

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

MÁRIO ARLINDO PAZ IRRIGARAY

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO À
COMPRESSÃO POR MEIO DA VELOCIDADE DE PULSOS
ULTRASSÔNICOS NA PASTA DO CONCRETO**

Florianópolis
2012

Mário Arlindo Paz Irrigaray

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO À
COMPRESSÃO POR MEIO DA VELOCIDADE DE
PROPAGAÇÃO DOS PULSOS ULTRASSÔNICOS NA PASTA
DO CONCRETO.**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ph.D. Roberto Caldas de Andrade Pinto.

Co-orientador: Prof. Ph.D. Ivo José Padaratz.

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Irrigaray, Mário Arlindo Paz

Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos na pasta do concreto (tese) / Mário Arlindo Paz Irrigaray; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto; co-orientador, Ivo José Padaratz. – Florianópolis, SC, 2012.

205 p. ; 21cm

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1 Engenharia Civil. 2. Estimativa da resistência do concreto. 3. Velocidade de pulsos ultrassônicos. 4. Correlações entre vel na pasta e fc. I. Pinto, Roberto Caldas Andrade. II Padaratz, Ivo José. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV Título.

Mário Arlindo Paz Irrigaray

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO À
COMPRESSÃO POR MEIO DA VELOCIDADE DE
PROPAGAÇÃO DOS PULSOS ULTRASSÔNICOS NA PASTA
DO CONCRETO.**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Civil”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 11 de Junho de 2012.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto Ph.D.
Orientador

Prof. Ph.D, Ivo José Padaratz, Ph.D.
Co-orientador

Prof^a. Lidia da Conceição Domingues Shehata, Ph. D

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho Prof., Ph. D

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Junior, Dr.

Prof^a. Janaíde Cavalcante Rocha, Dra.

AGRADECIMENTOS

Ao elencar as pessoas, instituições e empresas, tratarei de estabelecer ordem hierárquica. Espero poder ser inspirado por aquele que vem em primeiro lugar, Deus. Agradeço aos meus pais, pela vida, amor, simplicidade e exemplos de trabalho e dedicação. Agradeço especialmente a minha irmã, que ao assumir a responsabilidade de cuidar de minha mãe, hoje com 89 anos, viabilizou a realização do doutoramento.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco (UTFPR-Pato Branco), pela confiança ao autorizar meu afastamento para o doutoramento e aos colegas que de certa forma ficaram sobrecarregados com minha ausência.

Agradeço ao Professor Roberto Caldas de Andrade Pinto por confiar em minha capacidade, mesmo nos momentos em que eu não mais confiava, por ter sido prestativo e disponível, por saber restringir minhas “viagens”, por ter conciliado indulgência e autoridade e, ainda, por ter me orientado exemplarmente.

Agradeço ao Professor Ivo José Padaratz pela co-orientação, amizade e exemplo.

Agradeço as sugestões rápidas e precisas dos Professores Luiz Roberto Prudêncio Junior e Wellington Longuini Repette.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, ao Laboratório de Experimentação em Estruturas, ao Laboratório de Materiais de Construção e aos técnicos de laboratório Luis e Renato.

Agradeço aos colegas e amigos do GPEND, do GTEC, e ao carinho recebido dos colegas e amigos do GIEN, Prof. Szücs, Prof^a Poliana, Prof^a Angela e, ao doutorando Manuel. Agradeço especialmente a Thaini de Almeida, bolsista de iniciação científica, pelo total comprometimento em minha pesquisa. Sou também muito grato pela ajuda que recebi durante todas as concretagens dos alunos de iniciação científica, Alcides Emanuelli, Bruno de Oliveira Ventura, Nilton Dimas e Thuylon Gonçalves. Agradeço o carinho, amizade e ajuda recebida do Sr. Roque.

Agradeço também, a amiga e colega Elizângela Siliprandi por sua ajuda espontânea na correção.

Assim como na massa do concreto os agregados são unidos pela pasta, também no sutil existe “algo” que une o que é aparentemente separado, este algo foi, é, e sempre será o amor.

RESUMO

Esse trabalho propõe um procedimento alternativo para a estimativa da resistência à compressão do concreto através do método da velocidade de pulsos ultrassônicos (VPU). Este procedimento considera que a velocidade do concreto é dependente da proporção volumétrica e da VPU nos seus constituintes. Considera também, que a VPU nos agregados permanece inalterada durante o processo de hidratação e, em decorrência disso, entende que o único constituinte a sofrer alteração nas propriedades elásticas e, conseqüentemente, na velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos é a pasta de cimento. Portanto, propõe uma relação baseada na correlação entre a VPU através da pasta do concreto e a resistência à compressão do concreto, tendo como pré-requisito básico o conhecimento prévio da proporção volumétrica dos constituintes e a VPU através dos agregados miúdos e graúdos.

Para analisar o procedimento proposto foram produzidas misturas de concreto com três relações água/cimento, 0,48, 0,55 e 0,65, e com três teores de pasta, 28%, 32% e 36%. Empregaram-se cimento CP V-ARIRS, agregados graúdos granitos e diabásicos, agregados miúdos de britagem, e aditivo polifuncional. Além disso, foram produzidas misturas com cimento CP IV-32, utilizando agregado granítico. Tanto a VPU quanto a resistência à compressão foram determinadas em diversas idades, empregando-se corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm.

Empregando-se o procedimento proposto foi possível obter coeficientes de determinação (r^2) elevados entre a VPU na pasta e a resistência à compressão do concreto, independente do tipo de agregado, tipo de cimento, teor de pasta e dimensão máxima característica.

Este procedimento revela-se apropriado para aplicação em indústrias de pré-moldados, pré-fabricados e em concreteiras.

Palavras-chave: Ultrassom, Estimativa, resistência à compressão, Concreto

ABSTRACT

This work presents an alternative procedure to estimate concrete compressive strength based on the ultrasonic pulse velocity method (UPV). The proposed procedure considers that UPV in concrete depends on the volumetric proportions and the individual UPV of its constituents. It also considers that UPV in aggregates remains constant during the hydration process. Thus, cement paste is the only concrete constituent that undergoes changes in its elastic properties, including its UPV. This procedure proposes a relationship based on the dependence of UPV in cement paste and concrete compressive strength. The volumetric proportions of the concrete constituents and the UPV in the aggregates are therefore necessary to have been previously established.

In order to verify the proposed procedure, concrete mixtures with water to cement ratios of 0.48, 0.55 and 0.65 were produced. Three paste contents were used within each w/c mixture (28%, 32% and 36%). Brazilian cement type CP V-ARI-RS, granitic and basaltic coarse aggregates, crushed fine aggregates and chemical admixtures were also used in the concrete mixtures. Moreover, some concrete mixtures with Brazilian cement type CP IV-32 were also produced. Both UPV and compressive strength of all concrete mixtures were determined at several ages using 10 x 20 cm cylindrical specimens.

The proposed procedure was able to yield high coefficients of determination for the relationship between UPV in cement paste and concrete compressive strength regardless the type of aggregate, the type of cement, the paste content of the concrete mixtures.

This procedure may be useful to be applied in precast plants and concrete plants.

Keywords: Ultrasound, Estimation, Strength compressive, concrete.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Originalidade	5
1.2. Justificativa	6
1.3. Objetivo Geral	7
1.4. Objetivos Específicos	7
1.5. Estrutura da tese.....	8
2. MÉTODO DA VELOCIDADE DE PULSOS ULTRASSÔNICOS.....	11
2.1. Introdução	11
2.2. Princípio de funcionamento	11
2.3. Tipos de ondas de tensão.....	13
2.4. Tipos de transdutores.....	17
2.5. Formas de leitura.....	18
2.6. Dimensões do elemento a ser ensaiado.....	20
2.7. Acurácia e repetitividade	21
2.8. Vantagens da utilização do ultrassom.....	22
2.9. Desvantagens da utilização do ultrassom	23
2.10. Aplicações do método da velocidade de pulsos ultrassônicos	24
2.10.1. Estabelecimento da homogeneidade do concreto.....	24
2.10.2. Estudo sobre a hidratação do cimento	26
2.10.3. Estimativa da resistência do concreto	32

2.11.	Fatores que afetam a velocidade de pulsos ultrassônicos	35
2.11.1.	Fatores dependentes das propriedades do concreto	35
2.12.	Modelos para a estimativa da velocidade dos pulsos ultrassônicos.....	51
2.12.1.	Modelo de três fases	53
2.12.2.	Modelo de duas fases.	55
2.12.3.	Considerações sobre o Modelo de Lin et al.....	55
2.12.4.	Modelo Proposto para Estimativa da Resistência à Compressão a partir da Velocidade de Pulsos Ultrassônicos na Pasta	56
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	61
3.1.	Introdução	61
3.2.	Materiais empregados	66
3.2.1.	Agregados graúdos	66
3.2.2.	Agregados miúdos.....	67
3.2.3.	Cimentos.....	68
3.2.4.	Aditivo.....	69
3.3.	Procedimentos adotados no estudo.....	69
3.3.1.	Determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas-mãe	69
3.3.2.	Misturas estudadas	73
3.3.3.	Determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos	81
3.3.4.	Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado miúdo	84
3.3.5.	Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado graúdo.....	85
4.	APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	87
4.1.	Materiais empregados	87
4.1.1.	Agregados.....	87
4.1.2.	Cimentos.....	87
4.2.	Rochas-mãe	88
4.2.1.	Localização, vista aérea, bancadas e amostras obtidas nas Mineradoras	88
4.2.2.	Determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos em prisma de rochas	88
4.2.3.	Determinação da massa específica e absorção	89

4.2.4.	Resistência à compressão nas rochas- mães	89
4.3.	Misturas.....	90
4.3.1.	Pastas.....	90
4.3.2.	Argamassas	90
4.3.3.	Concreto	91
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	111
5.1.	Análise da velocidade dos pulsos ultrassônicos nas rochas.	111
5.2.	Velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados miúdos	112
5.3.	Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado graúdo.....	114
5.4.	Análise do comportamento da resistência à compressão das misturas de concreto	115
5.4.1.	Misturas de concreto com relação $a/c=0,48$	115
5.4.2.	Misturas de concreto com relação $a/c=0,55$	117
5.4.3.	Misturas de concreto com relação $a/c=0,65$	120
5.5.	Análise da velocidade de pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto.....	121
5.5.1.	Misturas de concreto com $a/c=0,48$	121
5.5.2.	Misturas de concreto com relação $a/c=0,55$	123
5.5.3.	Misturas de concretos com $a/c=0,65$	125
5.6.	Análise das correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos do concreto e resistência à compressão.	126
5.6.1.	Correlações com concretos $a/c=0,48$	126
5.6.2.	Correlações com concretos com $a/c=0,55$	130
5.6.3.	Correlações com concretos com $a/c=0,65$	134
5.6.4.	Correlações em função da relação água/cimento	135
5.7.	Velocidades dos pulsos ultrassônicos nas pastas de concretos obtidas pelo modelo de três fases	140
5.8.	Correlações entre velocidade na pasta do concreto e a resistência à compressão.....	142
5.8.1.	Correlações obtidas a partir da velocidade nas pastas dos concretos com $a/c=0,48$	142

5.8.2.	Correlações obtidas a partir das velocidades nas pastas de concretos com $a/c=0,55$	144
5.8.3.	Correlações obtidas a partir da velocidade nas pastas de concreto com relação $a/c=0,65$	147
5.8.4.	Correlações utilizando-se todas as misturas	148
5.8.5.	Comparação mantendo-se o teor de pasta constante e trabalhando-se com as demais variáveis.	150
5.8.6.	Considerações Finais sobre o Modelo Proposto	152
6.	CONCLUSÕES	155
6.1.	Velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas	155
6.2.	Velocidade nos agregados miúdos	155
6.3.	Velocidade nas rochas e velocidades nos agregados graúdos..	155
6.4.	Emprego do ultrassom para detecção de início e fim de pega	157
6.5.	Resistência à compressão	157
6.5.1.	Efeito do teor de pasta	157
6.5.2.	Efeito do agregado graúdo.....	158
6.5.3.	Efeito do tipo de cimento	159
6.5.4.	Efeito da dimensão máxima característica	159
6.6.	Velocidade de pulsos ultrassônicos.....	160
6.6.1.	Efeito do teor de pasta	160
6.6.2.	Efeito do tipo de agregado graúdo.....	161
6.6.3.	Efeito do tipo de cimento	161
6.7.	Comparativo entre as velocidades medidas nos prismas de concreto e nos corpos de prova.....	161
6.8.	Correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e resistência à compressão	161
6.8.1.	Efeito do teor de pasta	161
6.8.2.	Efeito do tipo de cimento	161
6.8.3.	Efeito do tipo de agregado graúdo.....	162
6.8.4.	Efeito da dimensão máxima característica	162
6.9.	Correlação entre velocidade na pasta do concreto e resistência à compressão.....	162

6.9.1.	Misturas com $a/c=0,48$	162
6.9.2.	Misturas com $a/c=0,55$	162
6.9.3.	Misturas com $a/c=0,65$	162
6.10.	Considerações finais	163
6.11.	Sugestões e recomendações para trabalhos futuros	164
7.	REFERÊNCIAS.....	165
	APÊNDICES - TABELAS.....	173
	APÊNDICES - FIGURAS.....	197

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Cabeçote de ultrassom típico, (SILVA JUNIOR e MARQUES, 2006).....	12
Figura 2-2 Representação esquemática do sistema de funcionamento do método da velocidade de pulsos ultrassônicos MALHOTRA e CARINO, 2004).	13
Figura 2-3 Aparelhos empregados para a determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos, PUNDIT, PUNDITPLUS e PUNDITLAB.....	13
Figura 2-4 Ondas longitudinais/compressionais/ ‘ <i>P-wave</i> ’ (MIKULIĆ ET AL., 2005).	14
Figura 2-5 Ondas transversais/cisalhamento/ ‘ <i>S-wave</i> ’ (MIKULIĆ ET AL., 2005).	15
Figura 2-6 Ondas de superfície/ ‘ <i>Rayleigh wave</i> ’ (MIKULIĆ ET AL., 2005).	15
Figura 2-7 Transdutor plano de 50,0 mm e 54 kHz.	18
Figura 2-8 Transdutor tipo sonda	18
Figura 2-9 Arranjo dos transdutores para medição direta	18
Figura 2-10 Arranjo dos transdutores para medição semi-direta	19
Figura 2-11 Arranjo dos transdutores para medição indireta.	19
Figura 2-12 Fase inicial, estágio de suspensão, onde as partículas de cimento estão isoladas uma das outras (YE et al., 2004).	26
Figura 2-13 Rede de sólidos interconectados, início da propagação dos pulsos ultrassônicos através da fase sólida (Ye et al., 2004).	27
Figura 2-14 Conectividade da fase sólida, 25% de hidratação, volume de sólidos conectados 60% (YE et al., 2004).....	28
Figura 2-15 Efeito da relação água/cimento e da presença de diferentes aditivos na velocidade de pulsos ultrassônicos em concretos e argamassas (GROSSE e REINHARDT 2001).	29
Figura 2-16 Evolução de velocidade de pulsos ultrassônicos com o tempo a partir da adição da água, em concretos com diferentes tipos de cimento (MALHOTRA, 2004).	30
Figura 2-17 Relação entre grau de hidratação e resistência à compressão, $a/c=0,40$ (quadrados cheios), $a/c=0,58$ (triângulos vazios) e $a/c=1,0$ (círculos cheios) BYFORS (1980 apud Pinto,1997).	31
Figura 2-18 Relação entre velocidade de pulsos ultrassônicos e água não evaporável (PINTO et al., 2000).	32
Figura 2-19 Gráfico das velocidades de pulsos ultrassônicos das diferentes rochas graníticas, na condição seca e saturada. (VASCONCELOS, 2008).	38

Figura 2-20 Efeito da dimensão máxima característica na velocidade de pulsos ultrassônicos em concretos produzidos com diferentes relações água/cimento (ABO-QUDAIS, 2005).....	40
Figura 2-21 Evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos, ao longo do tempo, para concretos produzidos com diferentes relações água/cimento (LIN et al., 2003).....	41
Figura 2-22 Relação entre porosidade e relação água/cimento (LAFHAJ et al 2006).	42
Figura 2-23 Relação entre porosidade e velocidade de pulsos ultrassônicos nas diferentes condições de ensaio, seca, parcialmente saturada e saturada (LAFHAJ et al 2006).....	42
Figura 2-24 Efeito da proporção do cimento: agregado miúdo: agregado graúdo na relação entre resistência à compressão e velocidade de pulsos ultrassônicos (MALHOTRA, 2004).	44
Figura 2-25 Efeito do volume de agregado graúdo na resistência à compressão e na velocidade de pulsos ultrassônicos (TRTNIK, 2009).45	45
Figura 2-26 Correlação entre V.P.U. e resistência à compressão, com diferentes adições minerais (DEMIRBOGA et al., 2004).....	46
Figura 2-27 Efeito da umidade relativa na V.P.U. concreto com a/c=0,50 e diferentes proporções de agregados (BERRIMAN et al., 2005).	48
Figura 2-28 Representação esquemática do procedimento de correção da estimativa da resistência, a partir de velocidades obtidas em diferentes condições de umidade (BUNGEY, 2006).....	49
Figura 2-29 Efeito da condição de cura na velocidade dos pulsos ultrassônicos (CÂMARA, 2006).....	50
Figura 2-30 Diagrama esquemático de um compósito constituído de N camadas (LIN et al., 2003).....	52
Figura 2-31 Relação entre velocidade medida e velocidade estimada, empregando o modelo de três fases (LIN et al., 2003).	54
Figura 2-32 Representação esquemática do modelo que usa a velocidade no concreto para o modelo adota a velocidade na pasta do concreto....	59
Figura 3-1 Fluxograma representativo da primeira etapa, determinação da velocidade nos prismas de rocha.	61
Figura 3-2 Fluxograma representativo da segunda etapa, determinação agregado miúdo.....	62
Figura 3-3 Fluxograma da terceira etapa, correlação V.P.U. x f_c	63
Figura 3-4 Fluxograma da quarta etapa, determinação velocidade no agregado graúdo.....	64
Figura 3-5 Fluxograma da quinta etapa, obtenção da velocidade na pasta do concreto e curvas de correlação.	65
Figura 3-6 Armazenamento agregado miúdo após secagem em estufa. 68	68

Figura 3-7 Forma de armazenamento dos cimentos.....	68
Figura 3-8 Amostras da primeira coleta.....	70
Figura 3-9 Primeira tentativa de corte, serra do laboratório de solos....	70
Figura 3-10 Resultado do corte na serra do Laboratório de solos.....	71
Figura 3-11 Amostras das rochas das Mineradoras.....	71
Figura 3-12 Foto do PUNDITLAB, empregado na determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas.....	72
Figura 3-13 Procedimento adotado para a leitura das amostras das rochas.....	72
Figura 3-14 Extração de testemunhos em rochas-mãe (Granito e diabásio).....	73
Figura 3-15 Dispositivo com pasta, leitura da velocidade de pulsos ultrassônicos a partir do estado fresco e monitoramento da temperatura com termopar tipo “K”.....	74
Figura 3-16 Argamassadeira empregada para a mistura das pastas	75
Figura 3-17 Procedimento adotado para obtenção da argamassa.....	76
Figura 3-18 Consistência dos concretos com diferentes relações água/cimento e/ou teor de pasta.....	78
Figura 3-19 Procedimento adotado para a determinação da massa específica e ar incorporado.....	79
Figura 3-20 Procedimentos para o ensaio de início e fim de pega concreto.....	79
Figura 3-21 Vedação dos corpos de prova, armazenamento nas primeiras 24 horas e armazenamento para as idades mais avançadas.....	80
Figura 3-22 Máquinas de Ensaio Universal SHIMADZU, Prensa: Mohor e Federhaff AG Mannheim e Prensa:AMSLER Aferida em 28/02/2011.	81
Figura 3-23 Aparelhos de ultrassom usados na pesquisa: PUNDIT Plus, PUNDIT Lab e PUNDIT.....	82
Figura 3-24 Dispositivo usado para determinar a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta, argamassa e concretos.....	83
Figura 3-25 Leitura nos dispositivos de concreto.....	84
Figura 3-26 Determinação da velocidade em corpos de prova de concreto.....	84
Figura 4-1 Penetrômetro de Proctor utilizado para a determinação do início e fim de pega em concretos.....	92
Figura 4-2 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M4828VG19	96
Figura 4-4 Evolução da velocidade de pasta e concreto M4832VG19 .	96
Figura 4-3 Evolução da velocidade da pasta e concreto da mistura M4836VG19	97

Figura 4-5 Evolução da velocidade de pasta e concreto da mistura M4832IVG19.....	97
Figura 4-6 Evolução da velocidade de pasta e concreto na mistura M4832VD19.....	98
Figura 4-7 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5528VG19.....	98
Figura 4-8 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5532VG19.....	99
Figura 4-9 Evolução da velocidade de pasta e concreto da mistura M5536VG19.....	99
Figura 4-10 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5532IVG19.....	100
Figura 4-11 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5532VD19.....	100
Figura 4-12 Evolução velocidade de pasta e concreto mistura M5532VG9,5.....	101
Figura 4-13 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M6528VG19.....	101
Figura 4-14 Evolução da velocidade de pasta e concreto da mistura M6532VG19.....	102
Figura 4-15 Evolução velocidade de pasta e concreto da mistura M6532VD19.....	102
Figura 4-16 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto, nas primeiras horas, M4828VG19.....	103
Figura 4-17 Evolução temperatura pasta, argamassa e concreto M4832VG19.....	104
Figura 4-18 Evolução temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M4836VG19.....	104
Figura 4-19 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M4832IVG19.....	105
Figura 4-20 Evolução temperatura em pasta, argamassa e concreto na mistura M4832VD19.....	105
Figura 4-21 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M5528VG19.....	106
Figura 4-22 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M5532VG19.....	106
Figura 4-23 Evolução temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M5536VG19.....	107
Figura 4-24 Evolução temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M5532IVG19.....	107

Figura 4-25 Evolução temperatura pasta, argamassa e concreto mistura M5532VD19	108
Figura 4-26 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M5532VG9,5.....	108
Figura 4-27 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M6532VG19.....	109
Figura 4-28 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M6532VD19.....	109
Figura 5-1 Variações na velocidade média de pulsos ultrassônicos em função da condição de saturação.....	111
Figura 5-2 Evolução da resistência em concretos com $a/c=0,48$, com diferentes teores de pasta.....	116
Figura 5-3 Evolução da resistência em concretos com $a/c=0,48$, misturas M4832IVG19, M4832VG19 e M4832VD19.....	117
Figura 5-4 Evolução da resistência em concretos com $a/c=0,55$, com diferentes teores de pasta e diferentes D.M.C.	118
Figura 5-5 Evolução da resistência em concretos com $a/c=0,55$, cimentos CPV-ARI-RS e CPIV-32, (granito e diabásio).	119
Figura 5-6 Evolução da resistência em concretos com relação $a/c=0,65$ e teores de pasta de 28% e 32%.	120
Figura 5-7 Evolução da resistência de concretos com $a/c=0,65$, cimento CPV-ARI-RS, com agregados graníticos e diabásicos.....	121
Figura 5-8 Evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos nos concretos, leitura feita nos corpos de prova.	122
Figura 5-9 Comportamento da evolução da velocidade do concreto com relação $a/c=0,48$, com granito, diabásio e cimento CP IV-32.	122
Figura 5-10 Evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos nos concretos com relação $a/c=0,55$ com diferentes teores de pasta.	123
Figura 5-11 Evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos nos concretos M5532VG19, M5532IVG19 e M5532VD19.....	124
Figura 5-12 Evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos em concretos com relação $a/c=0,65$, com teores de pasta de 28 e 32%. ...	125
Figura 5-13 Evolução da velocidade em concretos com $a/c=0,65$, com agregados graníticos e basálticos.	126
Figura 5-14 Correlação entre resistência nos concretos com $a/c=0,48$ e velocidade nos corpos de prova de concreto.	127
Figura 5-15 Correlação entre a velocidade no concreto (dispositivo e corpo-de-prova) e resistência à compressão.....	128
Figura 5-16 Correlações entre V.P.U. e resistência à compressão em concretos com $a/c=0,48$ e diferentes agregados graúdos.....	128

Figura 5-17 Correlação entre velocidade nos concretos com relação $a/c=0,48$ e resistência à compressão.	129
Figura 5-18 Efeito do teor de pasta na correlação entre V.P.U. e resistência à compressão em concretos com $a/c=0,48$	130
Figura 5-19 Correlações entre velocidade nos concretos com $a/c=0,55$ e resistência à compressão do concreto.	131
Figura 5-20 Correlações entre V.P.U. e resistência à compressão em concretos com mesma relação água/cimento e diferente agregado graúdo.	132
Figura 5-21 Correlações com misturas com $a/c=0,55$ (Cimento CPV-ARI-RS e CPIV-32, granito).	133
Figura 5-22 Correlação com concretos com $a/c=0,55$, diferentes dimensões máximas características.	134
Figura 5-23 Correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e resistência à compressão, em misturas com relação $a/c=0,65$	135
Figura 5-24 Efeito da relação água/cimento nas correlações de concretos com teor de pasta de 28%.	136
Figura 5-25 Comparação entre as correlações de concretos com teor de pasta de 32% e diferentes relações água/cimento.	137
Figura 5-26 Comparação entre as correlações produzidas com concretos de diferentes relações água/cimento e teor de pasta de 36%.	137
Figura 5-27 Comparação entre correlações de concreto com agregados de diabásio, com 32% de pasta e relações água/cimento 0,48, 0,55 e 0,65.	138
Figura 5-28 Correlação entre velocidade das pastas dos concretos das misturas com relação $a/c=0,48$ e a resistência à compressão.	142
Figura 5-29 Correlações entre velocidade na pasta do concreto e velocidade no concreto e a resistência à compressão, $a/c=0,48$	143
Figura 5-30 Análise comparativa de retas de correlação, com misturas de concreto com relação $a/c=0,48$	144
Figura 5-31 Correlações entre velocidade das pastas dos concretos com $a/c=0,55$ e resistência à compressão.	145
Figura 5-32 Correlação entre velocidade na pasta e velocidade no concreto e o \ln da resistência, misturas com $a/c=0,55$	145
Figura 5-33 Análise comparativa entre correlações, concretos com $a/c=0,55$	146
Figura 5-34 Correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e no concreto e a resistência à compressão, misturas com $a/c=0,65$	147
Figura 5-35 Correlações entre velocidades nas pastas de concreto com $a/c=0,65$ e o logaritmo neperiano da resistência à compressão.	148

Figura 5-36 Correlações entre velocidade na pasta e velocidade no concreto e a resistência à compressão.	149
Figura 5-37 Análise comparativa de correlações, utilizando-se todas as misturas.	149
Figura 5-38 Correlações entre V.P.U. na pasta e no concreto e a f_c , misturas com 32% de pasta.	150
Figura 5-39 Análise commparativa de correlações com o mesmo teor de pasta, (32%).	151
Figura 5-40 Comparação linear com o mesmo cimento e o mesmo teor de pasta, com agregado granítico e basáltico e diferentes relações a/c.	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Valores mínimos para a largura dos membros e dimensão máxima característica (BUNGEY, 2006).....	21
Tabela 2-2 Coeficiente de variação interno do método de ensaio da velocidade de pulsos ultrassônicos (ACI 228-1R: 2003)	22
Tabela 2-3 Descrição petrográfica dos granitos estudados por Vasconcelos et al. (2008)	36
Tabela 2-4 Porosidade de algumas rochas (NEVILLE, 1997).	39
Tabela 2-5 Efeito da temperatura na velocidade de pulsos ultrassônicos (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2002).	51
Tabela 3-1 Traço das argamassas em relação ao kg de cimento	75
Tabela 3-2 Relação das misturas de concreto.....	77
Tabela 3-3 Misturas de concreto: traço e consumo	77
Tabela 4-1 Características dos agregados	87
Tabela 4-2 Velocidade média dos pulsos ultrassônicos nas rochas mães (m/s)	89
Tabela 4-3 Valores da massa específica e absorção das amostras de rochas	89
Tabela 4-4 Resistência à compressão dos corpos de prova das rochas graníticas e diabásicas	90
Tabela 4-5 Velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta (m/s)	90
Tabela 4-6 Velocidade de pulsos ultrassônicos na mistura de argamassa	91
Tabela 4-7 Valores de abatimento, massa específica teórica, real e teor de ar incorporado das misturas de concreto.	91
Tabela 4-8 Início e fim de pega de algumas misturas de concreto.....	93
Tabela 4-9 Resultados de resistência média à compressão das misturas de concreto (em MPa)	94
Tabela 4-10 Resultados de velocidade de pulsos ultrassônicos para as misturas de concreto (em m/s).....	95
Tabela 5-1 Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado miúdo ...	113
Tabela 5-2 Volume dos materiais em cada mistura (%).....	114
Tabela 5-3 Velocidades nos agregados graúdos.....	115
Tabela 5-4 Resultados de velocidade de pulsos ultrassônicos nas pastas das misturas de concreto (m/s)	141

1. INTRODUÇÃO

O concreto tem feito parte da grande maioria das obras, sendo bastante difícil imaginar alguma atividade humana na qual o mesmo não esteja presente. A versatilidade e vantagens que ele apresenta lhe conferem um lugar de destaque entre os materiais de construção mais consumidos pela humanidade. As qualidades intrínsecas que o concreto oferece, aliadas ao seu reduzido custo fazem dele um material com vantagens técnicas, econômicas e sociais difíceis de serem ultrapassadas por qualquer outro, o que explica e justifica o seu extensivo uso em todo o mundo (Isaia, 2007). O consumo estimado em 2007 era na ordem de 11 bilhões de toneladas métricas ao ano (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os Estados Unidos e o Canadá consideram o investimento no estudo das estruturas de concreto como um dos mais importantes investimentos na ciência e tecnologia e entendem que o profundo conhecimento sobre concreto posiciona e mantém a sua indústria na fronteira do conhecimento assegurando alta competitividade (HELENE; ANDRADE, 2010).

Nos últimos anos houve um grande avanço na tecnologia do concreto, devido principalmente ao surgimento de novos aditivos químicos e adições minerais. Mudanças nas propriedades do concreto fresco e endurecido permitiram que algumas limitações antigas fossem superadas. Atualmente, é possível produzir concreto com elevado desempenho, aliando-se alta durabilidade com elevada resistência; concretos com elevada trabalhabilidade (auto-adensáveis e auto-nivelantes), baixa porosidade e, em alguns casos, com pequena retração e/ou com retração controlada.

Essas vantagens ou melhorias, quando empregadas, refletem-se na redução da seção transversal de pilares, com conseqüentes ganhos de área útil, redução no consumo dos insumos do concreto armado, (forma, concreto e aço), energia para o adensamento, redução nos custos em manutenção, aumento na vida útil, entre outras vantagens.

Dentre as principais propriedades estudadas no concreto destaca-se a resistência à compressão, quer seja pela simplicidade do ensaio, quer seja porque a esta propriedade estão atreladas várias outras, dentre elas,

a resistência à tração, resistência à abrasão, módulo de elasticidade, entre outras, além disso, é ela que norteia, usualmente, a dosagem e o controle de aceitação do concreto.

O concreto lançado na estrutura além de possuir diferentes graus de adensamento, é curado em condições bastante diferentes das dos corpos de prova, os quais devem ser moldados e curados de acordo com a Norma Brasileira nº 5738 (ABNT, 2008). O concreto na estrutura desenvolve uma história térmica que é dependente de fatores intrínsecos do concreto, (tipo e quantidade de cimento, de agregados e de aditivos), das dimensões do elemento estrutural e das condições climáticas.

O conceito de resistência potencial é designado aos concretos que são moldados, curados e ensaiados de acordo com as normas. Contudo, quando se deseja saber a resistência do concreto *in loco* percebe-se a necessidade de recorrer aos ensaios parcialmente destrutivos ou não destrutivos.

Os ensaios não destrutivos podem ser empregados tanto durante a execução das estruturas de concreto quanto depois de acabadas. Durante a execução existem algumas aplicações possíveis, dentre elas as seguintes: permitir o início das atividades de acabamento de pisos industriais, imediatamente após o fim de pega; verificar, nas primeiras horas, se valores mínimos de resistência foram atingidos e, dessa forma, possibilitar que atividades críticas, tais como remoção de formas, retirada de escoramento, aplicação de cargas de protensão, içamento e/ou transporte das peças pré-moldadas, possam ser iniciados com segurança.

Historicamente, desde que o concreto começou a ser empregado como material estrutural, houve a necessidade de se estimar sua resistência “in-loco” e, como consequência, frequentes foram e têm sido as tentativas em se desenvolver ou aprimorar os métodos de ensaios não destrutivos. Segundo Malhotra (1984), desde a década de 50 têm sido feitas várias tentativas quanto ao desenvolvimento de métodos de ensaio “in loco” não destrutivos, para assegurar a qualidade do concreto na estrutura. Uma característica importante dos ensaios não destrutivos é a possibilidade de execução de vários ensaios no mesmo local, ou em locais muito próximos, de modo que se podem acompanhar as variações ocorridas no concreto ao tempo (NEVILLE, 1997).

A importância de se estimar a qualidade do concreto *in loco*, que não através da extração de testemunhos, tem conduzido vários pesquisadores ao desenvolvimento de métodos de ensaios não destrutivos.

Em estruturas acabadas, os ensaios não destrutivos são aplicados para inspecionar a estrutura, quando se quer analisar: a qualidade, a homogeneidade e/ou a integridade dos elementos estruturais.

Os ensaios não destrutivos (END) possibilitam verificar a possibilidade de ataque por sulfatos, a reação álcali-agregado, e mesmo indícios de corrosão. Além disso, os ensaios não destrutivos são aplicáveis em estruturas sinistradas para verificar a resistência residual.

Os ensaios não destrutivos oferecem vantagens significativas em relação à extração de testemunhos, uma vez que são de rápida execução, tem baixo custo, permitem investigação mais abrangente da estrutura e geram resultados imediatamente (MACHADO, 2005). Por outro lado, deve-se considerar que a maioria dos ensaios não destrutivos são de natureza comparativa sendo, portanto, necessário estabelecer uma relação experimental entre a propriedade que está sendo medida e a resistência em corpos de prova ou testemunhos desse concreto. Essa relação permitirá a conversão do resultado do ensaio não destrutivo em uma estimativa do valor de resistência na obra. (NEVILLE, 1997).

Dentre os ensaios não destrutivos usualmente empregados para se estimar a resistência à compressão citam-se: Esclerometria, Penetração de pinos, *Pullout*, *Pulloff* e Ultrassom. Contudo, é indispensável frisar que estes ensaios possuem diferentes graus de acurácia. Estes ensaios não destrutivos estimam a resistência à compressão do concreto de forma indireta a partir da dureza superficial, resistência à penetração, resistência ao arrancamento e velocidade de pulsos ultrassônicos, cada um tem suas limitações. Para obter melhores resultados, pode-se empregar vários métodos para estimar a resistência do concreto, ao que se tem empregado o termo de métodos combinados (MALHOTRA; CARINO, 2004).

A maioria dos ensaios não destrutivos destinados à estimativa da resistência, como os acima mencionados, com exceção do ultrassom em modo de transmissão direta, avalia principalmente as propriedades do concreto de recobrimento Cabe ressaltar que o concreto de recobrimento pode ser atacado por substâncias agressivas, tais como cloretos, sulfatos

e gás carbônico, tendo alguns de seus constituintes e propriedades físicas e mecânicas alteradas. Por exemplo, o concreto ao sofrer carbonatação, tem sua dureza aumentada e o seu pH reduzido. Devido a estas alterações devem-se adotar procedimentos no sentido de impedir que a resistência do concreto, obtida por meio de END, seja superestimada, principalmente quando do emprego da esclerometria.

Uma das características do método da velocidade de pulsos ultrassônicos, em contraposição aos demais ensaios citados, é a possibilidade de analisar os elementos estruturais ao longo de sua altura e espessura, possibilitando assim uma visão mais abrangente dos mesmos. Os pulsos de ondas mecânicas que atravessam o elemento em análise não produzem nenhum tipo de dano à estrutura, de modo que é possível repetir o ensaio durante o tempo em que durar a investigação ou pesquisar e monitorar alterações ocorridas no concreto da estrutura.

Através do método da velocidade dos pulsos ultrassônicos pode-se, em teoria, obter outras informações tais como: espessura das peças, presença de fissuras, delaminações, presença de processos corrosivos ou reação álcali-agregado, módulo de elasticidade de concreto e argamassas, bem como início e fim de pega de concretos e argamassas.

Apesar do significativo número de pesquisas e estudos que objetivaram estimar a resistência do concreto a partir da velocidade dos pulsos ultrassônicos, ainda permanecem algumas dificuldades em se relacionar a velocidade de pulsos ultrassônicos com a resistência à compressão do concreto. Uma série de fatores como idade, condições de cura e umidade, proporção da mistura, tipo de agregado e tipo de cimento, influenciam diferentemente na resistência e na velocidade de pulsos ultrassônicos.

O tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos através do concreto é obtido pela somatória das parcelas dos tempos de propagação dos pulsos ultrassônicos em cada um dos constituintes do concreto ao longo de sua trajetória de propagação. O tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos através dos agregados graúdos e miúdos está condicionado ao tipo de agregado, às proporções volumétricas dos mesmos no concreto e às características elásticas, notadamente ao valor do módulo de elasticidade. Já o tempo de transmissão através da pasta depende de sua densidade e de suas características elásticas, principalmente do módulo de elasticidade, o qual por sua vez é dependente da relação água/cimento, grau de hidratação ou maturidade e, tipo de cimento.

Em concretos produzidos com os mesmos materiais, a velocidade de pulsos ultrassônicos será alterada toda vez que se mude a proporção de agregados graúdos, ainda que se mantenha a mesma relação água/cimento. Essa alteração, ainda que significativa, pode não produzir mudança na resistência do concreto.

Concretos produzidos com diferentes agregados graníticos podem apresentar diferentes valores de velocidade, ainda que produzidos com o mesmo traço. Isso devido à diferença significativa existente nos valores da velocidade de pulsos ultrassônicos entre as rochas graníticas. As diferentes regiões, épocas e condições de formação das rochas mães podem explicar as mudanças nas propriedades elásticas e mecânicas.

As curvas de correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão são substancialmente afetadas pelo tipo, dimensão máxima característica e quantidade de agregados graúdos, sendo essa uma das principais restrições do seu uso. Além disso, as curvas de correlação são influenciadas pelo tipo de cimento e pelo volume de pasta. Contudo, é possível adotar procedimentos que permitiriam minimizar o impacto das principais variáveis sobre a velocidade de pulsos ultrassônicos e, assim, aumentar as potencialidades de uso deste método não destrutivo.

Para tanto, fez-se necessária a utilização de um método que fosse capaz de incorporar as características dos agregados graúdos e miúdos, bem como as proporções dos mesmos na mistura. Este método levou em consideração a velocidade dos agregados graúdos, miúdos com suas respectivas proporções na mistura e, também, o volume de pasta. Tal método teria maior abrangência, uma vez que teria o potencial de empregar qualquer tipo e proporção de agregados.

1.1. Originalidade

Este trabalho desenvolve um método para avaliação da resistência à compressão do concreto a partir das velocidades do ultrassom.

O método proposto tem como base as considerações feitas por Lin *et al* (2003), os quais consideram o tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos em um elemento de concreto como sendo o somatório dos tempos de propagação através de cada uma das fases (pasta, agregado

miúdo, agregado graúdo) ao longo da trajetória de propagação. Dado que os volumes dos agregados graúdos e miúdos bem como as propriedades dos mesmos não se modificam com tempo, é de se esperar que essa parcela permaneça constante. Por outro lado, a outra parcela, representada pelo tempo gasto pelos pulsos ultrassônicos para ultrapassar a pasta, irá variar ao longo do tempo, devido às mudanças micro-estruturais que ocorrem na pasta durante a hidratação da mesma e, dependerá, essencialmente, da relação água/cimento e do tipo de cimento.

O método apresentado se diferencia dos demais porque se propõe a correlacionar a velocidade da pasta com a resistência do concreto à compressão, considerando que o esqueleto do concreto, representado pelos agregados miúdos e graúdos não sofre alteração ao longo do tempo e, que o ganho de velocidade no concreto se deve unicamente ao processo de hidratação da pasta. Neste sentido, verificou-se a validade do método empregando dois tipos de cimentos, dois tipos de agregados graúdos (granito e basalto), e duas dimensões máximas características (19 mm e 9,5 mm).

1.2. Justificativa

O estudo de alternativas para avaliar a resistência à compressão do concreto em estruturas existentes (ou em construção) tem sido de grande interesse. A utilização de propagação de ondas de tensão via ultrassom, é um método não destrutivo, rápido, e eficaz que permite avaliar indiretamente a resistência do material através da velocidade do pulsos ultrassônicos. Entretanto, sua utilização para este fim está condicionada à existência de curvas de calibração previamente desenvolvidas relacionando a velocidade do ultrassom (V_c) e a resistência à compressão (f_c) para a mistura investigada.

A maioria dos trabalhos de pesquisa realizados no Brasil e em outros países, que empregaram o método da velocidade de pulsos ultrassônicos, foi desenvolvida tendo como objetivo principal a obtenção de curvas de correlação entre a velocidade dos pulsos ultrassônicos no concreto e a sua resistência à compressão. Entretanto, devido ao fato de existir variações significativas entre as propriedades das rochas de mesma família, tanto no que se refere à resistência à compressão, quanto ao que se refere ao módulo de elasticidade, torna-se difícil encontrar uma curva

de correlação que seja capaz de englobar todas estas variabilidades. Por outro lado, quando se produz concretos com diferentes trabalhabilidades, ainda que com os mesmos agregados, surgem mudanças nos volumes de pasta, argamassa e agregados graúdos. Essas alterações volumétricas se traduzem em variações na velocidade dos pulsos ultrassônicos, mas não necessariamente variações na resistência à compressão.

Por meio do método aqui proposto, a estimativa da resistência à compressão do concreto não fica atrelada a uma mistura específica e, sim, ao conhecimento prévio das velocidades individuais em cada componente e à proporção destes na mistura. A estimativa da resistência à compressão do concreto fica atrelada à maturidade do concreto, expressa pelo ganho da velocidade da pasta, e não à sua idade.

1.3. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um método que possibilite estimar com maior acurácia a resistência à compressão do concreto, a partir da correlação com a velocidade na pasta do concreto, que é obtida com base na velocidade no concreto e nas proporções volumétricas e características dos seus constituintes.

1.4. Objetivos Específicos

- Determinar a velocidade dos pulsos ultrassônicos das rochas-mãe, que deram origem aos agregados graúdos, granito e basalto, diretamente nos prismas, obtidos a partir das amostras coletadas junto às Mineradoras;
- Determinar a velocidade do agregado graúdo empregando o modelo de três fases, proposto por Lin *et al* (2003);
- Determinar a velocidade do agregado miúdo empregando o modelo de duas fases, proposto por Lin *et al* (2003);
- Verificar a influência da variação do volume de pasta na velocidade do concreto e na variação da resistência à compressão;
- Verificar a influência do tipo de cimento na variação da velocidade do concreto e na variação da resistência à compressão;

- Verificar a influência do tipo de agregado graúdo na variação da velocidade do concreto e na variação da resistência;
- Verificar a influência da dimensão máxima característica dos agregados graúdos na variação da velocidade do concreto e na variação da resistência;
- Desenvolver curvas de correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão;
- Desenvolver curvas de correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta de concreto, obtida indiretamente, e a resistência à compressão do concreto;
- Verificar se o tipo de cimento empregado afeta as correlações da velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto e a resistência;
- Verificar se o tipo de agregado graúdo afeta as correlações da velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e a resistência à compressão;
- Verificar se a dimensão máxima característica do agregado graúdo influencia na correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e resistência à compressão;
- Verificar se o teor de pasta afeta a correlação entre velocidade na pasta e resistência à compressão;
- Verificar se a relação água/cimento afeta as correlações entre velocidade na pasta e resistência à compressão.

1.5. Estrutura da tese

A presente tese é composta de nove capítulos, os quais serão apresentados da seguinte maneira:

No capítulo 1 fez-se uma breve introdução da importância da aplicação dos ensaios não destrutivos para estimar propriedades em estruturas de concreto, quer sejam armadas ou não, tanto na fase construtiva quanto em obras já concluídas, apresentou-se os objetivos e a justificativa.

No capítulo 2 fez-se uma revisão do método da velocidade de pulsos ultrassônicos, evidenciando o que existe em outros países, as principais pesquisas e o que foi desenvolvido até o momento no Brasil e, além disso, apresentam-se modelos para a estimativa da velocidade de pulsos ultrassônicos.

No capítulo 3 apresentam-se os procedimentos metodológicos adotados para caracterizar os materiais, relacionam-se as máquinas e equipamentos utilizados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, começando-se pelos ensaios de caracterização e finalizando com os resultados das misturas.

No capítulo 5 realizou-se a análise e discussão dos resultados obtidos, enquanto no capítulo 6 apresentam-se considerações finais, bem como sugestões para outros trabalhos.

No capítulo 7 apresentam-se referências bibliográficas que nortearam esta tese, a seguir são apresentados os anexos que fazem parte deste trabalho e, por último apresentam-se os anexos com tabelas e figuras.

2. Método da velocidade de pulsos ultrassônicos

2.1. Introdução

O método da velocidade de pulsos ultrassônicos consiste na introdução de um feixe sonoro de alta frequência no material ou componente de interesse com o objetivo de determinar a velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos. Este método envolve a medição do tempo de propagação de pulsos de ondas de compressão através de uma trajetória previamente conhecida. Dividindo-se a distância percorrida pelo tempo decorrido tem-se o valor da velocidade de pulsos ultrassônicos (CARINO, 1997).

O método da velocidade de pulsos ultrassônicos vem sendo usado para avaliar a qualidade do concreto por mais de 65 anos. As primeiras informações relativas à medição da velocidade de pulsos ultrassônicos, gerados mecanicamente, através do concreto, surgiram nos Estados Unidos, na metade da década de 40. Constatou-se que a velocidade dependia principalmente das propriedades elásticas do material e que a mesma era quase independente da geometria (BUNGEY, 2006).

Esse método tem sido usado desde então para detectar as fissuras internas e outras falhas não visíveis externamente, assim como para monitorar as mudanças nas propriedades do concreto (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

O método utiliza ondas mecânicas que não geram danos nos elementos da estrutura a ser testada, sendo, portanto, não destrutivo. Podem-se testar os elementos quantas vezes se desejar e, assim, monitorar o desenvolvimento das mudanças internas durante um longo período de tempo (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

2.2. Princípio de funcionamento

As ondas ultrassônicas podem ser geradas por meio de diferentes processos, dentre eles os seguintes: efeito piezo-elétrico, processos eletrostáticos ou de excitação térmica, sendo mais comum a utilização de transdutores piezo-elétricos. O efeito piezo-elétrico é uma característica apresentada por alguns materiais que, quando deformados mecanicamente, produzem cargas elétricas e, quando submetidos a uma diferença de potencial, se deformam mecanicamente (efeito

piezométrico inverso). Quando uma diferença de potencial é aplicada ao elemento piezo-elétrico ele altera suas dimensões, gerando vibrações mecânicas (SILVA JUNIOR; MARQUES, 2006).

No ensaio de ultrassom as ondas sonoras são introduzidas no material sob teste através de um dispositivo denominado cabeçote. O cabeçote incorpora um elemento piezo-elétrico que converte sinais elétricos em vibrações mecânicas (modo transmissão) e vibrações mecânicas em sinais elétricos (modo recepção). Um cabeçote típico pode ser observado no desenho esquemático da Figura 2-1.

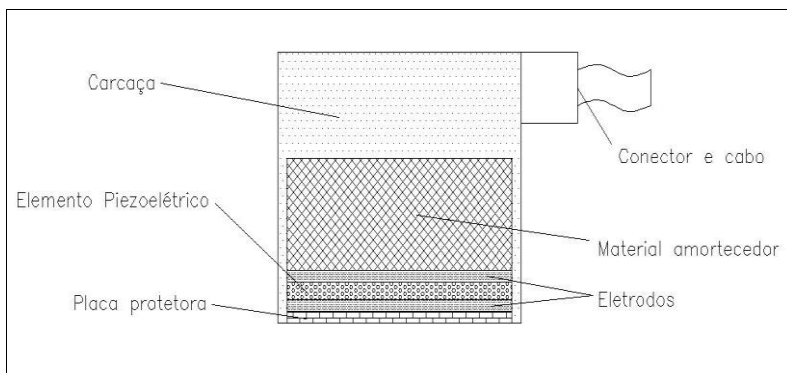


Figura 2-1 Cabeçote de ultrassom típico
(Silva Junior; Marques, 2006)

O transdutor é constituído de discos de material piezo-elétrico, que vibram quando submetidos a uma corrente alternada, produzindo ondas de pressão na direção normal ao disco. Esta vibração é então transferida à peça de concreto em forma de energia mecânica. As ondas geradas são captadas através de um transdutor receptor acoplado ao concreto a uma distância conhecida do transdutor transmissor, onde a energia mecânica é convertida novamente em pulsos elétricos de mesma frequência. Um dispositivo eletrônico cronometra o tempo decorrido entre o início da transmissão e a recepção de pulsos, que pode ser mostrado por um mostrador digital. Para transmissão ou recepção de pulsos, os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície, caso contrário, a camada de ar existente introduzirá um erro na leitura do tempo. O adequado acoplamento do transdutor à superfície do concreto é obtido com auxílio da aplicação de um fluido viscoso, tal como a vaselina sólida, substância normalmente empregada

(MALHOTRA, 2004; CARINO, 1997).

A Figura 2-2 apresenta o esquema de funcionamento do método da velocidade de pulsos ultrassônicos, enquanto a Figura 2-3 apresenta alguns aparelhos comerciais de ultrassom.

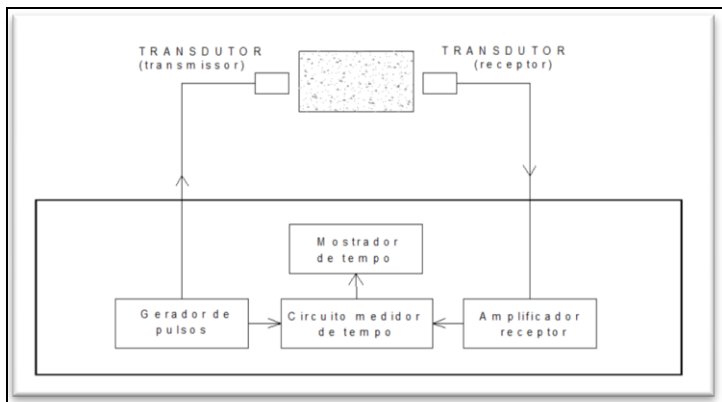


Figura 2-2 Representação esquemática do sistema de funcionamento do método da velocidade de pulsos ultrassônicos (MALHOTRA e CARINO, 2004).



Figura 2-3 Aparelhos empregados para a determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos, PUNDIT, PUNDITPLUS e PUNDITLAB.

2.3. Tipos de ondas de tensão

Três tipos de ondas de tensão são gerados através da aplicação de um impulso à uma massa sólida: ondas longitudinais, ondas transversais e ondas de superfície. As ondas de superfície se caracterizam por um deslocamento elíptico das partículas e são as mais lentas, enquanto as

ondas transversais ou de cisalhamento produzem um deslocamento das partículas perpendicular à direção de percurso, sendo mais rápidas que as ondas de superfície. As ondas longitudinais, algumas vezes chamadas de ondas de compressão, durante a propagação no material produzem regiões de compressão e expansão. As partículas oscilam na mesma direção de propagação da onda e, por serem as mais rápidas, são as primeiras a serem detectadas, sendo assim, as mais importantes e as que fornecem informações mais úteis. Transdutores eletro-acústicos produzem principalmente ondas desse tipo (BUNGEY, 2006).

As Figura 2-4, Figura 2-5 e Figura 2-6, respectivamente, representam o comportamento das ondas longitudinais, transversais e superficiais.

A intensidade de um feixe sonoro diminui à medida que o mesmo se propaga através do material, de forma que a intensidade do feixe que chega ao transdutor receptor é menor que a intensidade original. Esta diminuição acontece devido às perdas por transmissão, aos efeitos de interferência e de dispersão do feixe sonoro que ocorrem no material. A este fenômeno dá-se o nome de atenuação.

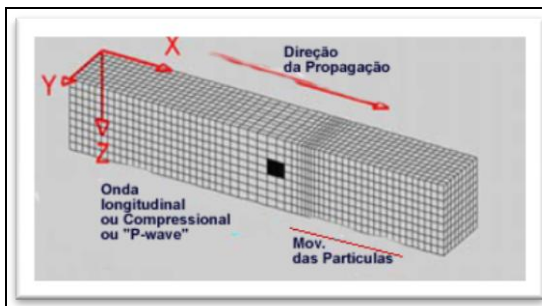


Figura 2-4 Ondas longitudinais/compressionais/ 'P-wave'
(MIKULIC *et al.*, 2005)

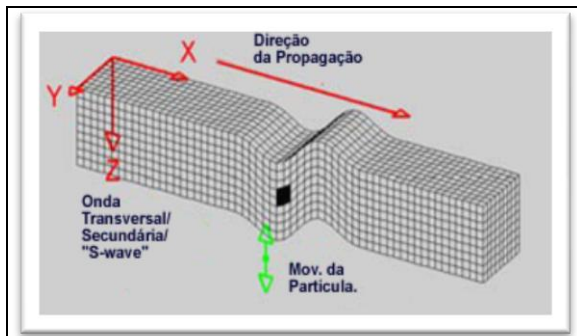


Figura 2-5 Ondas transversais/cisalhamento/ ‘S-wave’ (MIKULIC *et al.*, 2005)

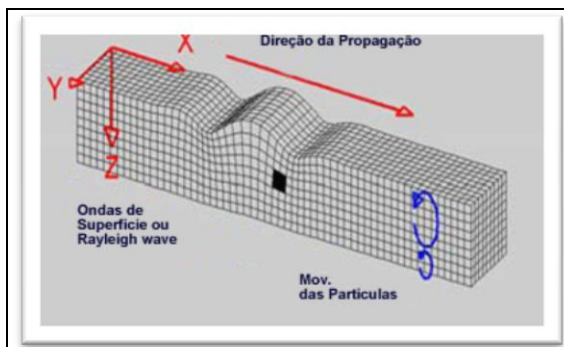


Figura 2-6 Ondas de superfície/ ‘Rayleigh wave’ (MIKULIC *et al.*, 2005)

Quando uma onda sonora se propaga em um determinado material atinge outro material, parte da energia sonora continua sua trajetória e parte é refletida na interface entre os dois materiais. A quantidade de energia sonora que é refletida e transmitida na interface dos dois materiais é função das impedâncias acústicas dos dois materiais. Caso as impedâncias acústicas sejam similares, não haverá reflexão. Quanto maior a diferença entre elas maior será a reflexão. A impedância acústica de um material é definida como o produto da massa específica do material pela velocidade de propagação, expressa através da Equação 2-1. A unidade de medida da impedância acústica é $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

$$Z = \rho \times v$$

Equação 2-1

A velocidade dos pulsos ultrassônicos depende das propriedades elásticas e da densidade do meio em que se propagam. Para um meio infinito, homogêneo e isotrópico, pode-se demonstrar que a velocidade da onda longitudinal é dada pela Equação 2-2.

$$v = \sqrt{\frac{K \cdot E_d}{\rho}} \quad \text{Equação 2-2}$$

Onde v = velocidade da onda longitudinal (m/s), E_d = Módulo dinâmico (N/m^2); ρ = densidade (kg/m^3) e k a constante dada pela Equação 2-3.

$$k = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad \text{Equação 2-3}$$

Em que ν = Coeficiente de Poisson dinâmico.

Através do emprego da Equação 2-3, pode-se constatar que variações nos valores do coeficiente de Poisson entre 0,15 e 0,25 resultam numa variação do coeficiente k entre 1,06 e 1,20, respectivamente, e produzem variações de até 6,6% no valor da velocidade de pulsos ultrassônicos. Assim, contanto que se disponha de uma razoável estimativa do valor do coeficiente de Poisson e da densidade do material, é possível calcular o valor do módulo dinâmico usando o valor da velocidade dos pulsos ultrassônicos. Considerando-se que o coeficiente de Poisson e a densidade dos concretos produzidos com agregados naturais variam muito pouco, a relação entre velocidade e módulo dinâmico pode apresentar razoável consistência, apesar de o concreto não ser um meio ideal, no qual um modelo matemático possa ser empregado (BUNGEY, 2006).

O módulo de elasticidade e a resistência do concreto crescem com a maturidade, por essa razão é possível que, com a velocidade dos pulsos, possa-se dispor de um meio para estimar a resistência do concreto, embora não exista relação física direta entre essas duas propriedades (ACI COMMITTEE 228, 2003).

Faz-se importante ressaltar que, na medida em que o concreto torna-se mais maduro, o módulo de elasticidade e a resistência crescem a

diferentes taxas. Nas primeiras idades o módulo tem uma taxa de crescimento superior à taxa de crescimento da resistência e em idades mais avançadas o módulo cresce em taxas menores. Como resultado do amplo intervalo de maturidade, a relação entre resistência à compressão e velocidade de pulsos ultrassônicos é altamente não linear (ACI COMMITTEE 228, 2003).

2.4. Tipos de transdutores

Transdutores com frequência entre 25 e 100 kHz são usualmente empregados para ensaiar concretos. Transdutores com diferentes frequências de ressonância estão disponíveis para aplicações especiais: transdutores de alta frequência (acima de 100 kHz) são usados em amostras de pequenas dimensões, com comprimento relativamente pequeno ou para concretos de alta resistência, enquanto transdutores de baixa frequência (abaixo de 25 kHz) são utilizados em amostras maiores ou com grande comprimento, ou em concretos com agregados graúdos de maiores dimensões. Esses transdutores geram principalmente ondas de compressão em uma frequência predominante, com a maior parte de sua energia direcionada ao longo do eixo normal à face do transdutor (MALHOTRA, 2004).

Os transdutores mais comumente usados têm frequência de 54 kHz, possuem superfície plana e diâmetro de 50 mm. Considerando-se que a grande maioria dos elementos estruturais possui face plana, esse tipo de transdutor possibilita bom contato com a superfície das peças a serem ensaiadas, conforme pode-se verificar na Figura 2-7.

Outra possibilidade é a utilização de um transdutor tipo sonda com um único ponto de contato. Este transdutor oferece vantagens já que não é necessário o uso de acoplantes. Pode-se ganhar tempo e melhorar a precisão de algumas aplicações. Estes transdutores podem também ser utilizados em superfícies curvas em contraste com os transdutores de superfície plana. O uso dos transdutores tipo sonda tem sido limitado. Na Figura 2-8 é apresentada foto dos mesmos.



Figura 2-7 Transdutor plano de 50,0 mm e 54 kHz.



Figura 2-8 Transdutor tipo sonda

2.5. Formas de leitura

Existem três tipos de configurações nas quais os transdutores podem ser arranjados. Conforme o tipo de arranjo, a transmissão do pulsos ultrassônicos é feita no modo direto (A), semi-direto (B) e indireto (C).

Os procedimentos de medição estão representados nas Figura 2-9, Figura 2-10 e Figura 2-11.

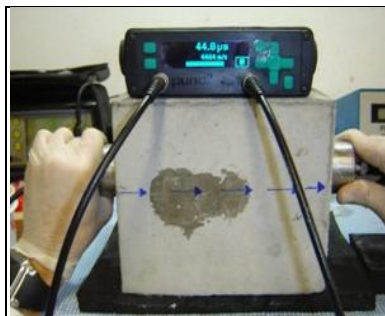


Figura 2-9 Arranjo dos transdutores para medição direta



Figura 2-10 Arranjo dos transdutores para medição semi-direta



Figura 2-11 Arranjo dos transdutores para medição indireta.

No modo de transmissão direto, o transdutor e o receptor são posicionados em faces opostas e os pulsos de energia são transmitidos em ângulo reto com a superfície do transdutor emissor, ou seja, a amplitude do sinal é máxima. Este método de leitura é mais confiável sob o ponto de vista da determinação do tempo de transmissão (BUNGEY, 2006).

O modo transmissão semi-direto pode algumas vezes ser usado de maneira satisfatória, se a distância entre os transdutores não for tão grande. A sensibilidade será menor e, se estes requisitos não são satisfeitos, é possível que o sinal recebido não seja claro, devido a atenuação do sinal recebido (BUNGEY, 2006).

O modo indireto é o menos satisfatório, uma vez que a amplitude do sinal recebido pode ser menor que 3%, se comparado à transmissão direta. O sinal recebido é dependente da dispersão dos pulsos devido às discontinuidades, sendo, portanto, altamente suscetível a erros

(BUNGEY, 2006).

Na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas utilizando a transmissão indireta não se tem um conhecimento preciso da trajetória de propagação dos pulsos e, portanto, é necessário um procedimento específico, como o descrito pela BS EN 12504-2004, no qual o transdutor emissor é fixado, variando-se a posição do transdutor receptor em espaços regulares previamente estabelecidos. A velocidade é dada pela inclinação da reta ajustada entre os tempos de propagação medidos e as distâncias entre os transdutores.

Faz-se importante lembrar que, neste caso, a velocidade dos pulsos será predominantemente influenciada pela camada superficial do concreto, a qual pode não ser representativa do concreto do elemento testado e o comprimento percorrido pela onda é incerto (BUNGEY, 2006).

Essa camada pode apresentar-se diferente devido aos procedimentos de adensamento e cura, acabamento superficial, ataque por sulfatos, ação do gelo e degelo, corrosão da armadura e ação do fogo. Por outro lado essa mesma desvantagem poderá auxiliar na determinação das espessuras de concreto com diferentes níveis de qualidade (FHWA, 1997).

YAMAN *et al* (2001) compararam as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas em lajes, utilizando a transmissão direta e a indireta. Eles constataram que os valores das velocidades obtidas pela transmissão indireta são estatisticamente similares aos valores obtidos pela transmissão direta, desde que as lajes apresentem propriedades uniformes, incluindo a umidade ao longo da superfície e da espessura.

TRICHES *et al* (2006) obtiveram relação em torno de 0,9 entre a medida indireta e a medida direta, em concreto compactado com rolo.

Independente da forma na qual as medidas sejam realizadas, durante a execução do ensaio devem ser evitadas vibrações, perfurações ou choques no elemento a ser testado (MALHOTRA, 2004).

2.6. Dimensões do elemento a ser ensaiado

Dificuldades surgem quando pequenos elementos estruturais são ensaiados, pois estes podem não ser considerados como um meio

efetivamente infinito. Isso irá ocorrer quando a largura do elemento estrutural a ser ensaiado for menor que o comprimento de onda, (λ), (BUNGEY, 2006). Como o comprimento de onda é dado pela Equação 2-4, tem-se que a largura mínima do elemento a ser ensaiado depende da frequência do transdutor utilizado e da velocidade, conforme Tabela 2-1.

$$\lambda = \frac{v_c}{f} \quad \text{Equação 2-4}$$

Tabela 2-1 Valores mínimos para a largura dos membros e dimensão máxima característica (BUNGEY, 2006)

Frequência do transdutor	Largura mínima do membro a ser ensaiado ou valor máximo da dimensão máxima característica (mm)	
	$V_c=3800$ m/s	$V_c=4600$ m/s
54 kHz	70	85
82 kHz	46	56
150 kHz	25	30

Para que seja possível evitar perda de sinal no receptor, o comprimento de onda deve ser maior que a dimensão máxima característica do agregado graúdo, embora isso normalmente não seja um problema.

A BS EN 12504-4 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2004) recomenda que o percurso mínimo seja de 100 mm, para concreto com dimensão máxima característica menor ou igual a 20 mm e de 150 mm, para os concretos produzidos com agregados graúdos com dimensão máxima característica entre 20 e 40 mm.

Para Bungey (2006) a medida da velocidade poderá decrescer com o aumento do comprimento da peça e uma redução típica de 5% para um aumento de 3 para 6 m possa ocorrer.

2.7. Acurácia e repetitividade

O coeficiente de variação interno do método de ensaio da velocidade de pulsos ultrassônicos, obtido por vários pesquisadores, dentre eles os citados pelo ACI COMMITTEE 228 (2003), é apresentado na Tabela 2-2

Tabela 2-2 Coeficiente de variação interno do método de ensaio da velocidade de pulsos ultrassônicos (ACI Committee 228, 2003)

Referência	Coeficiente de variação %	
	Intervalo	Média
Keiller (1984)	0,5 a 1,5	1,1
Carette e Malhotra (1984)	0,1 a 0,8	0,4
Bocca (1984)	0,4 a 1,2	0,7
Yun et al (1988)	0,4 a 1,1	0,6
Leshchinsky, Yu e Goncharova(1990)	0,2 a 4,0	1,9
Phoon, Lee e Loi (1999)	1,1 a 1,2	1,2

Uma vez que se tenha curvas de correlação confiáveis entre velocidade de pulsos ultrassônicos (V.P.U.) e a resistência à compressão e juntamente com boas condições de ensaio, é possível realizar estimativas de resistência à compressão do concreto com variação de $\pm 20\%$, a um nível de confiabilidade de 95% (BUNGEY, 2006).

O erro da estimativa cresce na medida em que o valor individual se afasta do valor médio, a partir dos quais se produziu a correlação, além disso, a correlação entre a v.p.u. e a resistência à compressão não é linear. Portanto, os erros de estimativa crescem com o aumento do valor da velocidade, sendo mais apropriado tratar com o erro da previsão.

A acurácia do ensaio decresce com o aumento dos níveis de resistência de tal forma que estimativas acima de 40 MPa devem ser tratadas com grande cautela (BUNGEY, 2006).

2.8. Vantagens da utilização do ultrassom

Dentre as vantagens da aplicação deste método podem ser citadas as seguintes: facilidade e rapidez de realização do ensaio; baixo custo operacional; acompanhamento do comportamento do concreto na estrutura, tanto nos casos de ganho de resistência quanto nos casos de alteração do concreto por agentes agressivos; não gera danos, nem marcas na estrutura; o equipamento é leve e fácil de transportar; os dados podem ser armazenados no próprio equipamento, e; é possível inspecionar grande volume de concreto (ACI COMMITTEE 228, 2003), (BUNGEY, 2006). Pode ser empregado nos mais variados tipos de concreto: concreto convencional, de alto desempenho, auto-adensável,

compactado a rolo e leves.

O método da velocidade de pulsos ultrassônicos permite após a concretagem a verificação e/ou alterações na qualidade do adensamento do concreto lançado na estrutura, além disso, pode-se verificar a uniformidade do concreto recebido. Em idades mais avançadas pode-se estimar a resistência à compressão.

A qualidade do concreto é variável ao longo da espessura da peça, ou seja, do exterior para o interior, devido às melhores condições de hidratação do cimento no interior da peça (melhores condições termohigrométricas). Entretanto, quando se emprega o método da velocidade de pulsos ultrassônicos, os pulsos atravessam toda a espessura da peça e, conseqüentemente, captam as diferenças existentes ao longo da espessura da peça.

2.9. Desvantagens da utilização do ultrassom

Nas primeiras idades, pequenos ganhos de resistência geram significativas mudanças na velocidade, entretanto, em idades mais avançadas, esses mesmos ganhos de resistência não produzem aumento significativo na velocidade. Por exemplo, um aumento de resistência de 3 a 8 MPa, pode gerar um acréscimo de velocidade de aproximadamente 2400 m/s para 3040 m/s. Por outro lado o aumento de resistência de 25 MPa para 30 MPa pode produzir um acréscimo de 3800 para 3920 m/s. Assim a sensibilidade da velocidade de pulsos ultrassônicos como indicativo das mudanças no concreto decresce com a maturidade e a resistência (ACI COMMITTEE 228, 2003).

Quando só se pode realizar o ensaio através do método indireto de propagação, uma desvantagem é que as ondas se propagam através da camada superficial do concreto. Essa camada, devido ao efeito de exsudação e segregação, e possível ação de agentes agressivos, pode apresentar menor valor de velocidade que em outras regiões da peça (MALHOTRA, 2004).

Na utilização deste método para avaliar resistência à compressão, necessita-se estabelecer previamente uma curva de correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência para a mistura desejada.

2.10. Aplicações do método da velocidade de pulsos ultrassônicos

O método da velocidade de pulsos ultrassônicos pode ser aplicado tanto em laboratório quanto em campo. Além disso, ele pode ser usado para o controle de qualidade, assim como na análise da deterioração da peça. Aplicações usuais incluem o estabelecimento da homogeneidade do concreto, estudo da hidratação, estimativa da resistência do concreto e estudos sobre a durabilidade do concreto.

2.10.1. Estabelecimento da homogeneidade do concreto

Os problemas relativos à homogeneidade podem ter origem em diversas causas, como: variação da qualidade dos procedimentos de lançamento, adensamento e cura, ataque por sulfatos, reação álcalis-agregado, exposição ao fogo, gelo-degelo, entre outros.

O método da velocidade de pulsos ultrassônicos é adequado para o estudo da homogeneidade do concreto e, portanto, de uma avaliação relativa da qualidade do concreto. As heterogeneidades tais como fissuras internas, deterioração, ‘ninhos de concretagem’ e variações na mistura do concreto causam variações na velocidade de pulsos ultrassônicos.

Além disso, a resistência do concreto *in-loco* pode sofrer variações, que podem estar relacionadas tanto com o processo produtivo (heterogeneidade nos insumos, problemas na dosagem e no transporte) assim como problemas na execução da concretagem, tais como: lançamento, adensamento, cura.

Durante o processo de concretagem é importante levar em consideração as características dos elementos estruturais, isto é, a relação área/volume, densidade de armadura, inclinação das formas, entre outras. As taxas de armadura podem variar, assim como o espaçamento entre barras. Em casos extremos, pode ser necessário alterar a trabalhabilidade do concreto. A mudança de trabalhabilidade pode ser obtida através da adição de aditivos plastificantes ou superplastificantes ou através da adição de água. Quando o aumento de trabalhabilidade é conseguido a partir da adição de água, faz-se necessário aumentar o consumo de cimento para manter a mesma relação água/cimento e,

assim não alterar a resistência característica, entretanto tal procedimento acarreta aumento no volume de pasta e mudanças no módulo de elasticidade, assim como possíveis alterações na velocidade de pulsos ultrassônicos.

Uma das aplicações do método da velocidade de pulsos ultrassônicos é o de verificar a homogeneidade do concreto na estrutura, isto significa, em tese, a verificação tanto da uniformidade da qualidade do processo produtivo do concreto quanto a uniformidade das atividades de lançamento, adensamento e cura. Contudo, é importante considerar que variações no volume de pasta ou na proporção de agregados podem produzir variações significativas nas velocidades dos pulsos ultrassônicos sem, contudo, produzir diferenças importantes na resistência.

Entre as várias pesquisas realizadas em estruturas existentes uma merece menção especial, realizada em 1953 por Paker da comissão de energia hidroelétrica de Ontário, no Canadá. A pesquisa foi realizada em uma barragem construída em 1914. Um total de 50000 leituras foi realizado, com a maioria delas espaçadas em 300 mm. As velocidades medidas variaram na estrutura da barragem de 1525 a 5185 m/s, sendo possível a partir destes valores determinar com sucesso áreas com avançada deterioração (MALHOTRA, 2004). Durante o período de 1948 a 1965 milhares de leituras foram realizadas em 29 barragens de concreto. McHenry e Oleson (1967 *apud* MALHOTRA; CARINO, 2004), citam 10 desses casos históricos nos quais as medidas das velocidades tinham sido uma avaliação suplementar para outras observações para resolver questões relativas ao reparo ou manutenção das barragens.

A análise estatística de resultados, juntamente com a produção de contornos de velocidade de pulsos em um membro da estrutura, podem frequentemente possibilitar valiosas informações relativas à variabilidade do material e aos padrões de construção. TOMSETT (1980 *apud* BUNGEY, 2006), tem sugerido que para uma única unidade construída a partir de uma única carga de concreto, o coeficiente de variação de 1,5% representaria bons padrões de construção e que esse valor subiria para 2,5% onde várias cargas ou várias unidades pequenas estivessem envolvidas. Um coeficiente de variação típico de 6 a 9% é ainda sugerido para um concreto semelhante ao longo de uma estrutura inteira.

DORNELLES *et al.* (2004) desenvolveram um ábaco de fácil determinação de não homogeneidades internas em peças estruturais de concreto. Porém a eficácia desta determinação depende da escolha de pontos adequados para realização das leituras, que deve ser feita através de um reticulado condizente com a dimensão suposta da região defeituosa, dependendo também da peça estrutural e da precisão exigida do ensaio.

2.10.2. *Estudo sobre a hidratação do cimento*

A hidratação do cimento é um complexo processo químico que envolve a mudança do estado de suspensão para o estado sólido. Durante o período de suspensão, o método da velocidade dos pulsos ultrassônicos é pouco sensível ao crescimento da estrutura da pasta. A fase água/ar, especialmente as bolhas de ar presentes na água, age como um fator que determina a velocidade dos pulsos ultrassônicos. Nesse período, as partículas de cimento estão isoladas umas das outras, enquanto os poros capilares com água estão conectados. Além disso, os pulsos ultrassônicos são fortemente atenuados pela quantidade enorme de minúsculas bolhas de ar na mistura fresca. Contudo, se for levada em conta à influência das bolhas de ar, o valor da velocidade dos pulsos ultrassônicos será de aproximadamente 200 m/s, em um concreto fresco com 1 a 2 % de ar. Na Figura 2-12, tem-se uma ilustração da dispersão das partículas de cimento na fase inicial, estágio de suspensão (YE *et al.*, 2004).

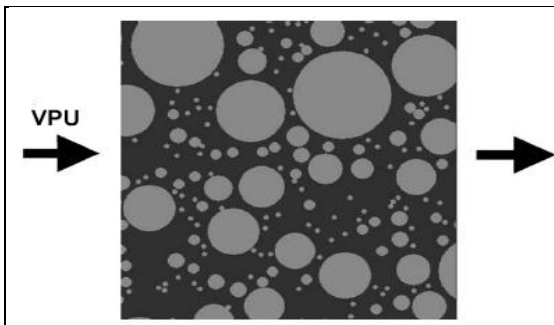


Figura 2-12 Fase inicial, estágio de suspensão, onde as partículas de cimento estão isoladas uma das outras (Ye *et al.*, 2004).

Ao final desse período, as menores partículas são dissolvidas e aderidas

às camadas externas das partículas maiores e pequenos feixes isolados de substância sólida são formados. Esses pequenos feixes isolados são a base da rede de sólidos. Essa rede de sólidos continua a se desenvolver até que se torne interconectada. Nesse momento crítico, o caminho da percolação sólida é formado. Na Figura 2-13 tem-se uma representação esquemática do caminho dos pulsos ultrassônicos, os quais, nesta fase, podem se propagar através da fase sólida ao invés da fase líquida (YE *et al.*, 2004).

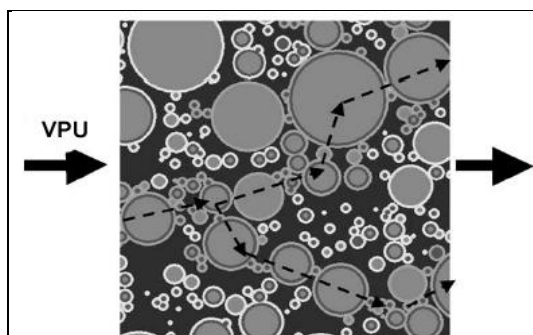


Figura 2-13 Rede de sólidos interconectados, início da propagação dos pulsos ultrassônicos através da fase sólida (Ye *et al.*, 2004).

Após o início do limiar da percolação sólida, ocorre um rápido aumento na velocidade dos pulsos ultrassônicos. Esse período pode durar de 10 a 60 horas, dependendo da temperatura de cura e tipo de cimento, os quais influenciam a taxa de hidratação. O aumento da velocidade de pulsos ultrassônicos depende do aumento da conexão dos sólidos, a qual por sua vez depende da formação de sólidos, ou seja, da hidratação. Da Figura 2-12 a

Figura 2-14, tem-se um aumento na fração de sólidos conectados de 30% para 60%, correspondendo a um aumento no grau de hidratação de 2,7% para 25% em 15 horas (YE *et al.*, 2004).

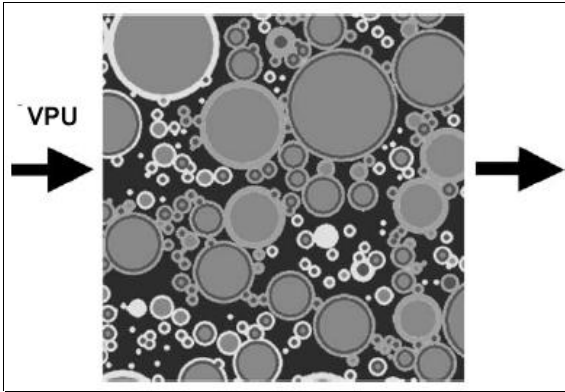


Figura 2-14 Conectividade da fase sólida, 25% de hidratação, volume de sólidos conectados 60% (Ye *et al.*, 2004).

Mudanças na estrutura interna do concreto podem ser monitoradas na mesma amostra testada. Muitos pesquisadores têm publicado informações sobre o sucesso da aplicação da velocidade de pulsos ultrassônicos no monitoramento da pega e endurecimento da pasta de cimento, argamassa e concreto.

O método é particularmente adequado para a detecção das mudanças durante as primeiras 36 horas após a adição da água à mistura do concreto. Uma aplicação deste método é a avaliação do tempo de pega para diferentes tipos de cimentos ou aditivos a serem usados em um dado projeto (MALHOTRA, 2004).

O método da velocidade de pulsos ultrassônicos é adequado para verificar a influência de aditivos plastificantes, aceleradores, incorporadores de ar, no retardo ou na aceleração da hidratação de pastas, argamassas e concretos. GROSSE e REINHARDT (2001) apresentaram estudos do monitoramento das propriedades dos concretos e argamassas, a partir do estado plástico, através de métodos combinados, dentre eles a velocidade de pulsos ultrassônicos. Nesse trabalho percebe-se nitidamente a influência da relação água/cimento, emprego ou não de aditivo na velocidade de pulsos ultrassônicos. A Figura 2-15 mostra o comportamento de diferentes concretos durante as primeiras horas da hidratação (GROSSE; REIHHARDT, 2001).

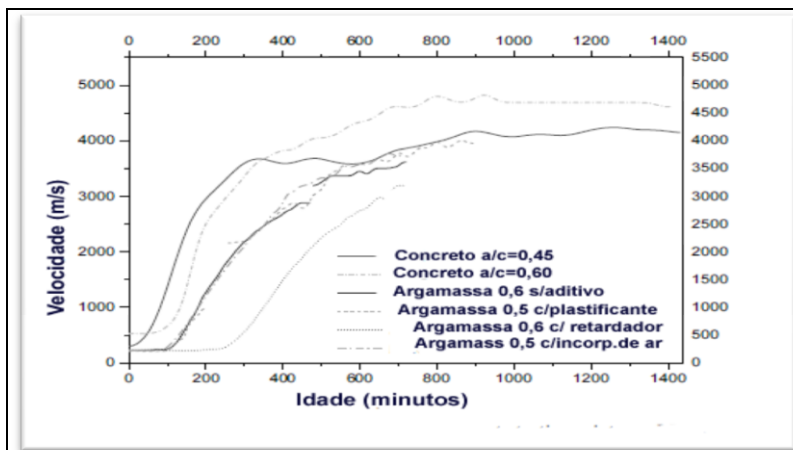


Figura 2-15 Efeito da relação água/cimento e da presença de diferentes aditivos na velocidade de pulsos ultrassônicos em concretos e argamassas (Grosse e Reinhardt, 2001).

WHITEHURST (1951 *apud* MALHOTRA; CARINO, 2004) apresentou resultados de ensaios realizados em prismas de concreto, com as dimensões de 102x102x406mm, na qual foram empregados diferentes tipos de cimentos. Ensaio de velocidade empregando SINOSCÓPIO foram realizados periodicamente, imediatamente após a desmoldagem e após terem sido transcorridas 8 horas ou mais. Velocidades iniciais na ordem de 1200 m/s foram observadas. Durante as primeiras horas iniciais a velocidade cresceu em uma taxa muito elevada. Após um período que variou de 4 ½ a 8 ½ h a taxa de ganho de velocidade cresceu repentinamente e continuou a um ritmo menor.

O ponto no qual ocorre essa mudança, ou seja, a mudança na taxa de ganho de resistência foi considerada como sendo o início de pega do concreto. Os resultados de WHITEHURST, juntamente com os reportados por CHEESMAN (1994 *apud* MALHOTRA; CARINO, 2004), são mostrados na Figura 2-16.

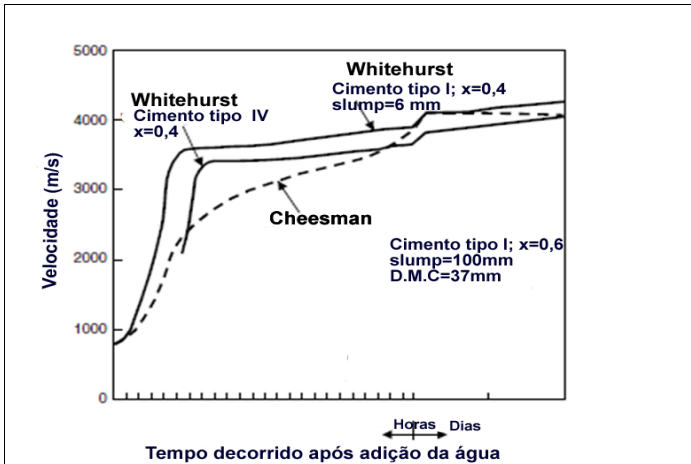


Figura 2-16 Evolução de velocidade de pulsos ultrassônicos com o tempo a partir da adição da água, em concretos com diferentes tipos de cimento (MALHOTRA E CARINO, 2004)

A taxa de hidratação das pastas e conseqüentemente a taxa de aumento de velocidade de pulsos ultrassônicos, além da relação água/cimento e da temperatura de cura, é influenciada pela composição química, finura, distribuição granulométrica e imperfeições estruturais dos compostos do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O crescimento da resistência está relacionado ao grau de hidratação (α), conforme comprovado por BYFORS (1980 *apud* PINTO, 1997). A Figura 2-17 apresenta o referido comportamento.

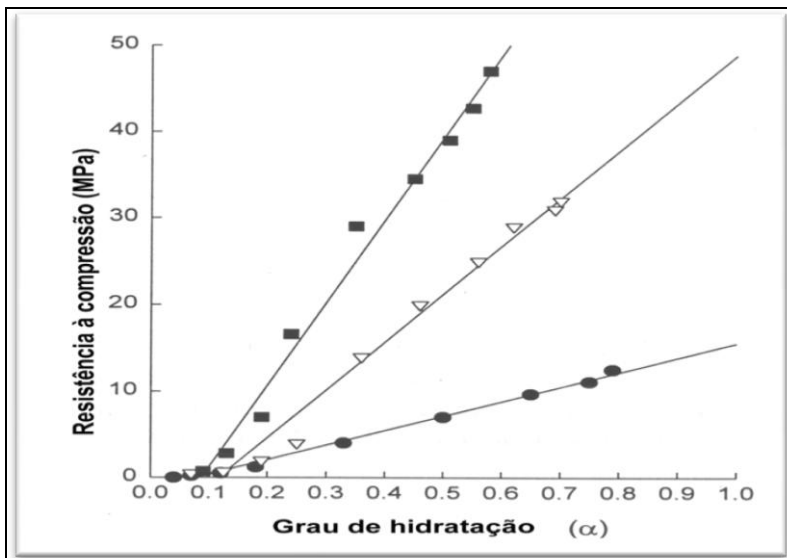


Figura 2-17 Relação entre grau de hidratação e resistência à compressão, $a/c=0,40$ (quadrados cheios), $a/c=0,58$ (triângulos vazios) e $a/c=1,0$ (círculos cheios) (PINTO, 1997).

PINTO *et al.* (2000) relacionaram a velocidade do pulsos ultrassônicos com a quantidade de água não evaporável por massa de cimento em argamassas. Os mesmos concluíram que, e em que pese não existir uma medida direta da taxa de hidratação, pode-se relacionar a quantidade de água não evaporável com o grau de hidratação e, conseqüentemente, com a velocidade de pulsos ultrassônicos.

A Figura 2-18 apresenta a relação obtida. Percebe-se que há uma dependência direta entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a quantidade de água não evaporável.

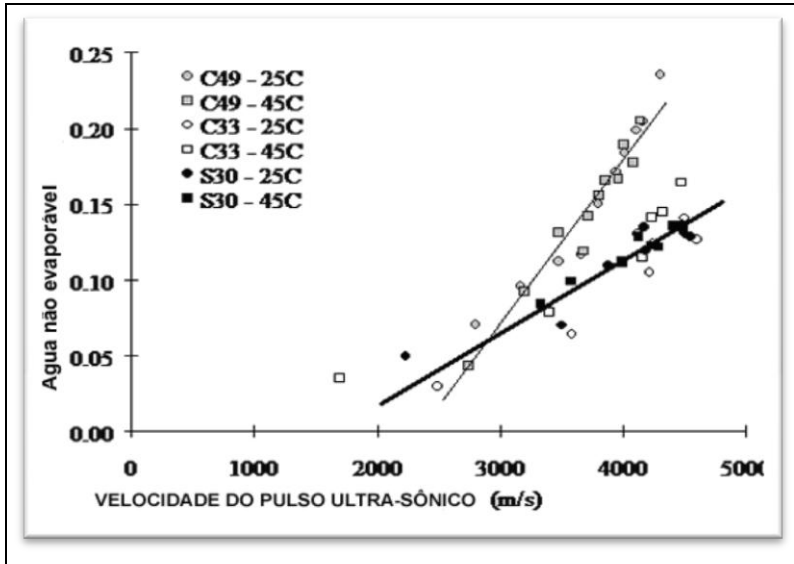


Figura 2-18 Relação entre velocidade de pulsos ultrassônicos e água não evaporável (PINTO *et al.*,2000).

2.10.3. Estimativa da resistência do concreto

Durante os anos 60 e 70, considerável atenção foi dirigida para a obtenção de maiores informações sobre o efeito de diferentes fatores sobre a velocidade de pulsos ultrassônicos. Os pesquisadores continuaram investigando e chegaram a um consenso de que não existia uma única correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão (CARINO, 1997). Contudo, e apesar de não existir relação física entre resistência e velocidade, o método da velocidade dos pulsos ultrassônicos pode ser usado para a estimativa da resistência do concreto, tanto *'in-loco'* quanto em estruturas de concreto pré-fabricado ou pré-moldado. A resistência pode ser estimada por meio de correlação pré-estabelecida entre estes dois parâmetros (MALHOTRA; CARINO 2004).

Para BUNGEY (2006), a menos que uma adequada curva de correlação seja obtida, é virtualmente impossível estimar a resistência de uma estrutura *'in-loco'* através da medida da velocidade de pulsos ultrassônicos. Contudo, é possível obter razoável correlação com a resistência à compressão e à flexão em laboratório, o que permite, no

caso de amostras semelhantes, estimativas com erro na ordem de $\pm 10\%$. O referido autor recomenda que se este tipo de procedimento for adotado, é mais confiável que sejam empregados testemunhos e que nas curvas de correlação sejam considerados os efeitos da umidade.

A Tabela 2-3 apresentado por MACHADO (2005) indica as correlações obtidas por vários autores, os intervalos para os quais elas são válidas, o tipo de agregado e de cimento empregado e, também o tipo de corpo-de-prova utilizado.

Verifica-se que não há uma correlação única válida para todas as misturas.

Tabela 2-3 Relação das correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos e resistência à compressão, ao longo do tempo, para os diferentes intervalos de resistência, composição do concreto e tipo de corpo-de-prova.

Autor	Equação	Variação f_c (MPa)	CP utilizado no ensaio de f_c	Agregado graúdo	Tipo de cimento
Elvery e Ibrahim (1976) (a)	$f_c = 0,0012e^{2,27V} \pm 6,4$	15 a 60	Cubo (100 mm)	Seixo (19,0 mm)	Cimento Portland comum
Teodoru 1988 (b)	$f_c = 0,00121 e^{2,30V}$	4 a 80	-----	Quartzzo	Cimento Portland comum
Yun et al 1988 (c)	$f_c = 0,329 V - 1065$	21, 28 e 35	Testemunho (150 x 300) mm	Seixo (25 e 40mm)	Cimento Portland comum
Almeida 1993 (d)	$f_c = 0,0133 \cdot V^{5,545}$ (1 etapa) $f_c = 0,01 V^{5,654}$ (2 etapa)	40,1 a 120,3	Cubo (150 mm)	Granito (25 mm)	Cimento Portland comum
Ferreira e Castro 1999 (e)	$f_c = 1,304 V^{2,222}$	15 a 40	Cilindro (150x300) mm	Agregado britado (25 mm)	CP- II-F-40
Phoon et al (1999) (f)	$f_c = 142,4 V - 587 + E$	35, 55 e 75	Cubo (150 mm)	Granito britado (5mm e 20 mm)	-----
Soshiroda e Varaputhaport (1999) (g)	$f_{c28} = 44,52 V - 126,83$ $f_{c28} = 54,18 V_{28} - 206,27$	20 a 65	Cubo (150 mm)	Seixo	Cimento Portland Comum
Pascali et al (2000) (h)	$f_c = 10^{-28} \cdot V^{8,1272}$	30 a 150	Cubo (150 mm)	Calcário (25 mm)	Cimento Portland (AR)
Qasrawi (2000) (i)	$f_c = 32,72 - 129,077$	6 a 42	Cubo (150 mm)	Diversos	Diversos
Evangelista (2002) (j)	$f_c = 0,025 \cdot e^{2,138V}$ (M1) $f_c = 0,0124 \cdot e^{1,8146V}$ (M2) $f_c = 0,0031 \cdot e^{2,062V}$ (M3)	10,8 a 53 10,1 a 46 8,0 a 48,7	Cilindro (150 x 3000 mm)	Gnaisse (19,0 mm) Gnaisse (9,5 mm) Sienito (19,0 mm)	CP III-32

Unidades: (c) f_c em kgf/cm^2 e V (m/s), (h) f_c em MPa e V em (m/s), Demais f_c em MPa e V em (km/s)

E = faixa de incerteza da estimativa

Fonte: MACHADO (2005)

2.11. Fatores que afetam a velocidade de pulsos ultrassônicos

Apesar de ser relativamente fácil de realizar o ensaio para determinar a velocidade de pulsos ultrassônicos, é necessário que o mesmo seja conduzido de maneira que as leituras sejam reproduzíveis e afetadas apenas pelas propriedades do concreto sobre análise. Os fatores que afetam a velocidade de pulsos ultrassônicos podem ser divididos em duas categorias: fatores dependentes das propriedades intrínsecas do concreto e outros fatores (MALHOTRA, 2004).

2.11.1. Fatores dependentes das propriedades do concreto

Conforme MALHOTRA e CARINO (2004), a relação entre resistência e velocidade não é única, sendo afetada por muitos fatores. Citam-se a seguir os principais fatores que afetam a velocidade dos pulsos ultrassônicos e que dependem das características do concreto.

2.11.1.1. Tipo de agregado graúdo

Muitos pesquisadores têm verificado que a velocidade de pulsos ultrassônicos através do concreto é influenciada pelo tipo e quantidade de agregado graúdo, eles tem claramente demonstrado que não se deve estimar a resistência do concreto a partir da velocidade de pulsos ultrassônicos a menos que correlações tenham sido realizadas previamente, empregando-se o mesmo tipo de concreto (MALHOTRA, 2004; ACI COMMITTEE 228, 2003; BUNGEY, 2006; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Em geral a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta é inferior à velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

SOLIS-CARCANO e MORENO (2008) produziram 100 diferentes misturas de concreto utilizando dez diferentes tipos de agregados calcários. Após terem desenvolvido critério de qualidade para estes, conseguiram estabelecer um melhor ajuste nas correlações entre resistência e velocidade de pulsos ultrassônicos. A partir de uma determinada velocidade e um dado valor de qualidade do agregado era possível estimar a resistência do concreto. O que causa bastante interesse nesse trabalho é o fato de os autores terem encontrado uma forma de levar em consideração as variações de qualidade dos agregados, mesmo quando se tratava de agregados de mesma origem

mineralógica, no caso calcário. Concluíram que para um dado valor de resistência, quanto pior o agregado, menor era a velocidade de pulsos ultrassônicos.

VASCONCELOS *et al.* (2008) estudaram as propriedades físicas e mecânicas de oito rochas graníticas. A Tabela 2-4 apresenta uma breve descrição petrográfica das rochas empregadas por esses autores.

Tabela 2-4 Descrição petrográfica dos granitos estudados por VASCONCELOS, 2008

Designação do granito	Descrição	Comprimento médio do grão (mm)	Intervalo de variação do tamanho dos grãos (mm)	Direção do carregamento
BA	Granulação fina a média biotita granito porfírtica	0.5 a 0.6	0.2 a 6.5	Paralelo ao plano de fissura
GA, GA*	Granulação de fino à médio, com tendência porfírtica, dois granito mica	0.5 a 0.6	0.3 a 7.5	Paralelo ao plano de fissura
RM	Granito biotita com granulação média	1.3–2.3	0.4–13.5	Paralelo ao plano de fissura
MC	Granito porfírtico biotita granulação graúda	1.6–2.4	0.3–16.5	Paralelo ao plano de fissura
AF	Granulação de fina a média/ duas micas granito	0.5–0.6 0	0.1–4.0	Paralelo e perpendicular ao plano de foliação.
MDB, MDB*	Granulação média / duas micas granito	0.7–0.9	0.3–14.5	Paralelo e perpendicular ao plano de foliação
PTA, PTA*	Granulação de fina à média/ duas micas granito	0.7–0.8	0.3–12.0	Paralelo e perpendicular ao plano de foliação e ao plano de fissura
PLA, PLA*	Granulação de media a graúda-Granito porfírtico biotita	0.5–1.1	0.2–14.0	Paralelo e perpendicular ao plano de fissura.

As propriedades físicas foram densidade, porosidade e velocidade de pulsos ultrassônicos, e as mecânicas, foram módulo de elasticidade, resistência à tração, resistência à compressão. Os pesquisadores encontram boa correlação não linear entre a resistência à tração e a

velocidade de pulsos ultrassônicos, ($r^2=0,89$). Entretanto, a estimativa da resistência à compressão, a partir da velocidade de pulsos ultrassônicos, não foi boa, (coeficiente de correlação de $r^2=0,72$). A anisotropia de alguns granitos, particularmente o PLA e PLA* pode ter sido o motivo desta baixa correlação.

Para a medição da velocidade dos pulsos ultrassônicos, VASCONCELOS *et al.* (2008) empregaram amostras de diferentes tamanhos, cubos de 150 mm de aresta, cilindros com diâmetro de 75mm x 150 mm de altura e prismas de 40 mm x 50 mm x 80 mm. Concluíram que a dimensão e a forma dos corpos de prova não afetaram significativamente os resultados de velocidade, para a maioria dos granitos analisados, sendo essas diferenças menores que 6,5%. Entretanto, em granitos que apresentavam anisotropia, a velocidade obtida em cubos foi superior em 10% e 17,5% na direção paralela e perpendicular à da foliação, respectivamente. Essa constatação fez com que os autores sugerissem, para o ensaio de velocidade, formas e tamanhos diferentes daqueles empregados nos ensaios mecânicos, pois as variações de velocidade foram significativas quando destas mudanças. Com isso, correlações estatísticas entre a VPU e os parâmetros mecânicos podem ser propostas.

As rochas graníticas, na condição seca, apresentaram velocidades que variaram de 1956 a 4805 m/s. Quando a medição foi realizada na condição saturada houve um aumento de velocidade. Em granitos de baixa porosidade, tais como BA e GA, a diferença de velocidade foi de 14,1% e 17,4%, respectivamente, e nos granitos RM e MC, a diferença encontrada foi de 30,5% e 35%, respectivamente.

A Figura 2-19 apresenta a velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas graníticas analisadas, na condição seca e na condição saturada.

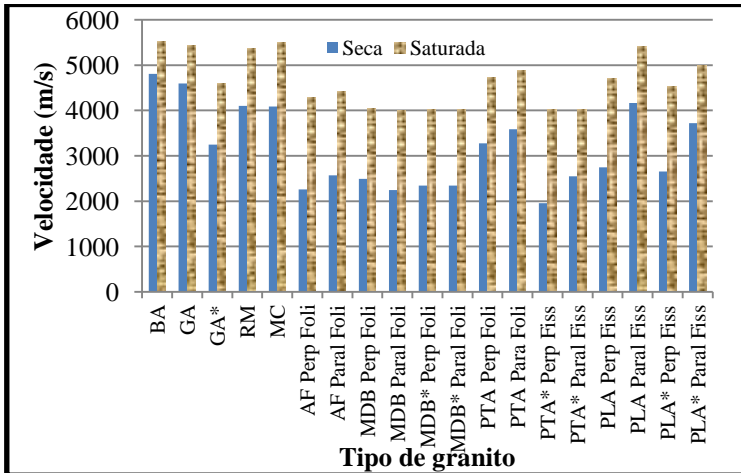


Figura 2-19 Gráfico das velocidades de pulsos ultrassônicos das diferentes rochas graníticas, na condição seca e saturada (Vasconcelos *et al.*, 2008).

As rochas graníticas analisadas apresentaram valores de resistência que variaram de 26 MPa a 159,8 MPa, sendo que o módulo de elasticidade variou de 11028 MPa a 63794 MPa.

Para NEVILLE (1997) não existe uma relação geral de dependência entre a resistência e o módulo de elasticidade de diferentes agregados. Em pesquisa realizada com agregados americanos, os agregados graníticos apresentaram valores de resistência oscilando entre 114 e 257 MPa, tendo valor médio de 181 MPa. Entretanto, esses valores são influenciados pelos planos de clivagem e podem não ser significativos quando se trata da rocha que foi fragmentada até os tamanhos que serão usados no concreto (NEVILLE, 1997). Diante dessa consideração, não se pode descartar a possibilidade de que os agregados graúdos apresentem resistência à compressão superior à resistência da rocha mãe.

A porosidade das rochas é outro aspecto passível de ser considerado. Entre as rochas mais comuns tem-se o arenito, quartzito, calcário e granito. O intervalo de variação da porosidade dessas rochas é apresentado na Tabela 2-. Através da análise dos valores percebe-se que as três primeiras rochas apresentam grande variabilidade no valor da

porosidade. Conseqüentemente, é de se esperar que concretos produzidos com agregados graúdos obtidos a partir das referidas rochas-mãe, ainda que de mesma origem mineralógica, apresentem diferentes porosidades.

Tabela 2-5 Porosidade de algumas rochas (NEVILLE, 1997)

Tipo de rocha	Porosidade (%)
Arenito	0,0 - 48
Quartzito	1,9 – 15,1
Calcário	0,0 – 37,6
Granito	0,4 – 3,8

Concretos produzidos com agregados de elevado módulo de elasticidade apresentam pouca deformabilidade e poderiam aumentar os níveis de tensão junto à zona de transição e romperem com baixo nível de deformação. Ao passo que concretos produzidos com agregados de moderado e baixo módulo de elasticidade permitiriam maior deformabilidade e suscitariam menores níveis de tensão na zona de transição o que poderia permitir o alcance de maiores resistências à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.11.1.2. Dimensão máxima característica do agregado graúdo

Concretos produzidos com agregados de diferentes dimensões máximas características e mesma relação água/cimento apresentam diferentes valores de velocidade de pulsos ultrassônicos (MALHOTRA; CARINO, 2004; ACI COMMITTEE 228, 2003; BUNGEY, 2006).

ABO-QUDAIS (2005), estudando concretos produzidos com agregados de dimensão máxima característica igual a 25 mm, 19 mm, 12,50 mm e 4,8 mm, confirmou que a velocidade do pulsos ultrassônicos decresce na proporção em que a dimensão máxima característica decresce, sendo esse aumento mais significativo em concretos com maior relação água/cimento. Além disso, constatou que os níveis de resistência cresceram na medida em que ocorreu a redução da dimensão máxima do agregado graúdo. A Figura 2-20 apresenta os resultados obtidos por ABO-QUDAIS (2005).

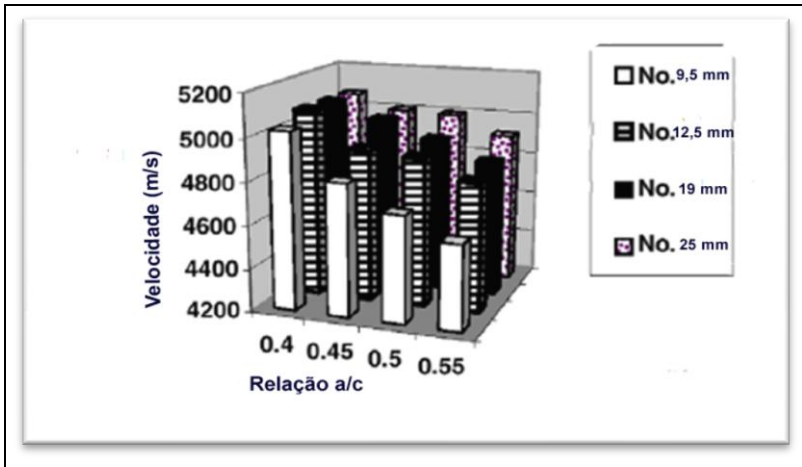


Figura 2-20 Efeito da dimensão máxima característica na velocidade de pulsos ultrassônicos em concretos produzidos com diferentes relações água/cimento, ABO-QUAIS (2005)

2.11.1.3. Relação água/cimento

O efeito da relação água/cimento na velocidade de pulsos ultrassônicos tem sido estudado por vários pesquisadores, dentre eles: BEN-ZEITUN, (1986), EVANGELISTA (2002), LIN *et al.* (2003), LIN *et al.* (2007), DEL RIO (2004), ABO-QUAIS, (2005) e MACHADO (2005).

A velocidade de pulsos ultrassônicos através do concreto é dependente do tempo necessário para que os pulsos ultrassônicos atravessassem determinado volume de pasta e de agregados. A velocidade de pulsos nas pastas é dependente da interconexão dos produtos sólidos da hidratação sendo, portanto, variável no tempo e dependente da relação água/cimento, tipo de cimento e grau de hidratação. Quando o concreto é produzido com baixa relação água/cimento, os grãos de cimento estão mais próximos uns dos outros e, assim, a interconexão é facilitada, conseqüentemente o ganho de velocidade nas primeiras idades cresce com a redução da relação água/cimento.

LIN *et al.* (2003), ao analisar o efeito da relação água/cimento e da relação agregado miúdo/agregados totais na velocidade de pulsos ultrassônicos e na resistência à compressão, mantiveram constante o volume de pasta em 36%. A Figura 2-21 facilita o entendimento da evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos com o tempo em

concretos produzidos com diferentes relações água/cimento (LIN *et al.*, 2003).

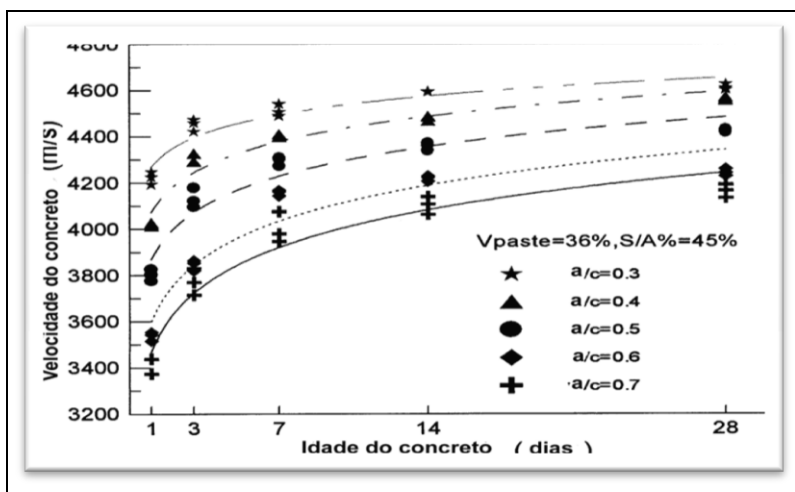


Figura 2-21 Evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos, ao longo do tempo, para concretos produzidos com diferentes relações água/cimento, LIN *et al.*, 2003.

A porosidade capilar está intimamente relacionada com a relação água/cimento e maturidade. Com a redução da relação água/cimento e com o aumento da maturidade, a porosidade capilar irá reduzir substancialmente. Pastas de cimento com relação água/cimento igual a 0,7 podem apresentar porosidade capilar, aos 28 dias, em torno de 37%; nessa mesma idade, pastas com relação água/cimento igual a 0,4 podem apresentar porosidade na ordem de 11% (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Essas diferenças de porosidade refletem-se no do ganho de resistência e módulo de elasticidade e, conseqüentemente, no aumento da velocidade de pulsos ultrassônicos.

BEM-ZEITUN (1986) analisou a influência da relação água/cimento, consumo de cimento, tipo de mistura, da cinza volante, e condições de cura na estimativa da resistência do concreto nas idades de 28 e 63 dias e concluiu que a velocidade de pulsos ultrassônicos é afetada pela relação água/cimento, consumo de cimento, quantidade de adição mineral e tipo de cura.

DEL RIO *et al.* (2004) produziram misturas de concreto com relação a/c

de 0,4 a 0,8 adotando diferentes metodologias de dosagem e confirmaram que existe uma relação exponencial entre resistência à compressão e a velocidade de pulsos ultrassônicos e que ambas variáveis são influenciadas pela relação água/cimento e proporção de agregados graúdos e que, para um mesmo tipo de concreto, é possível estimar a resistência aos 28 dias a partir de leituras de velocidades feitas 2 e 5 dias após a fabricação.

A velocidade de pulsos ultrassônicos pode ser relacionada com a porosidade. LAFHAJ *et al.* (2006) determinaram a porosidade de argamassas produzidas com relação água/cimento de (0,3; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55 e 0,60) e relacionaram essas porosidades com a velocidade de pulsos ultrassônicos. As Figura 2-22 e Figura 2-23 apresentam a relação entre porosidade e relação água/cimento e porosidade e velocidade de pulsos ultrassônicos.

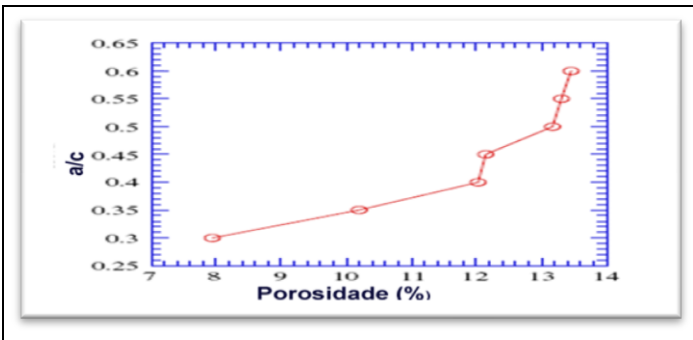


Figura 2-22 Relação entre porosidade e relação água/cimento, LAFHAJ *et al.* (2006).

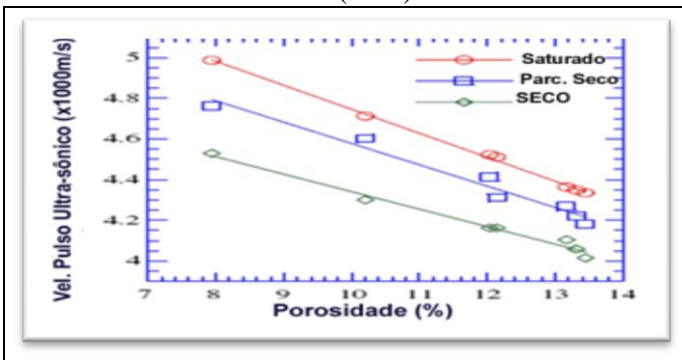


Figura 2-23 Relação entre porosidade e velocidade de pulsos

ultrassônicos nas diferentes condições de ensaio, seca, parcialmente saturada e saturada, LAFHAJ *et al.* (2006).

2.11.1.4. Efeito do volume de agregados ou do volume de pasta

Concretos com mesma relação água/cimento e mesmo tipo de agregados podem ser produzidos com diferentes consistências, ou seja, com diferentes relações água/materiais secos. Quando se aumenta a participação dos agregados miúdos e graúdos no concreto altera-se a consistência, assim o volume de agregados no concreto cresce na proporção em que se reduz a consistência, ocorrendo uma redução no volume da pasta. Com a redução no volume da pasta e aumento no volume de agregados a velocidade de pulsos ultrassônicos irá aumentar sem que necessariamente aumente a resistência do concreto.

MALHOTRA e CARINO (2004) citam trabalhos desenvolvidos por JONES, BULLOCK e WHITEHURST e KAPLAN (2004) os quais comprovaram que, para um mesmo nível de resistência, concretos com maior teor de agregado têm maiores velocidades de pulsos ultrassônicos. Os efeitos da alteração da proporção dos agregados graúdos na mistura do concreto sobre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência são mostrados na Figura 2-24. Observa-se, entretanto, que em se aumentando a proporção tanto de agregado miúdo quanto de agregado graúdo e mantendo-se, por exemplo, a consistência, faz-se necessário, ou adicionar aditivos ou aumentar proporcionalmente a quantidade de água e, neste último caso, ocorre alteração na relação água/cimento (Lei de Lyse). O que o gráfico não mostra é o crescente aumento na relação água/cimento devido o aumento no volume de agregados miúdos e graúdos, razão pela qual ocorre redução na velocidade dos pulsos ultrassônicos. O efeito do aumento da relação água/cimento é mais significativo que o efeito do volume de agregados.

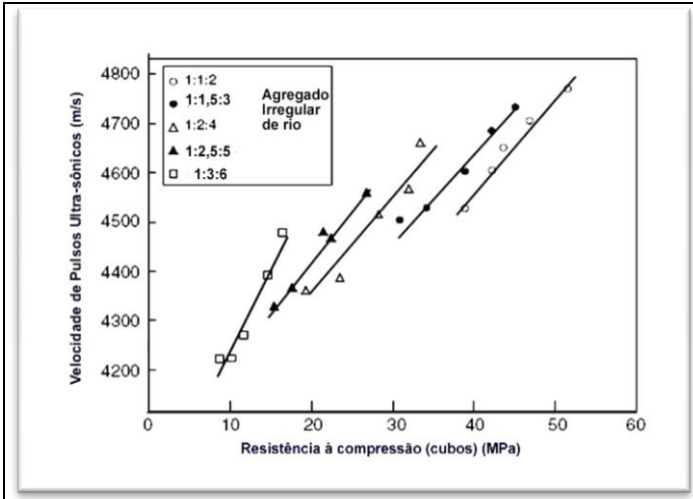


Figura 2-24 Efeito da proporção do cimento: agregado miúdo: agregado graúdo na relação entre resistência à compressão e velocidade de pulsos ultrassônicos (MALHOTRA, 2004).

O módulo de elasticidade é dependente do teor de materiais secos do traço, o que, em outros termos, significa dizer ser dependente das frações volumétricas das fases constituintes do concreto. Então, aquilo a que se denomina ‘qualidade da pasta’, isto é, a relação de quantidade de poros por unidade de volume da pasta, apesar de fundamental importância tanto para a resistência quanto para a rigidez, passa a pesar de maneira diferente para as duas propriedades quando se insere outro princípio, o da ‘quantidade de pasta’ (MONTIJA; DE FIGUEIREDO, 2008).

TRTNIK *et al.* (2009) estudou a influência do volume de agregado graúdo na velocidade de pulsos ultrassônicos e na resistência do concreto.

Na Figura 2-25 é possível constatar que, em concretos com o mesmo nível de resistência, a velocidade dos pulsos ultrassônicos cresce com o aumento do volume de agregados graúdos na mistura.

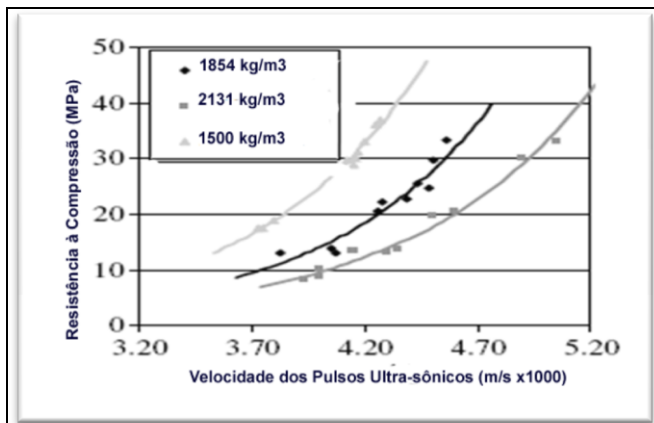


Figura 2-25 Efeito do volume de agregado graúdo na resistência à compressão e na velocidade de pulsos ultrassônicos (TRTNIK, 2009).

No estudo realizado por TRTNIK *et al.* (2009), foi mantida a mesma relação água/cimento e o volume de pasta, mas para que isso fosse possível, fez-se necessário que o concreto fosse aditivado. Adicionando-se mais agregados graúdos ao concreto, gera-se maior área de transição entre agregados graúdos e matriz, aumentando-se, assim, o volume total da zona de transição. Em decorrência disso, não se pode descartar a possibilidade de que concretos com maior volume de agregados graúdos sejam menos resistentes, apesar de possuírem maiores velocidades de pulsos ultrassônicos.

2.11.1.5. Tipo de cimento e porcentagem de adições minerais

A taxa de hidratação dos cimentos depende do tipo e classe de cimento, cimentos com maiores teores de adições minerais se hidrataram a uma menor taxa, por outro lado cimentos mais puros, com maior finura e maior teor de C3S e mais imperfeição estrutural terão elevada taxa de hidratação fazendo com o módulo dinâmico cresça e, conseqüentemente, aumente a velocidade de pulsos ultrassônicos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os valores tanto de resistência quanto de velocidade de pulsos ultrassônicos decrescem na medida em que se substitui o cimento por cinza volante e escória de alto forno ou por ambos. Os ganhos de resistência e de velocidade de pulsos ultrassônicos, em concretos com elevadas substituições de adições minerais, são influenciados pelos tempos de cura. Entretanto, os ganhos de resistência à compressão são

maiores que os ganhos na velocidade de pulsos ultrassônicos (DEMIRBOGA *et al.* 2004).

DEMIRBOGA *et al.* (2004), estudando a relação entre velocidade de pulsos ultrassônicos e resistência à compressão em concretos com altas substituições de cinza volante, escória de alto forno e cinza volante mais escória de alto forno, (50%, 60% e 70%), identificaram diferentes crescimentos de velocidade e resistência para cada mistura. Todas as misturas permaneceram em cura até a idade do ensaio (3, 7, 28 e 120 dias). As correlações entre velocidade e resistência à compressão, nas misturas investigadas, foram elevadas, todas exponenciais, diferindo entre si pelo valor das constantes. Entretanto, quando feita a correlação entre velocidade e resistência com todas as misturas foi possível encontrar um coeficiente de correlação de 0,948. A Figura 2-26 apresenta os resultados obtidos por DEMIRBOGA *et al.* (2004).

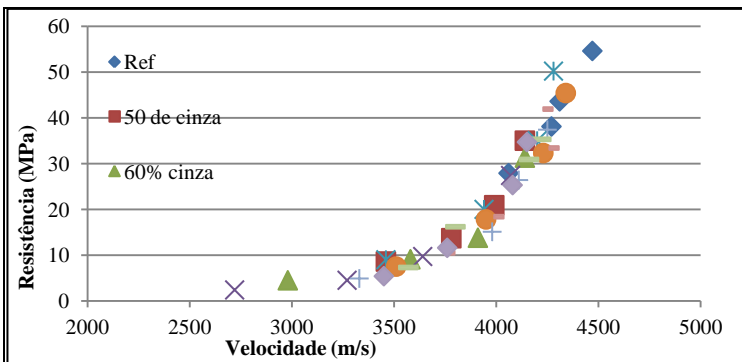


Figura 2-26 Correlação entre V.P.U. e resistência à compressão, com diferentes adições minerais, (DEMIRBOGA *et al.*, 2004).

2.11.1.6. Umidade

O teor de umidade pode alterar de forma significativa a correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão. Com o aumento do teor de umidade ocorre um incremento no módulo de elasticidade e na velocidade de pulsos ultrassônicos, dado que as moléculas de água são menos deformáveis que as moléculas de ar e que a velocidade de pulsos ultrassônicos através da água (1430 m/s) é bastante superior a velocidade do som no ar (340 m/s). Entretanto, quando o concreto é ensaiado à compressão, sua resistência é reduzida na proporção do aumento do teor de umidade. Isto ocorre devido à

redução das forças de Van Der Waals, uma vez que a água aumenta o espaçamento das camadas de C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Assim, se de um lado o aumento da umidade gera um aumento na velocidade de pulsos ultrassônicos, de outro lado reduz os níveis de resistência. Portanto, é preciso verificar a umidade do concreto antes do início do ensaio.

Na medida em que o conteúdo de umidade cresce da condição seca ao ar para a condição saturada é possível que ocorra um aumento de até 5%, na velocidade de pulsos ultrassônicos (ACI COMMITTEE 228, 2003).

As variações ocorridas na velocidade de pulsos ultrassônicos entre a condição saturada e a condição seca ao ar dependem de algumas variáveis, dentre elas, a porosidade, a permeabilidade e, principalmente, da umidade relativa nos poros do concreto no momento do ensaio. Portanto, relação a/c, tipo de cimento, tipo de agregados empregados e uso de aditivos são variáveis que devem ser consideradas quando do emprego de fatores de correção. Do trabalho de Berriman *et al.* (2005), pode-se perceber, através da Figura 2-27, que em concretos com diferentes misturas e mesma relação água/cimento, as variações nas velocidades dos concretos foram dependentes do tipo de mistura, entretanto, todas cresceram com o aumento da umidade relativa. Não obstante, nota-se que os aumentos foram maiores em misturas com maior proporção de agregados. Além disso, as velocidades das diferentes misturas foram muito próximas quando a umidade relativa do ar manteve-se em 32%.

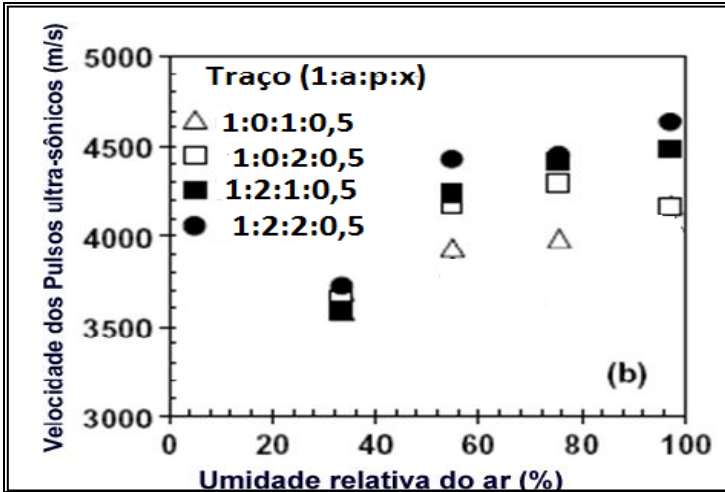


Figura 2-27 Efeito da umidade relativa na V.P.U. concreto com $a/c=0,50$ e diferentes proporções de agregados, (BERRIMAN *et al.*, 2005).

O efeito da condição de umidade tanto na velocidade de pulsos ultrassônicos quanto na resistência é mais um fator que contribui para as dificuldades de calibração, dado que quantidade de umidade irá decrescer com o tempo. TOMSETT (1980 *apud* BUNGEY, 2006), apresentou uma abordagem que permite a calibração da resistência do concreto *in-loco* a partir de uma correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão obtida de corpos de prova curados de acordo com as normas. Segundo estes pesquisadores a relação entre amostras curadas sobre diferentes condições de cura é dada pela Equação 2-5.

$$\ln(f_1/f_2) = K \cdot f_1(V_1 - V_2)$$

Equação 2-5

Onde f_1 é a resistência das amostras padronizadas na condição saturada e f_2 é a resistência 'atual' do concreto *in-loco*. V_1 é a velocidade nas amostras saturadas e V_2 é a velocidade do concreto na estrutura. K é uma constante que reflete a qualidade da compactação, sendo sugerido um valor de 0,015 para concreto bem compactado e 0,025 para compactação fraca ou deficiente. Além disso, deve-se entrar com as velocidades em km/s. Este procedimento de calibração é ilustrado através da Figura 2-28. Para qualquer condição de cura é possível ajustar a relação entre velocidade e resistência e, assim, membros semelhantes

na estrutura podem ser comparados a partir de uma correlação simples. Esta correlação pode ser assumida como tendo a mesma inclinação da relação obtida a partir das amostras padronizadas saturadas.

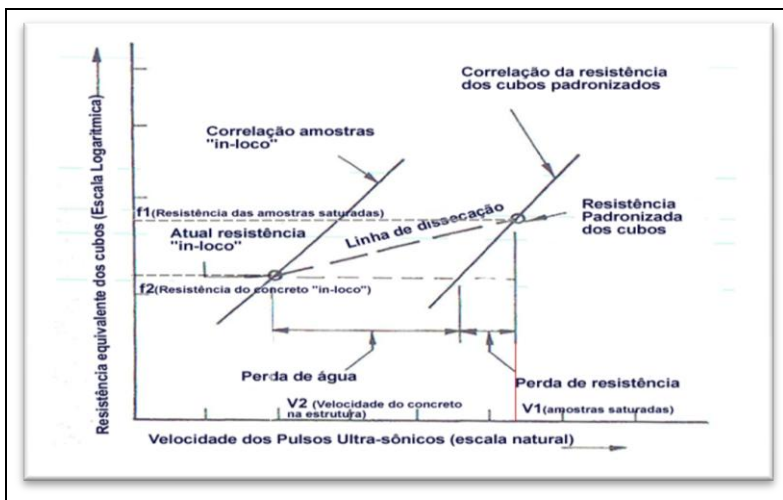


Figura 2-28 Representação esquemática do procedimento de correção da estimativa da resistência, a partir de velocidades obtidas em diferentes condições de umidade, (Bungey, 2006)

Note-se que a aplicação desse procedimento só é válida se os corpos de prova forem curados e ensaiados até a idade em que se pretende estimar a resistência do concreto na estrutura. Além disso, e apesar de ser óbvio, deve-se verificar se os concretos foram produzidos com os mesmos materiais. Deve-se ter o cuidado na aplicação da função 3.5, pois se deve considerar que concretos produzidos com diferentes tipos de cimento são afetados de forma bastante diferente pelas condições de cura e meio ambiente.

2.11.1.7. Condições de cura

Conforme o ACI COMMITTEE 228 (2003), as condições de cura podem afetar a relação entre velocidade e resistência, especialmente quando cura acelerada é utilizada.

BEN-ZEITUN (1986) estudou o efeito da condição de cura no valor da velocidade de pulsos ultrassônicos em concretos normais e em concretos com diferentes teores de cinza. Concluiu que a velocidade de pulsos

ultrassônicos aumenta com as melhorias nas condições de cura. A temperatura de cura modifica a taxa de hidratação das pastas dos concretos e a geração dos produtos sólidos da hidratação modificando a velocidade inicial.

CÂMARA (2006) estudou o comportamento da velocidade dos pulsos ultrassônicos em concretos com três diferentes níveis de resistência 20 MPa, 25 MPa e 30 MPa, nas idades de 3, 7, 14, 28 e 90 dias e concluiu que, para os níveis de resistência estudados e idades analisadas, todos os concretos curados em câmara úmida apresentaram maior velocidade que os concretos curados ao ar. Entre as possíveis razões, tem-se melhor qualidade no processo de hidratação e uma elevada percentagem de umidade nos poros dos concretos saturados. A Figura 2-29 mostra o referido comportamento.

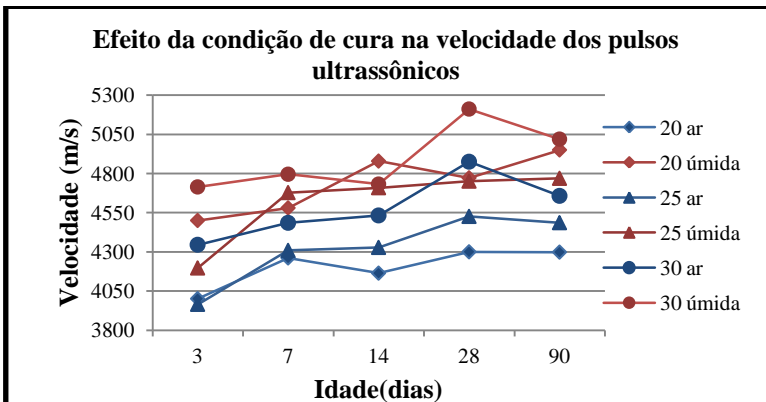


Figura 2-29 Efeito da condição de cura na velocidade dos pulsos ultrassônicos (Câmara, 2006)

2.11.1.8. *Efeito da temperatura de cura*

A temperatura de cura afeta a evolução da hidratação nas primeiras idades, por consequência tanto a resistência à compressão quanto a velocidade de pulsos ultrassônicos são afetados.

Considerando, entretanto, concretos a um mesmo grau de maturidade, a temperatura na ocasião do ensaio entre 10°C e 30°C não produz influência significativa nas velocidades medidas. Se a temperatura estiver fora deste intervalo, os fatores de correção apresentados na

Tabela 2-3 são recomendados (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2002).

Tabela 2-3 Efeito da temperatura na velocidade de pulsos ultrassônicos (International Atomic Energy Agency, 2002)

Correção dos valores das velocidades		
Temperatura	Concreto seco ao ar	Concreto saturado
°C	%	%
60	+ 5	+4
40	+2	+1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

2.12. Modelos para a estimativa da velocidade dos pulsos ultrassônicos

Alguns modelos vêm sendo propostos para estimar a velocidade dos pulsos ultrassônicos em peças de concreto. Dentre estes, um modelo simples é o proposto por LIN *et al.* (2003) onde o concreto é dividido em camadas e a velocidade do pulsos ultrassônicos na peça calculada a partir dos tempos de propagação do pulsos ultrassônicos através de cada camada. Este modelo se assemelha a modelos utilizados corriqueiramente para avaliação de propriedades mecânicas em materiais compósitos, onde fibras de diversas naturezas são envoltas por uma matriz polimérica (KAW, 1995).

O material cimentício pode ser considerado, portanto, como um material compósito constituído por várias fases distintas. Por exemplo, o concreto pode ser visto como constituído por três fases (pasta de cimento, agregado miúdo e agregado graúdo), ou por duas fases (argamassa e agregado graúdo). Da mesma forma, a argamassa pode ser vista como um material compósito constituído por duas fases (pasta e agregado miúdo).

A seguir apresentam-se a aplicação do modelo de três fases e de duas fases para obtenção de velocidade de pulsos ultrassônicos. A Figura 2-30 apresenta, esquematicamente, o modelo proposto por LIN *et al.* (2003).

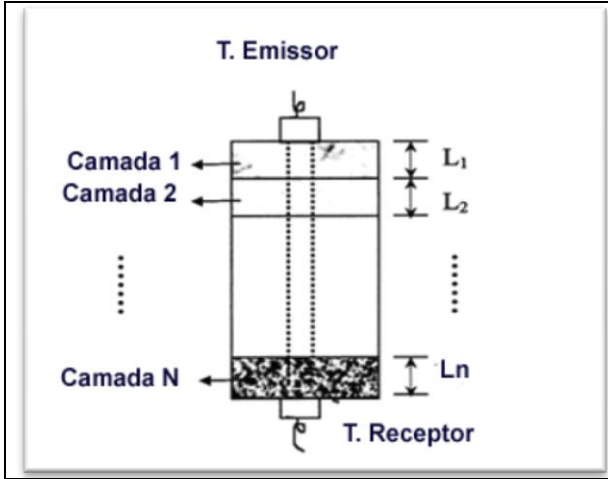


Figura 2-30 Diagrama esquemático de um compósito constituído de N camadas (LIN *et al.*, 2003).

O concreto foi dividido em N camadas. O tempo de propagação do pulsos ultrassônicos pelas N camadas é dado pelo somatório dos tempos de propagação em cada camada conforme Equação 2-6.

$$T_C = T_1 + T_2 + \dots + T_N \quad \text{Equação 2-6}$$

Onde T_1 , T_2 , ..., e T_N representam o tempo necessário para os pulsos ultrassônicos ultrapassarem as camadas 1, 2, ..., e N, respectivamente. Considerando-se que a velocidade em cada uma das camadas seja conhecida então, a equação 3.6 pode ser reescrita na forma da Equação 2-7.

$$\frac{L_C}{V_C} = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} + \frac{L_3}{v_3} + \dots + \frac{L_N}{v_N} \quad \text{Equação 2-7}$$

Onde L_C e V_C expressam, respectivamente, o comprimento total da peça e a velocidade no concreto e L_1 , L_2 , ..., e L_N expressam a espessura das camadas 1, 2, ..., e N, respectivamente. Considerando que cada camada possui a mesma seção transversal, A , pode-se, então, substituir o comprimento L_C e L_i , na Equação 2-7, pela relação entre o volume da camada e sua seção transversal, V_C/A e V_i/A_i . Resultando na Equação 2-8.

$$\frac{1}{v_c} = \frac{V_1}{V_c} \times \frac{1}{v_1} + \frac{V_2}{V_c} \times \frac{1}{v_2} + \dots + \frac{V_n}{V_c} \times \frac{1}{v_n} \quad \text{Equação 2-8}$$

Através Equação 2-7, pode-se constatar que a velocidade de pulsos ultrassônicos torna-se uma função, que é dependente das velocidades individuais de cada camada e das suas proporções volumétricas. Quando aplicada ao concreto, pode-se, na Equação 2-9, considerar as camadas como sendo as fases macroestruturais, ou seja, pasta, agregado miúdo e agregado graúdo, resultando em um modelo de três fases, ou, alternativamente um modelo de duas fases (argamassa + agregados graúdos).

2.12.1. Modelo de três fases

Neste modelo, o concreto é considerado um composto de três fases, quais sejam: fase pasta, fase agregado miúdo e fase agregado graúdo. A velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto pode, então, ser avaliada através da Equação 2-9.

$$\frac{1}{v_c} = \frac{V_p}{V_c} \times \frac{1}{v_p} + \frac{V_{am}}{V_c} \times \frac{1}{v_{am}} + \frac{V_{ag}}{V_c} \times \frac{1}{v_{ag}} \quad \text{Equação 2-9}$$

Onde v_c =velocidade no concreto; v_p =velocidade na pasta, v_{am} =velocidade no agregado miúdo, v_{ag} =velocidade no agregado graúdo; V_p =volume de pasta, V_{am} =volume de agregado miúdo e V_{ag} =volume do agregado graúdo.

Para verificar o quanto este modelo era adequado LIN *et al.* (2003) produziram várias misturas, alterando a relação a/c, o volume de pasta e a relação agregados miúdos/ agregados graúdos e compararam os valores estimados com os valores obtidos através de medida direta. Os valores obtidos são apresentados conforme Figura 2-31.

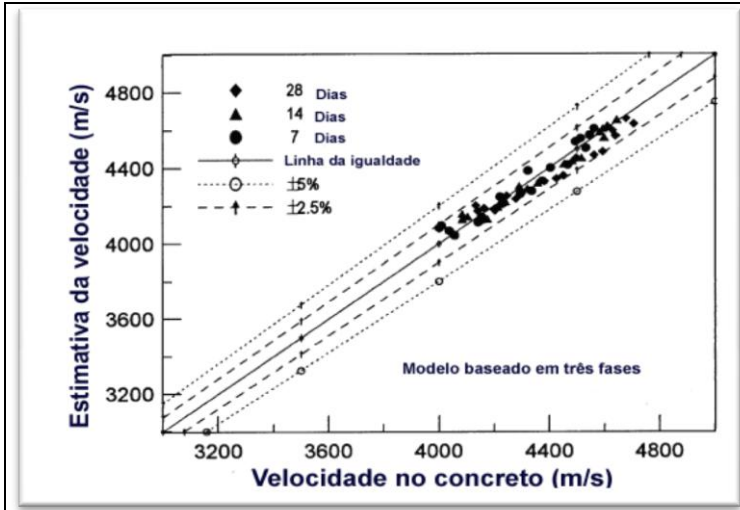


Figura 2-31 Relação entre velocidade medida e velocidade estimada, empregando o modelo de três fases (LIN *et al.*, 2003).

LIN *et al.* (2003) trabalharam com volume de pasta e consideraram que a relação entre agregado graúdo e miúdo poderia variar e desta forma apresentaram a velocidade do concreto em função do volumes de pasta e da relação volumétrica entre os agregados miúdos e os agregados totais, $(a_m/(a_m+a_g))$ e, assim apresentaram a

Equação 2-10.

$$\frac{1}{v_c} = \frac{V_p}{v_p} + (1 - V_p) \times \frac{a_m}{(a_m + a_g)} \times \frac{1}{v_{am}} + (1 - V_p) \times \frac{(1 - a_m)}{(a_m + a_g)} \times \frac{1}{v_{ag}} \quad \text{Equação 2-10}$$

O procedimento adotado por LIN *et al.* (2003) para a determinação da velocidade do agregado graúdo consistiu na extração de testemunhos da rocha calcária. Os testemunhos tinham forma cilíndrica de 75 mm de diâmetro por 150 mm de altura. Os valores de velocidade oscilaram entre 4908 e 5290 m/s, com média de 5175 m/s, com desvio padrão de 154 m/s.

A velocidade dos agregados miúdos foi obtida a partir do modelo de duas fases empregando a velocidade das pastas e a velocidade das argamassas. O valor médio encontrado foi de 4956 m/s, com desvio padrão de 148 m/s.

LIN *et al.* (2003) concluíram que este modelo é aplicável para estimativas de VPU em idades superiores a 7 dias. Os autores consideraram que em idades inferiores, o modelo não consideraria possíveis “águas livres” na mistura.

2.12.2. Modelo de duas fases.

A Equação 2-12 apresenta as variáveis necessárias para a determinação da velocidade do agregado miúdo.

$$v_{am} = \left[\frac{V_{am}}{\left(\left(\frac{1}{v_{arg}} \right) - \left(\frac{V_p}{v_p} \right) \right)} \right] \quad \text{Equação 2-11}$$

Onde v_{arg} = a velocidade na argamassa.

2.12.3. Considerações sobre o Modelo de LIN *et al.*

O modelo propõe estimar VPU somente com relação aos volumes percentuais das fases e natureza dos constituintes do concreto. Ao permitir que a parcela referente à velocidade da pasta se modifique com o tempo, o modelo permite incorporar quaisquer modificações na mistura em virtude da hidratação do concreto.

A consideração de sua utilização em idades avançadas pode ser decorrente da impossibilidade dos autores de considerarem valores variáveis para a VPU nos agregados em virtude de uma possível variação na umidade interna dos mesmos ao longo do processo da hidratação.

De qualquer forma, o modelo evidencia a relação entre V_c e V_p abrindo uma oportunidade para relacionar de forma mais direta uma propriedade mecânica do concreto com a VPU na pasta.

2.12.4. Modelo Proposto para Estimativa da Resistência à Compressão a partir da Velocidade de Pulsos Ultrassônicos na Pasta

Conforme discutido no Capítulo 1, a estimativa da resistência à compressão “in loco” é de grande importância em várias situações, sendo que a utilização de ensaios não destrutivos é muito vantajosa nesta situação.

Sabe-se que há uma dependência direta entre resistência à compressão e grau de hidratação, conforme evidenciado por vários pesquisadores, como YE *et al.* (2004), GROSSE e REINHARDT, (2001), MALHOTRA (2004) e PINTO *et al.* (2000), e apresentado nas Figura 2-14 a Figura 2-18. Por outro lado, a velocidade da onda de ultrassom depende diretamente do módulo de elasticidade do material, possuindo assim também uma dependência com a extensão do processo de hidratação conforme evidenciado na Figura 2-18. Este comportamento, aliado a um baixo coeficiente de variação nas medições, faz com que o método da velocidade de pulsos ultrassônicos se diferencie grandemente dos outros ensaios não destrutivos apresentados no capítulo dois quando utilizado na estimativa da resistência à compressão em misturas de concreto.

Entretanto, conforme verificado pela revisão de literatura apresentada nos itens anteriores, vários fatores podem influenciar a velocidade dos pulsos ultrassônicos no concreto de forma distinta de como influenciam na resistência à compressão. As correlações entre velocidade dos pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão, propostas pela maioria dos pesquisadores são, portanto específicas, isto é, servem unicamente para uma única mistura de concreto, para um dado tipo de cimento, tipo de agregado graúdo, dimensão máxima característica e, ocasionalmente, levam em consideração a proporção do agregado miúdo em relação aos agregados totais. Por consequência, os diversos fatores que influenciam as medições de velocidade fazem com que não haja uma única curva de correlação entre velocidade e resistência à compressão aplicável a todas as misturas de concreto.

Na realidade, entretanto, as reações de hidratação ocorrem somente na fase pasta ocasionando uma diminuição nos tempos de propagação de

pulsos ultrassônicos na pasta e por consequência no concreto ao longo do tempo, ocasionando um aumento na velocidade de propagação da onda ultrassônica com o tempo. Utilizando o modelo proposto por LIN *et al.* (2003), o tempo que os pulsos ultrassônicos necessitam para atravessar o concreto, em qualquer idade, pode ser obtido pelo somatório dos tempos envolvidos pelos pulsos ultrassônicos para atravessar cada uma das macrofases do concreto (pasta, agregado miúdo e agregado graúdo).

Em uma dada idade i , o tempo necessário para os pulsos atravessarem o concreto pode ser descrito pela Equação 2-12.

$$t_{ci} = t_{pi} + t_a + t_b \quad \text{Equação 2-12}$$

Onde t_{pi} =tempo de propagação na fase pasta; t_a = tempo de propagação no agregado miúdo; t_b = tempo de propagação no agregado graúdo.

Da mesma forma, em outra idade j , pode-se escrever a Equação 2-13.

$$t_{cj} = t_{pj} + t_a + t_b \quad \text{Equação 2-13}$$

Considerando inicialmente que os tempos de propagação nos agregados não se alteram ao longo do tempo, (t_a e t_b constantes), tem-se, portanto que o tempo de percurso de pulsos ultrassônicos no concreto em uma idade j , pode ser obtido a partir do tempo em uma idade anterior e da variação dos tempos nestas idades i e j na fase pasta, conforme apresentado na Equação 2-14.

$$t_{cj} = t_{ci} + (t_{pj} - t_{pi}) \quad \text{Equação 2-14}$$

Considera-se, portanto, que a variação da velocidade do concreto ao longo do tempo depende somente do volume de pasta e das variações ao longo do tempo da velocidade na pasta.

Em uma aplicação prática onde a velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto é conhecida pode-se, a partir do conhecimento prévio da proporção e tipo dos materiais constituintes, bem como do conhecimento prévio da velocidade nos agregados, obter a velocidade da pasta e verificar qual a extensão do processo de hidratação.

O modelo aqui proposto se propõe a correlacionar a resistência à compressão do concreto diretamente com a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta ao invés de correlacionar com a velocidade no concreto. Desta forma, misturas com mesmo tipo de cimento, mesma relação água/cimento, possuiriam, em teoria, mesma velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos na pasta, embora a velocidade no concreto pudesse ser bem diferente em virtude, por exemplo, da utilização de agregados distintos.

Esta nova correlação, em teoria, poderia ser aplicada para várias misturas de concreto, dependendo somente do tipo de cimento e da relação água-cimento. A influência do tipo de agregado, suas proporções na mistura seriam desconsideradas. Desta forma, a correlação entre VPU na pasta e resistência a compressão no concreto poderia ser aplicada a uma família de misturas de concreto expandindo o uso do ultrassom para estimar a resistência do concreto.

Esta relação, entretanto, ainda não poderia ser aplicada diretamente a misturas onde os agregados influenciam grandemente a resistência à compressão, como em misturas com agregados graúdos de baixa densidade (argila expandida, por exemplo) ou mesmo concretos de alta resistência. Para concretos de resistência usuais, por outro lado, esta correlação possibilitaria uma utilização muito maior do ultrassom na estimativa da resistência à compressão. Seria necessário obter previamente a VPU na pasta e nos agregados a serem utilizados, assim como a obtenção da curva de correlação entre VPU na pasta e f_c no concreto para uma mistura de concreto. A correlação obtida poderia ser, então, utilizada para outras misturas de concreto com mesmo tipo de cimento e relação água/cimento, porém produzidas com agregados distintos e com várias proporções volumétricas. A Figura 2-32 apresenta esquematicamente a potencialidade deste modelo.

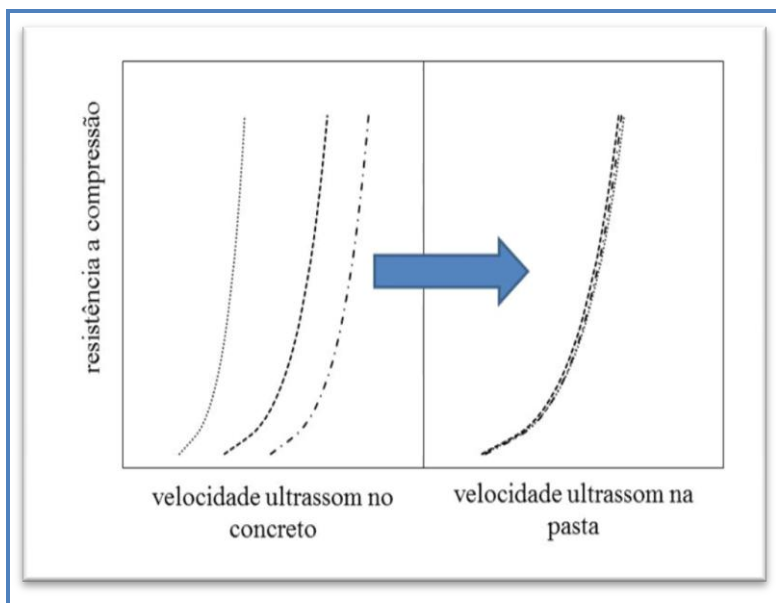


Figura 2-32 Representação esquemática do modelo que usa a velocidade no concreto para o modelo adota a velocidade na pasta do concreto.

Este trabalho se propõe a explorar esta nova possibilidade de utilização do ultrassom na estimativa de resistência a partir de um programa experimental. O principal objetivo é correlacionar resistência à compressão com VPU na pasta, independente dos agregados utilizados na mistura.

3. Programa Experimental

3.1. Introdução

O método proposto teve como objetivo correlacionar a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto, com a resistência à compressão, a partir das primeiras 24 horas. O referido modelo requer o conhecimento prévio da velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados graúdos e miúdos, assim como o conhecimento das proporções volumétricas desses constituintes na mistura de concreto.

Inicialmente, determinou-se a velocidade de pulsos ultrassônicos nos prismas das rochas. Posteriormente compararam-se estes valores com a velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados graúdos, os quais foram obtidos, indiretamente por meio do modelo de três fases. A Figura 3-1 apresenta o fluxograma do procedimento adotado nesta primeira etapa.

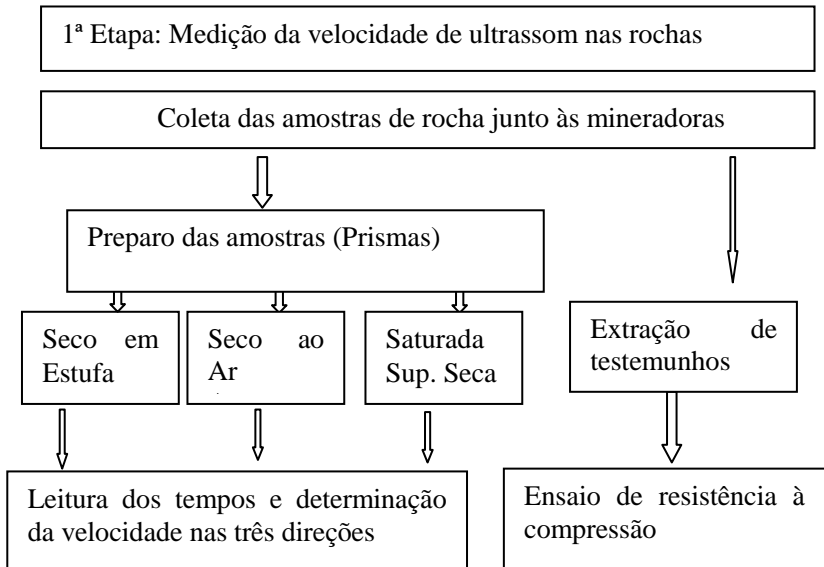


Figura 3-1 Fluxograma representativo da primeira etapa, determinação da velocidade nos prismas de rocha.

Para a determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado miúdo empregou-se o modelo de duas fases, também proposto por LIN *et al.* (2003), e utilizou-se a Equação 2-11. Além disso, fez-se necessário produzir pastas e argamassas com mesmas relações água/cimento, e acompanhar a evolução da velocidade ao longo das idades estudadas. A apresenta a sequência utilizada.

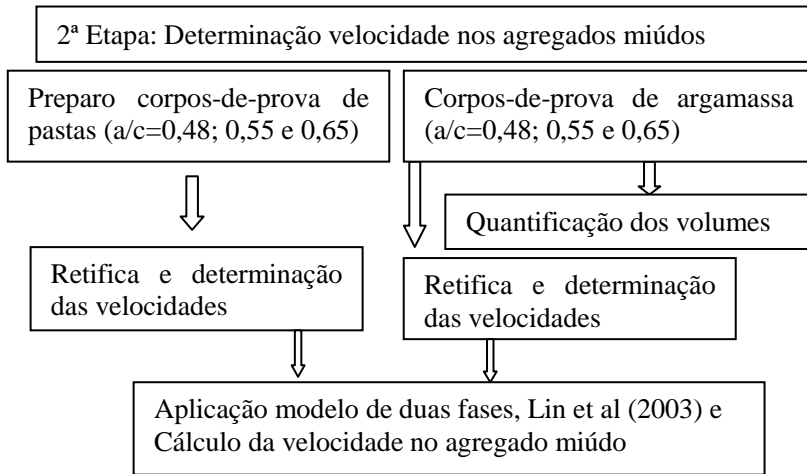


Figura 3-2 Fluxograma representativo da segunda etapa, determinação agregado miúdo.

Na sequência, foram produzidas misturas de concreto, determinada a V.P.U. no concreto e a resistência à compressão, e com estes dados foram feitas curvas de correlação, conforme Figura 3-3.

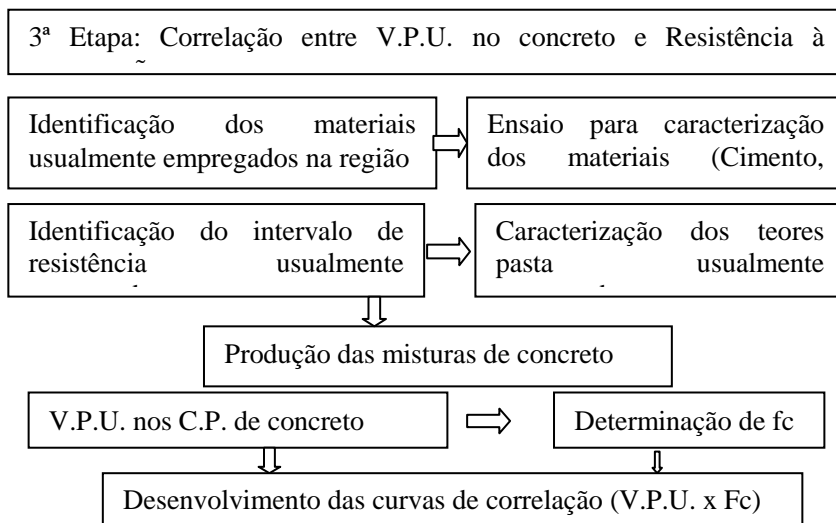


Figura 3-3 Fluxograma da terceira etapa, correlação V.P.U. x f_c

Para determinar a velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado graúdo, foi também necessária a aplicação do modelo de três fases, proposto por LIN *et al.* (2003), a velocidade de pulsos no agregado miúdo, a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta, e dispor-se das proporções volumétricas dos constituintes do concreto, isto é, volume de pasta, volume de agregado miúdo, volume de agregado graúdo. A Figura 3-4 apresenta o fluxograma desta etapa.

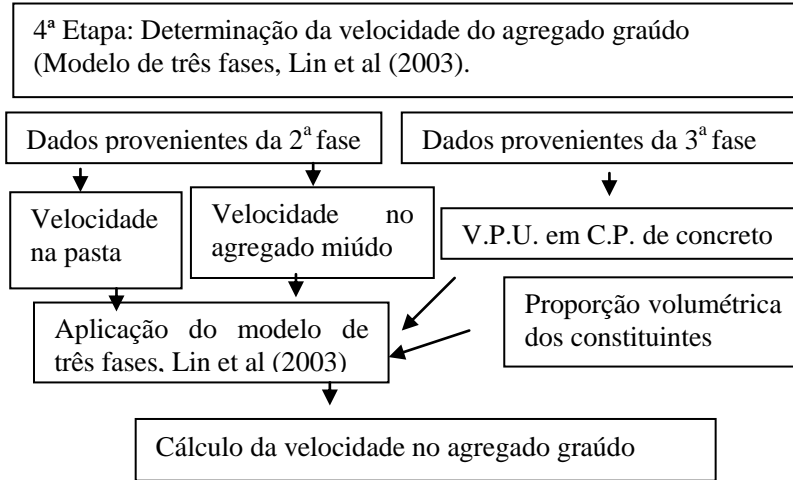


Figura 3-4 Fluxograma da quarta etapa, determinação velocidade no agregado graúdo.

Para obter a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto, fez-se necessário determinar, experimentalmente, a velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e utilizar o modelo de três fases proposto por LIN *et al.* (2003) para obter a velocidade na pasta. A Figura 3-5 apresenta o fluxograma representativo desta etapa.

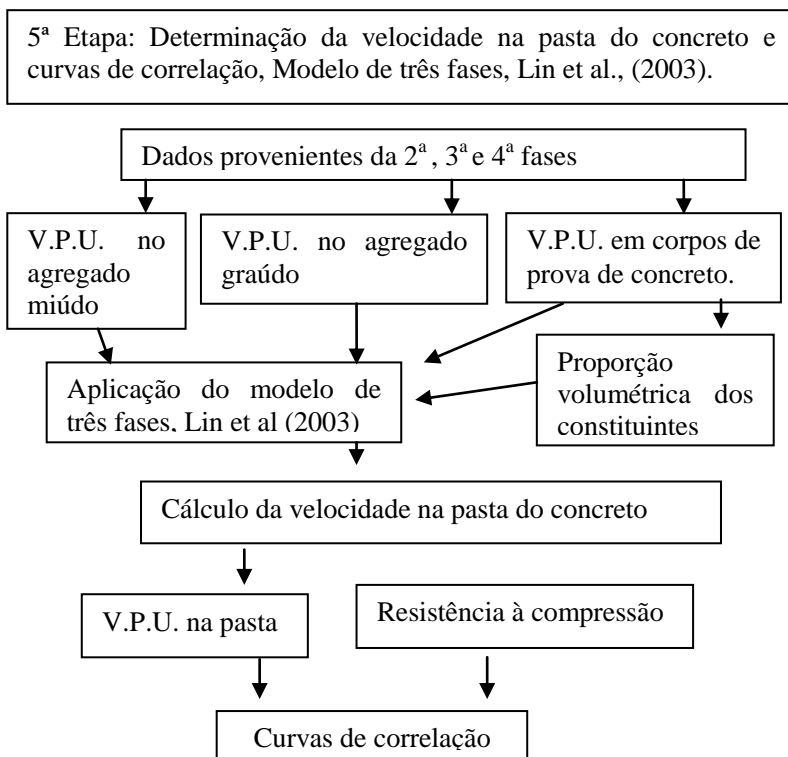


Figura 3-5 Fluxograma da quinta etapa, obtenção da velocidade na pasta do concreto e curvas de correlação.

Para verificar a eficácia do método proposto, optou-se por obter a velocidade dos pulsos ultrassônicos nas rochas-mãe. Para tanto, foram coletadas seis amostras de rochas junto às mineradoras. Essas amostras foram transformadas em prismas, através dos quais foi possível fazer a medição da velocidade no modo de transmissão direto. Os prismas graníticos e basálticos possuíam dimensões aproximadas de 20 cm x 10 cm x 10 cm. Leituras de ultrassom foram feitas em três diferentes graus de saturação, seca em estufa, seca ao ar e saturada superfície seca. Além disso, as leituras foram feitas em todas as direções do prisma.

Os resultados obtidos através da medição direta foram comparados com os resultados obtidos pelo modelo de três fases, ou seja, pelo método indireto.

Para verificar a validade do método proposto foi necessário definir alguns critérios, dentre eles os seguintes:

- ✓ Resistência: optou-se pelo valor máximo de resistência à compressão, f_{c_m} , de 50 MPa, já que resistências superiores a este valor sofrem fortemente a influência da zona de transição, o que não está contemplado no modelo de três fases. Além disso, para contemplar um amplo intervalo de resistências, optou-se por empregar as seguintes relações água/cimento: 0,65, 0,55 e 0,48, e ensaiar o concreto a partir das 12 horas de idade. As outras idades analisadas foram, 18 h, 1 dia, 2 dias, 3 dias, 5 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias. Para cada idade, empregaram-se 4 corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm;
- ✓ Cimentos: CPV-ARI-RS, sendo o mais empregado na indústria de pré-moldados e o CP IV-32, o mais usado nas empresas de concreto pré-misturado;
- ✓ Agregados graúdos: optou-se por utilizar os agregados da mineradora que, atualmente, mais fornecesse agregados para as empresas de concreto usinado. Os agregados empregados foram os graníticos extraídos da cidade de São José e os diabásicos, extraídos da cidade de Maracajá;
- ✓ Dimensão máxima característica: 19,0 mm e 9,5 mm, as mais usadas;
- ✓ Teores de pasta: 28%, 32% e 36%, valores mais usuais.

Inicialmente, foi necessário descobrir qual dentre as mineradoras da Grande Florianópolis fornecia a maior quantidade de agregados graúdos e miúdos para as empresas de concreto pré-misturado. Constatou-se que, embora a Mineradora Sulcatarinense fosse a que mais produzisse agregados graúdos, a Mineradora Cedro era quem mais fornecia agregados graúdos e miúdos às empresas de concreto usinado.

3.2. Materiais empregados

Apresentam-se, a seguir, os procedimentos adotados para caracterizar os materiais.

3.2.1. Agregados graúdos

Os agregados graúdos graníticos foram fornecidos pela Cedro Engenharia Comércio e Mineração, sendo originados da cidade de

Palhoça-SC. Os agregados de diabásio foram também fornecidos pela Cedro Engenharia, Comércio e Mineração e eram de pedreira na cidade de Maracajá.

Os agregados foram coletados diretamente da Mineradora, tendo sido colocados em tonéis de aço de 200 litros e armazenados no interior do laboratório de experimentação em estruturas (LEE) e foram empregados na condição seca ao ar.

Ensaio de massa específica e aparente, absorção, granulometria foram realizados, segundo as normas NM 53 (BRASIL, 2009) e NM 248 (BRASIL, 2001), respectivamente, de forma a caracterizar os agregados graúdos.

3.2.2. Agregados miúdos

O agregado miúdo de dunas foi fornecido pela empresa Ravlen, da cidade de Imbituba, doado pela Votorantin Cimentos S.A/Engemix. O agregado miúdo proveniente do britamento das rochas graníticas foi fornecido pela Mineradora Cedro, localizada na cidade de Palhoça-SC.

Para a produção das misturas de concreto e argamassas os agregados miúdos foram usados na proporção de 70% de agregados miúdos de britagem e 30% de agregado miúdo de dunas. Essa proporção foi adotada por representar a proporção mais amplamente empregada, quando da produção de concretos.

A massa específica e a massa específica aparente dos agregados miúdos, a granulometria e a absorção foram determinadas de acordo com as Normas do Mercosul NM 52 (BRASIL, 2009), NM 248 (BRASIL, 2003) e NM 30 (BRASIL, 2001).

Os agregados miúdos foram secos em estufa, todas as misturas foram produzidas com agregados miúdos na condição seca em estufa.

Os agregados miúdos após a secagem foram armazenados em dois sacos plásticos de 0,25 mm de espessura, tendo fechamento sido feito com fita lacre. A Figura 3-6 apresenta a forma de armazenamento dos agregados miúdos após a secagem.



Figura 3-6 Armazenamento agregado miúdo após secagem em estufa.

3.2.3. *Cimentos*

Foi empregado um CPV-ARI-RS, e um cimento CPIV-32. Verificou-se a conformidade do cimento quanto à resistência à compressão de acordo com a ABNT NBR 7215 (BRASIL, 1997)- Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Além disso, solicitou-se os resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos os quais são apresentados nos apêndices.

Após ter-se verificado a conformidade do cimento em relação à resistência, foram adquiridos 25 sacos de um mesmo lote. Os sacos de cimento foram divididos em duas partes. A massa de aproximadamente 25 kg foi ensacada em dois sacos plásticos de 0,25 mm de espessura e o saco foi fechado com fita lacre. Os sacos de cimento ficaram sobre lastro de madeira, afastados do solo, conforme indicado na Figura 3-7.



Figura 3-7 Forma de armazenamento dos cimentos

A massa específica dos cimentos foi determinada de acordo com a NM 23 (BRASIL, 2000) - Cimento Portland e outros materiais em pó.

3.2.4. Aditivo

Empregou-se um aditivo polifuncional fornecido pela Grace, com denominação comercial de Mirra 76, que, conforme o fabricante, tem a capacidade de reduzir em até 12% o consumo de água. Esse aditivo possui massa específica de 1,2 kg/litro.

3.3. Procedimentos adotados no estudo

3.3.1. Determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas-mãe

Atualmente, no Brasil, não existe uma norma que regulamente a determinação da velocidade de rochas. Por isso, foi necessário empregar a ASTM D 2845-05 (2005). A frequência natural dos transdutores, a menor dimensão lateral e o tamanho dos grãos da rocha são fatores que interagem mutuamente e podem afetar os resultados.

3.3.1.1. Coleta das amostras de rochas-mãe

Na Grande Florianópolis, cinco empresas mineradoras de rochas graníticas são as principais produtoras de agregados graúdos destinados à produção de concreto. Os agregados graúdos empregados nessa pesquisa são da Mineradora que mais fornece agregados graúdos e miúdos para as usinas de concreto usinado, atualmente, Mineradora Cedro. Considerando-se que o método tem o potencial para ser aplicado a qualquer tipo de agregado graúdo determinou-se, também, as principais características das rochas-mãe das demais Mineradoras da Grande Florianópolis, ou seja: Cedro, Saibrita, Sul-Catarinense, Santa-Bárbara e Pedrita. Em adição, caracterizou-se a rocha de diabásio proveniente da Mineradora Cedro, da cidade de Maracajá, SC.

Foram coletadas seis amostras de rochas em cada Mineradora. A Figura 3-8 fornece uma noção das dimensões das amostras coletadas.



Figura 3-8 Amostras da primeira coleta.

Após a coleta foi necessário preparar as amostras, cortando-as em forma de prismas, para proceder à leitura, conforme mostrado nas Figura 3-9 e Figura 3-10.



Figura 3-9 Primeira tentativa de corte, serra do laboratório de solos.



Figura 3-10 Resultado do corte na serra do Laboratório de solos.

As amostras foram cortadas com serra de 500 mm em uma marmoraria. Apresenta-se, na Figura 3-11, fotos das amostras das rochas. Após o corte as amostras, em sua grande maioria, ficaram com dimensões de aproximadamente (100x100x200) mm.



Diabásio

Saibrita

Santa Bárbara



Cedro



Sulcatarinense

Figura 3-11 Amostras das rochas das Mineradoras.

3.3.1.2. Equipamento empregado

O equipamento empregado para a leitura da velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas foi o PUNDITLAB. Este equipamento possui recurso que permite definir a largura da onda. Para a determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas seguiu-se as recomendações da ASTM D2845-05. A Figura 3-12 apresenta foto do PUNDITLAB, com a largura da onda pré-definida.



Figura 3-12 Foto do PUNDITLAB, empregado na determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas.

As amostras foram ensaiadas nas condições seca em estufa, seca ao ar, saturada superfície seca e nas três direções principais, longitudinal e 2 transversais a Figura 3-13, o procedimento de leitura.

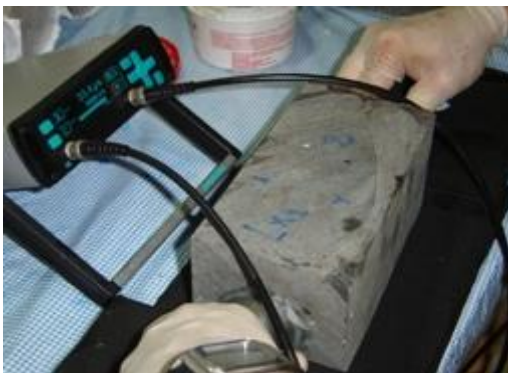


Figura 3-13 Procedimento adotado para a leitura das amostras das rochas.

3.3.1.3. Determinação da resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão das rochas extraiu-se, diretamente das amostras de rochas-mãe, testemunhos com diâmetro de 55 mm, conforme Figura 3-14.



Figura 3-14 Extração de testemunhos em rochas-mãe (Granito e diabásio).

O ensaio foi realizado com velocidade de 0,25 MPa/s, conforme NBR 10341:2006- Agregado graúdo para concreto- Determinação do módulo de deformação estático e do diagrama de tensão-deformação em rocha matriz.

3.3.1.4. Massa específica

Para a determinação da massa específica das rochas, as amostras foram pesadas na condição seca em estufa, posteriormente as amostras ficaram imersas em água por dois dias. As amostras empregadas possuíam formas prismáticas e suas bases eram metade de suas alturas. As principais dimensões empregadas foram de 10 cm x 10 cm x 20 cm, conforme se pode constatar na Figura 3-11.

3.3.1.5. Absorção

Para a determinação da absorção das rochas, as amostras ficaram imersas em água por três dias, posteriormente as amostras foram pesadas na condição saturada superfície seca. Após a pesagem as amostras foram colocadas em estufa por três dias, sendo pesadas na condição seca em estufa. As amostras possuíam as dimensões de 10 cm x 10 cm x 20 cm, conforme apresentado na Figura 3-11.

3.3.2. Misturas estudadas

Apresentam-se, a seguir, os traços das pastas, das argamassas e dos concretos empregados em cada uma das misturas.

3.3.2.1. Pastas

Numa primeira etapa, pastas foram produzidas em uma betoneira de eixo inclinado, marca Menegotti, com capacidade de 360 litros. Os traços em massa empregados para a produção das pastas foram: 1:0,48:0,005, 1:0,55:0,005 e 1:0,64:0,005, (cimento, água, aditivo).

Para que ocorresse perfeita homogeneização da pasta na betoneira de eixo inclinado optou-se por utilizar agregado graúdo na condição saturada superfície seca com objetivo de eliminar os possíveis grumos. Posteriormente, a pasta foi peneirada utilizando-se peneira 4,8 mm, e lançada no interior de um dispositivo de 10 cm x 20 cm x 20 cm, o qual é descrito no item 3.3.2.2. A pasta foi compactada em uma única camada, aplicando-se 60 golpes com soquete de 60 cm de comprimento e 16 mm de diâmetro. Após o adensamento, o dispositivo foi coberto com filme de plástico. Termopares foram colocados no interior da pasta para registrar o comportamento da temperatura, durante as primeiras 24 horas. A Figura 3-15 apresenta foto indicando o procedimento adotado.



Figura 3-15 Dispositivo com pasta, leitura da velocidade de pulsos ultrassônicos a partir do estado fresco e monitoramento da temperatura com termopar tipo “K”

Numa segunda etapa, pastas foram produzidas para se determinar a velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos nas pastas. As pastas foram produzidas com relação $a/c = 0,48$ (P48), $a/c = 0,55$ (P55) e $a/c = 0,65$ (P65) em argamassadeira de eixo vertical, como mostrado na Figura 3-16. Para cada relação a/c foram moldados seis corpos de prova de 10 x 20 cm, com as velocidades dos pulsos ultrassônicos medidas nas idades de 12 horas, 18 horas, 1 dia, 2 dias, 3 dias, 5 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias.



Figura 3-16 Argamassadeira empregada para a mistura das pastas

3.3.2.2. Argamassas

As argamassas foram produzidas com as mesmas relações água/cimento das pastas. Para tanto, foi necessário corrigir a água absorvida pelos agregados miúdos, adicionando-se a água absorvida pelos mesmos na mistura. Os traços finais empregados são apresentados na

Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Traço das argamassas em relação ao kg de cimento

Argamassa	Cimento	Areia britagem	Areia duna	Água	Aditivo
A48	1	1,564	0,670	0,497	0,005
A55	1	1,723	0,738	0,569	0,005
A65	1	1,950	0,836	0,672	0,005

Assim como para as misturas de pasta, foram adotados dois procedimentos de obtenção de argamassa. No primeiro procedimento, as misturas de concreto foram peneiradas por meio da peneira de 4,8 mm enquanto no segundo procedimento utilizou-se argamassadeira de eixo vertical.

O primeiro procedimento foi utilizado para a determinação do início e fim de pega de algumas misturas de concreto e também para acompanhamento da evolução da temperatura nas primeiras idades. As argamassas peneiradas foram lançadas no dispositivo de 10 cm x 20 cm x 20 cm. A Figura 3-17 mostra o procedimento de peneiramento

adotado. O procedimento de registro de temperatura foi idêntico ao empregado nas pastas.



Figura 3-17 Procedimento adotado para obtenção da argamassa.

No segundo procedimento, as argamassas produzidas, com o traço apresentado na

Tabela 3-1, foram moldadas lançadas em 6 corpos de prova de 10 x 20 cm para cada relação água/cimento. As medições das velocidades de pulsos ultrassônicos foram realizadas nas idades de 12h, 18h, 1 dia, 2 dias, 3 dias, 5 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias e serviram para determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado miúdo.

3.3.2.3. Concretos

As misturas de concreto receberam uma designação que teve como objetivo evitar que erros durante o processo fossem cometidos. Para tanto, definiu-se que os dois primeiros números representariam a relação água/cimento do concreto. Os outros dois números, representariam o teor de pasta da mistura. Os números romanos que seguem, V ou IV, referiram-se ao tipo de cimento usado. As outras duas letras, (G ou D) representariam o tipo de agregado graúdo utilizado e, finalmente, os dois últimos números a dimensão máxima característica do agregado graúdo.

Desta forma, a mistura M5532VG19 representa o concreto com relação água/cimento de 0,55, com teor de pasta de 32%, produzido com cimento CP V ARI RS, agregado granítico com dimensão máxima característica de 19 mm. A Tabela 3-2 apresenta a relação de todas as misturas de concreto produzidas nesta pesquisa.

Tabela 3-2 Relação das misturas de concreto

MISTURAS DE CONCRETO		
Concreto 0,48	Concreto 0,55	Concreto 0,64
M4828VG19	M5528VG19	M6528VG19
M4832VG19	M5532VG19	M6532VG19
M4836VG19	M5536VG19	
M4832IVG19	M5532IVG19	
	M5532VG9,5	
M4832VD19	M5532VD19	M6532VD19

A mistura M6536VG19 não foi produzida porque quando da medição da consistência da mistura M6532VG19 se obteve um abatimento de 23 cm. Entendeu-se que se a mistura M6536VG19 fosse produzida seu abatimento seria muito elevado e a probabilidade de segregação e exsudação também.

Os traços empregados em cada uma das misturas estão apresentados na Tabela 3-3, na condição saturada superfície seca.

Tabela 3-3 Misturas de concreto: traço e consumo

Mistura	Proporção (kg/m ³) SSD (Sat. superfície seca)					
	Cimento	Areia de britagem	Areia natural	Brita	Água	Aditivo
M4828VG19	327	634	272	1009	155	1,6
M4832VG19	374	580	248	984	177	1,9
M4836VG19	426	533	228	972	203	2,1
M5528VG19	302	645	276	1001	164	1,5
M5532VG19	350	594	255	981	191	1,7
M5536VG19	392	543	233	957	214	2,0
M6528VG19	272	655	281	989	175	1,4
M6532VG19	310	601	258	956	199	1,5
M5532VG9,5	348	591	253	976	190	1,7
M4832IVG19	370	584	250	986	176	1,9
M5532IVG19	343	595	255	977	187	1,7
M4832VD19	373	615	264	1024	180	1,9
M5532VD19	347	631	270	1021	192	1,7
M6532VD19	312	643	275	1006	204	1,6

Os volumes percentuais em cada uma das misturas de concreto podem ser vistas nos apêndices.

Em todas as misturas de concreto, o procedimento adotado foi o seguinte: imprimação da betoneira, colocação de toda a água no interior da betoneira; colocação dos agregados graúdos; colocação do cimento; colocação dos agregados miúdos; mistura por dois minutos; adição do aditivo plastificante e homogeneização por dois minutos.

Para cada mistura de concreto foram produzidos 38 corpos de prova. As idades escolhidas para o estudo da velocidade e resistência foram: 12 horas, 18 horas, 24 horas, 2 dias, 3 dias, 5 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias. Para cada idade foram empregados 4 corpos de prova de 10cm x 20 cm. Após a mistura do concreto, realizou-se o ensaio de consistência de acordo com a NM 67 (1998)-Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998). O abatimento dos concretos cresceu com o aumento do teor de pasta. A Figura 3-18 mostra as diferentes consistências apresentadas pelos concretos.



Figura 3-18 Consistência dos concretos com diferentes relações água/cimento e/ou teor de pasta.

Na grande maioria das misturas de concreto, determinou-se o ar incorporado pelo método gravimétrico, de acordo com a NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, de 2008. A Figura 3-19 apresenta o molde empregado para a determinação do ar incorporado e da massa específica do concreto.



Figura 3-19 Procedimento adotado para a determinação da massa específica e ar incorporado.

Em algumas misturas de concreto, determinou-se o início e fim de pega, de acordo com a NM 9:2003- Concreto e argamassa: determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração e ASTM C403/C 403M 08 2008, com o intuito de correlacionar-se com a velocidade de pulsos ultrassônicos. A Figura 3-20 mostra alguns detalhes do ensaio para a determinação do início e fim de pega.



Figura 3-20 Procedimentos para o ensaio de início e fim de pega concreto.

A resistência dos corpos de prova foi determinada obedecendo a exigências da ABNT NBR 5739:2007- Concreto- Ensaio de resistência de corpos de prova cilíndricos.

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a ABNT NBR 5738:2008. Os corpos de prova foram adensados manualmente, em duas camadas de 12 golpes, após a moldagem, os topos dos moldes foram vedados para que os corpos de prova não perdessem a água de exsudação por evaporação. Nas primeiras 24 horas os corpos de prova ficaram armazenados na sala do grupo de pesquisa em ensaios não destrutivos (GPEND). Posteriormente, os mesmos foram desenformados

e revestidos por várias camadas de filme plástico, sendo armazenados no interior de uma caixa de isopor, conforme Figura 3-21.



Figura 3-21 Vedação dos corpos de prova, armazenamento nas primeiras 24 horas e armazenamento para as idades mais avançadas.

No ensaio de 12 e 18 horas não foi possível retificar os corpos de prova. Portanto, fez-se necessário capeá-los com enxofre. Em alguns casos, o esforço para retirar o corpo-de-prova do molde de enxofre superava a resistência à tração do concreto e o corpo-de-prova era perdido. Na idade de 24 horas, a grande maioria dos corpos de prova pode ser retificada, com exceção dos concretos com cimento CPIV e os com relação $a/c=0,65$. Empregou-se a retifica horizontal, onde o corpo-de-prova fica apoiado, longitudinalmente, em um berço e aço. Apesar do esforço, as faces dos corpos-de-prova não ficavam perfeitamente planas.

A primeira série de concretos foi ensaiada na máquina universal SHIMADZU com capacidade de carga de 2000 KN. Entretanto, essa máquina apresentou problema e foi necessário o uso de outras duas prensas, a AMSLER com capacidade de carga de 500 Tf, aferida em 28/02/2011 e a Mohor & Federhaff AG Mannheim com capacidade de carga de 20 toneladas força, aferida 04/08/2004. Na Figura 3-22 tem-se foto da Máquina de Ensaio Universal SHIMADZU, Prensa Mohor e Federhaff AG Mannheim e da Prensa AMSLER.



Figura 3-22 Máquinas de Ensaio Universal SHIMADZU, Prensa: Mohor e Federhaff AG Mannheim e Prensa: AMSLER Aferida em 28/02/2011.

Além da máquina de ensaio universal e prensas acima descritas foi necessário, também, utilizar a prensa da empresa Engemix, com capacidade para 120 tf.

3.3.3. Determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos

Os ensaios foram feitas de acordo com a NM 58:1996 Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

3.3.3.1. Equipamentos empregados

Inicialmente, o aparelho de ultrassom empregado na pesquisa foi o Portable Ultrasonic non Destructive Digital Indicating Tester (PUNDIT) PLUS. Entretanto, devido aos frequentes problemas nas leituras, ocasionados no cabo do transdutor receptor, fez-se necessário recorrer ao aparelho de ultrassom de versão mais antiga, o PUNDIT. Esse aparelho era bastante demandado, uma vez que era o único que estava funcionando adequadamente. Para evitar transtornos com outros pesquisadores, fez-se solicitação de empréstimo de outro aparelho de ultrassom à PROCEQ. A PROCEQ entendeu a necessidade do nosso grupo de pesquisa, o GPEND, e disponibilizou, para uso exclusivo, o PUNDIT LAB. Todos os aparelhos de ultrassom funcionavam com transdutores de 54 kHz. Na Figura 3-23 tem-se o PUNDIT Plus, o PUNDIT Lab e o PUNDIT.



Figura 3-23 Aparelhos de ultrassom usados na pesquisa: PUNDIT Plus, PUNDIT Lab e PUNDIT.

É importante relatar que equipamentos de diferentes gerações ou marcas ao medirem os tempos de propagação dos pulsos ultrassônicos através de um elemento podem apresentar diferenças nos valores dos tempos medidos, ainda que os mesmos estejam perfeitamente calibrados. Nesse trabalho foi possível obter diferenças de até 4 microssegundos entre o PUNDIT Plus e o PUNDIT Lab. Uma das possíveis justificativas é a constante melhoria nos circuitos eletrônicos. Para as duas primeiras misturas produzidas, M4828VG19 e M5528VG19, foi empregado o PUNDIT Plus, para as demais misturas de concreto, pasta e argamassa, e para as leituras nas rochas mães, utilizou-se o equipamento PUNDIT Lab. Isso porque o PUNDIT PLUS vinha apresentando frequentes problemas de leitura.

3.3.3.2. Dispositivo empregado para medir a velocidade de pulsos ultrassônicos nas pastas, argamassas e concretos a partir do estado fresco

Os dois dispositivos utilizados para medir a velocidade das pastas, argamassas e concretos e acompanhar a evolução da temperatura possuíam dimensões de 10 cm x 20 cm x 20 cm e de 20 cm x 20 cm x 20 cm. Ambos possuíam estrutura externa em madeira compensada de 20 mm, revestidas internamente por vidro de 6,0 mm em duas faces para garantir uma perfeita planicidade da superfície. As outras faces foram revestidas com borracha de 20 mm. Nas faces revestidas com vidro foram feitos dois furos circulares de 50 mm de diâmetro na madeira compensada, a uma distância de 10 cm da base. Sobre esses dois furos, foram acoplados flanges de 60 mm, colados e aparafusados, servindo de

guia para os transdutores do ultrassom. Para obter perfeita aderência entre o vidro e o transdutor, foi necessário colocar o transdutor dentro de um niple duplo previamente retificado de PVC de 60 mm. Para que ficasse mais fácil de rosquear o niple ao flange, cortou-se a outra rosca do niple, tornando-o em um niple simples. O dispositivo possui um sistema de parafusos que permitiu moldar e desenformar facilmente os concretos, conforme mostrado na Figura 3-24. Detalhes do projeto podem ser vistos no Apêndice.

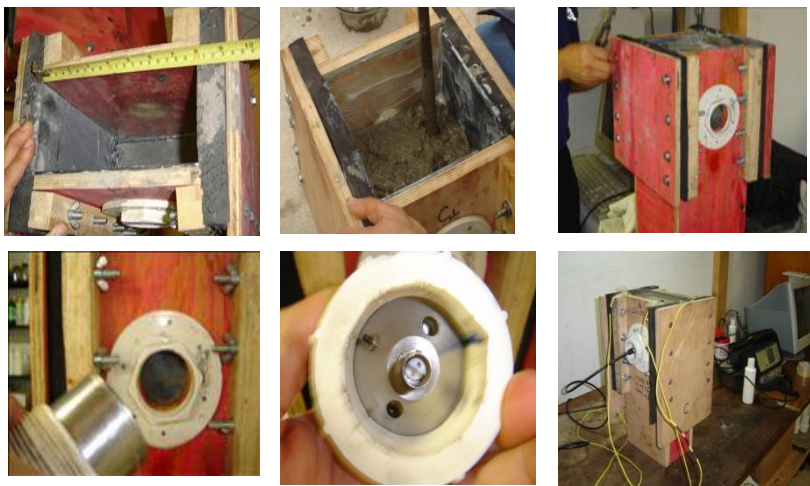


Figura 3-24 Dispositivo usado para determinar a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta, argamassa e concretos.

3.3.3.3. *Ensaio de ultrassom em concretos*

3.3.3.3.1 Utilizando o dispositivo

Durante as primeiras 24 horas, os concretos permaneceram no interior do dispositivo e leituras foram realizadas conforme procedimento descrito acima. Após 24 horas, os cubos de concreto foram desenformados, mediam-se as quatro faces ao redor do cubo no centro do mesmo e usava-se o valor médio como medida do percurso do pulsos ultrassônicos, posteriormente fazia a medição do tempo, considerando-se sempre o menor valor observado. Os cubos eram então revestidos por várias camadas de filme plástico e armazenados no interior de uma caixa de isopor, junto à sala do GPEND, até a próxima leitura. A Figura 3-25 apresenta leitura no dispositivo.

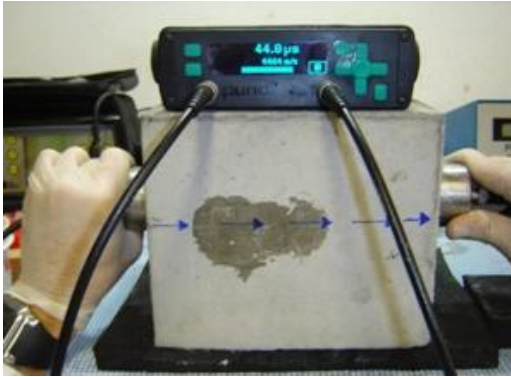


Figura 3-25 Leitura nos dispositivos de concreto.

3.3.3.3.1 Velocidade nos corpos de prova de concreto

De forma similar ao procedimento adotado nos cubos, os corpos de prova de concreto, na idade de ensaio, eram retirados do interior da caixa de isopor e o filme que os revestia era removido. Usando paquímetro eletrônico duas medidas de distância eram feitas. O valor médio era adotado como sendo a distância de topo a topo. Duas ou mais medições de tempo eram feitas, empregando-se a menor delas. A Figura 3-26 apresenta o procedimento adotado.



Figura 3-26 Determinação da velocidade em corpos de prova de concreto.

3.3.4. *Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado miúdo*

Para a determinação da velocidade do agregado miúdo foi necessário empregar o modelo de duas fases, conforme apresentado no item 3.12.2. Para aplicação desse modelo fez-se necessário o conhecimento das

proporções volumétricas dos constituintes da argamassa, isto é, do volume da pasta e volume do agregado miúdo, e também das velocidades de pulsos ultrassônicos na pasta e na argamassa. Para a determinação da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através dos agregados miúdos utilizou-se os dados obtidos das velocidades médias das pastas (P48, P55 e P65) e das argamassas (A48, A55 e A65), descritas anteriormente, obtidas em cada uma das idades. Além disso, fez-se necessária a aplicação da Equação 3-1.

$$v_{am} = \left[\frac{V_{am}}{\left(\left(\frac{1}{v_{arg}} \right) - \left(\frac{V_p}{v_p} \right) \right)} \right] \quad \text{Equação 3-1}$$

3.3.5. Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado graúdo

Para a determinação da velocidade do agregado graúdo foi necessário empregar o modelo de três fases (Equação 3-9), a partir do conhecimento das proporções volumétricas da pasta, do agregado miúdo, e do agregado graúdo além das velocidades no concreto, na pasta e no agregado miúdo.

Foram empregadas as velocidades obtidas nos concretos das misturas M4832VG19, M5532VG19 e M6532VG19 e M4832VD19, M5532VD19 e M6532VD19 e as velocidades obtidas nas pastas P48, P55 e P65 e a velocidade média do agregado miúdo.

A Equação 3-2 apresenta as variáveis necessárias para a determinação da velocidade do agregado graúdo.

$$v_{ag} = \left[\frac{V_{ag}}{\left(\left(\frac{1}{v_c} \right) - \left(\frac{V_p}{v_p} \right) - \left(\frac{V_{am}}{v_{am}} \right) \right)} \right] \quad \text{Equação 3-2}$$

4. Apresentação de resultados

4.1. Materiais empregados

4.1.1. Agregados

Nas Tabelas A1 a A8 do Apêndice são apresentadas as distribuições granulométricas dos agregados grãos graníticos da Mineradora Cedro, com D.M.C.=19,0 mm e com D.M.C.=9,5 mm, a granulometria do agregado grão de diabásico, proveniente da Mineradora Cedro, da Cidade de Maracajá, os valores individuais da massa específica do agregado miúdo de britagem das rochas graníticas da Mineradora Cedro, os valores individuais das massas específicas do agregado miúdo de dunas, a granulometria do agregado miúdo de britagem, a granulometria do agregado miúdo proveniente de dunas e a distribuição granulométrica do agregado miúdo com 70% de areia de britagem e 30% de areia de dunas. A Tabela 4-1 a seguir resume os resultados obtidos.

Tabela 4-1 Características dos agregados

Agregados	Massa específica (kg/dm ³)	D.M.C (mm)	Módulo Finura	Absorção média (%)
Agregado grão granítico	2,676	19,0	7,00	0,739
		9,5	5,94	
Agregado grão diabásico	2,897	19,0	6,92	0,556
Agregado miúdo de britagem	2,636	6,3	3,08	-
Agregado miúdo areia natural	2,650	1,2	1,27	-
Areia (70% Areia de britagem e 30% areia natural)	2,640	6,3	2,54	0,775

4.1.2. Cimentos

Os ensaios de caracterização da evolução da resistência à compressão do cimento CPV-ARI-RS utilizado nesta pesquisa estão apresentados na Tabela A9 do Apêndice. Os resultados individuais das massas

específicas dos cimentos CP IV-RS e CP V-ARI-RS, estão apresentadas nas Tabelas A-10 e A-11, respectivamente. Os valores médios obtidos foram de:

- Massa específica média do cimento CP IV-32: $2,854 \text{ g/cm}^3$.
- Massa específica média do cimento CPV-ARI-RS: $2,975 \text{ g/cm}^3$.

As características químicas e físicas deste cimento são apresentadas na Figura A9 e Figura A9, nos apêndices.

4.2. Rochas-mãe

4.2.1. Localização, vista aérea, bancadas e amostras obtidas nas Mineradoras

O momento da seleção e coleta das amostras na Mineradora Cedro é mostrado na Figura A10, o momento da coleta na Mineradora Saibrita apresenta-se na Figura A11. O local de coleta na Mineradora Sulcatarinense, na Figura A12, na Figura A13, apresenta-se a coleta na Mineradora Santa Bárbara.

4.2.2. Determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos em prisma de rochas

Os valores individuais da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através dos prismas das rochas, provenientes de cada uma das mineradoras, nas três direções e nas três condições e são apresentados no apêndice.

Apresenta-se na Tabela A12 as velocidades de pulsos ultrassônicos nos prismas de rocha da Mineradora da Santa Bárbara, na Tabela A13 as velocidades nos prismas da Mineradora Sulcatarinense, e na Tabela A14 as velocidades dos prismas da Mineradora Saibrita.

Os valores da velocidade de pulsos ultrassônicos nos prismas de rochas graníticas da Mineradora Cedro são apresentados na Tabela A15 e, por último, na Tabela 16 as velocidades nos prismas de diabásio da Mineradora Cedro da Cidade de Maracajá são apresentados.

A Tabela 4-2 apresenta a velocidade média da propagação de pulsos ultrassônicos através das rochas-mãe.

Tabela 4-2 Velocidade média dos pulsos ultrassônicos nas rochas mães (m/s)

Mineradora	Seca ao ar	Seca em estufa	Saturada sup. seca
Granito			
Santa Bárbara	5795	5261	6102
Sulcatarinense	5476	4903	5682
Saibrita	5750	5468	5974
Cedro (Palhoça-SC)	5254	4677	5779
Diabásio			
Cedro (Maracajá-SC)	6110	6002	6096

4.2.3. Determinação da massa específica e absorção

A Tabela 4-3 apresenta os valores médios obtidos para a massa específica e absorção dos corpos-de-prova prismáticos extraídos da rocha mãe. Os valores individuais da massa específica e absorção, obtidos por meio do ensaio de prismas das rochas-mãe, encontram-se nas Tabela A17, Tabela A18, e Tabela A19.

Tabela 4-3 Valores da massa específica e absorção das amostras de rochas

Granito		
Mineradora	Massa espec. média (g/cm ³)	Absorção média. (%)
Santa Bárbara	2,759	0,124
Sulcatarinense	2,620	0,267
Saibrita	2,622	0,122
Cedro (Palhoça-SC)	2,660	0,125
Diabásio		
Mineradora	Massa espec. média (g/cm ³)	Absorção média. (%)
Cedro (Maracajá/SC)	2,954	0,107

4.2.4. Resistência à compressão nas rochas- mães

Na Tabela 4-4 apresentam-se os valores de resistência à compressão das rochas graníticas e diabásicas.

Tabela 4-4 Resistência à compressão dos corpos de prova das rochas graníticas e diabásicas

Tipo de rocha	Corpos de Prova	Resistência à compressão (MPa)
Granito	cp 1	134
	cp 2	107
	cp 3	150
Diabásio	cp 1	159
	cp 2	176
	cp 3	184

Observou-se que os resultados foram influenciados grandemente pela qualidade do processo de retificação da amostra. Nas amostras de rocha diabásicas foram obtidas superfícies bastante planas, essa pode ter sido a razão motivo pela qual as variações de resistência foram bem inferiores aos das amostras de rocha granítica.

4.3. Misturas

4.3.1. Pastas

Apresenta-se na Tabela 4-5 os resultados das velocidades de propagação dos pulsos ultrassônicos através das pastas de cimento com relação $a/c=0,48$ (P48), $a/c=0,55$ (P55) e $a/c=0,65$ (P65), ao longo das diferentes idades. Os valores referem-se à média obtida a partir da leitura de 6 corpos de prova de 10 x 20 cm.

Tabela 4-5 Velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta (m/s)

relação a/c	Idade (dias)					
	1	3	5	7	14	28
0,48	2913	3274	3350	3353	3404	3459
0,55	2883	3022	3099	3149	3231	3285

4.3.2. Argamassas

Os resultados da velocidade de pulsos ultrassônicos através das argamassas de concreto com relação $a/c=0,48$, $a/c=0,55$ e $a/c=0,65$, são apresentados na Tabela 4-6. Os valores referem-se à média de 6 leituras em corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm.

Tabela 4-6 Velocidade de pulsos ultrassônicos na mistura de argamassa

relação a/c	Idade (dias)					
	1	3	5	7	14	28
0,48	3635	4021	4091	4078	4122	4179
0,55	3656	3802	3924	3942	4036	4098
0,65	3646	3792	3834	3886	3934	4008

4.3.3. Concreto

4.3.3.1. Abatimento, massa específica teórica, massa específica real e teor de ar incorporado.

A Tabela 4-7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de consistência (*Slump-test*), massa específica teórica, massa específica obtida e teor de ar incorporado, em cada mistura de concreto estudada.

Tabela 4-7 Valores de abatimento, massa específica teórica, real e teor de ar incorporado das misturas de concreto.

Mistura	Abatimento (cm)	Massa esp. teórica (kg/dm ³)	Massa esp. (kg/dm ³)	Ar incorporado (%)
M4828VG19	7	2,441	2,397	1,80
M4832VG19	9	2,407	2,364	1,80
M4836VG19	11	2,374	2,364	0,41
M4832IVG19	9	2,397	2,367	1,25
M4832VD19	10	2,490	2,458	1,30
M5528VG19	10	2,424	2,390	1,38
M5532VG19	13	2,386	2,372	0,58
M5536VG19	15	2,351	2,358	-0,29
M5532IVG19	12	2,378	2,358	0,83
M5532VD19	13	2,469	2,464	0,23
M5532VG9,5	10	2,386	2,359	1,11
M6528VG19	18	2,403	2,373	1,27
M6532VG19	23	2,364	2,324	1,67
M6532VD19	19	2,445	2,442	0,12

4.3.3.2. Início e fim de pega

Quando se adota o método proposto pela ASTM C 403 (ASTM, 2008), e também pela ABNT NBR NM 09:2003, para a determinação do início e fim de pega, faz-se necessário que o concreto seja peneirado na peneira de 4,8 mm. O monitoramento do início e fim de pega é relacionado à resistência à penetração nesta argamassa. A penetração do

concreto foi feita com uma agulha de Proctor com diferentes diâmetros. A resistência é dada pela razão entre a força necessária para uma penetração de 2,5 cm, em 10 segundos, pela área da agulha utilizada. Na Figura 4-3 mostra-se o penetrômetro de Proctor que foi utilizado.



Figura 4-1 Penetrômetro de Proctor utilizado para a determinação do início e fim de pega em concretos

Uma resistência de 3,5 MPa é associada ao início de pega, enquanto a resistência de 27,6 MPa ao final da pega. Uma das dificuldades da utilização deste método está na necessidade do peneiramento do concreto.

Alternativamente, pode-se utilizar o método da velocidade de pulsos ultrassônicos e correlacionar com os valores obtidos no penetrômetro de Proctor com os valores da velocidade de pulsos ultrassônicos através da argamassa peneirada. Para tanto, após o lançamento e adensamento inicia-se o monitoramento da velocidade de pulsos ultrassônicos na argamassa peneirada, empregando-se o dispositivo mostrado na Figura 3-24. Além disso, pode-se correlacionar o início e fim de pega com a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto, bastando empregar o modelo de duas fases.

Os resultados de início e fim de pega para as misturas de concreto nas quais este ensaio foi realizado são apresentados na Tabela 4-8.

Tabela 4-8 Início e fim de pega de algumas misturas de concreto

Mistura	tempo de pega (horas)		velocidade (m/s)	
			argamassa	pasto
M4832VG	início	9,8	2656	1806
	fim	11,5	3191	2316
M5528VG	início	8,9	2539	1523
	fim	11,0	3105	2007
M6528VG	início	9,8	2340	1385
	fim	12,0	3557	2522
M4832IVG	início	11,9	2700	1818
	fim	14,1	3250	2348
M5532IVG	início	13,1	2429	1584
	fim	15,3	3067	2164

4.3.3.3. Resistência à compressão

A resistência média à compressão dos corpos de prova de concreto das misturas investigadas avaliadas nas idades de 12 h, 18 h, 24 h, 2 dias, 3 dias, 5 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias são apresentadas na Tabela 4-9. Os resultados individuais são apresentados nas Tabela A20 à Tabela A33, nos apêndices.

4.3.3.4. Evolução da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos nos dispositivos de concreto e nos corpos-de-prova.

A Tabela 4-10 apresenta os resultados de velocidade de propagação ultrassônica nos corpos-de-prova e no dispositivo para as misturas de concreto investigadas avaliadas nas idades de 12 h, 18 h, 24 h, 2 dias, 3 dias, 5 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias. Os valores da velocidade no dispositivo foram obtidos a partir de uma única leitura, enquanto que a velocidade no concreto nos corpos de prova foi obtida a partir de quatro leituras.

Tabela 4-9 Resultados de resistência média à compressão das misturas de concreto (em MPa)

	Idade (Dias)									
	0,5	0,75	1	2	3	5	7	14	28	
M4828VG	2,91	13,22	18,59	27,98	32,36	36,28	38,18	42,13	42,94	
M4832VG	2,28	13,81	18,79	27,79	30,27	32,75	35,35	39,94	43,34	
M4836VG	1,00	1,22	19,78	28,21	31,72	33,88	34,99	39,09	43,26	
M4832IVG	0,50	6,73	13,99	22,91	27,23	29,76	33,30	37,20	43,90	
M4832VD	1,64	12,96	20,48	27,53	30,58	33,13	34,63	40,28	45,73	
M5528VG	2,82	10,42	15,80	24,65	27,62	29,86	32,41	35,34	37,59	
M5532VG	0,34	4,06	11,13	23,96	26,68	30,22	33,29	36,26	40,65	
M5536VG	0,59	6,43	12,73	20,11	24,72	-	29,63	34,95	38,18	
M5532IVG		3,66	9,78	16,70	20,46	23,08	24,09	28,30	33,89	
M5532VD	1,67	9,78	14,03	18,58	20,42	25,17	26,47	27,45	35,53	
M5532VG9,5	0,50	6,20	13,70	22,70	25,90	29,10	29,80	36,30	41,60	
M6528VG	0,91	5,97	9,85	17,60	20,35	22,56	23,42	26,87	29,34	
M6532VG	0,84	6,35	9,62	15,83	18,24	19,44	20,50	24,53	26,41	
M6532VD	0,98	6,26	10,25	16,76	18,02	21,62	22,18	25,44	27,97	

A média apresentada refere-se à média dos valores obtidos em 4 corpos-de-prova. Para a obtenção do valor médio foram excluídos os valores que estavam 10% acima da média e os valores que estavam 10% abaixo da média.

Tabela 4-10 Resultados de velocidade de pulsos ultrassônicos para as misturas de concreto (em m/s).

	Idade (Dias)											
	0,5	0,75	1	2	3	5	7	14	28			
M4828VG	3273	3980	4106	4377	4398	4475	4492	4518	4651			
M4832VG	3213	4001	4102	4305	4387	4424	4477	4479	4605			
M4836VG	2982	3990	4307	4307	4325	4359	4369	4524	4548			
M4832IVG	2810	3707	4133	4306	4349	4368	4485	4515	4561			
M4832VD	3351	4313	4566	4737	4766	4880	4980	4919	4959			
M5528VG	3145	3863	3996	4266	4390	4355	4429	4436	4515			
M5532VG	2769	3599	4069	4358	4409	4366	4470	4577	4583			
M5536VG	3072	3669	4093	4385	4307	-	4347	4428	4450			
M5532IVG		3599	4069	4358	4409	4366	4470	4476	4565			
M5532VD	3391	4251	4445	4616	4638	4703	4716	4732	4823			
M5532VG9,5	2811	3902	4137	4305	4356	4413	4450	4515	4523			
M6528VG	2803	3709	3966	4223	4246	4278	4342	4491	4529			
M6532VG	2727	3536	3854	3991	4211	4140	4201	4283	4345			
M6532VD	3129	3918	4178	4395	4640	4562	4600	4639	4728			

Os valores de velocidade, obtidos por meio dos corpos de prova, referem-se à média de quatro leituras.

4.3.3.5. Comportamento da evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos no dispositivo e nos corpos de prova

As Figuras 4-2 à 4-15 apresentam os resultados da evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos, ao longo do tempo, medidos no dispositivo imediatamente após o adensamento e nos corpos de prova de concreto, nas idades já descritas.

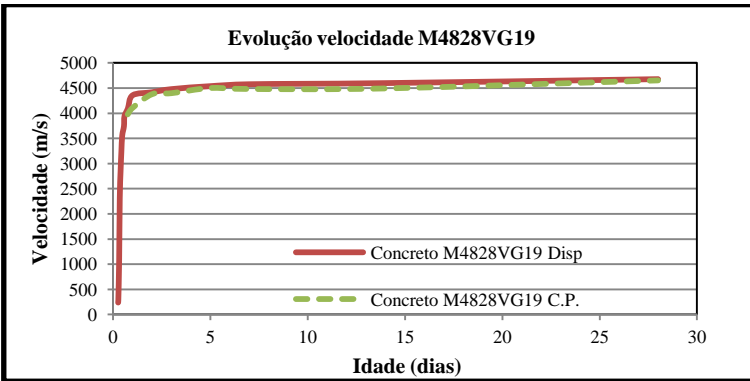


Figura 4-2 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M4828VG19

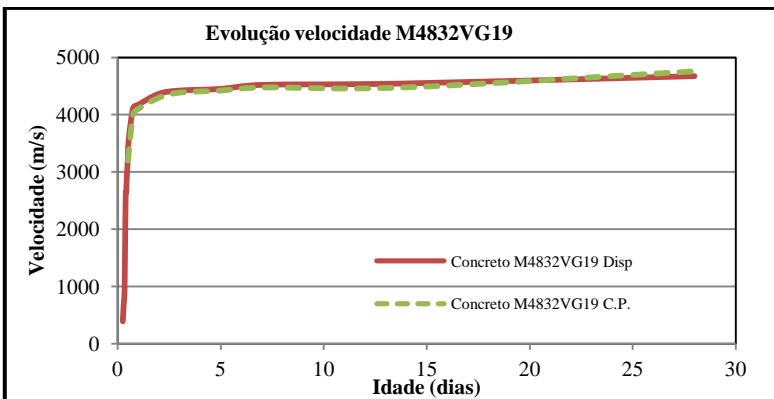


Figura 4-3 Evolução da velocidade de pasta e concreto M4832VG19

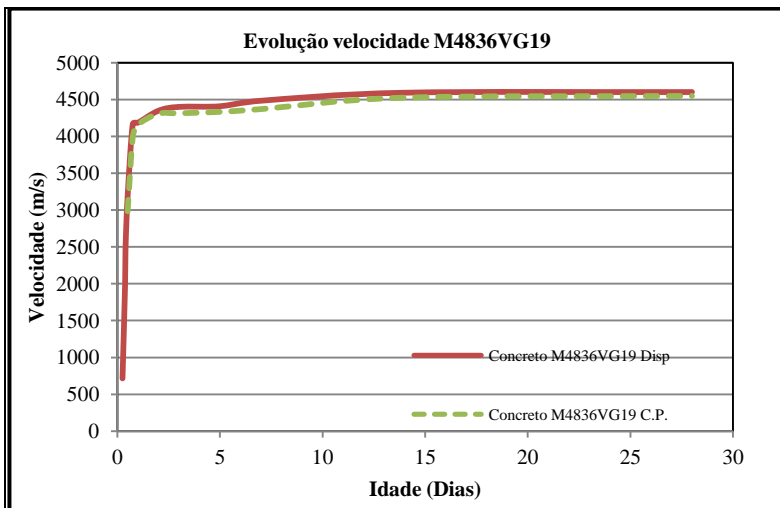


Figura 4-4 Evolução da velocidade da pasta e concreto da mistura M4836VG19

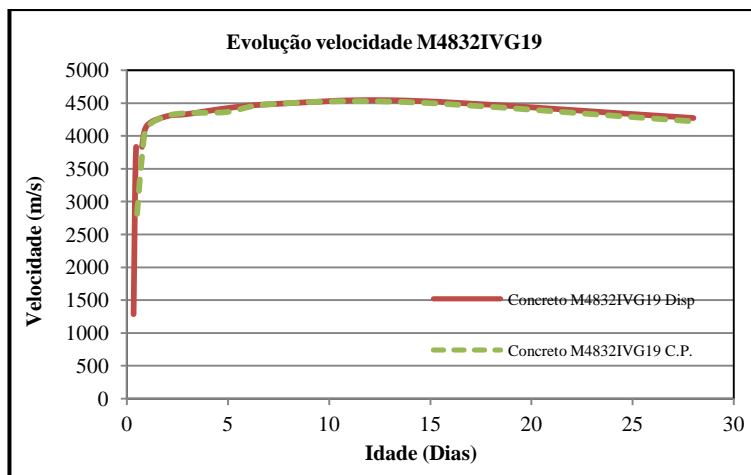


Figura 4-5 Evolução da velocidade de pasta e concreto da mistura M4832IVG19

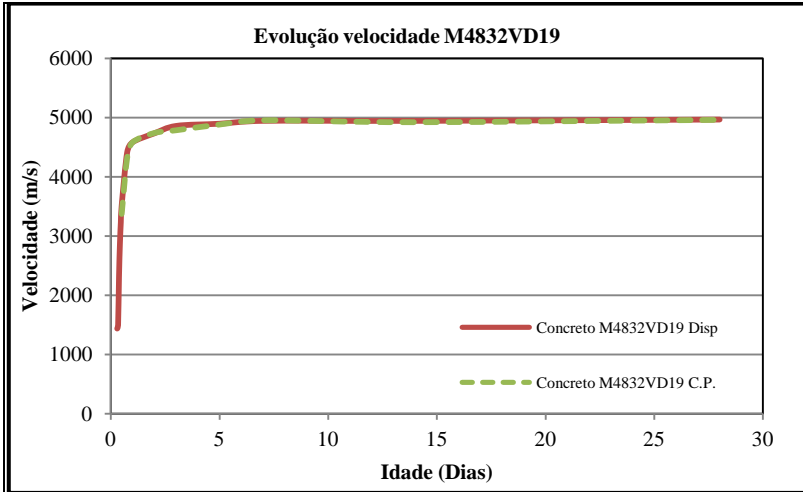


Figura 4-6 Evolução da velocidade de pasta e concreto na mistura M4832VD19

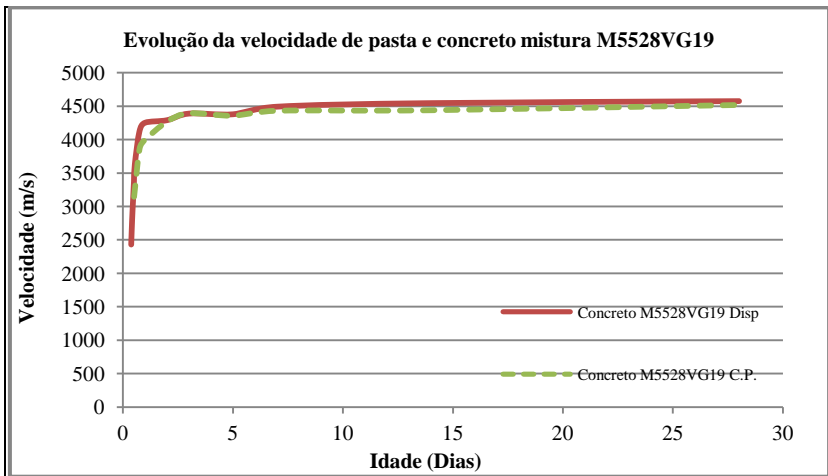


Figura 4-7 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5528VG19

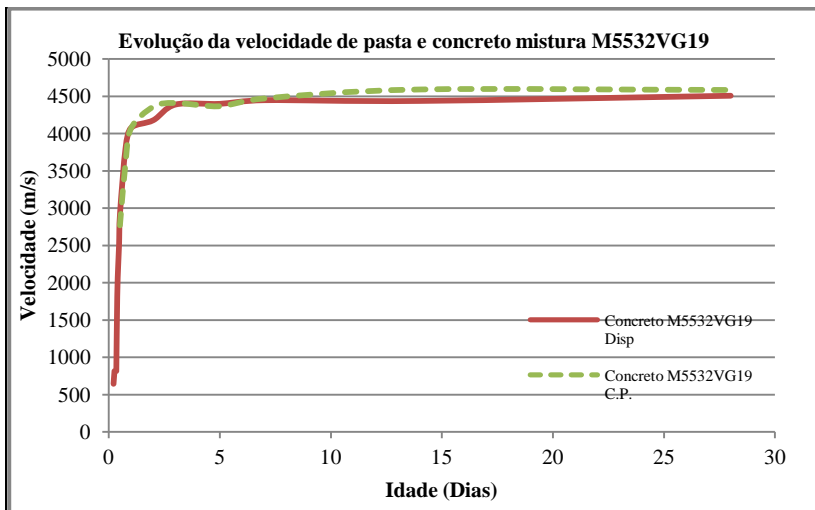


Figura 4-8 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5532VG19

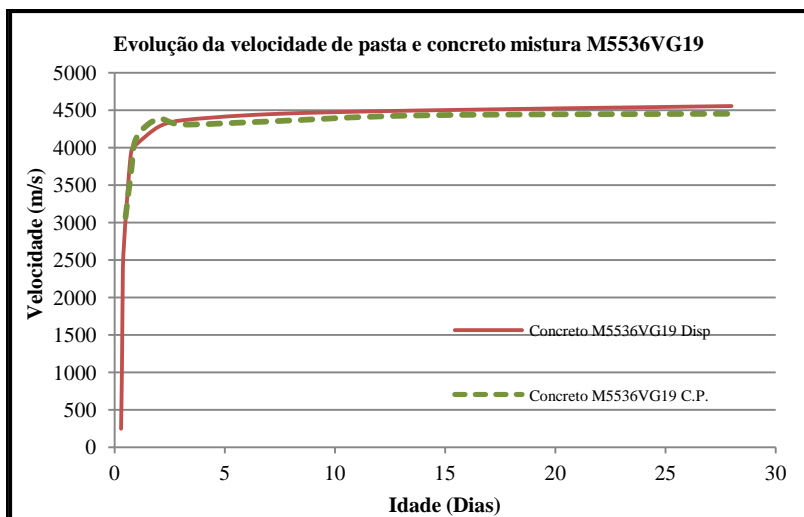


Figura 4-9 Evolução da velocidade de pasta e concreto da mistura M5536VG19

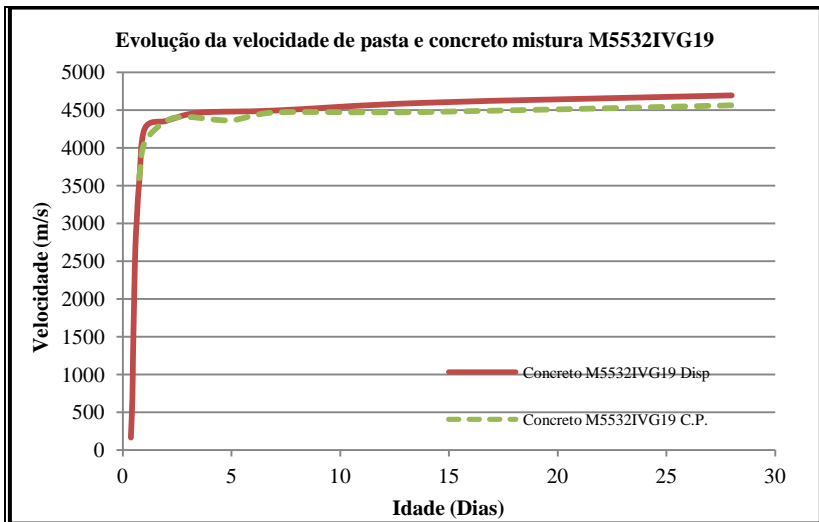


Figura 4-10 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5532IVG19

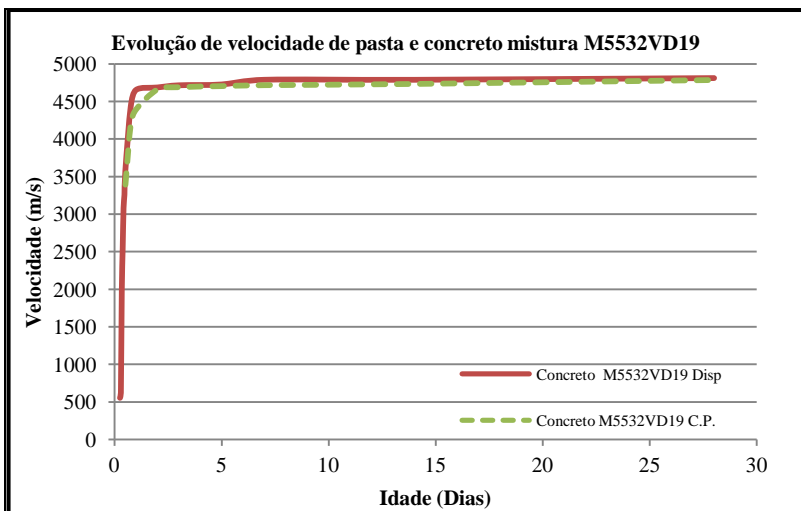


Figura 4-11 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M5532VD19

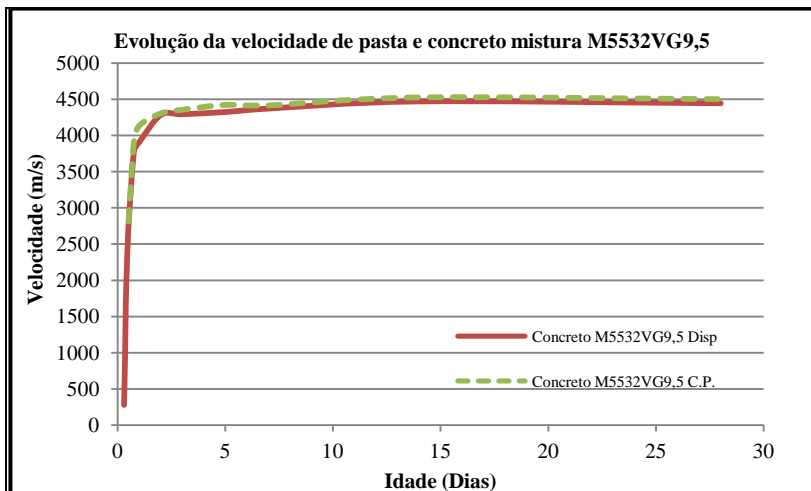


Figura 4-12 Evolução velocidade de pasta e concreto mistura M5532VG9,5

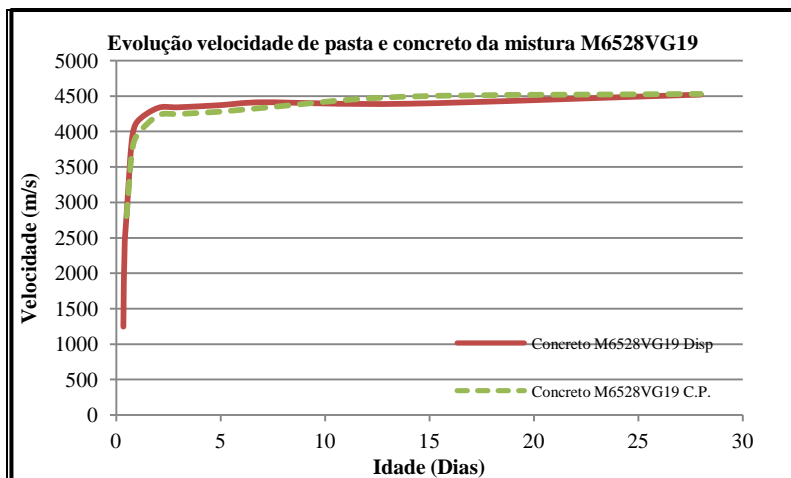


Figura 4-13 Evolução da velocidade de pasta e concreto mistura M6528VG19

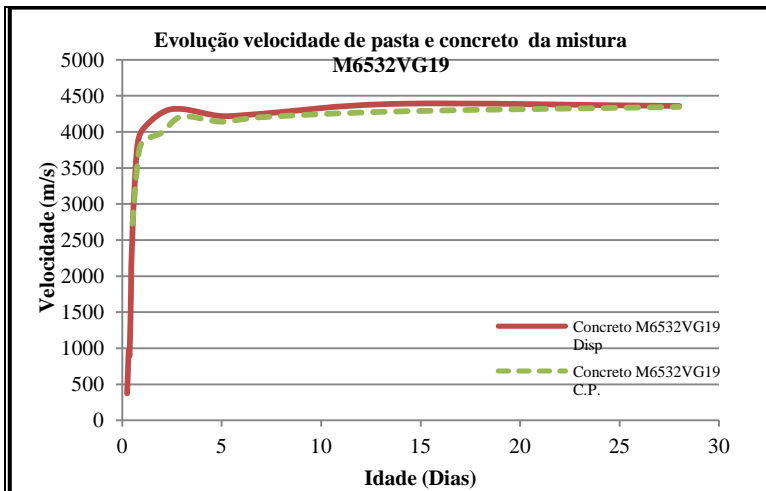


Figura 4-14 Evolução da velocidade de pasta e concreto da mistura M6532VG19

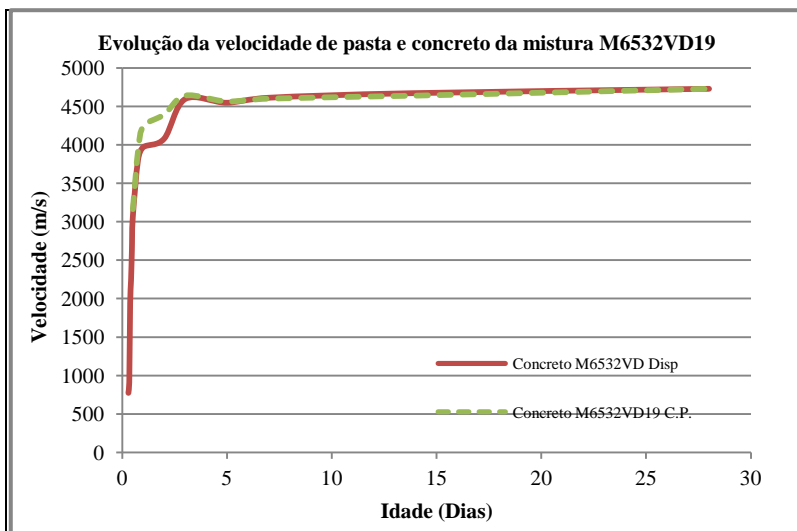


Figura 4-15 Evolução velocidade de pasta e concreto da mistura M6532VD19

Observa-se que em todas as misturas, as velocidades medidas no dispositivo e as velocidades medidas nos corpos-de-prova apresentaram resultados bem similares. O dispositivo, entretanto, permitiu a avaliação da velocidade em idades iniciais. Comprovando que o mesmo pode ser empregado quando o objeto de estudo for as primeiras horas.

A evolução da temperatura nas pastas, argamassas de concreto, concreto, e meio ambiente está apresentada nas Figura 4-16 a Figura 4-28, para cada mistura investigada, a partir das primeiras horas após a concretagem.

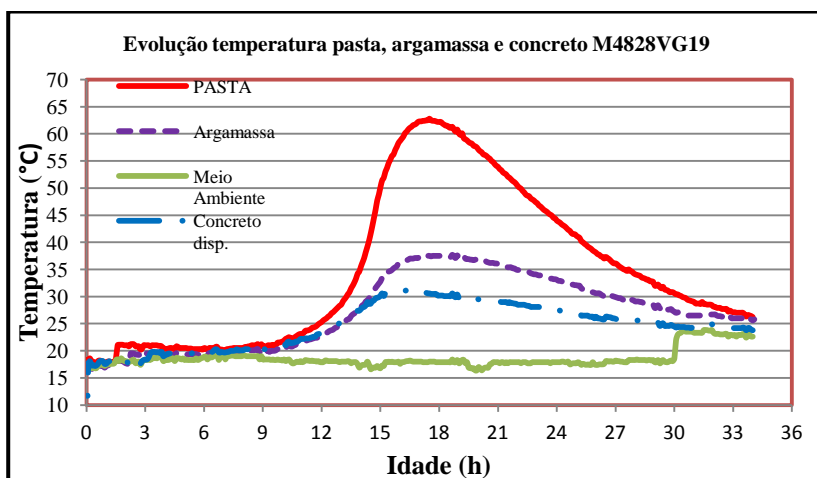


Figura 4-16 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto, nas primeiras horas, M4828VG19

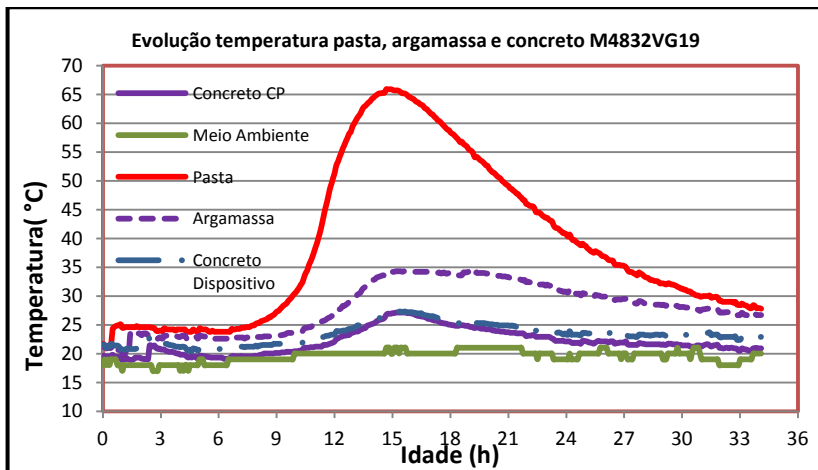


Figura 4-17 Evolução temperatura pasta, argamassa e concreto M4832VG19.

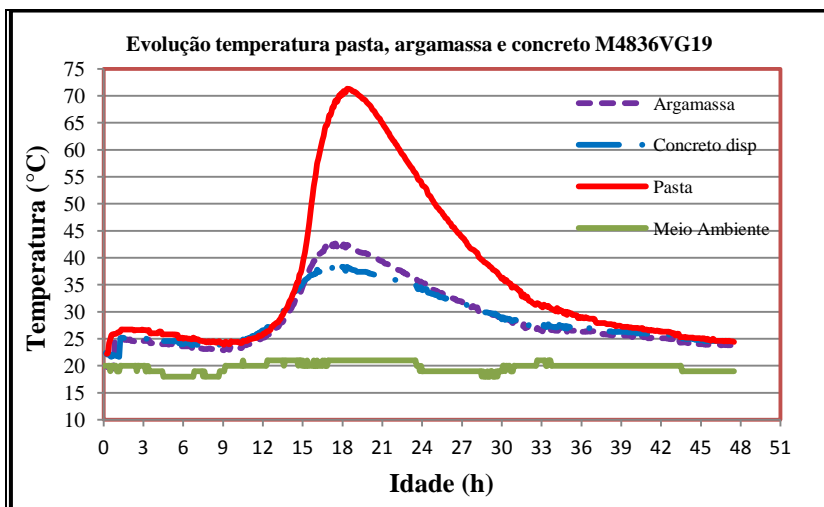


Figura 4-18 Evolução temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M4836VG19.

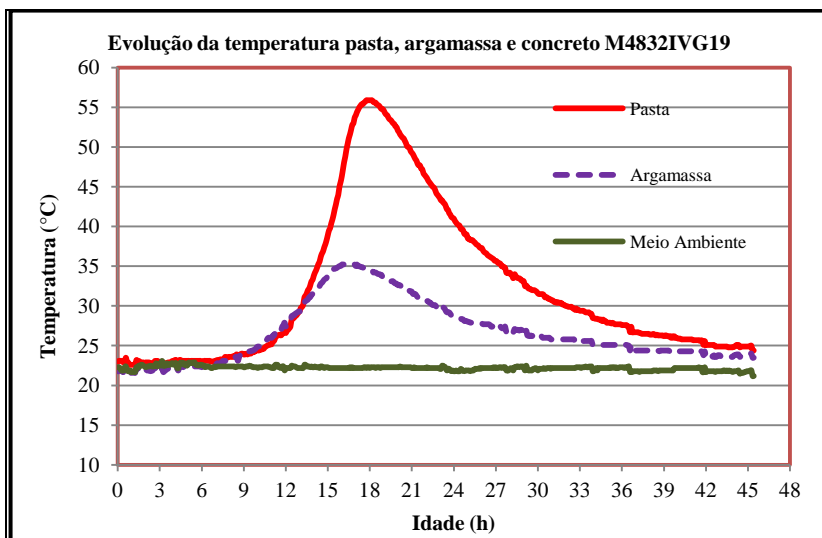


Figura 4-19 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M4832IVG19

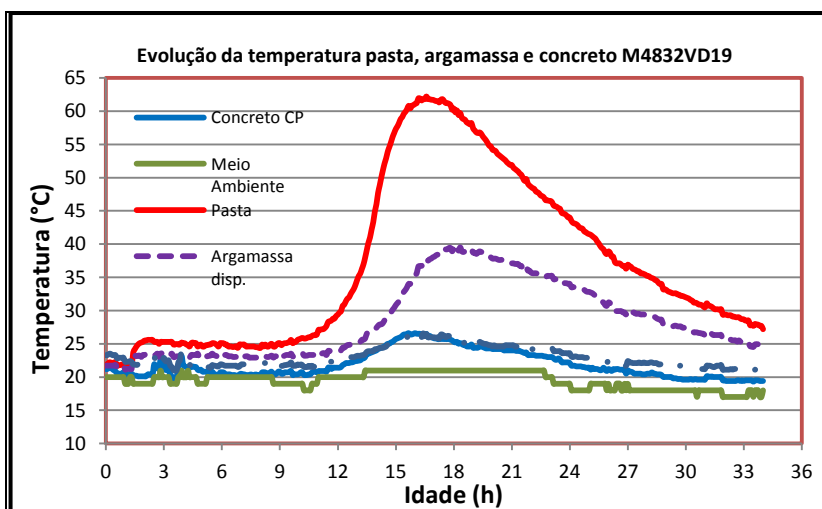


Figura 4-20 Evolução temperatura em pasta, argamassa e concreto na mistura M4832VD19

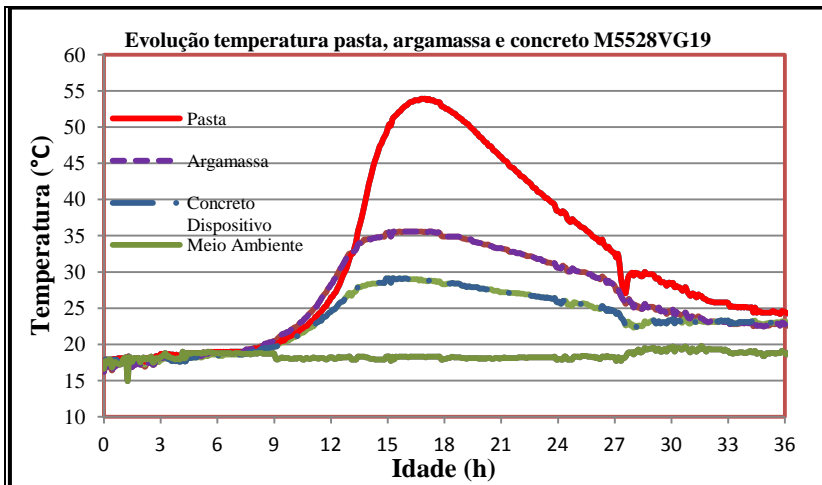


Figura 4-21 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M5528VG19.

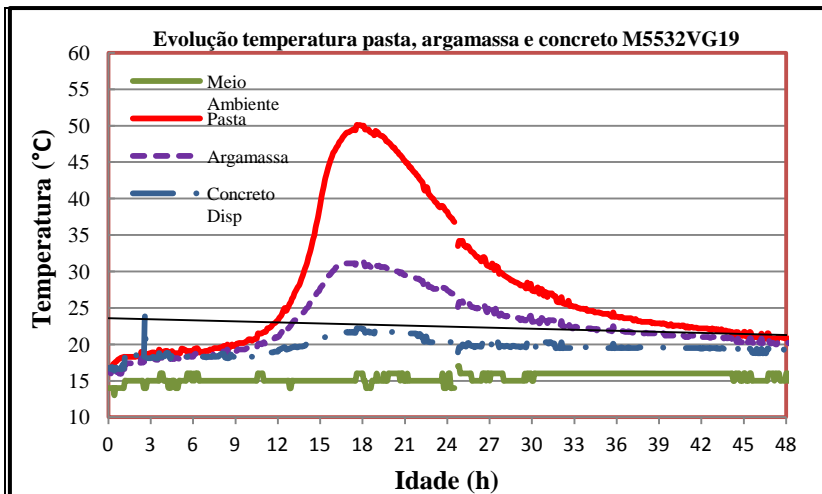


Figura 4-22 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M5532VG19.

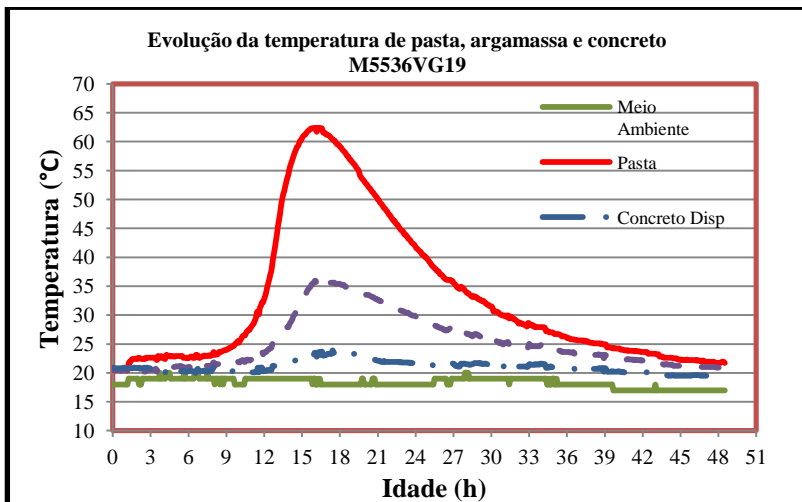


Figura 4-23 Evolução temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M5536VG19.

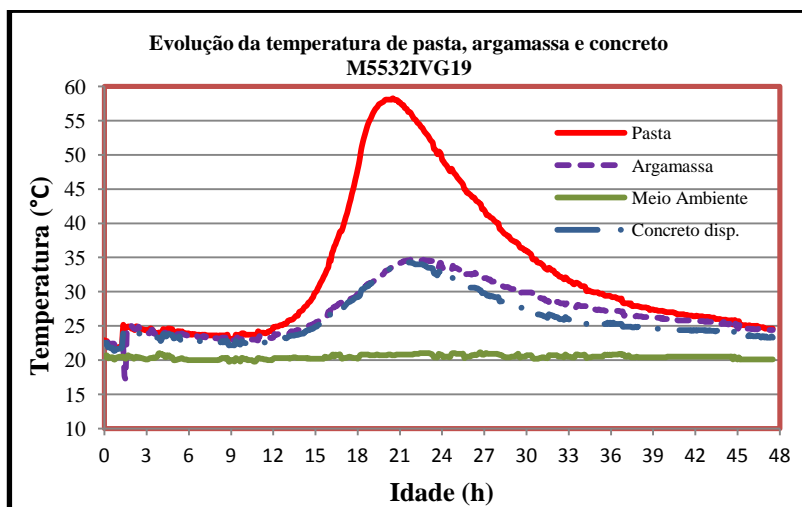


Figura 4-24 Evolução temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M5532IVG19

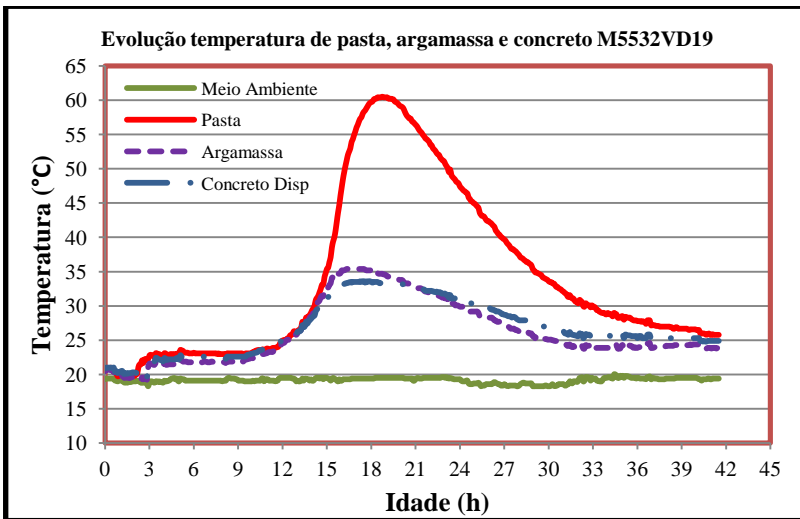


Figura 4-25 Evolução temperatura pasta, argamassa e concreto mistura M5532VD19

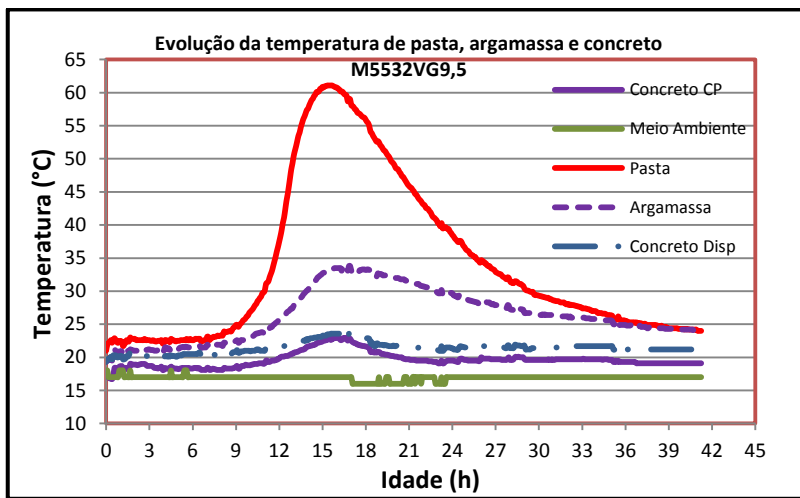


Figura 4-26 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto mistura M5532VG9,5

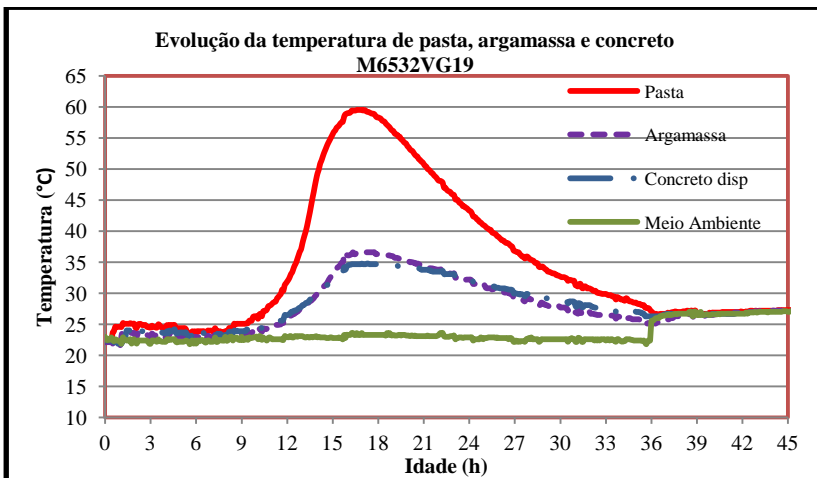


Figura 4-27 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M6532VG19

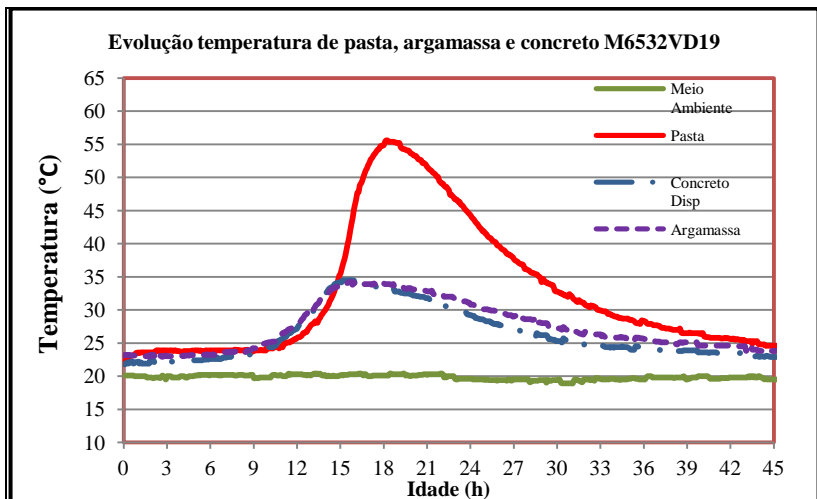


Figura 4-28 Evolução da temperatura de pasta, argamassa e concreto da mistura M6532VD19

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Análise da velocidade dos pulsos ultrassônicos nas rochas.

A velocidade média de propagação dos pulsos ultrassônicos através das amostras analisadas de diabásio foi superior à velocidade média dos pulsos ultrassônicos através das amostras de granito, como pode ser constatado através da análise dos resultados apresentados na Tabela 4-2.

Sob as mesmas condições de saturação foram verificadas diferenças de velocidade de pulsos ultrassônicos de 800 m/s entre as amostras na condição saturada superfície seca, de 564 m/s na condição seca ao ar e de 420 m/s na condição seca em estufa. A Figura 5-1 apresenta os valores médios da velocidade de pulsos ultrassônicos nas amostras de rocha de cada uma das mineradoras, nas condições saturada superfície seca, seca ao ar e seca em estufa.

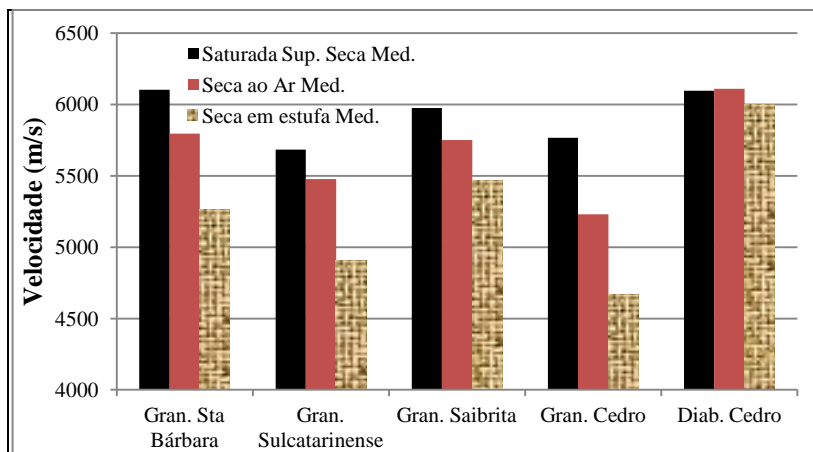


Figura 5-1 Variações na velocidade média de pulsos ultrassônicos em função da condição de saturação

Observando-se os valores apresentados na Tabela 4-2 e representados graficamente na Figura 5-1, pode-se constatar que as velocidades dos pulsos ultrassônicos foram influenciadas pela origem das rochas e condição de saturação quando da realização do ensaio.

Na condição seca em estufa, as amostras de rochas graníticas da mineradora Sulcatarinense apresentaram a menor velocidade média de pulsos ultrassônicos, 4903 m/s. Por outro lado, as amostras de rochas da mineradora Saibrita apresentaram velocidade média de pulsos ultrassônicos de 5469 m/s, uma diferença de 11%.

Na condição seca ao ar, as amostras de rocha da mineradora Santa Bárbara apresentaram a maior velocidade média de pulsos ultrassônicos, 5795 m/s, as amostras de rocha da mineradora Cedro apresentaram a menor velocidade média, 5231 m/s. Portanto, as amostras de mineradora Santa Bárbara apresentaram velocidade média de pulsos ultrassônicos 11% superior à velocidade de pulsos ultrassônicos nas amostras de rocha da mineradora Cedro. Por último, na condição saturada superfície seca, as amostras que apresentaram maior velocidade média de pulsos ultrassônicos foram as da Mineradora Santa Bárbara, com 6102 m/s e, as que apresentaram menor velocidade média de pulsos ultrassônicos foram as amostras de rochas da Mineradora Sulcatarinense, com 5682 m/s.

Variações de até 23% foram observadas na velocidade dos pulsos ultrassônicos nas rochas graníticas ensaiadas em função da consideração de saturação das rochas (Mineradora Cedro), o que evidencia a grande influência deste fator no ensaio de ultrassom. Por outro lado, o mesmo comportamento não se pode inferir em relação às amostras de rocha de diabásio.

Estas variações indicam a necessidade de avaliação da velocidade no agregado graúdo específico a ser utilizado na mistura do concreto quando se deseja utilizar o modelo proposto, o qual correlaciona velocidade da pasta e resistência à compressão. Um valor padrão utilizável para a velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos em um determinado tipo de rocha poderá não fornecer a acurácia desejada

5.2. Velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados miúdos

A velocidade de pulsos ultrassônicos da combinação de agregado miúdo (30% areia natural e 70% areia de britagem) foi obtida utilizando-se o modelo de duas fases apresentado na Equação 3-1. Para tanto, foram utilizados os valores de velocidade do ultrassom medidos nos corpos de

prova de pasta e de argamassa apresentados nas Tabela 4-5 e Tabela 4-5 e os volumes conhecidos de cada fase (agregado miúdo e pasta) referente às misturas de argamassas. Os valores calculados de velocidade estão apresentados na Tabela 5-1

Tabela 5-1 Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado miúdo

Relação a/c	Idade (dias)	Vel. agregado miúdo (m/s)	Vel.média agregado miúdo (m/s)
0,48	1	4856*	5255
	3	5233	
	5	5275	
	7	5224	
	14	5245	
	28	5298	
0,55	1	4994*	5322
	3	5186	
	5	5344	
	7	5266	
	14	5372	
	28	5443	
0,65	1	5441	5459
	3	5559	
	5	5491	
	7	5423	
	14	5359	
	28	5482	

*espúrios

Verifica-se, pelos valores apresentados na Tabela 5-1 que a velocidade cresceu com o aumento da relação água/cimento. Para relação a/c=0,48 velocidade média de 5255 m/s, para relação a/c=0,55 velocidade média de 5322 m/s e, para a/c=0,65 velocidade média de 5459 m/s. As velocidades de 4856 m/s e 4994, obtidas com 1 dia, nas relações a/c=0,48 e a/c=0,55, após análise estatística foram considerados espúrios.

Optou-se por adotar a média das velocidades médias obtidas para cada relação água/cimento, isto é, o valor de 5345 m/s para todas as misturas investigadas, por entender que esse é o valor central e, portanto, não iriam distorcer os valores que viessem a serem obtidos a partir dele.

5.3. Velocidade de pulsos ultrassônicos no agregado graúdo

Para a determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados graúdos utilizou-se o modelo de três fases e a Equação 3-2, com os valores de velocidade de pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto de referência (M5532VG19 para o agregado graúdo granítico e a M5532VD19 para o agregado de diabásio), a velocidade das pastas Tabela 4-5 a velocidade nos agregados miúdos (5345 m/s) e o volume dos constituintes nas misturas. A Tabela 5-2 apresenta o volume dos materiais em cada uma das misturas utilizadas.

Tabela 5-2 Volume dos materiais em cada mistura (%)

Volumes	Argamassa 0,55	M5532VG19	M5532VD
Pasta	49,8	31,6	31,2
Agregado miúdo	50,2	31,9	34,5
Agregado graúdo	-	36,5	34,3

A Tabela 5-3 apresenta os valores das velocidades obtidas em cada uma das idades e a média empregada para cada um dos agregados graúdos.

A média apresentada na Tabela 5-3 não considera os valores obtidos nas idades de um e três dias. Ao se comparar a velocidade dos agregados graúdos graníticos da Mineradora Cedro com a velocidade média das amostras da rocha-mãe (Mineradora Cedro) (Tabela A15), nas condições seca em estufa e seca ao ar verifica-se que a velocidade obtida nos agregados graúdos foi um pouco superior. Por outro lado, ao se comparar com a velocidade média na rocha-mãe, na condição saturada superfície seca, constata-se que a velocidade dos agregados graúdos é 4,3 % menor.

Tabela 5-3 Velocidades nos agregados graúdos.

Idade (dias)	Velocidades (m/s)	
	Granito mineradora Cedro	Diabásio mineradora Cedro
1	4800	8167
3	5732	7760
5	5549	7413
7	5624	7605
14	5372	7200
28	5524	7109
Média	5517	7332

Algumas hipóteses podem ser formuladas a partir destas observações. A primeira corresponderia ao efeito do processo de britagem, que minimizaria as superfícies de falhas dentro dos agregados graúdos e, por conseguinte implicaria em uma maior velocidade de propagação no agregado graúdo do que na rocha mãe. Esta hipótese considera que o agregado graúdo esteja em uma condição de saturação equivalente à seca ao ar ou em seca em estufa. Outra possível hipótese seria considerar que os agregados graúdos no interior do concreto possam estar numa condição de umidade superior à condição seca ao ar e inferior à condição saturada superfície seca. Nesta segunda hipótese, o processo de britagem não alteraria a velocidade do ultrassom. Uma terceira possibilidade é a não consideração da interface entre agregado graúdo e argamassa no modelo de Lin *et al.* (2003). Ainda seria possível a superposição destes efeitos.

5.4. Análise do comportamento da resistência à compressão das misturas de concreto

5.4.1. Misturas de concreto com relação $a/c=0,48$

5.4.1.1. Mistura com $a/c=0,48$ diferentes teores de pasta.

A Figura 5-2 apresenta a evolução da resistência dos concretos produzidos com relação $a/c=0,48$ e com diferentes teores de pasta.

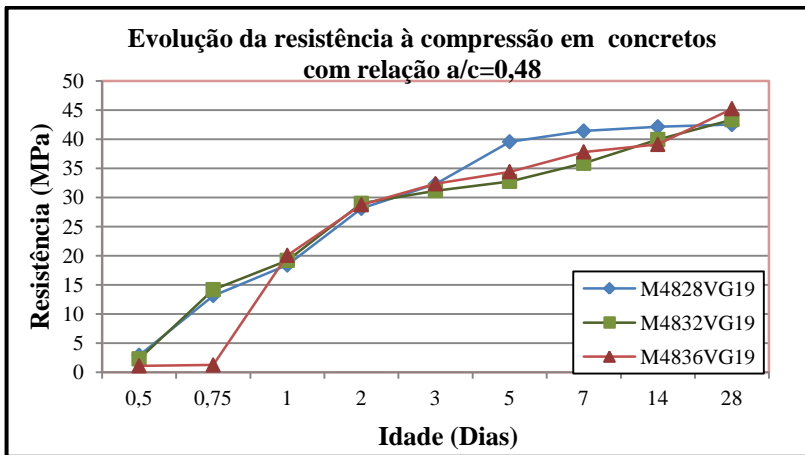


Figura 5-2 Evolução da resistência em concretos com $a/c=0,48$, com diferentes teores de pasta.

Aplicando-se logaritmo em ambas variáveis e desconsiderando-se as idades de 12 e 18 horas foi possível linearizar as relações, e assim fazer a comparação entre as mesmas. Após análise, conclui-se que não foi possível provar que as retas eram diferentes entre si, portanto as retas não diferiram entre si de forma significativa, a um nível de confiabilidade de 95%. Portanto, pode-se concluir que os concretos produzidos com teores de pasta de 28%, 32% e 36% não apresentaram diferenças significativas de resistência a compressão, a um nível de confiabilidade de 95%.

5.4.1.2. Misturas com relação $a/c=0,48$ com diferentes agregados e diferentes cimentos (CPV-ARI-RS e CP IV-32).

Apresenta-se na Figura 5-3 o comportamento da evolução da resistência à compressão de concretos com relação $a/c=0,48$, produzidos com cimento CP V-ARI, CP-IV-32, com agregados graníticos e diabásicos.

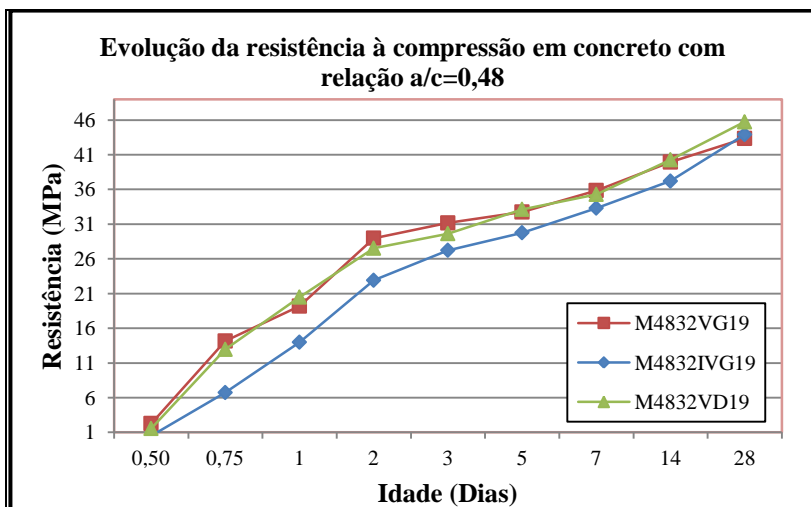


Figura 5-3 Evolução da resistência em concretos com a/c=0,48, misturas M4832IVG19, M4832VG19 e M4832VD19.

Analisando a Figura 5-3 é possível identificar que o concreto produzido com cimento CP-IV-32 apresentou, até a idade de 14 dias, resistência inferior aos demais concretos, confirmando o comportamento típico desse tipo de cimento. Quando se fez a linearização e comparou-se o comportamento da evolução da resistência destes concretos feitos com cimento CP IV-32, com os concretos feitos com CPV-ARI RS, com agregados graníticos e com agregados de diabásio, concluiu-se que a evolução da resistência entre esses concretos não é a mesma, isto é, existe diferença significativa entre as evoluções de resistência. Contudo, quando se comparou a evolução da resistência com o mesmo cimento, com agregados graníticos e basálticos, conclui-se que não existe diferença significativa entre as evoluções das resistências.

5.4.2. Misturas de concreto com relação a/c=0,55

5.4.2.1. Misturas com a/c=0,55 com diferentes teores de pasta e com diferentes dimensões máximas características.

O gráfico da Figura 5-4 apresenta a evolução da resistência à compressão de concretos com a/c=0,55, com diferentes teores de pasta e diferentes D.M.C.

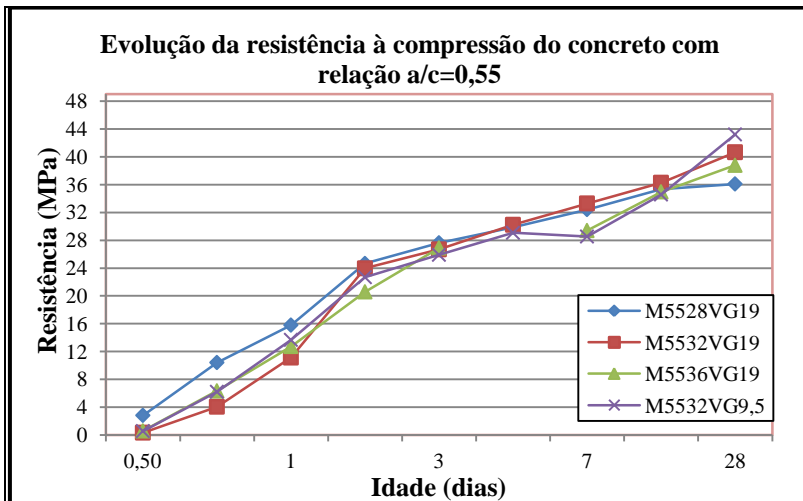


Figura 5-4 Evolução da resistência em concretos com $a/c=0,55$, com diferentes teores de pasta e diferentes D.M.C.

Até a idade de três dias o concreto da mistura M5528VG19 apresentou maior resistência que os demais. Do 5º ao 28º dia o concreto da mistura M5532 apresentou maior resistência, em comparação aos que possuíam a mesma dimensão máxima característica. O concreto da mistura M5532VG9,5 só foi mais resistente que os concretos com dimensão máxima característica de 19,0 mm na idade de 28 dias, nas demais idades os valores foram muito próximos.

Linearizando e testando-se a igualdade das retas concluiu-se que os concretos produzidos com diferentes teores de pasta, com relação $a/c=0,55$, apresentaram diferenças significativas na evolução da resistência. Contudo, não foi possível afirmar que exista diferença significativa na evolução de resistência entre os concretos com teores de pasta de 28% e 32%.

5.4.2.2. Misturas com relação $a/c=0,55$ com diferentes cimentos e diferentes tipos de agregados graúdos.

A Figura 5-5 apresenta o comportamento da evolução da resistência à compressão das misturas de concreto produzidas com a mesma relação água/cimento e mesmo teor de pasta e diferentes cimentos e agregados graúdos.

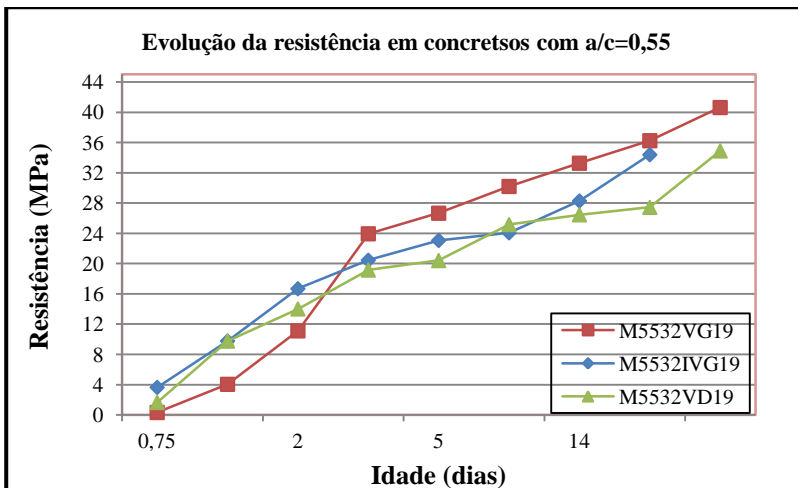


Figura 5-5 Evolução da resistência em concretos com a/c=0,55, cimentos CPV-ARI-RS e CPIV-32, (granito e diabásio).

Na Figura 5-5 constata-se que a resistência à compressão do concreto produzido com cimento CPV-ARI-RS e agregado granítico foi superior a resistência do concreto produzido com o mesmo cimento, mas com agregado de diabásio. Um das explicações possíveis pode estar na forma e na superfície do agregado diabásio. O agregado de diabásio possui forma um pouco mais lamelar que o agregado granítico e sua textura é mais fina, além disso, o agregado de diabásio apresentava, visualmente, maior teor de material pulverulento, embora não se tenha realizado ensaio de caracterização. O concreto feito com cimento CPIV-32 apresentou menor desempenho à resistência que o concreto feito com cimento CPV-ARI-RS, em todas as idades.

Realizou-se teste estatístico para verificar se existia diferença significativa na evolução da resistência dos concretos com a/c=0,55, feitos com diferentes cimentos e diferentes agregados graúdos, e constatou-se que existe diferença significativa na evolução da resistência desses concretos. Além disso, verificou-se se havia diferença significativa na evolução da resistência dos concretos feitos com cimento CP V-ARI-RS, mas com agregados graníticos e basálticos. Constatou-se que existe diferença significativa na evolução da resistência destes concretos.

5.4.3. Misturas de concreto com relação $a/c=0,65$

5.4.3.1. Concretos com $a/c=0,65$ e diferentes teores de pasta

A Figura 5-6 apresenta a evolução da resistência à compressão dos concretos com relação $a/c=0,65$ e teores de pasta de 28% e 32%.

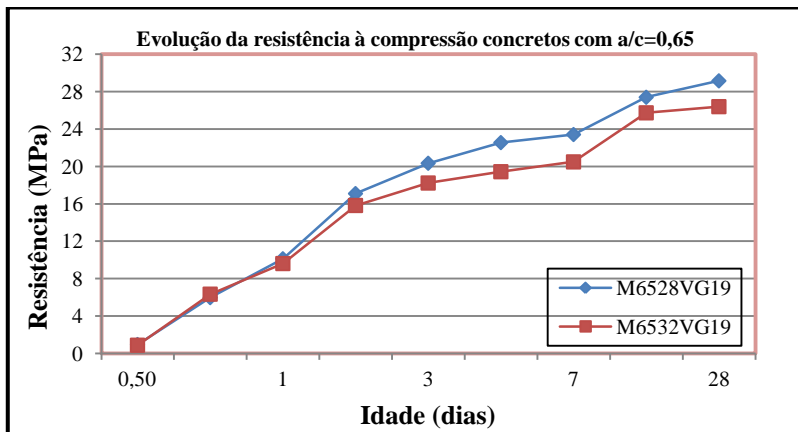


Figura 5-6 Evolução da resistência em concretos com relação $a/c=0,65$ e teores de pasta de 28% e 32%.

Note-se que a partir do 3º dia a resistência do concreto com teor de pasta de 28% torna-se superior à do concreto com 32%. Uma das explicações plausíveis é o maior grau de exsudação interna do concreto com maior teor de pasta.

Após análise estatística, concluiu-se que os concretos produzidos com $a/c=0,65$ e diferentes teores de pasta, apresentaram diferenças significativas na evolução da resistência do concreto à compressão.

5.4.3.2. Misturas com relação $a/c=0,65$ com diferentes agregados graúdos.

Na Figura 5-7 apresenta-se o comportamento da evolução da resistência do concreto com relação $a/c=0,65$, cimento CPV-ARI-RS, feitos com agregados graníticos e com agregados de diabásio.

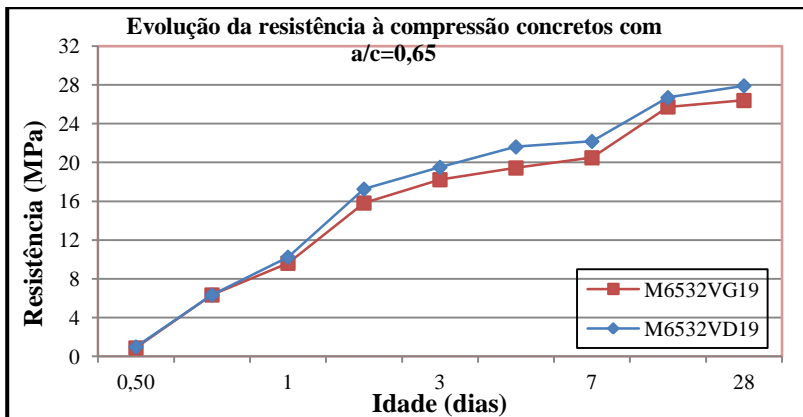


Figura 5-7 Evolução da resistência de concretos com $a/c=0,65$, cimento CPV-ARI-RS, com agregados graníticos e diabásicos.

Praticamente em todas as idades analisadas o concreto produzido com agregados diabásicos apresentaram maior resistência. Após análise estatística, concluiu-se que os concretos produzidos com diferentes agregados graúdos, com relação $a/c=0,65$, diferem entre si quanto a evolução da resistência à compressão.

5.5. Análise da velocidade de pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto

5.5.1. Misturas de concreto com $a/c=0,48$

5.5.1.1. Efeito do teor de pasta

Na Figura 5-8 apresenta-se a evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos em misturas de concreto com relação $a/c=0,48$, cimento CPV-ARI-RS e com diferentes teores de pasta. (Leituras feitas em corpos de prova).

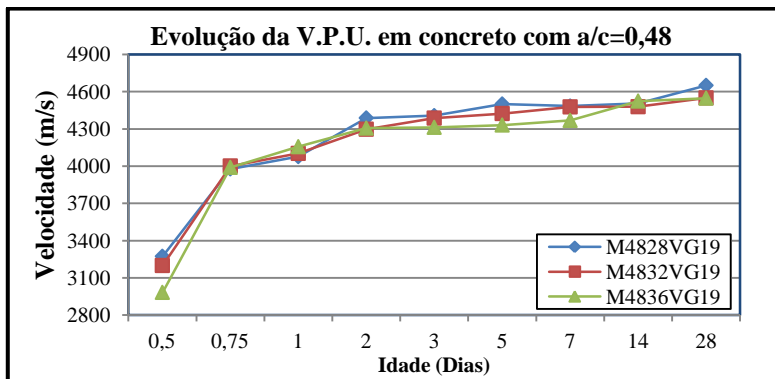


Figura 5-8 Evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos nos concretos, leitura feita nos corpos de prova.

Constata-se que nas primeiras idades, isto é, até, aproximadamente, 5 dias, os concretos com maior volume de agregados apresentaram maior velocidade. Fazendo-se análise estatística para verificar se o teor de pasta afeta ou não na evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos nos concretos produzidos com relação água/cimento igual a 0,48, constatou-se que o teor de pasta afeta significativamente.

5.5.1.2. Efeito do tipo de cimento e de agregado.

Na Figura 5-9 apresenta-se o comportamento da evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos nas misturas M4832VG19, M4832IVG19 e M4832VD19.

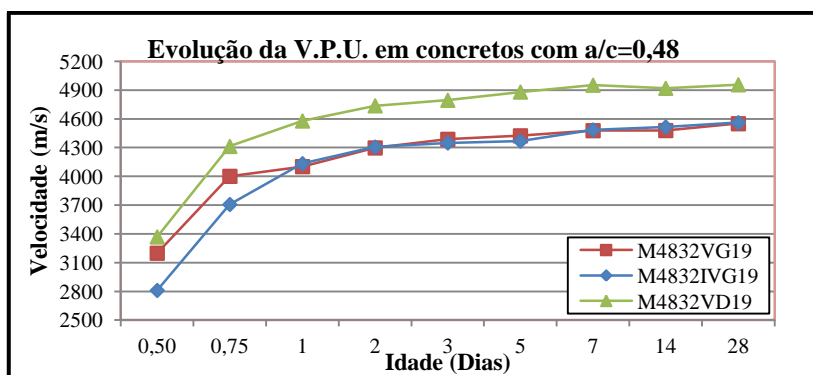


Figura 5-9 Comportamento da evolução da velocidade do concreto com relação a/c=0,48, com granito, diabásio e cimento CP IV-32.

Na Figura 5-9 percebe-se, com bastante evidência, que o concreto produzido com agregados diabásicos apresentou, em todas as idades analisadas, maior velocidade.

Verificou-se, estatisticamente, se os concretos produzidos com cimento CP V-ARI-RS e CP IV-32, com relação água/cimento igual a 0,48, apresentavam ou não diferentes aumentos de velocidades com o tempo e constatou-se que não houve diferença significativa entre os mesmos.

5.5.2. Misturas de concreto com relação $a/c=0,55$

5.5.2.1. Efeito do teor de pasta

Na Figura 5-10 apresenta-se o comportamento da evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos em concretos com relação $a/c=0,55$, com diferentes teores de pasta e com diferentes dimensões máximas características.

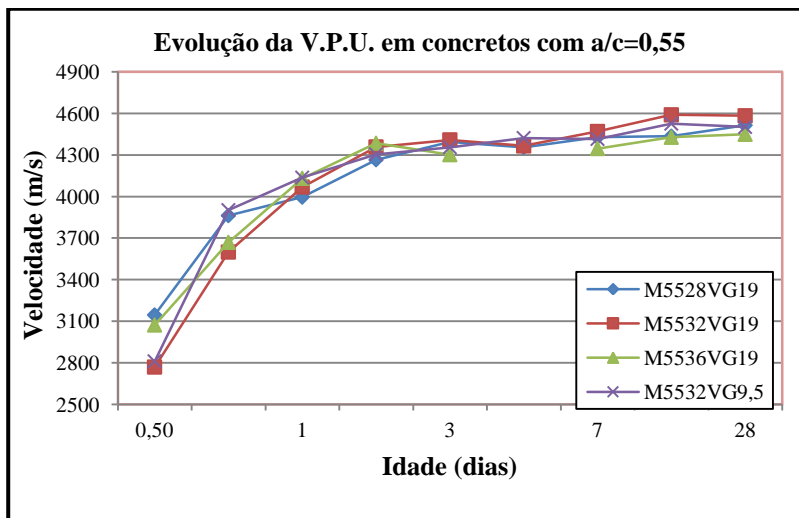


Figura 5-10 Evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos nos concretos com relação $a/c=0,55$ com diferentes teores de pasta.

Observa-se na Figura 5-10 que a mistura com maior volume de agregados M5528VG19 apresentou maior velocidade nas idades de 12 h e 18 horas, a partir dessa idade a mistura M5532VG19 apresentou velocidade um pouco maior que as demais misturas. Após análise estatística, constatou-se que os concretos produzidos com diferentes

teores de pasta apresentam diferenças significativas na evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos.

5.5.2.2. Efeito do tipo de cimento e de agregado.

Na Figura 5-11 apresenta-se a evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos em concretos com misturas M5532VG19, M5532VD19 e M5532IVG19.

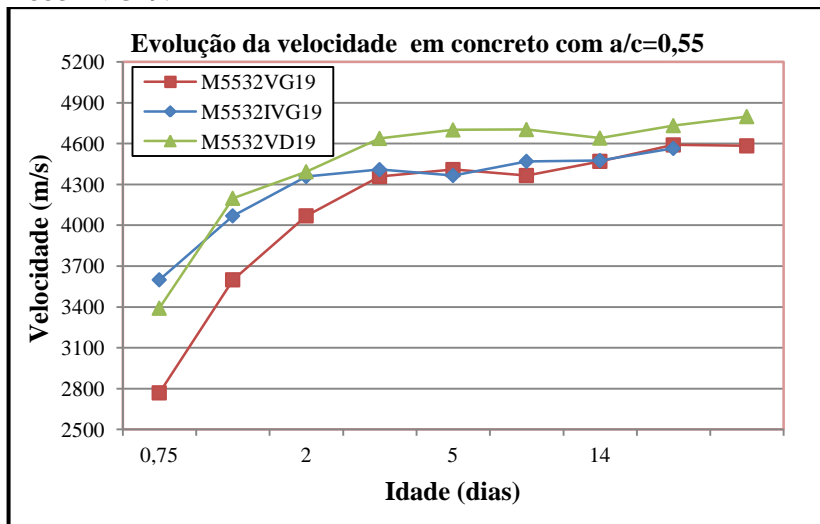


Figura 5-11 Evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos nos concretos M5532VG19, M5532IVG19 e M5532VD19.

Constatou-se, uma vez mais, o efeito do tipo de agregado graúdo na velocidade dos pulsos ultrassônicos, os concretos produzidos com agregados diabásicos apresentam maior velocidade em todas as idades analisadas. Através da análise estatística essa constatação visual é confirmada.

Analisando-se estatisticamente o comportamento da evolução da velocidade dos concretos feitos com os cimentos CP V-ARI-RS e CP IV-32, com agregados graníticos e relação $a/c=0,55$, a partir do segundo dia, constata-se que não existe diferença significativa na evolução da velocidade. Fato semelhante foi detectado nas misturas com relação $a/c=0,48$.

5.5.3. Misturas de concretos com $a/c=0,65$

5.5.3.1. Efeito do teor de pasta (M6528VG19, M6532VG19)

Na Figura 5-12 apresenta-se o comportamento da evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto com relação $a/c=0,64$, com CPV-ARI-RS, com teor de pasta de 28% e 32%.

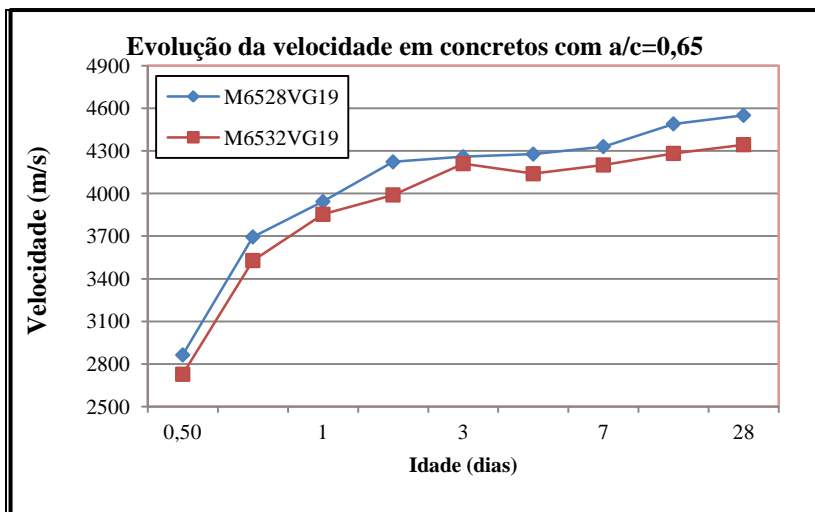


Figura 5-12 Evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos em concretos com relação $a/c=0,65$, com teores de pasta de 28 e 32%.

Pode-se constatar que a mistura com maior teor de agregados graúdos, (M6528VG19) apresentou, em todas as idades, maior velocidade. Uma das possíveis explicações é o maior volume de pasta de baixa qualidade, ($a/c=0,64$), que apresenta maior porosidade e, conseqüentemente, menor módulo dinâmico. Realizando-se análise estatística, comprovou-se que os concretos com $a/c=0,65$, produzidos com diferentes teores de pasta, apresentaram diferença significativa na evolução da velocidade dos pulsos ultrassônicos.

5.5.3.2. Efeito do tipo de agregado graúdo.

Na Figura 5-13 apresenta-se o comportamento da evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos dos concretos com relação $a/c=0,65$, produzidos com agregados graúdos graníticos e diabásicos.

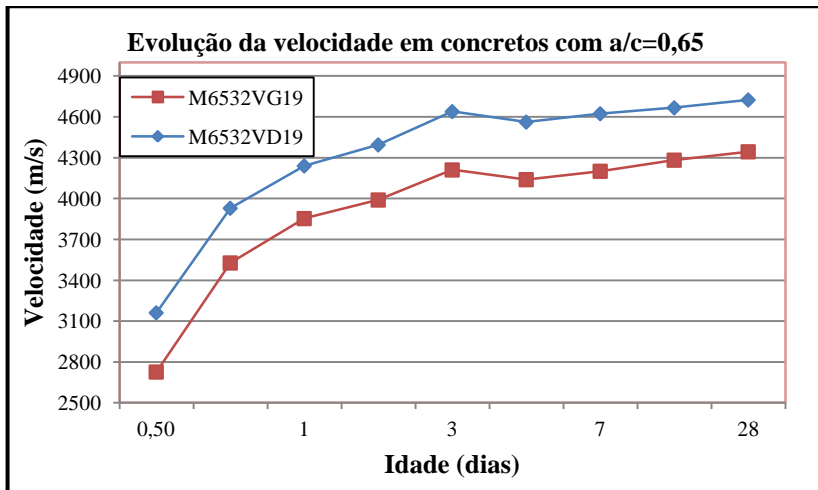


Figura 5-13 Evolução da velocidade em concretos com $a/c=0,65$, com agregados graníticos e basálticos.

Observa-se, uma vez mais, a significativa diferença de velocidade entre os concretos produzidos com agregados diabásicos e os produzidos com agregados graníticos. A justificativa está em que os agregados diabásicos apresentam maior velocidade. A análise estatística comprovou que os concretos com $a/c=0,65$, com diferentes agregados graúdos, apresentam diferenças significativas na evolução da velocidade de pulsos ultrassônicos.

5.6. Análise das correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos do concreto e resistência à compressão.

5.6.1. Correlações com concretos $a/c=0,48$.

Na Figura 5-14 apresenta-se a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos, obtida através da leitura em corpos de prova, e a resistência à compressão.

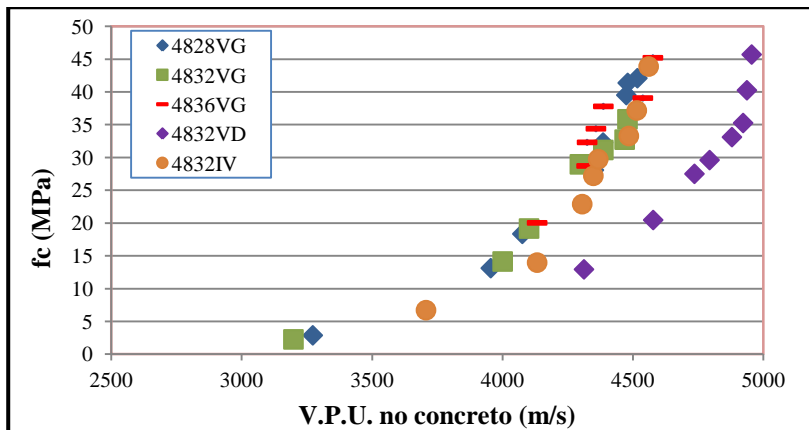


Figura 5-14 Correlação entre resistência nos concretos com $a/c=0,48$ e velocidade nos corpos de prova de concreto.

Observando-se o gráfico da Figura 5-14 verifica-se que o concreto produzido com agregado diabásico apresenta correlação bastante distinta das correlações feitas com agregados graníticos, ou seja, para os mesmos níveis de resistência o concreto com agregado diabásico apresenta velocidade superior às velocidades nos concretos produzidos com granitos, ratificando que, quanto mais elevada for a velocidade no agregado graúdo, maior será a velocidade no concreto.

Quando se fez análise estatística para verificar se o efeito do teor de pasta afetava ou não a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão, fez-se necessário linearizar a correlação, isto só foi possível quando se desconsiderou as primeiras idades de 12 h, 18h e 24 h. Após a linearização foi possível fazer a análise e constatar que o teor de pasta afetou a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão é afetada pelo teor de pasta dos concretos produzidos com relação $a/c=0,48$.

Outro objetivo foi verificar a existência de possíveis diferenças entre as correlações feitas empregando-se a velocidade no concreto do dispositivo e a velocidade nos corpos de prova, na Figura 5-15 apresentam-se os dados por meio de correlações. Nota-se que os dados obtidos através da leitura no dispositivo e os obtidos através dos corpos de prova são similares.

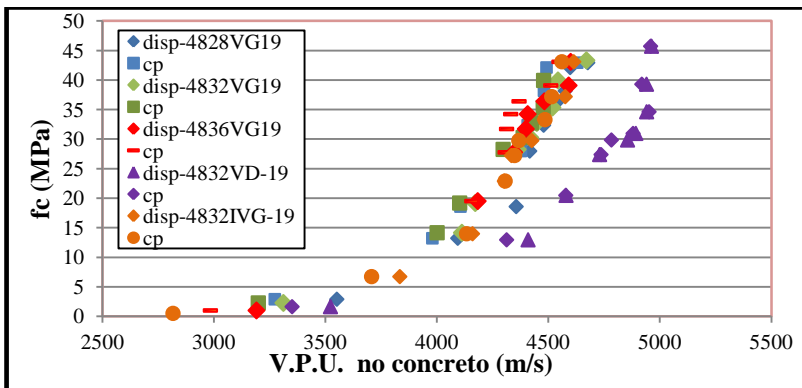


Figura 5-15 Correlação entre a velocidade no concreto (dispositivo e corpo-de-prova) e resistência à compressão.

As correlações são muito semelhantes, pois na grande maioria dos pontos ocorre uma sobreposição entre as velocidades obtidas no dispositivo e as obtidas nos corpos de prova. Portanto, pode-se dizer que a diferença entre essas correlações não é significativa.

Para verificar o efeito do tipo de agregado graúdo na correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos e resistência à compressão colocou-se lado a lado as correlações feitas com agregado granito e as feitas com agregado de diabásio, nas misturas com relação $a/c=0,48$, conforme Figura 5-16.

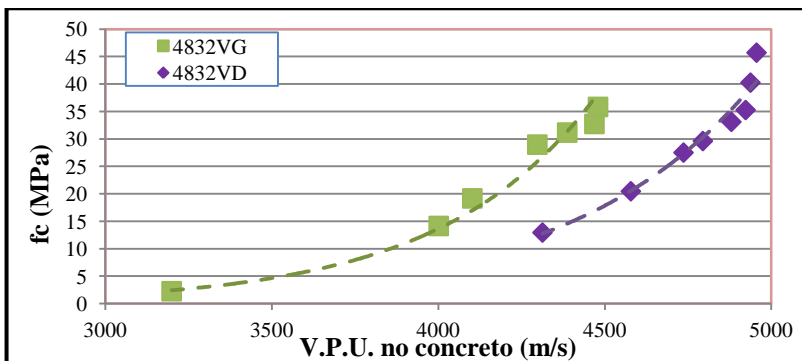


Figura 5-16 Correlações entre V.P.U. e resistência à compressão em concretos com $a/c=0,48$ e diferentes agregados graúdos.

Nota-se claramente que é necessário considerar a diferença entre as correlações.

Objetivando verificar se a correlação para concretos com o cimento CP V-ARI-RS era significativamente diferente da correlação feita para concreto com o cimento CP IV-32, colocaram-se as correlações citadas na Figura 5-17.

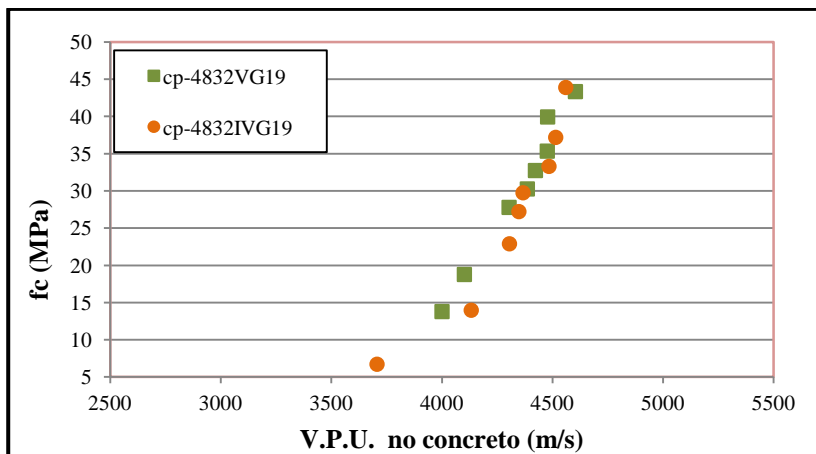


Figura 5-17 Correlação entre velocidade nos concretos com relação $a/c=0,48$ e resistência à compressão.

Observando-se a Figura 5-17 constata-se que as correlações feitas com os dois tipos de cimento não se mostram discrepantes. Realizando-se análise estatística foi possível constatar que não há diferença significativa entre as correlações feitas com os cimentos CP V-ARI-RS e CP IV-32, para os concretos com $a/c=0,48$ e 32% de pasta.

Para verificar se o teor de pasta alterava ou não as correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos e resistência à compressão, construíram-se os gráficos da Figura 5-18.

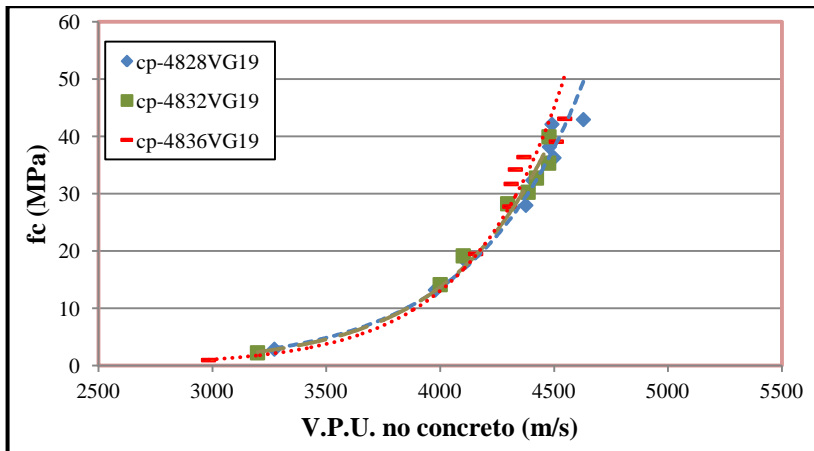


Figura 5-18 Efeito do teor de pasta na correlação entre V.P.U. e resistência à compressão em concretos com $a/c=0,48$.

Examinando a Figura 5-18, nota-se que as misturas com menor teor de pasta apresentam, para os mesmos valores de resistência velocidade um pouco maior, como era de se esperar, pois possuem maior volume de agregado graúdo. Na análise comparativa de retas, faz-se necessário a linearização das correlações, que só foi possível quando se desconsiderou as idades de 12 h, 18 h e 24h. Feita a linearização e comparando-se as retas, concluiu-se que o teor de pasta afetou a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão, para os concretos com relação $a/c=0,48$, feitos com cimento CP V-ARI-RS e agregados graníticos de 19,0 mm.

5.6.2. Correlações com concretos com $a/c=0,55$

Nessa etapa introduziu-se outra variável, agregado graúdo com dimensão máxima característica de 9,5 mm, com o intuito de verificar se a mesma afetava ou não a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão. Na Figura 5-19 apresentam-se as correlações feitas considerando-se todas essas variáveis, isto é: tipo de cimento, tipo de agregado, dimensão máxima característica e teor de pasta.

Utilizou-se somente a velocidade média obtida nos corpos de prova, uma vez que foi constatado não haver diferenças significativas entre as velocidades no dispositivo e as velocidades nos corpos de prova.

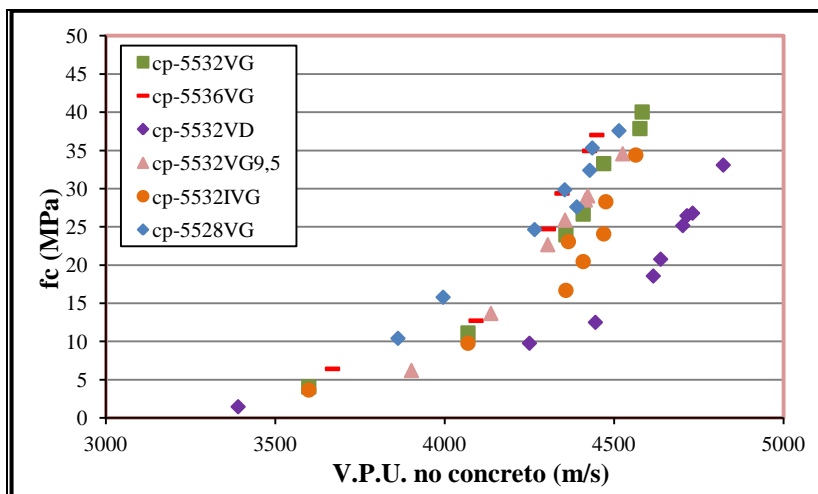


Figura 5-19 Correlações entre velocidade nos concretos com $a/c=0,55$ e resistência à compressão do concreto.

Verifica-se que o tipo de agregado graúdo afeta substancialmente as correlações. Após análise estatística, concluiu-se que os teores de pasta de 28% e 32%, nos concretos com $a/c=0,55$, não afetaram significativamente a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos nos concretos e a resistência à compressão. Além disso, quando se inclui os dados do concreto com 36%, a partir do 7º dia, não se pode afirmar que as correlações sejam significativamente diferentes entre si.

Para evidenciar o efeito do tipo de agregado graúdo na correlação fez-se os gráficos da Figura 5-20.

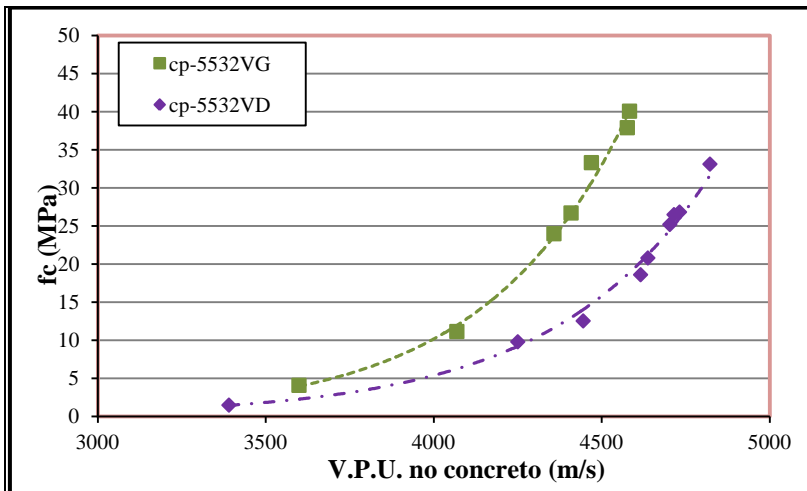


Figura 5-20 Correlações entre V.P.U. e resistência à compressão em concretos com mesma relação água/cimento e diferente agregado graúdo.

Nota-se na Figura 5-20 o efeito do tipo de agregado graúdo nas correlações, confirmando o que foi verificado quando as misturas com $a/c=0,48$ foram analisadas.

O efeito do tipo de cimento na correlação pode ser verificado comparando-se a relativa ao concreto com cimento CP V-ARI-RS com a de concreto com cimento CP IV-32, conforme Figura 5-21.

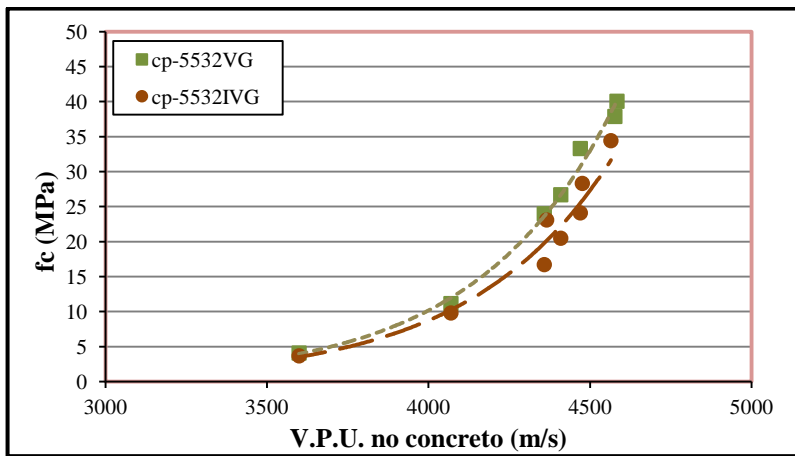


Figura 5-21 Correlações com misturas com $a/c=0,55$ (Cimento CPV-ARI-RS e CPIV-32, granito).

Examinando-se, graficamente, o comportamento das correlações verifica-se que a correlação feita com CP IV-32 difere um pouco da correlação feita com o CP V-ARI-RS. Ao se realizar análise estatística comprovou-se que o tipo de cimento não afetou, de forma significativa, a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão. O mesmo acontecendo com os concretos com relação $a/c=0,48$.

O efeito da dimensão máxima característica na correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos e resistência à compressão dos concretos produzidos com $a/c=0,55$ e apresentado graficamente na Figura 5-22. Nesta apresenta-se as correlações feitas com agregado granítico com dimensão máxima característica de 19 mm e com agregado granítico com D.M.C. de 9,5 mm.

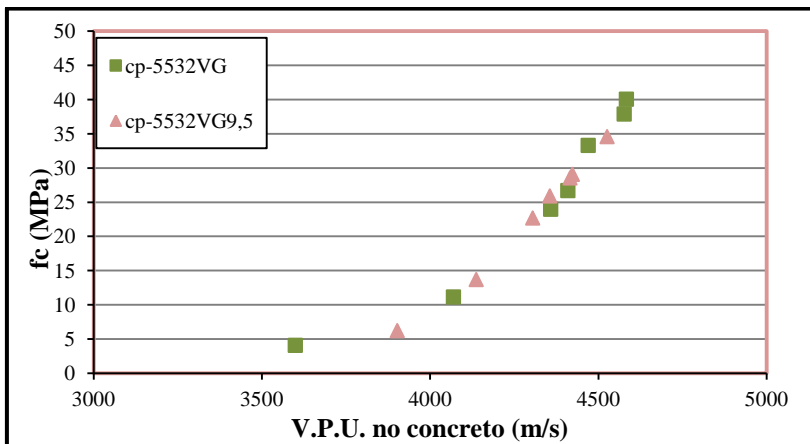


Figura 5-22 Correlação com concretos com $a/c=0,55$, diferentes dimensões máximas características.

Constata-se, graficamente, que as correlações feitas com os concretos M5532VG19 e M5532VG9,5 apresentam, praticamente, a mesma linha de tendência. Após análise estatística foi possível concluir que as correlações feitas com essas diferentes dimensões máximas não diferiram entre si de forma significativa.

5.6.3. Correlações com concretos com $a/c=0,65$

Dando continuidade ao estudo comparativo das correlações, apresentam-se na Figura 5-23 correlações feitas entre V.P.U. e resistência à compressão de concretos com relação água/cimento igual a 0,65. As correlações referem-se a concretos produzidos com agregado gráudo granito com teores de pasta de 28 % e 32 % e com agregado gráudo de diabásio produzido com teor de pasta de 32 %.

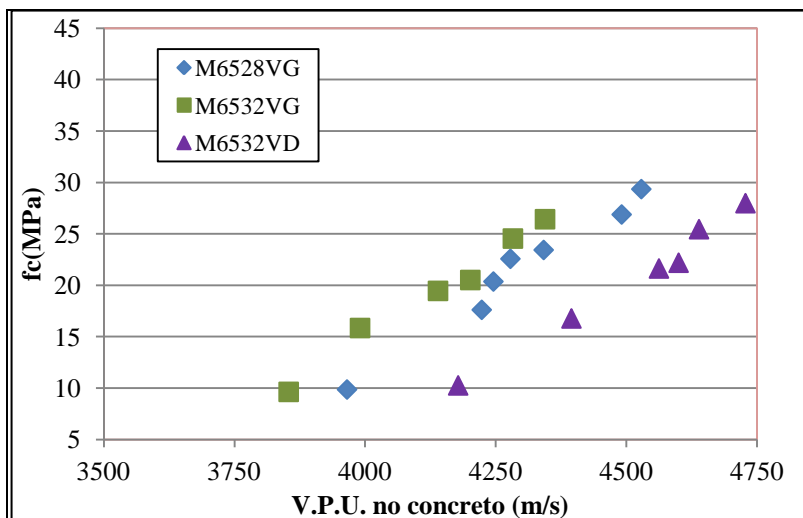


Figura 5-23 Correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e resistência à compressão, em misturas com relação $a/c=0,65$.

Para os concretos com relação $a/c=0,65$, nota-se que para o mesmo nível de resistência os concretos feitos com menor teor de pasta apresentam maior velocidade. Além disso, o mesmo aconteceu quando se comparou as correlações feitas com agregados granitos e diabásicos. Estes últimos também apresentaram maior velocidade. O efeito do teor de pasta nas correlações parece crescer na medida em que a qualidade da pasta baixa, isto é, na mesma proporção em que ocorre o aumento da diferença entre a velocidade no agregado graúdo e na velocidade na pasta.

Constatou-se que, independente da relação água/cimento empregada, o tipo de agregado graúdo afetou, consideravelmente, a correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão.

5.6.4. Correlações em função da relação água/cimento

A seguir verifica-se o efeito da relação água/cimento na correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos e resistência à compressão. Inicia-se com as correlações feitas com 28% de pasta e com as relações $a/c=0,48$, $0,55$ e $0,65$, conforme Figura 5-24.

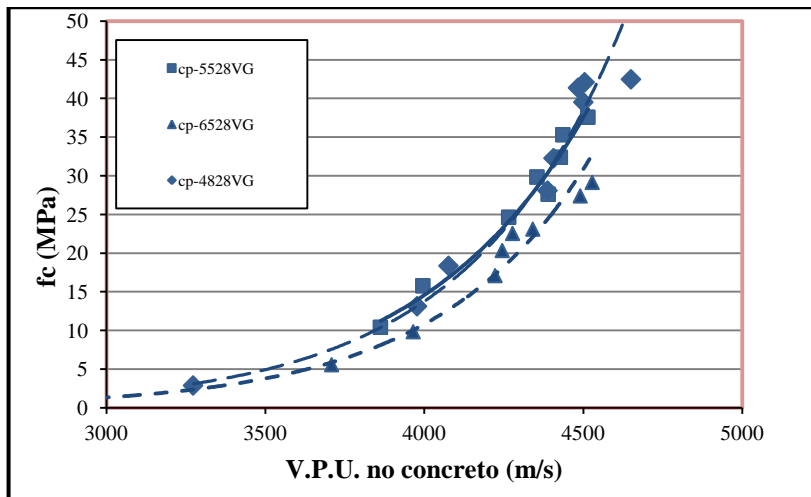


Figura 5-24 Efeito da relação água/cimento nas correlações de concretos com teor de pasta de 28%.

Observa-se que as correlações feitas com as misturas de concreto com relação água/cimento 0,48 e 0,55 e teor de pasta de 28% praticamente se superpõem, enquanto que a correlação feita com a mistura com relação $a/c=0,65$ se afasta um pouco das demais. Excluindo-se a mistura de concreto com relação $a/c=0,65$ e comparando as correlações, após linearização, constata-se que as correlações feitas com 0,48 e 0,55 e teor de pasta de 28% não diferem entre si de forma significativa.

A Figura 5-25 apresenta a comparação gráfica entre as correlações de concretos com teor de pasta de 32% e diferentes relações água/cimento.

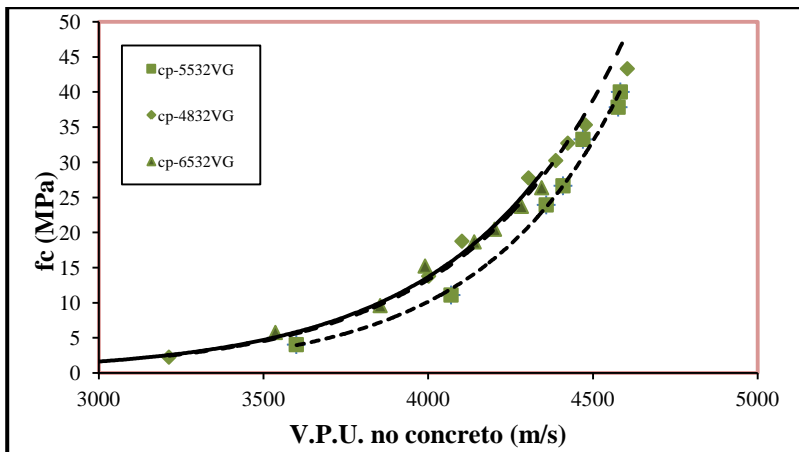


Figura 5-25 Comparação entre as correlações de concretos com teor de pasta de 32% e diferentes relações água/cimento.

Nessa comparação a correlação feita com relação água/cimento 0,48 parece ser a continuidade da correlação feita com relação $a/c=0,65$. A correlação com relação água/cimento igual a 0,55 está deslocada das outras duas. Excluindo-se esta última e fazendo-se análise comparativa das correlações constata-se que as correlações não diferem entre si de forma significativa.

Comparam-se, a seguir, as correlações feitas com concretos que possuem teor de pasta de 36% e relação água/cimento de 0,48 e 0,55, conforme Figura 5-26.

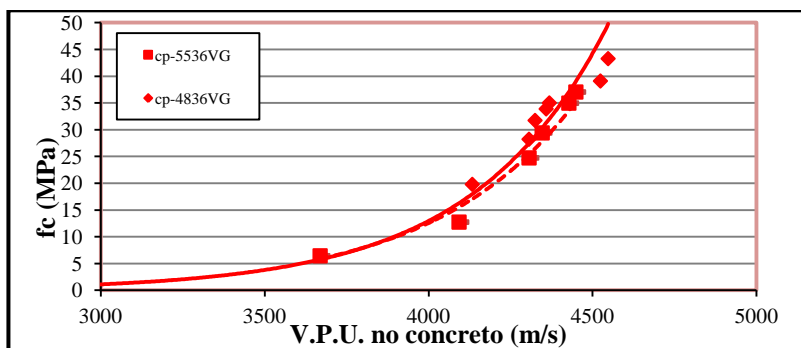


Figura 5-26 Comparação entre as correlações produzidas com concretos de diferentes relações água/cimento e teor de pasta de 36%.

Nessa última compara-se nota-se que a correlação com relação água/cimento 0,48 parece dar continuidade a correlação com relação água/cimento 0,55. Entretanto, ao se realizar análise comparativa entre estas correlações constatou-se que as mesmas diferem entre si de forma significativa.

Por último, faz-se a comparação entre as correlações das misturas de concreto produzidas com agregados diabásicos, com 32% de pasta e relações água/cimento igual a 0,48, 0,55 e 0,65, apresentado na Figura 5-27.

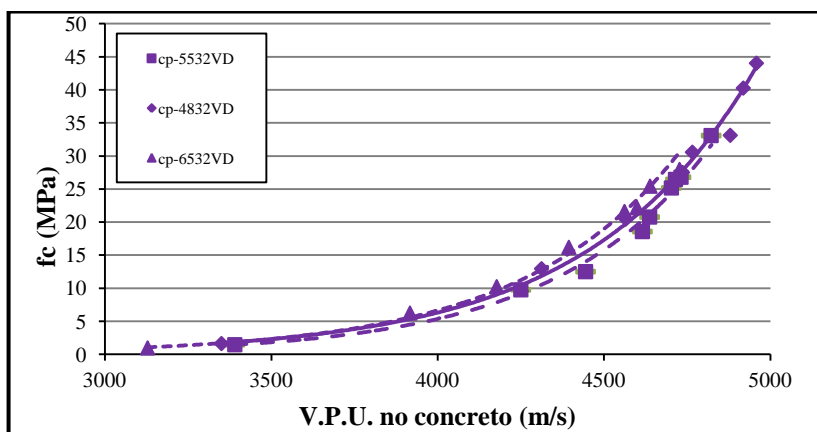


Figura 5-27 Comparação entre correlações de concreto com agregados de diabásio, com 32% de pasta e relações água/cimento 0,48, 0,55 e 0,65.

Analisando-se as correlações verifica-se que existe uma pequena defasagem entre as correlações feitas com $a/c=0,65$ e $0,55$, e que a correlação com $a/c=0,48$ pode ser considerada uma continuidade das duas. Ao se realizar análise comparativa entre as correlações, através do processo de linearização e do teste “F”, constatou-se que as correlações não diferem entre si de forma significativa.

Constatou-se que as correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão, para as relações água/cimento testadas, isto é, 0,48 e 0,55, com teores de pasta de 32%, não são afetadas quando se emprega o cimento CP-V-ARI RS, ou o cimento CP-IV-32.

O teor de pasta afeta a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão. Esse efeito se torna mais significativo com o aumento das diferenças entre as velocidades no agregado graúdo e na velocidade na pasta. Quanto mais se substitui a pasta de elevada relação água/cimento e porosidade por agregado de elevada velocidade mais significativo se torna a diferença entre as correlações. É possível, contudo, que em pasta compactas com baixa porosidade esse efeito seja menos significativo.

A dimensão máxima característica não afetou significativamente as correlações entre a velocidade de pulsos ultrassônicos nos concretos e a resistência à compressão, pelo menos para os níveis de velocidade e resistência investigados. Isso, possivelmente, porque não ocorreu queda na relação água/cimento da pasta, uma vez que a quantidade de água absorvida pelos agregados graúdos foi corrigida previamente. Além disso, a substituição do agregado graúdo de D.M.C. de 19 mm por agregado graúdo de D.M.C. de 9,5 mm foi feita com equivalência de massa. Não obstante, faz-se necessário um maior número de ensaios para consubstanciar essa hipótese.

Em todas as relações água/cimento investigadas foi significativo o efeito do tipo de agregado na correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão.

Mantendo-se os teores de pasta, analisou-se a possibilidade das correlações, entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e resistência à compressão, obtidas a partir de diferentes relações água/cimento serem iguais. Concluiu-se que para os teores de 28% as correlações feitas com relação $a/c=0,48$ e $0,55$ não diferem significativamente. Para os teores de 32%, concluiu-se que as correlações feitas com $a/c=0,48$ e $0,65$ não diferem significativamente.

As correlações feitas com teor de pasta de 36% e relações água/cimento igual a $0,48$ e $0,55$, diferem significativamente. Portanto, só foi possível unificar parcialmente as correlações produzidas com diferentes relações água/cimento, ainda que se empregasse o mesmo tipo de cimento, agregado graúdo e o mesmo teor de pasta.

5.7. Velocidades dos pulsos ultrassônicos nas pastas de concretos obtidas pelo modelo de três fases

Para determinar a velocidade nas pastas dos concretos empregou-se o modelo de três fases, apresentado na Equação 5-1. Em todas as misturas de concreto empregou-se o mesmo tipo de agregado miúdo, o mesmo empregado no modelo de duas fases, cuja velocidade é de 5345 m/s. A velocidade dos agregados graúdos utilizada foi a que se obteve por meio do modelo de três fases, isto é, 5517 m/s para os agregados graníticos e 7332 m/s para os agregados diabásicos.

$$v_p = \left[\frac{V_p}{\left(\left(\frac{1}{v_c} \right) - \left(\frac{V_{ag}}{v_{ag}} \right) - \left(\frac{V_{am}}{v_{am}} \right) \right)} \right] \quad \text{Equação 5-1}$$

Na Tabela 5-4, a seguir, apresentam-se os valores das velocidades de pulsos ultrassônicos nas pastas das misturas de concreto obtidas por meio do referido modelo.

Tabela 5-4 Resultados de velocidade de pulsos ultrassônicos nas pastas das misturas de concreto (m/s)

Mistura	Idade (dias)										
	0,5	0,75	1	2	3	5	7	14	28		
M4828VG19	1635	2346	2501	2895	2950	3096	3105	3168	3453		
M4832VG19	1732	2592	2725	3001	3138	3269	3286	3307	3486		
M4836VG19	1635	2705	2873	3144	3147	3198	3241	3484	3548		
M4832IVG19	1384	2208	2733	2981	3046	3075	3267	3314	3392		
M4832VD19	1697	2600	2922	3133	3214	3337	3401	3423	3451		
M5528VG19	1476	2174	2335	2703	2872	2856	2956	2983	3189		
M5532VG19	1348	2085	2642	3026	3135	3067	3141	3379	3455		
M5536VG19	1718	2308	2878	3140	3199	---	3217	3330	3403		
M5532IVG19	---	1912	2579	2918	2972	3059	3105	3254	3407		
M5532VD19	1717	2476	2699	3006	3048	3108	3127	3157	3226		
M5532VG9,5	1380	2429	2733	2974	3051	3142	3200	3309	3322		
M6528VG19	1291	2026	2312	2651	2736	2771	2861	3071	3021		
M6532VG19	1322	2017	2377	2546	2788	2779	2830	2948	3041		
M6532VD19	1512	2145	2454	2622	2860	2859	2906	2969	3030		

5.8. Correlações entre velocidade na pasta do concreto e a resistência à compressão

5.8.1. Correlações obtidas a partir da velocidade nas pastas dos concretos com $a/c=0,48$.

No item anterior foram realizadas correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e resistência à compressão do concreto, onde foi constatado que o tipo de agregado gráúdo afeta substancialmente a correlação. Tendo-se em vista que o objetivo do método proposto é apresentar uma única correlação a qual seja independente do tipo de agregado e/ou tipo de cimento. Analisam-se agora as correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta de concretos com $a/c=0,48$ e resistência à compressão. A Figura 5-28 apresenta as correlações feitas com diferentes teores de pasta (28%, 32% e 36%), diferentes agregados gráúdos (granito e diabásio), e diferentes cimentos (CP V-ARI-RS e CP IV-32).

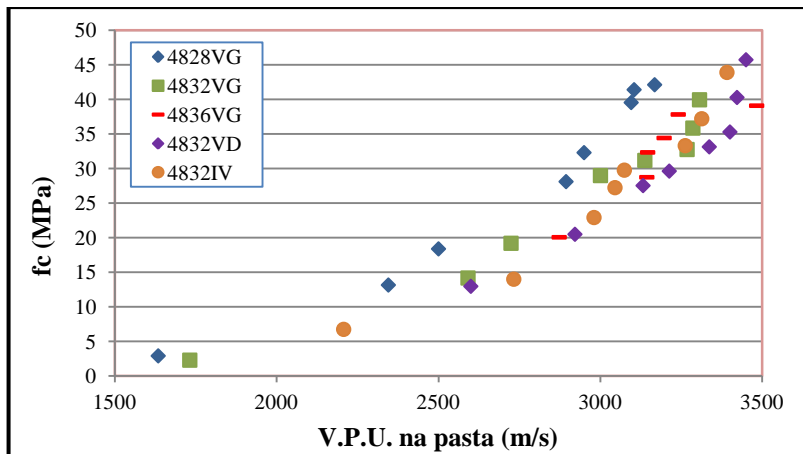


Figura 5-28 Correlação entre velocidade das pastas dos concretos das misturas com relação $a/c=0,48$ e a resistência à compressão.

Quando se emprega nas correlações feitas a partir da velocidade nas pastas dos concretos e a resistência à compressão constata-se que o efeito do tipo de agregado gráúdo e teor de pasta são reduzidos significativamente. Para evidenciar essa alteração apresenta-se a Figura 5-29, onde as correlações são feitas com as velocidades no concreto e

com as velocidades na pasta do concreto e, onde se desconsiderou a mistura M4828VG. O motivo de exclusão da mistura M4828VG já foi explicado previamente, apenas lembrando que o PUNDIT PLUS forneceu valores de velocidade inferiores ao PUNDIT LAB.

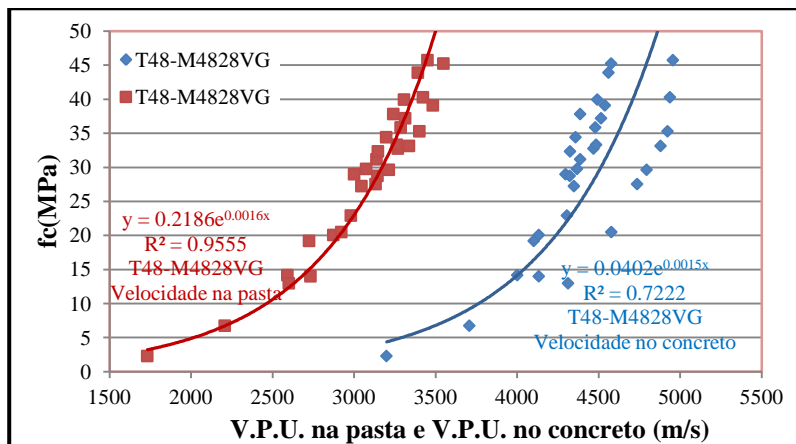


Figura 5-29 Correlações entre velocidade na pasta do concreto e velocidade no concreto e a resistência à compressão, $a/c=0,48$.

Verifica-se ao analisar a Figura 5-29 que as velocidades ficaram mais agrupadas e que é possível ventilar a hipótese de essas correlações não sejam significativamente diferentes. Para tanto, faz-se necessário linearizar as correlações e fazer análise comparativa de retas, conforme Figura 5-30.

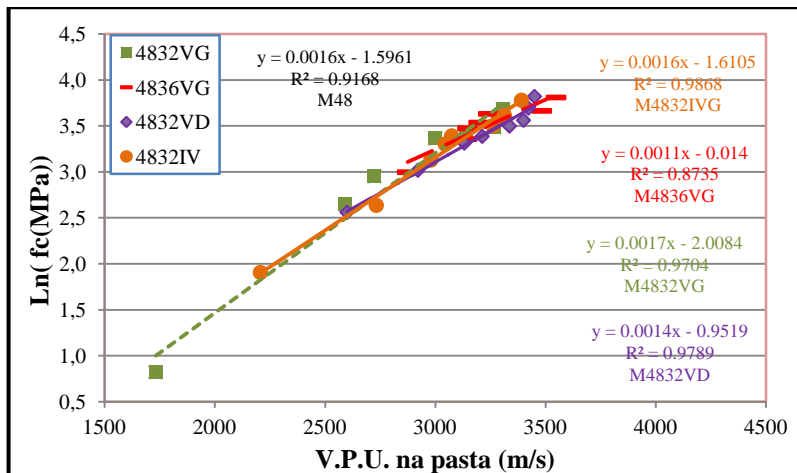


Figura 5-30 Análise comparativa de retas de correlação, com misturas de concreto com relação $a/c=0,48$.

Desconsiderando-se as idades de 12 h e 18 h e fazendo-se análise comparativa dos dados constatou-se que não se pode afirmar que as retas diferem entre si de forma significativa. Isto porque no teste F, empregado para a comparação entre retas, o valor de $F_{(5,23)}$ calculado foi de 0,66 e o valor de $F_{(5,23)}$ para um nível de confiabilidade de 95% é de 2,64. Sendo assim, conclui-se que, para a relação água/cimento igual a 0,48, o tipo de agregado graúdo, o tipo de cimento e o teor de pasta não afetam as correlações feitas entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e a resistência à compressão com nível de confiabilidade de 95%. Deve-se ressaltar que para essa relação água/cimento a correlação pode ser unificada, independente do teor de pasta, tipo de agregado graúdo e tipo de cimento.

5.8.2. Correlações obtidas a partir das velocidades nas pastas de concretos com $a/c=0,55$

Observa-se na Figura 5-31 que a correlação feita com a mistura M5528VG19 mostra-se bastante diferente das demais e pelas razões previamente expostas será desconsiderada na sequência das análises.

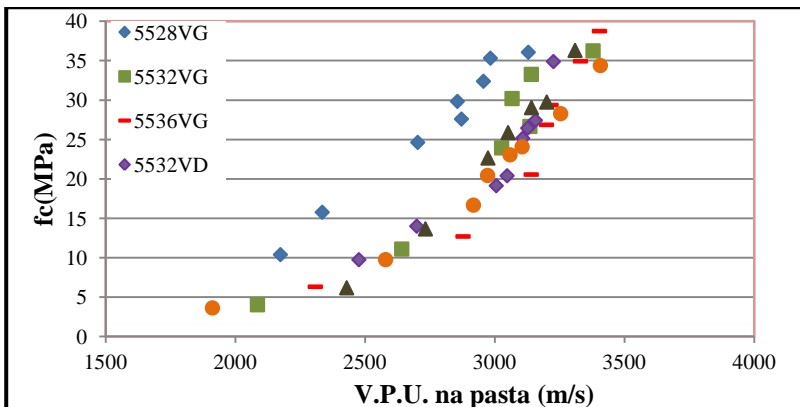


Figura 5-31 Correlações entre velocidade das pastas dos concretos com $a/c=0,55$ e resistência à compressão.

A Figura 5-32 apresenta as correlações entre velocidade na pasta e velocidade no concreto e a resistência à compressão para todas as misturas com relação água/cimento de 0,55. Objetivou-se com essa apresentação evidenciar a melhoria ocorrida nas correlações.

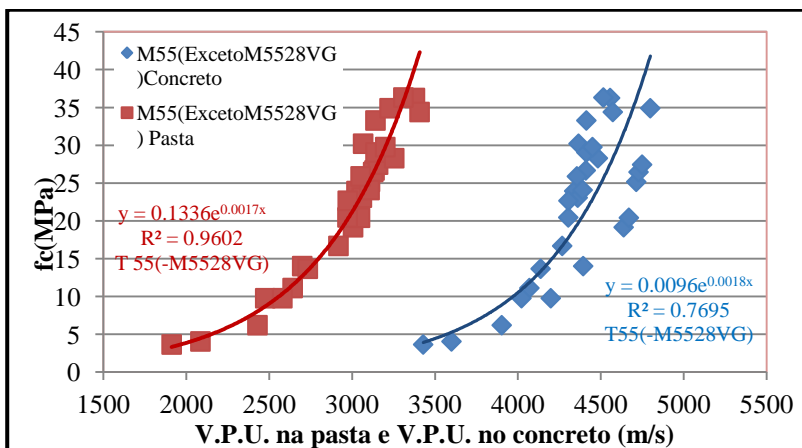


Figura 5-32 Correlação entre velocidade na pasta e velocidade no concreto e o \ln da resistência, misturas com $a/c=0,55$.

Analisando a Figura 5-32 constata-se que as velocidades nas pastas ficaram mais agrupadas e que é possível ventilar a hipótese de essas correlações não sejam significativamente diferentes. Em decorrência de

verificar esta hipótese, fez-se necessário linearizar as correlações e comparar as retas empregando o teste “F”. A Figura 5-33 apresenta as correlações linearizadas.

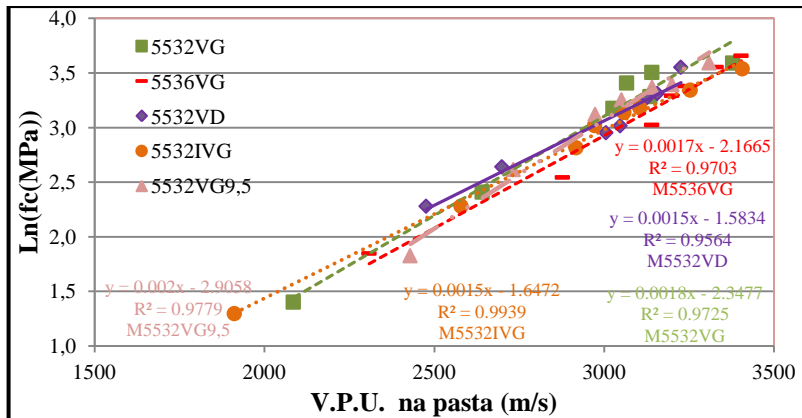


Figura 5-33 Análise comparativa entre correlações, concretos com $a/c=0,55$.

Após análise comparativa constatou-se que as correlações diferem entre si considerando um nível de confiabilidade de 95%, pois o teste estatístico $F_{(6,27)_{\text{calculado}}}$ foi 3,60 e o $F_{(6,27)_{\text{tabelado}}}$ é de 2,46 e portanto superior para se considerar que as retas não diferem significativamente entre si. Consequentemente para essa relação água/cimento não foi possível afirmar, com os dados disponíveis, que o teor de pasta não afete a correlação. Por outro lado, excluindo-se a mistura M5536VG19 e fazendo-se nova análise, constatou-se que o tipo de agregado graúdo, o tipo de cimento e a dimensão máxima característica não afetaram a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e a resistência à compressão, com um nível de confiabilidade de 95%. Analisando-se os dados de resistência da mistura M5536VG19, percebe-se que os valores obtidos nas idades de 3 e 14 dias são inferiores em até 15% aos das misturas M5528VG19 e M5532VG19. Possivelmente estas diferenças tenham ocasionado diferentes correlações.

5.8.3. Correlações obtidas a partir da velocidade nas pastas de concreto com relação a/c=0,65.

Na Figura 5-34 apresentam-se as correlações obtidas entre V.P.U. nas pastas de concreto e V.P.U. nos concretos com relação a/c=0,65 e a resistência à compressão.

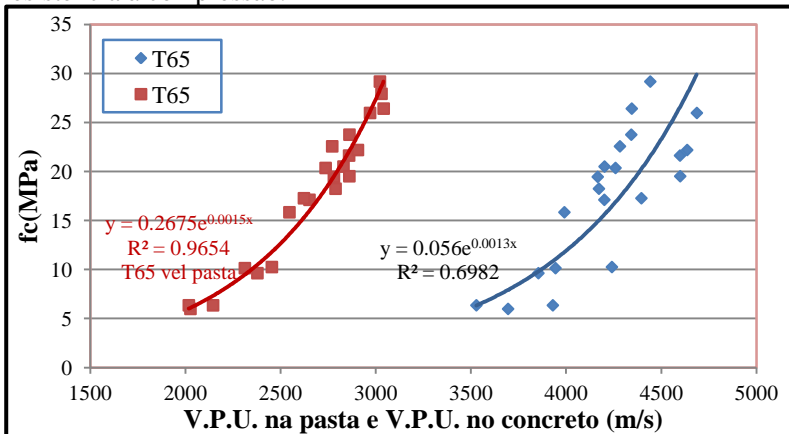


Figura 5-34 Correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e no concreto e a resistência à compressão, misturas com a/c=0,65.

Nota-se que os dados ficam mais ajustados à curva de correlação na qual se emprega a velocidade nas pastas do que à curva de correlação em que se emprega a velocidade no concreto. Desta forma nota-se que existe um forte indicativo da redução do efeito do tipo de cimento e tipo de agregado graúdo na correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e a resistência à compressão. Contudo, faz-se necessário verificar se é significativo ou não o efeito do tipo de agregado e o teor de pasta na correlação que emprega a velocidade na pasta. Assim sendo, apresentam-se na Figura 5-35 as correlações produzidas com diferentes agregados e diferentes teores de pasta e a resistência à compressão.

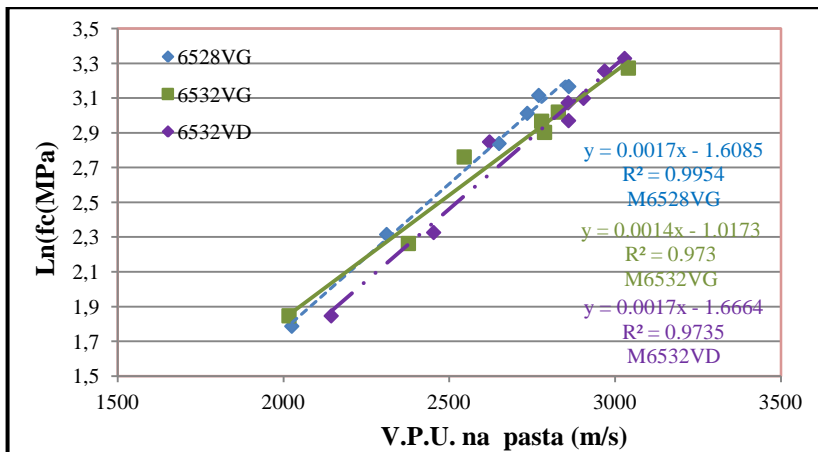


Figura 5-35 Correlações entre velocidades nas pastas de concreto com $a/c=0,65$ e o logaritmo neperiano da resistência à compressão.

Após análise conclui-se que as correlações não diferiram significativamente entre si, ou seja, nem o teor de agregado ou pasta nem o tipo de agregado graúdo afetaram a correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e resistência à compressão, para a relação água/cimento igual a 0,65. Isto porque o $F_{(3,17)}_{\text{calculado}}$ foi inferior ao $F_{(3,17)}_{\text{tabelado}}$ respectivamente 4,31 e 5,18.

5.8.4. Correlações utilizando-se todas as misturas

A Figura 5-36 apresenta as correlações feitas com todas as misturas, independente do tipo de cimento, tipo de agregado e dimensão máxima característica. Nota-se a redução da dispersão da correlação quando se utiliza no lugar da velocidade no concreto a velocidade na pasta.

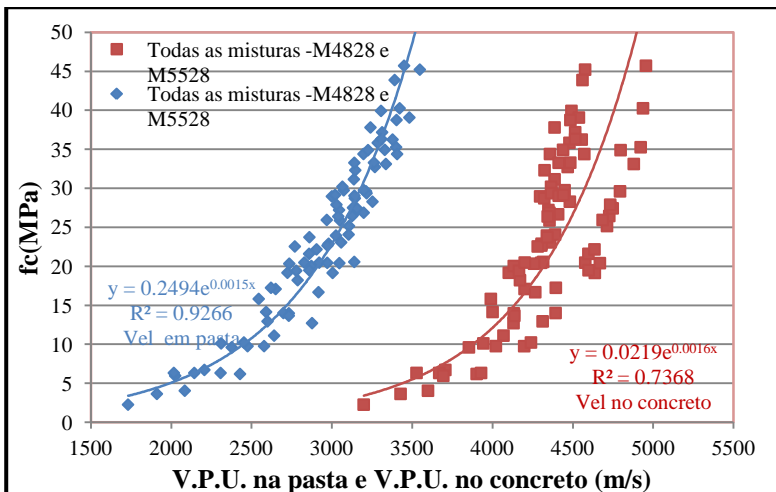


Figura 5-36 Correlações entre velocidade na pasta e velocidade no concreto e a resistência à compressão.

Avaliando-se as correlações individuais de cada mistura adotando-se o mesmo procedimento que vem sendo adotado, apresentam-se na Figura 5-37 as correlações obtidas.

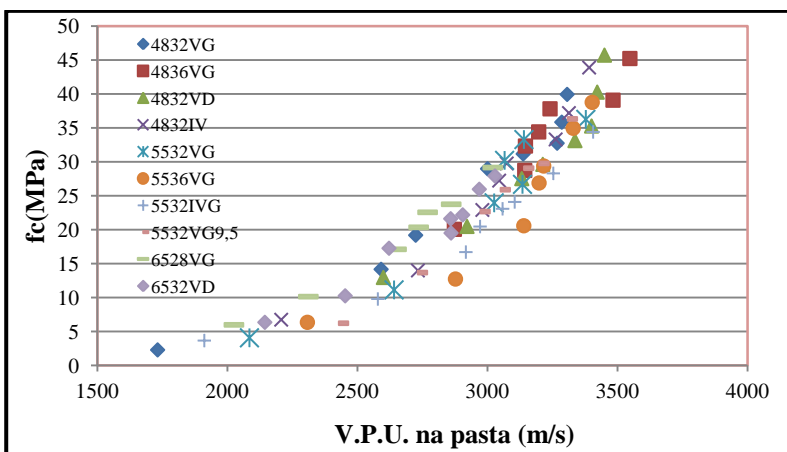


Figura 5-37 Análise comparativa de correlações, utilizando-se todas as misturas.

A partir da análise comparativa das correlações conclui-se que as correlações diferem significativamente entre si ao nível de confiabilidade de 95%, pois o teste estatístico $F_{(13,66)}$ calculado foi superior ao $F_{(11,54)}$ tabelado, respectivamente 11,66 e 1,87. Portanto não se pode afirmar que as variáveis estudadas não produzam diferença significativa nas correlações, ou seja, a relação água/cimento, o teor de pasta, o tipo de cimento, o tipo de agregado e a dimensão máxima do agregado graúdo afetaram a correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e resistência à compressão do concreto, considerando os materiais utilizados.

5.8.5. Comparação mantendo-se o teor de pasta constante e trabalhando-se com as demais variáveis.

Neste item algumas etapas preliminares serão dispensadas. Na Figura 5-38 apresentam-se as correlações entre velocidade na pasta e no concreto e resistência à compressão. Note-se que o coeficiente de determinação (r^2) da correlação feita empregando-se a velocidade na pasta é de 92,7% e o mesmo coeficiente na correlação com a velocidade do concreto é de 73,7%.

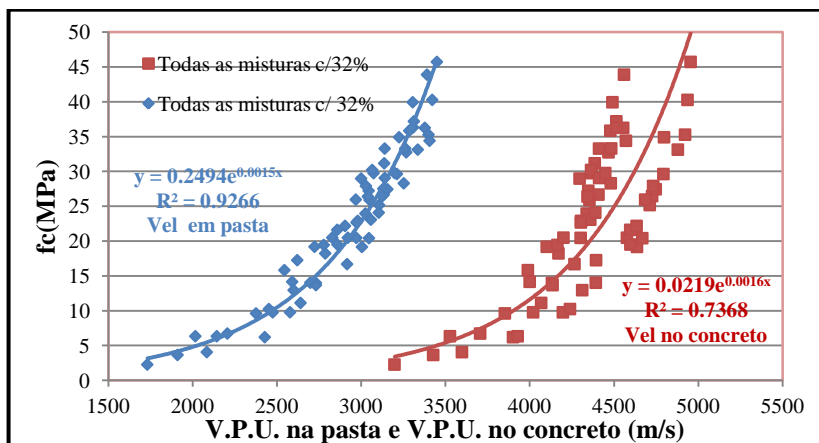


Figura 5-38 Correlações entre V.P.U. na pasta e no concreto e a f_c , misturas com 32% de pasta.

A Figura 5-39 apresenta as correlações linearizadas para o teste comparativo entre retas.

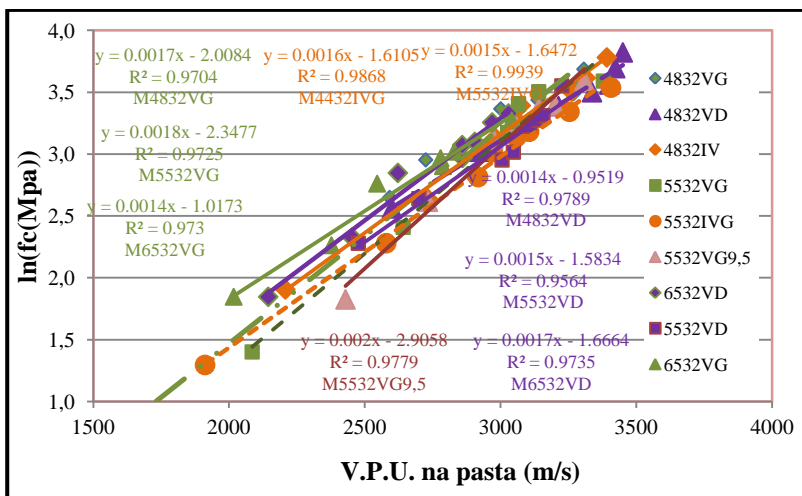


Figura 5-39 Análise comparativa de correlações com o mesmo teor de pasta, (32%).

Fez-se o teste para verificar se as correlações diferiam entre si, e apesar do elevado valor de r^2 , os valores foram os seguintes: $F_{(10,51)_{calculado}} = 8,8$ e $F_{(10,51)} = 2,02$, para um nível de confiabilidade de 95%. Diante desses valores, conclui-se que as correlações diferiam entre si.

Fez-se outro teste onde se manteve o tipo de cimento (CP V-ARI-RS) e a dimensão máxima característica e o teor de pasta, mudando o tipo de agregado graúdo e a relação água/cimento, a Figura 5-40 apresenta as correlações linearizadas para o teste comparativo de retas.

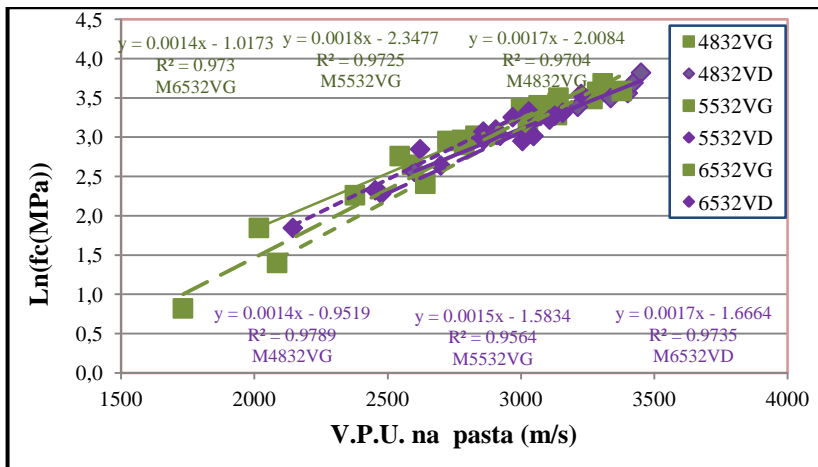


Figura 5-40 Comparação linear com o mesmo cimento e o mesmo teor de pasta, com agregado granítico e basáltico e diferentes relações a/c.

Nesta última análise concluiu-se que as retas permanecem diferentes entre si até um nível de confiabilidade de 96,5%, ou seja, com os dados disponíveis não é possível agrupar correlações com diferentes relações água/cimento, mesmo mantendo-se o tipo de cimento e o teor de pasta.

5.8.6. Considerações Finais sobre o Modelo Proposto

Foi possível constatar que quando as misturas de concreto foram produzidas com relação água/cimento igual a 0,48 as correlações entre velocidade de pulso ultrassônico na pasta e a resistência à compressão não foram afetadas pelo teor de pasta, pelo tipo de agregado graúdo, e tampouco pelo tipo de cimento. Podendo, portanto, serem unificadas.

Para as misturas de concreto com relação água/cimento igual a 0,55, o teor de pasta afetou as correlações entre velocidade de pulso ultrassônico na pasta e a resistência à compressão. Contudo, para o teor de pasta de 32%, as correlações não foram afetadas pelo tipo de agregado graúdo, tipo de cimento, e tampouco pela dimensão máxima característica, de tal forma que essas correlações podem ser unificadas.

Já nas misturas de concreto com relação água/cimento igual a 0,65 o teor de pasta e o tipo de agregado graúdo não afetaram as correlações

entre a velocidade de pulso ultrassônico na pasta e a resistência à compressão.

Com um nível de confiabilidade de 96,6% pode-se afirmar que as correlações feitas com agregados diabásicos e graníticos, com teor de pasta de 32% e relações água/cimento igual a 0,48, 0,55 e 0,65 não diferiram significativamente entre si. Assim sendo, para esse nível de confiabilidade, poder-se-ia unificar as seis correlações.

Para as relações água/cimento 0,48 e 0,65 o modelo proposto conseguiu minimizar significativamente o efeito do teor de pasta, tipo de cimento, do tipo de agregado, e da dimensão máxima. O que não foi possível quando se empregou a correlação entre velocidade de pulso ultrassônico no concreto. Portanto, não se pode descartar a hipótese de o mesmo possa vir a ser empregado em uma ou mais “famílias” de concreto, desde que, é claro, tenha-se determinado a velocidade dos agregados graúdos, dos agregados miúdos e que se conheça previamente as proporções volumétricas dos constituintes do concreto.

Finalmente, faz-se importante registrar a necessidade de inclusão de novas misturas para melhorar as correlações até então obtidas.

A seguir apresenta-se um possível protocolo para utilização do modelo proposto quando se deseja estabelecer uma curva de correlação entre velocidade na pasta do concreto e resistência à compressão do concreto para aplicação em famílias de misturas de concreto. Este protocolo pode ser útil na indústria de pré-moldados.

1. Estabelecer o intervalo de resistência a ser utilizado (até 50 MPa);
2. Definir pelo menos três relações água cimento dentro da faixa de resistência desejada;
3. Determinar a velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados miúdos, empregando o modelo de duas fases, proposto por Lin et al., 2003. Para tanto, produzir pastas e argamassas nas relações água/cimento já definidas, utilizando pelo menos seis corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm, e determinar a velocidade dos pulsos ultrassônicos dos mesmos, nas idades de 2, 3, 5, 7, 14 e 28 dias. Adotar procedimento para evitar perda de água por evaporação. Após 24 horas, devem-se retirar os corpos-de-prova de pasta e argamassa do interior dos

moldes, retificá-los e adotar algum procedimento para garantir que os mesmos não percam a umidade, por exemplo, envolvá-los em várias camadas de filme plástico, nas duas direções;

4. Produzir concretos com os agregados usualmente empregados na indústria/concreteira, com diferentes relações água/cimento e diferentes trabalhabilidades, ou seja, diferentes proporções volumétricas, de pasta, agregado miúdo e agregado graúdo, medir a velocidade e determinar a resistência desses concretos;
5. Determinar a velocidade dos agregados graúdos pelo modelo de três fases proposto por Lin et al., 2003;
6. Com a velocidade dos concretos, a velocidade dos agregados miúdos, a velocidade dos agregados graúdos, e a proporção volumétrica dos constituintes do concreto, calcular a velocidade da pasta nos concretos produzidos com diferentes relações água/cimento e estabelecer curvas de correlação entre a velocidade na pasta do concreto e a resistência à compressão;
7. Cada vez que novos agregados vierem a ser empregados, devem-se obter as velocidades nestes, e utilizar as curvas de correlação obtidas entre velocidade na pasta e resistência do concreto para estimar a resistência à compressão.

6. Conclusões

6.1. Velocidade de pulsos ultrassônicos nas rochas

Segundo a literatura, rochas de mesma origem geológica podem apresentar variações significativas na velocidade de pulsos ultrassônicos. A composição e proporção mineralógica alteram as propriedades mecânicas e elásticas das rochas. Neste estudo observou-se que a alteração do tipo de rocha afetou a velocidade de pulsos ultrassônicos, confirmando-se dados da revisão bibliográfica. Além disso, a velocidade depende da condição de umidade da amostra ensaiada e, em alguns casos da direção do ensaio. Uma variação em torno de 10% na velocidade dos pulsos ultrassônicos em rochas graníticas de diferentes jazidas pode ser percebida.

Experimentalmente, verificou-se que sob mesmas condições de saturação foram constatadas diferenças significativas de velocidade entre as rochas graníticas. Além disso, na medida em que o teor de umidade crescia no interior dos poros das rochas graníticas foi observado aumento na velocidade de pulsos ultrassônicos, isto por motivos previamente discutidos, aumento do módulo dinâmico, devido a menor deformabilidade e/ou porque o som se propaga com maior velocidade na água do que no ar. Esse mesmo comportamento não foi observado nas amostras de rochas de diabásio.

6.2. Velocidade nos agregados miúdos

Quando da determinação da velocidade dos agregados miúdos pelo modelo de duas fases sugere-se que os valores obtidos nas primeiras idades sejam desconsiderados, pois eles se afastam substancialmente do valor médio. Além disso, recomenda-se utilizar um número mínimo de 6 corpos de prova para que os valores obtidos nas pastas e argamassas sejam mais representativos.

6.3. Velocidade nas rochas e velocidades nos agregados graúdos

Para a determinação da velocidade do agregado graúdo pelo modelo de três fases recomenda-se adotar os mesmos procedimentos sugeridos para determinação do agregado miúdo.

Ao se comparar a velocidade dos agregados graúdos graníticos da Mineradora Cedro com a velocidade média das amostras da rocha-mãe (Mineradora Cedro) (

Tabela A18), nas condições seca em estufa e seca ao ar verificou-se que a velocidade obtida nos agregados graúdos foi um pouco superior. Por outro lado, quando se comparou com a velocidade média na rocha-mãe, na condição saturada superfície seca, com a velocidade média nos agregados graúdos na mesma condição constatou-se que a velocidade dos agregados graúdos foi 4,3 % inferior.

Duas hipóteses podem ser formuladas a partir destas observações. A primeira corresponderia ao efeito do processo de britagem, que minimizaria as superfícies de falhas dentro dos agregados graúdos e, por conseguinte implicaria em uma maior velocidade de propagação no agregado graúdo do que na rocha mãe. Esta hipótese considera que o agregado graúdo esteja em uma condição de saturação equivalente à seca ao ar ou em seca em estufa.

Uma outra possível hipótese seria considerar que os agregados graúdos no interior do concreto possam estar numa condição de umidade superior à condição seca ao ar e inferior à condição saturada superfície seca. Nesta segunda hipótese, o processo de britagem não alteraria a velocidade do ultrassom.

Uma outra consideração seria uma possível superposição destes efeitos.

Além dessas possíveis hipóteses, faz-se importante ressaltar que o modelo proposto não contempla possíveis efeitos decorrentes da existência da zona de transição.

Para os agregados graúdos de diabásio, por outro lado, a velocidade média nas amostras das rochas-mãe foi sempre inferior à velocidade nos agregados diabásicos, independente da condição de saturação da rocha. Para este agregado, portanto, apenas a primeira hipótese poderia ser formulada, ou seja, o processo de britagem influenciou os valores de velocidade dos pulsos ultrassônicos.

6.4. Emprego do ultrassom para detecção de início e fim de pega

Os resultados obtidos utilizando-se cimento CP V-ARI RS e CP IV-32 se mostraram bastante satisfatórios. Evidenciou-se que o procedimento de empregar a velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos para a detecção de início e fim de pega é mais rápido e mais prático do que o ensaio em que se emprega o penetrômetro de Proctor. Contudo, faz-se necessário ampliar-se a pesquisa verificando, por exemplo, o efeito de aditivos aceleradores e/ou retardadores. O tempo de início de pega encontrado correspondeu a uma velocidade na pasta em torno de 1800 m/s, enquanto para fim de pega encontrou-se uma velocidade na pasta em torno de 2300 m/s independentemente do tipo de cimento. Contudo, espera-se que este valor mude quando a relação a/c mudar.

6.5. Resistência à compressão

6.5.1. Efeito do teor de pasta

6.5.1.1. Misturas com $a/c=0,48$

A mistura de concreto com teor de pasta de 28% apresentou maior resistência nas idades de 3, 5, 7 e 14 dias. Entretanto, ao se considerar apenas as idades a partir de 2 dias foi possível constatar, através da análise estatística, que o teor de pasta não afetou significativamente a resistência à compressão destes concretos.

6.5.1.2. Misturas com $a/c=0,55$

A mistura com teor de pasta de 28% apresentou nas idades de 0,5, 0,75, 1,0 e 3 dias maior resistência à compressão. Entretanto, descartando-se as primeiras idades, e realizando análise estatística concluiu-se que o teor de pasta afetou de forma significativa a resistência à compressão desses concretos. Não obstante, não foi possível afirmar que os concretos produzidos com teores de pasta de 28% e 32% diferiram significativamente entre si. Por outro lado, ao se analisar as idades de 3 dias e 14 dias da mistura M5536VG19, constatou-se que esses valores diferiram em até 15% a menos do que o valor médio das outras misturas. Portanto, não se pode descartar a possibilidade de o teor de pasta não afetar significativamente a resistência à compressão dos concretos com água/cimento igual a 0,55.

6.5.1.3. Misturas com $a/c=0,65$

Em todas as idades analisadas o concreto com menor teor de pasta de 28% apresentou maior resistência à compressão. Os resultados da análise estatística confirmaram que foi significativo o efeito do teor de pasta nos concretos com água/cimento igual a 0,65.

Conclusão sobre o efeito do teor de pasta na resistência à compressão

Nos concretos produzidos com menor relação água/cimento, 0,48, o teor de pasta não afetou significativamente a resistência à compressão. Nos concretos com relação água/cimento de 0,55, constatou-se que a resistência não foi afetada quando os teores de pasta foram de 28% e 32%. Contudo, para o teor de pasta de 36%, notou-se relativa queda de resistência. Para os concretos com relação água/cimento igual a 0,65 foi significativo o efeito do teor de pasta na resistência à compressão.

Diante desses resultados parece haver um intervalo de relação água/cimento abaixo do qual o teor de pasta não afeta a resistência.

6.5.2. Efeito do agregado graúdo

6.5.2.1. Misturas com $a/c=0,48$

Com relação ao desempenho à resistência o concreto produzido com agregados diabásicos com relação $a/c=0,48$ foi muito semelhante ao produzido com agregados graníticos. Após análise estatística concluiu-se que os concretos produzidos com diferentes agregados, com $a/c=0,48$, não apresentaram diferenças significativas de resistência.

6.5.2.2. Misturas com $a/c=0,55$

O concreto produzido com agregado diabásico apresentou em todas as idades analisadas menor resistência à compressão que o concreto produzido com agregados graníticos. Concluiu-se, após análise estatística, que os concretos produzidos com agregados de diabásio e de granito, com relação $a/c=0,55$, apresentaram diferenças significativas de resistência.

6.5.2.3. Misturas com $a/c=0,65$

O concreto produzido com agregados diabásicos apresentou em praticamente todas as idades analisadas maior resistência à compressão

que o concreto feito com agregados graníticos. Contudo, para um nível de confiabilidade de 96,2% não se pode afirmar que os agregados graúdos produzam concretos com diferenças significativas de resistência.

Conclusão sobre o tipo de agregado graúdo na resistência à compressão

O tipo de agregado graúdo não afetou significativamente a resistência dos concretos com relação $a/c=0,48$, em um nível de confiabilidade de 95%, e também não afetou a resistência dos concretos com relação $a/c=0,65$, com nível de confiabilidade de 96,2%. Entretanto, o mesmo não aconteceu com a mistura com relação $a/c=0,55$, onde os concretos produzidos com agregados de diabásio apresentaram maior resistência.

6.5.3. Efeito do tipo de cimento

6.5.3.1. Misturas com $a/c=0,48$

Identificou-se que o concreto produzido com cimento CP-IV-32 apresentou, até a idade de 14 dias, resistência inferior aos demais concretos, confirmando o comportamento típico desse tipo de cimento. Entretanto, aos 28 dias sua resistência foi levemente superior ao concreto produzido com cimento ARI-RS.

6.5.3.2. Misturas com $a/c=0,55$

A resistência do concreto produzido com cimento CP IV-32 foi menor em todas as idades analisadas.

Conclusão do efeito do tipo de cimento sobre a resistência à compressão

Os concretos produzidos com cimento CP IV-32 apresentaram menor resistência em todas as idades analisadas, exceto aos 28 dias para a relação $a/c=0,48$, isto porque as reações pozolânicas propiciam aumento da resistência do concreto com a idade.

6.5.4. Efeito da dimensão máxima característica

Em quase todas as idades analisadas o concreto produzidos com relação água/cimento igual a 0,55, com dimensão máxima característica de 9,5 mm apresentou menor resistência que o concreto com dimensão máxima de 19 mm, exceto na idade de 28 dias. Entretanto, após análise

estatística concluiu-se que os concretos produzidos com agregados de dimensão máxima característica de 9,5 mm e 19,0 mm não diferem entre si de forma significativa, para um nível de confiabilidade de 95%.

6.6. Velocidade de pulsos ultrassônicos

6.6.1. Efeito do teor de pasta

6.6.1.1. Misturas com $a/c=0,48$

A mistura de concreto produzida com teor de pasta de 28% apresentou em todas as idades analisadas maiores velocidades que as demais. As misturas de concreto com maior teor de pasta apresentaram menores velocidades de pulsos ultrassônicos. Além disso, feita análise estatística, concluiu-se que o teor de pasta afeta a velocidade de pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto com relação $a/c=0,48$.

6.6.1.2. Misturas com $a/c=0,55$

A mistura de concreto com teor de pasta de 32% apresentou maior velocidade de pulsos ultrassônicos nas idades de 2, 3, 5, 7, 14 e 28 dias. A mistura com 36% apresentou a menor velocidade entre as misturas analisadas, confirmando a estimativa teórica. A mistura de concreto com teor de pasta de 28% apresentou valores de velocidade intermediários. A análise estatística confirmou que o teor de pasta afetou a velocidade de pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto com relação $a/c=0,55$.

6.6.1.3. Misturas com $a/c=0,65$

O concreto com teor de pasta de 28% apresentou, em todas as idades analisadas, velocidades de pulsos ultrassônicos superiores às da mistura de concreto com teor de pasta de 32%. Após análise estatística concluiu-se que o teor de pasta afetou a velocidade de pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto com relação $a/c=0,65$.

Conclusão sobre o efeito do teor de pasta na velocidade de pulsos ultrassônicos

O teor de pasta afetou a velocidade de pulsos ultrassônicos nas misturas de concreto com relação água/cimento de 0,48, 0,55 e 0,65. Nas relações água/cimento de 0,48 e 0,65, constatou-se que quanto menor o teor de pasta maior a velocidade de pulsos ultrassônicos.

6.6.2. Efeito do tipo de agregado graúdo

Os concretos produzidos com agregados de diabásio apresentaram em todas as idades analisadas e em todas as relações água/cimento produzidas maiores velocidades de pulsos ultrassônicos.

6.6.3. Efeito do tipo de cimento

Compararam-se as velocidades dos pulsos ultrassônicos dos concretos produzidos com cimento CP V-ARI-RS e cimento CP IV-32, do mesmo fabricante, nas idades de referência, nas relações $a/c=0,48$ e $0,55$, com teor de pasta de 32% e, conclui-se que para essas misturas, não ocorreu diferença significativa entre as velocidades.

6.7. Comparativo entre as velocidades medidas nos prismas de concreto e nos corpos de prova.

Não foi possível identificar diferenças entre as velocidades medidas nos prismas de concreto (20 x 20 x 20 cm) e nos corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm).

6.8. Correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e resistência à compressão

6.8.1. Efeito do teor de pasta

Para as misturas de concreto com relação água/cimento de $0,48$ e $0,65$, teor de pasta afetou de forma significativa as correlações entre V.P.U. no concreto e f_c . Por outro lado, para as misturas de concreto com relação água/cimento igual a $0,55$, o teor de pasta não afetou de forma significativa as correlações.

6.8.2. Efeito do tipo de cimento

Os tipos de cimento (CP V-ARI-RS e CP IV-32) empregados para a produção das correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto e a resistência à compressão não produziram diferença significativa nas correlações, para um nível de confiabilidade de 95%.

6.8.3. Efeito do tipo de agregado graúdo

O tipo de agregado graúdo empregado afetou de forma substancial a correlação entre a velocidade de pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão do concreto. As misturas produzidas com agregados graníticos apresentaram, em todas as relações água/cimento pesquisadas, para os mesmos níveis de resistência, valores de velocidade menores que as misturas produzidas com agregados diabásicos.

6.8.4. Efeito da dimensão máxima característica

O efeito da dimensão máxima característica foi analisado apenas na mistura com relação $a/c=0,55$. Para essa relação não foi possível identificar diferença significativa entre as correlações feitas com o agregado granítico de 19,0 mm e o agregado granítico de 9,5 mm.

6.9. Correlação entre velocidade na pasta do concreto e resistência à compressão

6.9.1. Misturas com $a/c=0,48$

O tipo de agregado graúdo, o tipo de cimento e o teor de pasta não afetaram as correlações feitas entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e a resistência à compressão de forma significativa.

6.9.2. Misturas com $a/c=0,55$

Concluiu-se que as correlações não foram afetadas pelo tipo de cimento, tipo de agregado graúdo e nem pela dimensão máxima característica. O teor de pasta afetou de forma significativa a correlação entre velocidade na pasta e resistência à compressão. Portanto, é indispensável dar-se continuidade a esse estudo para que com uma amostragem mais ampla se possa gerar conclusões mais consistentes.

6.9.3. Misturas com $a/c=0,65$

A correlação entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e a resistência à compressão não foi afetada pelo teor de pasta nem pelo tipo de agregado graúdo.

6.10. Considerações finais

Para a aplicação do método proposto, recomenda-se a determinação da velocidade dos agregados miúdos obtida a por meio do modelo de duas fases. Além disso, recomenda-se a utilização do modelo de três fases para a determinação da velocidade de pulsos ultrassônicos nos agregados graúdos em contraposição a obtenção de velocidades em prismas obtidos a partir da rocha mãe. É possível que o processo de britagem reduza falhas, fissuras e mesmo heterogeneidades provenientes da anisotropia das rochas.

Analisando-se as conclusões parciais provenientes da análise estatística existe indicativo de que as correlações entre velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta e a resistência à compressão, geradas por meio desse modelo, não foram afetadas pelo tipo de agregado graúdo, pelo teor de pasta, pela dimensão máxima característica, ou pelo tipo de cimento.

Foram realizados vários testes com o intuito de eliminar o efeito da relação água/cimento no modelo. Entretanto, com os dados disponíveis, não foi possível afirmar que se pode empregar o método desconsiderando-se o efeito da relação água/cimento.

Empregando-se o modelo proposto foi possível obter coeficiente de determinação (r^2) bastante elevado, da ordem de 96,0%, independente do tipo de agregado, teor de pasta, tipo de cimento ou dimensão máxima característica. Entretanto, quando se emprega a velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto esses valores caem em média para 73%.

Não foi percebida vantagem alguma em se analisar o concreto nas primeiras idades, pois se fazia necessário capear com enxofre nas idades de 12 h e 18 h, além disso, a qualidade do contato não era muito boa devido às irregularidades no topo dos corpos de prova, sendo que isso, em alguns casos, prejudicava a leitura dos tempos de propagação dos pulsos ultrassônicos. Além disso, essas primeiras idades dificultam o procedimento de linearização, necessário à análise comparativa de curvas de correlação. Portanto, acredita-se que outros estudos possam ser realizados a partir da idade de um dia, sem perda significativa nos resultados.

Por fim, como já foi descrito em vários trechos da tese, faz-se necessário que outras pesquisas sejam conduzidas para verificar a viabilidade da extensão do método proposto.

6.11. Sugestões e recomendações para trabalhos futuros

- Seria muito relevante a continuidade dessa pesquisa, onde outros profissionais realizassem estudos semelhantes ao que foi desenvolvido, empregando agregados graúdos de origem calcária, gnaisse, entre outros;
- Seria também importante averiguar como o modelo proposto se comporta quando da utilização de diferentes cimentos e aditivos;
- Recomenda-se que as próximas pesquisas sejam realizadas em ambiente com controle de temperatura, principalmente quando se for determinar a velocidade de pulsos ultrassônicos nas pasta e argamassas;
- Seria importante verificar como o modelo proposto se comporta quando se emprega concreto de alto-desempenho e/ou concreto auto-adensável;
- Sugere-se que se determine individualmente a velocidade dos agregados miúdos britados e os naturais e posteriormente verifique-se se a velocidade obtida na proporção a ser empregada no concreto está próxima da média ponderada das velocidades individuais.

REFERÊNCIAS

- ABO-QUDAIS, S. A. Effect of concrete mixing parameters of propagation of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**, v. 19, issue 8, p. 257-263, out. 2005.
- ACI COMMITTEE 228. **In-Place Methods to Estimate Concrete Strength**. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2003. 44 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C403/C403M-08**. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, West Conshohocken, 2008.
- BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. ABNT, Rio de Janeiro, 2008.
- _____. _____. **NBR 5739**. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. ABNT, Rio de Janeiro, 2007.
- _____. _____. **NBR 7215** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. ABNT, Rio de Janeiro, 1997.
- _____. _____. **NBR 9833**. Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. ABNT, Rio de Janeiro, 2008.
- _____. _____. **NBR 10341**. Agregado graúdo para concreto – determinação do módulo de deformação estático e do diagrama de tensão-deformação em rocha matriz. ABNT, Rio de Janeiro, 2006.
- _____. _____. **NM 52** – Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. _____. **NM 53** – Agregado graúdo: determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. _____. **NM 09** – Concreto e argamassa: determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração. Rio de Janeiro, 2003.

_____. _____. **NM 248** – Agregado: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. _____. **NM 30** – Agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. _____. **NM 67** – Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BEN-ZEITUN, A. E. Use of pulse velocity to predict compressive strength of concrete. **International Journal of cement, composite and lightweight concrete**, [S.l.], v. 8, issue 1, p 51-59, fev. 1986.

BERRIMAN, J.; PURNELL, P. HUTCHINS, D.A.; NEILD, A. Humidity and Aggregate content Correction Factors for air-coupled Ultrasonic evaluation of concrete. **Ultrasonics**, [S.l.] v.43, p. 211-217, fev. 2005.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 12504-4**: Testing concrete in structures determination of ultrasonic pulse velocity. Londres: BSI, 2004.

BULLOCK, R.E.; WHITEHURST, E.A. Effect of certain variables on pulse velocities through concrete. Highway Research Board Bulletin, n. 206, p.37-41, 1959. In: MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Nondestructive Testing of Concrete**. 2. ed. Londres: ASTM International, 2004.

BUNGEY, J. H. **The Testing of Concrete in Structures**. 4. ed. Londres: Taylor & Francis, 2006.

BYFORS, J. **Plain concrete at early ages**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1980.

CÂMARA, E. **Avaliação da resistência à compressão do concreto utilizado usualmente na Grande Florianópolis através de métodos**

de ensaios não destrutivos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

CARINO, N. J., Nondestructive Test Method. In: NAWY, E.G. (Coord.) **Concrete construction engineering handbook**. 1. ed. Flórida: Taylor & Francis, 1997.

CHEESMAN, W. J. Dynamic testing of concrete with the soniscope apparatus. **Proceedings of the Highway Research Board**, vol. 29, p. 176–183, 1994.

CNS ELECTRONICS LTD. **PUNDIT manual**. London, 1994. 76 p.
COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 58** – Hormigón endurecido: determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos. Argentina, 1996.

DEL-RIO, L. M.; JIMÉNEZ, A.; LÓPEZ, F.; ROSA, F. J.; RUFO, M. M.; PANIAGUA, J. M. Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing. **Ultrasonics**, Cáceres, v. 42, p. 527-530, 2004.

DEMIRBOGA, R.; TURKMAN, I.; KARAKOÇ, M. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 34, p. 2329-2336, 2004.

DORNELLES, F. L.; PINTO, R. C. A.; e PADARATZ, I. J. **Deteção de Falhas Internas de Concretagem Através do Uso do Ultra-Som**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47. 2005, Olinda. Anais do 47^o IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto. Olinda. 2004.

ELVERY, R. H.; IBRAHIM, L. A. M. Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. **Magazine of Concrete Research**, Londres, v. 28, issue 97, p.181–190, dez. 1976.

EVANGELISTA, A. C. J. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

FHWA - Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments - FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IAEA-TCS-17: Guidebook on Non-destructive testing of Concrete Structures. Viena:2002.

GROSSE, C. U.; REINHARDT, H-W. Fresh concrete monitored by ultrasound methods. **Otto-Graf-Journal**, Stuttgart, v. 12, p.157-168, 2001.

ISAIA, G. C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2005.

_____. **Materiais de Construção e princípios de ciência dos materiais**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2007.

JONES, R. Non-Destructive Testing of Concrete.. In: MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Nondestructive Testing of Concrete**. 2. ed. Londres: ASTM International, 2004.

KAPLAN, M.F. The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete. In: MALHOTRA, V. M. e CARINO, N. J. **Nondestructive Testing of Concrete**. 2. ed. Londres: ASTM International, 2004.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. New York: CRC Press, 1995.

KEILLER, A. P. An investigation of the effects of test procedure and curing history on the measured strength of concrete. **SP82-22** – In situ non-destructive testing of concrete. Detroit, v. 82, p. 441-458, set. 1984. (ACI Special publication)

LAFHAJ, Z.; GOUEYGOU, M.; DJERBI, A.; KACZMAREK, M. Correlation between porosity and ultrasonic parameters of mortar with viriable water/cement ratio and water cement. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 36. p. 625-633, 2006.

LIN, YICHING; LAI, CHAO-PENG; YEN, TSONG. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills v. 100, issue 1, p. 21-28, jan.-fev., 2003.

LIN, C-H.; TSAI, M-J.; LEE, C-J.; WANG, S-Y.; LIN, L-D. Effects of ring characteristics on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of seven softwood species. **Holzforschung**, Berlin, v. 61, p. 414-418, 2007.

MACHADO, M. D. **Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos Usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaios não Destrutivos**. 2005. 294 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MALHOTRA, V. M. In Situ/Nondestructive Testing of Concrete – A Global Review. Special Publication SP-82, Detroit, v. 82, p. 1-16, set. 1984.

MALHOTRA V. M; CARINO N. J. **Nondestructive Testing of Concrete**. 2. ed. London: American Society for Testing and Materials, 2004.

MCHEMRY, D.; OLESON, C.C. **Pulse velocity measurements on concrete dams**. In: MALHOTRA V. M; CARINO N. J. **Nondestructive Testing of Concrete**. 2. ed. Londres: ASTM International, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008.

MIKULIC, D. *et al.* Application of ultrasonic methods for early age concrete characterisation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SLOVENIAN FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING, 8., Portoroz, set. 2005.

MONTIJA, F. C.; FIGUEIREDO, A.D. **Alguns aspectos da relação entre módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto**. São Paulo: EPUSP, 2008.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J.

Nondestructive Testing of Concrete. 2. ed. London: American Society for Testing and Materials, 2004.

NEVILLE, M. A. **Propriedades do Concreto**, Tradução Salvador E. Giammusso. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: PINI, 1997.

PINTO, R. C. A. **The effect of curing temperatures on the development of mechanical properties of fresh and hardened high strength silica fume mixtures** – a maturity approach. 1997. 294 f. Tese (Doutorado)–Universidade de Cornell, Nova Iorque, 1997.

_____. .; HOVER, Kenneth C. Combined Effects of Silica Fume, Superplasticizer and Temperature on Setting Behaviour. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 52, n. 5 p. 345-352, 2000.

_____; MEDEIROS, A.; PADARATZ, I. J., **Ultrasonic to estimative depth of surface opening cracks**. publicado em e-NDT., 2004.

PROCEQ. 2010. Disponível em:

<<http://www.proceq.com/produtos/teste-de-concreto/martelo-de-teste-de-concreto/digi-schmidt.html?L=6>>. Acesso em: 22 jan. 2010.

SILVA JÚNIOR, S. F.; MARQUES, P. V. **Apostila do curso de Engenharia Mecânica**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

SOLÍS-CARCAÑO, R.; MORENO, E. I. Evaluation of concrete made of crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. **Construction and Building Materials**, v. 22, issue 6, p. 1225-1231, jun. 2008.

TEODORU, G. V. The Use of Simultaneous Nondestructive Tests to Predict the Compressive Strength of Concrete. **Nondestructive Testing**, p. 137-152, American Concrete Institute, Detroit, 1988. (Special Publication SP-112)

TOMSETT, H. N., Ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality. **Magazine of concrete research**, v. 32, n. 110, Londres, mar. 1980.

TRICHES, G.; PINTO, R. C. A.; SILVA, A. J.; MACHADO, T. T. Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete with Bottom Ash

for Sustainable Pavements. In: 2006 AIRFIELD AND HIGHWAY PAVEMENT SPECIALTY CONFERENCE, 2006, Atlanta. **Proceedings**... Atlanta: American Society of Civil Engineers, v. 1. p. 329-340.

TRTNIK, G.; KAVCIC, F.; TURK, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. **Ultrasonics**, v. 49. p. 53-60, [S. l.], 2009.

VASCONCELOS, A.; ASSUMPÇÃO, M.; NASCIMENTO, A.F.; FERREIRA, J.M; MENEZES, E.A.S; BARBOSA, J.R. Intraplate Earthquake Swarm in Belo Jardim, NE, Brazil: Reactivation of a Major Neoproterozoic Shear Zone (Pernambuco Lineament). **Geophysical Journal International**, [S.l : S. n.], 2008.

WHITEHURST, E. A. Soniscope tests concrete structures. **Proceedings of Journal American Concrete Institute**, Farmington Hills, v. 47, issue 2, p. 433-444, fev. 1951.

YAMAN, I. O. et al. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 98, issue 6, p. 450-457, nov.-dec. 2001.

YE, G.; LURA, P.; BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L., Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 34, p. 631-640, 2004.

YUN, C. H.; CHOI, K. R.; KIM, S. Y. et al.. Comparative Evaluation of Nondestructive Test Methods for In-Place Strength Determination. **Nondestructive Testing Special Publication SP-112**. Detroit, v. 112, p. 111-136, jan. 1989.

APÊNDICES – TABELAS

Tabela A1- Granulometria do agregado graúdo da Mineradora Cedro (Palhoça-SC), com DMC=19,0mm.

Agregado graúdo Granítico Mineradora Cedro			
Peneira (mm)	Mat. Ret (g)	% ret.	% ret acum
25	0		
19	535	5,36	5,36
12.5	6.950	69,6	74,96
9.5	1.985	19,88	94,84
6.3	490	4,91	99,75
4.8	10	0,1	99,85
Fundo	15	0,15	100

Tabela A2- Distribuição granulométrica do agregado graúdo granítico da Mineradora Cedro (Palhoça-SC), com DMC=9,5mm.

Peneira	Amostra 1 (Brita zero)			Amostra 2 (Brita zero)		
	Mat. Ret. (g)	% Retida	% Ret. Acumul.	Mat. Ret. (g)	% Retida	% Ret. Acumul.
9,5	52,92	4,13	4,13	77,1	1,92	1,92
6,3	600,4	46,88	51,02	1839,8	45,73	47,64
4,75	533,5	41,66	92,68	1692,7	42,07	89,72
2,36	92,2	7,20	99,88	397,6	9,88	99,60
1,18	0,3	0,02	99,90	4,91	0,12	99,72
Fundo	1,3	0,10	100,00	11,3	0,28	100

Tabela A3- Distribuição granulométrica agregado de diabásio da Mineradora Cedro (Maracajá-SC), com DMC=19,0mm.

Peneira	Amostra 1			Amostra 2		
	Mat. Ret. (g)	% Retida	% Ret. Acum.	Mat. Ret. (g)	% Retida	% Ret. Acum.
19	141,01	1,41	1,41	88,23	0,89	0,89
12,7	6460	64,40	65,80	6220	62,45	63,34
9,5	2740	27,31	93,11	2660	26,71	90,05
6,3	648,3	6,46	99,58	940	9,44	99,48
4,8	10,11	0,10	99,68	28,26	0,28	99,77
Fundo	32,3	0,32	100,00	23,22	0,23	100,00

Tabela A4- Valores individuais da massa específica do agregado miúdo proveniente do britamento das rochas graníticas.

Agregado miúdo britamento de rochas graníticas	Amostras			
	1	2	3	4
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,642	2,636	2,646	2,62
Média	2,636			

Tabela A5- Valores individuais da massa específica do agregado miúdo proveniente das dunas.

Agregado miúdo de dunas.	Amostras		
	1	2	3
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,657	2,647	2,644
Massa específica aparente Média (g/cm ³)	2,650		

Tabela A6- Distribuição granulométrica do agregado miúdo proveniente do britagem de rochas graníticas.

Peneira (mm)	Amostra 1			Amostra 2		
	Mat. retido(g)	% retida	% ret. Acumul.	material retido (g)	% retida	% ret. Acumul.
6,3	20,3	2,034	2,034	31,5	3,156	3,156
4,8	37,0	3,707	5,740	41,7	4,178	7,333
2,4	189,4	18,974	24,714	191,8	19,215	26,548
1,2	242,4	24,284	48,998	244,2	24,464	51,012
0,6	127,9	12,813	61,811	125,6	12,583	63,594
0,3	144,7	14,496	76,307	133,7	13,394	76,989
0,15	110,6	11,080	87,387	94,0	9,417	86,406
Fundo	125,9	12,613		135,7	13,594	

Tabela A7- Distribuição granulométrica do agregado miúdo proveniente de dunas.

Peneira (mm)	Amostra 1		
	material retido (g)	% retida.	% ret. acumulada
6,3	0,0	0,00	0,00
4,8	0,0	0,00	0,00
2,4	0,0	0,00	0,00
1,2	0,0	0,00	0,00
0,6	0,4	0,05	0,05
0,3	262,7	31,37	31,42
0,15	539,0	64,37	95,80
Fundo	35,2	4,20	100,00

Tabela A8- Distribuição granulométrica do agregado miúdo empregado na pesquisa (70% britagem de rochas graníticas com 30% areia de duna).

Peneira(mm)	Amostra 1		
	material retido (g)	% retida	% ret. Acumulada
6,3	0,8	0,04	0,04
4,8	13,2	0,72	0,76
2,4	146,8	7,99	8,75
1,2	257,2	14,00	22,75
0,6	152,7	8,31	31,06
0,3	424,9	23,13	54,19
0,15	662,8	36,08	90,27
Fundo	178,8	9,73	100,00

Tabela A9- Resistência do cimento CPV-ARI-RS com 1 dia, 3 e 7 dias.

Ensaio de resistência do cimento CP V-ARI-RS					
Idade: 1 dia					
CP	φ1 (mm)	φ2 (mm)	h (mm)	carga (kN)	Resist. (MPa)
CP1	47,35	47,25	97,15	24,40	13,85
CP2	47,55	47,40	98,05	25,40	14,35
CP3	47,30	47,35	98,20	26,00	14,78
Idade: 3 dias					
CP	φ1 (mm)	φ2 (mm)	h (mm)	carga (kN)	Resist. (MPa)
CP1	47,30	47,45	96,25	36,30	20,59
CP2	47,35	47,40	95,30	35,60	20,20
CP3	47,35	47,15	96,85	44,35	25,29
Idade: 7 dias					
CP	φ1 (mm)	φ2 (mm)	h (mm)	carga (kN)	Resist. (MPa)
CP1	47,40	47,40	97,15	59,84	33,91
CP2	47,35	47,15	97,26	61,20	34,90
CP3	47,45	47,55	97,59	60,17	33,95
NBR 7215 > 34 OK !			Média	34,26	

Tabela A10- Resultado do ensaio de massa específica do cimento
CP V-ARI-RS.

Frascos	Vol. inicial (ml)	Massa cim (g)	Vol. final (ml)	Vol. desl (ml)	M. esp (g/cm ³)
1	0,50	54,9	19,18	18,68	2,939
2	0,60	60,0	20,75	20,15	2,978
3	0,55	60,0	20,50	19,95	3,008
Média massa específica: 2,975 g/cm ³					

Tabela A11-Resultado do ensaio de massa específica do cimento
CPIV-32

Frascos	Vol. Inicial (ml)	Massa cim (g)	Vol. Final (ml)	Vol. Desl (ml)	M.Esp (g/cm ³)
1	0,90	60,0	22,00	21,1	2,8436
2	0,00	55,0	19,20	19,2	2,8646
Média massa específica: 2,854 g/cm ³					

Tabela A12- Velocidade média nas três direções das amostras de rochas da Mineradora Santa Bárbara, nas condições seca, seca em estufa e saturada superfície seca.

Velocidade Granito Santa Bárbara (m/s)			
Amostra	Seca ao Ar	Seca em Estufa	Saturada Sup. Seca
1	6037	5657	6249
2	5861	5328	6018
3	5749	5176	6045
4	5838	5098	6128
5	5489	5046	6068
Média	5795	5261	6102
D.P.	230	249	127
C.V.	4,0	4,7	2,1

Tabela A13- Velocidade média nas três direções das amostras de rochas da Mineradora Sulcatarinense, nas condições seca, seca em estufa e saturada superfície seca.

Velocidade Granito Mineradora Sulcatarinense (m/s)			
Amostra	Seca ao Ar	Seca em Estufa	Saturada Sup. Seca
1	5381	4635	5590
2	4693	4326	5268
3	5847	5412	5815
4	5393	5074	5748
5	5790	4681	5772
6	5732	5229	5792
7	5499	4963	5792
Média	5476	4903	5682
D.P.	487	373	209
C.V.	8,9	7,6	3,7

Tabela A14-Velocidade média nas três direções das amostras de rochas da Mineradora Saibrita.

Velocidade Granito Mineradora Saibrita (m/s)			
Amostra	Seca ao Ar	Seca em Estufa	Saturada Sup. Seca
1	5979	5979	5979
2	5790	5239	6065
3	5567	5720	5970
4	5595	5130	5988
5	5670	5050	5916
6	5899	5698	5927
Média	5750	5468	5974
D.P.	168,1	375	67
C.V.	2,9	6,8	1,1

Tabela A15- Velocidade média nas três direções das rochas da Mineradora Cedro (Palhoça-SC).

Velocidade Granito Mineradora Cedro (Palhoça-SC) (m/s)			
Amostra	Seca ao Ar	Seca em Estufa	Saturada Sup. Seca
1	5018	4733	5612
2	5263	4690	5866
3	5007	4596	5636
4	5594	5070	5985
5	5203	4525	5651
6	5296	4523	5796
7	5233	4548	5813
Média	5254	4677	5779
D.P.	312,7	325,7	201,1
C.V.	6,0	7,0	3,5

Tabela A16-Velocidade média nas três direções das amostras de rochas de Diabásio da Mineradora Cedro (Maracajá-SC).

Velocidade Diabásio Mineradora Cedro (Maracajá-SC)			
Amostra	Seca ao Ar	Seca em Estufa	Saturada Sup. Seca
1	6055	6055	6093
2	6164	5997	6067
3	6151	5977	6121
4	6137	5969	6107
5	6062	5954	6098
6	6091	6060	6091
Média	6110	6002	6096
D.P.	69	45,1	67
C.V.	1,1	0,8	1,1

Tabela A17- Absorção e Massa específica das rochas da Mineradora Santa Bárbara e Sulcatarinense.

Mineradora Santa Bárbara			Mineradora Sulcatarinense	
Amostra	Absorção (%)	Massa esp.(g/cm ³)	Absorção (%)	Massa esp.(g/cm ³)
Amostra 1	0,098	2,774	0,492	
Amostra 2	0,076	2,775	0,665	2,592
Amostra 3	0,156	2,755	0,113	2,622
Amostra 4	0,143	2,752	0,155	2,623
Amostra 5	0,147	2,737	0,107	2,630
Amostra 6	-	-	0,106	2,627
Amostra 7	-	-	0,233	2,626
Média	0,124	2,759	0,267	2,620

Tabela A18- Absorção e Massa específica das rochas da Mineradora Cedro e Saibrita.

Mineradora Cedro			Mineradora Saibrita	
Amostra	Absorção (%)	Massa esp. (g/cm ³)	Absorção (%)	Massa esp. (g/cm ³)
Amostra 1	0,240	2,637	0,092	2,622
Amostra 2	0,110	2,674	0,102	2,628
Amostra 3	0,115	2,665	0,090	2,626
Amostra 4	0,063	2,673	0,237	2,626
Amostra 5	0,117	2,659	0,164	2,631
Amostra 6	0,111	2,669	0,046	2,602
Amostra 7	0,121	2,669	-	-
Média	0,125	2,660	0,122	2,622

Tabela A19- Absorção e Massa específica das rochas da Mineradora Cedro (Diabásio).

Mineradora Cedro (Diabásio)		
Amostra	Absorção (%)	Massa específica (g/cm ³)
Amostra 1	0,096	2,949
Amostra 2	0,114	2,953
Amostra 3	0,098	2,958
Amostra 4	0,131	2,956
Amostra 5	0,120	2,952
Amostra 6	0,081	2,957
Média	0,107	2,954

Tabela A20- Resultado da resistência à compressão dos corpos de provada mistura M4828VG19

MISTURA 4828VG19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	2,81	2,93	2,95	2,93	2,91	0,07	2,56
(18 h)	13,12	12,52	13,79	13,46	13,22	0,64	4,81
(1 dia)	18,71	18,54	17,87	19,22	18,59	0,44	2,39
(2 dias)	29,01	27,30	27,99	27,63	27,98	0,86	3,07
(3 dias)	32,65	31,82	32,41	32,56	32,36	0,43	1,32
(5 dias)	30,20	35,37	37,18	-	36,28	1,28	3,53
(7 dias)	38,17	39,54	37,38	37,64	38,18	1,09	2,87
(14 dias)	41,84	41,40	43,12	42,15	42,13	0,90	2,12
(28 dias)	41,60	39,66	42,99	42,90	41,79	0,78	1,86

Tabela A21- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M4832VG19

MISTURA 4832VG19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	2,40	2,16	2,16	2,39	2,28	0,14	6,01
(18 h)	13,94	15,21	13,77	13,71	14,16	0,71	5,01
(1 dia)	18,45	18,96	20,39	18,95	19,19	0,83	4,35
(2 dias)	26,13	28,83	28,42	29,69	28,27	0,64	2,30
(3 dias)	29,47	31,99	32,05	27,58	30,27	1,47	4,86
(5 dias)	32,41	32,32	31,85	34,41	32,75	1,14	3,48
(7 dias)	34,60	36,74	36,20	33,86	35,35	1,11	3,15
(14 dias)	39,27	40,96	39,60	34,89*	39,94	0,90	2,24
(28 dias)	44,35	42,95	43,04	43,03	43,34	0,67	1,55

Tabela A22- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M4836VG19

MISTURA 4836VG19							
	Resistência (MPa)						
Idade	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4	Média	D.P.	C.V
(12 h)	1,03	1,18*	1,03	0,96	1,00	0,04	4,22
(18 h)	1,22	1,24	1,20	1,24	1,22	0,02	1,53
(1 dia)	19,23	20,20	18,73	19,91	19,52	0,21	1,07
(2 dias)	27,15	28,97	28,50	26,46	27,77	0,34	1,21
(3 dias)	32,16	31,85	32,98	29,90	31,72	0,58	1,84
(5 dias)	35,33	34,32	33,59	33,72	34,24	0,87	2,55
(7 dias)	37,33	38,31	35,43	34,55	36,40	0,69	1,90
(14 dias)	38,86	38,07	40,33	34,44*	39,09	1,14	2,93
(28 dias)	41,56	44,68	43,54	47,47	44,32	2,47	5,57

Tabela A23- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M4832IVG19

MISTURA 4832IVG19							
	Resistência (MPa)						
Idade	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4	Média	D.P.	C.V
(12 h)	0,40*	0,51	0,50	0,53	0,51	0,01	2,60
(18 h)	6,99	6,60	6,69	6,65	6,73	0,17	2,58
(1 dia)	14,07	14,18	13,66	14,04	13,99	0,23	1,62
(2 dias)	22,57	22,80	22,96	23,30	22,91	0,31	1,33
(3 dias)	26,53	27,86	26,90	27,63	27,23	0,62	2,27
(5 dias)	28,98	31,20	29,91	28,95	29,76	1,05	3,54
(7 dias)	34,19	33,34	32,38	-	33,30	0,90	2,71
(14 dias)	37,46	36,89	36,65	37,78	37,20	0,51	1,38
(28 dias)	44,74	40,69	43,66	43,29	43,10	0,84	1,94

Tabela A24- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M4832VD19

MISTURA 4832VD19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	1,64	1,38*	1,65	-	1,64	0,01	0,37
(18 h)	12,23	13,12	13,19	13,30	12,96	0,49	3,81
(1 dia)	21,04	20,17	20,45	20,28	20,48	0,39	1,89
(2 dias)	27,92	27,45	27,21	26,98	27,39	0,36	1,31
(3 dias)	30,83	30,37	27,68	30,55	29,86	1,70	5,69
(5 dias)	28,69*	33,14	33,12	28,92*	30,97	2,50	8,07
(7 dias)	35,40	35,88	32,68	34,57	34,63	0,66	1,91
(14 dias)	40,07	39,88	40,87	36,38*	40,28	0,53	1,31
(28 dias)	45,43	38,98*	45,37	46,39	45,73	0,57	1,26

Tabela A25- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M5528VG19

MISTURA 5528VG19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	2,69	2,58	3,20	-	2,82	0,33	11,77
(18 h)	9,97	10,33	10,74	10,63	10,42	0,35	3,33
(1 dia)	16,37	16,00	14,86	15,96	15,80	0,64	4,13
(2 dias)	24,41	25,37	24,17	-	24,65	0,63	2,58
(3 dias)	26,83	28,82	23,51*	27,21	27,62	1,06	3,83
(5 dias)	30,85	29,60	29,40	29,59	29,86	0,66	2,22
(7 dias)	33,72	31,97	30,89	33,06	32,41	1,24	3,83
(14 dias)	35,00	36,39	34,86	35,09	35,34	0,71	2,00
(28 dias)	38,96	38,05	36,32	37,03	37,59	1,15	3,07

Tabela A26- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M5532VG19

MISTURA 5532VG19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	0,37	0,29*	0,34	0,36	0,35	0,01	4,18
(18 h)	4,35	4,28	4,22	3,41*	4,28	0,06	1,47
1 dia)	10,80	11,16	11,38	11,16	11,13	0,24	2,14
(2 dias)	23,60	23,74	24,45	24,04	23,96	0,37	1,55
(3 dias)	26,56	27,93	26,79	25,44	26,68	1,02	3,82
(5 dias)	29,65	31,18	31,08	28,95	30,22	1,09	3,62
(7 dias)	33,15	33,33	34,36	33,41	33,56	0,54	1,62
(14 dias)	34,14*	37,13	35,17	38,61	36,26	2,00	5,51
(28 dias)	40,43	42,78	39,85	39,52	40,65	1,47	3,63

Tabela A27- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M5536VG19

MISTURA 5536VG19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	0,59	0,58	0,59	0,59	0,59	0,004	0,75
(18 h)	6,56	6,34	6,09	6,38	6,34	0,19	3,04
(1 dia)	12,44	12,58	12,85	13,03	12,73	0,27	2,09
(2 dias)	20,24	21,29	18,71	20,21	20,11	0,61	3,05
(3 dias)	27,26	22,65	26,51	22,47	24,72	0,53	2,14
(5 dias)	-	-	-	-	-	-	-
(7 dias)	28,53	29,04	30,01	30,94	29,63	0,73	2,50
(14 dias)	33,98	36,09	33,64	36,09	34,95	1,32	3,78
(28 dias)	40,86	37,12	36,39	38,34	38,18	1,96	5,13

Tabela A28- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M5532IVG19

MISTURA 5532IVG19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)							
(18 h)	3,78	3,54	2,50*	2,51*	3,66	0,17	4,63
1 dia)	9,05	10,18	9,39	9,03	9,41	0,54	5,72
(2 dias)	16,96	16,69	16,08	17,05	16,70	0,44	2,63
(3 dias)	19,67	16,20*	19,32	22,40	20,46	1,68	8,23
(5 dias)	19,60*	22,00	23,02	24,21	23,08	1,10	4,78
(7 dias)	23,92	23,35	24,74	24,34	24,09	0,60	2,48
(14 dias)	25,11*	28,53	27,66	28,70	27,50	0,56	2,02
(28 dias)	35,17	34,28	33,77	32,34	33,89	1,18	3,49

Tabela A 29- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M5532VD19

MISTURA 5532VD19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	1,27*	1,27*	1,51	1,82	1,67	0,22	13,15
(18 h)	9,59	10,20	7,78*	9,54	9,78	0,36	3,73
1 dia)	11,17*	10,84*	13,79	14,27	14,03	0,34	2,71
(2 dias)	19,61	18,72	15,22*	17,40	18,58	1,11	5,97
(3 dias)	16,07*	20,37	19,71	21,18	20,42	0,74	3,62
(5 dias)	25,58	24,75	25,64	24,72	25,17	0,50	2,00
(7 dias)	26,06	27,30	26,15	26,35	26,47	0,57	2,15
(14 dias)	26,94	27,11	28,29	24,87*	27,40	0,74	2,69
(28 dias)	37,26	34,69	34,63	32,69*	35,53	1,04	3,09

Tabela A30- Resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M5532VG9,5

MISTURA 5532VG9,5							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	0,52*	0,52*	0,63	0,58	0,60	0,03	5,79
(18 h)	6,29	6,48	5,86*	8,36	7,04	1,14	16,22
(1 dia)	13,71	13,09	13,84	14,08	13,68	0,42	3,10
(2 dias)	22,71	23,61	22,86	21,52	22,67	0,86	3,81
(3 dias)	26,19	25,30	25,28	26,81	25,89	0,74	2,87
(5 dias)	29,32	30,22	29,20	28,33*	29,06	0,81	2,79
(7 dias)	29,32	27,84	30,22	29,20	29,58	0,85	2,86
(14 dias)	37,72	33,53	34,94	32,09*	35,40	2,40	6,78
(28 dias)	43,97	43,29	42,35	39,58*	43,20	0,80	1,88

Tabela A31- Resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M6528VG19

MISTURA 6528VG19							
Idade	Resistência (MPa)				Média	D.P.	C.V
	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4			
(12 h)	1,24*	0,91	0,79*	0,92	0,91	0,01	0,75
(18 h)	5,36*	5,60	5,78	6,54	5,97	0,05	8,40
(1 dia)	10,52	9,95	9,00	9,93	9,85	0,34	3,44
(2 dias)	17,17	16,33	19,11	17,81	17,60	0,74	4,22
(3 dias)	20,10	20,83	20,12	25,93*	20,35	0,41	2,03
(5 dias)	22,14	22,78	22,49	22,83	22,56	0,32	1,41
(7 dias)	23,20	24,33	22,45	23,70	23,42	0,80	3,39
(14 dias)	27,80	27,44	26,98	25,23	26,87	0,41	1,53
(28 dias)	29,31	30,24	29,12	28,68*	29,34	0,66	2,24

Tabela A32- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M6532VG19

MISTURA 6532VG19							
	Resistência (MPa)						
Idade	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4	Média	D.P.	C.V
(12 h)	0,88	0,63	0,81	0,96	0,84	0,08	8,91
(18 h)	5,15	5,94	6,29	6,81	6,35	0,44	6,86
(1 dia)	9,59	10,02	8,81	10,06	9,62	0,58	6,02
(2 dias)	15,06	13,51*	16,50	15,93	15,83	0,73	4,60
(3 dias)	15,96	15,35	19,29	17,18	18,24	1,49	8,19
(5 dias)	18,62	18,08*	20,27	17,79*	19,44	1,17	6,01
(7 dias)	20,97	20,43	20,09	20,89	20,50	0,45	2,18
(14 dias)	26,08	19,47*	25,41	22,10	24,53	2,13	8,68
(28 dias)	26,41	27,49	23,98*	25,31	26,41	1,09	4,12

Tabela A33- Resultado do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova da mistura M6532VD19

MISTURA 6532VD19							
	Resistência (MPa)						
Idade	C.P.1	C.P.2	C.P.3	C.P.4	Média	D.P.	C.V
(12 h)	1,02	0,95	0,98	0,98	0,98	0,03	2,89
(18 h)	6,53	6,33	6,17	6,01	6,26	0,18	2,92
(1 dia)	10,27	8,97	10,38	10,09	10,25	0,15	1,46
(2 dias)	15,76	17,01	14,50*	17,51	16,76	0,90	5,39
(3 dias)	17,55	20,69	18,32	18,19	18,02	0,41	2,30
(5 dias)	21,88	22,74	20,61	21,24	21,62	0,91	4,20
(7 dias)	21,84	22,15	22,85	21,89	22,18	0,46	2,08
(14 dias)	24,47	26,65	26,76	23,89	25,44	0,07	0,29
(28 dias)	28,03	28,84	28,18	27,91	28,24	0,71	2,53

Tabela A34- Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto da mistura M4828VG19.

M4828VG19		M4832VG19.	
Idade (dias)	Conc. Disp.	Idade (dias)	Conc. Disp
0,31	1074	0,33	912
0,34	2305	0,38	2230
0,38	2845	0,42	2648
0,42	3237	0,44	2855
0,47	3551	0,49	3185
0,56	3740	0,50	3312
0,58	3941	0,54	3584
0,76	4094	0,75	4112
1	4356	1	4172
2	4417	2	4363
3	4479	3	4419
5	4538	5	4448
7	4576	7	4519
14	4598	14	4543
28	4677	28	4671

Tabela A35- Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto da mistura

M4836VG19		M4832IVG19	
Idade (dias)	Conc. Disp.	Idade (dias)	Conc. Disp.
0,25	716	0,33	1284
0,38	1984	0,38	2326
0,40	2465	0,42	3342
0,50	3191	0,50	3834
0,75	4166	0,75	3834
1	4183	1	4160
2	4347	2	4303
3	4399	3	4335
5	4407	5	4426
7	4482	7	4482
14	4591	14	4538
28	4600	28	4274

Tabela A36-Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto da mistura.

M4832VD19		M5528VG19	
Idade (dias)	Conc. Disp.	Idade (dias)	Conc. Disp.
0,29	1434	0,36	
0,33	1493	0,38	2430
0,38	2306	0,42	2802
0,42	2862	0,46	3088
0,46	3229	0,50	3372
0,50	3523	0,54	3636
0,75	4409	0,75	4124
1	4580	1	4252
2	4730	2	4291
3	4856	3	4390
5	4893	5	4380
7	4941	7	4493
14	4941	14	4547
28	4963	28	4576

Tabela A37- Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto da mistura.

M5532VG19		M5536VG19	
Idade (dias)	Conc. Disp.	Idade (dias)	Conc. Disp.
0,25	817	0,25	111
0,38	1815	0,38	2399
0,42	2218	0,42	2662
0,46	2515	0,46	2871
0,50	2929	0,50	3055
0,75	3806	0,75	3943
1	4076	1	4046
2	4177	2	4279
3	4387	3	4363
5	4397	5	-
7	4446	7	4447
14	4436	14	4497
28	4505	28	4555

Tabela A38- Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto da mistura

M5532IVG19.		M5532VD19.	
Idade (dias)	Conc. Disp.	Idade (dias)	Conc. Disp.
0,46	1236	0,29	622
0,50	1837	0,33	1971
0,54	2410	0,38	2532
0,58	2801	0,42	3084
0,63	3007	0,46	3258
0,64	3163	0,50	3577
0,75	3575	0,75	4428
1	4258	1	4654
2	4360	2	4686
3	4447	3	4715
4	4477	4	4726
7	4497	7	4789
14	4600	14	4788
28	4697	28	4811

Tabela A39- Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto da mistura

M5532VG9,5.		M6528VG19	
Idade (dias)	Conc. Disp.	Idade (dias)	Conc. Disp.
0,33	872	0,37	1848
0,38	1702	0,38	2011
0,42	2131	0,40	2265
0,44	2371	0,41	2419
0,47	2511	0,42	2489
0,50	2764	0,50	2826
0,75	3775	0,75	3874
1	3908	1	4135
2	4285	2	4332
3	4294	3	4342
5	4325	5	4372
7	4372	7	4413
14	4471	14	4392
28	4446	28	4521

Tabela A40- Velocidade de pulsos ultrassônicos no concreto da mistura.

M6532VG19		M6532VD19	
Idade (dias)	Conc. Disp.	Idade (dias)	Conc. Disp.
0,33	972	0,29	775
0,38	904	0,33	913
0,44	1764	0,38	1947
0,46	2126	0,42	2232
0,51	2530	0,46	2628
0,56	2872	0,50	3052
0,75	3770	0,75	3800
1	4018	1	3967
2	4265	2	4078
3	4316	3	4593
5	4218	5	4545
7	4250	7	4611
14	4389	14	4671
28	4358	28	4726

Tabela A41- Velocidade de pasta, argamassa e agregado miúdo.

Relação a/c	Idade(dias)	Vel. Pasta (m/s)	Vel.argamassa (m/s)	Vel. agregado miúdo (m/s)
0,48	1	2913	3635	4856
	3	3274	4021	5233
	5	3350	4091	5275
	7	3353	4078	5224
	14	3404	4122	5245
	28	3459	4179	5298
0,55	1	2883	3656	4994
	3	3022	3802	5121
	5	3099	3924	5344
	7	3149	3942	5266
	14	3231	4036	5372
	28	3285	4098	5443
0,65	1	2727	3646	5441
	3	2863	3792	5559
	5	2931	3834	5491
	7	3014	3886	5423
	14	3094	3934	5359
	28	3145	4008	5482

Tabela A42- Traço da mistura M4828VG19 e M4832VG19

Traço M4828VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	40,00	13,44	11,16
Areia artificial	76,98	28,56	23,71
Areia natural	32,99	12,24	10,16
Brita Granítica Cedro	122,71	45,415	37,71
Água	20,58	20,58	17,09
Aditivo	0,20	0,20	0,17
Volume de pasta (%)			28,42
Volume agregado miúdo (%)			33,89
Volume agregado graúdo (%)			37,71
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,436
Traço M4832VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	40,00	13,44	12,76
Areia artificial	61,60	22,86	21,69
Areia natural	26,40	9,80	9,30
Brita Granítica Cedro	104,73	38,76	36,78
Água	20,33	20,33	19,29
Aditivo	0,20	0,20	0,19
Volume de pasta (%)			32,24
Volume agregado miúdo (%)			30,98
Volume agregado graúdo (%)			36,78
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,403

Tabela A43- Traço da mistura M4836VG, M4832IVG19 e M4832VD19

Traço M4836VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	35,00	11,76	14,35
Areia artificial	43,44	16,12	19,66
Areia natural	18,62	6,91	8,43
Brita Granítica Cedro	79,41	29,39	35,85
Água	17,62	17,62	21,49
Aditivo	0,17	0,17	0,21
Volume de pasta (%)			36,06
Volume agregado miúdo (%)			28,09
Volume agregado graúdo (%)			35,85
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,370
Traço M4832IVG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP IV-32	35,00	12,14	13,00
Areia artificial	54,74	20,31	21,74
Areia natural	23,46	8,70	9,32
Brita Granítica Cedro	92,62	34,28	36,70
Água	17,80	17,80	19,05
Aditivo	0,17	0,17	0,19
Volume de pasta (%)			32,24
Volume agregado miúdo (%)			32,24
Volume agregado graúdo (%)			31,06
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,396
Traço M4832VD19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	30,00	10,08	12,69
Areia artificial	49,06	18,20	22,91
Areia natural	21,02	7,80	9,81
Brita Diabásio	81,88	27,83	35,02
Água	15,40	15,40	19,38
Aditivo	0,15	0,15	0,19
Volume de pasta (%)			32,26
Volume agregado miúdo (%)			32,72
Volume agregado graúdo (%)			35,02
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,486

Tabela A44- Traço das misturas M5528VG19 e M5532VG19

Traço M5528VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	40,00	13,44	10,28
Areia artificial	84,66	31,41	24,02
Areia natural	36,28	13,46	10,29
Brita Granítica Cedro	131,68	48,75	37,28
Água	23,50	23,50	17,97
Aditivo	0,20	0,20	0,15
Volume de pasta (%)			28,405
Volume agregados miúdos (%)			34,314
Volume agregados graúdos (%)			37,281
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,419
Traço M5532VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	30,00	10,08	11,85
Areia artificial	50,52	18,74	22,03
Areia natural	21,65	8,03	9,44
Brita	83,60	30,66	36,03
Água	17,42	17,42	20,47
Aditivo	0,15	0,15	0,18
Volume de pasta (%)			32,50
Volume agregado miúdo (%)			31,47
Volume agregado graúdo (%)			36,03
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,38

Tabela A45-Traço das misturas M5536VG19 e M5532IVG19

Traço M5536VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	33,00	11,09	13,22
Areia artificial	45,36	16,83	20,06
Areia natural	19,44	7,21	8,60
Brita Granítica Cedro	80,02	29,62	35,29
Água	19,00	19,00	22,64
Aditivo	0,16	0,16	0,20
Volume de pasta (%)			36,05
Volume agregado miúdo (%)			28,65
Volume agregado graúdo (%)			35,29
Massa específica teórica (%)			2,347
TRAÇO M5532IVG19			
	Massa (kg)	Volume	Volume (%)
Cimento CP IV-32	35,00	12,14	11,99
Areia Artificial	60,29	22,37	22,08
Areia Natural	25,84	9,59	9,46
Brita 1	99,11	36,68	36,21
Água	20,343	20,34	20,08
Aditivo	0,175	0,175	0,173
Volume de pasta (%)			32,24
Volume agregado miúdo (%)			31,55
Volume agregado graúdo (%)			36,21
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,377

Tabela A46-Traço das misturas M5532VD19 e M6528VG19.

Traço M5532VD19			
	Massa (kg)	Volume	Volume (%)
Cimento CP V-ARI-RS	29,00	9,75	11,68
Areia artificial	52,27	19,39	23,25
Areia natural	22,40	8,31	9,96
Brita diabásio	84,82	28,83	34,55
Água	17,00	17,00	20,38
Aditivo	0,14	0,14	0,17
Volume de pasta			32,24
Volume de agregado miúdo (%)			33,21
Volume de agregado graúdo (%)			34,55
Massa específica teórica do concreto (kg/dm ³)			2,496
Traço M5532VG9,5			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	30,00	10,08	11,81
Areia artificial	50,52	18,74	21,95
Areia natural	21,65	8,03	9,41
Brita zero granítica	83,60	30,95	36,25
Água	17,42	17,42	20,40
Aditivo	0,15	0,15	0,18
Volume de pasta (%)			32,39
Volume agregado miúdo (%)			31,36
Volume agregado graúdo (%)			36,25
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,381

Tabela A47-Traço das misturas M6528VG19, M6532VG19

Traço M6528VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	35,00	11,76	9,24
Areia artificial	83,67	31,04	24,39
Areia natural	35,86	13,30	10,45
Brita Granítica Cedro	126,44	46,80	36,76
Água	24,22	24,22	19,02
Aditivo	0,175	0,175	0,14
Volume de pasta (%)			28,40
Volume agregado miúdo (%)			34,84
Volume agregado graúdo (%)			36,76
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,399
Traço M6532VG19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	30,00	10,08	10,56
Areia artificial	57,79	21,44	22,46
Areia natural	24,77	9,19	9,63
Brita Granítica	92,09	34,08	35,69
Água	20,54	20,54	21,51
Aditivo	0,15	0,15	0,16
Volume de pasta (%)			32,22
Volume agregado miúdo (%)			32,08
Volume agregado graúdo (%)			35,70
Massa específica teórica (kg/dm ³)			2,360

Tabela A48-Traço da mistura M6532VD19

Traço M6532VD19			
Materiais	Massa (kg)	Volume	Vol (%)
Cimento CP V-ARI-RS	27,00	9,08	10,50
Areia artificial	55,11	20,45	23,65
Areia natural	23,62	8,76	10,14
Brita diabásio	86,51	29,40	34,00
Água	18,64	18,64	21,56
Aditivo	0,13	0,13	0,16
Volume de pasta (%)			32,21
Volume agregado miúdo (%)			33,79
Volume agregado graúdo (%)			34,00
Massa específica teórica do concreto (%)			2,441

APÊNDICES – FIGURAS

Primeira etapa da montagem do dispositivo, base prismática.

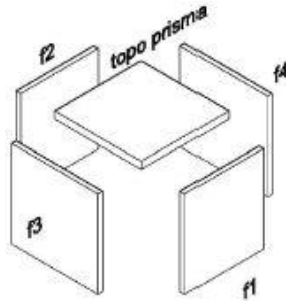


Figura A1- Partes que compõem a base prismática, feitas em chapa laminada compensada de 15 mm.

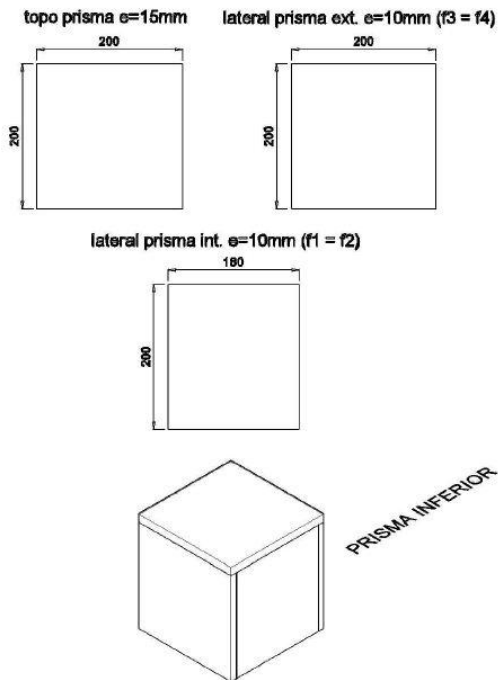


Figura A2 Dimensões dos elementos da base prismática

Segunda etapa da montagem do prisma

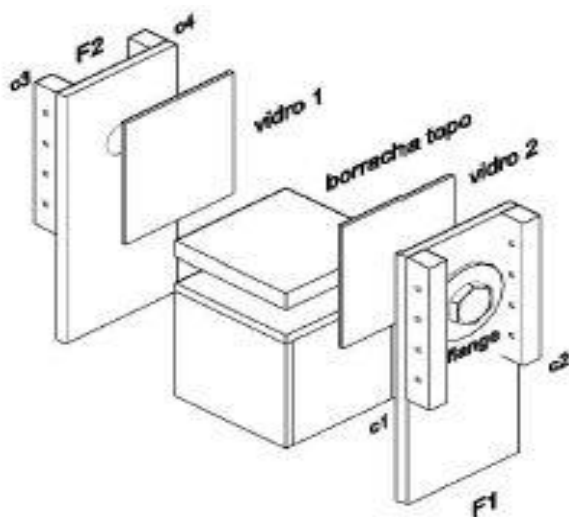


Figura A3 Segunda etapa da montagem do dispositivo.

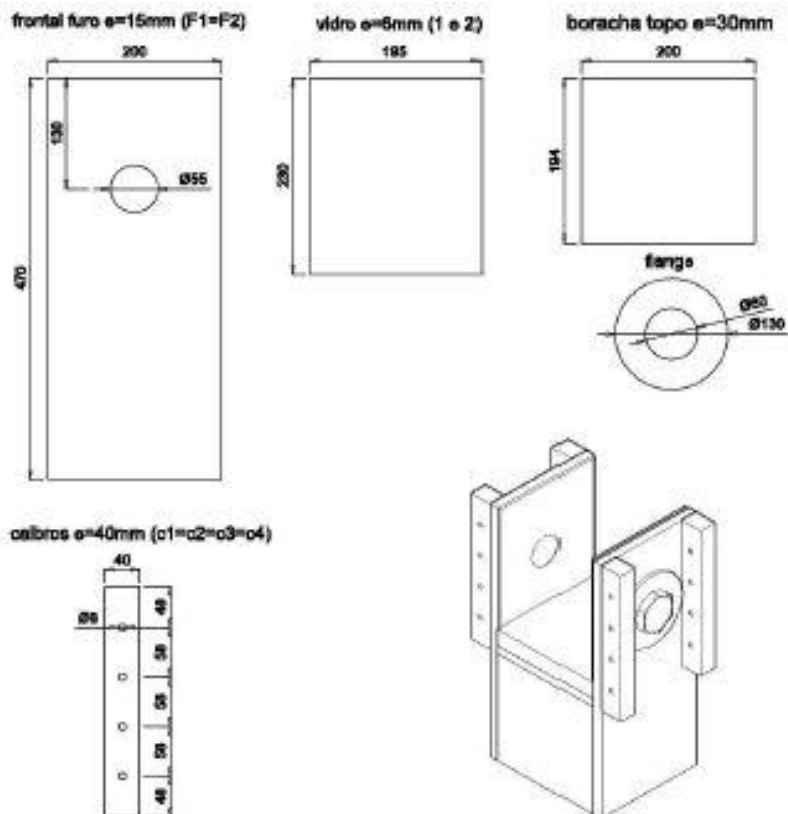


Figura A 4 Detalhe das fases laterais afixadas a base prismática

III

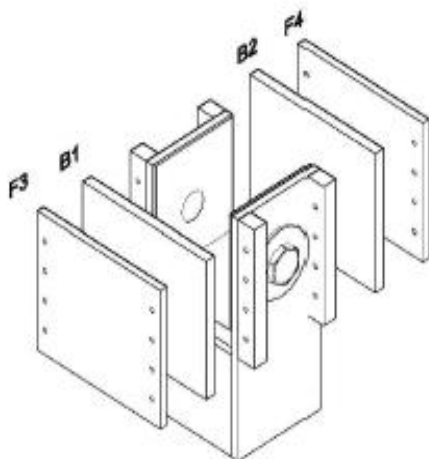


Figura A5 Terceira etapa da montagem do dispositivo.

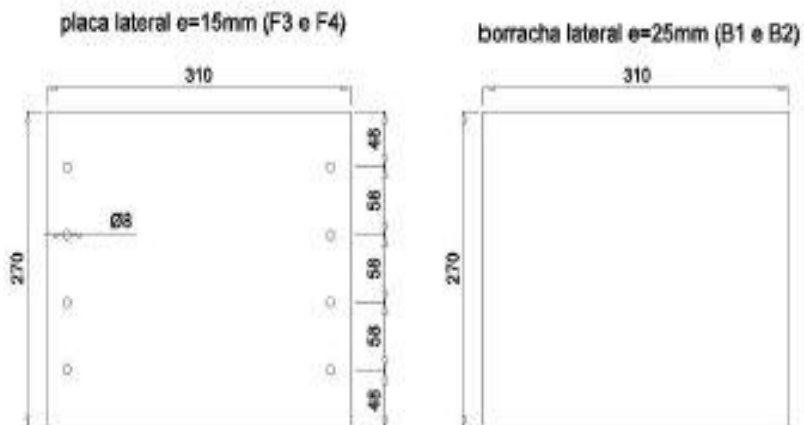


Figura A6 Partes da terceira etapa.

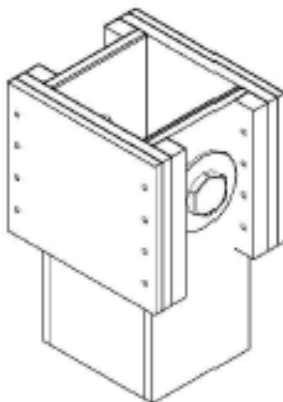


Figura A7 Dispositivo para leitura da velocidade de pulsos ultrassônicos em pasta, argamassas e concretos no estado fresco.

FABRICA: RIO BRANCO MARCA: VOTORAN BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO		CQ - CPIVRS Exped. Fab.III fevereiro-11		Votorantim Cimentos		
ENSAIOS QUÍMICOS - CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO - NBR 5734/91						
ENSAIO QUÍMICOS -RX -MÉTODO DE ENSAIO NBR 14656/01	NBR Nº	UNIDADE	MÉDIA	Máximo	Mínimo	ESPECIFICAÇÃO NORMA
Perda ao Fogo - PF	NM18/04	%	3,10	4,09	2,04	<ou=4,5
Oxido de Magnésio - MgO	NM14/04	%	4,93	5,45	4,38	<ou=6,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NM16/04	%	2,47	2,79	2,04	<ou=4,0
Anidrido Carbônico - CO ₂	NM20/04	%	2,39	2,95	1,34	<ou=3,0
Resíduo Insolúvel - RI	NM15/04	%	24,45	29,62	20,12	não aplicável
Equivalente Alcalino em Na ₂ O - (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)		%	0,90			não aplicável
ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS						
ENSAIO	NBR Nº	UNIDADE	MÉDIA	Máximo	Mínimo	ESPECIFICAÇÃO NORMA
Área Específica (Blaine)	NM76/98	m ² /kg	451	508	383	não aplicável
Massa Específica	NM23/01	g/cm ³	2,84	-	-	não aplicável
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	1,00	1,90	0,00	<ou=8,0
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	12826/93	%	3,76	5,70	1,90	não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/02	%	30,86	31,80	30,20	não aplicável
Início de Pega	NM65/03	min	229	250	150	>ou=60minut
Fim de Pega	NM65/03	min	303	330	200	<ou=480minut
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente	11582/91	mm	0,05	0,50	0,00	<ou=5,0
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			ESPECIFICAÇÃO		NORMA NBR 7215/69	
Idade (Dias)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio		
1	12,40	18,80	16,16	1,70	0	
3	21,30	27,10	24,61	1,32	>ou=10	
7	25,00	32,20	29,35	1,77	>ou=20	
28	39,40	44,60	41,86	1,32	>ou=32	
ESTABILIDADE DE PARÂMETROS DE QUALIDADE: RESISTÊNCIA e PEGA						
<p style="text-align: center;">Acompanhamento de resistências - últimos 12 meses</p>			<p style="text-align: center;">Acompanhamento tempo de início e fim de pega</p>			
<p style="text-align: center;">Responsável Técnico:</p> <p style="text-align: center;">Químico CLAIR CERON C.R.Q. 09200046 clair.ceron@vrcimentos.com.br</p>			<p style="text-align: center;">Assistência Técnica:</p> <p style="text-align: center;">Eng. Paulo Roberto Niebel CREA 23.937-D PR paulo.niebel@vrcimentos.com.br</p>			

Figura A8- Resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento CP IV-RS.

FABRICA: RIO BRANCO MARCA: VOTORANTIM BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO		CO - ARIRS Exped. Fab.II julho-10		Votorantim Cimentos		
ENSAIOS QUÍMICOS - CIMENTO POZOLANICO DE ALTA RESIST INICIAL NBR5736/91- 5733/91						
ENSAJO QUÍMICOS-RX -MÉTODO DE ENSAJO NBR 14656/01	NBR Nº	UNIDADE	MÉDIA	Máximo	Mínimo	ESPECIFICAÇÃO NORMA
Perda ao Fogo - PF	NM15/04	%	3,48	3,96	2,96	<Cl>=1,5
Óxido de Magnésio - MgO	NM14/04	%	3,54	3,98	3,22	<Cl>=4,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NM16/04	%	3,00	3,60	2,27	<Cl>=4,5
Anidrido Carbônico - CO ₂	NM20/04	%	2,54	2,98	2,15	<Cl>=3,0
Resíduo Insolúvel - RI	NM22/05	%	12,05	15,95	7,32	não aplicável
Equivalentes Alcalino em Na ₂ O - (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)		%	6,83			não aplicável
ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS						
ENSAJO	NBR Nº	UNIDADE	MÉDIA	Máximo	Mínimo	ESPECIFICAÇÃO NORMA
Área Específica (Blaine)	NM75/95	m ² /kg	493	518	465	>Cl>=300
Massa Específica	NM23/01	g/cm ³	2,96			não aplicável
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)	11579/91	%	0,10	0,20	0,10	<Cl>=5,0
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)	12826/93	%	3,25	3,00	0,70	não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/02	%	29,55	30,80	29,40	não aplicável
Início de Pega	NM65/03	min	193	220	155	>Cl>=50min
Fim de Pega	NM65/03	min	265	300	225	<Cl>=60min
Expansibilidade de Le Châtelier - a Quente	11582/91	mm	0,45	1,00	0,00	<Cl>=5,0
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			ESPECIFICAÇÃO		NORMA NBR 7215/69	
Idade (Dias)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio		
1	22,00	25,50	23,36	1,18	>Cl>=11	
3	32,60	35,70	33,75	0,97	>Cl>=24	
7	37,20	42,70	38,56	1,24	>Cl>=34	
28	44,60	48,80	46,49	1,16	não aplicável	
ESTABILIDADE DE PARÂMETROS DE QUALIDADE: RESISTÊNCIA e PEGA						
<p style="text-align: center;">Acompanhamento de resistências - últimos 12 meses</p>			<p style="text-align: center;">Acompanhamento tempo de início e fim de pega</p>			
<p style="text-align: center;">Responsável Técnico:</p> <p>Químico CLAIR CERON C.R.Q. 09200046 clair.ceron@vvcimentos.com.br</p>			<p style="text-align: center;">Assistência Técnica:</p> <p>Eng. Paulo Roberto Niebel CREA 23.937-D PR paulo.niebel@vvcimentos.com.br</p>			

Figura A9- Resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos do cimento CP V-ARI-RS



Figura A10- Momento da seleção e coleta das amostras das amostras de rochas na Mineradora Cedro, para o ensaio de ultrassonografia.



Figura A11- Momento da seleção e coleta das amostras na Mineradora Saibrita.



Figura A12- Momento da seleção e coleta das amostras das rochas da Sulcatarinense.



Figura A13- Momento da seleção e coleta das amostras das rochas da Mineradora Santa Bárbara.