
| | | 2,261 | | 40,79 | | 2,244 | | 40,32 | |
| | | 2,243 | | 39,61 | | - | | - | |
| F3 | e ₁ =1,10 mm | 2,246 | 2,24 | 36,70 | 38,49 | não foram moldadas | | | |
| | | 2,230 | | 38,98 | | | | | |
| | | 2,237 | | 39,77 | | | | | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,244 | 2,25 | 42,05 | 41,76 | não foram moldadas | | | |
| | | 2,244 | | 41,58 | | | | | |
| | | 2,252 | | 41,66 | | | | | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,296 | 2,28 | 42,36 | 42,44 | 2,256 | 2,25 | 41,26 | 41,11 |
| | | 2,290 | | 43,62 | | 2,242 | | 40,95 | |
| | | 2,258 | | 41,34 | | 2,243 | | - | |

Tabela 6.43 – Resistências à compressão e massas específicas saturadas - Traço 2

| Frequência | Excentricidade | 100 kg | | | | 200 kg | | | |
|------------|-------------------------|---|-------|--------------------------------|-------|---|-------|--------------------------------|-------|
| | | Massa específica saturada (kg/dm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | | Massa específica saturada (kg/dm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | |
| | | individual | médio | individual | médio | individual | médio | individual | médio |
| F1 | e ₁ =1,10 mm | 2,234 | 2,23 | 37,96 | 38,17 | 2,231 | 2,23 | 38,83 | 39,27 |
| | | 2,233 | | 39,77 | | 2,235 | | 39,14 | |
| | | 2,226 | | 36,78 | | 2,233 | | 39,85 | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,256 | 2,26 | 41,34 | 42,34 | 2,252 | 2,25 | 40,24 | 40,95 |
| | | 2,268 | | 42,13 | | 2,246 | | 41,26 | |
| | | 2,263 | | 43,54 | | 2,246 | | 41,34 | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,246 | 2,25 | 42,28 | 42,94 | 2,247 | 2,24 | 42,60 | 41,37 |
| | | 2,254 | | 44,17 | | 2,227 | | 40,71 | |
| | | 2,246 | | 42,36 | | 2,243 | | 40,79 | |
| F2 | e ₁ =1,10 mm | não foram moldadas | | | | não foram moldadas | | | |
| | e ₂ =1,35 mm | não foram moldadas | | | | não foram moldadas | | | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,247 | 2,24 | 42,13 | 42,52 | 2,225 | 2,23 | 38,90 | 40,00 |
| | | 2,242 | | 41,97 | | 2,224 | | 39,38 | |
| | | 2,238 | | 43,46 | | 2,232 | | 41,73 | |
| F3 | e ₁ =1,10 mm | não foram moldadas | | | | não foram moldadas | | | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,229 | 2,24 | 37,73 | 40,11 | não foram moldadas | | | |
| | | 2,234 | | 40,71 | | | | | |
| | | 2,262 | | 41,89 | | | | | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,274 | 2,26 | 42,91 | 43,17 | 2,236 | 2,24 | 41,50 | 41,77 |
| | | 2,264 | | 43,93 | | - | | - | |
| 2,248 | | 42,68 | | 2,239 | | 42,05 | | | |

Tabela 6.44 – Resistências à compressão e massas específicas saturadas - Traço 3

| Frequência | Excentricidade | 100 kg | | | | 200 kg | | | |
|------------|-------------------------|---|-------|--------------------------------|-------|---|-------|--------------------------------|-------|
| | | Massa específica saturada (kg/dm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | | Massa específica saturada (kg/dm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | |
| | | individual | médio | individual | médio | individual | médio | individual | médio |
| F1 | e ₁ =1,10 mm | 2,268 | 2,26 | 39,77 | 39,30 | 2,260 | 2,27 | 39,30 | 39,93 |
| | | 2,270 | | 39,30 | | 2,272 | | 40,71 | |
| | | 2,255 | | 38,83 | | 2,265 | | 39,77 | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,280 | 2,28 | 40,08 | 40,48 | 2,280 | 2,27 | 39,85 | 41,26 |
| | | 2,290 | | 40,32 | | 2,269 | | 41,89 | |
| | | 2,284 | | 41,03 | | 2,269 | | 42,05 | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,276 | 2,27 | 40,79 | 40,42 | 2,272 | 2,26 | 39,45 | 38,88 |
| | | 2,278 | | 39,30 | | 2,259 | | 37,25 | |
| | | 2,269 | | 41,18 | | 2,262 | | 39,93 | |
| F2 | e ₁ =1,10 mm | 2,253 | 2,26 | 36,70 | 36,49 | não foram moldadas | | | |
| | | 2,275 | | 36,86 | | não foram moldadas | | | |
| | | 2,260 | | 35,92 | | não foram moldadas | | | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,260 | 2,26 | 36,39 | 37,46 | não foram moldadas | | | |
| | | 2,261 | | 39,06 | | não foram moldadas | | | |
| | | 2,270 | | 36,94 | | não foram moldadas | | | |
| | e ₃ =1,60 mm | - | 2,30 | - | 38,90 | 2,261 | 2,26 | 39,14 | 39,43 |
| | | 2,296 | | 40,40 | | 2,266 | | 41,34 | |
| | | 2,303 | | 37,41 | | 2,254 | | 37,80 | |
| F3 | e ₁ =1,10 mm | não foram moldadas | | | | não foram moldadas | | | |
| | e ₂ =1,35 mm | 2,251 | 2,26 | 39,93 | 40,27 | não foram moldadas | | | |
| | | 2,260 | | 39,85 | | não foram moldadas | | | |
| | | 2,263 | | 41,03 | | não foram moldadas | | | |
| | e ₃ =1,60 mm | 2,268 | 2,26 | 40,95 | 41,21 | 2,251 | 2,26 | 36,78 | 37,33 |
| | | 2,254 | | 40,87 | | 2,255 | | 36,15 | |
| 2,269 | | 41,81 | | 2,259 | | 39,06 | | | |

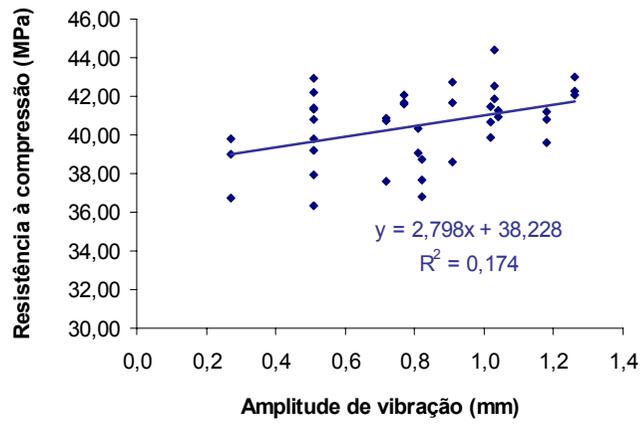
Tabela 6.45 – Parâmetros estatísticos obtidos nas análises fatoriais

| Fonte | | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | |
|-----------|-------------|---|----|-------|-------|-----------------------------------|
| | | SQ | GL | MQ | F | $F_{0,05}(\text{fonte,residual})$ |
| Análise 1 | F | 9,50 | 2 | 4,75 | 2,36 | 3,55 |
| | e | 54,46 | 2 | 27,23 | 13,55 | 3,55 |
| | $f_x e$ | 6,71 | 4 | 1,68 | 0,83 | 2,93 |
| | residual | 36,17 | 18 | 2,01 | | |
| Análise 2 | T | 6,80 | 2 | 3,40 | 2,59 | 3,26 |
| | e | 64,15 | 2 | 32,07 | 24,38 | 3,26 |
| | C | 3,87 | 1 | 3,87 | 2,94 | 4,11 |
| | $T_x e$ | 30,45 | 4 | 7,61 | 5,79 | 2,63 |
| | $T_x C$ | 1,87 | 2 | 0,93 | 0,71 | 3,26 |
| | $C_x e$ | 3,14 | 2 | 1,57 | 1,19 | 3,26 |
| | $T_x e_x C$ | 11,13 | 4 | 2,78 | 2,11 | 2,63 |
| | residual | 47,36 | 36 | 1,32 | | |

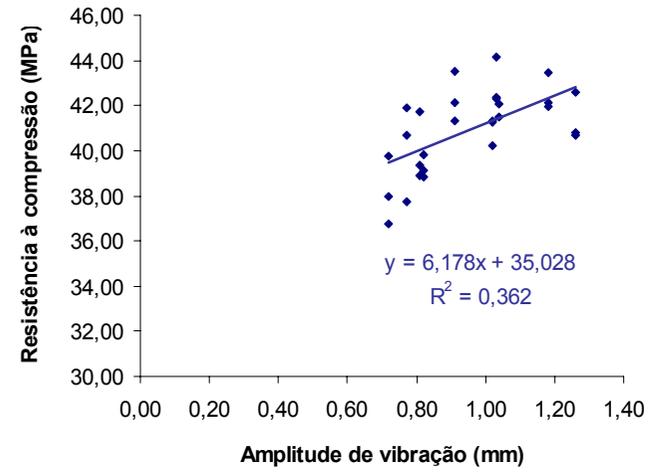
F = frequência
e = excentricidade
T = traço
C = carga

Tabela 6.46 – Parâmetros estatísticos obtidos para as correlações entre a resistência e a amplitude de vibração

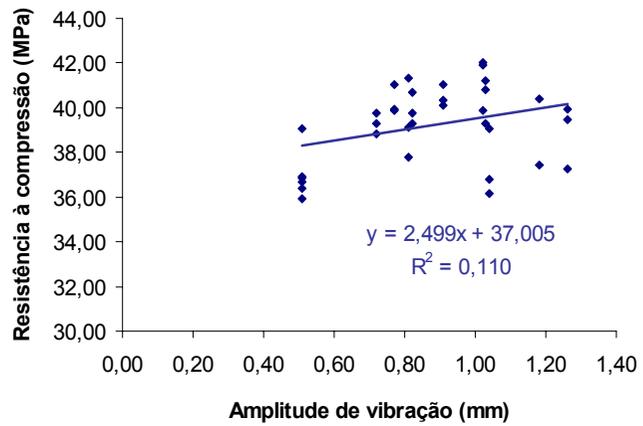
| Traço | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|------|------|------|------|------|-------------------|----|--------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | $t_{(n-2) 0,025}$ | n | R^2 |
| 1 | 38,23 | 2,80 | 0,84 | 0,99 | 1,75 | 2,83 | 2,33 | 40 | 0,1743 |
| 2 | 35,03 | 6,18 | 1,53 | 1,58 | 1,47 | 3,91 | 2,37 | 29 | 0,3617 |
| 3 | 37,01 | 2,50 | 1,12 | 1,24 | 1,65 | 2,02 | 2,35 | 35 | 0,1097 |



a) Traço 1



b) Traço 2



c) Traço 3

Figura 6.63 – Resistência à compressão x amplitude de vibração: a) Traço1; b) Traço2; c) Traço 3

Na Tabela 6.47 são apresentados os resultados de resistência à compressão e massa específica saturada para os corpos-de-prova 9 x 8 cm, moldados com os Traços 1, 2 e 3.

Tabela 6.47 – Resistência à compressão e massa específica saturada para os corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Traço | Massa específica saturada (kg/dm ³) | | Resistência à compressão (MPa) | |
|-------|---|-------|--------------------------------|-------|
| | individual | médio | individual | médio |
| 1 | 2,23 | 2,23 | 35,00 | 34,16 |
| | 2,23 | | 32,91 | |
| | 2,23 | | 34,58 | |
| | 2,27 | 2,27 | 39,27 | 40,57 |
| | 2,27 | | 41,89 | |
| | 2,28 | | 40,56 | |
| | 2,31 | 2,31 | 40,32 | 41,20 |
| | 2,31 | | 41,73 | |
| | 2,31 | | 41,55 | |
| 2 | 2,23 | 2,23 | 36,13 | 37,32 |
| | 2,23 | | 38,49 | |
| | 2,23 | | 37,33 | |
| | 2,27 | 2,27 | 44,04 | 42,55 |
| | 2,27 | | 42,86 | |
| | 2,28 | | 40,76 | |
| | 2,32 | 2,32 | 46,40 | 44,72 |
| | 2,32 | | 43,54 | |
| | 2,32 | | 44,21 | |
| 3 | 2,24 | 2,24 | 36,15 | 36,31 |
| | 2,23 | | 35,52 | |
| | 2,24 | | 37,25 | |
| | 2,29 | 2,29 | 39,85 | 40,90 |
| | 2,29 | | 41,42 | |
| | 2,28 | | 41,42 | |
| | 2,35 | 2,35 | 37,02 | 37,91 |
| | 2,35 | | 38,67 | |
| | 2,34 | | 38,04 | |

Determinando-se, através de interpolações lineares, as resistências equivalentes dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função das massas específicas saturadas das PCP, é possível se obter uma série de pontos, compostos pela resistência à compressão do corpos-de-prova 9 x 8 cm e a resistência à compressão da PCP, ambas para uma mesma massa específica saturada e mesmo traço. Dispondo-se esses pontos (resistência do corpo-de-prova, resistência da peça), na curva de correlação para peças de 80 mm apresentada na Figura 6.30, pode-se verificar que os mesmos

enquadram-se dentro da faixa de previsão para valores individuais e praticamente em cima da curva de correlação média, principalmente, no caso dos Traços 1 e 2 (Figuras 6.64 e 6.65). Para o Traço 3 (Figura 6.66), apesar dos referidos pontos enquadrarem-se dentro da faixa de previsão para valores individuais, os mesmos ficaram levemente abaixo da curva de correlação média, indicando que a resistência das PCP, produzidas no equipamento protótipo ficou aquém da esperada, tomando-se como referência a resistência dos corpos-de-prova 9 x 8 cm.

Acredita-se que essa diferença tenha ocorrido pelo fato da maior quantidade de água empregada no Traço 3 ($a/c = 0,50$), determinada através do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. A umidade ótima utilizada para os Traços 1 e 2, apresentou-se adequada, independente da regulagem de máquina empregada. Contudo, a quantidade adotada para o Traço 3 mostrou-se, em alguns casos, ser excessiva, principalmente quando os tempos de vibro-compressão eram altos (> 10 s), comparando-se com os tempos de vibro-compressão reais. Nesses casos, a quantidade de água na superfície das peças fazia com que as mesmas ficassem aderidas na sapata de compressão do equipamento protótipo. A hipótese levantada é de que o efeito de vibração, aliado a maior quantidade de água e ao grau de compactação empregado, resultaram em uma espécie de exsudação da água, quando da moldagem das peças. Isso fez com que as peças apresentassem poros interconectados ou pontos de acúmulo de água dentro da própria peça, resultando em pontos de fraqueza e reduzindo a resistência à compressão das referidas peças.

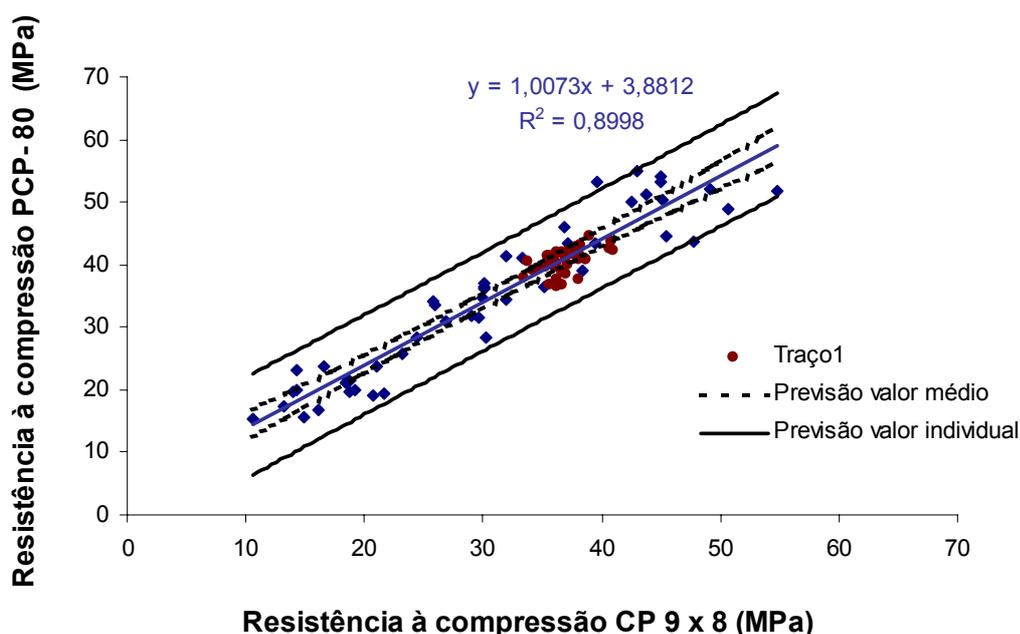


Figura 6.64 – Resistência à compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 1

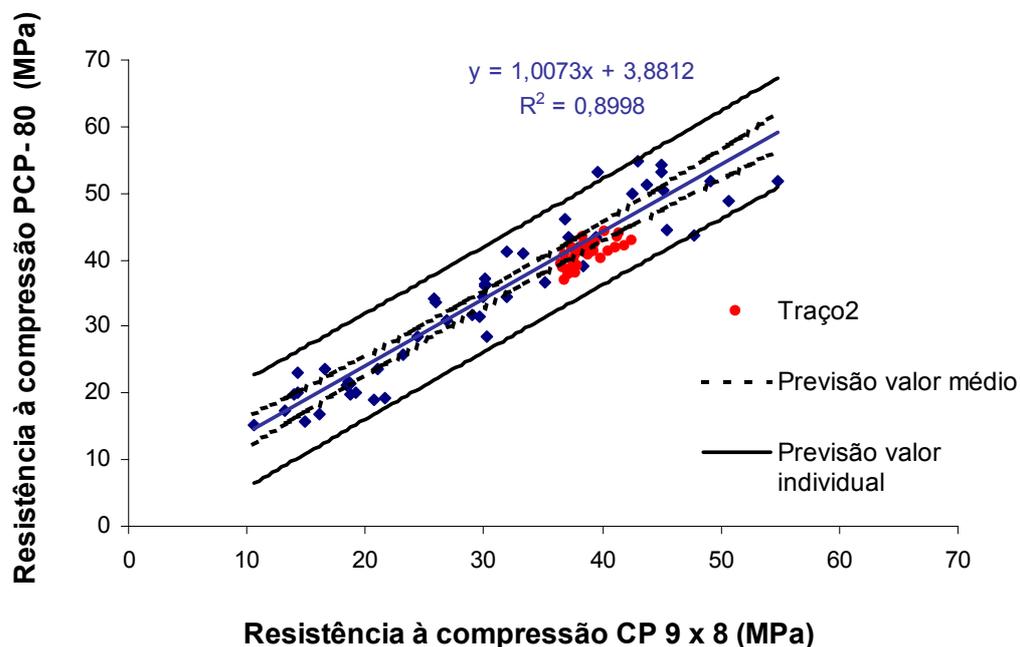


Figura 6.65 – Resistência à compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 2

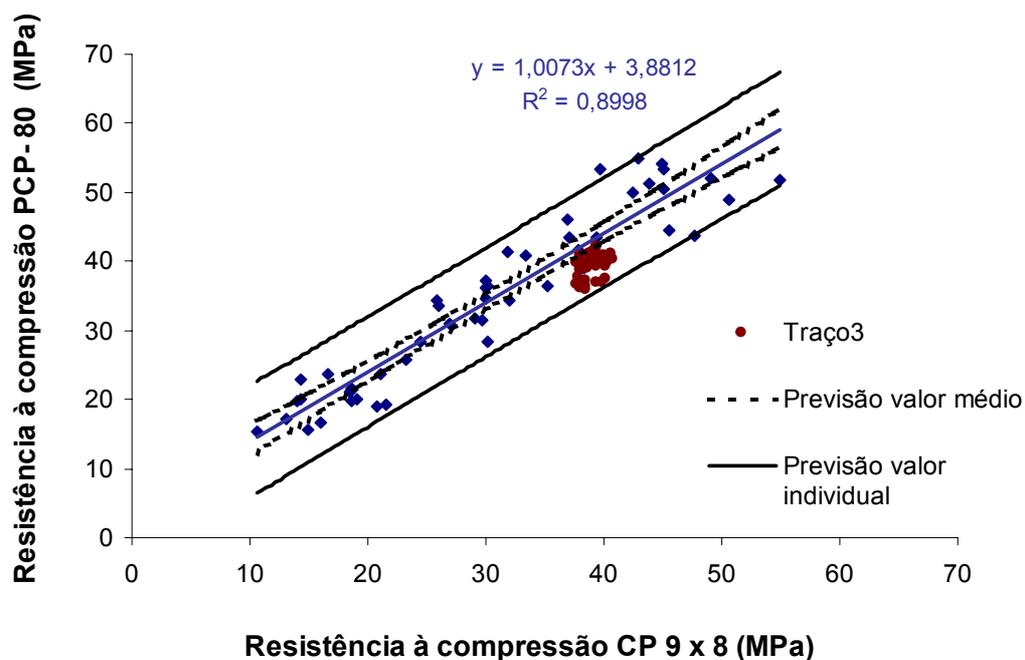


Figura 6.66 – Resistência à compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo em função da resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 3

6.3.4 – AVALIAÇÃO EM ESCALA REAL DA INFLUÊNCIA DO TIPO DE MISTURA NO TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DAS PCP

Em função das diferenças encontradas no estudo conduzido no equipamento protótipo com relação aos tempos de vibro-compressão, quando do emprego de diferentes misturas, decidiu-se utilizar as duas situações extremas dos estudos anteriores (melhor e pior caso - Traço 1 e 2) em uma situação real de produção. Para tal, foram produzidas PCP do tipo PAV2-80, empregando-se os Traços 1 e 2, no equipamento da empresa onde o presente trabalho foi conduzido (equipamento MONTANA, modelo MULTIBLOC MBX-975).

A idéia de se empregar esse equipamento surgiu em função da disponibilidade do mesmo e, pelo fato do referido equipamento trabalhar com efeito de choque. Esse efeito é capaz de produzir níveis de frequência mais elevados, em comparação a faixa utilizada nos estudos conduzidos no equipamento protótipo, podendo-se assim verificar se os resultados encontrados anteriormente podem ser estendidos para outros equipamentos, com diferentes sistemas de vibração.

Na Tabela 6.48 são apresentados os materiais e suas respectivas quantidades empregadas para a produção das PCP em escala real.

Tabela 6.48 – Quantidades dos materiais empregados para produção dos PAV2-80 no equipamento da MONTANA – MBX-975

| Materiais | Quantidade de material (kg) | | | |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| | Traço 1 | | Traço 2 | |
| | unitário | quantidade por virada | unitário | quantidade por virada |
| Cimento | 1,00 | 175 | 1,00 | 133 |
| AN1 | 3,88 | 679 | - | - |
| AN2 | 0,54 | 95 | - | - |
| AA | - | - | 4,50 | 600 |
| B0 | 1,20 | 210 | 1,12 | 150 |
| Aditivo ¹ | 0,35% | 612 g | 0,35% | 465g |
| Água | 6,55 % ² | 75 | 6,98% ² | 62 |

1 – Aditivo incorporador de ar que era empregado pela fábrica – (0,35% - proporção média indicada pelo fabricante do aditivo);

2 – Relação água / materiais secos (H) determinada através do processo de secagem (frigorífico).

Durante a produção das peças, regulava-se o tempo de alimentação de forma a obter diferentes graus de compactação e avaliava-se o tempo de vibro-compressão resultante, com o auxílio de um cronômetro manual. Esses tempos eram marcados nas chapas de apoio das peças com giz de cera, sendo essas chapas encaminhadas à grade. Ao término da moldagem das peças, a grade com todas as chapas marcadas era conduzida para uma área lateral onde, com o auxílio de uma balança com capacidade de 200 kg, eram determinados os pesos das chapas com as peças e o peso das chapas isoladamente, para a determinação do peso médio das peças através da expressão (27):

$$\text{Peso médio das peças} = \left(\frac{\text{Peso}_{\text{chapa+peças}} - \text{Peso}_{\text{chapa}}}{\text{número peças / chapa}} \right) \quad (27)$$

Antes do descarte das peças para a determinação do peso da chapa, eram determinadas as alturas das peças em oito pontos da chapa para a obtenção da altura média. De posse da massa verde, da altura média das peças e da área média do PAV2-80, determinada posteriormente em laboratório, obteve-se a porcentagem de volume de sólidos em função do tempo de vibro-compressão das PCP (Tabela 6.49).

Tabela 6.49 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento de vibro-compressão (MONTANA – MBX 975) – Traços 1 e 2

| Traço 1 | | Traço 2 | |
|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Tempo de vibro-compressão (s) | Porcentagem de volume de sólidos | Tempo de vibro-compressão (s) | Porcentagem de volume de sólidos |
| 8,68 | 80,6 | 4,20 | 72,8 |
| 5,70 | 78,6 | 1,85 | 72,6 |
| 11,67 | 81,1 | 0,87 | 69,7 |
| 6,37 | 77,9 | 4,64 | 71,9 |
| 1,73 | 74,7 | 10,30 | 77,9 |
| 4,35 | 76,1 | 4,26 | 74,7 |

Na Figura 6.67 é apresentado o gráfico de porcentagem de volume de sólido em função do tempo de vibro-compressão para os dois traços empregados no presente estudo. Através do referido gráfico e dos resultados do estudo de comparação de funções lineares, apresentados na Tabela 6.50, pode-se verificar que existe uma diferença significativa entre as curvas obtidas para o Traço 1 e 2, com um nível de confiabilidade de 99,68 %, o que condiz com os resultados obtidos no estudo anterior, no equipamento protótipo de vibro-compressão. Caso sejam fixadas

as porcentagens de volume de sólidos das peças e a regulação do equipamento (frequência, amplitude e nível de carga de compressão), o Traço 1 resultará em uma maior produtividade (menor tempo de vibro-compressão), se comparado ao Traço 2, independente do sistema de vibração empregado (com ou sem efeito de choque).

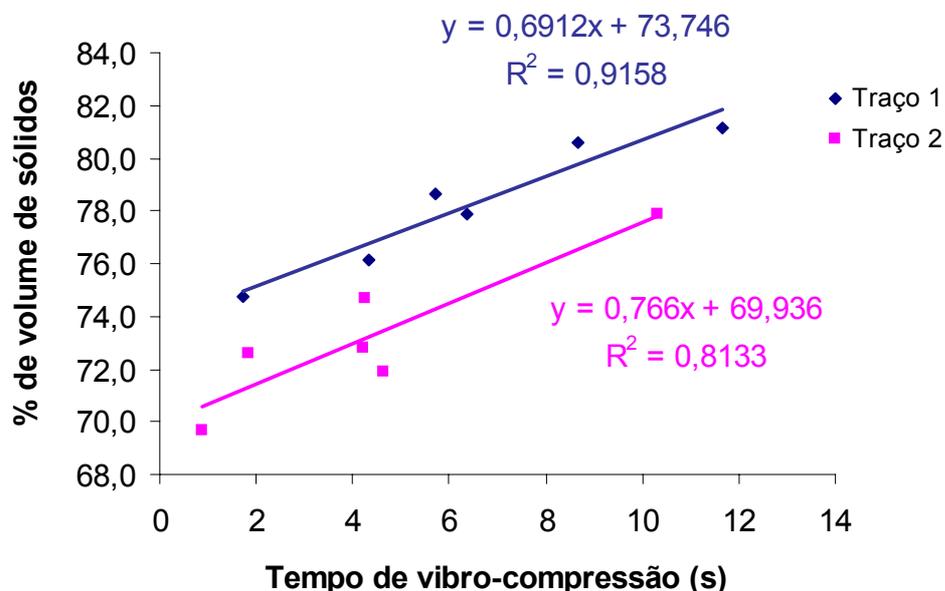


Figura 6.67 – Porcentagem de volume de sólidos em função do tempo de vibro-compressão para as PCP produzidas com os Traços 1 e 2 – MONTANA – MBX-975

Tabela 6.50 – Comparação de funções lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.62

| Traço | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|-------|---|----|---|---|-------|--------------------|
| | SQR | GL | a | b | F | confiabilidade (%) |
| 1 | 2,61 | 4 | 2 | 8 | 12,78 | 99,68 |
| 2 | 7,26 | 4 | | | | |
| Todos | 41,41 | 10 | | | | |

confiabilidade = 1 – significância (α)

6.3.5 – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que o parâmetro que exerce influência significativa no tempo de vibro-compressão das peças é a amplitude do movimento de vibração. Essa amplitude, em se tratando de produção de PCP, deve girar em torno de 0,8 a 1,0 mm. Valores acima dessa faixa não resultaram em reduções significativas no tempo de vibro-compressão das referidas peças, aumentando consideravelmente a energia de vibração, o que pode implicar em desgaste excessivo do equipamento.

No que tange à frequência de vibração, os resultados indicam que esse parâmetro não exerce influência sobre o tempo de vibro-compressão das PCP. Por isso, acredita-se que valores de frequência mais baixos (≈ 50 Hz), dentro da faixa de estudo (46 – 73 Hz), resultam em um menor desgaste do equipamento de vibro-compressão, uma vez que a energia é diretamente proporcional à frequência de vibração.

Com relação à carga de compressão, essa exerceu influência significativa sobre o tempo de vibro-compressão das PCP, sendo que para o carregamento maior houve um aumento no tempo necessário para a moldagem das peças. Acredita-se que por isso, os grandes fabricantes de máquina vibro-prensa (Besser e Columbia), utilizam em seus equipamentos apenas o peso de um pórtico metálico como aplicador de carga, sem o auxílio de um pistão hidráulico para aumentar o nível de carregamento sobre as peças.

Vale a pena ser enfatizado que os resultados obtidos através do soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, com relação à energia necessária para a moldagem dos mesmos, condizem com os resultados obtidos no equipamento protótipo e na própria máquina vibro-prensa em escala real, viabilizando o emprego da energia de compactação como parâmetro de avaliação de produtividade das misturas. O traço que demandou uma menor energia de compactação (Traço 1), foi o que apresentou melhor desempenho em todas as situações, quando do emprego da vibração. Conforme mencionado anteriormente, apesar do Traço 3 ter apresentado o pior desempenho com relação à energia de compactação, o fato de se conseguir trabalhar com um pouco mais de água nessa mistura, fez com que a mesma apresentasse um melhor desempenho, comparando-se com o Traço 2, em ambos os testes (energia de compactação do soquete de compactação e tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo).

No presente estudo não se conseguiu estabelecer uma relação direta entre os parâmetros de máquina e a resistência à compressão das PCP. Em termos práticos pode-se dizer que a influência dos parâmetros de máquina sobre a resistência das peças é pequena, comparando-se com a influência sobre o tempo de vibro-compressão. Em outras palavras, se forem tomados dois equipamentos de vibro-compressão diferentes, com parâmetros distintos, a influência desses parâmetros sobre a resistência das peças para uma dada porcentagem de volume de sólidos será muito pequena, comparada com a diferença obtida quando fixados os tempos de vibro-compressão. Em igualdade de produtividade (fixando-se o tempo de vibro-compressão) o equipamento que apresentar uma maior amplitude e menor nível de carga de compressão, produzirá peças com um maior grau de compactidade e, conseqüentemente, maior resistência.

Em função dos resultados de resistência das PCP produzidas no equipamento protótipo e seus respectivos corpos-de-prova 9 x 8 cm, pode-se concluir que é possível a previsão da resistência das PCP, através das curvas de correlação apresentadas no item 6.2.2.8. Conforme mencionado anteriormente, os pontos (resistência dos corpos-de-prova, resistência das PCP) enquadraram-se dentro da faixa de previsão para valores individuais e praticamente sobre a curva de correlação média, com exceção dos resultados obtidos para o Traço 3 que ficaram levemente abaixo da referida curva.

Através da moldagem das PCP no equipamento protótipo, pode-se verificar que é possível a determinação da quantidade ideal de água, empregando-se o equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, pois os parâmetros de máquina não influenciaram as condições superficiais das peças para tempos de vibro-compressão dentro dos tempos reais de produção (<10 segundos); com exceção do Traço 3, onde a quantidade de água adotada ($a/c = 0,50$) ficou um pouco acima da quantidade ideal.

6.4 – CORRELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DE UMA MÁQUINA VIBRO-PRENSA REAL E A ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO SOQUETE / TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DO EQUIPAMENTO PRÓTOTIPO

Através dos estudos apresentados nos itens anteriores pode-se perceber que tanto a energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm como o tempo de vibro-compressão, obtido através do equipamento protótipo, parecem ser indicativos da facilidade ou dificuldade de vibro-prensagem das misturas no próprio equipamento de vibro-compressão. Contudo, para se encontrar qual a real diferença em segundos de vibro-prensagem relativa a uma certa diferença em Joules, obtida através do soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, ou uma diferença em segundos, obtida através do equipamento protótipo de vibro-compressão, era preciso avaliar se existe uma correlação entre os referidos equipamentos. Além disso, era importante verificar se essa correlação não é influenciada pelo tipo de mistura empregada.

A seguir é apresentada a metodologia utilizada na presente fase do trabalho, bem como os resultados encontrados e a análise dos mesmos.

6.4.1 – METODOLOGIA EMPREGADA

6.4.1.1 – Moldagem das peças

Para a determinação da correlação entre o tempo de vibro-compressão da máquina vibroprensa utilizada no presente trabalho (MONTANA MBX-975) e, a energia de compactação do soquete utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, ou o tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo, foram empregados três diferentes traços, apresentados na Tabela 6.51. Além disso, esses testes tiveram como objetivo avaliar se o tipo de traço empregado influenciaria nas referidas correlações.

Os traços foram pesados e misturados nos equipamentos da própria fábrica, sendo coletada uma pequena quantidade (cerca de 20 litros) após a etapa de mistura, para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP no equipamento protótipo.

Durante a produção das PCP (PAV2-80) no equipamento de vibro-compressão da MONTANA, o tempo de alimentação do equipamento era regulado de forma a se obter diferentes graus de compacidade, avaliando-se o tempo de vibro-compressão resultante, com o auxílio de um cronômetro manual. Esses tempos eram marcados nas chapas de apoio das peças com giz de cera e essas chapas, por sua vez, eram encaminhadas à grade. Ao término da produção das peças, a grade com as chapas marcadas, era conduzida a uma área lateral para a determinação da massa específica verde média de cada chapa. Para tal, era determinado o peso

verde individual de todas as peças pertencentes à chapa em questão, bem como suas respectivas alturas. Posteriormente, no LMCC-UFSC, foi determinada a área média das PCP estudadas na presente fase (PAV2-80), o que permitiu a determinação das curvas de tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde das peças.

Tabela 6.51 – Traços empregados

| | Quantidade de material por virada (kg) | | | |
|---------|--|-----------|--------------------------|-------------------------|
| | Cimento | Brita "0" | Areia média ¹ | Areia fina ² |
| Traço 1 | 175 | 210 | 720 | 100 |
| Traço 2 | 175 | 130 | 700 | 200 |
| Traço 3 | 225 | 130 | 700 | 200 |

1 – areia média MF = 3,00

2 – areia fina MF = 0,90

Obs: Os materiais utilizados foram os materiais disponíveis na fábrica onde os estudos foram conduzidos;

Simultaneamente à moldagem das PCP na máquina vibro-prensa, foram moldados os corpos-de-prova 9 x 8 cm e as PCP, tipo PAV1-80, no equipamento protótipo, variando-se a massa específica verde (2,10; 2,20 e 2,30 kg/dm³) para a determinação da energia de compactação e do tempo de vibro-compressão necessários para a moldagem dos mesmos. Foi moldado um corpo-de-prova 9 x 8 cm e uma PCP, tipo PAV1-80, para cada massa específica empregada. Na Tabela 6.52 são apresentadas as massas verdes utilizadas para a moldagem dos referidos artefatos.

Cabe ressaltar que foram fixados os seguintes parâmetros para o equipamento protótipo:

- Excentricidade = 1,35 mm
- Frequência = 45,0 Hz (F1)
- Carga de compressão = 200 kg

Esses parâmetros foram adotados na tentativa de se obter parâmetros de máquina próximos aos do equipamento da MONTANA.

Tabela 6.52 – Massas verdes empregadas para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP

| d_{verde} (kg/dm ³) | Massa verde (g) | |
|--|-----------------|--------|
| | cp 9 x 8 cm | PCP |
| 2,10 | 1068,7 | 3360,0 |
| 2,20 | 1119,7 | 3520,0 |
| 2,30 | 1170,6 | 3680,0 |

6.4.2 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.4.2.1 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde das PCP - MONTANA

Na Tabela 6.53 são apresentadas as massas específicas verdes médias e os tempos de vibro-compressão resultantes das chapas, para os três traços empregados, referentes às PCP produzidas no equipamento da MONTANA MBX – 975.

Na Figura 6.68 é apresentado o gráfico de tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde média das PCP, para os três traços estudados. Linearizando-se as funções exponenciais apresentadas na Figura 6.68 e, analisando-se os parâmetros estatísticos das regressões lineares resultantes (Tabela 6.54), pode-se afirmar que existe uma correlação significativa entre as variáveis estudadas (tempo de vibro-compressão e massa específica verde) a um nível de confiabilidade superior a 96 %.

Tabela 6.53 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento da MONTANA

| | Massa específica verde média da chapa (kg/dm ³) | Tempo de vibro-compressão da chapa (s) |
|---------|---|--|
| Traço 1 | 2,34 | 7,95 |
| | 2,34 | 8,70 |
| | 2,33 | 5,95 |
| | 2,25 | 3,26 |
| | 2,23 | 2,11 |
| | 2,17 | 1,26 |
| Traço 2 | 2,26 | 6,15 |
| | 2,22 | 4,23 |
| | 2,25 | 3,42 |
| | 2,19 | 2,30 |
| | 2,14 | 1,79 |
| Traço 3 | 2,27 | 6,03 |
| | 2,26 | 5,54 |
| | 2,25 | 4,53 |
| | 2,25 | 3,20 |
| | 2,16 | 2,71 |
| | 2,13 | 1,14 |

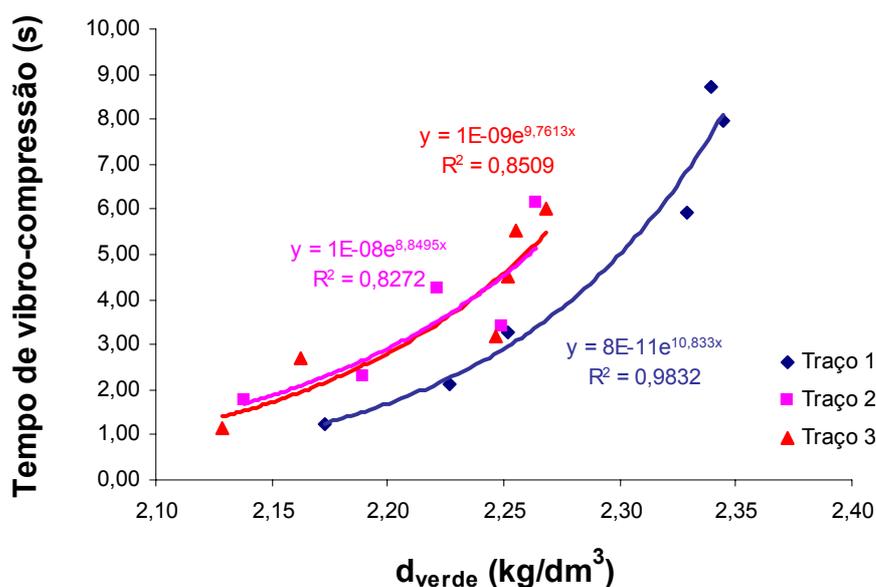


Figura 6.68 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde média das PCP produzidas no equipamento da MONTANA

Tabela 6.54 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.68

| Traço | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-------|------|------|------|-------|--------------------|---|----------------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R ² |
| 1 | -23,31 | 10,83 | 1,61 | 0,71 | 0,11 | 15,29 | 99,99 | 6 | 0,9832 |
| 2 | -18,40 | 8,85 | 5,17 | 2,33 | 0,23 | 3,79 | 96,78 | 5 | 0,8272 |
| 3 | -20,44 | 9,76 | 4,53 | 2,04 | 0,27 | 4,78 | 99,12 | 6 | 0,8509 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

6.4.2.2 – Energia de compactação em função da massa específica verde dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Na Tabela 6.55 são apresentadas as massas específicas verdes e as energias de compactação resultantes, para os três traços empregados, referentes aos corpos-de-prova 9 x 8 cm.

Tabela 6.55 – Resultados obtidos para os corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Traços | Massa específica verde (kg/dm ³) | Energia de compactação (J) |
|--------|---|-------------------------------|
| 1 | 2,10 | 60 |
| | 2,20 | 180 |
| | 2,31 | 364 |
| 2 | 2,11 | 70 |
| | 2,21 | 180 |
| | 2,31 | 442 |
| 3 | 2,11 | 90 |
| | 2,21 | 260 |
| | 2,31 | 572 |

Na Figura 6.69, é apresentado o gráfico de energia de compactação em função da massa específica verde média dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, para os três traços estudados. Através da linearização das funções exponenciais apresentadas na Figura 6.69 e analisando-se os parâmetros estatísticos das regressões lineares resultantes (Tabela 6.56), pode-se afirmar que existe uma correlação significativa entre as variáveis estudadas (energia de compactação e massa específica verde) a um nível de confiabilidade acima de 90%. Além disso, as dispersões dos pontos em relação às expressões ajustadas foram baixas, haja vista os valores de R^2 superiores a 0,98.

Tabela 6.56 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.69

| Traço | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|------|------|------|------|--------|--------------------|---|--------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R^2 |
| 1 | -14,15 | 8,72 | 2,74 | 1,25 | 0,18 | 7,01 | 90,98 | 3 | 0,9800 |
| 2 | -15,13 | 9,21 | 0,09 | 0,04 | 0,01 | 228,11 | 99,72 | 3 | 1,0000 |
| 3 | -14,95 | 9,25 | 1,20 | 0,54 | 0,08 | 16,99 | 96,26 | 3 | 0,9965 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

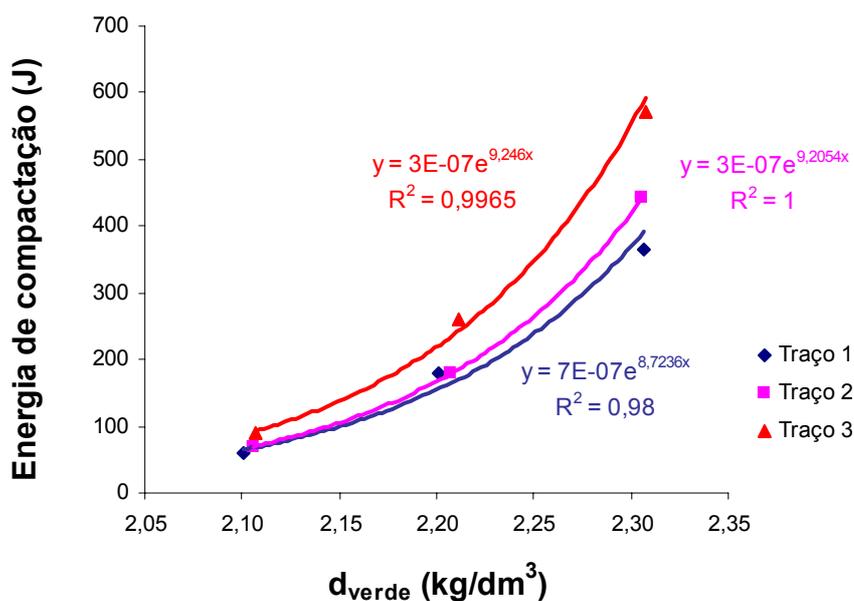


Figura 6.69 – Energia de compactação em função da massa específica verde dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

6.4.2.3 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde das PCP – equipamento protótipo

Na Tabela 6.57, são apresentadas as massas específicas verdes e os tempos de vibro-compressão resultantes, para os três traços empregados, referentes as PCP, produzidas no equipamento protótipo.

Tabela 6.57 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento protótipo

| Traços | Massa específica verde (kg/dm ³) | Tempo de vibro-compressão (s) |
|--------|--|-------------------------------|
| 1 | 2,15 | 0,89 |
| | 2,23 | 1,68 |
| | 2,31 | 4,04 |
| 2 | 2,12 | 1,20 |
| | 2,22 | 2,75 |
| | 2,29 | 6,20 |
| 3 | 2,10 | 0,78 |
| | 2,21 | 3,11 |
| | 2,30 | 6,39 |

Na Figura 6.70, é apresentado o gráfico de tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde média para as PCP, produzidas no equipamento protótipo, para os três

traços estudados. Através da linearização das funções exponenciais apresentadas na Figura 6.70 e analisando-se os parâmetros estatísticos das regressões lineares resultantes (Tabela 6.58), pode-se afirmar que existe uma correlação significativa entre as variáveis estudadas (tempo de vibro-compressão e massa específica verde) a um nível de confiabilidade acima de 92%. Além disso, as dispersões dos pontos em relação às expressões ajustadas foram baixas (R^2 superiores a 0,98).

Tabela 6.58 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.70

| Traço | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-------|------|------|------|-------|--------------------|---|--------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R^2 |
| 1 | -21,12 | 9,75 | 2,25 | 1,01 | 0,11 | 9,64 | 93,42 | 3 | 0,9894 |
| 2 | -20,15 | 9,57 | 1,74 | 0,79 | 0,10 | 12,16 | 94,78 | 3 | 0,9933 |
| 3 | -23,20 | 10,95 | 2,85 | 1,29 | 0,18 | 8,48 | 92,53 | 3 | 0,9863 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

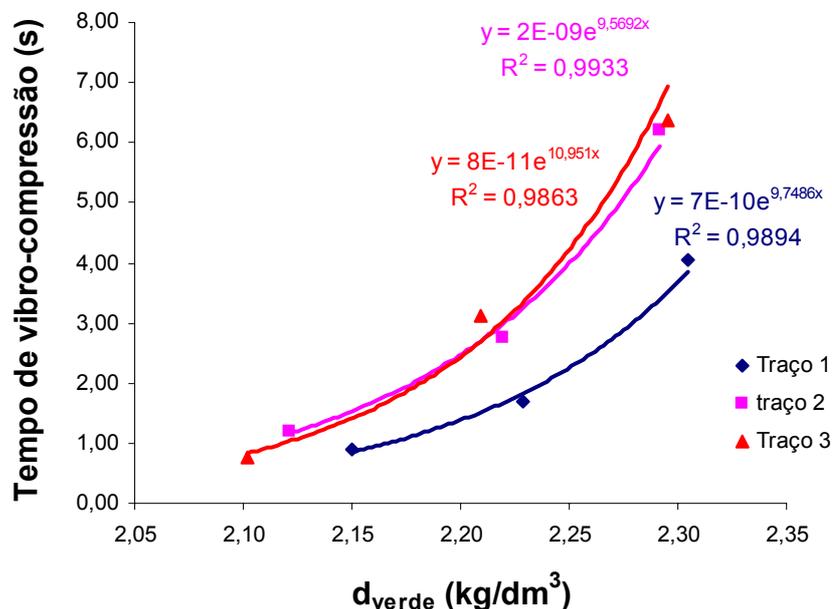


Figura 6.70 – Tempo de vibro-compressão em função da massa específica verde das PCP produzidas no equipamento protótipo

6.4.2.4 – Correlação entre o tempo de vibro-compressão do equipamento da MONTANA e a energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Para a determinação da correlação entre o tempo de vibro-compressão do equipamento da MONTANA e a energia de compactação do soquete, foram tomados os valores de tempo de vibro-compressão das PCP e suas respectivas massas específicas verdes, para a determinação da energia de compactação equivalente dos corpos-de-prova, através das correlações entre energia de compactação e a massa específica verde, apresentadas anteriormente na Figura 6.69, para os três traços estudados.

Na Figura 6.71, são apresentadas as referidas curvas de correlação, para os três traços empregados no presente estudo. Através de uma análise estatística dos resultados obtidos (Tabela 6.59), pode-se verificar que existe uma correlação significativa, a um nível de confiabilidade acima de 95%, entre as variáveis estudadas (tempo de vibro-compressão das PCP produzidas no equipamento da Montana e energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm).

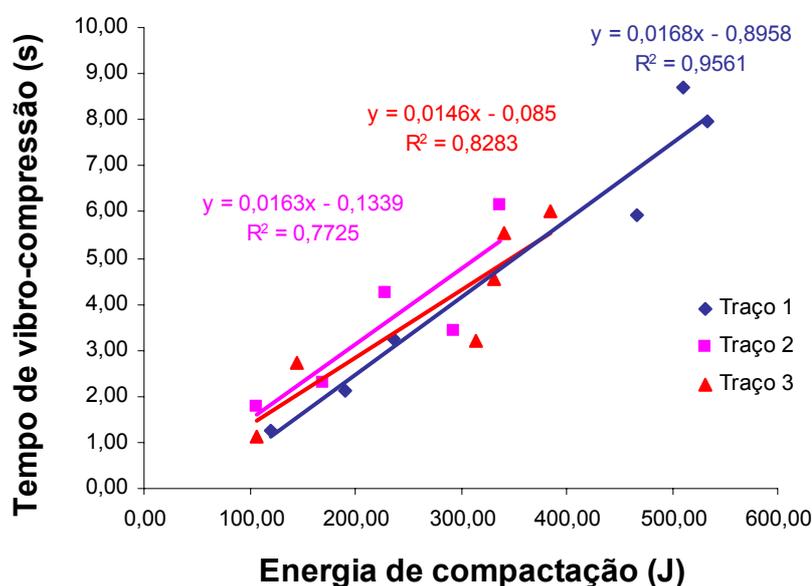


Figura 6.71 – Tempo de vibro-compressão da MONTANA em função da energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

Tabela 6.59 – Parâmetros estatísticos das correlações apresentadas na Figura 6.71

| Traço | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|------|------|---------------------|------|------|--------------------|---|----------------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R ² |
| 1 | -0,90 | 0,02 | 0,69 | $1,8 \cdot 10^{-3}$ | 0,73 | 9,33 | 99,93 | 6 | 0,9561 |
| 2 | -0,13 | 0,02 | 1,24 | $5,1 \cdot 10^{-3}$ | 0,95 | 3,19 | 95,03 | 5 | 0,7725 |
| 3 | -0,08 | 0,01 | 0,96 | $3,3 \cdot 10^{-3}$ | 0,86 | 4,39 | 98,82 | 6 | 0,8283 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

Através de estudos de comparação de funções lineares (Tabela 6.60) pode-se afirmar que não existe diferença significativa entre os diferentes traços estudados ($F < F_{0,05(a,b)}$). Na Figura 6.72, é apresentada a curva média de tempo de vibro-compressão das PCP em função da energia de compactação dos corpos-de-prova, juntamente com os limites para previsão de valores médios e individuais para um grau de confiabilidade de 95%.

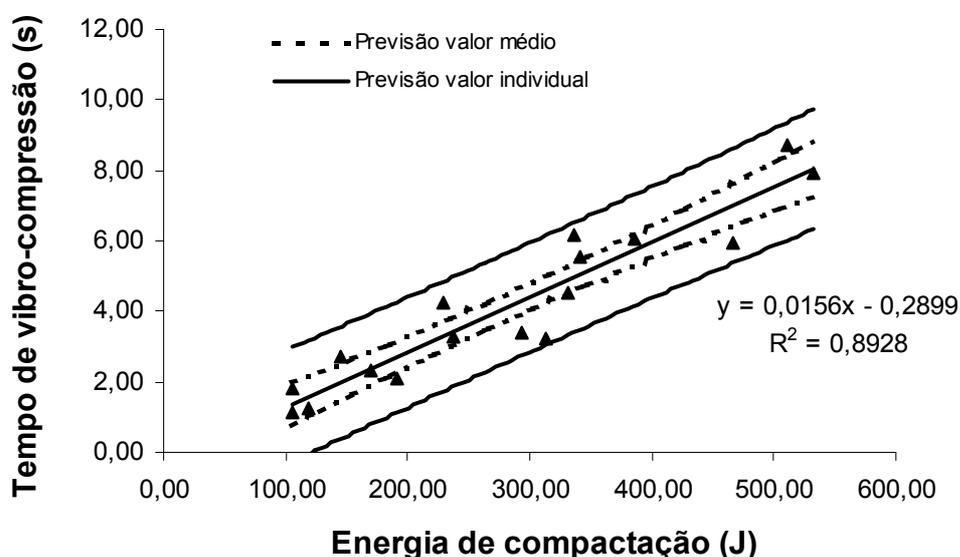


Figura 6.72 – Tempo de vibro-compressão da PCP em função da energia de compactação – previsão de valor médio e individual

Tabela 6.60 – Resultados da análise de comparação de funções lineares

| Traço | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|-----------------|---|----|---|----|------|-----------------|
| | SQR | GL | a | b | F | $F_{0,05(a,b)}$ |
| 1 | 2,13 | 4 | 4 | 11 | 0,39 | 3,36 |
| 2 | 2,71 | 3 | | | | |
| 3 | 2,94 | 4 | | | | |
| todos os traços | 8,88 | 15 | | | | |

6.4.2.5 – Correlação entre o tempo de vibro-compressão do equipamento da MONTANA e o tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo

Para a determinação da correlação entre o tempo de vibro-compressão do equipamento da MONTANA e o tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo, foram tomados os valores de tempo de vibro-compressão das PCP e suas respectivas massas específicas verdes, para a determinação do tempo de vibro-compressão equivalente das PCP produzidas no equipamento protótipo, através das correlações apresentadas anteriormente na Figura 6.70, para os três traços estudados.

Na Figura 6.73 são apresentadas as curvas de correlação, para os três traços empregados no presente estudo. Através da linearização das funções exponenciais apresentadas na Figura 6.73 e, analisando-se os parâmetros estatísticos das regressões lineares resultantes (Tabela 6.61), pode-se afirmar que existe uma correlação significativa entre as variáveis estudadas (tempo de vibro-compressão das PCP produzidas no equipamento da Montana e tempo de vibro-compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo) a um nível de confiabilidade acima de 97 %.

Tabela 6.61 – Parâmetros estatísticos das regressões lineares provenientes da linearização das funções exponenciais apresentadas nas Figuras 6.73

| Traço | Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|------|------|------|------|------|--------------------|---|----------------|
| | a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R ² |
| 1 | 0,05 | 0,36 | 0,17 | 0,04 | 0,19 | 8,75 | 99,91 | 6 | 0,9504 |
| 2 | 0,12 | 0,31 | 0,29 | 0,08 | 0,23 | 3,92 | 97,05 | 5 | 0,8363 |
| 3 | 0,06 | 0,35 | 0,29 | 0,08 | 0,29 | 4,32 | 98,76 | 6 | 0,8233 |

confiabilidade = 1 – significância (α)

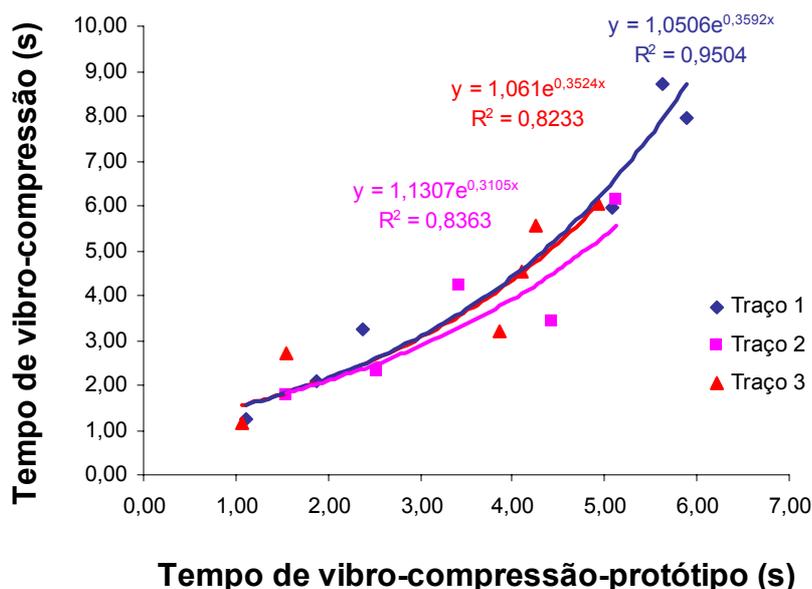


Figura 6.73 – Tempo de vibro-compressão da MONTANA em função do tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo

Fazendo-se uma comparação de funções lineares (Tabela 6.62) utilizando-se as funções exponenciais linearizadas (ver Tabela 6.61), pode-se afirmar que não existe diferença significativa entre os diferentes traços estudados ($F < F_{0,05(a,b)}$). Na Figura 6.74 é apresentada a curva média do tempo de vibro-compressão das PCP produzidas no equipamento da MONTANA em função do tempo de vibro-compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo, juntamente com os limites para previsão de valores médios e individuais para um grau de confiabilidade de 95%.

Tabela 6.62 – Resultados da análise de comparação de funções lineares

| Traço | Parâmetros – comparação de funções lineares | | | | | |
|-----------------|---|----|---|----|------|-----------------|
| | SQR | GL | a | b | F | $F_{0,05(a,b)}$ |
| 1 | 0,15 | 4 | 4 | 11 | 0,18 | 3,36 |
| 2 | 0,16 | 3 | | | | |
| 3 | 0,34 | 4 | | | | |
| todos os traços | 0,68 | 15 | | | | |

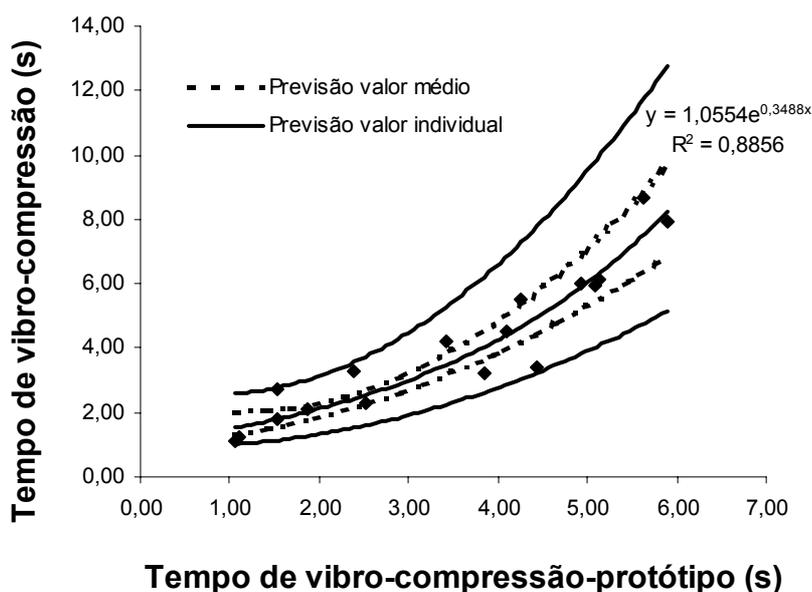


Figura 6.74 – Tempo de vibro-compressão das PCP da MONTANA em função do tempo de vibro-compressão das PCP do protótipo – previsão de valor médio e individual

6.4.3 – CONCLUSÕES

Os resultados do estudo apresentado mostraram que existe uma correlação entre o tempo de vibro-compressão de um dado equipamento com a energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e com o tempo de vibro-compressão das peças produzidas no equipamento protótipo. Com isso, é possível a determinação da real diferença em segundos de vibro-prensagem de um equipamento de vibro-compressão, relativa a uma diferença em joules, ou em segundos de vibro-prensagem do equipamento protótipo.

Vale ressaltar que o tipo de traço não influencia na correlação existente entre os equipamentos, ou seja, independente do traço empregado, uma determinada energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, ou um determinado tempo de vibro-compressão do equipamento protótipo, equivale a um valor fixo de tempo de vibro-compressão na própria máquina vibro-prensa.

6.5 – AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DAS CONDIÇÕES SUPERFICIAIS DAS PCP

A condição superficial (textura) das PCP é um parâmetro importante, que deveria ser levado em consideração na hora de se dosar uma mistura para produção das peças, pois o cliente, interessado no referido artefato, no momento da compra, busca não só o preço, mas também qualidade que, de certa forma, está relacionada com a textura do produto.

Como atualmente não existe nenhuma maneira prática e confiável de se obter uma medida quantitativa da textura das peças, os tecnologistas de concreto utilizam a sua experiência, ajustando subjetivamente as condições superficiais das PCP no momento dos testes no equipamento de vibro-compressão.

Uma PCP com uma textura fechada (Figura 6.75a) caracteriza-se por apresentar poucos poros superficiais, o que resulta em uma peça mais lisa e com tonalidade uniforme, puxando normalmente para um cinza claro, dependendo da coloração dos agregados empregados, do tipo de cimento e da presença de pigmentos. Já uma PCP com textura aberta (Figura 6.75b) possui uma superfície mais porosa, resultando em uma maior variação de tonalidade, pois os poros superficiais das PCP tendem a apresentar uma tonalidade mais escura, comparada à tonalidade dos agregados e da pasta de cimento. Em função do exposto, acreditava-se que as peças com texturas mais abertas tendem a apresentar um maior desvio padrão no histograma de frequências de intensidade de *pixels*, comparado ao valor obtido para uma peça de textura mais fechada. Para a comprovação dessa hipótese foi estabelecido um programa de testes, dentro do presente trabalho, descrito a seguir, para avaliar a potencialidade do emprego do desvio padrão do histograma de frequências de intensidade de *pixels*, em imagens em tons de cinza, como uma medida quantitativa da condição superficial das peças (textura).



a) PCP com uma textura mais fechada



b) PCP com uma textura mais aberta

Figura 6.75 – Detalhe de PCP com texturas: a) fechada; b) aberta

6.5.1 – METODOLOGIA EMPREGADA

6.5.1.1 – Aquisição das imagens

Nesse trabalho foi utilizado o *scanner* como ferramenta para aquisição das imagens, pelo fato da possibilidade de uma maior resolução e, principalmente, pela maior facilidade de controle das condições ambientais. Como o princípio básico de funcionamento da maioria dos equipamentos de aquisição como *scanners* e câmeras digitais é o da exposição do objeto original à luz e posterior determinação da quantidade de luz refletida, as condições ambientais de luminosidade influenciam no resultado de aquisição das imagens. Porém, como o *scanner* possui uma fonte de luz própria para iluminação do objeto original, consegue-se padronizar o ambiente, colocando-se o equipamento em uma condição de completa escuridão.

Para o presente trabalho, foi padronizada uma condição onde o equipamento de aquisição (*scanner*) era colocado dentro de uma caixa de isopor completamente fechada, sendo que as paredes dessa caixa eram revestidas com cartolina preta para evitar a penetração da luz. Além da referida caixa de isopor envolvendo todo o *scanner*, era colocada, no momento da aquisição das imagens, uma caixa de papelão sobre o equipamento, envolvendo a PCP (Figura 6.76).

Para não danificar o vidro do *scanner*, era colocada uma placa de vidro de 3 mm sobre o mesmo e então apoiada a PCP. Essa placa de vidro era revestida com cartolina preta (parte preta virada para a luz do *scanner*), deixando-se uma área de 9 x 19 cm para a PCP.

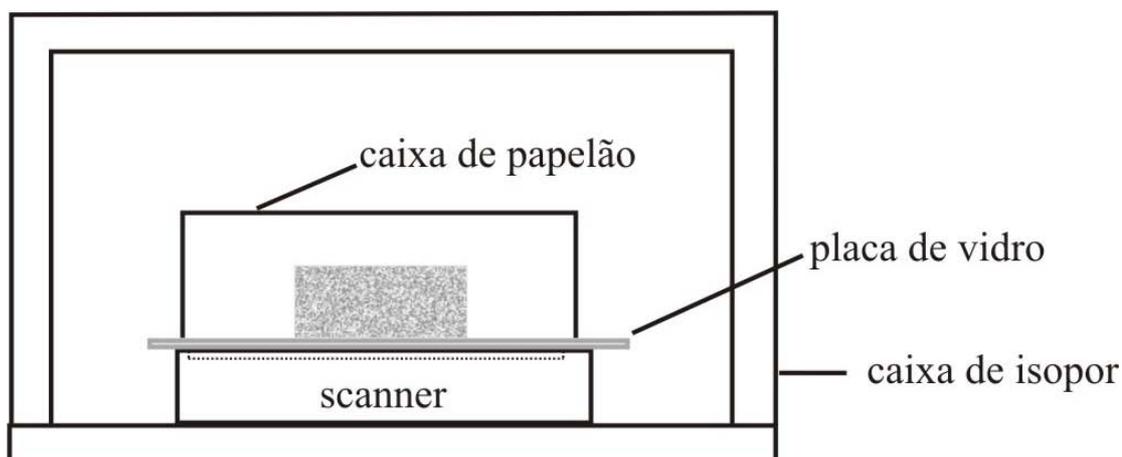


Figura 6.76 – Detalhe das condições padronizadas para a aquisição das imagens

6.5.1.2 – Calibração do scanner

Apesar da condição ambiente padronizada para a aquisição das imagens, cada *scanner* possui intensidade de luz própria, sensores distintos e, em alguns casos, dispositivos para ajuste de tonalidade automático, para obtenção de uma maior nitidez da imagem. Essas diferenças resultam em digitalizações de imagens distintas para um dado objeto real. Um exemplo disso pode ser encontrado na Figura 6.77, onde são apresentados dois histogramas de frequência obtidos através dos *scanners* Genius Color Page Vivid 3 XE e HP Scanjet 2200c. Através dos referidos histogramas, pode-se perceber que, apesar de ser empregado o mesmo objeto (PCP) nos dois equipamentos e a aquisição da imagem ter sido feita nas mesmas condições ambientes (dentro do sistema de caixas apresentado na Figura 6.76), houve uma diferença considerável na intensidade média e no desvio padrão do histograma de frequências de intensidades de *pixels*^{vi}.

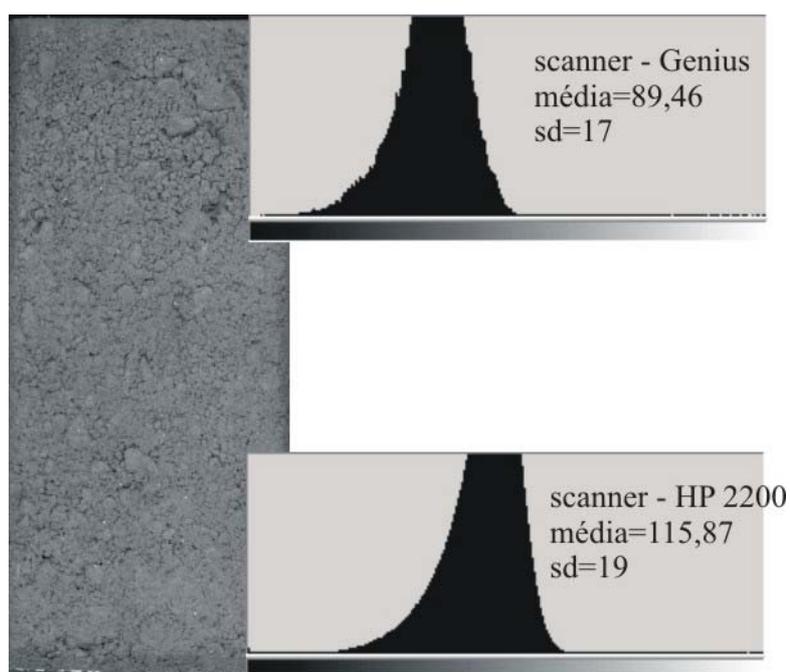
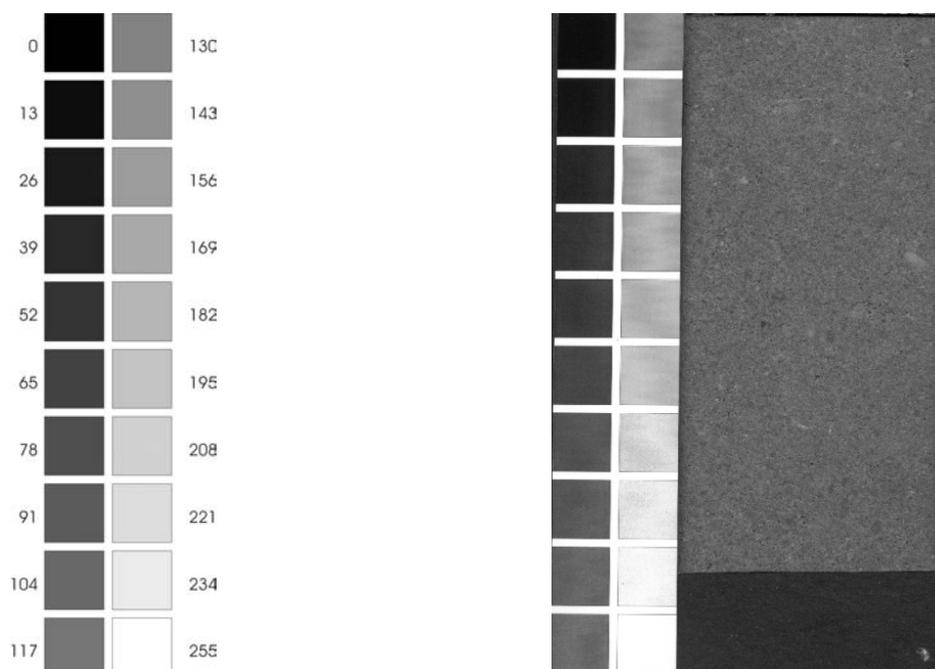


Figura 6.77 – Histogramas de frequências obtidos através de dois *scanners* distintos (Genius e HP 2200c)

Em função dessa diferença, adotou-se um procedimento de calibração dos *scanners*, com o auxílio de um modelo impresso (paleta), contendo algumas das cores dentre as que compõem o espectro de tons de cinza (0 – 255). Essa paleta (Figura 6.78a) foi impressa em um papel *couche*

^{vi} Optou-se por trabalhar com o número inteiro para o desvio padrão do histograma de frequências, sendo adotado critérios matemáticos de arredondamento.

branco, fosco, gramatura 210, utilizando-se uma impressora laser da Canon, modelo LBP 2000. No momento da aquisição da imagem da peça, digitalizava-se, simultaneamente, a paleta impressa (Figura 6.78b). Com isso, eventuais distorções que ocorriam na digitalização das PCP, em função do tipo de *scanner*, ocorriam também na paleta impressa. Após a digitalização das imagens (PCP e paleta), determinava-se, dentro do próprio programa de tratamento de imagens, a curva de correlação entre os valores das tonalidades da paleta impressa, obtidos através do *scanner* em questão, com os valores reais das tonalidades empregadas na referida paleta. Através dessa curva de correlação era possível executar a correção das distorções de digitalização provenientes dos equipamentos. O programa de tratamento de imagens empregado no presente trabalho foi o UTHSCSA-Image Tool, programa gratuito distribuído pela University of Texas Health Science Center at San Antonio. Na Figura 6.78, são apresentados os dois histogramas corrigidos, obtidos através dos *scanners* Genius e HP 2200c, para a imagem digitalizada da PCP apresentada anteriormente na Figura 6.77. Pode-se perceber que, após a calibração, os valores de intensidade média ficaram bem mais próximos, enquanto os valores de desvio padrão do histograma de frequência foram iguais.



a) detalhe da paleta de calibração

b) digitalização da paleta juntamente com a PCP

Figura 6.78 – a) paleta de calibração; b) digitalização simultânea da paleta e da PCP

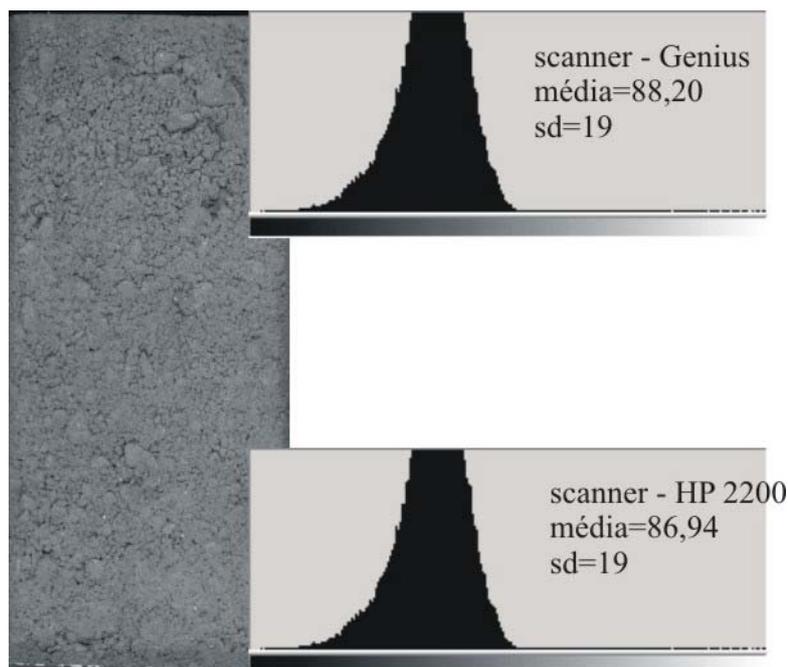


Figura 6.79 – Histogramas de freqüências corrigidos obtidos através dos *scanners* Genius e HP 2200c

6.5.1.3 – Definição da resolução

Um fator importante a ser determinado e que influencia no resultado do histograma de freqüências de uma imagem digitalizada é a resolução a ser empregada para aquisição da imagem. Quando se aumenta a resolução de captura de uma imagem, aumenta-se o número de *pixels* por polegada, influenciando no valor do desvio padrão do histograma de freqüências, pela inclusão de novos *pixels* com diferentes tonalidades.

Para eliminar eventuais variações no desvio padrão em função da resolução empregada, a adoção de uma resolução alta, por exemplo, 1000 dpi, quando da aquisição das imagens, seria a primeira vista, uma solução para esse problema. Contudo, o tamanho dos arquivos gerados seria muito grande, necessitando de processadores mais potentes para uma simples análise do histograma de freqüências.

Em função disso, foi feito um estudo da influência da resolução no desvio padrão do histograma de freqüências de uma imagem digitalizada em tons de cinza, obtida de uma PCP empregando-se um *scanner* Genius Color Page Vivid 3. Através do gráfico apresentado na Figura 6.80, pode-se verificar que, quando são empregadas resoluções acima de 400 dpi, o

resultado do desvio padrão do histograma de freqüências praticamente não sofre variação, ficando na casa do 17,35.

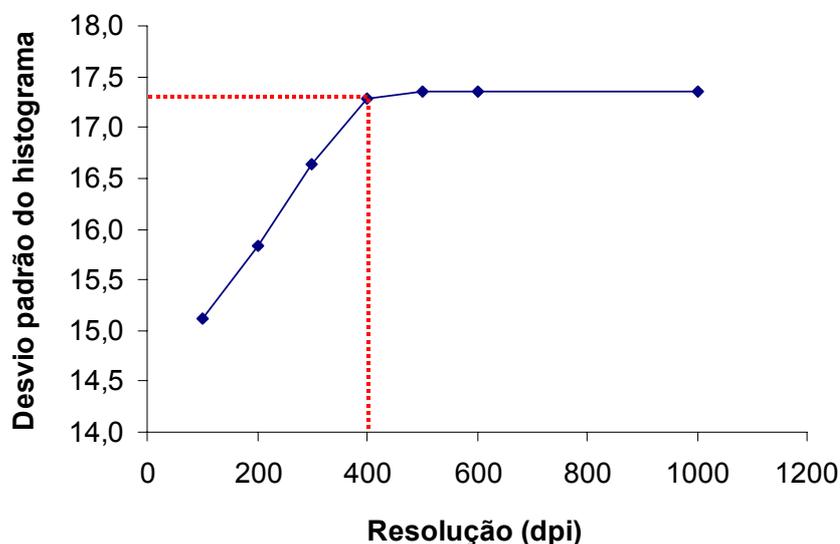


Figura 6.80 – Avaliação da influência da resolução no resultado do desvio padrão do histograma de freqüências

Tomando-se como base os resultados encontrados nos testes conduzidos nesta fase do trabalho, foi adotada a resolução de 400 dpi para aquisição das imagens através do *scanner*, a fim de se reduzir o tamanho dos arquivos e agilizar a etapa de processamento das imagens (definição dos histogramas).

6.5.1.4 – Comparação entre uma escala de textura de PCP definida pelo olho humano e o desvio padrão do histograma de freqüência

Para validar a hipótese proposta no presente trabalho de se avaliar quantitativamente a textura das PCP através do desvio padrão do histograma de freqüências, comparou-se uma escala de PCP, ordenadas em função do olho humano, com os resultados dos referidos desvios.

Essa escala de PCP foi obtida, procurando-se no estoque da fábrica onde os trabalhos foram conduzidos, uma série de peças na cor natural (cinza – sem o uso de pigmentos), com texturas variadas. Na Figura 6.81, são apresentadas as referidas peças, em ordem decrescente de qualidade, definida em função do olho humano (a – melhor peça; f – pior peça em função da textura). Vale ressaltar que essa classificação foi obtida em função da opinião de cinco diferentes pessoas.

As peças apresentadas na Figura 6.81 foram digitalizadas empregando-se os três *scanners* (Genius, HP 2200c e AOC) e os procedimentos mencionados anteriormente (sistema de caixas para escurecimento do ambiente, placa de vidro para apoio, paleta de calibração e resolução de 400 dpi). Essas imagens foram armazenadas no formato “JPEG” para posterior calibração e determinação do histograma de frequência com o auxílio do programa UTHSCSA-Image Tool.

Na Tabela 6.63, são apresentados os resultados de desvio padrão obtidos para as PCP da Figura 6.81, através dos três *scanners* empregados no presente trabalho.

Através desses resultados, pode-se verificar que o desvio padrão obtido através do histograma das imagens digitalizadas em tons de cinza correlaciona bem com a escala do olho humano, pois a ordem decrescente de qualidade apresentada na Figura 6.81 foi obtida também, quando a avaliação foi feita através do referido desvio padrão.

Além disso, os resultados obtidos nos testes conduzidos nessa fase do trabalho mostraram a possibilidade do emprego de *scanners* convencionais para a aquisição das imagens, desde que seja empregado algum procedimento para aquisição e principalmente para a calibração dos mesmos.

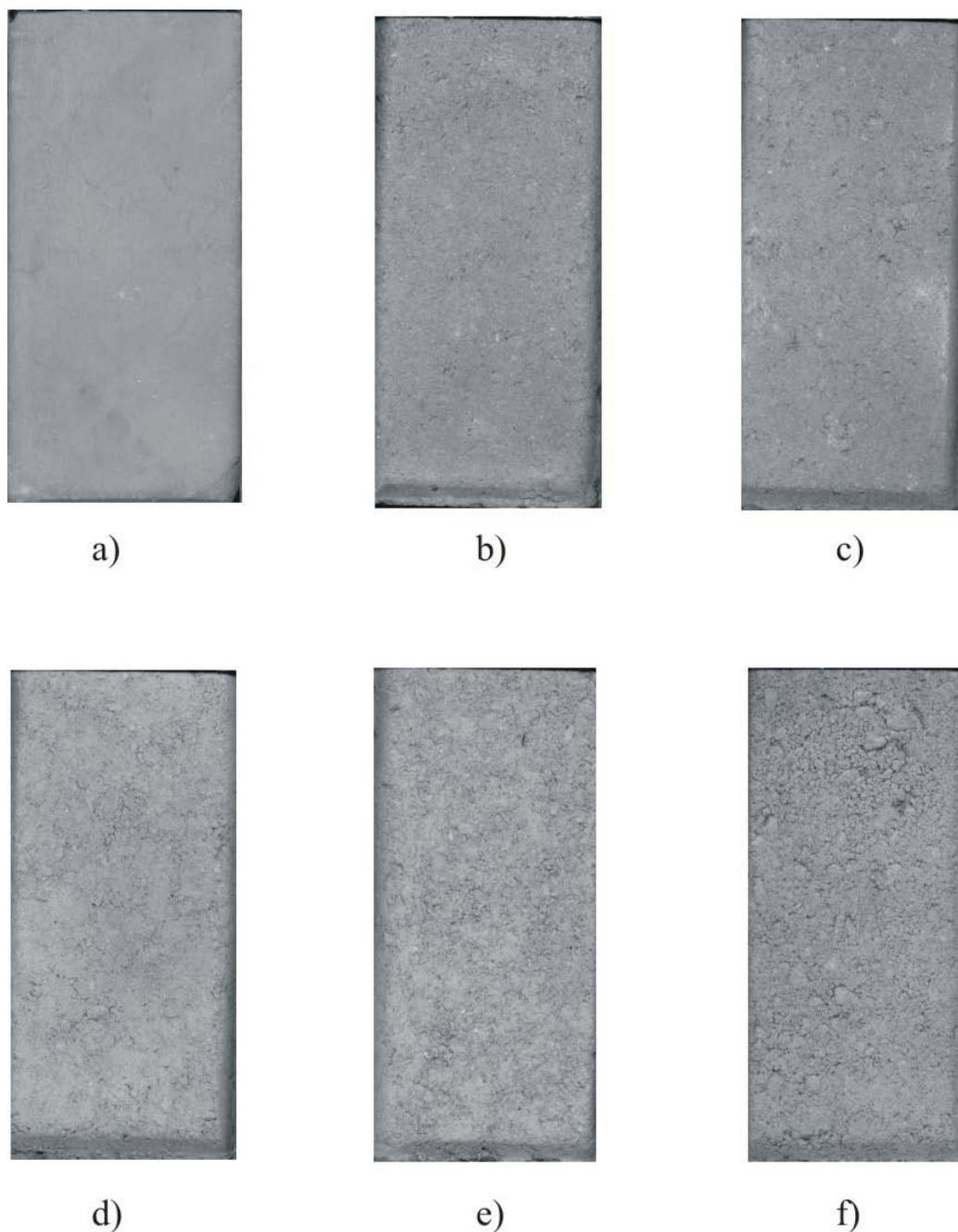


Figura 6.81 – Escala de PCP em função da textura superficial

Tabela 6.63 – Resultados de desvios padrão obtidos das imagens digitalizadas das PCP apresentadas na Figura 6.81 – *scanners* Genius e HP 2200c

| <i>scanner</i> | Desvio Padrão | | | | | |
|----------------|---------------|----|----|----|----|----|
| | a | b | c | d | e | f |
| Genius | 7 | 12 | 13 | 15 | 17 | 20 |
| HP 2200c | 7 | 13 | 13 | 15 | 17 | 20 |
| AOC | 7 | 13 | 13 | 15 | 18 | 21 |

6.5.1.5 – Avaliação quantitativa da textura das PCP produzidas em uma máquina vibroprensa real e no equipamento protótipo

Com o objetivo de se testar a metodologia de quantificação de textura proposta e avaliar a possibilidade de se prever texturas empregando-se o equipamento protótipo de vibrocompressão, foram produzidas PCP do tipo PAV1-80 no equipamento da Montana MBX – 975. Simultaneamente, foram moldadas PCP no equipamento protótipo de vibrocompressão, empregando-se o mesmo traço e os procedimentos de moldagem apresentados no item 6.3.2.2.

Foram selecionadas três peças produzidas na máquina da Montana e moldadas três peças no equipamento protótipo, sendo todas conduzidas à caixa de isopor (Figura 6.39).

Passadas 24 horas do momento da moldagem, as peças foram coletadas e encaminhadas para o LMCC-UFSC. Essas peças permaneceram por alguns dias no laboratório para que se procedesse a secagem ao ar da superfície das mesmas. Após essa etapa foi feita a digitalização das referidas peças empregando-se o *scanner* Genius Color Page Vivid 3 e os procedimentos apresentados anteriormente para aquisição das imagens.

Na Figura 6.82 são apresentadas as imagens das PCP produzidas na máquina da Montana e no equipamento protótipo. Através das referidas imagens e dos resultados de desvio padrão do histograma de frequências, apresentados na Tabela 6.64, pode-se verificar que o equipamento protótipo e os procedimentos de moldagem das PCP empregados no mesmo, são capazes de reproduzir com um certo grau de confiabilidade as texturas das PCP produzidas em escala real.

Tabela 6.64 – Resultados de desvios padrão obtidos das imagens digitalizadas das PCP produzidas na Montana e no equipamento protótipo

| Equipamento | Desvio Padrão | | | |
|-------------|---------------|----|----|-------|
| | 1 | 2 | 3 | média |
| Montana | 17 | 18 | 18 | 18 |
| Protótipo | 18 | 16 | 18 | 17 |



a) Montana 1



b) Montana 2



c) Montana 3



d) Protótipo 1



e) Protótipo 2



f) Protótipo 3

Figura 6.82 – PCP produzidas na máquina Montana MBX-975 e no equipamento protótipo de vibro-compressão

6.5.2 – CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que a hipótese levantada sobre o desvio padrão do histograma de frequências da imagem das PCP em tons de cinza representar quantitativamente a textura superficial das peças é válida, sendo que o referido valor do desvio padrão apresentou-se correlacionável com a escala de qualidade definida pelo olho humano.

O valor do desvio padrão do histograma de frequências é um número relativamente prático e de rápida obtenção, não sofrendo influência do operador. Porém cuidados devem ser tomados quando da digitalização das imagens, pois a luminosidade do ambiente pode influenciar os resultados finais.

Outro ponto importante é a questão da calibração dos equipamentos. Os resultados apresentados nesse estudo mostraram a necessidade e a possibilidade de calibração dos *scanners*, empregando-se um padrão impresso. Contudo, estudos mais aprofundados necessitam ser realizados para a definição desse padrão e de procedimentos para calibração dos referidos equipamentos.

Com o emprego do desvio padrão do histograma de frequências fica viável o estabelecimento de uma classificação objetiva da textura das PCP para fins de normalização, facilitando a relação entre produtor e consumidor e agregando valor aos produtos de melhor acabamento superficial.

Utilizando-se o valor do desvio padrão do histograma de frequências como parâmetro de comparação, pode-se concluir que o equipamento protótipo e os procedimentos de moldagem definidos nesse trabalho, são capazes de representar a textura das PCP produzidas em máquinas vibro-prensas reais, que trabalhem com o sistema de uma camada (equipamentos com uma gaveta). Em função disso, torna-se possível a avaliação prévia da textura das PCP, com uma boa precisão, empregando-se o equipamento protótipo, o que elimina a necessidade de testes excessivos no próprio equipamento de vibro-compressão para o ajuste das proporções entre os agregados, quando da aplicação de um estudo de dosagem.

7 – PROPOSTA DE UM MÉTODO EXPERIMENTAL DE DOSAGEM PARA PCP

Tomando-se como base os resultados obtidos no programa experimental do presente trabalho, foi proposto um método de dosagem para PCP, com o auxílio do equipamento de moldagem de corpos-de-prova 9 x 8 cm e/ou o equipamento protótipo de vibro-compressão. A seguir será descrita detalhadamente cada etapa da metodologia proposta, sendo apresentado, posteriormente, um exemplo ilustrativo do método.

7.1 – DEFINIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP

Como o método aqui proposto é baseado em resistências médias, é necessário que seja feita uma conversão das resistências características, prescritas pela NBR 9781 (1987), para resistências médias, através da seguinte expressão:

$$F_{pj} = F_{pk} + t \cdot Sd \quad (28)$$

Onde: F_{pj} = Resistência média de dosagem a j dias;

F_{pk} = Resistência característica das PCP segundo prescrições da NBR 9781 (1987);

35 MPa para solicitações de veículos comerciais de linha;

50 MPa para tráfego de veículos especiais ou solicitações com acentuado efeito de abrasão;

t = coeficiente de *Student* com um nível de confiabilidade de 80 % - (Tabela 7.1)

Sd = Desvio padrão de dosagem.

Tabela 7.1 – Coeficiente de *Student* (t) com um nível de confiabilidade de 80 %

| n | t | n | t |
|----|-------|------|-------|
| 6 | 0,920 | 18 | 0,863 |
| 7 | 0,906 | 20 | 0,861 |
| 8 | 0,896 | 22 | 0,859 |
| 9 | 0,889 | 24 | 0,858 |
| 10 | 0,883 | 26 | 0,856 |
| 12 | 0,876 | 28 | 0,855 |
| 14 | 0,870 | 30 | 0,854 |
| 16 | 0,866 | ≥ 32 | 0,842 |

O valor de Sd é função de uma série de fatores relacionados aos materiais (qualidade e uniformidade) e ao processo de produção como um todo (proporcionamento, mistura, moldagem

e cura). Dentro do processo produtivo, destaca-se a influência do tipo de equipamento de vibro-compressão empregado e sua regulação na variação da resistência das peças.

Nas fábricas de médio e grande porte da Região Sul do Brasil, onde os proporcionamentos são feitos em peso, o valor do desvio padrão (Sd) varia de 2,5 a 5,0 MPa para as PCP com resistências características de 35 MPa.

Como sugestão para a definição do desvio padrão da resistência à compressão das PCP, pode ser empregada a curva apresentada na Figura 7.1. Essa curva foi definida através de algumas simulações, empregando-se os resultados obtidos nos estudos apresentados no item 6.2.2. Através da mesma, pode ser definido o coeficiente de variação da resistência à compressão das peças e, conseqüentemente, o desvio padrão da resistência, em função do coeficiente de variação da massa específica no estado verde das peças e da resistência à compressão média das mesmas, haja vista que existe uma boa correlação entre as variáveis apresentadas na Figura 7.1 (coeficiente de variação da resistência à compressão e da massa específica verde das peças), a um nível de confiabilidade de 100% (Tabela 7.2).

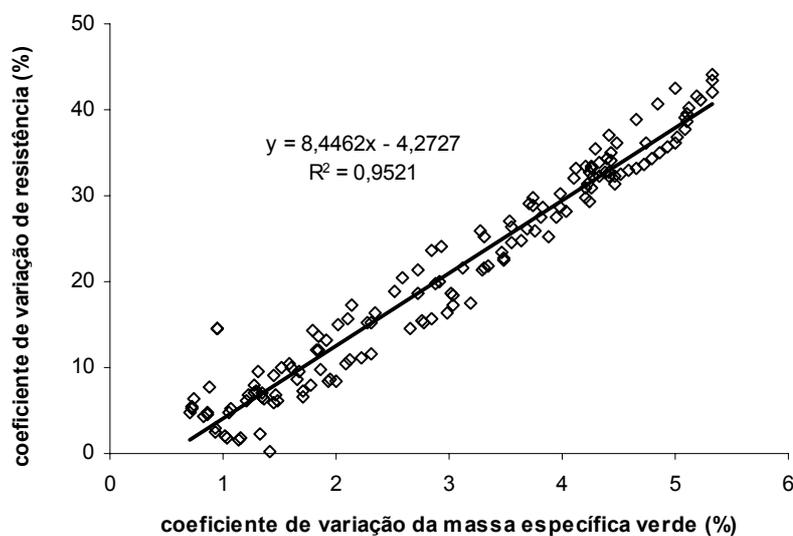


Figura 7.1 – Coeficiente de variação da resistência à compressão em função do coeficiente de variação da massa específica no estado verde das PCP

Tabela 7.2 – Parâmetros estatísticos da correlação apresentada na Figura 7.1

| Parâmetros estatísticos | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|-------|--------------------|-----|----------------|
| a | b | Sa | Sb | Se | t | confiabilidade (%) | n | R ² |
| -4,27 | 8,45 | 0,52 | 0,16 | 2,68 | 54,45 | 100,00 | 151 | 0,9521 |

7.2 – SELEÇÃO DOS MATERIAIS A SEREM EMPREGADOS

A seleção dos materiais a serem empregados deve estar baseada inicialmente na disponibilidade e uniformidade das propriedades. Posteriormente, pode ser feita uma avaliação mais criteriosa, levando-se em consideração a questão do custo desses materiais e a influência das propriedades dos mesmos na qualidade (textura) e na produtividade das peças.

Com relação ao cimento, o mais recomendado para artefatos pré-moldados é o cimento de alta resistência inicial – CPV-ARI, em função da sua maior finura, que de certa forma ajuda a aumentar a coesão da mistura e pelo fato de permitir a liberação das câmaras de cura e das grades, mais rapidamente, em função da resistência mais elevada a baixas idades. Em algumas regiões como o sul do Brasil, o cimento CPV-ARI não se encontra disponível, sendo fornecido o CP V-ARI-RS (cimento com adição de cinza volante) como substituto. Em regiões de clima quente e, quando a fábrica dispuser de um sistema de câmaras de cura para aplicação de vapor, pode ser empregado o cimento CII-Z ou até mesmo o cimento CIV. Contudo, vale ressaltar que esses tipos de cimento podem prejudicar a resistência das PCP a baixas idades, em função das suas finuras e das adições empregadas, resultando em quebras excessivas dos cantos das PCP durante a fase de desforma, paletização e transporte.

Quanto aos agregados, infelizmente não existe nenhuma faixa granulométrica consagrada para a produção de PCP. Conforme visto anteriormente, as faixas recomendadas não levam em consideração um fator muito importante, a forma do agregado.

Em se tratando de agregados miúdos, recomenda-se que sejam empregados agregados com a forma mais arredondada possível^{vii}, sendo comum o emprego de dois ou mais agregados miúdos, para a obtenção de uma boa textura. Essa prática de utilização de vários agregados miúdos para a produção de PCP é comum quando são empregados agregados miúdos provenientes de rio, pois os mesmos, normalmente, apresentam uma deficiência muito grande de partículas finas (material retido nas peneiras 0,30 e 0,15 mm).

Já para os agregados graúdos, a prática corrente é o emprego de brita zero, ou comumente conhecida com pedrisco (material retido na # 4,8 mm e com dimensão máxima característica de 9,5 mm). Recomenda-se que o agregado graúdo empregado seja um material mais cúbico possível (coeficiente de forma superior a 0,15 – segundo a AFNOR XP P18-540 (1997)), sendo possível o emprego de agregados graúdos naturais (seixo rolado), quando disponíveis.

^{vii} Recomenda-se que sejam empregados agregados com coeficiente de forma superiores a 0,20, empregando-se o método proposto e utilizado no presente trabalho.

Os aditivos comumente empregados para a produção das PCP são os aditivos incorporadores de ar, responsáveis por diminuir o atrito interno entre os grãos, facilitando a etapa de compactação. A maioria das fábricas de artefatos pré-moldados emprega detergente sintético devido ao menor custo.

Os pigmentos empregados para dar a coloração as PCP são, normalmente, pigmentos sintéticos, em função do maior controle durante a fabricação, o que resulta em uma maior uniformidade do material. Esses pigmentos podem ser fornecidos em pó ou na forma líquida. O segundo tipo apresenta um poder de coloração muito maior do que o pigmento em pó. Contudo, apresenta um custo mais elevado e sua validade gira em torno de 1 ano, dependendo das condições de estoque, trazendo problemas para alguns fabricantes que não fornecem peças coloridas com uma certa frequência.

7.3 – PROPORÇÕES ENTRE OS AGREGADOS

Para a determinação da proporção entre os agregados disponíveis, devem ser feitos testes experimentais com o auxílio do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm ou o equipamento protótipo de vibro-compressão.

Iniciando-se pela areia mais grossa dentre os agregados miúdos disponíveis, é feita uma argamassa na proporção 1: 5; empregando-se uma relação água / materiais secos de 7,0 %. Caso a referida relação água / materiais secos resulte em uma mistura com excesso de água (quantidade excessiva de água na superfície das peças), deve-se reduzir essa relação. Com essa argamassa, são moldados dois corpos-de-prova 9 x 8 cm ou duas PCP com uma porcentagem de volume de sólidos de 78,6 %, para avaliação da energia ou do tempo necessário para a moldagem, bem como da textura resultante. A massa verde dos corpos-de-prova ou das PCP pode ser definida de acordo com a seguinte expressão:

$$m_{moldagem} = vol \times \left[\frac{6}{\frac{1}{d_c} + \frac{5}{d_{agrossa}}} \right] \times \frac{78,6}{100} \times \left(1 + \frac{H}{100} \right) \quad (29)$$

Onde: $m_{moldagem}$ = massa verde para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm ou para as PCP;
 vol = volume do corpos-de-prova 9 x 8 cm (0,5089 litros) ou da PCP do tipo PAV1-80 (1,60 litros);
 d_c = massa específica do cimento;
 $d_{agrossa}$ = massa específica da areia grossa;
 H = relação água / materiais secos.

Na seqüência, são feitas adições de areia fina (de 5 em 5 %), mantendo-se fixo o traço (1:5), a relação água / materiais secos e a porcentagem de volume de sólidos (78,6 %) anteriormente empregada. Semelhante ao teste feito com argamassa somente com areia grossa, é avaliada a energia ou o tempo necessário para a moldagem das peças e a textura resultante das mesmas. A massa verde das peças pode ser definida, em função da porcentagem de areia grossa e areia fina, empregando-se a expressão apresentada a seguir:

$$m_{moldagem} = vol \times \left[\frac{6}{\frac{1}{d_c} + \frac{5}{100} \times \left(\frac{\%_{agrossa}}{d_{agrossa}} + \frac{\%_{afina}}{d_{afina}} \right)} \right] \times \frac{78,6}{100} \times \left(1 + \frac{H}{100} \right) \quad (30)$$

Onde: $\%_{agrossa}$ = porcentagem de areia grossa do agregado total;
 $\%_{afina}$ = porcentagem de areia fina do agregado total;
 d_{afina} = massa específica da areia fina.

A proporção ideal entre agregados miúdos é aquela que resulta na menor energia de compactação ou no menor tempo de vibro-compressão para a moldagem das peças e ao mesmo tempo, proporciona uma textura bem fechada. Vale ressaltar que nesse estágio da metodologia tem-se uma idéia da textura resultante das peças no tocante a argamassa que fará parte do concreto. Caso a textura das referidas peças não apresente uma condição bem fechada nesse estágio, quando adicionado o agregado graúdo, a tendência é piorar ainda mais a condição superficial das mesmas.

Quando do emprego de mais de dois agregados miúdos para a dosagem das PCP, deve-se proceder de forma semelhante à mencionada anteriormente, determinando-se primeiramente a composição ideal, entre os dois agregados miúdos mais grossos. Uma vez determinada a proporção ideal entre os mesmos, é feito novamente um teste utilizando-se o agregado miúdo mais fino.

Definidas as proporções ideais entre os agregados miúdos, parte-se para a adição do agregado graúdo à mistura (adições de 5 em 5 %), mantendo-se fixo o traço (1: 5) e a relação água / materiais secos anteriormente empregada. Da mesma forma, são moldadas peças com uma porcentagem de volume de sólidos de 78,6 %, para avaliação da energia ou do tempo de vibro-compressão necessário para a moldagem das peças, bem como da textura das mesmas. Através da expressão (31) é possível a determinação da massa verde para a moldagem das peças, em função da porcentagem dos agregados empregados.

$$m_{moldagem} = vol \times \left[\frac{1}{d_c} + \frac{5}{100} \times \left(\frac{\%_p}{d_p} + \frac{\%_{agrossa}}{d_{agrossa}} + \frac{\%_{afina}}{d_{afina}} \right) \right] \times \frac{78,6}{100} \times \left(1 + \frac{H}{100} \right) \quad (31)$$

Onde: $\%_p$ = porcentagem de agregado graúdo do agregado total;
 d_p = massa específica do agregado graúdo.

Além da proporção ideal entre os agregados miúdos encontrada nos testes anteriores com argamassa, recomenda-se fazer uma avaliação empregando-se pontos com 5 e 10 % a mais de areia fina em relação ao ponto ideal. Esses pontos apresentarão, provavelmente, texturas mais fechadas, devido a maior quantidade de areia fina, porém demandarão maiores energias ou tempos de vibro-compressão para a moldagem das peças. Contudo, quando da adição do agregado graúdo, pode-se conseguir uma maior incorporação do mesmo dentro da mistura, reduzindo a energia ou o tempo necessário para a moldagem das peças e, ao mesmo tempo, melhorando a textura, em função da maior quantidade de areia fina empregada.

A proporção ideal entre os agregados será aquela que apresentar uma menor energia ou tempo de vibro-compressão para a moldagem das peças e, ao mesmo tempo, resultar em uma textura adequada. Normalmente, quanto mais agregado graúdo se consegue incorporar na mistura, menor é a energia ou o tempo de vibro-compressão para a moldagem das peças, em função da redução do atrito interno dentro da mistura. Contudo, a textura das peças começa a ficar prejudicada com o aumento da quantidade do referido agregado. Por isso, o ponto ideal, normalmente, é o ponto onde se consegue empregar uma maior quantidade de agregado graúdo sem que ocorra prejuízo das condições superficiais das peças.

Cabe salientar que, no caso do emprego do equipamento protótipo de vibro-compressão, é possível a avaliação direta da textura resultante, conforme mencionado anteriormente. Já no caso dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, o que se tem é uma idéia da quantidade ideal de agregado graúdo em função das condições laterais dos referidos corpos-de-prova. Quando a quantidade de agregado graúdo na mistura começa a prejudicar a textura das PCP, os corpos-de-prova confeccionados com essa mistura, apresentam pequenos pontos de falha, próximos aos agregados graúdos que afloram a superfície dos referidos corpos-de-prova. Uma averiguação da real condição superficial das PCP só será possível mediante testes no próprio equipamento de vibro-compressão.

7.4 – TRAÇOS E PERCENTAGEM DE VOLUME DE SÓLIDOS A SEREM EMPREGADOS NO ESTUDO DE DOSAGEM

Para a construção das curvas de dosagem serão empregados três traços, 1: 6,5; 1: 5,0 e 1: 3,5; sendo possível o desdobramento dos mesmos através das porcentagens de agregados definidas no item anterior.

Traço desdobrado = 1: p: a_g:a_f

Traço desdobrado = 1: (m x %_p) : (m x %_{agrossa}) : (m x %_{afina})

Para cada um dos traços mencionados, serão moldados corpos-de-prova com diferentes compacidades, ficando como sugestão as seguintes porcentagens de volume de sólidos:

- Compacidade baixa = 73,3 %
- Compacidade média = 76,8 %
- Compacidade alta = 80,3 %

7.5 – MOLDAGEM DAS PEÇAS E DETERMINAÇÃO DA UMIDADE ÓTIMA

Com o auxílio do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm ou com o equipamento protótipo de vibro-compressão, deverão ser moldados, em laboratório, peças empregando-se os três traços (1: 6,5; 1:5,0 e 1: 3,5) e as três porcentagens de volume de sólidos (73,3; 76,8 e 80,3 %), para a determinação da umidade ótima em cada situação. Conforme mencionado (item 6.2.4), a quantidade ideal de água é a máxima possível, desde que não prejudique a resistência à compressão e a produtividade, em função do excesso de água no topo das peças.

Como sugestão, pode-se iniciar a determinação da umidade ótima, para cada situação mencionada, com uma relação água / materiais secos (H) de 6,0 %, moldando-se quatro corpos-de-prova 9 x 8 cm ou quatro PCP tipo PAV1-80, para avaliação da quantidade de água no topo das referidas peças. Caso as peças apresentem uma superfície seca, é possível o emprego de uma quantidade mais elevada de água, podendo-se aumentar a relação água / materiais secos (H) de 0,5 em 0,5 %, até o ponto onde toda a área do topo das referidas peças apresente vestígios de água. Esse ponto é considerado como a quantidade máxima de água que o equipamento suportará. Quantidades de água acima desse limite podem resultar em paradas excessivas,

quando da produção das PCP na própria fábrica, para limpeza das sapatas, em função da aderência das peças de concreto.

As massas verdes para a moldagem das peças podem ser definidas empregando-se a equação (32), em função das porcentagens de cada agregado, suas respectivas massas específicas, do traço, da porcentagem de volume de sólido e da relação água / materiais secos adotada.

$$m_{\text{moldagem-cp}} = \text{vol} \times \frac{(1+m)}{\left[\frac{1}{d_c} + \frac{m}{100} \times \left(\frac{\%_p}{d_p} + \frac{\%_{\text{agrossa}}}{d_{\text{agrossa}}} + \frac{\%_{\text{afina}}}{d_{\text{afina}}} \right) \right]} \times \frac{\%V_{\text{sol}}}{100} \times \left(1 + \frac{H}{100} \right) \quad (32)$$

Onde: $m = 6,5; 5,0$ e $3,5$

$\% V_{\text{sol}} = 73,3; 76,8$ e $80,3 \%$

$H =$ relação água / materiais secos a ser empregada

Após a moldagem as peças (corpos-de-prova 9 x 8 cm ou PCP) devem ser curadas em uma caixa de isopor fechada (ver Figura 6.39), com uma lâmina de água no fundo, durante as primeiras 24 horas. Caso o estudo de dosagem seja realizado dentro da própria fábrica e haja a disponibilidade da aplicação de cura a vapor, essa pode ser empregada, para simular as condições as quais as PCP serão submetidas.

Após as primeiras 24 horas dentro da caixa de isopor, ou ao término do ciclo de cura a vapor, devem ser determinadas as alturas reais e o volume médio das peças, empregando-se o ensaio da caixa metálica apresentado no item 6.2.2.4. Com isso é possível a determinação da área média das peças, empregando-se a expressão (33).

$$\text{área média} = \frac{\text{volme médio}}{\text{altura média}} \quad (33)$$

Onde: altura média = média das alturas das peças empregadas para a determinação do volume médio no ensaio da caixa metálica.

As porcentagens de volume de sólidos reais das peças podem ser determinadas aplicando-se a expressão (34).

$$\%V_{sol} = \frac{\left(\frac{m_{real}}{(área\ média \times altura)} \right) \left(1 + \frac{H}{100} \right)}{(1 + m)} \times 100 \quad (34)$$

$$\left[\frac{1}{d_c} + \frac{m}{100} \times \left(\frac{\%_p}{d_p} + \frac{\%_{agrossa}}{d_{agrossa}} + \frac{\%_{afina}}{d_{afina}} \right) \right]$$

Onde: m_{real} = massa real no estado verde da peça;
 altura = altura da peça;
 H = relação água / materiais secos empregada para a moldagem da peça;
 m = traço utilizado para a moldagem da peça;
 d_c = massa específica do cimento;
 $\%_p$ = porcentagem de agregado graúdo do agregado total;
 d_p = massa específica do agregado graúdo;
 $\%_{agrossa}$ = porcentagem de areia grossa do agregado total;
 $d_{agrossa}$ = massa específica da areia grossa;
 $\%_{afina}$ = porcentagem de areia fina do agregado total;
 d_{afina} = massa específica da areia fina.

No caso dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, a área média pode ser definida com sendo:

$$área\ média_{cp} = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (35)$$

Onde: d = diâmetro real do corpo-de-prova 9 x 8 cm.

Após a determinação da área média e das alturas individuais das peças, essas devem ser capeadas com pasta de cimento, para regularização das superfícies de contato com os pratos da prensa (corpos-de-prova 9 x 8 cm) ou com as pastilhas de aplicação de carga (PCP). Ao término da etapa de capeamento, as peças devem ser imersas em água até a data do rompimento (normalmente 28 dias).

Através da curva de resistência à compressão das peças em função da quantidade de água, consegue-se determinar a quantidade ótima de água, com relação a resistência à compressão. O teor ideal de água da mistura para uma dada situação (traço e porcentagem de volume de sólidos) será o menor teor dentre a máxima quantidade de água que o equipamento suporta e a quantidade ótima de água com relação a resistência à compressão das peças.

7.6 –CONSTRUÇÃO DAS CURVAS DE DOSAGEM

Com os valores das percentagens de volume de sólidos reais, as energias ou os tempos de vibro-compressão e os resultados de resistências à compressão das peças para o teor de umidade ótima, é possível a construção das curvas apresentadas na Figura 7.2, para a posterior definição do traço piloto. Para que se obtenha uma maior precisão, quando da aplicação do método de dosagem proposto, devem ser empregadas as curvas que melhor se ajustam aos pontos experimentais obtidos.

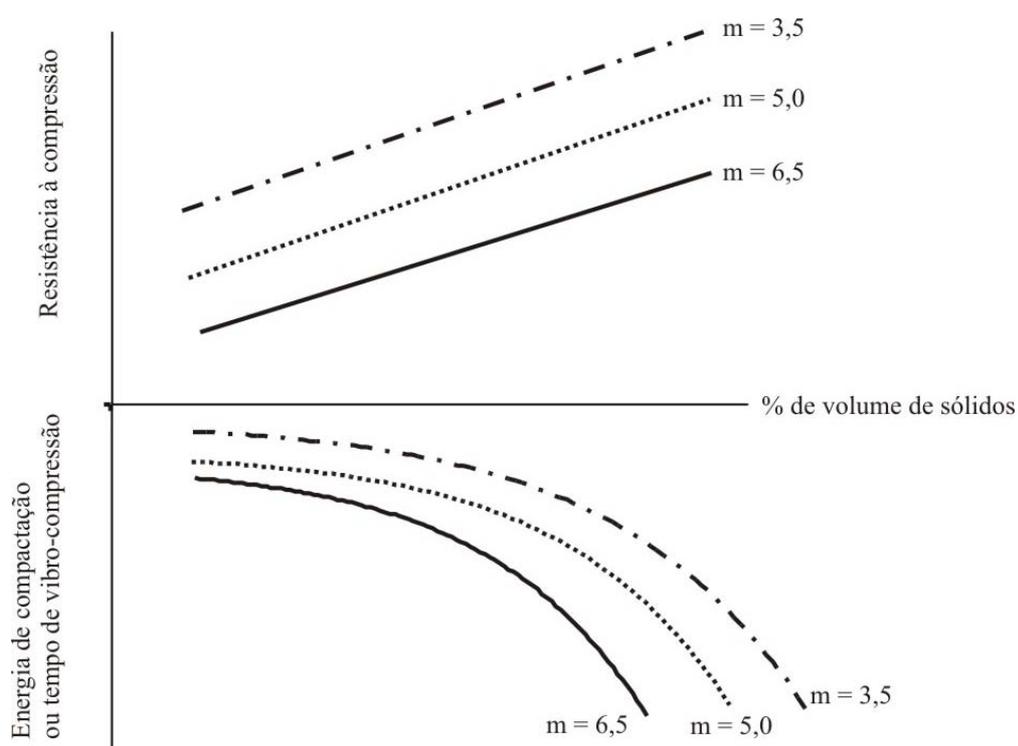


Figura 7.2 – Ábaco de dosagem obtido através das peças (corpos-de-prova 9 x 8 cm ou PCP – PAV1-80) moldadas em laboratório

7.7 – CORRELAÇÃO DA ENERGIA OU DO TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO PARA MOLDAGEM DAS PEÇAS COM O TEMPO DE VIBRO-COMPRESSÃO DA MÁQUINA VIBRO-PRENSA

A determinação da correlação entre os equipamentos pode ser feita empregando-se qualquer mistura que esteja sendo utilizada na própria máquina vibro-prensa. Durante a produção das PCP, o tempo de alimentação do equipamento deve ser regulado de forma a se obter diferentes graus de compactidade, avaliando-se o tempo de vibro-compressão resultante, com o auxílio de um cronômetro manual. Esses tempos devem ser marcados nas chapas de apoio das peças com giz de cera para posterior identificação das mesmas. Ao término da produção das peças, a grade com as chapas marcadas, deve ser conduzida a uma área lateral para a determinação da massa verde média de cada chapa. Com o auxílio de uma balança, devem ser determinados os pesos das chapas com as peças e o peso das chapas isoladamente, para a determinação do peso médio das peças através da expressão (36).

$$\text{peso médio das peças} = \frac{(\text{peso da chapa com as peças} - \text{peso da chapa})}{\text{número de peças na chapa}} \quad (36)$$

Antes do descarte das peças para a determinação do peso da chapa, deve-se determinar a altura média das peças da referida chapa.

Vale a pena ressaltar que um lote de aproximadamente 15 PCP deve ser recolhido durante os testes na própria máquina vibro-prensa, para a definição do volume médio e, conseqüentemente, da área média das peças que se encontram efetivamente em produção, empregando-se o ensaio da caixa metálica.

Simultaneamente, empregando-se a mesma mistura, devem ser moldados corpos-de-prova 9 x 8 cm, variando-se o grau de compactidade, para avaliação da energia necessária para compactação.

No caso do emprego do equipamento protótipo de vibro-compressão, amostras dos materiais empregados (cimento, agregados graúdo e miúdos e aditivo) devem ser coletadas para posterior estudo em laboratório. É importante também a determinação da umidade efetivamente utilizada na mistura quando da moldagem das PCP na máquina vibro-prensa, para que se possa reproduzir com a maior fidelidade as condições empregadas na fábrica.

Semelhante aos corpos-de-prova 9 x 8 cm, deve-se variar o grau de compacidade das peças para a determinação dos tempos de vibro-compressão necessários para a moldagem das mesmas. Recomenda-se que, em ambos os casos, (equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm ou equipamento protótipo de vibro-compressão), sejam determinadas as massas verdes reais, imediatamente após a moldagem das peças e suas respectivas alturas, para a determinação da porcentagem de volume de sólidos real de cada peça.

Os graus de compacidade empregados no equipamento de moldagem dos corpos-de-prova e no protótipo de vibro-compressão devem ser compatíveis com os graus de compacidade alcançados na máquina vibro-prensa real. Como sugestão podem ser empregadas porcentagens de volume de sólidos variando de 71,0 a 82,0 %.

Mediante os referidos testes é possível a determinação das curvas de tempo de vibro-compressão da máquina vibro-prensa e do equipamento protótipo em função da porcentagem de volume de sólidos das peças, bem como a curva de energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm em função da referida porcentagem de volume de sólidos. Como todas as peças foram moldadas com a mesma mistura, é possível se correlacionar o tempo de vibro-compressão da máquina vibro-prensa com o tempo de vibro-compressão do protótipo ou com a energia de compactação do soquete.

Para tal, deve-se tomar os valores de tempo de vibro-compressão das PCP produzidas na própria máquina vibro-prensa e suas respectivas porcentagens de volume de sólidos, para a determinação do tempo de vibro-compressão equivalente das peças produzidas no equipamento protótipo, ou da energia de compactação equivalente dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, empregando-se as correlações mencionadas anteriormente (tempo de vibro-compressão em função da porcentagem de volume de sólidos - protótipo e energia de compactação em função da porcentagem de volume de sólidos – soquete).

Definidas as correlações entre os equipamentos, é possível incrementar o ábaco de dosagem, apresentado anteriormente na Figura 7.2, com o terceiro quadrante (Figura 7.3).

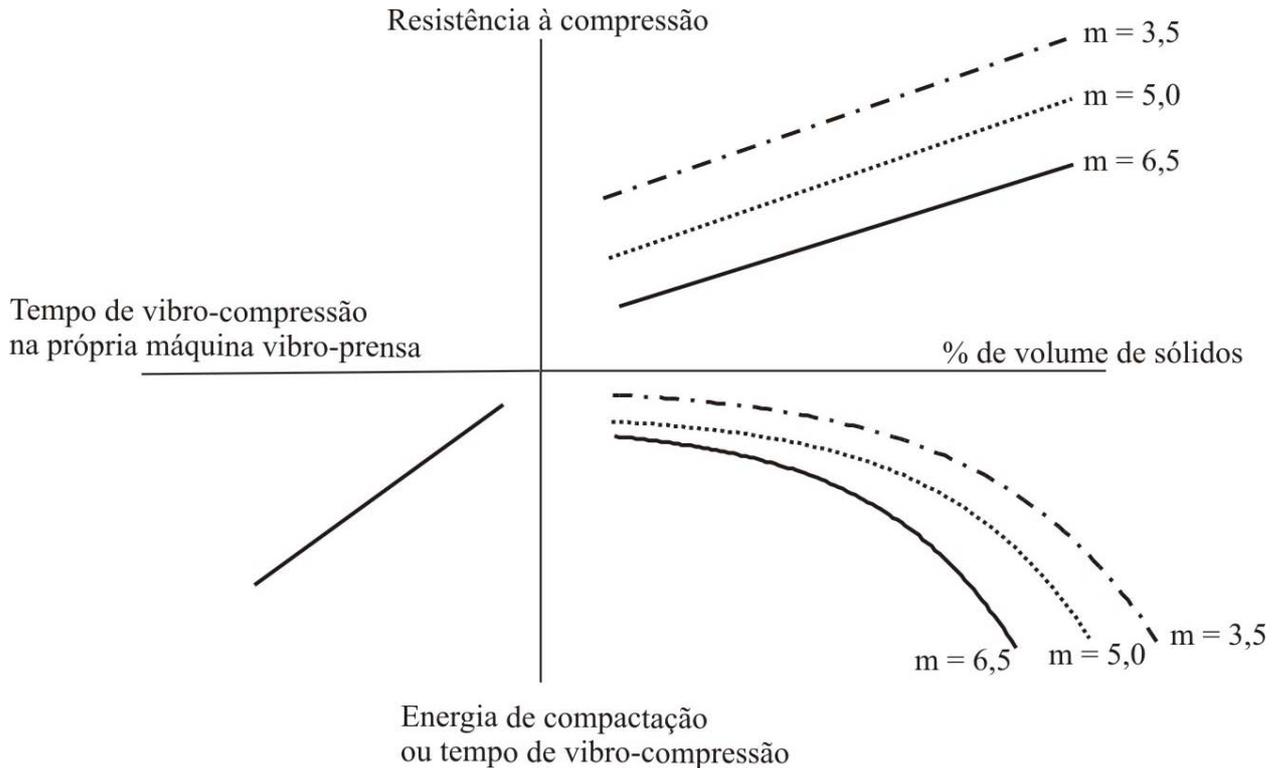


Figura 7.3 – Ábaco de dosagem com o incremento da relação entre a máquina vibro-prensa real e o equipamento empregado para o estudo em laboratório (equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm ou protótipo de vibro-compressão)

7.8 – DEFINIÇÃO DO TRAÇO PRELIMINAR

Para a definição do traço preliminar a ser empregado na própria fábrica para a produção das peças, os seguintes passos devem ser seguidos:

- 1 - Definir a resistência característica desejada, convertendo-a em resistência média, através do procedimento descrito no item 7.1.
- 2 - Se o estudo de dosagem foi conduzido no equipamento protótipo de vibro-compressão, pode-se entrar com o valor de resistência média, obtida acima, diretamente no ábaco de dosagem. Caso o estudo tenha sido realizado com o auxílio do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, é preciso corrigir o valor médio obtido anteriormente, empregando-se as curvas de correlação, apresentadas no item 6.2.2.8 (Figura 6.29 ou 6.30), obtendo-se a resistência equivalente dos corpos-de-prova 9 x 8 cm.

3 - Para a obtenção do traço preliminar, primeiramente, deve ser definido o tempo de vibro-compressão médio desejado para a máquina vibro-prensa. Esse tempo é função direta do porte e da regulagem do equipamento, girando, normalmente, em torno de 5 segundos para equipamentos de médio porte e 3 segundos para equipamentos de grande porte.

4 - Definido o tempo de vibro-compressão desejado para a máquina vibro-prensa, consegue-se através da curva do 3º quadrante, encontrar a energia ou o tempo de vibro-compressão do protótipo associados ao tempo de vibro-compressão da máquina (Figura 7.4).

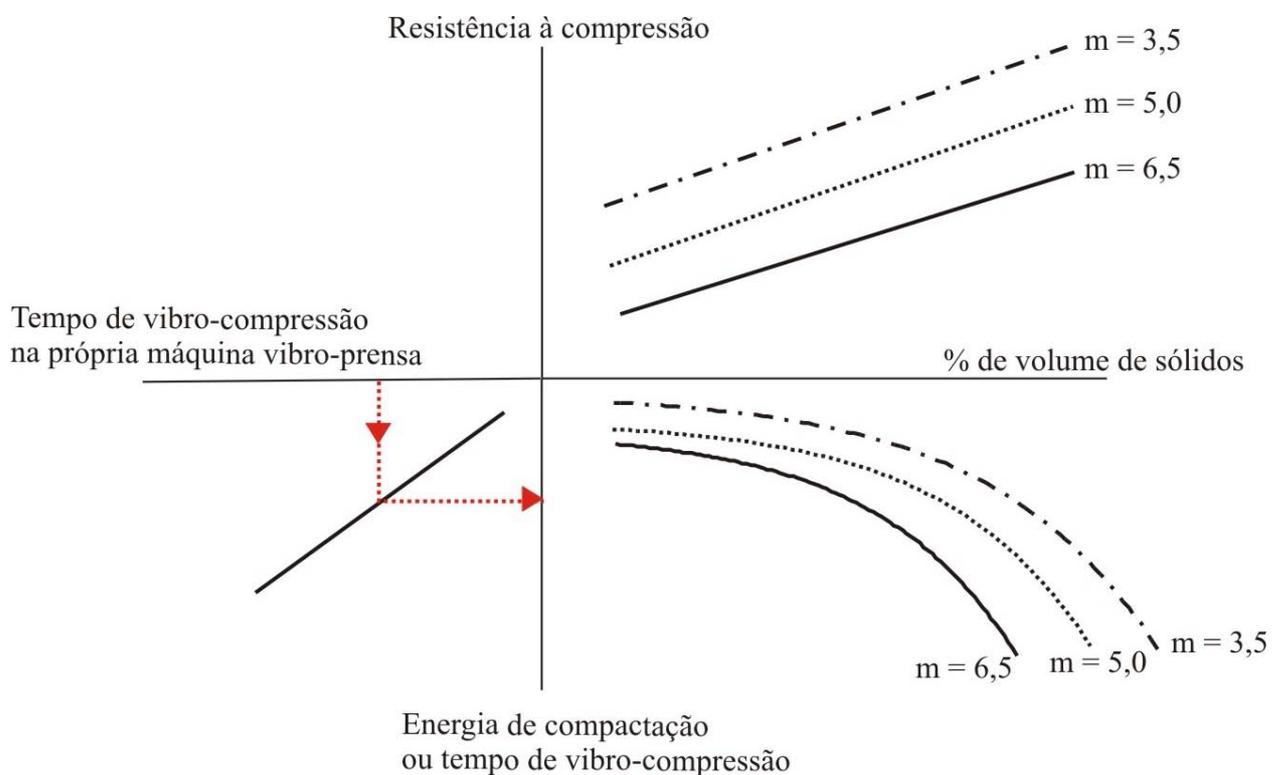


Figura 7.4 – Determinação da energia de compactação ou do tempo de vibro-compressão do protótipo associado a um determinado tempo de vibro-compressão da máquina vibro-prensa

5 - Para a determinação do traço preliminar, deve-se traçar uma reta horizontal passando pelo valor de resistência média definido no item 1 ou 2 (reta horizontal do 1º quadrante) e outra reta horizontal passando pela energia de compactação ou tempo de vibro-compressão definido no item 5 (reta horizontal do 2º quadrante). Quando os pontos de intersecção entre essas duas retas horizontais e uma reta vertical, passante pelo 1º e 2º quadrante apresentarem o mesmo valor de “m”, esse será o traço preliminar ($m_{\text{preliminar}}$) – Figura 7.5.

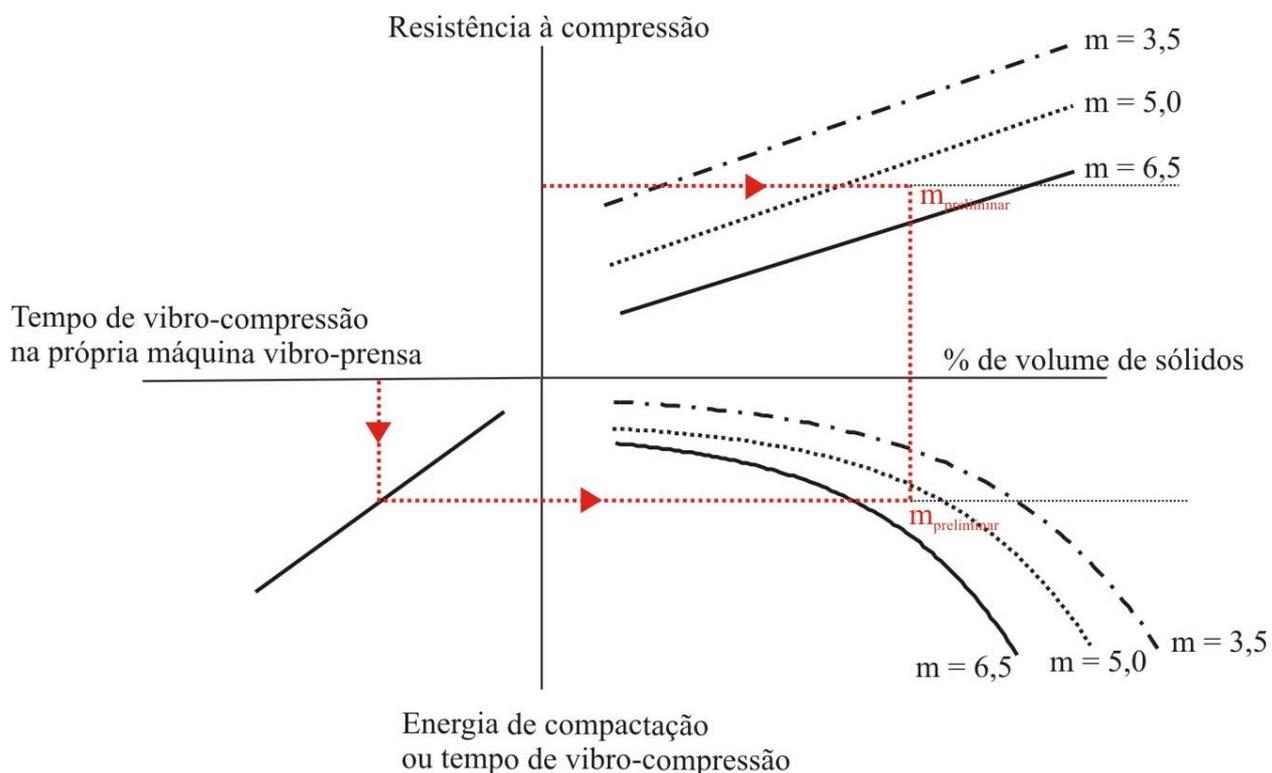


Figura 7.5 – Definição do traço piloto através do ábaco de dosagem (m_{piloto})

6 – A umidade ideal do traço preliminar pode ser obtida através de interpolações, em função da posição do referido traço ($m_{\text{preliminar}}$) em relação às curvas do primeiro quadrante (Figura 7.6).

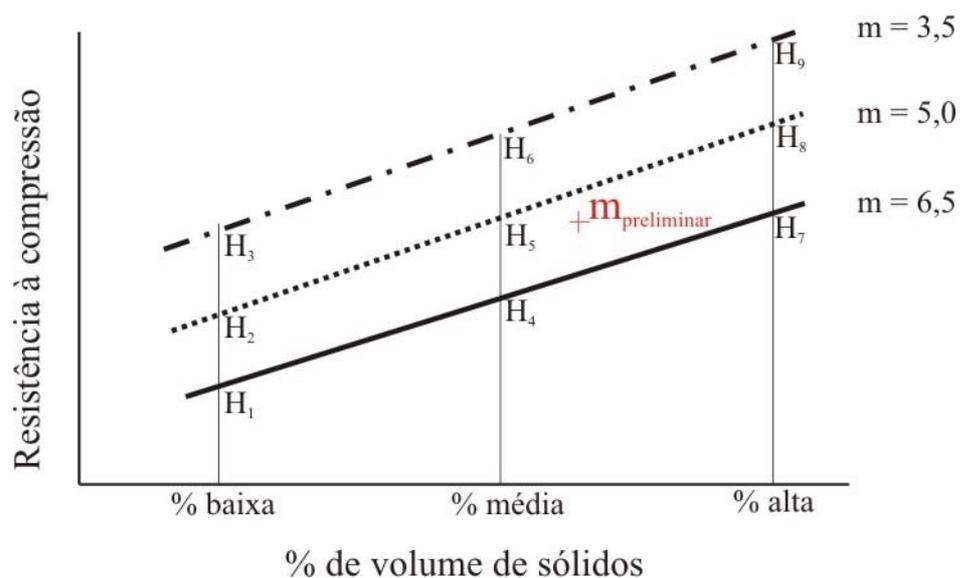


Figura 7.6 – Determinação da umidade ótima do traço preliminar ($m_{\text{preliminar}}$)

7.9 – AJUSTES FINAIS NA MÁQUINA VIBRO-PRENSA

Antes de se colocar o traço preliminar em produção, deve-se conferir a distribuição dos pesos das peças nas chapas e avaliar a variabilidade desses pesos no decorrer da produção. Conforme mencionado anteriormente (item 4.2), o peso das peças é um dos principais parâmetros de controle de qualidade da produção e, nesse caso, pode ser utilizado com um parâmetro de controle da regulagem do equipamento. No entender do autor, variações de peso que resultem em coeficientes de variação da massa específica no estado verde das peças superior a 2,0 %, devem ser evitadas, procedendo-se as devidas correções no equipamento, na regulagem do mesmo, ou no processo produtivo, para que o desvio padrão de produção não seja muito elevado.

Após as conferências no equipamento de vibro-compressão e as devidas regulagens, quando necessário, o traço preliminar deve ser colocado na produção, ajustando-se a umidade da mistura de maneira que a mesma fique próxima da umidade ideal, definida no estudo de dosagem laboratorial.

Com o silo de armazenamento do equipamento de vibro-compressão devidamente preenchido com o traço preliminar, deve-se começar a produção das peças propriamente dita, ajustando-se o tempo de alimentação de forma a se obter o tempo de vibro-compressão pré-estabelecido na etapa de dosagem. Quando a produção apresentar um regime uniforme, com o tempo de vibro-compressão próximo do tempo pré-definido, deve-se avaliar se a umidade da mistura está adequada para as condições de produção empregadas. Essa avaliação, conforme mencionado anteriormente, é feita de forma visual, verificando-se a quantidade de água nas laterais das peças e, principalmente, na parte superior das mesmas. Essa superfície superior deve apresentar-se levemente umedecida, não comprometendo a produção em função das paradas para limpeza da sapata. É prática corrente nas fábricas a parada para limpeza das sapatas a cada 5 a 10 minutos de produção, quando o equipamento não dispõe de sistemas de aquecimento de sapatas ou de dupla-camada.

Caso a umidade adotada para a mistura preliminar seja elevada, fazendo com que as superfícies laterais e superior das peças apresentem uma quantidade excessiva de água, ou, em caso contrário, onde a mistura apresente-se de forma muito seca, deve-se corrigir a umidade da mistura nas viradas subseqüentes, até que as peças apresentem condições adequadas de

produção. Deve ser lembrado que, em algumas situações, o fator governante da umidade ideal é a resistência à compressão, o que implicará em peças com uma aparência levemente seca.

Com o equipamento de vibro-compressão regulado (tempo de vibro-compressão semelhante ao tempo pré-definido na fase de dosagem) e a umidade da mistura adequada, deve-se avaliar a textura das PCP e o grau de compacidade alcançado, determinando-se a porcentagem de volume de sólidos, empregando-se a expressão (34), ou através da massa específica verde equivalente.

Caso o grau de compacidade esteja de acordo com o valor encontrado através do ábaco de dosagem, quando da determinação do traço preliminar (Figura 7.5), o referido traço pode ser empregado na produção das PCP. Caso contrário, pode-se deparar com duas situações:

- O grau de compacidade encontrado é maior do que o determinado anteriormente através do ábaco de dosagem: Caso isso ocorra, pode-se reduzir o tempo de alimentação e, conseqüentemente, o tempo de vibro-prensagem, de forma a diminuir o grau de compacidade das PCP até que se atinja o valor pré-definido através do ábaco de dosagem. Com isso, consegue-se aumentar a produtividade das peças, mantendo-se o traço preliminar, determinado no item anterior (7.8). Outra opção seria a de se fazer uma nova interpolação no primeiro quadrante do ábaco de dosagem, de forma a se reduzir o consumo de cimento, mantendo-se fixa a porcentagem de volume de sólidos alcançada no equipamento.
- O grau de compacidade encontrado é menor do que o determinado anteriormente através do ábaco de dosagem: No caso do grau de compacidade alcançado ser inferior ao definido através do ábaco de dosagem, pode-se aumentar o tempo de alimentação, resultando, conseqüentemente, em um aumento do tempo de vibro-prensagem e do grau de compacidade das PCP, de forma que esse alcance o valor pré-definido através do ábaco de dosagem. Com isso, manter-se-á o traço preliminar definido anteriormente, resultando em uma redução na produtividade das PCP. Outra opção seria a de se fazer uma nova interpolação nas curvas do primeiro quadrante do ábaco de dosagem, aumentando-se o consumo de cimento da mistura, mantendo-se fixa a porcentagem de volume de sólidos alcançada.

Definido o grau de compacidade das peças e o traço a ser empregado, de forma a se alcançar a resistência média pré-definida, as PCP devem ser produzidas, controlando-se sempre

o peso verde das mesmas e a regulagem do equipamento, através da variabilidade dos pesos nas chapas e ao longo da produção. Para a finalização do método de dosagem, deve-se determinar a resistência à compressão característica das PCP aos 28 dias, procedendo-se os devidos ajustes, caso necessário.

7.10 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DO MÉTODO DE DOSAGEM

Como exemplo ilustrativo do método de dosagem proposto no presente trabalho, foi feita uma reavaliação do traço da empresa onde os trabalhos foram conduzidos, com o objetivo de se melhorar a textura das peças, tentando-se manter o consumo de cimento e a produtividade anteriormente empregada.

7.10.1 – Parâmetros da mistura antiga

- Resistência à compressão média = 43,0 MPa
- Textura (desvio padrão do histograma de frequência) = 17
- Tempo médio de vibro-compressão da MONTANA = 5 segundos
- Porcentagem de volume de sólidos média = 78,6 %
- Traço = 1: 5,62 (cimento: agregados)
- % brita “0” = 21,4 %
- % areia grossa (MF = 2,99) = 69,0 % (AN1 – empregada no programa experimental)
- % de areia fina (MF = 0,93) = 9,6 % (AN 2 – empregada no programa experimental)

7.10.2 – Determinação das proporções entre os agregados

Empregando-se o equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, foram feitos testes, primeiramente, em argamassas, na proporção 1: 5 (cimento: agregados), empregando-se uma relação água / materiais secos de 7,0% e uma porcentagem de volume de sólidos de 78,6 %. Na Tabela 7.3, são apresentados os resultados de energia de compactação e de textura, através da avaliação visual das laterais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, em função das proporções de areia grossa e fina empregada.

Tabela 7.3 – Resultados de energia de compactação e de textura (avaliação visual) para os corpos-de-prova 9 x 8 cm – composição das areias (grossa e fina)

| % agregados | | Energia de compactação (J) | Textura lateral do cp |
|--------------|------------|----------------------------|-----------------------|
| Areia grossa | Areia fina | | |
| 100 | 0 | 580 | ruim |
| 90 | 10 | 400 | regular |
| 80 | 20 | 240 | boa |
| 70 | 30 | 320 | excelente |

Em função dos testes com argamassas, a mistura com 80 % de areia grossa e 20 % de areia fina, foi a que demandou uma menor energia de compactação e ao mesmo tempo apresentou uma textura lateral boa. Em função disso, foi adotada essa proporção entre os agregados miúdos para os testes com a incorporação da brita “0”, mantendo-se fixa a relação água / materiais secos da mistura ($H = 7,0\%$) e a porcentagem de volume de sólidos (78,6 %). Na Tabela 7.4 são apresentados os resultados de energia de compactação e da textura lateral dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, para a mistura 80 – 20 agregados miúdos com a adição de pedrisco.

Tabela 7.4 – Resultados de energia de compactação e de textura (avaliação visual) para os corpos-de-prova 9 x 8 cm – (80 – 20) agregados miúdos

| % agregados | | Energia de compactação (J) | Textura lateral do cp |
|------------------|-----------|----------------------------|-----------------------|
| Agregados miúdos | Brita “0” | | |
| 100 | 0 | 240 | boa |
| 90 | 10 | 200 | boa |
| 85 | 15 | 160 | regular |
| 80 | 20 | 120 | ruim |

Além da mistura entre os agregados miúdos que apresentou o melhor desempenho (80 – 20), foi utilizada a mistura com 70 % de areia grossa e 30 % de areia fina, para avaliação da quantidade máxima que se conseguia incorporar de agregado graúdo, bem como seu desempenho quanto à energia de compactação e à textura lateral dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Na Tabela 7.5 são apresentados os resultados para a referida mistura (70-30).

Através dos resultados de energia de compactação e das texturas laterais dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, pode-se verificar que a mistura que apresentou o melhor desempenho foi a mistura 70 – 30 de agregados miúdos, com uma adição de 20 % de brita “0” (Tabela 7.5). Essa mistura de agregados miúdos, inicialmente, não apresentou um bom desempenho quanto a

energia necessária para a compactação dos corpos-de-prova. Porém, como a referida mistura possuía uma quantidade mais elevada de areia fina, foi possível uma maior incorporação de agregado graúdo à mistura, sem prejudicar demasiadamente a textura lateral dos corpos-de-prova e reduzindo consideravelmente a energia de compactação dos mesmos.

Tabela 7.5 – Resultados de energia de compactação e de textura (avaliação visual) para os corpos-de-prova 9 x 8 cm – (70 – 30) agregados miúdos

| % agregados | | Energia de compactação (J) | Textura lateral do cp |
|------------------|-----------|----------------------------|-----------------------|
| Agregados miúdos | Brita “0” | | |
| 100 | 0 | 320 | excelente |
| 85 | 15 | 160 | boa |
| 80 | 20 | 130 | regular |
| 75 | 25 | 100 | ruim |

Em função disso, a proporção entre os agregados ficou sendo:

- Brita “0” = 20,0 %
- Areia grossa = 56,0 %
- Areia fina = 24,0 %

7.10.3 – Avaliação da textura no equipamento protótipo

Como a avaliação da textura através dos corpos-de-prova 9 x 8 cm não é muito eficiente, foram produzidas algumas peças no equipamento protótipo, empregando-se um traço 1: 5 (cimento : agregados), com a proporção definida no item anterior (7.10.2). Para a moldagem das PCP no referido equipamento, foi utilizado o procedimento de moldagem apresentado anteriormente no item (6.3.2.2). Na Figura 7.7 são apresentados em detalhe três PCP produzidas no equipamento protótipo, com o traço 1: 5, empregando-se a proporção nova e três peças com o mesmo traço, empregando-se a proporção antiga entre os agregados.

O valor médio do desvio padrão do histograma de freqüência para a proporção nova entre os agregados foi igual a 12; valor esse bem inferior ao desvio padrão das PCP produzidas com a proporção antiga, que foi igual a 17.

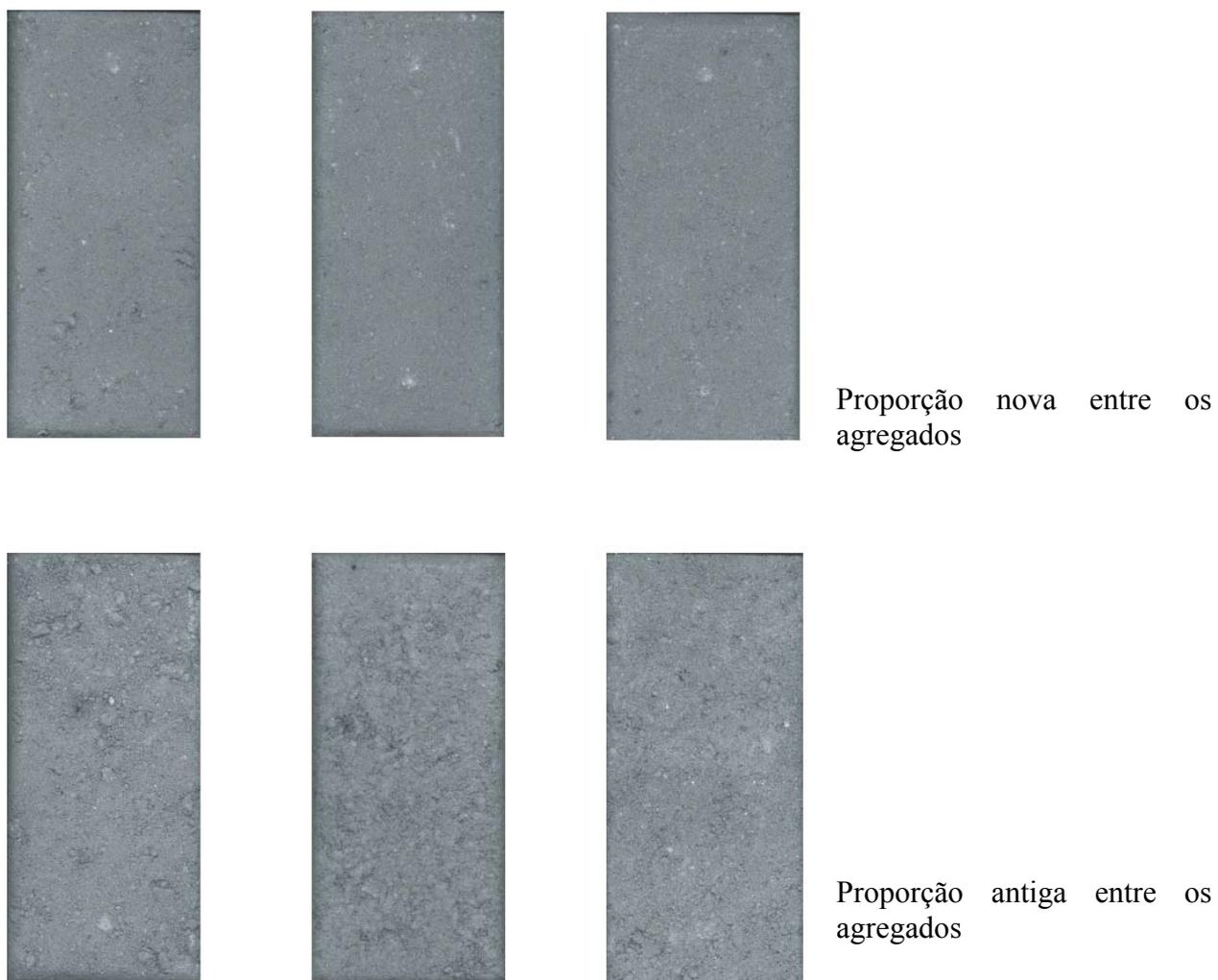


Figura 7.7 – Detalhe de PCP produzidas no equipamento protótipo empregando-se a proporção entre os agregados nova e a antiga

7.10.4 – Traços e porcentagens de volume de sólidos empregadas no estudo de dosagem

Para o presente exemplo ilustrativo do método de dosagem fora empregados os traços 1: 5 e 1: 6,5. Esses traços foram então desdobrados, empregando-se as porcentagens dos agregados definidas no item 7.10.2.

Traço 1 = 1: 5 (cimento : agregados)

Traço 1 desdobrado = 1: 1,0: 2,8: 1,2 (cimento: brita “0”: areia grossa: areia fina)

Traço 2 = 1: 6,5 (cimento : agregados)

Traço 2 desdobrado = 1: 1,3: 3,64: 1,56 (cimento: brita “0”: areia grossa: areia fina)

Para ambos os traços foram empregados porcentagens de volume de sólidos iguais a 73,3; 76,8 e 80,3 %.

7.10.5 – Determinação da umidade ótima

Para cada situação definida anteriormente (traço e porcentagem de volume de sólidos), foram moldados corpos-de-prova 9 x 8 cm, variando-se a umidade da mistura, para a determinação da umidade ótima para cada caso. Foram avaliadas visualmente as condições superficiais dos corpos-de-prova com relação à presença e quantidade de água e a resistência à compressão dos mesmos. Na Tabela 7.6, são apresentadas as relações água / materiais secos (H) ideais para os traços e as porcentagens de volume de sólidos empregados. Vale ressaltar que o fator determinante, em todas as situações, do teor de água ideal das misturas, foi a condição superficial dos corpos-de-prova.

Tabela 7.6 – Relação água / materiais secos em função do traço e da porcentagem de volume de sólidos

| Porcentagem de volume de sólidos | Traços | |
|----------------------------------|--------|--------|
| | 1: 5,0 | 1: 6,5 |
| 73,3 | 8,0 % | 7,5 % |
| 76,8 | 7,5 % | 7,0 % |
| 80,3 | 6,5 % | 6,0 % |

7.10.6 – Moldagem das peças e construção do ábaco de dosagem

Para o presente exemplo ilustrativo foram moldados corpos-de-prova 9 x 8 cm e PCP, do tipo PAV1-80, no equipamento protótipo. Para cada situação, foram moldadas 4 peças, determinando-se a energia necessária para compactação, no caso dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, e o tempo de vibro-compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo. Imediatamente após a moldagem das peças, foram determinadas as massas verdes das mesmas, para o posterior cálculo da porcentagem de volume de sólidos real.

As peças (corpos-de-prova 9 x 8 cm e PCP) foram curadas dentro de uma caixa de isopor com uma pequena lâmina de água no fundo (ver Figura 6.39) durante as primeiras 24 horas. Ao término da cura inicial, foram determinadas as alturas e volumes das referidas peças, procedendo-se, posteriormente, o capeamento das mesmas com pasta de cimento. Ao término da etapa de capeamento, as peças foram imersas em água até a data do rompimento (28 dias). Na

Tabela 7.7 e 7.8, são apresentados, respectivamente, os resultados dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP, produzidas no equipamento protótipo.

Tabela 7.7 – Resultados obtidos para os corpos-de-prova 9 x 8 cm

| Traço 1: 5,0 | | | Traço 1: 6,5 | | |
|--------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------------|
| Porcentagem vol. sólidos | Energia (J) | Resistência à compressão (MPa) | Porcentagem vol. sólidos | Energia (J) | Resistência à compressão (MPa) |
| 73,2 | 50 | 28,4 | 73,2 | 60 | 22,4 |
| 73,4 | 40 | 28,8 | 73,1 | 50 | 21,8 |
| 73,3 | 50 | 28,1 | 73,3 | 60 | 21,8 |
| 73,5 | 40 | 27,7 | 73,4 | 50 | 22,2 |
| 76,5 | 160 | 37,5 | 76,5 | 220 | 33,4 |
| 76,6 | 160 | 38,0 | 76,4 | 220 | 32,4 |
| 76,8 | 180 | 39,9 | 76,4 | 220 | 33,0 |
| 76,7 | 160 | 34,7 | 76,4 | 220 | 33,9 |
| 79,7 | 572 | 51,0 | 78,2 | 858 | 40,7 |
| 80,0 | 650 | 50,9 | 78,6 | 1014 | 39,6 |
| 80,0 | 598 | 53,7 | 78,8 | 910 | 42,6 |
| 79,9 | 624 | 49,3 | 78,7 | 962 | 39,2 |

Tabela 7.8 – Resultados obtidos para as PCP produzidas no equipamento protótipo

| Traço 1: 5,0 | | | Traço 1: 6,5 | | |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Porcentagem vol. sólidos | Tempo vibro-compressão (s) | Resistência à compressão (MPa) | Porcentagem vol. sólidos | Tempo vibro-compressão (s) | Resistência à compressão (MPa) |
| 74,4 | 0,58 | - | 73,4 | 0,59 | 28,9 |
| 73,3 | 0,60 | 34,3 | 73,9 | 0,89 | 28,6 |
| 73,0 | 0,39 | 31,2 | 73,7 | 0,84 | 26,8 |
| 73,7 | 0,62 | 32,2 | 73,1 | 0,78 | 24,8 |
| 76,3 | 1,48 | - | 76,2 | 2,05 | 33,7 |
| 76,0 | 1,51 | 40,1 | 76,2 | 2,14 | 36,9 |
| 76,2 | 1,64 | 39,3 | 76,3 | 2,28 | 36,9 |
| 76,0 | 1,66 | 40,5 | 75,7 | 2,23 | 31,5 |
| 79,3 | 8,18 | 49,4 | 78,3 | 11,14 | 36,1 |
| 79,1 | 8,39 | 49,8 | 78,3 | 9,80 | 39,5 |
| 79,5 | 11,54 | 45,7 | 77,7 | 10,71 | 35,4 |
| 79,3 | 11,73 | 48,1 | - | - | - |

Cabe ressaltar que os parâmetros empregados no equipamento protótipo foram os mesmos adotados no estudo do item 6.4:

- Excentricidade = 1,35 mm

- Freqüência = 45,0 Hz (F1)
- Carga de compressão = 200 kg

Com os resultados apresentados nas Tabelas 7.7 e 7.8, e com as curvas de correlações definidas entre o equipamento da MONTANA e o soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, bem como o equipamento protótipo, apresentadas no item 6.4, foi possível a construção dos ábacos de dosagem apresentados nas Figuras 7.8 e 7.9.

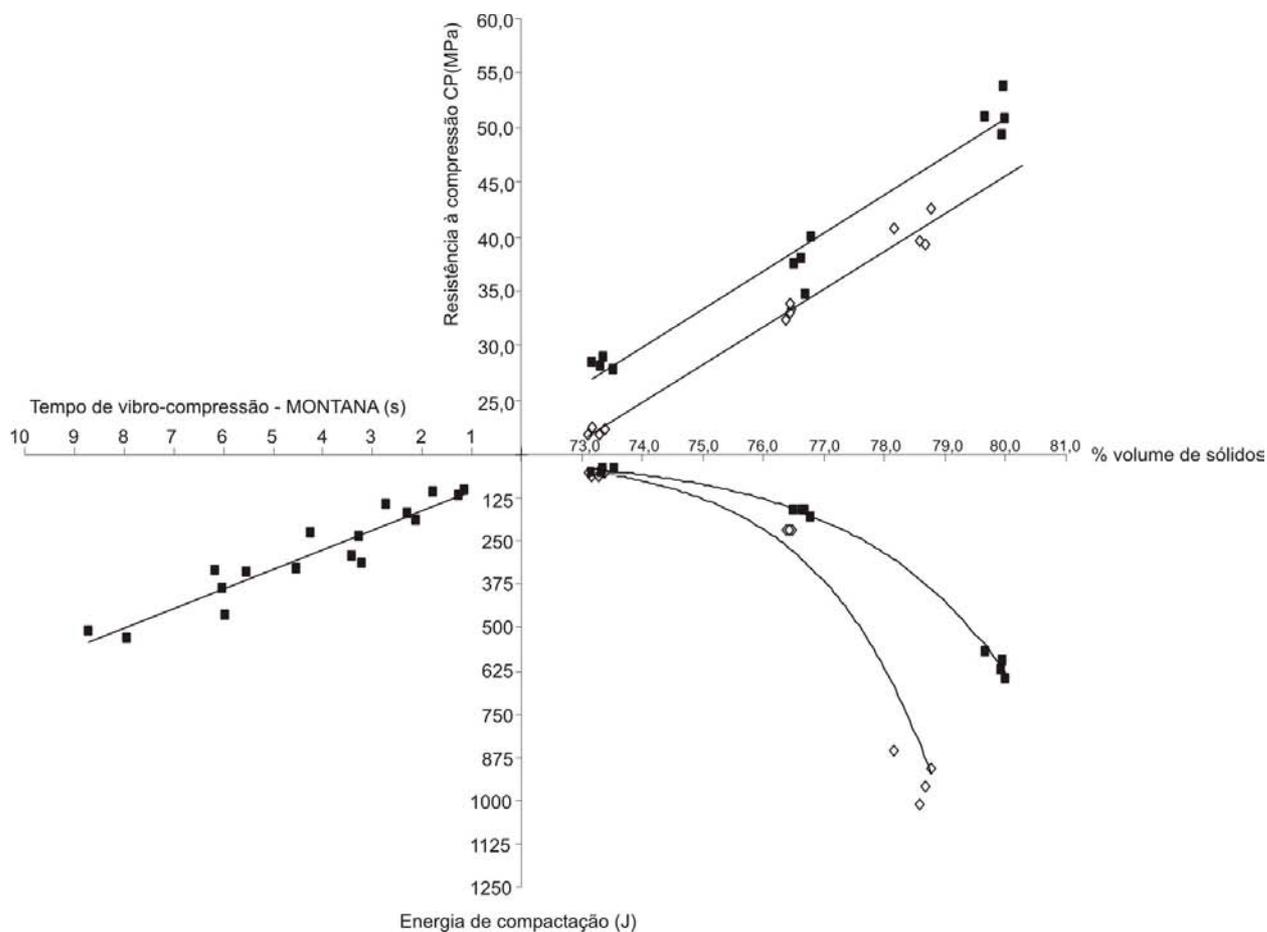


Figura 7.8 – Ábaco de dosagem para as PCP – soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

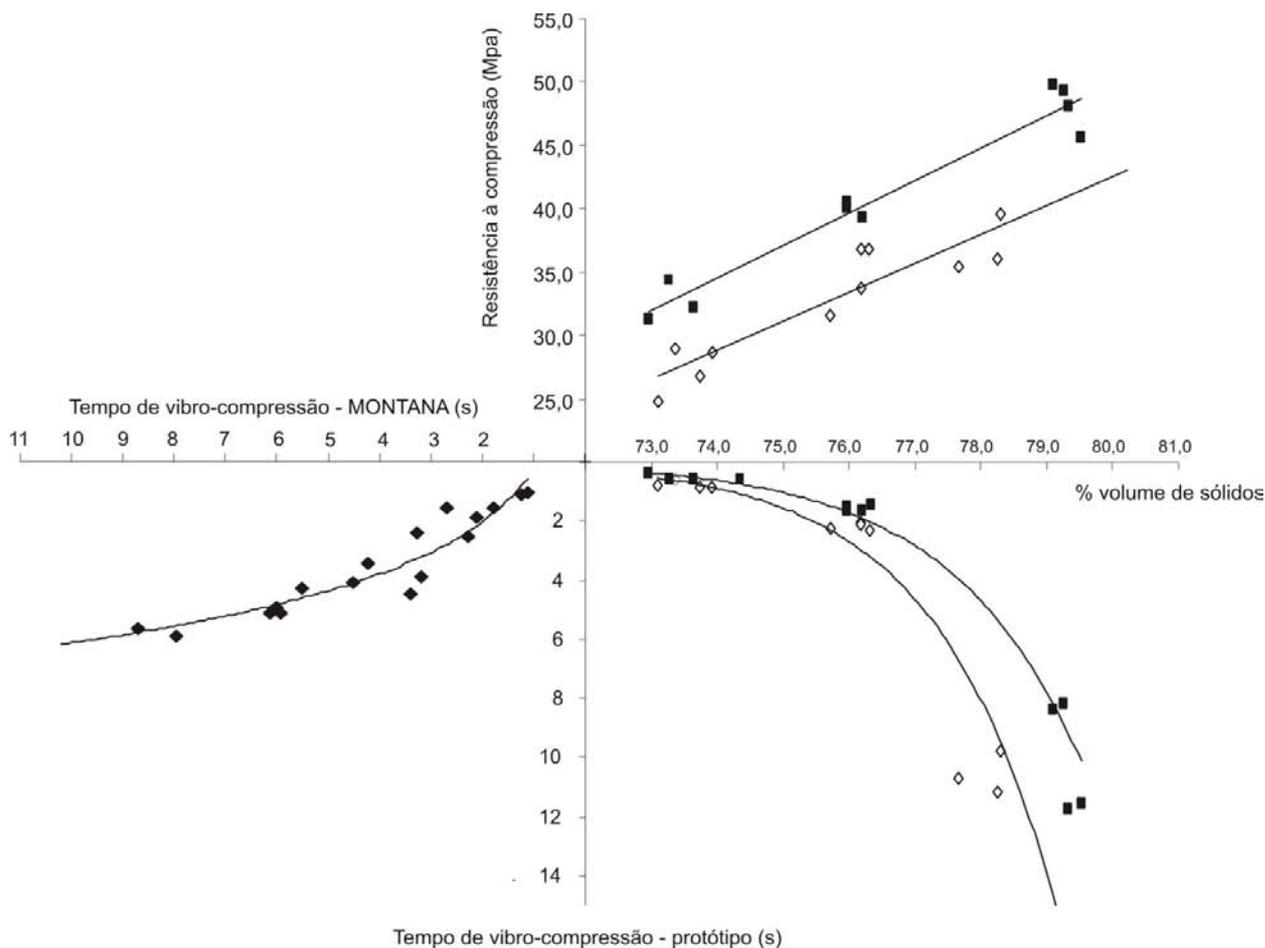


Figura 7.9 – Ábaco de dosagem para as PCP – equipamento protótipo

7.10.7 – Definição do traço preliminar

Considerando-se a resistência média das peças como sendo a resistência média do traço antigo (43 MPa), e o tempo de vibro-compressão médio do equipamento da MONTANA como sendo igual a 5 segundos, é possível a definição do traço preliminar através dos ábacos apresentados nas Figuras 7.8 e 7.9. Vale ressaltar que para a definição do traço preliminar empregando-se o ábaco de dosagem definido através dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, é preciso corrigir a resistência, utilizando-se a curva de correlação apresentada anteriormente na Figura 6.30. Com isso, para se obter PCP com resistência média de 43 MPa, a resistência necessária para os corpos-de-prova 9 x 8 cm é de aproximadamente 40 MPa.

Nas Figuras 7.10 e 7.11 é apresentada a definição do traço preliminar, empregando-se, respectivamente, o ábaco de dosagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e o das PCP, produzidas no equipamento protótipo.

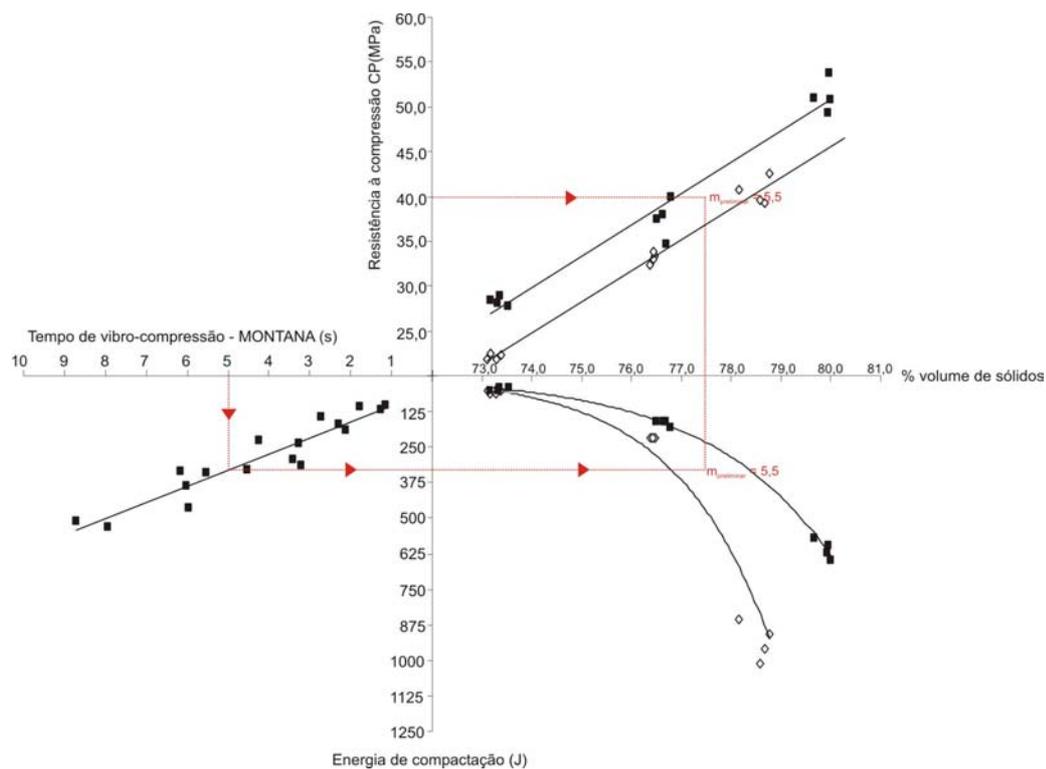


Figura 7.10 – Definição do traço preliminar das PCP – soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm

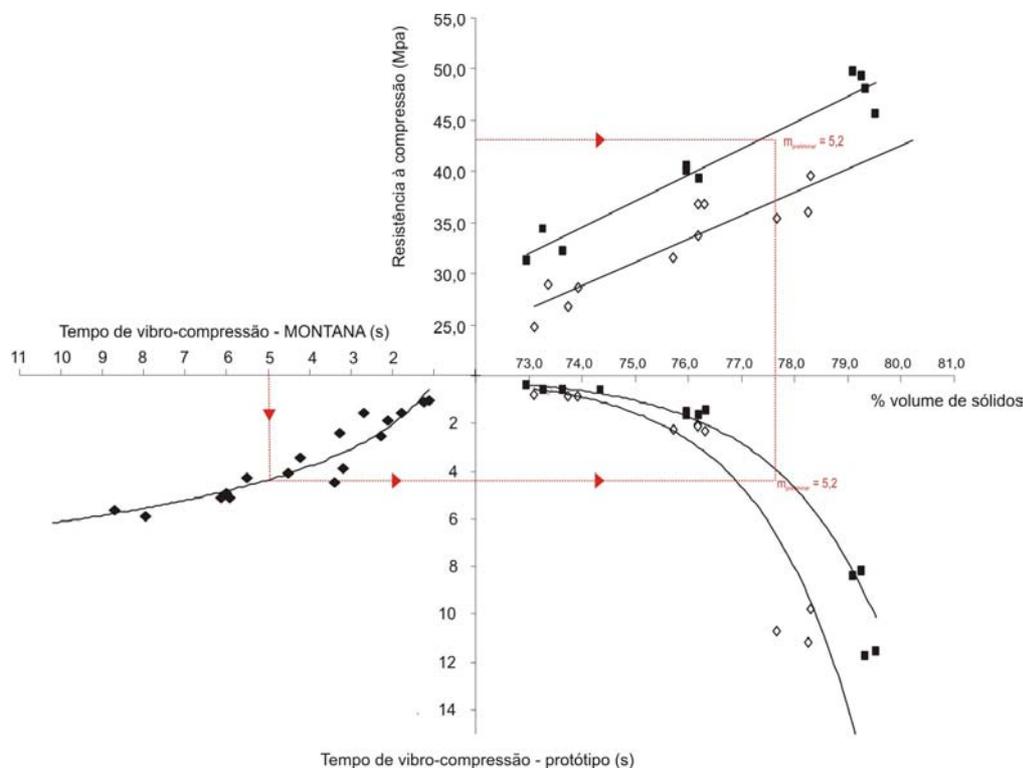


Figura 7.11 – Definição do traço preliminar das PCP – equipamento protótipo

7.10.8 – Determinação da umidade ideal para o traço preliminar

Utilizando-se os valores de umidade determinados no item 6.6.10.5 (Tabela 7.6), através do soquete de compactação dos corpos-de-prova e, com os resultados médios obtidos no estudo de dosagem, foi possível, através de algumas interpolações, a determinação da umidade ideal para o traço preliminar. Nas Figuras 7.12 e 7.13, são apresentados detalhes dos gráficos de 1º quadrante do ábaco de dosagem dos corpos-de-prova e das PCP, respectivamente, para a interpolação e determinação da umidade ideal do traço preliminar.

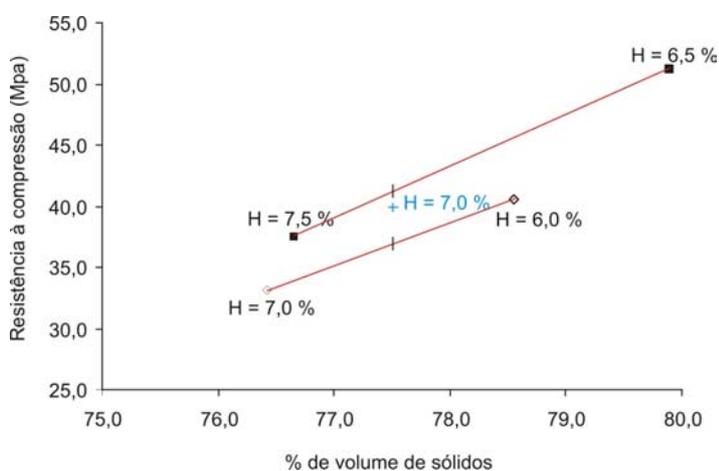


Figura 7.12 – Detalhe da determinação da umidade ideal do traço preliminar – corpos-de-prova 9 x 8 cm

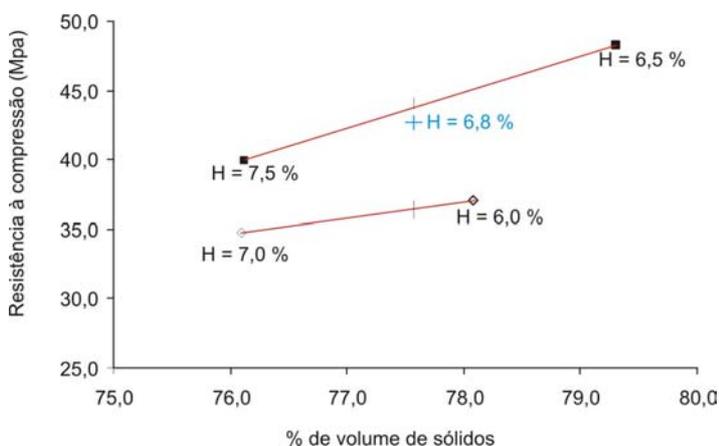


Figura 7.13 – Detalhe da determinação da umidade ideal do traço preliminar – PCP produzidas no equipamento protótipo

7.10.9 – Resultado do estudo de dosagem para testes na máquina vibro-prensa

Na Tabela 7.9 são apresentados os resultados finais, da fase experimental feita em laboratório, aplicando-se o método de dosagem proposto, com o auxílio do soquete de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm e das PCP, produzidas no equipamento protótipo.

Tabela 7.9 – Resultados do estudo de dosagem – fase laboratorial

| | Corpos-de-prova 9 x 8 cm | PCP produzidas no equipamento protótipo |
|----------------------------------|--------------------------|---|
| Traço preliminar (em massa) | 1: 5,5 | 1: 5,2 |
| % brita “0” | | 20,0 |
| % areia grossa | | 56,0 |
| % areia fina | | 24,0 |
| Textura | - | 12 ¹ |
| Porcentagem de volume de sólidos | 77,5 % | 77,6 % |
| Relação água / materiais secos | 7,0 % | 6,8 % |

¹ – Desvio padrão do histograma de freqüências

8 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inexistência de métodos de dosagem para PCP que garantam o cumprimento de requisitos de desempenho, sem a necessidade de ajustes excessivos no próprio equipamento de vibro-compressão, foi o motivador principal do desenvolvimento desse trabalho. Para que se pudesse contribuir para com essa área do conhecimento, foi necessária a proposição de novos tipos de testes e equipamentos, que permitissem avaliar e caracterizar, antecipadamente, parâmetros como a resistência à compressão das PCP, seu acabamento superficial (textura), e o desempenho das misturas com relação à facilidade na etapa de moldagem.

Um dos equipamentos propostos foi o soquete de compactação para a moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm. Dentre os resultados obtidos no presente trabalho com relação a esse equipamento, pode-se destacar:

- A existência de uma boa correlação entre as resistências à compressão das PCP e dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, independente do formato das PCP e do proporcionamento da mistura (traço), viabilizando a previsão, em laboratório, da resistência à compressão das PCP;
- A possibilidade do emprego da energia de compactação dos corpos-de-prova como parâmetro para avaliação e qualificação das misturas em laboratório, com relação à facilidade na etapa de moldagem (vibro-compressão). Os testes conduzidos nesse trabalho mostraram que o soquete de compactação é bastante sensível, em se tratando de energia de compactação dos corpos-de-prova, haja vista as diferenças obtidas entre os traços estudados (Traços 1, 2 e 3) e com o aumento da quantidade de água dos mesmos;
- O referido equipamento permite a determinação da quantidade ideal de água de uma mistura, quando fixado um grau de compactação, levando-se em consideração parâmetros de desempenho, como a resistência à compressão das peças (curva de evolução de resistência com o aumento do teor de umidade da mistura) e a produtividade das mesmas, em função da máxima quantidade de água que o equipamento suportar. Essa quantidade máxima permitida pelo equipamento é definida em função da avaliação visual da área de abrangência e da quantidade de água no topo dos corpos-de-prova, dando um indicativo das condições superficiais das PCP quando produzidas no próprio equipamento de vibro-compressão. PCP que apresentam excesso de água após a moldagem em sua superfície demandam um número excessivo de paradas para a limpeza

das sapatas, em função da constante aderência com o concreto, quando o equipamento não dispõe de sistemas de aquecimento de sapata ou “*doublecap*”;

- Com relação à avaliação prévia da textura das PCP, tomando-se como base a textura dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, o que se verificou foi que, via de regra, a textura dos corpos-de-prova apresenta-se mais fechada do que a das PCP, inviabilizando a previsão da textura das PCP em estudos laboratoriais, empregando-se o referido equipamento

Em função dos resultados encontrados no estudo do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, onde não é aplicado o efeito de vibração, e, devido à falta de bibliografia específica sobre o assunto, houve a necessidade da proposição de um equipamento protótipo de vibro-compressão para a avaliação da influência dos parâmetros do equipamento (frequência, amplitude e carga de compressão) e de diferentes misturas, no tempo de vibro-compressão das peças e na resistência à compressão das mesmas. No que tange aos resultados dos estudos conduzidos com o equipamento protótipo, pode-se destacar:

- O parâmetro que exerce influência significativa no tempo de vibro-compressão das peças é a amplitude do movimento de vibração. Essa amplitude, em se tratando de produção de PCP, deve girar em torno de 0,8 a 1,0 mm;
- Com relação à frequência de vibração, essa parece não exercer influência significativa sobre tempo de vibro-compressão das PCP. Com isso, acredita-se que valores de frequências da ordem de 50 Hz são os mais indicados para produção das PCP, pois resultam em um menor desgaste do equipamento de vibro-compressão, uma vez que a energia é diretamente proporcional a frequência de vibração;
- O nível de carga de compressão aplicado influencia significativamente o tempo de vibro-compressão das peças. Provavelmente por isso, os grandes fabricantes de máquinas vibro-prensas utilizam em seus equipamentos apenas o peso de um pórtico metálico como aplicador de carga, sem o auxílio de um pistão hidráulico para aumentar o nível de carregamento sobre as peças;
- Nesse trabalho não se conseguiu estabelecer uma relação direta entre os parâmetros do equipamento de vibro-compressão e a resistência à compressão das peças. O que se constatou foi que a influência dos parâmetros do equipamento sobre a resistência à compressão das peças é pouco significativa perto da influência dos referidos parâmetros (amplitude e nível de carga) no tempo de vibro-compressão das mesmas;

- O equipamento protótipo e os procedimentos de moldagem, definidos nesse trabalho, são capazes de representar a textura das PCP produzidas em máquinas vibro-prensas reais, que trabalham com o sistema de uma camada (equipamentos com uma gaveta), eliminando a necessidade de testes e ajustes excessivos no próprio equipamento de vibro-compressão para avaliação do acabamento superficial das PCP;
- Os parâmetros de vibração não influenciam na quantidade ideal de água das misturas, quando os tempos de vibro-compressão encontram-se dentro dos tempos reais de produção (< 10 segundos). Com isso, qualquer regulagem do equipamento protótipo pode ser empregada para a determinação da quantidade ideal de água da mistura, desde que os tempos de vibro-compressão resultantes sejam inferiores a 10 segundos.

Os estudos conduzidos no presente trabalho mostraram ainda que:

- O emprego de curvas e faixas granulométricas pré-estabelecidas, como no caso da faixa recomendada pela Columbia, não é garantia de uma alta produtividade das peças (baixo tempo de vibro-compressão). Isso ocorre pelo fato dessas curvas não levarem em consideração a forma do agregado, que influencia diretamente no atrito interno das misturas e, conseqüentemente, na energia despendida para a moldagem das peças;
- É possível se correlacionar o tempo de vibro-compressão das PCP produzidas em uma máquina vibro-prensa real com a energia de compactação dos corpos-de-prova 9 x 8 cm, ou com o tempo de vibro-compressão das PCP produzidas no equipamento protótipo; com isso, consegue-se determinar a real diferença em segundos de vibro-prensagem para um equipamento de vibro-compressão, relativa a uma diferença em joules, ou em segundos de vibro-prensagem do equipamento protótipo;
- O ensaio prescrito pela ASTM E 965 – 87 para a medição da macrotextura superficial e adaptado no presente trabalho para as condições das PCP, sofre grande influência do operador, inviabilizando o emprego do mesmo para caracterização da textura das peças;
- O emprego do desvio padrão do histograma de frequências de imagens em tons de cinza como valor numérico das condições superficiais das peças (textura), mostrou-se correlacionável com a escala de qualidade definida pelo olho humano, sendo de rápida obtenção e não sofrendo influência do operador. Com isso, fica viável o estabelecimento de uma classificação objetiva da textura das PCP para fins de normalização, facilitando a

relação entre produtor e consumidor e agregando valor aos produtos de melhor acabamento superficial;

- Apesar das diferenças encontradas nas análises numéricas empregando-se o método dos elementos finitos para os diversos formatos de peças encontrados no mercado da região da Grande Florianópolis, os ensaios experimentais mostraram que o ensaio preconizado pela NBR 9780 (1987) não é influenciado pelo efeito de confinamento lateral exercido pela largura excedente ao diâmetro da pastilha de aplicação de carga.

Evidentemente, o presente trabalho apresentou algumas limitações, em função da sua grande abrangência e devido à necessidade de inúmeros testes dentro das próprias fábricas, empregando-se equipamentos reais de vibro-compressão. Contudo, acredita-se que os objetivos prescritos foram cumpridos, e o trabalho contribuiu para com o desenvolvimento da tecnologia dos concretos secos empregados para a produção das PCP. Para finalizar, alguns temas de interesse para trabalhos futuros foram levantados, dentre os quais pode-se destacar:

- Influência do efeito de vibração com e sem choque, no tempo de vibro-compressão das PCP;
- Estudo da influência dos parâmetros de vibração e de diferentes tipos de mistura na etapa de alimentação das PCP;
- Avaliação da eficácia de aditivos plastificantes e incorporadores de ar, visando o aumento da produtividade, ou o aumento do grau de compactação das peças quando fixada uma regulagem de equipamento;
- Avaliação do efeito de diferentes cores de pigmentos no resultado do desvio padrão do histograma de frequências de imagens em tons de cinza, bem como a definição de escalas de qualidade em função da tonalidade das peças, para classificação e qualificação das mesmas;
- Estudos sobre a parte de abrasão das peças para pavimentação (métodos de ensaio; relação entre a resistência à abrasão e a resistência à compressão; estabelecimento de limites em função da vida útil das peças).

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard specification for solid concrete interlocking paving units*. ASTM C936. Philadelphia, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for measuring surface macrotexture depth using a volumetric technique*. ASTM E 965. Philadelphia, 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for abrasion resistance of concrete by sandblasting*. ASTM C418. Philadelphia, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Aditivos para concreto de cimento Portland - Especificações*. NBR 11768. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária - Método de ensaio*. NBR 7810. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados para concreto*. NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. NBR 7217. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. NBR 7223. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Peças de concreto para pavimentação – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio*. NBR 9780. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Peças de concreto para pavimentação – Especificação*. NBR 9781. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Preparo, controle e recebimento de concreto*. NBR 12655. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de concreto - procedimentos*. NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. *Granulats – Définitions, conformité, specifications*. AFNOR P18-540, 1997.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. *Pavés en béton – Prescriptions et méthodes d'essai*. AFNOR P98-303, 1988.

ASHFORD, J.; ODAN, J.. *Start with a scan – A guide to transforming scanned photos and objects into high quality art*. Peachpit Press, Berkeley, CA., 1996.

AUSTRALIAN STANDARD. *Masonry units and segmental pavers*. AS/NZ 4455, 1997.

AUSTRALIAN STANDARD. *Masonry units and segmental pavers – Methods of test*. AS/NZ 4456, 1997.

BARFOOT, J. *More pavers of quality for more money*. Concrete, September, p. 12-14, 1988.

BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE. *Betonstraatstenen*. NBN B21 – 311/A1, 1994

BERGERHOF, Walter. *Interlocking paving blocks – market potential and economic production*. Precast concrete, London, p. 457 – 459, Oct. 1981.

- BRESSON, J.; BRUSIN, M.. *Étude de l'influence des paramètres de la vibration sur le comportement des bétons*. CERIB – Publication technique n° 32, Mars, 1977.
- BRESSON, J.. *La Vibration dans les machines à blocs*. CERIB – Publication technique n° 58, Mars, 1981.
- BRESSON, J.. *La Vibration des bétons*. CERIB – Publication technique n° OG-04, Fév., 2001.
- BRITISH STANDARD. *Precast concrete paving blocks – Specification for paving blocks*. BS 6717 – Part1, London, 1986.
- BRÜEL & KJÆR. *Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers – Theory and application*. Handbook, 1978.
- CARTER, S.. *Colour Vision*. Concrete, Jan./Feb., p. 34 – 35, 1996.
- CARTER, S.. *Pigmenting concrete*. Concrete, Nov./Dec. – 1998.
- Computers and Structures, Inc. SAP 2000 Plus – *Integrated Structural Analysis and Design Software* – Version 6.1, 1997.
- DAFICO, Dario de Araújo. *Contribuição ao estudo da dosagem do concreto de cimento Portland*. Florianópolis, 1997. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *Pflastersteine beton*. DIN 18501. Berlin, Beuth Verlag, 1978.
- DOWSON, A. J.. *A manufacturer's perspective of variation within the production process of concrete paving block*. Third International Workshop on Concrete Block Paving, Carta Gena de Indias, Colombia, May - 1998.

- DOWSON, A. J.. *Mix design for concrete block paving*. Precast Concrete, London, Feb. p. 65 – 75, 1981.
- DOWSON, A. J.. *The iron oxide pigment in concrete effect – Will it Last?*. Third International Workshop on Concrete Block Paving, Carta Gena de Indias, Colombia, May - 1998.
- DUTRUEL, F.; DARDARE, J.. *Contribution to the study of structural behaviour of a concrete block pavement*. Second International Conference on Concrete Block Paving, Delft, p. 29 – 39, 1984.
- ELLIS, J.; WARREN, R.; DRYHURST, D.. *Bringing colour to concrete*. Concrete, Jan./Feb. 1996, p. 38 – 40.
- FERREIRA JUNIOR, Sylvio. *Peças de concreto para pavimentação*. 25^a Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, Outubro, 1991, p. 837 – 849.
- FERREIRA JUNIOR, Sylvio. *Produção de blocos de concreto para alvenaria – Prática recomendada*. ABCP – Boletim Técnico 103. São Paulo, 3^a edição, 1995a.
- FIOLA, C.; TARDINI, B.. *Concrete quality versus mixing time*. Third International Conference on Concrete Block Paving, Rome, Italy. p. 252-272, May, 1988.
- FRASSON JUNIOR, Artêmio. *Metodologia de dosagem e processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural*. Florianópolis, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.
- GONNERMAN, H.F.. *Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete*. ASTM PROC, 25 – Part II, p. 37 – 50, 1925.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P.. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. PINI/SENAI, 1992, 313p.

- HOLTHAUS, E. W.. *Possibilities and limitations of modern vibrating systems in concrete block machines*. Third International Conference on Concrete Block Paving, Rome, Italy. p. 289-297, May, 1988.
- JUVAS, K.. *Very dry precasting concrete*. In: *Special Concretes: Workability and Mixing*. Proceedings of the International RILEM Workshop, London, 1993. p. 153 – 168.
- KASTLEMAN, K. R.. *Digital image processing*. Prentice Hall, 1996.
- KNAPTON, J.. *The Romans and their roads – The original small element pavement technologists*. Fifth International Conference on Concrete Block Paving, Tel-Aviv, Israel, June 23 – 27, 1996, p. 17 – 52.
- KNAPTON, J.; BARBER, S. D.. *Concrete block paving in UK*. Symposium on Precast Concrete Paving Block, Johannesburg, South Africa, 1979.
- LANGENDONCK, TELEMACO VAN. *Resistência de blocos parcialmente carregados*. São Paulo: ABCP, 1952.
- LA ROVERE, HENRIETTE LEBRE. *Utilização do método de elementos finitos em projetos de estruturas*. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – 2001.
- LEVITT, M.. *Precast concrete: manufacture, properties and usage*. London : Applied Science, 1982. p. 33 – 52.
- MAKING QUALITY PAVERS WITH COLUMBIA EQUIPMENT. Vancouver, USA, 1986.
- MARCHAND, J.; HORNAIN, H.; DIAMOND, S.; PIGEON, M.; GUIRAUD, H.. *The microstructure of dry concrete products*. Cement and Concrete Research, vol. 26, No. 3, p. 427-438, 1996.

- MARCHAND, J.; BOISVERT, L.; TREMBLAY, S.; MALTAIS, J.; PIGEON, M.. *Air Entrainment in no-Slump Mixes*. Concrete International, Apr. 1998, p. 38 – 43.
- MEDEIROS, J. S.. *Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto*. São Paulo, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M.. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. PINI, São Paulo, 1994.
- MEYER, A.. *Materials and specification for block paving in West Germany*. Precast Concrete. London, p. 175 – 177, Apr. 1981.
- MILLER, D.; COOK. *Concrete block paving – A survey of industrial applications in the UK*. Precast Concrete. London, December. 1981.
- NEVILLE, A. M.. *Propriedades do concreto*. Trad. Salvador Eugênio Giammusso. São Paulo, PINI, 1988.
- PAGE, G. K.. *Interlocking concrete paver production on small-pallet concrete block machines*. Third International Workshop on Concrete Block Paving, Cartagena de Indias, Colombia, May 10 – 13, 1998, p. 9-1 – 9-13.
- PEARSON, A.; SHACKEL, B.. *Australian national standards for segmental and flag pavements*. 7^o International Conference on Concrete Block Paving. Sun City, South Africa, p. 12-15, Oct. 2003.
- PETRUCCI, E. G. R.. *Concreto de cimento Portland*. 12^a ed.. São Paulo: Globo, 295p, 1993.
- PETTIT, G. J. L.. *Abrasion test method for paving units compared*. 7th International Conference on Concrete Block Paving. Sun City, South Africa, 2003.

- PFEIFFENBERGER, L. E.. *Aggregate gradations used for various products formed on the block machine*. Besser Block, Alpena, Set./Out. 1985. p. 3 – 5.
- PIOROTTI, J. L.. *Pavimentação intertravada*. 2^a ed. Rio de Janeiro, Montana, 1989.
- RODRIGUES, Púbio Penna Firme. *Estágio atual da pavimentação intertravada no Brasil*. In: 4^o Seminário sobre normalização de cimento, concreto e agregados, São Paulo: IBRACON, 1986.
- RODRIGUES, Púbio Penna Firme. *Recomendações para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação*. In: Reunião Anual, São Paulo: IBRACON, 27 a 31 agosto, 1984.
- RODRIGUES, Púbio Penna Firme. *Fabricação de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação – Prática recomendada*. 2^a ed. São Paulo, ABCP, 1995a, 15p.
- RODRIGUES, Púbio Penna Firme. *Parâmetros de dosagem do concreto*. São Paulo, ABCP, 1995b, 23p.
- ROLLINGS, R. S.. *Concrete block pavements – US Army Engineer Waterways Experimental Station*. Technical Report – GL 82, 1982.
- SCURI, A. E.. *Fundamentos da imagem digital*. TECGRAF/PUC. Rio de Janeiro, 1999.
- SHACKEL, B.. *An experimental investigation of the response of interlocking block pavements to simulated traffic load*. Australian Road Research Board, Research Report – ARR 90 – p. 11-44, 1979.
- SHACKEL, B.. *A study of the behaviour of block paving under traffic using a heavy vehicle simulator*. Australian Road Research Board, Research Report – Vol 10 PT2 – p. 19-30, 1980.

- SHACKEL, B.. *Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavement*. London : Elsevier Applied Science, 1990.
- SHACKEL, B.. *Interlocking Concrete Block Pavements*. In: STOCK, A. F.. *Concrete pavements*. 1988. p. 377 – 412.
- TANGO, C. E. S.. *Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais*. 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Florianópolis, Brazil, Aug. 21 – 24, 1994, p. 21 – 30.
- TRICHÊS JR., M.; JORDAN, R.. *Instrumentação para medição de vibrações*. Curso oferecido pelo LVA-UFSC à DHB S.A., 2002.
- TUCKER JR, JOHN. *Effect of length on the strength of compression test specimens*. ASTM PROC., 45: 976-984, 1945.

ANEXOS – RESULTADOS

ANEXO I – AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE A MASSA ESPECÍFICA VERDE E SATURADA DAS PCP E DOS CORPOS-DE-PROVA 9 x 8 cm

Nas Tabelas I.1 e I.2 são apresentados, respectivamente os resultados do estudo de correlação entre a massa específica verde e saturada dos PAV3-60 e os corpos-de-prova 9 x 8 cm moldados com o mesmo traço. Já nas Tabelas I.3 e I.4 são apresentados os referidos resultados para os PAV2-80 e seus respectivos corpos-de-prova 9 x 8 cm.

Tabela I.1 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV3-60

| n | Peso verde (g) | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{verde} (kg/dm ³) | d_{saturado} (kg/dm ³) |
|----|----------------|-------------------|-------------|---|--|
| 1 | 2112,0 | 2233,4 | 60,6 | 2,00 | 2,11 |
| 2 | 2092,0 | 2177,4 | 59,4 | 2,02 | 2,10 |
| 3 | 2368,0 | 2446,2 | 63,7 | 2,13 | 2,20 |
| 4 | 2298,0 | 2368,8 | 62,4 | 2,11 | 2,18 |
| 5 | 2392,0 | 2440,7 | 62,7 | 2,18 | 2,23 |
| 6 | 2376,0 | 2419,9 | 62,4 | 2,18 | 2,22 |
| 7 | 2494,0 | 2511,1 | 63,9 | 2,23 | 2,25 |
| 8 | 2544,0 | 2553,0 | 62,8 | 2,32 | 2,33 |
| 9 | 2474,0 | 2498,3 | 62,8 | 2,26 | 2,28 |
| 10 | 2480,0 | 2502,4 | 63,0 | 2,26 | 2,28 |
| 11 | 2290,0 | 2354,1 | 62,6 | 2,09 | 2,15 |
| 12 | 2666,0 | 2675,2 | 63,8 | 2,39 | 2,40 |
| 13 | 2092,0 | 2164,0 | 60,6 | 1,98 | 2,04 |
| 14 | 2688,0 | 2695,7 | 63,8 | 2,41 | 2,42 |
| 15 | 2566,0 | 2579,1 | 62,7 | 2,34 | 2,36 |

Área média PAV3-60 = 174,65 cm²

Tabela I.2 – Resultados obtidos para os corpos-de-prova 9 x 8 cm moldados com o mesmo traço dos PAV3-60

| n | Peso verde (g) | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{verde} (kg/dm ³) | d_{saturado} (kg/dm ³) |
|----|----------------|-------------------|-------------|---|--|
| 1 | 1018 | 1070,1 | 80,3 | 1,99 | 2,10 |
| 2 | 1018 | 1072,0 | 80,2 | 2,00 | 2,10 |
| 3 | 1069 | 1097,4 | 80,2 | 2,10 | 2,15 |
| 4 | 1069 | 1099,0 | 80,2 | 2,10 | 2,16 |
| 5 | 1120 | 1136,7 | 80,4 | 2,19 | 2,22 |
| 6 | 1120 | 1136,9 | 80,3 | 2,19 | 2,23 |
| 7 | 1171 | 1181,5 | 80,8 | 2,28 | 2,30 |
| 8 | 1171 | 1180,6 | 80,5 | 2,29 | 2,31 |
| 9 | 1221 | 1223,3 | 81,3 | 2,36 | 2,37 |
| 10 | 1221 | 1222,3 | 81,2 | 2,36 | 2,37 |

Tabela I.3 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV2-80

| n | Peso verde (g) | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{verde} (kg/dm ³) | d_{saturado} (kg/dm ³) |
|----|----------------|-------------------|-------------|---|--|
| 1 | 3992,0 | 4128,7 | 80,7 | 2,11 | 2,18 |
| 2 | 3996,0 | 4175,2 | 80,7 | 2,11 | 2,21 |
| 3 | 4116,0 | 4189,6 | 80,3 | 2,19 | 2,23 |
| 4 | 3890,0 | 4010,7 | 79,4 | 2,09 | 2,16 |
| 5 | 4308,0 | 4364,3 | 81,8 | 2,25 | 2,28 |
| 6 | 4408,0 | 4445,5 | 81,9 | 2,30 | 2,32 |
| 7 | 4088,0 | 4168,7 | 80,3 | 2,17 | 2,22 |
| 8 | 4378,0 | 4415,8 | 81,9 | 2,28 | 2,30 |
| 9 | 4460,0 | 4472,0 | 80,6 | 2,36 | 2,37 |
| 10 | 4512,0 | 4525,9 | 80,8 | 2,38 | 2,39 |
| 11 | 4004,0 | 4106,5 | 80,3 | 2,13 | 2,18 |
| 12 | 4352,0 | 4420,1 | 82,7 | 2,25 | 2,28 |
| 13 | 3790,0 | 4019,3 | 80,5 | 2,01 | 2,13 |
| 14 | 3652,0 | 3879,5 | 78,6 | 1,98 | 2,11 |

Área média PAV3-60 = 234,22 cm²

Tabela I.4 – Resultados obtidos para os corpos-de-prova 9 x 8 cm moldados com o mesmo traço dos PAV2-80

| n | Peso verde (g) | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{verde} (kg/dm ³) | d_{saturado} (kg/dm ³) |
|----|----------------|-------------------|-------------|---|--|
| 1 | 967,0 | 1041,6 | 80,1 | 1,90 | 2,05 |
| 2 | 967,0 | 1039,9 | 80,0 | 1,90 | 2,04 |
| 3 | 1017,9 | 1065,5 | 80,1 | 2,00 | 2,09 |
| 4 | 1017,9 | 1070,3 | 79,8 | 2,01 | 2,11 |
| 5 | 1068,8 | 1101,1 | 80,1 | 2,10 | 2,16 |
| 6 | 1068,8 | 1108,6 | 80,3 | 2,09 | 2,17 |
| 7 | 1119,7 | 1134,9 | 80,2 | 2,19 | 2,22 |
| 8 | 1119,7 | 1135,7 | 80,4 | 2,19 | 2,22 |
| 9 | 1221,5 | 1219,4 | 80,6 | 2,38 | 2,38 |
| 10 | 1221,5 | 1219,3 | 80,9 | 2,37 | 2,37 |

ANEXO II – Resistência á compressão das PCP de 60 e 80 mm e suas respectivas séries de corpos-de-prova 9 x 8 cm

Tabela II.1 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV1-60

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 2214,7 | 56,1 | 2,07 | 20,28 |
| 2 | 2316,7 | 57,5 | 2,11 | 24,21 |
| 3 | 2312,1 | 57,7 | 2,10 | 26,41 |
| 4 | 2333,2 | 59,2 | 2,07 | 23,03 |
| 5 | 2334,9 | 58,4 | 2,10 | 27,27 |
| 6 | 2342,6 | 57,8 | 2,12 | 31,05 |
| 7 | 2380,9 | 58,6 | 2,13 | 29,00 |
| 8 | 2407,5 | 58,8 | 2,15 | 35,05 |
| 9 | 2434,9 | 59,1 | 2,16 | 28,06 |
| 10 | 2411,9 | 58,2 | 2,17 | 42,21 |
| 11 | 2478,5 | 59,5 | 2,18 | 38,75 |
| 12 | 2509,7 | 60,9 | 2,16 | 35,45 |
| 13 | 2521,5 | 59,5 | 2,22 | 43,86 |
| 14 | 2560,9 | 59,6 | 2,25 | 50,14 |
| 15 | 2554,2 | 58,8 | 2,28 | 57,22 |
| 16 | 2559,7 | 58,6 | 2,29 | 56,98 |
| 17 | 2659,5 | 60,1 | 2,32 | 62,40 |
| 18 | 2725,5 | 61,0 | 2,34 | 55,96 |
| 19 | 2756,5 | 62,1 | 2,33 | 51,72 |
| 20 | 2738,8 | 60,7 | 2,37 | 56,35 |

Área média PAV1-60 = 190,83 cm²

Tabela II.2 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1018,6 | 80,2 | 2,00 | 8,80 |
| 2 | 1030,0 | 79,8 | 2,03 | 7,94 |
| 3 | 1019,8 | 80,0 | 2,01 | 7,47 |
| 4 | 1032,2 | 80,1 | 2,03 | 8,88 |
| 5 | 1082,1 | 80,0 | 2,13 | 17,37 |
| 6 | 1067,1 | 80,0 | 2,10 | 18,78 |
| 7 | 1075,4 | 80,1 | 2,11 | 18,08 |
| 8 | 1079,2 | 80,2 | 2,12 | 18,86 |
| 9 | 1144,8 | 80,2 | 2,24 | 39,45 |
| 10 | 1145,6 | 80,3 | 2,24 | 36,31 |
| 11 | 1149,5 | 80,4 | 2,25 | 37,02 |
| 12 | 1147,1 | 80,3 | 2,25 | 37,18 |
| 13 | 1224,4 | 81,4 | 2,37 | 60,83 |
| 14 | 1228,7 | 81,3 | 2,38 | 62,95 |
| 15 | 1231,1 | 81,5 | 2,37 | 58,08 |
| 16 | 1226,8 | 81,4 | 2,37 | 54,94 |

Tabela II.3 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV2-60

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 3054,4 | 62,3 | 2,07 | 22,48 |
| 2 | 3059,7 | 61,8 | 2,09 | 24,99 |
| 3 | 3035,8 | 60,8 | 2,11 | 20,75 |
| 4 | 3050,0 | 63,9 | 2,01 | 20,75 |
| 5 | 3168,0 | 63,5 | 2,10 | 21,46 |
| 6 | 3060,2 | 61,4 | 2,10 | 27,74 |
| 7 | 3098,7 | 62,5 | 2,09 | 18,39 |
| 8 | 3273,1 | 62,8 | 2,20 | 40,24 |
| 9 | 3282,8 | 65,1 | 2,12 | 33,32 |
| 10 | 3204,2 | 62,7 | 2,15 | 33,72 |
| 11 | 3280,3 | 62,8 | 2,20 | 33,80 |
| 12 | 3334,1 | 62,3 | 2,26 | 52,11 |
| 13 | 3334,9 | 63,9 | 2,20 | 38,67 |
| 14 | 3347,6 | 64,4 | 2,19 | 41,81 |
| 15 | 3385,3 | 61,8 | 2,31 | 54,23 |
| 16 | 3426,4 | 62,4 | 2,31 | 52,89 |
| 17 | 3404,2 | 62,9 | 2,28 | 51,24 |
| 18 | 3457,4 | 62,9 | 2,32 | 55,41 |
| 19 | 3478,2 | 64,1 | 2,29 | 51,95 |
| 20 | 3448,3 | 63,5 | 2,29 | 53,52 |
| 21 | 3479,7 | 63,9 | 2,29 | 52,58 |
| 22 | 3548,2 | 64,0 | 2,34 | 54,23 |
| 23 | 3054,4 | 62,3 | 2,07 | 22,48 |

Área média PAV2-60 = 237,38cm²

Tabela II.4 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1019,6 | 79,7 | 2,01 | 7,70 |
| 2 | 1020,2 | 78,3 | 2,05 | 8,41 |
| 3 | 1018,8 | 79,0 | 2,03 | 8,33 |
| 4 | 1016,0 | 79,1 | 2,02 | 8,33 |
| 5 | 1087,7 | 80,1 | 2,13 | 16,03 |
| 6 | 1075,5 | 80,0 | 2,11 | 17,84 |
| 7 | 1080,5 | 79,9 | 2,13 | 17,84 |
| 8 | 1083,1 | 79,9 | 2,13 | 16,98 |
| 9 | 1134,4 | 80,3 | 2,22 | 37,33 |
| 10 | 1134,4 | 80,0 | 2,23 | 37,10 |
| 11 | 1135,0 | 80,2 | 2,22 | 35,60 |
| 12 | 1137,3 | 80,4 | 2,22 | 34,27 |
| 13 | 1221,4 | 81,3 | 2,36 | 56,51 |
| 14 | 1222,2 | 81,5 | 2,36 | 52,58 |
| 15 | 1223,2 | 81,9 | 2,35 | 56,20 |
| 16 | 1221,4 | 81,2 | 2,37 | 53,37 |

Tabela II.5 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV3-60

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 2057,5 | 57,1 | 2,05 | 18,08 |
| 2 | 2078,7 | 57,5 | 2,06 | 20,20 |
| 3 | 2104,9 | 58,3 | 2,06 | 20,12 |
| 4 | 2136,9 | 57,9 | 2,10 | 23,19 |
| 5 | 2136,8 | 56,7 | 2,15 | 22,56 |
| 6 | 2213,3 | 58,8 | 2,15 | 21,69 |
| 7 | 2182,9 | 59,0 | 2,11 | 24,91 |
| 8 | 2154,0 | 57,4 | 2,14 | 32,46 |
| 9 | 2206,9 | 59,0 | 2,13 | 26,96 |
| 10 | 2224,3 | 59,6 | 2,13 | 29,16 |
| 11 | 2226,6 | 58,8 | 2,16 | 32,54 |
| 12 | 2242,4 | 58,6 | 2,18 | 34,35 |
| 13 | 2291,8 | 57,9 | 2,26 | 50,38 |
| 14 | 2323,7 | 59,6 | 2,22 | 43,15 |
| 15 | 2313,0 | 58,0 | 2,27 | 56,67 |
| 16 | 2340,8 | 58,2 | 2,29 | 47,39 |
| 17 | 2386,1 | 59,8 | 2,28 | 49,59 |
| 18 | 2384,4 | 59,0 | 2,30 | 57,45 |
| 19 | 2386,9 | 58,4 | 2,33 | 59,65 |
| 20 | 2448,1 | 59,8 | 2,33 | 56,43 |
| 21 | 2459,7 | 61,0 | 2,30 | 56,82 |
| 22 | 2456,9 | 59,1 | 2,37 | 62,64 |
| 23 | 2451,0 | 58,8 | 2,38 | 73,17 |
| 24 | 2506,1 | 60,4 | 2,37 | 68,77 |
| 25 | 2558,0 | 60,6 | 2,41 | 67,12 |

Área média PAV3-60 = 175,49 cm²

Tabela II.6 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1041,2 | 80,4 | 2,04 | 7,39 |
| 2 | 1042,3 | 80,4 | 2,04 | 6,84 |
| 3 | 1042,4 | 79,7 | 2,06 | 8,41 |
| 4 | 1042,5 | 79,8 | 2,05 | 8,02 |
| 5 | 1076,9 | 80,3 | 2,11 | 18,16 |
| 6 | 1102,8 | 80,0 | 2,17 | 17,84 |
| 7 | 1104,1 | 80,6 | 2,15 | 17,06 |
| 8 | 1089,1 | 80,5 | 2,13 | 16,50 |
| 9 | 1149,1 | 80,2 | 2,25 | 35,37 |
| 10 | 1149,3 | 80,5 | 2,24 | 36,78 |
| 11 | 1152,0 | 80,6 | 2,25 | 37,49 |
| 12 | 1149,0 | 80,3 | 2,25 | 39,69 |
| 13 | 1226,9 | 81,3 | 2,37 | 62,40 |
| 14 | 1231,9 | 81,5 | 2,38 | 59,89 |
| 15 | 1231,6 | 81,6 | 2,37 | 59,02 |
| 16 | 1231,4 | 81,3 | 2,38 | 62,33 |

Tabela II.7 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV4-60

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 3764,6 | 65,5 | 2,28 | 48,89 |
| 2 | 3421,9 | 61,0 | 2,23 | 37,41 |
| 3 | 3497,0 | 62,6 | 2,22 | 35,76 |
| 4 | 3712,0 | 64,4 | 2,29 | 45,98 |
| 5 | 3553,8 | 61,9 | 2,28 | 52,42 |
| 6 | 3064,0 | 60,6 | 2,01 | 14,07 |
| 7 | 3174,0 | 62,1 | 2,03 | 15,40 |
| 8 | 3132,0 | 62,5 | 1,99 | 15,88 |
| 9 | 3151,8 | 63,5 | 1,97 | 17,61 |
| 10 | 3159,1 | 61,5 | 2,04 | 18,23 |
| 11 | 3211,8 | 59,9 | 2,13 | 28,37 |
| 12 | 3295,3 | 62,4 | 2,09 | 27,04 |
| 13 | 3346,6 | 63,1 | 2,10 | 30,65 |
| 14 | 3301,2 | 62,3 | 2,10 | 28,69 |
| 15 | 3373,4 | 60,7 | 2,20 | 39,61 |
| 16 | 3393,9 | 62,8 | 2,14 | 29,55 |
| 17 | 3797,7 | 65,8 | 2,29 | 57,06 |
| 18 | 3451,7 | 63,3 | 2,16 | 31,52 |
| 19 | 3479,9 | 63,2 | 2,19 | 37,33 |
| 20 | 3513,1 | 62,3 | 2,24 | 42,83 |
| 21 | 3539,7 | 62,0 | 2,27 | 52,11 |
| 22 | 3652,4 | 64,2 | 2,26 | 54,15 |
| 23 | 3673,6 | 64,2 | 2,27 | 51,01 |
| 24 | 3847,9 | 64,8 | 2,35 | 62,17 |
| 25 | 3824,1 | 65,8 | 2,31 | 56,51 |

Área média PAV4-60 = 252,16 cm²

Tabela II.8 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1017,9 | 80,1 | 2,00 | 6,99 |
| 2 | 993,9 | 80,0 | 1,95 | 7,62 |
| 3 | 1025,3 | 80,0 | 2,01 | 6,76 |
| 4 | 1031,8 | 79,7 | 2,04 | 6,92 |
| 5 | 1072,3 | 80,8 | 2,09 | 14,78 |
| 6 | 1073,7 | 80,7 | 2,09 | 12,81 |
| 7 | 1076,2 | 80,3 | 2,11 | 15,40 |
| 8 | 1069,3 | 80,4 | 2,09 | 15,95 |
| 9 | 1140,4 | 81,0 | 2,21 | 32,22 |
| 10 | 1140,4 | 80,2 | 2,24 | 36,78 |
| 11 | 1147,1 | 81,2 | 2,22 | 30,49 |
| 12 | 1143,2 | 81,2 | 2,21 | 29,87 |
| 13 | 1227,1 | 82,0 | 2,35 | 52,58 |
| 14 | 1228,1 | 81,9 | 2,36 | 52,97 |
| 15 | 1229,8 | 81,9 | 2,36 | 55,02 |
| 16 | 1229,8 | 82,1 | 2,35 | 57,61 |

Tabela II.9 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV1-80

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 3011,2 | 75,1 | 2,10 | 19,73 |
| 2 | 3045,4 | 75,9 | 2,10 | 21,46 |
| 3 | 3074,3 | 76,0 | 2,12 | 19,10 |
| 4 | 3093,1 | 77,0 | 2,11 | 19,96 |
| 5 | 3039,1 | 74,5 | 2,14 | 25,78 |
| 6 | 3156,5 | 78,0 | 2,12 | 23,74 |
| 7 | 3158,5 | 75,4 | 2,20 | 28,37 |
| 8 | 3216,3 | 78,0 | 2,16 | 34,27 |
| 9 | 3196,5 | 76,3 | 2,20 | 37,10 |
| 10 | 3229,4 | 78,0 | 2,17 | 31,05 |
| 11 | 3234,6 | 76,7 | 2,21 | 41,26 |
| 12 | 3293,5 | 77,2 | 2,24 | 36,55 |
| 13 | 3296,6 | 77,8 | 2,22 | 40,95 |
| 14 | 3309,0 | 77,1 | 2,25 | 46,06 |
| 15 | 3325,2 | 76,7 | 2,27 | 53,29 |
| 16 | 3345,5 | 76,4 | 2,30 | 49,99 |
| 17 | 3379,0 | 76,8 | 2,31 | 51,24 |
| 18 | 3430,2 | 78,2 | 2,30 | 54,94 |
| 19 | 3448,4 | 78,0 | 2,32 | 53,29 |
| 20 | 3449,7 | 78,0 | 2,32 | 50,46 |
| 21 | 3471,8 | 77,0 | 2,36 | 48,81 |
| 22 | 3478,2 | 78,7 | 2,32 | 54,15 |
| 23 | 3548,1 | 79,5 | 2,34 | 43,70 |
| 24 | 3604,8 | 80,4 | 2,35 | 51,95 |
| 25 | 3613,3 | 79,0 | 2,40 | 51,72 |

Área média PAV1-80 = 190,72 cm²

Tabela II.10 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1015,9 | 79,7 | 2,00 | 8,65 |
| 2 | 1020,7 | 80,0 | 2,01 | 8,49 |
| 3 | 1016,4 | 79,8 | 2,00 | 8,80 |
| 4 | 1016,6 | 80,1 | 2,00 | 8,72 |
| 5 | 1086,2 | 80,1 | 2,13 | 18,63 |
| 6 | 1088,4 | 80,0 | 2,14 | 19,88 |
| 7 | 1087,6 | 80,1 | 2,13 | 18,31 |
| 8 | 1087,0 | 79,8 | 2,14 | 19,41 |
| 9 | 1140,5 | 80,0 | 2,24 | 36,00 |
| 10 | 1145,6 | 80,3 | 2,24 | 34,58 |
| 11 | 1137,8 | 80,1 | 2,23 | 33,56 |
| 12 | 1139,9 | 80,2 | 2,23 | 33,72 |
| 13 | 1224,4 | 81,6 | 2,36 | 51,24 |
| 14 | 1224,7 | 81,6 | 2,36 | 51,72 |
| 15 | 1222,1 | 81,4 | 2,36 | 53,76 |
| 16 | 1227,6 | 81,7 | 2,36 | 51,64 |

Tabela II.11 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV2-80

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 3774,7 | 78,4 | 2,06 | 17,29 |
| 2 | 3824,5 | 78,9 | 2,07 | 15,72 |
| 3 | 3801,7 | 79,6 | 2,04 | 15,33 |
| 4 | 3833,7 | 79,3 | 2,07 | 19,96 |
| 5 | 3852,6 | 79,8 | 2,06 | 19,81 |
| 6 | 3883,1 | 79,8 | 2,08 | 16,74 |
| 7 | 3895,8 | 80,6 | 2,06 | 23,03 |
| 8 | 3946,0 | 79,6 | 2,12 | 19,33 |
| 9 | 3938,0 | 80,8 | 2,08 | 23,66 |
| 10 | 3936,7 | 80,3 | 2,09 | 21,06 |
| 11 | 3968,4 | 80,9 | 2,10 | 21,61 |
| 12 | 3975,9 | 79,1 | 2,15 | 33,56 |
| 13 | 4015,0 | 78,8 | 2,18 | 34,58 |
| 14 | 4043,8 | 78,9 | 2,19 | 34,42 |
| 15 | 4117,4 | 81,1 | 2,17 | 31,67 |
| 16 | 4081,1 | 81,6 | 2,14 | 28,37 |
| 17 | 4102,8 | 80,6 | 2,17 | 31,52 |
| 18 | 4134,1 | 81,1 | 2,18 | 36,39 |
| 19 | 4176,1 | 82,0 | 2,18 | 36,08 |
| 20 | 4162,3 | 79,7 | 2,23 | 41,73 |
| 21 | 4220,3 | 81,0 | 2,23 | 43,38 |
| 22 | 4250,2 | 81,0 | 2,24 | 43,38 |
| 23 | 4246,7 | 81,2 | 2,23 | 39,06 |
| 24 | 4355,9 | 81,4 | 2,28 | 44,56 |

Área média PAV2-80 = 234,22 cm²

Tabela II.12 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1134,8 | 80,4 | 2,22 | 37,25 |
| 2 | 1012,2 | 79,9 | 1,99 | 6,76 |
| 3 | 1179,6 | 81,1 | 2,29 | 47,79 |
| 4 | 1016,2 | 80,1 | 2,00 | 7,23 |
| 5 | 1069,4 | 80,2 | 2,10 | 15,88 |
| 6 | 1097,1 | 80,2 | 2,15 | 26,57 |
| 7 | 1136,5 | 80,4 | 2,22 | 35,45 |
| 8 | 1057,4 | 80,3 | 2,07 | 11,55 |
| 9 | 1179,4 | 81,6 | 2,27 | 45,35 |
| 10 | 1066,3 | 79,9 | 2,10 | 18,78 |
| 11 | 1098,6 | 80,4 | 2,15 | 23,66 |
| 12 | 1041,8 | 80,5 | 2,04 | 10,37 |

**ANEXO III – INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE CIMENTO NAS CORRELAÇÕES
OBTIDAS PARAS AS PCP DE 60 E 80 mm E OS CORPOS-DE-PROVA 9 X 8 cm**

Tabela III.1 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV2-60

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 2890,1 | 60,4 | 2,03 | 18,39 |
| 2 | 2954,7 | 59,7 | 2,10 | 29,08 |
| 3 | 2988,4 | 61,8 | 2,05 | 24,76 |
| 4 | 2997,1 | 59,6 | 2,13 | 34,19 |
| 5 | 2986,4 | 62,2 | 2,03 | 22,56 |
| 6 | 3001,1 | 60,1 | 2,11 | 32,22 |
| 7 | 3095,5 | 61,0 | 2,15 | 36,23 |
| 8 | 3065,6 | 60,2 | 2,16 | 39,77 |
| 9 | 3099,0 | 60,4 | 2,17 | 41,81 |
| 10 | 3215,2 | 62,9 | 2,16 | 39,06 |
| 11 | 3162,4 | 62,8 | 2,13 | 37,33 |
| 12 | 3229,8 | 62,5 | 2,19 | 47,94 |
| 13 | 3263,4 | 63,0 | 2,19 | 47,16 |
| 14 | 3246,3 | 61,0 | 2,25 | 53,92 |
| 15 | 3319,9 | 62,7 | 2,24 | 55,02 |
| 16 | 3355,7 | 61,8 | 2,30 | 61,62 |
| 17 | 3291,0 | 61,6 | 2,26 | 55,25 |
| 18 | 3395,1 | 62,7 | 2,29 | 59,50 |
| 19 | 3437,5 | 62,3 | 2,34 | 72,78 |
| 20 | 3481,2 | 61,5 | 2,40 | 65,23 |
| 21 | 3462,6 | 61,2 | 2,40 | 73,64 |
| 22 | 3460,7 | 62,9 | 2,33 | 62,17 |

Área média PAV2-60 = 236,19 cm²

Tabela III.2 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1178,5 | 80,1 | 2,31 | 59,65 |
| 2 | 1097,2 | 80,3 | 2,15 | 33,17 |
| 3 | 1096,6 | 79,9 | 2,16 | 34,97 |
| 4 | 1017,3 | 79,6 | 2,01 | 9,20 |
| 5 | 1012,6 | 79,9 | 1,99 | 11,71 |
| 6 | 1222,1 | 81,1 | 2,37 | 64,37 |
| 7 | 1222,1 | 80,8 | 2,38 | 65,86 |
| 8 | 1136,1 | 80,4 | 2,22 | 42,21 |
| 9 | 1177,8 | 80,2 | 2,31 | 53,05 |
| 10 | 1066,1 | 80,2 | 2,09 | 24,29 |
| 11 | 1137,2 | 80,2 | 2,23 | 45,59 |
| 12 | 1065,9 | 80,1 | 2,09 | 22,24 |
| 13 | 1045,4 | 79,7 | 2,06 | 18,16 |
| 14 | 1036,7 | 79,4 | 2,05 | 12,65 |

Tabela III.3 – Resultados obtidos para as PCP do tipo PAV2-80

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 3884,7 | 78,9 | 2,07 | 15,40 |
| 2 | 3825,3 | 78,1 | 2,06 | 13,28 |
| 3 | 3939,6 | 80,2 | 2,07 | 17,76 |
| 4 | 3946,8 | 79,4 | 2,09 | 17,45 |
| 5 | 3926,4 | 80,7 | 2,05 | 15,64 |
| 6 | 4007,4 | 79,5 | 2,12 | 28,45 |
| 7 | 4052,1 | 79,9 | 2,13 | 27,98 |
| 8 | 4086,7 | 80,3 | 2,14 | 27,51 |
| 9 | 4216,1 | 81,3 | 2,18 | 32,70 |
| 10 | 4222,4 | 82,0 | 2,17 | 26,64 |
| 11 | 4251,7 | 82,4 | 2,17 | 31,20 |
| 12 | 4243,8 | 81,4 | 2,19 | 34,27 |
| 13 | 4226,1 | 80,5 | 2,21 | 38,98 |
| 14 | 4297,6 | 81,1 | 2,23 | 43,23 |
| 15 | 4338,6 | 81,0 | 2,25 | 42,83 |
| 16 | 4340,6 | 81,6 | 2,24 | 48,41 |
| 17 | 4375,6 | 82,4 | 2,23 | 42,05 |
| 18 | 4438,5 | 82,5 | 2,26 | 46,06 |
| 19 | 4417,2 | 83,0 | 2,24 | 46,29 |
| 20 | 4520,4 | 83,5 | 2,28 | 49,28 |
| 21 | 4511,9 | 83,2 | 2,28 | 62,80 |
| 22 | 4507,5 | 82,5 | 2,30 | 52,97 |
| 23 | 4561,4 | 82,9 | 2,32 | 51,40 |

Área média PAV2-80 = 237,81 cm²

Tabela III.4 – Resultados obtidos para cps 9 x 8 cm

| n | Peso saturado (g) | Altura (mm) | d_{saturado} (kg/dm ³) | Resistência (MPa) |
|----|-------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 1020,4 | 80,0 | 2,00 | 9,20 |
| 2 | 1119,9 | 80,0 | 2,20 | 28,84 |
| 3 | 1153,4 | 80,4 | 2,26 | 41,42 |
| 4 | 1186,4 | 80,4 | 2,32 | 56,82 |
| 5 | 1051,8 | 80,1 | 2,07 | 13,60 |
| 6 | 1227,8 | 81,4 | 2,37 | 67,28 |
| 7 | 1089,5 | 80,0 | 2,14 | 19,73 |
| 8 | 1190,7 | 80,8 | 2,32 | 51,24 |
| 9 | 1054,8 | 80,0 | 2,07 | 12,34 |
| 10 | 1020,1 | 79,9 | 2,01 | 8,96 |
| 11 | 1148,7 | 80,2 | 2,25 | 41,26 |
| 12 | 1080,4 | 80,0 | 2,12 | 20,43 |
| 13 | 1228,8 | 81,4 | 2,37 | 66,96 |

ANEXO IV – RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO PARA OS TRAÇOS 2 E 3

Tabela IV.1 – Resultados obtidos de energia para compactação e resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 2

| a/c | n° | n° de golpes ¹ | | Energia média (J) | Resistência à compressão (MPa) | |
|------|----|---------------------------|-------|----------------------|--------------------------------|--------------|
| | | individual | média | | individual | Média / sd |
| 0,40 | 1 | 22 | 22,5 | 450 | 41,81 | 39,93 / 1,48 |
| | 2 | 24 | | | 38,90 | |
| | 3 | 24 | | | 39,06 | |
| | 4 | 20 | | | 38,04 | |
| | 5 | 22 | | | 40,56 | |
| | 6 | 23 | | | 41,18 | |
| 0,43 | 1 | 16 | 17,0 | 340 | 44,33 | 41,88 / 1,32 |
| | 2 | 16 | | | 42,21 | |
| | 3 | 18 | | | 40,79 | |
| | 4 | 18 | | | 41,42 | |
| | 5 | 18 | | | 41,73 | |
| | 6 | 16 | | | 40,79 | |
| 0,46 | 1 | 14 | 14,8 | 297 | - | 44,36 / 0,90 |
| | 2 | 15 | | | 44,88 | |
| | 3 | 15 | | | 45,27 | |
| | 4 | 15 | | | 44,41 | |
| | 5 | 15 | | | 42,91 | |
| | 6 | 15 | | | 44,33 | |
| 0,50 | 1 | 10 | 10,3 | 207 | 44,56 | 45,17 / 1,00 |
| | 2 | 10 | | | 44,88 | |
| | 3 | 10 | | | 44,64 | |
| | 4 | 11 | | | 46,76 | |
| | 5 | 10 | | | 46,00 | |
| | 6 | 11 | | | 44,17 | |
| 0,53 | 1 | 10 | 9,7 | 193 | - | 43,51 / 1,12 |
| | 2 | 9 | | | 44,48 | |
| | 3 | 9 | | | 44,56 | |
| | 4 | 10 | | | 41,81 | |
| | 5 | 10 | | | 43,23 | |
| | 6 | 10 | | | 43,46 | |

Tabela IV.2 – Resultados obtidos de energia para compactação e resistência à compressão dos corpos-de-prova 9 x 8 cm – Traço 3

| a/c | n° | n° de golpes ¹ | | Energia média (J) | Resistência à compressão (MPa) | |
|------|----|---------------------------|-------|-------------------|--------------------------------|--------------|
| | | individual | média | | individual | Média / sd |
| 0,40 | 1 | 27 | 28,0 | 560 | 40,32 | 38,17 / 3,10 |
| | 2 | 25 | | | 37,25 | |
| | 3 | 30 | | | 37,65 | |
| | 4 | 30 | | | 37,10 | |
| | 5 | 27 | | | 38,51 | |
| | 6 | 29 | | | 38,20 | |
| 0,43 | 1 | 21 | 20,3 | 407 | 42,36 | 41,39 / 4,24 |
| | 2 | 19 | | | 39,22 | |
| | 3 | 23 | | | 43,86 | |
| | 4 | 20 | | | 39,77 | |
| | 5 | 19 | | | 40,87 | |
| | 6 | 20 | | | 42,28 | |
| 0,46 | 1 | 14 | 15,2 | 303 | 43,38 | 43,78 / 1,22 |
| | 2 | 15 | | | 42,83 | |
| | 3 | 16 | | | 42,91 | |
| | 4 | 16 | | | 44,72 | |
| | 5 | 15 | | | 42,99 | |
| | 6 | 15 | | | 45,82 | |
| 0,50 | 1 | 12 | 12,2 | 243 | 43,31 | 43,88 / 2,80 |
| | 2 | 12 | | | 44,25 | |
| | 3 | 13 | | | 43,86 | |
| | 4 | 12 | | | 43,35 | |
| | 5 | 12 | | | 43,70 | |
| | 6 | 12 | | | 44,56 | |
| 0,53 | 1 | 12 | 11,2 | 223 | 42,76 | 42,76 / 0,28 |
| | 2 | 11 | | | 42,52 | |
| | 3 | 11 | | | 42,83 | |
| | 4 | 11 | | | 42,91 | |
| | 5 | 11 | | | 42,63 | |
| | 6 | 11 | | | 43,15 | |

ANEXOS – PROCEDIMENTOS

**ANEXO A – DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL PARA A
MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA 9 X 8 cm PARA UMA DADA % DE
VOLUME DE VAZIOS**

Analisando-se um determinado volume de concreto “V” verifica-se que parte desse volume é constituído por material sólido (cimento e agregados) e a outra parte por vazios de ar e água existentes dentro do concreto.

Sabendo-se que:

$$\%V_{sol} = \frac{V_{sol}}{V_{concreto}} \times 100 \quad (A1)$$

No caso dos corpos-de-prova 9 x 8 cm:

$$\%V_{sol} = \frac{V_{sol}}{V_{cp}} \times 100 \quad (A2)$$

Onde:

$\%V_{sol}$ = % de volume de material sólido da mistura;

V_{sol} = volume de material sólido referente ao cimento e agregados – não se leva em consideração a água;

$V_{concreto}$ = volume de concreto;

V_{cp} = volume do corpo-de-prova cilíndrico 9 x 8 cm.

Como as massas específicas seca real e teórica de uma mistura podem ser definida com sendo:

$$d_{real-seca} = \frac{m}{V_{concreto}} = \frac{m}{V_{cp}} \quad (A3)$$

$$d_{teórica-seca} = \frac{m}{V_{sol}} \quad (A4)$$

Onde:

$d_{real-seca}$ = relação entre a massa seca de concreto, ou seja, a massa de cimento e agregados e o volume do concreto, que neste caso é igual ao volume do corpo-de-prova de 9 x 8 cm;

$d_{teórica-seca}$ = relação entre a massa seca de concreto e o volume de sólidos.

Substituindo-se as expressões (A3) e (A4) na expressão (A2):

$$\%V_{sol} = \frac{\frac{m}{d_{teórica-seca}}}{\frac{m}{d_{real-seca}}} \times 100 = \frac{d_{real-seca}}{d_{teórica-seca}} \times 100 \quad (A5)$$

Isolando-se o $d_{real-seca}$ da expressão (5):

$$d_{real-seca} = \frac{d_{teórica-seca} \times \%V_{sol}}{100} \quad (A6)$$

A massa específica teórica seca nada mais é do que a soma das relações entre a massa e a massa específica dos materiais sólidos que constituem o concreto. Com isso a massa específica teórica seca ($d_{teórica-seca}$) pode ser expressa como sendo:

$$d_{teórica-seca} = \frac{m_c}{d_c} + \frac{m_{p1}}{d_{p1}} + \dots + \frac{m_{pn}}{d_{pn}} + \frac{m_{a1}}{d_{a1}} + \dots + \frac{m_{an}}{d_{an}} \quad (A7)$$

Onde:

m_c = quantidade de cimento, em kg, empregada no concreto

m_{p1} = quantidade de agregado graúdo “1”, em kg, empregada no concreto

m_{pn} = quantidade de agregado graúdo “n”, em kg, empregada no concreto

m_{a1} = quantidade de agregado miúdo “1”, em kg, empregada no concreto

m_{an} = quantidade de agregado miúdo “n”, em kg, empregada no concreto

d_c = massa específica do cimento (kg/dm^3)

d_{p1} = massa específica do agregado graúdo “1” (kg/dm^3)

d_{pn} = massa específica do agregado graúdo “n” (kg/dm^3)

d_{a1} = massa específica do agregado miúdo “1” (kg/dm^3)

d_{an} = massa específica do agregado miúdo “n” (kg/dm^3)

Reescrevendo a expressão (A7) em função do traço “m”:

$$d_{teórica-seca} = \frac{1 + m}{\frac{1}{d_c} + \frac{m}{100} \times \left(\frac{\%_{p1}}{d_{p1}} + \dots + \frac{\%_{pn}}{d_{pn}} + \frac{\%_{a1}}{d_{a1}} + \dots + \frac{\%_{an}}{d_{an}} \right)} \quad (A8)$$

Onde:

m = quantidade de agregado total pela quantidade de cimento

$\%_{p1}$ = quantidade de agregado graúdo “1” pela quantidade total de agregado

$\%_{pn}$ = quantidade de agregado graúdo “n” pela quantidade total de agregado

$\%_{a1}$ = quantidade de agregado miúdo “1” pela quantidade total de agregado

$\%_{an}$ = quantidade de agregado miúdo “n” pela quantidade total de agregado

Substituindo-se (8) em (6):

$$d_{real-seca} = \frac{(1 + m)}{\left[\frac{1}{d_c} + \frac{m}{100} \times \left(\frac{\%_{p1}}{d_{p1}} + \dots + \frac{\%_{pn}}{d_{pn}} + \frac{\%_{a1}}{d_{a1}} + \dots + \frac{\%_{an}}{d_{an}} \right) \right]} \times \frac{\%V_{sol}}{100} \quad (A9)$$

Transformando-se a massa específica real seca em úmida:

$$d_{real-úmida} = d_{real-seca} \times \left(1 + \frac{h}{100} \right) \quad (A10)$$

Onde:

$d_{\text{real-umida}}$ = massa específica real úmida

h = umidade percentual do concreto

Substituindo-se (9) em (10):

$$d_{\text{real-umida}} = \frac{(1+m)}{\left[\frac{1}{d_c} + \frac{m}{100} \times \left(\frac{\%_{p1}}{d_{p1}} + \dots + \frac{\%_{pn}}{d_{pn}} + \frac{\%_{a1}}{d_{a1}} + \dots + \frac{\%_{an}}{d_{an}} \right) \right]} \times \frac{\%V_{\text{sol}}}{100} \times \left(1 + \frac{h}{100} \right) \quad (\text{A11})$$

Para determinar a quantidade de material necessária para a moldagem de um corpos-de-prova cilíndrico de 9 x 8 cm, basta multiplicar o volume de corpo-de-prova pela massa específica real úmida da mistura, dada pela expressão (A11). Com isso tem-se:

$$m_{\text{moldagem-cp}} = d_{\text{real-umida}} \times \text{volume cp (9 x 8 cm)} \quad (\text{A12})$$

Como o volume do cp (9 x 8 cm) é de 0,5089 litros

$$m_{\text{moldagem-cp}} = 0,5089 \times \frac{(1+m)}{\left[\frac{1}{d_c} + \frac{m}{100} \times \left(\frac{\%_{p1}}{d_{p1}} + \dots + \frac{\%_{pn}}{d_{pn}} + \frac{\%_{a1}}{d_{a1}} + \dots + \frac{\%_{an}}{d_{an}} \right) \right]} \times \frac{\%V_{\text{sol}}}{100} \times \left(1 + \frac{h}{100} \right) \quad (\text{A13})$$

Através dessa expressão encontra-se a massa necessária para a moldagem de um corpos-de-prova cilíndrico (9 x 8 cm), para uma dada % de volume de sólidos e, em função dos parâmetros da mistura descritos anteriormente.

ANEXO B – PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE FORMA DOS AGREGADOS COM BASE NA AFNOR XP P18-540 (1997)

1 – Objetivo

Determinar o coeficiente de forma dos agregados, baseado nas prescrições da AFNOR XP P18-540 (1997).

2 – Equipamentos

- 1 balança com precisão mínima de 0,001g;
- 1 picnômetro de 50 ml;
- 1 *scanner* com capacidade de resolução de até 1000 dpi;
- placas de vidro de 100 x 100 x 2 mm (comprimento x largura x espessura);
- 1 jogo de peneiras para ensaio de peneiramento de agregados, de acordo com a NBR 7211 (1983);
- 1 escala métrica com precisão de milímetros.

3 – Seqüência de ensaio

3.1 – Peneirar o agregado seguindo as recomendações da NBR 7217 (1992), para a separação das frações e determinação das respectivas porcentagens retidas. Cada fração corresponde aos agregados retidos em uma determinada peneira.

3.2 – Determinar a massa específica de cada fração ($d_{\text{fração}}$) empregando-se o processo do picnômetro. Recomenda-se que o valor da massa específica de cada fração seja proveniente da média de três determinações. (obs: para a determinação da massa específica deve-se empregar uma balança com precisão mínima de 0,001 g).

3.3 – Pesar um certo número de grãos de cada fração sobre uma placa de vidro, anotando-se a massa ($m_{\text{fração}}$), para a posterior aquisição de imagem através de *scanner*. Esse número de grãos a ser pesado é função do tamanho dos mesmos, ficando como sugestão os valores indicados na Tabela B1.

Tabela B1 – Número de grãos de grãos para cada fração

| Fração retida na peneira (mm) | Número de grãos |
|-------------------------------|-----------------|
| 6,3 | $\geq 100^i$ |
| 4,8 | $\geq 100^i$ |
| 2,4 | 150 |
| 1,2 | 200 |
| 0,6 | 250 |
| 0,3 | 500 |
| 0,15 | 1000 |

ⁱ Estudos estatísticos feitos com diversos agregados, levando-se em consideração a massa e o comprimento dos grãos por fração, mostraram que o tamanho de uma amostra representativa seria 88 grãos, estimando-se um erro relativo de 5,0 %. Por isso, o número de grãos mínimo sugerido na Tabela B1 é igual a 100.

Os números de grãos apresentados na Tabela B1 são propostos para agregados com massas específicas variando entre 2,60 e 2,70 kg/dm³. Caso os agregados a serem avaliados apresentem massas específicas mais altas, como no caso dos agregados basálticos, esses números sugeridos na Tabela B1 podem ser reduzidos. Entretanto, no caso de avaliação de agregados leves, os referidos números devem ser aumentados, principalmente, para os grãos retidos nas peneiras 0,3 e 0,15 mm, a fim de não se perder precisão na hora da determinação da massa dos grãos sobre o vidro “*m_{fração}*”.

3.4 – Proceder a aquisição das imagens dos grãos dispostos sobre as placas de vidro, empregando-se *scanners* que possuam uma capacidade de resolução de até 1000 dpi. Sugere-se que para a aquisição das imagens sejam utilizadas as resoluções apresentadas na Tabela B2 em função do tamanho dos grãos.

Tabela B2 – Resolução para aquisição das imagens em função do tamanho dos grãos

| Fração retida na peneira (mm) | Resolução (dpi) |
|-------------------------------|-----------------|
| 6,3 | 300 |
| 4,8 | 300 |
| 2,4 | 400 |
| 1,2 | 400 |
| 0,6 | 600 |
| 0,3 | 1000 |
| 0,15 | 1000 |

Cabe ressaltar que no momento da aquisição da imagem dos grãos através do *scnner*, deve-se inserir uma escala métrica, com precisão de milímetros (Figura B1), para posterior calibração da imagem.

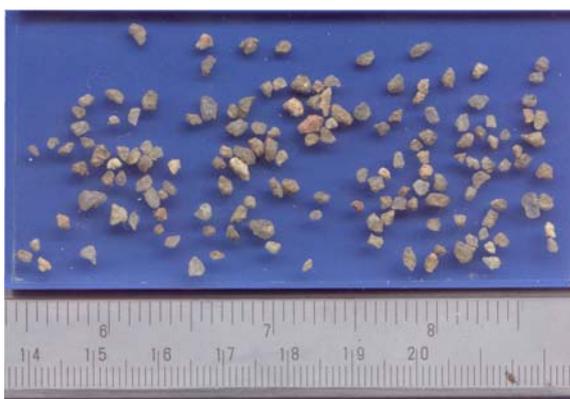


Figura B1 – Detalhe de uma imagem com a escala métrica

Nessa etapa de aquisição das imagens, recomenda-se utilizar um fundo de cor azul, para evitar que as sombras dos grãos atrapalhem no momento da tomada dos comprimentos dos mesmos.

3.5 – Carregar as imagens digitalizadas dentro do programa de tratamento de imagensⁱⁱ, procedendo-se a contagem de todos os grãos, para a determinação do número real de grãos colocados sobre a placa de vidro (n).

3.6 – Proceder a calibração da imagem, com o auxílio da escala métrica com precisão de milímetro. A maioria dos programas de tratamento de imagens possui um comando de calibração, onde é possível o ajuste automático quando se dispõe uma dimensão conhecida. Normalmente determina-se a distância entre dois pontos, distância essa conhecida, indicando-se, posteriormente, o valor real dessa distância.

3.7 – Determinar a maior dimensão (L) de pelo menos 100 grãos, dentre os colocados sobre a placa de vidro. Como o grão irá se apoiar sobre a placa na sua maior dimensão, ao determina-la, estará sendo determinado o comprimento do referido grão. Normalmente, os programas de tratamento de imagem possuem um banco de armazenamento, onde ficam registrados temporariamente as medidas dos comprimentos dos grãos, podendo-se exportar esses dados em forma de arquivos *.txt*, para posterior análise com o auxílio de planilhas eletrônicas como o *Excel*.

3.8 – Calcular o coeficiente de forma de cada fração com base na definição da AFNOR XP P18-540 (1997):

$$cf = \frac{V}{\pi \times d^3 / 6} \quad (\text{B1})$$

Onde: V = volume de um grão;
d = diâmetro da esfera que circunscreve o grão.

Este coeficiente representa a razão entre o volume de um grão e o da esfera que o circunscreve.

Tomando-se a definição da AFNOR XP P18-540 (1997) como base, tem-se que o coeficiente de forma de cada fração pode ser determinado como sendo:

$$cf_{\text{fração}} = \frac{m_{\text{fração}} \times n^{\circ} \text{ grãos medidos}}{n \times d_{\text{fração}} / \Sigma \pi \times L^3 / 6} \quad (\text{B2})$$

Onde: $m_{\text{fração}}$ = massa de todos os grãos colocados sobre a placa de vidro (item 3.3);
n = número real de grãos colocados sobre a placa de vidro (item 3.5);
 $d_{\text{fração}}$ = massa específica da fração analisada;
 n° grãos medidos = número de grãos que foram medidos com o auxílio do programa de tratamento de imagens (item 3.7). Vale ressaltar que esse número deve ser ≥ 100 ;
L = comprimentos dos grãos, determinados com o auxílio do programa de tratamento de imagens (item 3.7).

3.9 – O coeficiente de forma do agregado é definido como sendo:

ⁱⁱ Recomenda-se o emprego do programa UTHSCSA-Image Tool, distribuído gratuitamente pela University of Texas Health Science Center at San Antonio.

$$cf_{\text{agregados}} = \frac{cf_{\#4,8} \times \%ret_{\#4,8} + cf_{\#2,4} \times \%ret_{\#2,4} + cf_{\#1,2} \times \%ret_{\#1,2} + cf_{\#0,6} \times \%ret_{\#0,6} + cf_{\#0,3} \times \%ret_{\#0,3} + cf_{\#0,15} \times \%ret_{\#0,15}}{100} \quad (B3)$$

Onde: $cf_{\#4,8}$ = coeficiente de forma da fração retida na peneira 4,8 mm;
 $\%ret_{\#4,8}$ = porcentagem retida na peneira 4,8 mm;
 $cf_{\#2,4}$ = coeficiente de forma da fração retida na peneira 2,4 mm;
 $\%ret_{\#2,4}$ = porcentagem retida na peneira 2,4 mm;
 $cf_{\#1,2}$ = coeficiente de forma da fração retida na peneira 1,2 mm;
 $\%ret_{\#1,2}$ = porcentagem retida na peneira 1,2 mm;
 $cf_{\#0,6}$ = coeficiente de forma da fração retida na peneira 0,6 mm;
 $\%ret_{\#0,6}$ = porcentagem retida na peneira 0,6 mm;
 $cf_{\#0,3}$ = coeficiente de forma da fração retida na peneira 0,3 mm;
 $\%ret_{\#0,3}$ = porcentagem retida na peneira 0,3 mm;
 $cf_{\#0,15}$ = coeficiente de forma da fração retida na peneira 0,15 mm;
 $\%ret_{\#0,15}$ = porcentagem retida na peneira 0,15 mm.

OBS: A quantidade de material passante na peneira 0,15 mm é desconsiderada na determinação do coeficiente de forma dos agregados.

Como exemplo ilustrativo, nas Tabelas B3 e B4 são apresentados, respectivamente, os coeficientes de forma para cada fração e o coeficiente de forma final dos agregados empregados no presente trabalho.

Tabela B3 – Coeficiente de forma por fração dos agregados empregados no presente trabalho

| # (mm) | Coeficiente de forma | | | | | |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| | Areia natural 1 (AN1) | Areia natural 2 (AN2) | Areia natural 3 (AN3) | Areia artificial (AA) | Brita "0" (B0) | Material ¼" (A¼") |
| 9,5 | - | - | - | - | 0,190 | - |
| 6,3 | - | - | - | - | 0,193 | - |
| 4,8 | 0,328 | - | - | - | 0,150 | 0,162 |
| 2,4 | 0,356 | - | 0,280 | 0,138 | 0,155 | 0,125 |
| 1,2 | 0,228 | - | 0,252 | 0,133 | - | - |
| 0,6 | 0,233 | - | 0,221 | 0,134 | - | - |
| 0,3 | 0,192 | 0,241 | 0,184 | 0,148 | - | - |
| 0,15 | 0,192 | 0,228 | 0,155 | 0,123 | - | - |

Tabela B4 – Coeficiente de forma dos agregados empregados no presente trabalho

| # (mm) | Areia natural 1 (AN1) | | Areia natural 2 (AN2) | | Areia natural 3 (AN3) | | Areia artificial (AA) | | Brita "0" (B0) | | Material ¼" (A¼") | |
|--------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | CF _{fração} | % _{retida} | CF _{fração} | % _{retida} | CF _{fração} | % _{retida} |
| 9,5 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | 0,190 | 2 | - | 0 |
| 6,3 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | 0,193 | 35 | - | 0 |
| 4,8 | 0,328 | 1 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | 0,150 | 40 | 0,162 | 39 |
| 2,4 | 0,356 | 12 | - | 0 | 0,280 | 4 | 0,138 | 5 | 0,155 | 21 | 0,125 | 60 |
| 1,2 | 0,228 | 25 | - | 0 | 0,252 | 15 | 0,133 | 29 | - | 0 | - | 0 |
| 0,6 | 0,233 | 27 | - | 0 | 0,221 | 28 | 0,134 | 25 | - | 0 | - | 0 |
| 0,3 | 0,192 | 21 | 0,241 | 4 | 0,184 | 26 | 0,148 | 17 | - | 0 | - | 0 |
| 0,15 | 0,192 | 10 | 0,228 | 85 | 0,155 | 17 | 0,123 | 10 | - | 0 | - | 0 |
| CF | 0,225 | | 0,203 | | 0,185 | | 0,116 | | 0,164 | | 0,138 | |