

Dissertação

M. Eng.

Vanessa Rheinheimer

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

**UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NO
CONTROLE TECNOLÓGICO DE EXECUÇÃO DE
PAVIMENTOS DE CONCRETO TIPO *FAST TRACK***

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Vanessa Rheinheimer

Florianópolis, Fevereiro de 2007

**“UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NO CONTROLE TECNOLÓGICO DE
EXECUÇÃO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO TIPO *FAST TRACK*”**

VANESSA RHEINHEIMER

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof. Glicério Trichês - Coordenador do PPGEC

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, PhD. - Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin – UFRGS

Dr. Glicério Trichês - - ECV/UFSC

Ivo José Padaratz, PhD. - ECV/UFSC

“Diz-se que, mesmo antes de um rio cair no oceano, treme de medo. Olha para trás, para toda jornada, os cumes, as montanhas, o longo caminho sinuoso através das florestas, através dos povoados, e vê a sua frente um oceano tão vasto que, ao entrar nele, nada mais é do que desaparecer para sempre. MAS NÃO HÁ OUTRA MANEIRA. O rio não pode voltar, nem você pode voltar. Voltar é impossível na existência: você pode apenas ir em frente. Neste momento o rio perde o medo, pois percebe que deixará de ser rio PARA SE TORNAR UM OCEANO.”

*À minha grande amiga Ana Paula, que ilumina meus caminhos.
Ao meu pai, motivo de tudo.*

AGRADECIMENTOS

Admiração, respeito, amizade. Meu orientador provocou em mim tudo isso. Afinal, tanta dedicação, compreensão, companheirismo, não é fácil de encontrar. Roberto: ter você como orientador foi uma honra, levarei para sempre os ensinamentos que me passaste, como profissional e como pessoa. Obrigada por tudo. Você é incrível. Quando crescer quero ser como você!

Agradeço ao meu pai, meu maior exemplo, motivo maior de tudo. Você é meu orgulho, minha força, meu porto seguro. Sem você não haveria nada. Te amo. E à Gisa, que veio para colocar um novo sorriso no rosto do meu pai, e trouxe mais alegria à nossa família.

Às minhas irmãs superpoderosas, que sempre estiveram presentes virtualmente, e me apoiaram tanto... Fabi e Carol: amo muito vocês também.

À minha inspiração: Ana... Como definir? Você é minha guia, minha conselheira. Em quem me espelho para seguir em frente. Sempre presente, mesmo que virtualmente, para me ajudar. Se hoje sou mestre, é porque me inspirei em você! E se serei doutora, é porque tenho você caminhando ao meu lado. Nunca esquecerei tudo o que fizeste por mim!

Aos colegas Tatiane, Raphael, Arthur, Aline, Adolfo e Marco. Mais do que amigos, vocês foram minha família neste lugar. Fosse numa concretagem, em ensaios na madrugada, em domingos modelando estruturas, numa pizza, num bar ou mesmo no msn, vocês foram incríveis! Conhecer vocês foi um presente. Precisaria de muitas páginas para agradecer por tudo o que fizeram por mim: um parágrafo para cada um seria pouco. Tentei demonstrar com gestos!

Aos meus bolsistas queridos: Paulo, Thiago e Murilo. Nosso começo foi difícil, mas depois de muito esforço vocês aprenderam que precisam descontar o peso do balde... E pesaram muitos materiais, limparam muitas fôrmas, rodaram muito concreto e passaram muitas madrugadas rompendo corpos-de-prova e brigando com o ultra-som. Sem vocês teria sido impossível. Obrigada por tudo. Não esquecerei da minha equipe onde estiver!

Aliás, a toda a turma do GPEND, nosso incrível e mais querido grupo de pesquisas!

Ao meu gato Nestor, minha paixão: lindo e fofo miando quando eu precisava escrever... nenê lindo, te amo!

Aos colegas Vanessa Pflieger, André Hadlich e Everlei Câmara, por todos os conhecimentos passados, o apoio técnico, a troca de informações e a amizade.

A toda a galera da viagem pro Rio! Momentos para não esquecer nunca, jogadores! Valeu...

Aos meus grandes amigos de Porto Alegre: Vanessa, Camila, Priscila, Ângela, Felipe, Gustavo, Aninha, Patrícia (que saudade, amiga!), Samuel, Valter, e todos os outros de quem eu nunca esquecerei. Vocês fazem parte de um tempo que não volta mais, mas que está sempre presente no coração. E também aos grandes mestres que tive lá e que, mesmo de longe, nunca esquecerei: Luís Carlos, Denise, Acir, Rios, Dario, Ruy....

Aos colegas do Giem, pelo sorriso amigo com um “*Buenos dias*”. A luz sempre acesa nos domingos pela manhã, ou nas sextas à noite me fizeram sentir menos sozinha na universidade nestes horários impróprios. Por todo o material emprestado e o apoio técnico. Obrigada por tudo.

Aos colegas de laboratório Marcos, Tina e Leonardo, pelo apoio, companheirismo e ajuda técnica na execução do meu trabalho. E aos funcionários Edilson, Edi e Roque, pela mão de obra indispensável. Ao LMCC pelos materiais, equipamentos, ensinamentos e broncas dispensados. Obrigada.

Aos professores do PPGEC: Ivo, Angela, Henriette, Narbal, Glicério, Prudêncio, Wellington, pelos conhecimentos passados e pela amizade.

A toda a minha família, que mesmo de longe sei que torceu muito por mim e me ajudou muito nessa época difícil da minha vida. Tia Dete, tio Udo, Tina, Lú, tio Celso, minhas avós, vocês são especiais.

Agradeço muito às empresas que forneceram material para esta pesquisa. Sem a colaboração de vocês nada seria possível: ÀS Cimentos Votoran, em especial ao Sr. Maurício, pela doação dos cimentos dos Traços I a III. À Saibrita, em especial ao Eng. Jorge, pela doação dos agregados graúdos, e pela doação da brita graduada para a execução

da placa de concreto. À Engeterra, em especial ao Eng. Rodrigo, pela doação dos agregados miúdos. À Matec pela doação dos aditivos. À Itambé Cimentos, pela doação do cimento utilizado nos traços IV e V. Obrigada.

Em especial à Concrebrás, aos Engenheiros Jorge Christófolli e Patrick Zampieri, pela doação dos materiais, do concreto, pelo apoio técnico, compreensão, amizade e atenção que tornaram possível a execução da placa.

À Prefeitura Municipal de São José, especialmente ao Eng. Túlio, pela disposição em ajudar na execução da placa, por toda a atenção, pela amizade e interesse.

À Concepa, em especial ao Eng. Thiago Vitorello, e ao Eng. Lélío Brito, pelo fornecimento dos dados sobre o pavimento da Free-way.

Ao Professor Glicério, pelo apoio na concepção e execução da placa.

Ao apoio financeiro do CNPq.

Como definir tudo o que aconteceu nestes quase dois anos? Levarei só as coisas boas, e não foram poucas. Foi muito especial! E ficará para sempre.

RESUMO

Pavimentos construídos com a finalidade de uma rápida liberação ao tráfego, chamados de pavimentos de concreto *fast track*, sanam a necessidade de rapidez na liberação de pavimentos ao tráfego, podendo, quando bem construídos, proporcionar uma maior durabilidade à estrutura. Nestes pavimentos, necessita-se do constante monitoramento das propriedades mecânicas, em especial a resistência à tração na flexão, de forma a se ter segurança no momento da liberação da placa ao tráfego. Métodos não destrutivos, como o método da maturidade e ultra-som, são usualmente empregados para este monitoramento internacionalmente. Este trabalho aprofunda o estudo sobre a utilização de ensaios não destrutivos no monitoramento do ganho de resistência *in loco* em pavimentos de concreto *fast track*. Cinco misturas de concreto possivelmente utilizáveis em pavimentos rígidos foram investigadas e uma mistura aplicável a pavimentos de concreto *fast track* foi escolhida. Curvas de maturidade, seguindo-se o procedimento ASTM C 1074 (1998) para obtenção de valores da Energia de Ativação no concreto foram desenvolvidas a partir de ensaios de resistência à compressão e alternativamente a partir de ensaios de resistência à tração na flexão, propagação de ondas ultra-sônicas e início e fim de pega. Posteriormente, para a mistura escolhida, foi moldada uma placa-teste em tamanho real e submetida a um carregamento estático em seu ponto central, e em um ponto próximo ao bordo. Uma análise numérica foi desenvolvida a fim de localizar os pontos de maiores esforços na placa, bem como o nível de tensões provocado pela aplicação da carga. O desenvolvimento da resistência da placa foi continuamente estimado a partir do método da maturidade e ultra-som. Esperou-se aplicar o carregamento em torno de 24 horas após a concretagem, simulando aplicações *fast track*, o que se deu antes do esperado. As tensões e as deformações foram monitoradas em pontos específicos, e os valores comparados com os do modelo numérico, de maneira a conhecer comportamento da placa. Os resultados indicaram que todos os traços podem ser usados em aplicações *fast track*, já que atingiram altas resistências iniciais. O ultra-som não se forneceu resultados satisfatórios, porém foi possível estimar a resistência através do método da maturidade. Na placa de pavimento, os resultados no modelo real foram semelhantes ao modelo teórico, sendo este considerado uma boa aproximação.

Palavras-chave: Pavimentos de concreto fast track; Ensaios não-destrutivos.

ABSTRACT

The requirements of rapidity in the pavements releasing to the traffic are each time bigger, mainly when it is about repairing, when traffic interruptions are total undesirable, therefore they provoke the users dissatisfaction. Pavements constructed with the purpose of the fast release, called fast track concrete pavements, solve this necessity, being able, when well constructed, to provide a bigger structure durability. In these pavements, it is necessary to monitor constantly the mechanical properties development, in special the flexural strength, in order to be ascertained the open time to the pavement to traffic. Non destructive methods, as the maturity method and ultrasound, are usually used internationally for this monitoring. This work deepens the study of using non destructive testing in the following of the resistance profit at work in fast track concrete pavements. Five possible concrete mixtures on rigid pavements had been investigated and an applicable mixture of fast track concrete pavement was chosen. Maturity curves, following procedure ASTM C 1074 (1998) for attainment of Activation Energy values for the concrete had been developed to compressive strength assays and alternatively to flexural strength, ultrasonic waves propagation and initial and final set. Then, for the chosen mixture, a plate-test in real size was molded and submitted to a static shipment at central point, and at a point next to the edge. A numerical analysis was developed in order to locate the points of bigger efforts in the plate, as well as the level of stress provoked by the load application. The development of the plate resistance was continuously esteemed with maturity method and ultrasound. It was expected to apply the shipment around 24 hours after the concrete caste, simulating fast track applications, but it was given before the waited time. The stress and strain had been monitored in specific points, and the values compared with the numerical model, in a way to know behavior of the plate. The results indicated that all mixtures could be used at fast track applications because it obtained high initial resistance. The ultrasound didn't supply satisfactory results, but it was possible to esteem the concrete resistance by the maturity method. At concrete plate, the results obtained by real model was similar to theoretical model, and it was considered a good approximation.

Keywords: Fast track concrete pavements; Non-destructive testing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 2.1 Transmissão de esforços às camadas de base para pavimentos rígidos e flexíveis, onde em vermelho aparece a distribuição de tensões (Fonte: OBRAS VIALES, 2005).</i>	27
<i>Figura 2.2 Court Avenue, Bellefontaine, Ohio, EUA (Fonte: COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2005).</i>	28
<i>Figura 2.3 Perfil de um pavimento de concreto simples com barra de transferência.</i>	29
<i>Figura 2.4 Determinação gráfica do Número Admissível de Repetições de carga pelo critério de Fadiga (Fonte: DNIT, 2004).</i>	34
<i>Figura 2.5 Determinação gráfica do Número Admissível de Repetições de carga pelo critério de Erosão (Fonte: DNIT, 2004).</i>	38
<i>Figura 2.6 Tipos de eixos: (a) eixo simples de rodagem simples; (b) eixo simples de rodagem dupla; (c) eixo tandem duplo; (d) eixo tandem triplo.</i>	43
<i>Figura 2.7 Posição da carga crítica para as tensões de tração na flexão (DNIT, 2004).</i>	43
<i>Figura 2.8 Posição da carga crítica para as deformações (DNIT, 2004).</i>	44
<i>Figura 2.9 Reação à tendência de retração da placa de concreto</i>	45
<i>Figura 2.10 Tendência de empenamento da placa de concreto durante o dia.</i>	46
<i>Figura 2.11 Tendência de empenamento da placa de concreto durante a noite.</i>	46
<i>Figura 2.12 Comportamento de líquido denso.</i>	47
<i>Figura 2.13 Posições e configurações analisadas por Westergaard em 1926.</i>	48
<i>Figura 3.1 Lei de Saul</i>	68
<i>Figura 3.2 Representação do conceito de Energia de Ativação (Adaptado de Mancio et al., 2004).</i>	71
<i>Figura 3.3 Lei de Saul modificada por Carino (2004)</i>	79
<i>Figura 3.4 Comparação entre a evolução da resistência com o tempo e com a Maturidade.</i>	79
<i>Figura 3.5 Esquema de funcionamento do ultra-som. Fonte: ASTM C 597-02 (2003).</i>	82
<i>Figura 3.6 Modos de transmissão. (a) transmissão direta; (b) transmissão indireta; (c) transmissão semi-direta. Fonte: NBR 8802 (1994).</i>	83
<i>Figura 3.7 Transmissão indireta. Fonte: NBR 8802 (1994).</i>	84
<i>Figura 3.8 Gráfico para a obtenção da Velocidade de onda para a Transmissão indireta.</i>	85
<i>Figura 3.9 Efeito da temperatura. Fonte: Jones e Facaoaru (1974 apud Bungey, 1989).</i>	89
<i>Figura 3.10 Comparação de diferentes métodos na estimativa da resistência (WHITING et al., 1994).</i>	93
<i>Figura 3.11 Comparação de diferentes métodos na estimativa da resistência (WHITING et al., 1994).</i>	93
<i>Figura 4.1 Fluxograma do Programa Experimental.</i>	97
<i>Figura 4.2 Câmara climática.</i>	102
<i>Figura 4.3 Produção dos corpos-de-prova cúbicos de argamassa.</i>	103
<i>Figura 4.4 Produção dos corpos-de-prova cúbicos de argamassa.</i>	104
<i>Figura 5.1 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço I.</i>	110
<i>Figura 5.2 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço I.</i>	110
<i>Figura 5.3 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em argamassas para o Traço I.</i>	111
<i>Figura 5.4 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço I.</i>	111
<i>Figura 5.5 Evolução com a idade da resistência à compressão e à tração na flexão, em concreto, para o Traço I.</i>	113
<i>Figura 5.6 Evolução com a idade da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço I.</i>	113
<i>Figura 5.7 Exemplo de Gráfico de Arrhenius.</i>	114
<i>Figura 5.8 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço I.</i>	114
<i>Figura 5.9 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço I.</i>	115
<i>Figura 5.10 Curva de Maturidade para as Velocidades de onda Ultra-sônica do Traço I.</i>	115
<i>Figura 5.11 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço II.</i>	116
<i>Figura 5.12 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço II.</i>	116
<i>Figura 5.13 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em argamassas para o Traço II.</i>	117
<i>Figura 5.14 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço II.</i>	117

Figura 5.15 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão em concreto para o Traço II.	118
Figura 5.16 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço II.	119
Figura 5.17 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência para o Traço II.	120
Figura 5.18 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço II.	121
Figura 5.19 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço II.	121
Figura 5.20 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço III.	122
Figura 5.21 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço III.	122
Figura 5.22 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica, em argamassas, para o Traço III.	123
Figura 5.23 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço III.	123
Figura 5.24 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão, em concreto, para o Traço III.	124
Figura 5.25 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço III.	125
Figura 5.26 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência para o Traço III.	126
Figura 5.27 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço III.	127
Figura 5.28 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço III.	127
Figura 5.29 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço IV.	128
Figura 5.30 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço IV.	128
Figura 5.31 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço IV.	129
Figura 5.32 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão em concreto, para o Traço IV.	130
Figura 5.33 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço IV.	131
Figura 5.34 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço IV.	132
Figura 5.35 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço V.	133
Figura 5.36 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço V.	133
Figura 5.37 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em argamassas para o Traço V.	133
Figura 5.38 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço V.	134
Figura 5.39 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão em concreto para o Traço V.	135
Figura 5.40 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço V.	136
Figura 5.41 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência, para o Traço V.	137
Figura 5.42 Evolução da temperatura com o tempo para os corpos-de-prova de concreto.	138
Figura 5.43 Relação entre idade real e equivalente para compressão para o Traço V.	138
Figura 5.44 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço V.	139
Figura 5.45 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço V.	139
Figura 5.46 Curvas de Maturidade para Velocidade de onda ultra-sônica do Traço V.	139
Figura 6.1 Fluxograma da modelagem e execução da placa de concreto.	142
Figura 6.2 Retroanálise para a obtenção do módulo de elasticidade da base.	143
Figura 6.3 Pontos de aplicação das cargas concentradas para a escolha da pior situação.	144
Figura 6.4 Malha de elementos gerada.	144
Figura 6.5 Elemento Solid 187 (Fonte: Ansys, 2006).	145
Figura 6.6 Elemento Solid 186 (Fonte: Ansys, 2006).	145
Figura 6.7 Pontos de aplicação da carga na simulação numérica.	146
Figura 6.8 Tensões nos pontos da placa.	146
Figura 6.9 Deformações nos pontos da placa.	147
Figura 6.10 Geometria da placa com as chapas metálicas para a aplicação de carga. (a) Carga no centro. (b) Carga a 85 cm do bordo.	148
Figura 6.11 Tensões na placa para carga no centro. (a) Tensão no eixo x. (b) Tensão no eixo z.	149

Figura 6.12 Deformações na placa para carga no centro. (a) Deformação no eixo x. (b) Deformação no eixo z.	150
Figura 6.13 Tensões na placa para carga a 85 cm do bordo. (a) Tensão no eixo x. (b) Tensão no eixo z.	151
Figura 6.14 Deformações na placa para carga a 85 cm do bordo. (a) Deformação no eixo x. (b) Deformação no eixo z.	152
Figura 6.15 Compactação da base.	153
Figura 6.16 Instrumentação para o ensaio da base.	154
Figura 6.17 Localização dos transdutores de deslocamento para o ensaio da base para a chapa de raio 10,8 cm.	154
Figura 6.18 Localização dos transdutores de deslocamento para o ensaio da base para a chapa de raio 14,35 cm.	155
Figura 6.19 Extensômetros: (a) de imersão. (b) de superfície.	156
Figura 6.20 Disposição dos extensômetros na altura da placa.	156
Figura 6.21 Localização dos termopares na placa.	157
Figura 6.22 Posicionamento dos pontos de aplicação de carga.	158
Figura 6.23 Localização dos transdutores de deslocamento para a carga a 85 cm do bordo da placa.	158
Figura 6.24 Localização dos transdutores de deslocamento para a carga no centro da placa.	159
Figura 6.25 Fixação dos transdutores de deslocamento.	159
Figura 6.26 Comportamento da base quando utilizada chapa de raio 10,8 cm.	160
Figura 6.27 Bacia de deformações quando utilizada chapa de raio 10,8 cm.	161
Figura 6.28 Comportamento da base quando utilizada chapa de raio 14,35 cm.	161
Figura 6.29 Bacia de deformações quando utilizada chapa de raio 14,35 cm.	162
Figura 6.30 Comparação entre as tensões provocadas pelas duas chapas.	162
Figura 6.31 Perfil de Temperaturas.	163
Figura 6.32 Curva de maturidade para tração na flexão nas primeiras idades.	165
Figura 6.33 Curva de tendência para a curva de maturidade para tração na flexão para o Traço V.	166
Figura 6.34 Estimativa da Idade Equivalente para a resistência à tração na flexão de 2MPa.	166
Figura 6.35 Ultra-som na placa.	167
Figura 6.36 Resultados dos transdutores de deslocamento para o ensaio no canto da placa.	167
Figura 6.37 Resultados dos strain gages para o ensaio no canto da placa.	168
Figura 6.38 Linhas de Deformações com as estimativas para o fundo da placa em diferentes níveis de carregamento (eixo x).	169
Figura 6.39 Estimativa das deformações no fundo da placa para o ensaio no canto da placa (eixo x).	169
Figura 6.40 Bacia de deformações para o ensaio no canto da placa.	170
Figura 6.41 Resultados dos transdutores de deslocamento mais próximo e mais distante do ponto de aplicação de carga, para o ensaio no canto da placa.	170
Figura 6.42 Resultados dos transdutores de deslocamento para o ensaio no meio da placa.	172
Figura 6.43 Resultados dos strain gages para o ensaio no meio da placa.	172
Figura 6.44 Linhas de Deformações com as estimativas para o fundo da placa em diferentes níveis de carregamento.	173
Figura 6.45 Estimativa das deformações no fundo da placa para o ensaio no meio da placa.	173
Figura 6.46 Bacia de deformações para o ensaio no meio da placa.	174
Figura 6.47 Resultados dos transdutores de deslocamento mais próximo e mais distante do ponto de aplicação de carga, para o ensaio no meio da placa.	174
Figura 6.48 Comparação entre resultados do modelo numérico e da prova de carga para a placa de pavimento com carga aplicada a 85 cm do bordo.	176
Figura 6.49 Comparação entre resultados do modelo numérico e da prova de carga para a placa de pavimento com carga aplicada no centro.	176
Figura B.1 Medidas da face de aplicação do carregamento.	204

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 Formulário Padrão para Preenchimento dos parâmetros de dimensionamento</i>	40
<i>Tabela 2.2 Exemplos de Traços de Pavimentos de Concreto</i>	55
<i>Tabela 3.1 Valores de Energia Aparente de Ativação para cimentos nacionais. Fonte: Pinto (2004a)</i>	75
<i>Tabela 4.1 Traços de concreto estudados</i>	99
<i>Tabela 4.2 Traços de Argamassas</i>	99
<i>Tabela 5.1 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em argamassas para o Traço I</i>	109
<i>Tabela 5.2 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço I.</i>	112
<i>Tabela 5.3 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som, em concretos, para o Traço I.</i>	112
<i>Tabela 5.4 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço I.</i>	114
<i>Tabela 5.5 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em argamassas para o Traço II.</i>	116
<i>Tabela 5.6 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço II.</i>	117
<i>Tabela 5.7 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em concretos para o Traço II.</i>	118
<i>Tabela 5.8 Resultados da evolução com a idade, da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência para o Traço II.</i>	119
<i>Tabela 5.9 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço II.</i>	120
<i>Tabela 5.10 Resultados da evolução com a idade, da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som, em argamassas, para o Traço III.</i>	122
<i>Tabela 5.11 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço III.</i>	123
<i>Tabela 5.12 Resultados da evolução com a idade, da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som, em concretos, para o Traço III.</i>	124
<i>Tabela 5.13 Resultados da evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência, para o Traço III.</i>	125
<i>Tabela 5.14 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço III.</i>	126
<i>Tabela 5.15 Resultados da evolução com a idade, da Resistência à compressão e à tração na flexão, em argamassas, para o Traço IV.</i>	128
<i>Tabela 5.16 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço IV.</i>	129
<i>Tabela 5.17 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em concretos para o Traço IV.</i>	130
<i>Tabela 5.18 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço IV.</i>	131
<i>Tabela 5.19 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em argamassas para o Traço V.</i>	132
<i>Tabela 5.20 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço V.</i>	134
<i>Tabela 5.21 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em concretos para o Traço V.</i>	135
<i>Tabela 5.22 Resultados da evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência, para o Traço V.</i>	136

<i>Tabela 5.23 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço V.</i>	137
<i>Tabela 5.24 Resumo dos resultados dos traços estudados.</i>	140
<i>Tabela 6.1 Propriedades dos materiais adotadas na modelagem da placa.</i>	143
<i>Tabela 6.2 Tensões e deformações na placa.</i>	148
<i>Tabela 6.3 Idades equivalentes.</i>	164
<i>Tabela 6.4 Resistência à tração na flexão estimada pela curva de maturidade.</i>	165
<i>Tabela 6.5 Resistência dos Corpos-de-Prova no instante do ensaio no canto da placa.</i>	171
<i>Tabela 6.6 Resistência dos Corpos-de-Prova no instante do ensaio no centro da placa.</i>	175
<i>Tabela 6.7 Resultados de resistência aos 28 dias.</i>	175
<i>Tabela A.1 Caracterização do agregado miúdo Tipo A.</i>	193
<i>Tabela A.2 Caracterização do agregado miúdo Tipo B.</i>	194
<i>Tabela A.3 Caracterização do agregado miúdo Tipo C.</i>	194
<i>Tabela A.4 Caracterização do agregado miúdo Tipo D – Areia Industrial.</i>	195
<i>Tabela A.5 Caracterização do agregado miúdo Tipo E – Areia Fina.</i>	195
<i>Tabela A. 6 Caracterização do agregado graúdo Tipo A.</i>	196
<i>Tabela A.7 Caracterização do agregado graúdo Tipo B.</i>	196
<i>Tabela A.8 Caracterização do agregado graúdo Tipo C.</i>	196
<i>Tabela A.9 Caracterização do agregado graúdo Tipo D.</i>	197
<i>Tabela A.10 Caracterização do agregado graúdo Tipo E.</i>	197
<i>Tabela A.11 Caracterização do agregado graúdo Tipo F.</i>	198
<i>Tabela A.12 Caracterização físico-mecânica do cimento CPV – ARI RS (1).</i>	199
<i>Tabela A.13 Caracterização físico-mecânica do cimento CPII-Z.</i>	200
<i>Tabela A.14 Caracterização físico-mecânica do cimento CPV – ARI RS (2)</i>	201
<i>Tabela A.15 Caracterização do aditivo - Lignosulfonato (Fonte: Degussa, 2006).</i>	202
<i>Tabela A.16 Caracterização do aditivo - Naftaleno (Fonte: Grace, 2006a).</i>	202
<i>Tabela A.17 Caracterização do aditivo – Éster Policarboxílico (Fonte: Grace, 2006b).</i>	203
<i>Tabela B.1 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço I para a temperatura de 13°C.</i>	204
<i>Tabela B.2 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço I para a temperatura de 30°C.</i>	205
<i>Tabela B.3 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço I para a temperatura de 50°C.</i>	205
<i>Tabela B.4 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço I para a temperatura de 13°C.</i>	206
<i>Tabela B.5 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço I para a temperatura de 30°C.</i>	207
<i>Tabela B.6 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço I para a temperatura de 50°C.</i>	208
<i>Tabela B.7 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 1 dia.</i>	208
<i>Tabela B.8 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 3 dias.</i>	209
<i>Tabela B.9 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 7 dias.</i>	209
<i>Tabela B.10 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 14 dias.</i>	209

<i>Tabela B.11 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 21 dias.</i>	210
<i>Tabela B.12 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 28 dias.</i>	210
<i>Tabela B.13 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço II para a temperatura de 15°C.</i>	211
<i>Tabela B.14 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço II para a temperatura de 30°C.</i>	212
<i>Tabela B.15 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço II para a temperatura de 50°C.</i>	213
<i>Tabela B.16 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço II para a temperatura de 15°C.</i>	214
<i>Tabela B.17 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço II para a temperatura de 30°C.</i>	215
<i>Tabela B.18 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço II para a temperatura de 50°C.</i>	216
<i>Tabela B.19 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 1 dia.</i>	216
<i>Tabela B.20 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 3 dias.</i>	217
<i>Tabela B.21 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 7 dias.</i>	217
<i>Tabela B.22 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 14 dias.</i>	217
<i>Tabela B.23 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 21 dias.</i>	218
<i>Tabela B.24 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 28 dias.</i>	218
<i>Tabela B.25 Resultados de ultra-som para concreto do Traço II para o corpo-de-prova de Referência</i>	218
<i>Tabela B.26 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço III para a temperatura de 15°C.</i>	219
<i>Tabela B.27 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço III para a temperatura de 30°C.</i>	220
<i>Tabela B.28 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço III para a temperatura de 50°C.</i>	221
<i>Tabela B.29 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço III para a temperatura de 15°C.</i>	222
<i>Tabela B.30 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço III para a temperatura de 30°C.</i>	223
<i>Tabela B.31 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço III para a temperatura de 50°C.</i>	224
<i>Tabela B.32 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 1 dia.</i>	224
<i>Tabela B.33 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 3 dias.</i>	225

<i>Tabela B.34 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 7 dias.</i>	225
<i>Tabela B.35 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 14 dias.</i>	225
<i>Tabela B.36 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 21 dias.</i>	226
<i>Tabela B.37 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 28 dias.</i>	226
<i>Tabela B.38 Resultados de ultra-som para concreto do Traço III para o corpo-de-prova de Referência.</i>	226
<i>Tabela B.39 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço IV para a temperatura de 15°C.</i>	227
<i>Tabela B.40 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço IV para a temperatura de 30°C.</i>	228
<i>Tabela B.41 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço IV para a temperatura de 50°C.</i>	229
<i>Tabela B.42 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço IV para a temperatura de 15°C.</i>	230
<i>Tabela B.43 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço IV para a temperatura de 30°C.</i>	231
<i>Tabela B.44 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço IV para a temperatura de 50°C.</i>	232
<i>Tabela B.45 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 1 dia.</i>	232
<i>Tabela B.46 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 3 dias.</i>	233
<i>Tabela B.47 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 7 dias.</i>	233
<i>Tabela B.48 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 14 dias.</i>	233
<i>Tabela B.49 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 21 dias.</i>	234
<i>Tabela B.50 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 28 dias.</i>	234
<i>Tabela B.51 Resultados de ultra-som para concreto do Traço IV para o corpo-de-prova de Referência.</i>	234
<i>Tabela B.52 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço V para a temperatura de 15°C.</i>	235
<i>Tabela B.53 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço V para a temperatura de 30°C.</i>	236
<i>Tabela B.54 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço V para a temperatura de 50°C.</i>	237
<i>Tabela B.55 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço V para a temperatura de 15°C.</i>	238
<i>Tabela B.56 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço V para a temperatura de 30°C.</i>	239

<i>Tabela B.57 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço V para a temperatura de 50°C.</i>	240
<i>Tabela B.58 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 1 dia.</i>	241
<i>Tabela B.59 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 3 dias.</i>	241
<i>Tabela B.60 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 7 dias.</i>	241
<i>Tabela B.61 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 14 dias.</i>	242
<i>Tabela B.62 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 21 dias.</i>	242
<i>Tabela B.63 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 28 dias.</i>	242
<i>Tabela B.64 Resultados de ultra-som para concreto do Traço IV para o corpo-de-prova de Referência.</i>	243
<i>Tabela C.1 Resultados do Ensaio da Base com a chapa de raio 10,8 cm.</i>	244
<i>Tabela C.2 Resultados do Ensaio da Base com a chapa de raio 14,35 cm.</i>	248
<i>Tabela C.3 Resultados dos Transdutores de Deslocamento no Ensaio da Placa para carga aplicada no centro.</i>	250
<i>Tabela C.4 Resultados dos Strain Gages no Ensaio da Placa para carga aplicada no centro.</i>	254
<i>Tabela C.5 Resultados dos Transdutores de Deslocamento no Ensaio da Placa para carga aplicada a 85cm do bordo.</i>	258
<i>Tabela C.6 Resultados dos Transdutores de Deslocamento no Ensaio da Placa para carga aplicada a 85cm do bordo.</i>	260

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	24
2	PAVIMENTOS DE CONCRETO	25
2.1	Histórico do pavimento de concreto	27
2.1.1	Pavimentos de concreto no Brasil	28
2.2	Pavimento de Concreto Simples	29
2.3	Dimensionamento	30
2.3.1	O Método da PCA/84	30
2.4	TENSÕES E DEFORMAÇÕES	41
2.4.1	Ações	41
2.4.2	Teoria de Westergaard	47
2.5	PROCESSO CONSTRUTIVO PARA MANUTENÇÃO DE UMA PLACA	52
2.6	FAST TRACK	53
2.6.1	Materiais para Pavimentos de concreto <i>Fast Track</i>	58
2.6.2	Processo Construtivo	60
2.6.3	Crítérios para abertura do pavimento ao tráfego	60
3	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	62
3.1	MATURIDADE	62
3.1.1	Descrição do método	63
3.1.2	Princípios do método	64
3.1.3	Funções maturidade	67
3.1.4	Correlação entre Maturidade e Resistência à Compressão	76
3.1.5	Vantagens e limitações	78
3.1.6	Aplicações	79
3.2	ULTRA-SOM	80
3.2.1	Descrição do método	80
3.2.2	Vantagens e limitações	85
3.2.3	Aplicações	86
3.2.4	Fatores que influenciam os resultados do ensaio	87
3.2.5	Normalização	92
3.3	MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS A PAVIMENTOS DE CONCRETO	92
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	95
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	95
4.2	TRAÇOS ESTUDADOS	97
4.3	PROGRAMA DE ENSAIOS REALIZADOS	100
4.3.1	Fatores não controláveis	100
4.3.2	Ensaio realizados	100
5	RESULTADOS E ANÁLISE	109
5.1	Traço I	109
5.1.1	Ensaio em argamassa	109

5.1.2	Ensaio em concreto	112
5.1.3	Curvas de Maturidade	113
5.2	Traço II	115
5.2.1	Ensaio em argamassa	115
5.2.2	Ensaio em concreto	118
5.2.3	Curvas de Maturidade	120
5.3	Traço III	121
5.3.1	Ensaio em argamassa	121
5.3.2	Ensaio em concreto	124
5.3.3	Curvas de Maturidade	126
5.4	Traço IV	127
5.4.1	Ensaio em argamassa	127
5.4.2	Ensaio em concreto	129
5.4.3	Curvas de Maturidade	131
5.5	Traço V	132
5.5.1	Ensaio em argamassa	132
5.5.2	Ensaio em concreto	135
5.5.3	Curvas de Maturidade	137
6	PLACA DE CONCRETO	141
6.1	Modelagem numérica	142
6.2	Execução e testes	153
6.2.1	Base de brita graduada	153
6.2.2	Placa de concreto	155
6.3	Resultados	160
6.3.1	Base	160
6.3.2	Placa	163
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	178
7.1	CONCLUSÕES	178
7.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	181
	Bibliografia	183
	ANEXO A - Caracterização dos materiais	193
	A.1 Agregados	193
	A.1.1 Agregado miúdo	193
	A.1.2 Agregado graúdo	195
	A.2 Cimentos	198
	A.3 Aditivos	202
	ANEXO B – Resultados Individuais no estudo dos Traços	204
	B.1 Traço I	204
	B.2 Traço II	211
	B.3 Traço III	219
	B.4 Traço IV	227
	B.5 Traço V	235
	ANEXO C – Resultados Individuais da Placa de Concreto	244
	C.1 Ensaio da Base	244
	C.2 Ensaio da Placa – Carga no centro	250
	C.2 Ensaio da Placa – Carga a 85 cm do bordo	258

1 INTRODUÇÃO

O uso de pavimentos de concreto tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Isso porque, apesar de o custo inicial ser maior do que do pavimento flexível, seu desempenho é extremamente superior. Isso justifica seu emprego em projetos em locais críticos, como cabeceiras de pontes, viadutos, curvas com raios pequenos, corredores de ônibus, aeroportos, entre outros, onde a análise econômica não se prende somente em considerar seu custo inicial, mas também considera seu custo de manutenção, que a partir do 10º a 12º ano justificam os custos iniciais maiores que os do pavimento flexível. Porém, o tempo necessário até a liberação ao tráfego, de normalmente 28 dias, acaba inviabilizando eventuais manutenções.

Surge então a necessidade de se acelerar o ganho de resistência do concreto, viabilizando a rápida liberação do pavimento ao tráfego.

Neste sentido, se desenvolveu o pavimento de concreto *fast track*, que proporciona a liberação da via ao tráfego em pouco tempo. Vários exemplos de sucesso de aplicação de pavimentos de concreto *fast track* são encontrados na literatura internacional (Hendrikx (1998), FHWA (1994) Whiting et al. (1994)), onde a liberação do pavimento ocorreu em poucas horas.

Em campo, normalmente o critério para a liberação do pavimento ao tráfego é a idade do concreto. Acredita-se que, ao atingir uma determinada idade, o concreto tenha adquirido resistência suficiente para suportar as cargas provenientes de sua utilização, com deformação e fissuração aceitáveis.

Entretanto, em pavimentos de concreto *fast track*, há a necessidade de um contínuo monitoramento do desenvolvimento da resistência do concreto para que se tenha confiabilidade no comportamento estrutural do pavimento no momento de sua liberação ao tráfego. Portanto, o critério passa a ser mais rigoroso, devendo ser relacionado diretamente com a resistência do material, porém flexível o suficiente para levar em consideração eventuais fatores que acarretem uma modificação na taxa de evolução da resistência com o tempo, como a temperatura.

Corpos-de-prova cilíndricos de concreto, para ensaios de resistência à compressão simples são amplamente utilizados para este fim. Também corpos-de-prova prismáticos para ensaios de tração na flexão são eventualmente adotados. Porém, obter-se dados a partir destes ensaios *in loco* torna-se demasiadamente caro e demorado, já que é necessário deslocar equipamentos específicos ao local (Arnesen, 2003). Além disso, estes corpos-de-prova não representariam realmente a resistência da estrutura real. Para isso, são adotados coeficientes de segurança.

Para contornar esta adversidade, os ensaios não-destrutivos, que avaliam indiretamente a resistência do pavimento *in situ*, dentre os quais o Método da Maturidade e a Propagação de ondas ultra-sônicas, se apresentam com um grande potencial para este controle tecnológico em campo.

1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Pavimentos de concreto geralmente exigem tempo para liberação ao tráfego de 28 dias, o que é compatível na implantação das obras. Porém, no caso de reparos de pavimentos em túneis, cabeceiras de pontes, corredores de ônibus, estacionamento de aeronaves, entre outras, este período de interrupção no trânsito é inconcebível. Como alternativa, pode-se acelerar o ganho de resistência do concreto, fazendo com que a resistência de projeto para os 28 dias passe a ser atingida em algumas horas. Este é o objetivo do pavimento de concreto *fast track*.

Contudo, para que esta aceleração no ganho de resistência ocorra, são necessárias algumas modificações nas especificações e nos processos construtivos, como traços, critérios de liberação do pavimento, juntas, cura, entre outros. Além disso, é necessário que se faça um constante monitoramento do ganho de resistência, para minimizar o período de cura sem correr riscos de danos à estrutura.

Para que se tenha este monitoramento, são necessários ensaios que informem a resistência à tração na flexão adquirida pelo material. O método tradicional seria romper corpos-de-prova de concreto. Ocorre que, pela necessidade da realização de várias rupturas

em um curto espaço de tempo, seria exigida a presença de equipamento para ruptura em obra, o que se torna caro e trabalhoso.

Uma alternativa de fácil execução e baixo custo é a utilização de ensaios não destrutivos para avaliar o desenvolvimento da resistência à tração na flexão em pavimentos de concreto *fast track*. Estes ensaios necessitam apenas certo conhecimento prévio do comportamento do material e aparelhagem específica. Assim consegue-se monitorar o ganho de resistência e estabelecer o momento certo da liberação ao tráfego, sem riscos à estrutura.

Este trabalho irá utilizar ensaios não destrutivos para monitoração do desenvolvimento de propriedades mecânicas de concretos de diferentes misturas, para possível uso em pavimentos de concreto *fast track*, pesquisando uma mistura apropriada para o uso brasileiro.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é estudar um traço adequado para a aplicação de pavimentos de concreto *fast track* no país, a partir de misturas já utilizadas para este fim, monitorando-os através do método da maturidade e do ultra-som. A partir deste traço, estudar o comportamento experimental de uma placa de pavimento quando submetida à carga em pequenas idades. Desta forma almeja-se contribuir na ampliação desta tecnologia no Brasil.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Avaliar diferentes traços de concreto para utilização em pavimentos de concreto *fast track*;
- Propor a adoção de um traço específico para pavimentos de concreto *fast track* com materiais encontrados na Grande Florianópolis;
- Estimar valores de Energia Aparente de Ativação para estas misturas, através de procedimentos normalizados (ASTM C 1074), assim como procedimentos alternativos, como ultra-som e início e fim de pega;

- Estudar a aplicação do método da maturidade para estimar a resistência à tração na flexão;
- Estudar a aplicação do ultra-som pelo método indireto para estimar a resistência à tração na flexão do concreto;
- Verificar o comportamento de uma placa de pavimento quando submetida à cargas em suas idades iniciais.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está dividido em sete capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo traz a justificativa da pesquisa, mostrando a necessidade da realização de estudos que ampliem o conhecimento dos pavimentos de concreto *fast track* no Brasil, além de estabelecer os objetivos e a estruturação deste trabalho.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica sobre pavimentos de concreto, apresentando um breve histórico e abordando método de dimensionamento, ações atuantes e o uso de pavimentos de concreto *fast track*.

O terceiro capítulo trata de ensaios não destrutivos, focando-se no método da maturidade e na velocidade de propagação de onda ultra-sônica, e suas aplicações em pavimentos de concreto.

No quarto capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido nesta pesquisa, demonstrando ensaios, materiais e misturas utilizados.

O quinto capítulo traz os resultados obtidos para cada tipo de ensaio e cada traço estudados, bem como a análise destes resultados.

No sexto capítulo são descritos todos os procedimentos utilizados na execução de uma placa de pavimento de concreto em tamanho real, desde a análise numérica, execução, ensaios, resultados e análise.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 PAVIMENTOS DE CONCRETO

Segundo o DER – Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (2005), pavimento rígido é um tipo de “pavimento pouco deformável, constituído pelas camadas de subleito, reforço do subleito, sub-base e placas de concreto”. Já para o Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT (2004), o pavimento rígido é formado, predominantemente, por camadas que trabalham sensivelmente à tração, sendo formado por placa de concreto (que desempenha ao mesmo tempo o papel de revestimento e de base) e sub-base (camada empregada com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte do subleito e/ou evitar o fenômeno de bombeamento “pumping” dos solos subjacentes à placa de concreto).

Em 2005, em pesquisa realizada pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2005), dos 1,7 milhões de quilômetros de extensão da rede rodoviária nacional, apenas 165 mil km estavam pavimentados, sendo que 72% encontravam-se em estado ruim, péssimo ou regular, percentual que passou a 75% em 2006. Nesta última pesquisa, 79,7% das rodovias administradas por concessionárias foram consideradas ótimas ou boas, enquanto nas administradas pelo governo federal, estradas neste estado são apenas 16,9% (CNT, 2006).

No Brasil, apenas 2% das rodovias receberam pavimento de concreto, enquanto que nos Estados Unidos 20% das rodovias utilizam concreto, e a previsão é de que este percentual dobre até 2015, de acordo com Giusti (2005), ainda afirmando que, na América Latina, o Chile é o país que mais utiliza este tipo de material para pavimentação e, na Alemanha, o concreto é utilizado em praticamente todas as auto-estradas.

Segundo Pimentel (2005), a pavimentação com asfalto é 18% mais barata em relação à executada com concreto. Porém, o custo de manutenção do pavimento flexível é de seis a sete vezes superior ao do concreto, para um período de 20 anos. Além disso, a vida útil do pavimento rígido é pelo menos quatro vezes mais longa que a do flexível, alcançando 40 a 50 anos.

Atualmente o governo brasileiro desembolsa cerca de R\$ 130.000/km/ano para a recuperação de pistas asfaltadas, segundo Pimentel (2005), e, de acordo com o Banco Mundial apud Giusti (2005), cada dólar investido em uma estrada de concreto corresponde a economia de três dólares em custo operacional.

Pitta (1996) afirma que, embora a indústria brasileira do cimento produza mais de 40 milhões de toneladas ao ano, possui ainda uma boa margem ociosa, a qual, segundo Pimentel (2005), chega a 18 milhões de toneladas por ano, o que torna ainda mais interessante o uso deste insumo na produção de estradas.

Os pavimentos de concreto trazem diversos benefícios para o usuário, podendo-se citar (ABCP, 2005; PITTA, 1996):

- Economia de até 20% de combustível em caminhões quando trafegam em rodovias de pavimento rígido, em relação às de pavimento flexível, já que o veículo anda com mais facilidade;
- Redução da distância de frenagem em 40%, já que há maior atrito da superfície com o pneu;
- Diminuição do aquecimento do pavimento, requerendo até 60% menos iluminação, melhorando a visibilidade do condutor, já que há maior reflexão dos raios solares pelo pavimento, por este ser de cor clara;
- A rugosidade dada ao pavimento faz com que aumente a segurança de rolamento quando a superfície está úmida, mantendo assim o conforto;
- Menor tempo de paralisações, desvios de rota e outras inconveniências ao usuário, já que os defeitos que ocorrem são de pequena monta e sempre bem localizados e delimitados;
- Alta durabilidade, pois possui elevada resistência mecânica e ao desgaste, e baixa permeabilidade;
- A velocidade de escoamento da água é muito superior, melhorando assim resistência à derrapagem por hidroplanagem, quando comparada à superfície do asfalto.

Tecnicamente, no pavimento rígido o concreto absorve grande parte dos esforços que são exercidos sobre o pavimento, enquanto no pavimento flexível uma parte destes esforços são transmitidos às camadas inferiores, conforme mostra a Figura 2.1 (OBRAS VIALES, 2005).

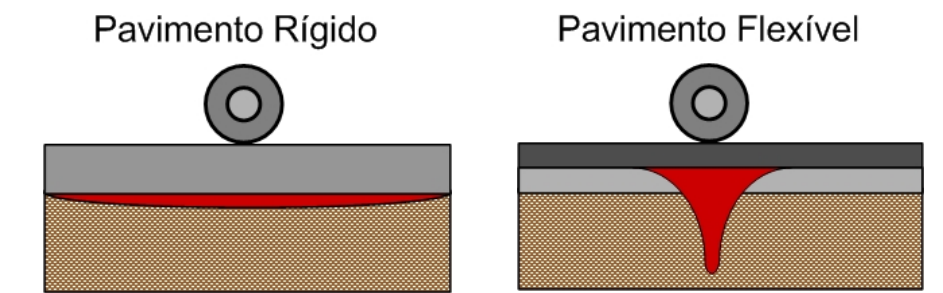


Figura 2.1 Transmissão de esforços às camadas de base para pavimentos rígidos e flexíveis, onde em vermelho aparece a distribuição de tensões (Fonte: OBRAS VIALES, 2005).

2.1 *Histórico do pavimento de concreto*

Segundo a Comunidade da Construção (2005), nos Estados Unidos foi construído o primeiro pavimento de concreto, na cidade de Bellefontaine, Estado de Ohio, em 1893, quando foi pavimentada a Court Avenue, Figura 2.2. Foi projetada e executada por um farmacêutico, George Bartholomew, que propôs ao município a execução do pavimento por sua conta, com pagamento dentro de cinco anos, se comprovada sua eficiência nesse período. A qualidade foi comprovada, e passou-se então a estudar e aplicar esta técnica mundialmente.



Figura 2.2 Court Avenue, Bellefontaine, Ohio, EUA (Fonte: COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2005).

A partir daí foram executados pavimentos de concreto pelo mundo, como, em 1909, Wayne County - "First mile", em 1910 a Grand Forks, ND, em 1920 a Marcopa Country (AZ- 255 Km), chegando ao Brasil em 1925, nas ruas da cidade de Pelotas (RS), em 1926 a Estrada do Caminho do mar em São Paulo, em 1929 a Estrada de Itaipava, no Rio de Janeiro, passando a técnica do pavimento de concreto a ser difundida mundialmente (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2005).

2.1.1 Pavimentos de concreto no Brasil

No Brasil existem pavimentos de concreto com mais de 50 anos de idade, em funcionamento e em boas condições. Os mais significativos, historicamente, são, segundo a Comunidade da Construção (2005): aeroportos no Nordeste, construídos nos anos 40, aeroportos Santos Dumont no Rio de Janeiro e Congonhas em São Paulo, rodovia Edson Passos no Rio de Janeiro e rodovias Anchieta e Anhangüera em São Paulo.

Nos anos 50 foram pavimentadas vias urbanas no Rio de Janeiro, estradas em Pernambuco e na Paraíba. Nos anos 60, estradas Rio-Petrópolis, Rio-Teresópolis, Itaipava-Teresópolis, todas no Rio de Janeiro, além de vias urbanas em Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Já nos anos 70 houve a interligação Anchieta-Imigrantes, rodovia dos Imigrantes, ambas em São Paulo, rodovia Sapucaia-Gravataí no Rio Grande do Sul e o aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro.

2.2 Pavimento de Concreto Simples

O pavimento de concreto pode ser constituído de diversas maneiras, de acordo com as necessidades locais, como pavimento de concreto simples, armado, protendido, com adição de fibras, concreto rolado, entre outros.

O pavimento de concreto simples, objeto deste trabalho, pode contar ou não com barras de transferência, que apenas atuam na transmissão de esforços entre as placas (Figura 2.3). Estas placas são apoiadas diretamente sobre a fundação, sendo todos os esforços, tanto de compressão quanto de tração, resistidos por elas (OLIVEIRA, 2000).

Com a finalidade de evitar danos por efeito de retração no concreto, empenamento e dilatação térmica, são executadas, nestas placas, juntas de dilatação, as quais podem ser moldadas ou serradas.

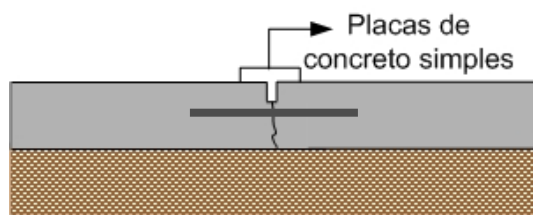


Figura 2.3 Perfil de um pavimento de concreto simples com barra de transferência.

Segundo Oliveira (2000), os pavimentos de concreto simples, com barras de transferência, têm dimensões entre 16 a 45 cm de espessura e até 7 metros em comprimento, sendo 5 metros o mais usual. As barras de transferência permitem uma significativa diminuição da espessura das placas, já que, havendo transferência de esforços entre estas, diminui-se a possibilidade de bombeamento de material de fundação perto das

juntas, dependendo do tipo de material utilizado na base, minimizando os esforços nas placas.

A execução deste tipo de pavimento é normalizada pela NBR 7583 (1984), a qual estabelece critérios para a execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico, descrevendo materiais, equipamentos e procedimentos para esta técnica.

2.3 Dimensionamento

São de amplo conhecimento e uso, três métodos para o dimensionamento de pavimentos de concreto: o Guia da AASHTO (1993), o Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (PCASE 2003) e o Método da Portland Cement Association (PCA/84), sendo este último o mais divulgado e utilizado no Brasil, e, portanto, abordado neste trabalho.

Além disso, segundo Balbo (2003) existem diversos programas de elementos finitos para a análise numérica de estruturas de pavimentos, disponíveis comercialmente, como, por exemplo, ILLI 2000 (2D), ABACQUS (3D), EVERFE (3D), entre outros.

2.3.1 O Método da PCA/84

Este método pode ser aplicado no dimensionamento de pavimentos de concreto simples, com ou sem barras de transferência, e ainda em pavimentos de concreto com armadura distribuída, contínua ou descontínua.

O método de 1984 apresenta melhorias em relação ao método anterior, de 1966, que utilizava a teoria de Westergaard para a determinação das tensões críticas, considerando a superposição de efeitos proposta por Pickett e Ray em 1951, sob forma de ábacos, enquanto o novo método utiliza elementos finitos na determinação das tensões (PEREIRA, 2003). Este passa, então, a levar em conta fatores como (OLIVEIRA, 2000, VIEIRA et al., 2004, BALBO, 2003, DNIT, 2004, HALL, 2006):

- diferentes graus de transferência de carga nas juntas transversais, considerando a presença ou não de barras de transferência de carga;
- efeitos da existência ou não de acostamento de concreto, que contribuem na redução de tensões e deslocamentos verticais ao longo da borda livre da placa e impedem a penetração lateral de água;
- contribuição estrutural das sub-bases de solo melhorado, concreto rolado ou de concreto pobre;
- ação de eixos tandem triplos;
- considera um modelo de ruína por erosão da fundação, por formação de degraus ou escalonamento nas juntas transversais, além do modelo de fadiga já considerado no método anterior .

O Método da PCA/84 apresenta ábacos para casos onde há base de concreto compactado com rolo, sendo um apresentado para o caso de bases não aderidas e outro para bases aderidas, já que este tipo de base colabora para a redução de tensões nas placas de concreto.

A seguir serão descritos os três modelos de ruína considerados neste método.

2.3.1.1 Critério da Fadiga

Para este modelo adota-se a Hipótese de Miner, do princípio dos danos acumulados, onde a parcela da resistência à fadiga não consumida por um certo grupo de cargas (especificadas no Item 2.4.1.1) é disponibilizada para o consumo de outras cargas, e a soma final dos consumos individuais de resistência à fadiga é igual ao dano total, expresso pela Equação 2.1 (OLIVEIRA, 2000, VIEIRA et al., 2004).

$$D_r = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_j} \quad (2.1)$$

onde:

D_r : relação de danos acumulados para o período de projeto devido à ação de todos os grupos de carga;

j : número do grupo de carga;

m : número total de grupos de carga;

n_i : número de repetições previstas da carga j ;

N_j : número de repetições admissíveis da carga j .

O consumo máximo admissível por fadiga é de 100%, porém, segundo Oliveira (2000), o método de 1966 indicava este valor como 125%, levando em consideração que períodos de folga entre as aplicações de carregamento proporcionariam um aumento da resistência à fadiga.

De acordo com DNIT (2004), os eixos simples são os que provocam maiores danos por fadiga no pavimento.

Segundo Vieira et al. (2004) e Pereira (2003), a curva de fadiga adotada é baseada nas equações a seguir .

- Para $R_r < 0,45$: N é ilimitado
- Para $0,45 \leq R_r \leq 0,55$:

$$N = \left(\frac{4,2577}{R_r - 0,4325} \right)^{3,268} \quad (2.2)$$

- Para $R_T > 0,55$:

$$\log N = \frac{0,9718 - R_T}{0,0828} \quad (2.3)$$

Onde:

N: número admissível de repetições da carga;

R_T : relação de tensões, que expressa o valor da relação entre a tensão de tração na placa e a resistência característica à tração na flexão do concreto;

O método considera, para o cálculo da tensão máxima, que o eixo solicitante está localizado tangente à borda longitudinal da placa. Porém, sabe-se que apenas uma pequena parte dos veículos transitam por esta posição, e para tanto estimou-se o percentual destes veículos, chegando-se ao valor de 6%, já implícito no método (OLIVEIRA, 2000, PEREIRA, 2003, DNIT, 2004).

Além disso, o método adota como constantes o módulo de elasticidade do concreto, o coeficiente de Poisson, o comprimento da placa, a carga no eixo, a área de contato do pneu e o espaçamento entre as rodas. A fim de considerar a influência de outros parâmetros, o método corrige os valores de tensões máximas teóricas através de fatores de ajustamento, ou fatores de correção, que admitem o efeito do suporte da fundação além da borda da placa, os efeitos da localização da carga ao longo da seção transversal da placa, o ganho de resistência do concreto após os 28 dias e o efeito da variabilidade das propriedades do concreto, obtendo assim tensões equivalentes. Estas tensões equivalentes podem ser obtidas em tabelas fornecidas pelo método e variam em função do tipo de eixo, da espessura da placa, do módulo de reação do subleito e da existência ou não de

acostamento de concreto. A presença de barras de transferência não influi no fator de fadiga, segundo o método (VIEIRA et al., 2004).

A partir dos valores de tensão equivalente, obtidos nas tabelas do método, passa-se à determinação do número admissível de repetições de carga em função da fadiga, através de um ábaco, onde parte-se do valor de carga majorada e do valor da relação de tensões, conforme a Figura 2.4.

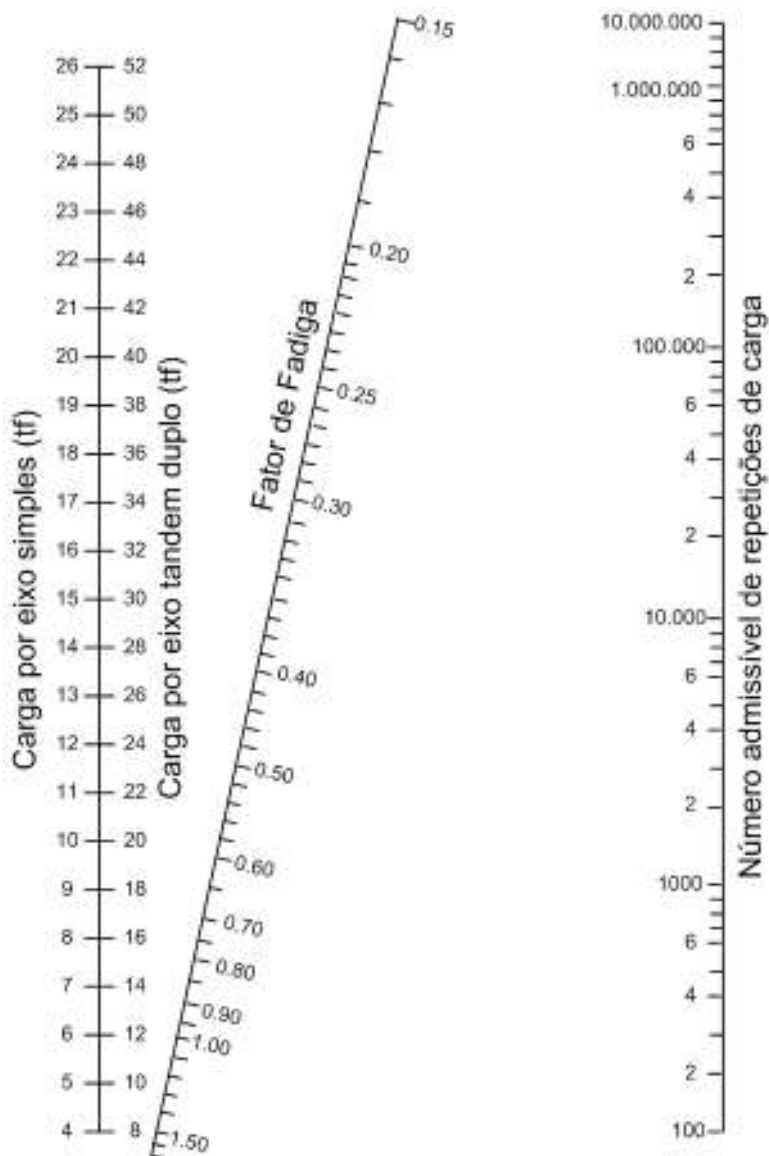


Figura 2.4 Determinação gráfica do Número Admissível de Repetições de carga pelo critério de Fadiga (Fonte: DNIT, 2004).

2.3.1.2 Critério da Erosão e Escalonamento

Erosão é a perda de material da camada imediatamente sob a placa de concreto, e ocorre devido à ação combinada da água e da passagem de cargas elevadas. Em uma pista experimental da AASHTO foi observado que a ruptura das placas ocorria, predominantemente, por efeito de bombeamento ou perda de solo da fundação, levando à formação de vazios sob as placas, o que ocasionava deflexões nos cantos e nas bordas (OLIVEIRA, 2000, VIEIRA et al., 2004).

Segundo Oliveira (2000), a análise da erosão também considera o dano acumulado, dado pela Equação 2.4.

$$D_{total} = \sum_i c_2 \cdot \frac{N_{sol,i}}{N_{adm,i}} \quad (2.4)$$

Onde:

D_{total} : dano por erosão;

i : relação de tensões, que é a relação entre a tensão na placa e o módulo de resistência, ou ruptura ($f_{ctM,k}$), do concreto;

$N_{sol,i}$: número de repetições previstas para a relação de tensões i , devido à força na borda, quando não houver acostamento de concreto, ou devido à força no interior da placa, quando houver;

$N_{adm,i}$: número admissível de repetições para a relação de tensões i , devido à força na borda, quando não houver acostamento de concreto, ou devido à força no interior da placa, quando houver;

C_2 : coeficiente de distribuição de tráfego (0,06 para pavimentos sem acostamento de concreto e 0,94 para pavimentos com acostamento de concreto).

A partir de resultados obtidos em pistas experimentais para índice de serventia igual a três, é dada a Equação 2.5, que fornece o valor do Fator de Erosão (P), que, por sua vez, mede o poder ou influência que uma certa força possui para produzir deformação vertical na placa (OLIVEIRA, 2000, DNIT, 2004).

$$P = \frac{268,7 \cdot p^2}{h \cdot k^{0,73}} \quad (2.5)$$

Onde:

P: fator de erosão

p: pressão vertical exercida na fundação sob o canto da placa, em psi;

h: espessura da placa em polegadas;

k: coeficiente de recalque, em libras por polegada cúbica.

No critério de erosão foram incluídos os danos causados pelo escalonamento nas juntas transversais, relacionando-se o índice de serventia do pavimento com a severidade do escalonamento, a espessura do pavimento, o número de veículos pesados e outras variáveis, como pavimentos sem barras de transferência e sub-bases estabilizadas, sendo que estes parâmetros não haviam sido considerados nas pistas experimentais da AASHTO (VIEIRA et al., 2004).

Então, a expressão que representa o modelo de escalonamento associado ao de erosão é dada pela Equação 2.6 (OLIVEIRA, 2000).

$$\log N = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9)^{0,013} \quad (2.6)$$

Onde:

N: número admissível de repetições de carga para o período de projeto, para um índice de serventia final de 3,0 (qualidade de rolamento boa);

P: fator de erosão;

C_1 : constante de ajustamento relacionada ao tipo de sub-base (1,0 se granular e 0,9 se tratada com cimento).

De acordo com Oliveira (2000), a presença de dispositivos que promovam a transferência de cargas entre as placas, e entre a placa e o acostamento, minimizam os efeitos de erosão e escalonamento, visto que proporcionam uma diminuição nas tensões tangentes à junta longitudinal e transversal, permitindo assim a redução da espessura da placa.

O dano por erosão é causado prioritariamente pelos eixos tandem simples. Porém fatores climáticos, não levados em consideração no método, devem ser modificados de forma a majorar este dano (OLIVEIRA, 2000).

A partir dos dados de espessura da placa, tipo de eixo, coeficiente de recalque da fundação, uso de barras de transferência e de acostamento de concreto, parte-se para as tabelas fornecidas pelo método para a obtenção do fator de erosão. De posse deste valor, utilizam-se os ábacos fornecidos para a determinação do número de repetições de carga admissível para o critério de erosão, conforme exemplificado na Figura 2.5.

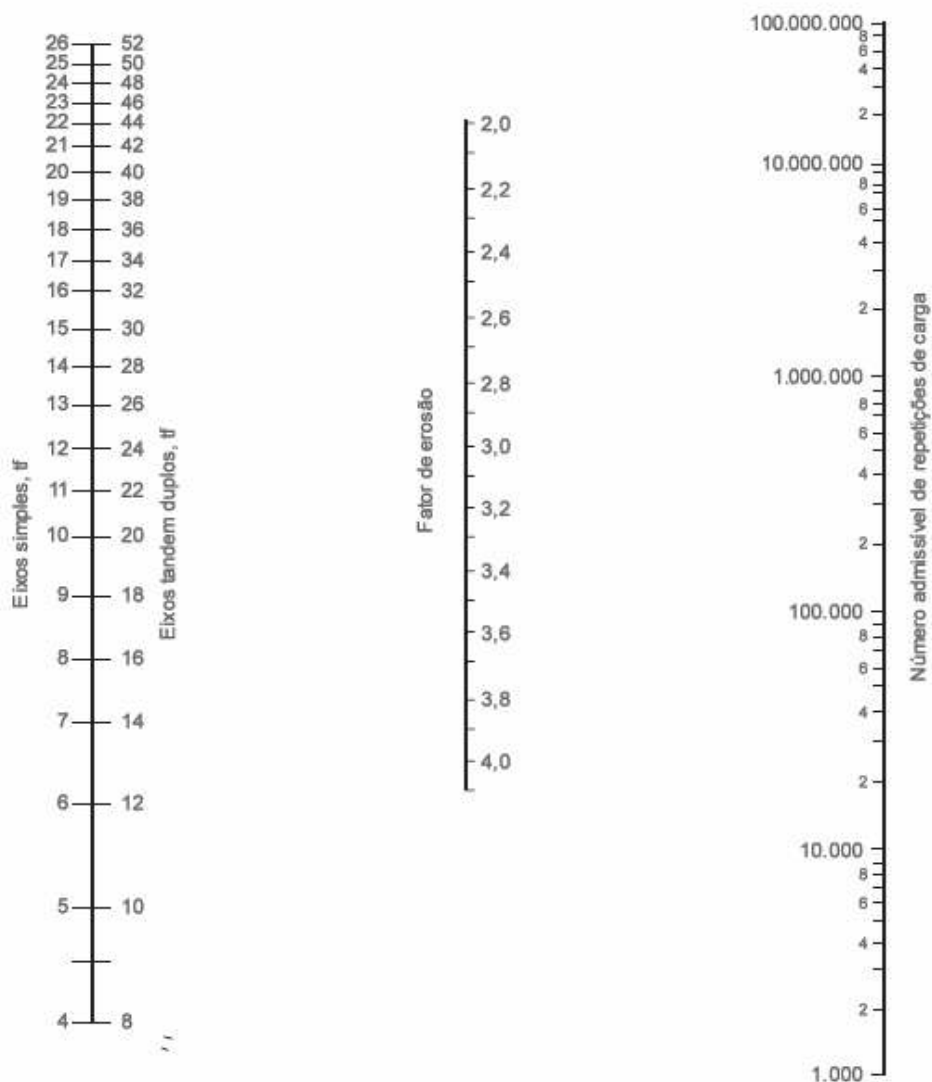


Figura 2.5 Determinação gráfica do Número Admissível de Repetições de carga pelo critério de Erosão (Fonte: DNIT, 2004).

Porém, segundo Balbo (2003), a erosão depende de fatores climáticos, além do que, estes fatores de erosão são significativos apenas para valores de k (módulo de reação do subleito) inferiores a cerca de 60MPa/m, o que não é o caso de bases cimentadas, onde não ocorre este tipo de dano, como em bases de concreto compactado com rolo, questões que são ignoradas no método.

2.3.1.3 Procedimento de Cálculo pelo método da PCA/84

Para proceder aos cálculos neste método preenche-se um formulário padrão (Tabela 2.1) com os parâmetros de dimensionamento, que são:

- Tipo de acostamento (uso ou não de concreto);
- Adoção ou não de barras de transferência;
- Resistência característica à tração na flexão do concreto;
- Coeficiente de recalque do subleito ou do sistema subleito-sub-base (k);
- Fator de segurança das cargas (igual a 1,1 para vias com moderada frequência de caminhões pesados, 1,2 para vias com grande frequência de caminhões e 1,3 para pavimentos que necessitem desempenho excepcional);
- Distribuição de frequência das cargas por eixo simples, tandem duplo e tandem triplo durante o período de projeto, obtidas em postos de pesagem;
- Adoção de uma espessura inicial para a placa;

Tabela 2.1 Formulário Padrão para Preenchimento dos parâmetros de dimensionamento

Cálculo da Espessura do Pavimento de Concreto						
Projeto:						
Espessura-tentativa: cm				Juntas com BT (sim/não):		
K _{sb} : MPa/m		Acostamento de concreto (sim/não):				
Resistência Característica à tração na flexão:				MPa		
Período de Projeto: anos			Fator de segurança de cargas F _{sc} :			
Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x F _{sc} (tf)	Número de repetições previstas	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			Número de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Número de repetições admissíveis	Consumo por erosão (%)
EIXOS SIMPLES			Tensão Equivalente:		Fator de erosão:	
			Fator de Fadiga:			
EIXOS TANDEM DUPLOS			Tensão Equivalente:		Fator de erosão:	
			Fator de Fadiga:			
EIXOS TANDEM TRIPLOS			Tensão Equivalente:		Fator de erosão:	
			Fator de Fadiga:			
			TOTAL		TOTAL	

Com os dados de frequência das cargas, preenche-se as colunas: Cargas por eixo, Cargas por eixo x F_{sc} e Número de repetições previstas. A partir daí, com os valores de *k* e da espessura do pavimento, determinam-se as tensões equivalentes para cada tipo de eixo, utilizando as tabelas fornecidas pelo método. O fator de fadiga é obtido, para cada tipo de eixo, dividindo a tensão equivalente pela resistência característica à tração do concreto. Já para a determinação do fator de erosão, para cada tipo de eixo, utilizam-se as tabelas fornecidas pelo método a partir dos valores de *k* e da espessura do pavimento.

A partir daí, determina-se o número admissível de repetições de cada nível de carga atuante, de cada tipo de eixo, através dos ábacos, tanto para fadiga quanto para erosão. Para a determinação do consumo de fadiga de cada carga, divide-se o número admissível pelo número esperado de repetições previstas para ela.

Na obtenção dos danos totais relativos à fadiga e à erosão, faz-se o somatório dos valores individuais de carga, sendo que este valor deve ser inferior a 100%. Caso exceda este valor, aumenta-se a espessura da placa e se refaz os cálculos.

Note-se que não existem ábacos para eixos tandem triplos, portanto os valores de força por eixo para este caso devem ser adotados como a força total dividida por três e multiplicada pelo fator de segurança, utilizando então para estes valores os ábacos referentes aos eixos simples.

Todas as tabelas, bem como os ábacos necessários para a obtenção dos parâmetros de cálculo, são encontradas na literatura internacional, como em DNIT (2004).

2.4 TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Como qualquer estrutura, os pavimentos de concreto sofrem ações que provocam neles esforços e deslocamentos. Estas ações podem ser diretas (devidas ao tráfego de veículos) ou indiretas (dilatação térmica, retração, empenamento). Para a determinação das tensões e deformações provocadas nas placas por estas ações foram desenvolvidas diversas teorias, sendo que será apresentada neste trabalho somente a de Westergaard, bem como as ações atuantes que causam estes esforços.

2.4.1 Ações

2.4.1.1 Ações diretas

Podem ocorrer ações diretas móveis ou estáticas, sendo o primeiro caso predominante em rodovias e vias urbanas. A análise deste tipo de carregamento em relação ao módulo e também ao número de repetições é extremamente importante, já que este parâmetro pode acarretar danos por fadiga, podendo ser responsável pela ruptura da estrutura.

As cargas móveis normalmente possuem curta duração, sendo caracterizadas como transientes. Seus valores variam com a velocidade em proporção inversa (COSTA, 2004).

Portanto, quanto maior a velocidade do veículo, menores as cargas e, conseqüentemente, menores as tensões geradas no pavimento (OLIVEIRA, 2000).

- *Área de contato do pneu*

Na análise das ações móveis que atuam no pavimento, considera-se como crítica a carga devido ao trânsito de caminhões de carga somente, já que, comparados a estes, as ações provocadas por veículos de passeio e motocicletas são desprezíveis. Para isso, analisa-se o modo de aplicação da carga, que depende da pressão de enchimento dos pneus, além da idade destes. Segundo Oliveira (2000), para pneus novos e com enchimento e carga máxima dentro das normas, a área de contato entre pneu e placa tem a forma aproximadamente elíptica. Já para pneus usados e com carga acima do permitido, esta área de contato aproxima-se da forma retangular.

Porém, segundo estudo realizado por Oliveira (2000), a adoção de diferentes formas de aplicação de carga implica em pouca diferença nos esforços provocados. Costa (2004) afirma então que pode-se adotar a forma circular, de maneira a facilitar a análise.

Veículos com a mesma carga, porém com configurações diferentes de rodagem, provocam diferentes esforços nas placas, devido à distribuição de carregamentos. Existem veículos de carga com as seguintes distribuição de eixos, ilustradas na Figura 2.6:

- Eixo simples de rodagem simples (seis toneladas);
- Eixo simples de rodagem dupla (10 toneladas);
- Eixo tandem duplo (17 toneladas por eixo);
- Eixo tandem triplo (25,5 toneladas por eixo);

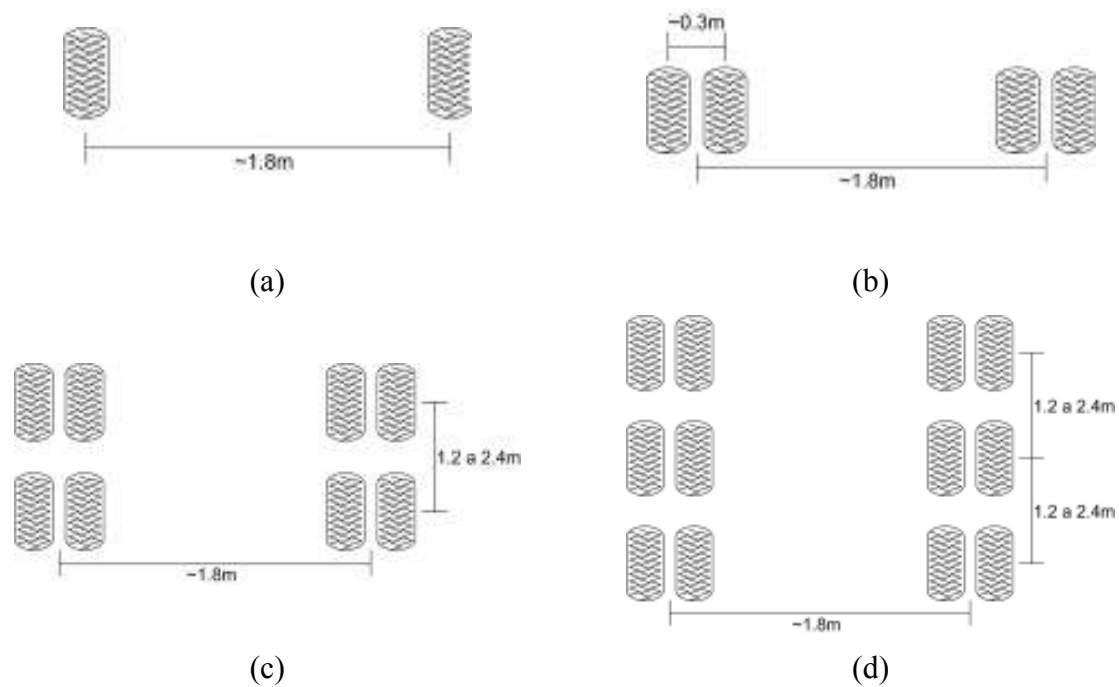


Figura 2.6 Tipos de eixos: (a) eixo simples de rodagem simples; (b) eixo simples de rodagem dupla; (c) eixo tandem duplo; (d) eixo tandem triplo.

Pelo método da PCA, a posição crítica da carga em pavimentos simples com juntas transversais se dá segundo as Figuras 2.7 e 2.8.

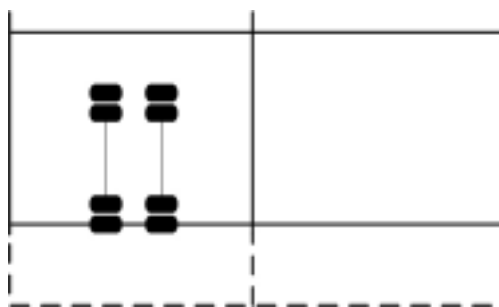


Figura 2.7 Posição da carga crítica para as tensões de tração na flexão (DNIT, 2004).

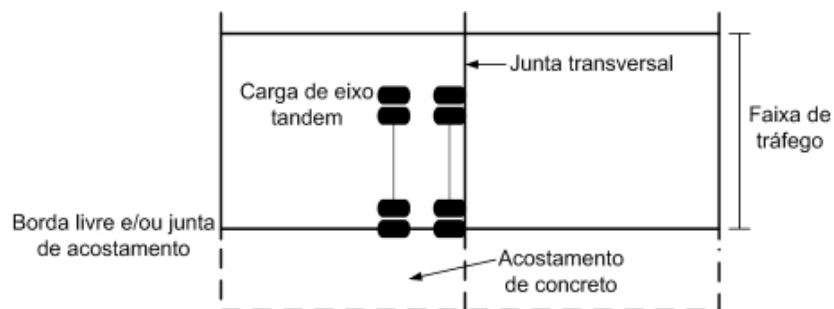


Figura 2.8 Posição da carga crítica para as deformações (DNIT, 2004).

2.4.1.2 Ações indiretas

A placa de concreto sofre ações devidas à retração, efeito térmico e empenamento, as quais provocam na estrutura o surgimento de tensões e deformações. Estas ações não são consideradas nos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos, porém, a fim de evitar a fissuração por retração, executam-se juntas transversais e, muitas vezes, adotam-se pavimentos armados.

- **Retração**

O concreto, desde sua moldagem, sofre efeitos de variações dimensionais devidas a diversos fatores atuantes. Podem ocorrer três tipos de retração no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994, NEVILLE, 1997):

- Retração plástica no concreto fresco, devido à perda de água por exsudação, por evaporação, por absorção de água pelas fôrmas ou pelos agregados;
- Retração autógena, por redução de volume dos produtos da hidratação do cimento, quando a água livre já foi toda consumida;
- Retração por secagem, que ocorre no concreto já endurecido, quando este está exposto a um ambiente com umidade inferior à sua.

Devido à grande área de exposição ao ar, em placas de concreto ocorre prioritariamente a retração por secagem, que depende, além das características do material,

das dimensões da peça e das condições climáticas, já que a retração aumenta com a diminuição da umidade relativa do ar, com o aumento da temperatura e com o aumento da velocidade dos ventos.

O processo de retração por secagem provoca nas placas fissuração excessiva, se não houver um processo efetivo de cura, visto que, gera tensões na placa que chegam a ser maiores do que o limite da resistência do material em pequenas idades. Além do processo de cura, a execução de juntas, diminuindo assim as dimensões da peça, diminui a fissuração por retração.

A formação de fissuras ocorre porque, devido à retração, há uma tendência de encurtamento da placa das bordas para o centro. Porém, como a face inferior da placa está apoiada sobre a camada de base, surge uma força contrária (conforme apresentado na Figura 2.9), gerando esforços de tração na placa. Caso não houvesse esse atrito, não haveria efetivamente a ocorrência de fissuras, apenas a redução de volume da peça.



Figura 2.9 Reação à tendência de retração da placa de concreto

- ***Dilatação térmica***

Com a variação da temperatura ocorre também variação no volume do material, sendo estas diretamente proporcionais. Se as tensões resultantes da dilatação e do atrito sofrido forem maiores do que as resistentes do concreto, ocorre fissuração. Com a diminuição da temperatura ocorre a contração do material, surgindo esforços de compressão e, caso contrário, esforços de tração.

De acordo com Medina e Motta (2005), uma variação lenta de 10°C na temperatura, ocorrendo uniformemente na placa, pode causar tensões da ordem de $2,5\text{MPa}$ no centro e $2,1\text{MPa}$ na borda, para um concreto com $E=21000\text{MPa}$, $\mu = 0,15$ e $\alpha_t = 1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

- ***Empenamento***

Com as variações de temperatura ocorrentes durante o dia e a noite, as placas de concreto sofrem efeitos diferenciais de dilatação e compressão térmica. Durante o dia, com a ação do calor, a placa é aquecida primeiramente em sua face superior, sendo que a inferior permanece com uma temperatura menor. Este diferencial de temperatura induz a movimentação da placa, conforme a Figura 2.10. entretanto, o peso próprio atua no sentido inverso, impedindo esta movimentação, e assim surgem esforços de tração na face inferior e compressão na superior. Já no período noturno, ocorre o fenômeno contrário (Figura 2.11), criando um gradiente de temperaturas, provocando assim o efeito de empenamento da placa (OLIVEIRA, 2000).

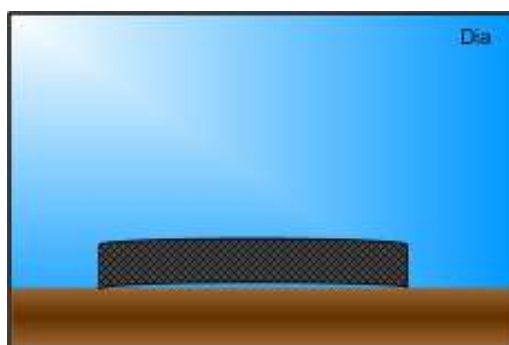


Figura 2.10 Tendência de empenamento da placa de concreto durante o dia.

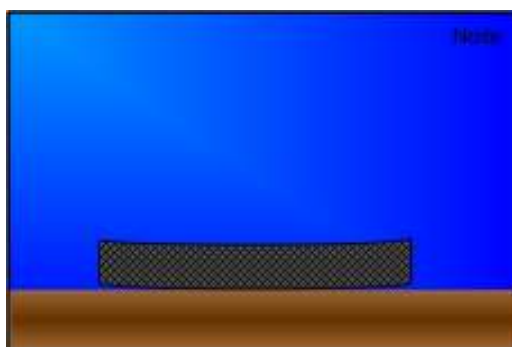


Figura 2.11 Tendência de empenamento da placa de concreto durante a noite.

Ainda segundo Medina e Motta (2005), uma diferença de temperatura de 10°C entre as faces da placa, provoca uma tensão de tração por encurvamento da ordem de 1,05MPa, em um concreto com as mesmas características descritas anteriormente.

2.4.2 Teoria de Westergaard

Diversas teorias já foram desenvolvidas com o intuito de determinar as tensões e deformações existentes em placas de concreto apoiadas sobre o solo, sendo que os métodos de dimensionamento de pavimentos utilizam a teoria de Westergaard para a determinação de tensões, deslocamentos e momentos fletores. A teoria é baseada em placas elásticas delgadas apoiadas sobre líquido denso, onde este líquido denso é composto por diversas molas de constante de proporcionalidade k (Coeficiente de Recalque ou Módulo de Reação da Fundação), independentes, e a tensão em cada ponto depende exclusivamente da deformação pontual e não das tensões nas regiões vizinhas, conforme ilustrado na Figura 2.12 (Oliveira, 2000). Este comportamento de líquido denso não ocorre realmente em solos, sendo apenas uma simplificação para fins de cálculo. Atualmente, com o avanço da informática, tornou-se possível a adoção de parâmetros que representam melhor a realidade, já que métodos numéricos são mais precisos que os analíticos utilizados na época.

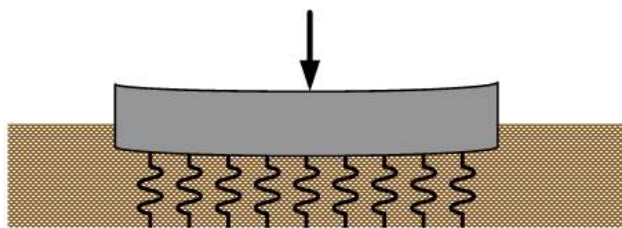


Figura 2.12 Comportamento de líquido denso.

Em sua teoria, Westergaard utilizou o método das aproximações sucessivas de Ritz, baseado no princípio de energia mínima, e considerou como hipóteses para sua análise que a placa constituía-se de material homogêneo, elástico e isotrópico e que as reações do subleito são verticais e proporcionais aos deslocamentos verticais da placa, a qual possui espessura constante. Admitiu também que as forças distribuídas no interior e no canto da placa são uniformes e sobre áreas circulares, bem como a força na borda da placa é

uniformemente distribuída sobre área semicircular (OLIVEIRA, 2000). Os casos estudados estão ilustrados na Figura 2.13.

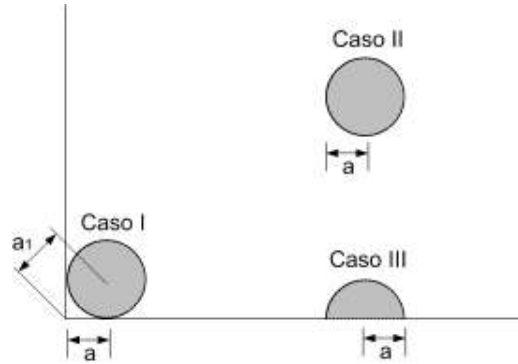


Figura 2.13 Posições e configurações analisadas por Westergaard em 1926.

- **Caso I: Carregamento no canto da placa**

Segundo Medina e Motta (2005), ao aplicar-se um carregamento de roda no canto da placa, surgem tensões de tração no topo desta. A deflexão nas proximidades do canto da placa pode ser expressa pela Equação 2.7:

$$z_c = \frac{P}{k\lambda^2} \left(1,1e^{-\frac{x}{\lambda}} - \frac{a_1}{\lambda} 0,88e^{-\frac{2x}{\lambda}} \right) \quad (2.7)$$

Onde:

z_c : deslocamento máximo para força no canto da placa;

a_1 : distância do canto da placa ao eixo de aplicação da carga (conforme Figura 2.13);

λ : raio de rigidez relativa;

P: força aplicada;

x: distância do ponto considerado ao canto da placa;

k: módulo de reação da fundação.

O raio de rigidez relativa λ é a distância entre o ponto de aplicação da força e o ponto de momento nulo, e pode ser expresso pela Equação 2.8:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (2.8)$$

Onde:

ν : coeficiente de Poisson;

E: módulo de elasticidade do concreto;

h: espessura da placa.

A tensão na face superior da placa provocada pela carga aplicada no canto é expressa pela Equação 2.9:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a_1}{\lambda} \right)^{0,6} \right] \quad (2.9)$$

Onde:

σ_c : tensão no topo da placa.

- ***Caso II: Carregamento no interior da placa***

Westergaard apresenta, para uma carga aplicada no interior da placa, as tensões segundo a Equação 2.10 e os deslocamentos verticais segundo a Equação 2.11.

$$\sigma_i = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{\lambda}{a} + 0,6159 \right) \quad (2.10)$$

Onde:

a: raio da área circular em que a força do pneu é distribuída (Figura 2.13);

σ_i : tensão de tração máxima para força no interior da placa.

$$z_i = \frac{P}{8k\lambda^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2\lambda} \right) - 0,673 \right] \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right\} \quad (2.11)$$

Onde:

z_i : deslocamento máximo para força no interior da placa.

- **Caso III: Carregamento na borda da placa**

Westergaard apresentou, durante a evolução de seus trabalhos, diversas formulações que expressam a tensão devido ao carregamento na extremidade. Em 1948 apresentou soluções generalizadas para tensões e deslocamentos máximos produzidos por cargas circulares e semicirculares aplicadas à borda da placa, diferindo significativamente das formulações apresentadas anteriormente, considerando, para carga circular tangente à borda, a Equação 2.12 para tensão e a Equação 2.13 para deformação.

$$\sigma_{b(circular)} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln \left(\frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1,84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1,18(1+2\nu)a}{\lambda} \right] \quad (2.12)$$

Onde:

$\sigma_{b(circular)}$: tensão de tração máxima para força no bordo da placa e área circular.

$$z_{b(circular)} = \frac{\sqrt{2+1,2\nu P}}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0,76+0,4)a}{\lambda} \right] \quad (2.13)$$

Onde:

$z_{b(circular)}$: deslocamento máximo para força no bordo da placa e área circular.

Para carga semicircular, considera-se seu bordo paralelo à extremidade da placa, obtendo-se as Equações 2.14 para tensão e 2.15 para deformação.

$$\sigma_{b(semi-circular)} = \frac{0,803P}{h^2} \left[4 \log\left(\frac{\lambda}{a}\right) + 0,282\left(\frac{\lambda}{a}\right) + 0,650 \right] \quad (2.14)$$

Onde:

$\sigma_{b(semi-circular)}$: tensão de tração máxima para força no bordo da placa e área semi-circular.

$$z_{b(semi-circular)} = \frac{\sqrt{2+1,2\nu P}}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0,323+0,17\nu)a}{\lambda} \right] \quad (2.15)$$

Onde:

$z_{b(semi-circular)}$: deslocamento máximo para força no bordo da placa e área circular.

Em 1951, Pickett e Ray elaboraram gráficos de influência para o cálculo dos momentos fletores e das deflexões nas placas para diferentes posicionamentos das cargas, baseados na teoria de Westergaard, os quais podem ser encontrados na literatura (MEDINA E MOTTA, 2005, BALBO, 2003)

2.5 PROCESSO CONSTRUTIVO PARA MANUTENÇÃO DE UMA PLACA

A manutenção de uma placa de pavimento rígido visa devolvê-la às condições de trabalho ideais, proporcionando ao usuário conforto e segurança, ou ainda adequando o pavimento a um novo conjunto de solicitações.

De acordo com Gonçalves (1999), existem quatro modalidades de intervenção em pavimentos rígidos, sendo estas:

- Conservação: reparos em zonas específicas da placa, sendo realizados imediatamente ao aparecimento do defeito;
- Recuperação: visa devolver à placa sua plena capacidade funcional e/ou estrutural, a partir de intervenções totais ou parciais, como a recuperação das juntas ou ainda reparos localizados na fundação;
- Restauração: visando recuperar a capacidade funcional e estrutural do pavimento, executa-se um pavimento superposto ao existente, que possua desempenho mínimo satisfatório;
- Reconstrução: em casos onde o nível de deterioração do pavimento é avançado, ou houver defeitos que impossibilitem a recuperação sem perda estrutural da placa, necessita-se remover totalmente o pavimento antigo e reconstruí-lo.

Em pavimentos rígidos, ao contrário dos flexíveis, a maioria dos defeitos ocorre pontualmente, associados a causas específicas, defeitos esses normalmente devido ao uso de materiais ou técnicas construtivas inadequadas. Os defeitos que ocorrem em pavimentos rígidos são alçamento da placa (levantamento nas juntas, fissuras ou outras

descontinuidades), fissuras, escalonamento, defeitos na selagem das juntas ocasionando bombeamento de finos, desnível entre pavimento e acostamento, entre outros (GONÇALVES, 1999).

Para aplicação em pavimentos de concreto *fast track*, objeto deste trabalho, pode-se seguir os procedimentos para reconstrução, recomendados pela ACPA em Voigt [199-?], ou roteiros de reconstruções já executadas, como em Lee, Harvey e Thomas (2003).

2.6 FAST TRACK

O estado de degradação da malha rodoviária nacional é de conhecimento público, e tem-se notado a crescente preocupação, por parte da população e das autoridades, com relação à falta de segurança nas rodovias. Intervenções vêm sendo feitas para atenuar a gravidade da situação, porém ainda há muito por fazer.

Ocorre que, em muitos locais de tráfego intenso e pesado, onde normalmente são utilizados pavimentos rígidos, intervenções provocam transtornos ao usuário e promovem sua insatisfação. Surge então a necessidade de redução no tempo de interrupção das pistas, a qual pode ser obtida com a aceleração do ganho na resistência do pavimento, através da aplicação de pavimentos de concreto *fast track*.

O uso de pavimentos de concreto em sua forma tradicional, que exige tempo até a liberação ao tráfego de 28 dias, é normalmente aceitável na construção de novos pavimentos. Porém em reparos pode tornar-se inviável, principalmente quando há grande uso da via, como em aeroportos e algumas rodovias (BULL e WOODFORD, 1997), ou ainda em áreas urbanas, onde congestionamentos de grande monta podem ocorrer, principalmente em intervenções em cruzamentos de vias (ACPA, 1994), locais onde é impossível que se façam interrupções por longo tempo. O pavimento de concreto *fast track* não necessita de cura adicional após o período determinado para a abertura do tráfego, ou seja, a cura precisa ser de apenas algumas horas a poucos dias, dependendo do caso. Além disso, a recente modernização do parque nacional de equipamentos para pavimentação e o avanço tecnológico de misturas de concreto de alta resistência inicial (BALBO, 2003), tornam viável a utilização destes pavimentos.

Assim, a desvantagem do pavimento de concreto frente ao pavimento flexível, além do custo inicial, é o tempo necessário até a liberação ao tráfego. O uso do pavimento de concreto *fast track* sana esta dificuldade, tornando viável a sua utilização (TRITSCH, 1994).

O pavimento de concreto *fast track* surgiu em 1986 em Buena Vista County, Estados Unidos (FHWA, 1994). Em 1988 a Federal Highway Administration, nos EUA, iniciou uma série de testes em projetos piloto a fim de promover o desenvolvimento desta técnica nos Estados Unidos, através do Demonstration Project SP 201 “Accelerated Rigid Paving Techniques” (FHWA, 1994).

Segundo Hendrikx (1998), na Bélgica mais de 30.000 m² de rodovias já foram reparadas utilizando este método, e, de acordo com Cotera S. (1999), na Alemanha e na Áustria, pavimentos utilizando aditivo superplastificante têm sido abertos ao tráfego em 24 horas, já que estes permitiram a diminuição significativa da relação água/cimento.

Este tipo de pavimento vem sendo aplicado em diversos casos, seja em obras novas, reconstruções, reforços aderentes ou não aderidos em revestimentos sobre pavimentos asfálticos, entre outros (COTERA S., 1999).

A ACPA (1994) apresenta informações sobre 29 pavimentos de concreto *fast track* executados nos Estados Unidos na época, divididos entre aeroportos, rodovias, interseções, ruas e estradas com pequeno volume de tráfego e projetos industriais. Apresenta dados sobre traços, critérios de abertura ao tráfego, tipo de cura, entre outros. Ansari et al. (1997) e Whiting et al. (1994) também apresentam estudos de pavimentos de concreto *fast track* executados nos Estados Unidos. Alguns destes traços estão demonstrados na Tabela 2.2, para fins de comparação.

Tabela 2.2 Exemplos de Traços de Pavimentos de Concreto

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
Espessura (cm)		25,4	26,7	26,7	10,2	30,48	-	-	-	18	-	19 a 24	-	
Cimento	Tipo	Tipo I ¹	Tipo III ²	Tipo III	Tipo III	Tipo I	Tipo I	Tipo I	Tipo III	CPV	CPV	CPII-Z	CPV	
	Consumo (Kg/m ³)	441	375	437	418	419	469	414	440	455	455	411	-	
a/c		0,42	0,42	0,38	0,42	0,35	0,41	0,41	0,49	0,44	0,43	0,39	-	
Critério para abertura ao tráfego	Tração na Flexão	-	2,8 MPa @12hs	2,8 MPa @12hs	-	3,1 MPa @24hs	-	-	12 a 24 hs	4,4 MPa @28 dias	5,5 MPa @28 dias	4,5 MPa @28 dias	-	
	Compressão	17,3 MPa @12hs	-	-	20,7 MPa @24hs	-	-	-		24 MPa @28 dias	24 MPa @28 dias	-	30 MPa @30 horas	
Resistência nos ensaios (MPa)	Tração na Flexão	24hs	-	-	5,2	-	-	-	-	-	-	-	-	
		28 dias	-	-	-	-	-	-	-	-	5,5	-	5,3	-
		outros	-	3,0 MPa @12hs	4,1 MPa @12hs	-	4 MPa @48hs	4,0 MPa @6,5hs	2,8 MPa @7hs	-	-	-	4,1 MPa @3dias	-
	Compressão	24hs	28,8	-	-	20,9	-	25,3	24,4	-	-	-	-	-
		28 dias	38,9	-	-	-	-	40,6	36,5	-	39,3	-	41,8	-
		outros	15 MPa @ 6hs	-	-	8,28 MPa @12hs	-	19,1 MPa @6hs	16,3 MPa @6hs	7,9 MPa @7,8hs	-	-	30,4 MPa @3dias	-

¹ Cimento Tipo I Americano equivale ao cimento CPI brasileiro.

² Cimento Tipo III Americano equivale ao cimento CPV brasileiro.

Sendo:

A: Pavimento de concreto *Fast Track* executado em Denver, CO, Estados Unidos.
Fonte: ACPA (1994);

B: Pavimento de concreto *Fast Track* executado em Cedar Rapids, IA, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);

C: Pavimento de concreto *Fast Track* executado em Cedar Rapids, IA, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);

D: Pavimento de concreto *Fast Track* executado em Kansas City, KS, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);

E: Pavimento de concreto *Fast Track* executado pela North Carolina DOT, Estados Unidos. Fonte: ACPA (1994);

F: Pavimento de concreto *Fast Track* executado em New Jersey, Estados Unidos. Fonte: Ansari et al. (1997);

G: Pavimento de concreto *Fast Track* executado em New Jersey, Estados Unidos. Fonte: Ansari et al. (1997);

H: Pavimento de concreto *Fast Track* executado pela Iowa DOT, Estados Unidos. Fonte: Whiting et al. (1997);

I: Pavimento executado no túnel Antonieta de Barros, Florianópolis. Fonte: Giublin et al. (2003);

J: Pavimento de concreto *Fast Track* executado na Avenida Iguaçu em Curitiba. Fonte: Vieira e D'Aquino (2003);

K: Pavimento executado na BR 290 – Free-way, pela concessionária Concepa. Fonte: Giublin [200-] e BRITO (2006).

L: Pavimento de concreto *Fast Track* executado no vão central da ponte Rio - Niterói, no Rio de Janeiro. Fonte: Medeiros (2006).

Com o pavimento de concreto *fast track* surgem também novas alternativas para reduzir a interrupção do tráfego em reparos, como o fechamento de apenas uma pista, o trabalho somente em um final de semana, ou ainda a suspensão do trânsito em todo um sentido da via por vez (FHWA, 1994).

Uma alternativa para a aceleração no ganho da resistência é o uso de cobertores ou mantas térmicas, que impedem a saída do calor da estrutura, promovendo assim o aumento na velocidade das reações de hidratação do cimento. Porém, esta alternativa incute custos elevados, e muitas vezes se torna inviável (FHWA, 1994). Além disso, no geral, altas temperaturas de cura resultam em altas resistências iniciais, porém diminuem um pouco as resistências finais (ANSARI et al., 1997).

Vários fatores devem ser estudados para a execução deste pavimento, como a disponibilidade de maquinário, a maneira de inserção das barras de transferência de carga, execução e selagem das juntas, entre outros. (FHWA, 1994).

Segundo FHWA (1994) já existem no mercado selantes de juntas, para uso específico em pavimento de concreto em pequenas idades, podendo ser aplicados no concreto ainda no estado fresco.

Para produzir um concreto que adquira alta resistência em pequenas idades, não são necessárias grandes modificações no traço do concreto tradicional. Apenas com um adequado proporcionamento dos materiais, com um tipo apropriado e alto consumo de cimento, da ordem de 400 a 500 kg/m³, baixa relação água/cimento (WHITING et al., 1994), aditivos, adições e agregados apropriados, esta realidade se torna possível, conforme descrito no item a seguir.

O custo do concreto para pavimentos de concreto *fast track* é maior do que os concretos para pavimentos usuais, já que usa, em maior quantidade, materiais mais caros, como o cimento. Porém, considerando que o custo do concreto é de cerca de 5 a 8% do custo total de uma obra de pavimentação, é preciso avaliar a relação custo/benefício, já que muitas vezes é extremamente vantajoso o uso desta técnica (AVENI, 2001).

2.6.1 Materiais para Pavimentos de concreto *Fast Track*

2.6.1.1 Cimento

De acordo com FHWA (1994), em pavimentos de concreto *fast track* recomenda-se utilizar cimentos do tipo III americano, o equivalente ao CPV-ARI brasileiro, com cinza volante tipo C americana, e, em caso de liberação do pavimento em torno de 24 horas após a moldagem, indica-se também o uso de cimentos do tipo I e II americanos, equivalentes ao CPI e CPI-MRS (Moderada Resistência a Sulfatos), respectivamente. Segundo a ACPA (1994), utiliza-se consumos entre 415 e 475 kg/m³ para cimentos ASTM C 150 Tipo I ou III Americanos.

Whiting et al. (1994) sugerem como alternativa para acelerar ainda mais o ganho de resistência da mistura, a adoção de cimentos diferentes do Portland, como cimentos de aluminato de cálcio, os quais, segundo Mehta e Monteiro (1994), são ideais para altas temperaturas e para reparos emergenciais, especialmente em climas frios.

No Brasil, o indicado para esta aplicação seria o cimento do tipo CPV – ARI, já que este permite que se adquiram altas resistências em pouco tempo, pois o cimento do tipo CPI, que seria uma alternativa, não é encontrado com facilidade no mercado, bem como cimentos diferentes do Portland.

De acordo com Cotera S. (1999), o cimento CPV- ARI proporciona maiores resistências em menores idades pelo fato de ser mais fino, além de possuir maior quantidade de C₃S. Porém, isso demanda mais água e pode ocasionar fissuração excessiva, já que provoca maior calor de hidratação pelo rápido processamento das reações químicas, além de poder apresentar falsa pega.

2.6.1.2 Aditivos

Os aditivos indicados para uso nestes pavimentos são os redutores de água do Tipo A, segundo a classificação da ASTM C 494 (1992), que reduzem em, no mínimo, 5% a

demanda de água (ACPA, 1994), ou, ainda, aditivos superplastificantes de última geração, que permitem uma redução ainda maior. Na Europa, segundo Cotera S. (1999), tem-se adotado também aditivos do tipo F e G, considerados redutores de água de alto desempenho, como os à base de policarboxilatos. Apesar de possuírem custo de três a quatro vezes maior do que os plastificantes, sua demanda é cerca de três vezes menor para uma mesma redução de água da mistura.

Em países de clima frio adota-se ainda aditivos incorporadores de ar, com a finalidade de evitar danos pelo efeito gelo-degelo.

Em alguns casos pode-se adotar aditivos aceleradores de endurecimento, porém alguns deles são à base de cloreto de cálcio, o que promove a corrosão nas armaduras e/ou nas barras de transferência de esforços. Normalmente não são utilizados em pavimentos de concreto *fast track*.

2.6.1.3 Adições

Cotera S. (1999) afirma que na grande maioria dos pavimentos de concreto *fast track* executados nos Estados Unidos, foi utilizada cinza volante, que é um resíduo da queima do carvão, normalmente subproduto produzido em usinas termelétricas. A porcentagem de adição de cinza volante no concreto é da ordem de 10%.

2.6.1.4 Agregados

Os agregados utilizados no concreto devem ter uma granulometria contínua. Além disso, a ACPA (1994) indica como relação agregado graúdo/miúdo o intervalo entre 1:1 a 1,5:1.

2.6.2 Processo Construtivo

Para a execução de pavimentos de concreto *fast track* não são necessários equipamentos diferentes do usual em pavimentação. Apenas um ótimo planejamento e logística, bem como uma equipe bem treinada, garantem a otimização do tempo na execução deste tipo de estrutura.

O processo de abertura de juntas se dá da mesma maneira que no concreto usual, porém deve se ter conhecimento prévio das características do material para que esta seja executada no tempo certo, evitando danos à estrutura. Já o processo de cura precisa ser cuidadoso e eficiente, sendo indispensável para a obtenção de grandes resistências em pequenas idades. A cura proporciona a retenção da umidade e o aproveitamento do calor de hidratação do concreto na aceleração das reações. Para otimizar este processo, pode-se utilizar cura química, aspergindo na superfície produtos que formam uma pequena camada que evita a saída da água. Pode-se ainda adotar o uso de panos constantemente umedecidos, ou ainda a adoção de mantas térmicas, que fornecem calor à mistura, acelerando o processo das reações químicas (COTERA S., 1999).

2.6.3 Critérios para abertura do pavimento ao tráfego

Segundo Pinto (2004a), para determinar o momento de liberação do pavimento ao tráfego, normalmente são utilizados como critérios a idade do concreto ou a resistência mecânica. A combinação entre estes dois fatores pode também ser adotada. O tempo é facilmente medido, porém sozinho não é o suficiente para prever a resistência do concreto. Diversos fatores, além da idade, interferem na resistência do concreto, como a relação água/cimento, tipo de cimento (composição e finura), propriedades dos agregados e uso de adições e, para uma mesma mistura de concreto, fatores ambientais de construção como temperatura do concreto, adensamento e condições de cura (FHWA, 1994) também afetam a taxa de desenvolvimento da resistência.

Desta forma, há a necessidade de se monitorar continuamente o desenvolvimento da resistência do material para garantia da segurança no momento da liberação do pavimento.

Uma opção seria a realização de ensaios de tração na flexão, no ambiente da obra, o que requer o deslocamento de equipamentos especiais. Outra opção é a utilização de ensaios não destrutivos, como, por exemplo, o método da maturidade, ultra-som, *pull-out*, *breakoff*, entre outros. Resultados fornecidos por estes ensaios são geralmente relacionados com a resistência à compressão, porém estes ensaios também podem ser correlacionados com a resistência à tração.

Segundo Tritsch (1994), para a execução das juntas de dilatação são necessários cuidados importantes e precisão no momento de se efetuar o serviço, que não deve ser executado muito cedo, de forma a provocar danos no concreto fresco, nem tarde o suficiente para que ocorram nele fissuras de retração.

Com o rápido ganho de resistência, surge a necessidade do uso de ensaios rápidos e confiáveis que permitam conhecer esta resistência *in situ*.

A questão principal dentro do pavimento de concreto *fast track* é a decisão do tempo necessário para sua liberação ao tráfego. A resposta a este questionamento é função da resistência à tração do concreto e/ou o tempo de cura deste. Para obter-se estes fatores resposta, adota-se, então, métodos que demonstrem a evolução da resistência com o tempo, como Método da Maturidade, a propagação de ondas ultra-sônicas, entre outros.

3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Ao misturar o cimento com a água, começam a ocorrer reações químicas que formam compostos que promovem o endurecimento do concreto, conhecidas como hidratação do cimento. Inicialmente o concreto fresco não tem resistência suficiente para suportar sequer o peso próprio, mas com a formação da matriz cimentícia há um acréscimo gradual em sua resistência. Este desenvolvimento da resistência pode ser monitorado através de ensaios mecânicos, método amplamente adotado no controle tecnológico do concreto em obras. Porém, além deste método ser de custo elevado, ele não representa bem o real ganho de resistência do concreto, visto que corpos-de-prova em laboratório são curados em diferentes condições de temperatura e umidade do concreto em obra (SUBRAMANIAM et al., 2002).

Assim, surge como alternativa o uso de Ensaio não Destrutivo, que permitem monitorar o ganho de resistência do concreto *in loco* de forma rápida, precisa e normalmente com baixos custos. Entre as alternativas que podem ser adotadas para monitorar estas variações nas propriedades do concreto, estão o Método da Maturidade e o Ultra-som, que serão detalhados a seguir.

3.1 MATURIDADE

Com o fim da Segunda Guerra Mundial e a retomada do crescimento da indústria no final dos anos 40, também a construção civil passou a sofrer um processo de modernização. A necessidade de uma maior rapidez em alguns processos levou ao surgimento de novas tecnologias, como a cura a vapor.

Com o surgimento desta nova tecnologia de cura vem também a necessidade de conhecer-se o ganho de resistência do concreto em elevadas temperaturas. Para isso, necessitava-se de um modelo teórico que representasse a influência da temperatura no ganho de resistência do concreto. Diversos autores passaram a estudar estes aspectos, resultando no Método da Maturidade, que avalia o ganho da resistência de uma peça

estrutural com o tempo e a temperatura, podendo sua aplicação ser estendida além de concretos submetidos à cura térmica.

Segundo Chengju (1989), é necessário que se tenha conhecimento avançado sobre a predição da resistência de uma peça estrutural, para que se possa, de forma ágil, segura e econômica, permitir serviços como a desforma de peças estruturais, retirada do escoramento, aplicação de cargas de protensão, transporte de peças pré-moldadas, liberação de pavimentos ao tráfego, entre outros. O método tradicional de monitoramento da resistência do concreto, através de ensaios de compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos, em casos onde necessita-se de grande quantidade de ensaios para o monitoramento do ganho de resistência do concreto, pode ser trabalhoso e relativamente caro. Além disso, há a impossibilidade de submeter os corpos-de-prova a condições de cura semelhantes às condições de obra, diminuindo assim a precisão dos resultados, sendo adotados então coeficientes de segurança que minimizam estas distorções.

3.1.1 Descrição do método

As reações de hidratação do cimento, como grande parte das reações químicas, têm sua velocidade alterada com a temperatura. Quanto maiores as temperaturas, mais rápido se darão estas reações, e, portanto, mais rápido serão desenvolvidas características de resistência da mistura.

A resistência do concreto é função da idade e da temperatura da mistura, consideradas no método, além de outros fatores, como relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de cura, umidade, entre outros. Porém, em pequenas idades, o erro na estimativa da resistência é alto, já que as condições de cura no laboratório são totalmente diferentes das condições em campo (CARINO, 2004).

O Método da maturidade permite que seja estimada a resistência do concreto a partir do histórico de temperaturas do material. Através de equações matemáticas, relacionando tempo e temperatura, chamadas de função de maturidade, este método calcula, para uma mistura, o seu grau de maturidade em uma determinada idade. Este grau de maturidade,

quando referenciado a uma temperatura fixa, é também chamado de Idade Equivalente. Este índice fornece um indicativo da resistência adquirida pela mistura.

Ao atingir um determinado grau de maturidade ou Idade Equivalente, a mistura terá adquirido um nível de resistência que independe da combinação temperatura-tempo, necessária para atingir esta Idade Equivalente (PINTO, 2004a). Em outras palavras, uma mesma mistura de concreto pode atingir o mesmo nível de resistência em idades reais distintas, dependendo do seu histórico de temperatura.

Pinto (2000) afirma que se pode modelar qualquer característica do concreto através deste método, desde que esta característica esteja correlacionada com a hidratação do cimento, como resistência, módulo de elasticidade, etc.

3.1.2 Princípios do método

Conforme Byfors (1980 apud PINTO, 1997), em uma mistura de concreto, a taxa de hidratação do cimento é função somente da temperatura da mistura naquele momento, a um determinado grau de hidratação, idéia fundamentada na cinética das reações químicas, onde a taxa de reação é função das concentrações dos reagentes e da temperatura, como expressa a Equação 3.1.

$$\left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{\alpha} = f(T) \quad (3.1)$$

Onde:

$\left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{\alpha}$: medida da taxa de hidratação do cimento ou variação do grau de hidratação

com o tempo;

$f(T)$: taxa constante, função da temperatura.

Considerando a lei das reações químicas, onde a velocidade da reação é equivalente à taxa de hidratação do cimento, a Equação 3.3 pode ser reescrita como a Equação 3.2.

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(T)g[\alpha(t)] \quad (3.2)$$

Onde:

$g[\alpha(t)]$: concentração de partículas de cimento que não reagiram, a partir do decréscimo da função com o grau de hidratação α .

A Equação 3.2 pode ser reescrita como a Equação 3.3 e, considerando que a temperatura do concreto pode variar com o tempo, obtém-se a Equação 3.4.

$$\frac{1}{g[\alpha(t)]} d\alpha = f(T)dt \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{g[\alpha(t)]} d\alpha = f[T(t)]dt \quad (3.4)$$

Onde:

$F[T(t)]$: função de maturidade.

Integrando a Equação 3.4 até o tempo t equivalente ao grau de hidratação α :

$$\int_0^{\alpha} \frac{1}{g[\alpha(t)]} d\alpha = \int_0^t f[T(t)]dt \quad (3.5)$$

Obtém-se uma função que relaciona α e t :

$$H(\alpha) = M(t) \quad (3.6)$$

Onde:

$H(\alpha)$: resultado da integração em α ;

$M(t)$: maturidade no tempo t .

A equação 3.6 demonstra que a maturidade é função do tempo e da temperatura do concreto.

Conforme Carino (2004), a fim de representar melhor esta propriedade, Rastrup introduziu o termo “Idade Equivalente”, que representa o tempo que um concreto levaria para atingir a resistência em questão, a uma Temperatura de Referência, e é obtida a partir da integral representada na Equação 3.7 (CARINO, 1984).

$$t_e = \int_0^t \left[\frac{k(T)}{k_s} \right] dt \quad (3.7)$$

Onde:

k_s : valor da taxa constante à Temperatura de Referência;

k : Taxa constante.

Considerando uma função linear com o tempo, obtém-se a Equação 3.8.

$$t_e = \frac{\sum_0^t (T - T_o) \Delta t}{T_r - T_o} \quad (3.8)$$

Onde:

T_r : Temperatura de Referência (°C ou F);

t_e : Idade Equivalente na Temperatura de Referência T_r (horas ou dias).

Normalmente se utiliza como Temperatura de Referência a de 20°C, e a Idade Equivalente passa a ser calculada com a Equação 3.9.

$$t_e = \frac{\sum_0^t (T - T_o) \Delta t}{20 - T_o} \quad (3.9)$$

3.1.3 Funções maturidade

3.1.3.1 Função de Saul

Visando suprir as necessidades técnicas da época, Nurse (1949) publicou um trabalho avaliando aspectos da cura a vapor, e, pela primeira vez, utilizando o produto simples entre tempo e temperatura para avaliar o ganho de resistência do concreto. McIntosh (1949) introduziu a idéia de que a taxa de ganho da resistência do concreto é diretamente proporcional à diferença entre a temperatura do material e a temperatura abaixo da qual as reações de hidratação não ocorrem. Para esta temperatura ele indicou o valor de -1,1°C.

O conceito de maturidade foi primeiramente concebido por Saul (1951):

“Uma mesma mistura de concreto a um mesmo grau de maturidade (medido como função de temperatura e tempo) tem aproximadamente a mesma resistência, qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o grau de maturidade”.

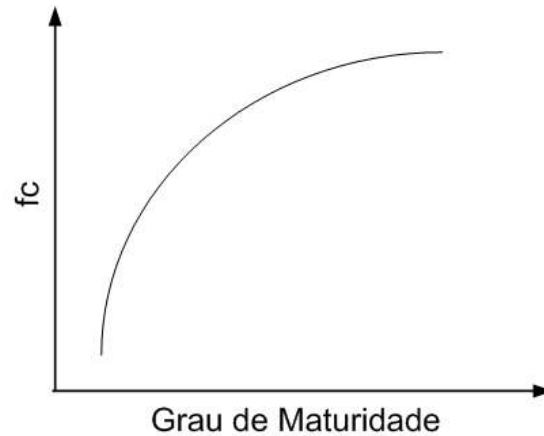


Figura 3.1 Lei de Saul

Baseado no trabalho de Nurse, Saul, então, propôs uma equação empírica para estimar a maturidade da mistura (Equação 3.10).

$$M_s = \sum_0^t (T - T_o) \Delta t \quad (3.10)$$

Onde:

M_s : Maturidade do concreto na idade t ;

Δt : Intervalo de tempo do processo de endurecimento (horas ou dias);

T : Média de temperaturas em um intervalo de tempo t (em °C ou F);

T_o : Temperatura de base.

A equação de Nurse-Saul é utilizada no intervalo de temperaturas onde ocorrem as reações de hidratação do cimento, segundo Chengju (1989), no intervalo de 5 a 30°C.

Inicialmente, Saul considerou a temperatura de base T_0 como 0°C , a temperatura abaixo da qual as reações cessam. Porém, mais tarde, diversos autores propuseram novos valores para esta temperatura, a qual, segundo Bickley (1993), poderia estar entre -12°C e -10°C , sendo que a temperatura exata para cada mistura de concreto depende da composição e das propriedades dos materiais cimentícios empregados e das misturas químicas empregadas, preponderando como usual o valor de -10°C (CHENGJU, 1989, CARINO, 2004). Em pavimentos de concreto estudados para o New Jersey Department of Transportation, adotou-se o valor de $6,5^\circ\text{C}$ para esta aplicação em concretos com alta resistência inicial (LUKE et al., 2002). Utilizando o valor usual de -10°C , a equação de Nurse-Saul passa então a ser apresentada como mostra a Equação 3.11.

$$M_s = \sum_0^t (T + 10)\Delta t \quad (3.11)$$

Esta é uma expressão muito simples, e por isso tem sido muito utilizada, porém não representa bem o ganho de resistência do concreto (SALVADOR FILHO, 2001), já que, segundo Carino (2004), ela sugere uma relação linear para o ganho da resistência, o que não é real. Portanto, para demonstrar melhor o ganho de resistência, precisa-se considerar a cinética das reações químicas de hidratação do cimento, levando em consideração que o ganho inicial de resistência do concreto é causado pela aceleração das reações de endurecimento deste, que é diretamente influenciada pela temperatura.

De acordo com Neville (1997) a temperatura de -10°C é apropriada para o uso como temperatura de origem em idades de até 28 dias em temperaturas entre 0 e 20°C , sendo que em temperaturas e/ou idades mais elevadas, é recomendado o uso de temperaturas de base mais elevadas.

3.1.3.2 Função FHP

De acordo com Chengju (1989), diversos autores passaram a sugerir o uso da equação de Arrhenius para a maturidade, já que este parâmetro está relacionado com a cinética das reações de hidratação do cimento.

A hidratação do cimento ocorre devido a diversas reações químicas e, para que estas reações aconteçam, é necessário que as moléculas possuam energia cinética suficiente para transformar os reagentes em produtos. Como em reações exotérmicas, caso da hidratação do cimento, o estado de energia dos reagentes é maior que o dos produtos, a diferença entre o nível de energia necessário para o início das reações e o nível de energia dos reagentes foi denominado Energia de Ativação, pelo químico sueco Svante Arrhenius em 1888.

3.1.3.2.1 Energia de Ativação

A Energia de Ativação pode ser considerada como a quantidade de energia que os reagentes precisam adquirir para o início da reação química, conforme ilustrado na Figura 3.2. Apenas as moléculas dotadas de energia suficiente conseguem sofrer colisões eficazes ao se aproximarem entre si com geometria favorável. Cada reação possui um valor característico de Energia de Ativação, a qual não depende da temperatura ou da concentração dos reagentes. Segundo Arrhenius, a velocidade com que ocorrem as reações é chamada taxa constante, e pode ser calculada pela Equação 3.12 (PERUZZO e CANTO, 1993).

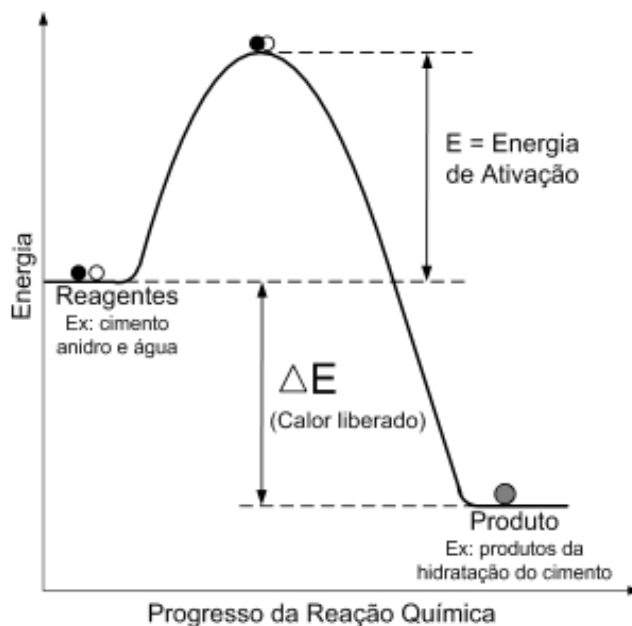


Figura 3.2 Representação do conceito de Energia de Ativação (Adaptado de Mancio et al., 2004).

$$k = Ae^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \quad (3.12)$$

Onde:

E: Energia de Ativação;

R: Constante universal dos gases (8,3144 J/mol K);

T: Temperatura absoluta (K);

A: Constante ou fator de frequência.

Em uma reação química ocorrem inúmeras colisões entre as moléculas, sendo estas eficazes ou não. Colisão eficaz é a que conduz à formação de produto, sendo então necessário que ela ocorra com geometria adequada e energia suficiente. O fator de frequência A relaciona-se com a frequência com que ocorrem as colisões entre as moléculas, ocorrendo a transferência de energia cinética, e com a probabilidade de que estas colisões sejam efetivas, com os átomos posicionados convenientemente,

possibilitando a formação de novas ligações químicas (PERUZZO e CANTO, 1993, PINTO, 1997).

Segundo Pinto (2000) e Carvalho (2002), em altas temperaturas há maior quantidade de moléculas com energia cinética mínima, formando mais produtos e processando mais rapidamente as reações químicas, ou seja, quanto maior a Energia de Ativação, mais sensível à temperatura é a reação, já que é necessária uma quantidade maior de energia cinética.

O processo de hidratação do cimento, porém, é heterogêneo, já que ocorre, ao mesmo tempo, uma grande quantidade de diferentes reações. Cabe então adotar o conceito de Energia Aparente de Ativação, sendo este um valor médio para as diversas Energias de Ativação das reações dos compostos do cimento, as quais ocorrem simultaneamente (CARINO, 2004).

A partir da Equação de Arrhenius, considerando a relação entre as velocidades de hidratação do cimento em uma temperatura qualquer e na Temperatura de Referência, Freiesleben-Hansen e Pedersen (1977) definiram uma função de maturidade (Equação 3.13).

$$\frac{k_t}{k_{tr}} = \frac{Ae^{-\frac{E}{RT}}}{Ae^{-\frac{E}{RT_r}}} = e^{-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)} \quad (3.13)$$

A partir daí, chegaram à função da maturidade conhecida como FHP, demonstrada na Equação 3.14.

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{E_a}{R}\left[\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_r}\right]} \Delta t \quad (3.14)$$

Onde:

t_e : Idade Equivalente à Temperatura de Referência T_r (horas);

E_a : Energia Aparente de Ativação (J/mol);

T : média de temperaturas em um intervalo de tempo Δt ($^{\circ}\text{C}$);

T_r : Temperatura de Referência ($^{\circ}\text{C}$);

Δt : intervalo de tempo (horas).

O valor de E_a não é constante durante todo o processo de hidratação do cimento, visto que até o início de pega e durante a pega do cimento, o tempo que os reagentes levam para se transformar em produtos rege a taxa de evolução da hidratação, ou seja, a própria cinética da reação química. Após este período já está formada parte da matriz cimentícia, e a água necessária para a hidratação dos grãos de cimento move-se por difusão, que é um processo menos sensível à temperatura. Portanto, com o crescimento da hidratação há uma tendência de diminuição da Energia Aparente de Ativação na mistura. Apesar disso, a maioria dos pesquisadores não adota valores decrescentes para E_a (Pinto, 2004b). Segundo Carvalho (2002) diversos autores já têm constatado que os valores de Energia Aparente de Ativação para os primeiros estágios da hidratação é aproximadamente duas vezes maior do que para o posterior período de difusão controlada.

Valores experimentais para a Energia Aparente de Ativação das reações de hidratação para uma mistura específica, podem ser obtidos através de qualquer propriedade relacionada à hidratação do cimento, como a massa de água não evaporável, ensaios mecânicos ou calorimétricos (Pinto, 2004b).

O procedimento ASTM C 1074 (1998) indica métodos experimentais para obtenção da Energia Aparente de Ativação, baseados na evolução da resistência à compressão de argamassas em ao menos três condições de temperatura distintas. Assumindo que o desenvolvimento da resistência com o tempo obedece a uma relação hiperbólica linear, descrita na Equação 3.15, obtém-se a taxa constante. A Energia Aparente de Ativação é obtida linearizando a expressão 3.12, relacionando-se o inverso da temperatura com o

logaritmo natural de K_t , no chamado gráfico de Arrhenius, com o coeficiente angular da reta sendo proporcional ao valor de E_a .

$$f_c = f_{c\infty} \frac{k_t(t-t_0)}{1+k_t(t-t_0)} \quad (3.15)$$

Onde:

f_c : Resistência à compressão na idade t ;

$f_{c\infty}$: Resistência à compressão última;

t : Idade do concreto;

t_0 : Idade em que se inicia o desenvolvimento de f_c .

Em casos onde a precisão nas previsões de resistência não for tão importante ou não haja possibilidade de executar os ensaios para a obtenção do valor de Energia Aparente de Ativação, recomendados pela ASTM C 1074 (1998), admitindo-se erros na estimativa da resistência, pode-se adotar valores de E_a publicados por diversos autores. Para o cimento Tipo I americano (equivalente ao CPI brasileiro), os valores sugeridos para E_a são entre 40 e 50 kJ/mol (ASTM C 1074, 1998). Já para cimentos nacionais há diversos valores, obtidos experimentalmente, que são propostos na literatura. Pinto (2004a) compilou-os na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Valores de Energia Aparente de Ativação para cimentos nacionais. Fonte: Pinto (2004a)

Autor	Tipo de Cimento	Ea (kJ/mol)
BARBOSA et al. (2002)	CP II	41,7
	CP V	34,5
CARVALHO (2002)	CP II	31,6
	CP III	26,8
	CP II + 9% sílica ativa	33,5
PINTO et al. (2002)	CP V	50,1
PERES et al. (2003)	CP I	35,4
	CP II	31,4
	CP III	57,0
	CP IV	50,4
	CP V	29,0
PERES et al. (2004)	CPII + 8% sílica ativa	32,3
	CPII + 16% sílica ativa	34,8
SALVADOR FILHO (2001)	CP V	34,5
	CP V + 10% sílica ativa	41,9
	CP V + 20% sílica ativa	43,2

Através das funções citadas anteriormente, transforma-se a idade real do concreto em um grau de maturidade, obedecendo a lei da maturidade de Saul (1951), descrita anteriormente.

A resistência do concreto passa a ser então a mesma para qualquer temperatura de cura em um mesmo grau de maturidade. Para isso precisa-se conhecer o ganho da resistência com o tempo, em ao menos uma condição isotérmica. Para todas as outras condições de temperatura a resistência passa a ser estimada por uma combinação entre tempo e temperatura, através do grau de maturidade.

Pinto et al. (2001) apresentam valores distintos de E_a para uma mesma mistura, obtidos experimentalmente através da evolução de propriedades distintas (resistência à compressão, grau de hidratação, velocidade do onda ultra-sônica), sugerindo que o índice E_a está relacionado com a sensibilidade térmica da propriedade de interesse.

Mancio et al. (2004) alertam para a necessidade da escolha precisa dos valores de Energia Aparente de Ativação, visto que pequenas variações podem acarretar grandes diferenças em termos de estimativa de resistência. Além disso, ressaltam a diferença entre misturas utilizadas atualmente com as usuais na época em que o método foi concebido, ressaltando o corriqueiro uso de adições químicas e minerais a fim de melhorar o

desempenho do concreto em relação à durabilidade, trabalhabilidade e resistência. Além disso, afirmam que a faixa de temperaturas que correlacionam resistência e maturidade é única e limitada.

3.1.4 Correlação entre Maturidade e Resistência à Compressão

Conforme descrevem diversos autores, como Carino (2004) e Pinto (1997), foram propostas diversas funções matemáticas visando relacionar a resistência à compressão da mistura com o seu grau de maturidade. Entre estas funções, citam a proposta por Nykanen em 1956, demonstrada na Equação 3.16.

$$f_c = f_{c\infty} (1 - e^{-\gamma M}) \quad (3.16)$$

Onde:

γ : Constante.

Também há uma função estabelecida por Plowman (1956), dada na Equação 3.17.

$$f_c = a + b \log(M) \quad (3.17)$$

Onde:

a, b: Constantes relacionadas ao relação água/cimento do concreto e ao tipo de cimento.

Já Freiesleben-Hansen e Pederson (1977) sugeriram que a relação entre resistência e maturidade pode ser similar à relação entre grau de hidratação e maturidade, propondo, a partir de dados empíricos, a Equação 3.18.

$$f_c = f_{c\infty} e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^a} \quad (3.18)$$

Onde:

τ : tempo constante;

a: parâmetro de forma.

Carino e Lew (1983) propuseram ainda uma função onde se considera a maturidade no momento em que se inicia o ganho de resistência, demonstrada na Equação 3.19. Mais tarde Carino (2004) desenvolve um modelo parabólico-hiperbólico, Equação 3.20.

$$f_c = f_{c\infty} \frac{M - M_0}{1 + a(M - M_0)} \quad (3.19)$$

Onde:

M_0 : Maturidade no tempo t_0 ;

a: constante.

$$f_c = f_{c\infty} \frac{\sqrt{a(M - M_0)}}{1 + \sqrt{a(M - M_0)}} \quad (3.20)$$

3.1.5 Vantagens e limitações

O Método da Maturidade considera que a única variável que interfere no ganho de resistência de uma determinada mistura, ao longo do tempo, é a temperatura, desprezando a influência de fatores como proporções da mistura, composição dos materiais, condições de umidade, entre outros, ou seja, para uma mesma composição de materiais da mistura, há apenas uma função de temperatura (NEVILLE, 1997).

Segundo Evangelista (2002), ao fazerem-se medidas de temperatura no interior de uma determinada peça de concreto, obtém-se valores pontuais, que não representam necessariamente a temperatura de toda a peça, o que pode ocasionar uma estimativa da resistência acima da real, retardando a liberação da estrutura, ou abaixo da real, ocasionando uma liberação prematura da estrutura, o que pode acarretar danos. Para que se obtenham dados que representem a peça como um todo, é necessário um número considerável de pontos de medida, o que, em alguns casos, tornaria o ensaio demasiadamente caro.

Ainda segundo Bungey (1989) a correlação entre a resistência e a maturidade é específica para cada composição do concreto, bem como a cada condição de cura à qual é submetido.

O modelo usual proposto por Saul (1951) não leva em consideração a perda potencial de resistência última, a qual ocorre com o aumento da temperatura inicial de cura. Carino (2004) reescreveu a Lei de Saul, considerando esta perda potencial de resistência última, relacionando a maturidade como grau relativo de desenvolvimento da resistência:

“Uma mesma mistura de concreto a um mesmo grau de maturidade (medido como função de temperatura e tempo) tem aproximadamente a mesma resistência **relativa**, qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o grau de maturidade”.

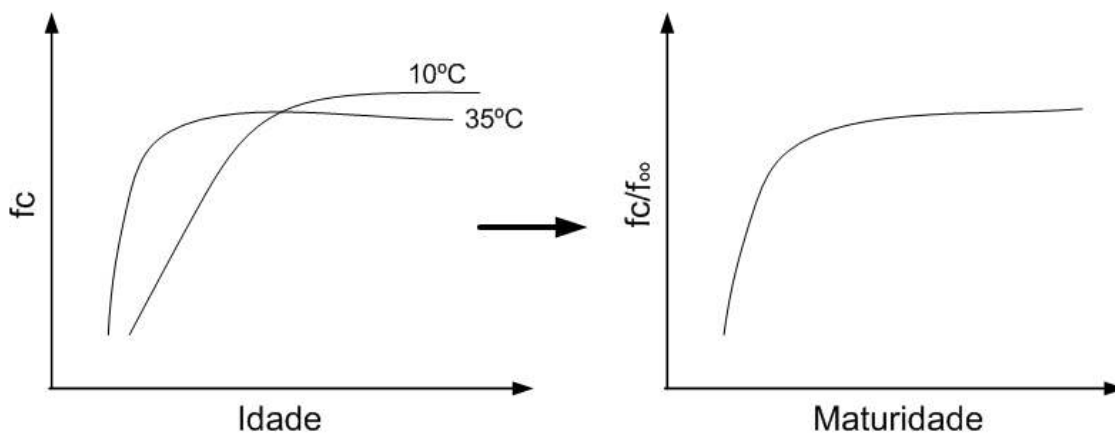


Figura 3.3 Lei de Saul modificada por Carino (2004)

Porém, considerando este aspecto, perde-se muito, já que estima-se a resistência relativa para uma dada maturidade. Estas perdas são atenuadas se não houverem grandes variações ou, ainda, se o método for utilizado apenas em idades iniciais, onde apenas pequenas diferenças relativas ocorrem (Figura 3.4).

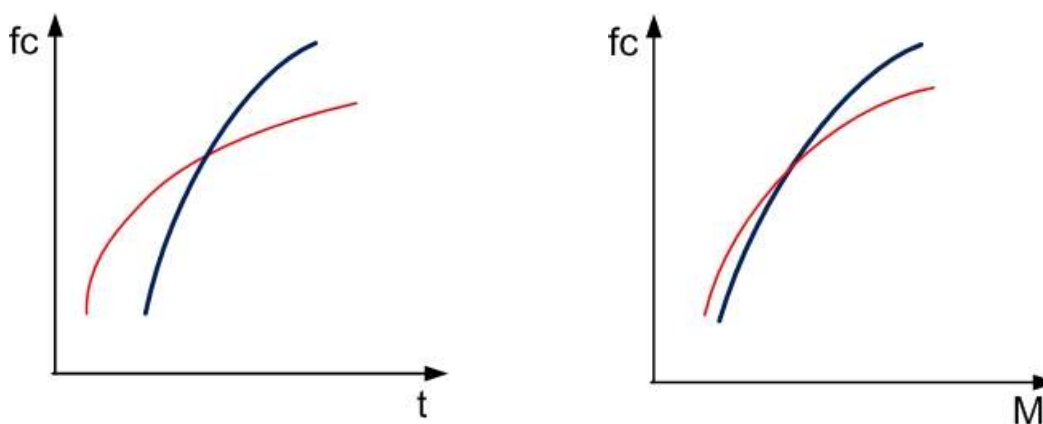


Figura 3.4 Comparação entre a evolução da resistência com o tempo e com a Maturidade.

3.1.6 Aplicações

Quando obtém-se anteriormente a estimativa da relação entre a resistência à compressão (ou outra característica da mistura) e a maturidade em laboratório, pode-se, em campo, monitorar o histórico de temperaturas do concreto e, através das relações obtidas

para a mistura em laboratório, estimar-se a resistência a partir do fator de maturidade obtido, utilizando o método como não destrutivo. Este monitoramento da temperatura do concreto *in loco* é feito através de sensores colocados na peça, logo após sua moldagem, em locais onde as condições de temperatura de cura são menos favoráveis ou ainda onde as cargas estruturais são mais críticas (SALVADOR FILHO, 2001).

Segundo Pinto et al. (2002), pode-se utilizar o método para estimar a resistência em idades iniciais, de forma a permitir a desforma, a aplicação de cargas de protensão ou ainda a liberação ao tráfego, sem que ocorram danos à estrutura, principalmente em ambientes de temperatura baixa, onde o ganho de resistência é retardado.

3.2 ULTRA-SOM

O método não destrutivo para obtenção da velocidade de onda ultra-sônica começou a ser desenvolvido no Canadá e Inglaterra, quase que simultaneamente, onde era chamado de *soniscope* e *ultrasonic tester*, respectivamente, e é utilizado com sucesso para avaliar a qualidade do concreto há mais de 60 anos, já que possibilita a detecção de falhas internas e de outros defeitos, como mudanças nas características do concreto, deterioração por agentes químicos e ação do efeito gelo-degelo (Carino, 2004). Além disso, é muito adotado pela facilidade na execução, baixo custo e confiabilidade de resultados. O equipamento utilizado para este ensaio é portátil, o que colaborou para a difusão da técnica. Temos como exemplo o PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester*), equipamento utilizado neste trabalho, que funciona à bateria e conta com mostrador digital. Este equipamento proporciona a realização de medidas em peças de até 20 metros de comprimento (Bungey, 1989).

3.2.1 Descrição do método

A velocidade de ondas ultra-sônicas que atravessam um material depende da massa específica e das propriedades elásticas do material, e independe da geometria da peça. Para

um meio infinito, homogêneo, elástico e isotrópico, a velocidade de propagação da onda pode ser expressa pela equação 3.21 (BUNGEY, 1989, PUNDIT MANUAL, 1994).

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (3.21)$$

Com:

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.22)$$

Onde:

V: velocidade da onda, m/s;

E_d : módulo de elasticidade dinâmico, N/m^2 ;

ρ : massa específica, kg/m^3 ;

ν : coeficiente de Poisson dinâmico.

O método consiste em acoplar um par de transdutores piezelétricos em faces da peça de concreto, provocar uma excitação no elemento piezelétrico em um transdutor com um sinal de tensão elétrica, causando uma vibração com frequência ressonante. Esta vibração excita o material com uma larga escala de frequências ultra-sônicas e gera ondas de tensão que são transmitidas através do material e recebidas no outro transdutor (YAMAN et al., 2001), conforme ilustrado na Figura 3.5. Resumidamente, consiste em criar uma onda ultra-sônica em um ponto na face da peça, e medir o tempo de percurso da onda deste ponto a um outro ponto. Com a distância entre os dois pontos, a velocidade de propagação da onda pode ser determinada (CARINO, 2004). A velocidade de onda é calculada utilizando-se a Equação 3.23.

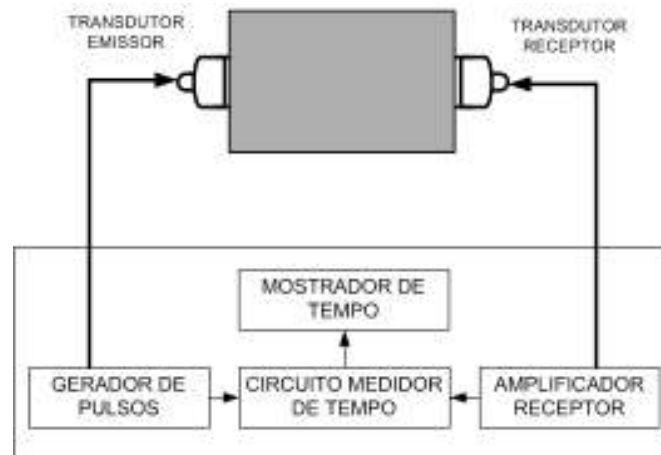


Figura 3.5 Esquema de funcionamento do ultra-som. Fonte: ASTM C 597-02 (2003).

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.23)$$

Onde:

V: velocidade de propagação das ondas;

L: distância entre os transdutores;

t: tempo de percurso das ondas.

Os transdutores são projetados para gerar apenas um tipo de onda, as longitudinais (compressão), porém outros dois tipos são gerados simultaneamente: as transversais (cisalhamento) e as de superfície (*Rayleigh*). A diferença entre elas é o tipo de movimento provocado nas partículas: as longitudinais têm as partículas na mesma direção da propagação das ondas, e sua velocidade é cerca de duas vezes maior do que as outras. As transversais têm partículas se movimentando perpendicularmente à propagação das ondas, e as *Rayleigh* movimentam-se elipticamente pela superfície da peça. Porém, as ondas transversais e as *Rayleigh* são geradas em quantidades muito inferiores às longitudinais, sendo então desprezíveis (BUNGEY, 1989).

Carino (2004) especifica, para concretos, velocidades típicas de propagação de ondas ultra-sônicas da ordem de 3000 a 5000 m/s.

De acordo com Bungey (1989), a presença de armaduras, massa específica do concreto, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson são fatores que interferem na velocidade de propagação de onda ultra-sônica.

Segundo a NBR 8802 (1994), o posicionamento dos transdutores para a realização do ensaio pode ser feito de três maneiras, mostradas na Figura 3.6.

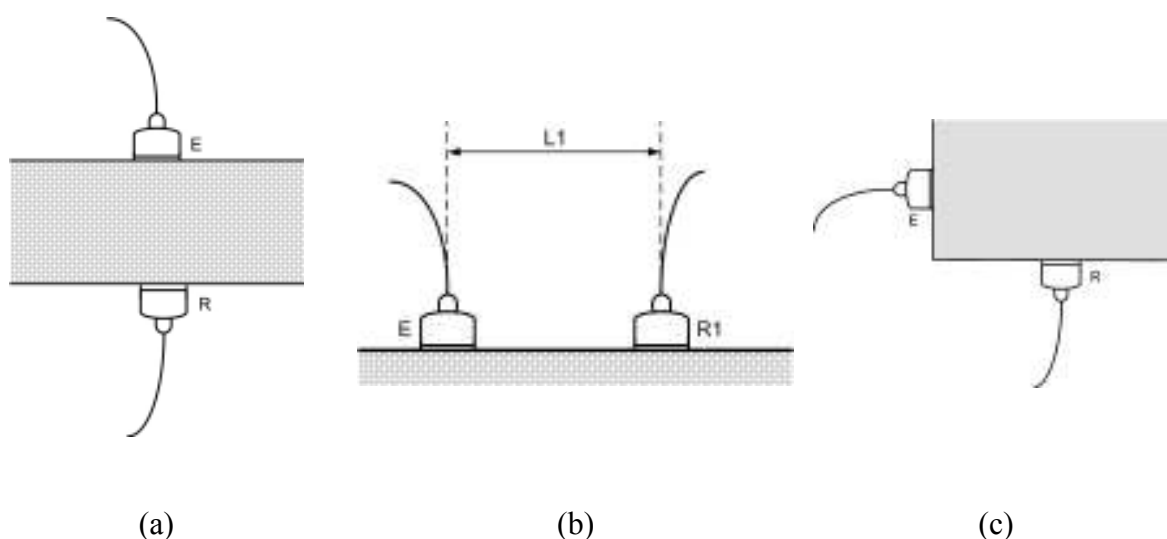


Figura 3.6 Modos de transmissão. (a) transmissão direta; (b) transmissão indireta; (c) transmissão semi-direta. Fonte: NBR 8802 (1994).

A transmissão direta é a mais recomendada para a transmissão da onda ultra-sônica, já que há maior intensidade na recepção da onda. Já a transmissão indireta é utilizada quando se tem acesso somente a uma das faces da peça, caso dos pavimentos, porém a amplitude do sinal pode ser menor que 3% quando comparada à transmissão direta. Segundo Yaman et al. (2001), a British Standards indica que a velocidade de onda no modo de transmissão indireta é de 5 a 20% menor que no modo direto, dependendo da qualidade do concreto. A transmissão semi-direta é a menos recomendada, sendo adotada somente quando não há possibilidade de acesso às faces opostas da peça e esta não tenha o comprimento necessário para realização da transmissão indireta, já que pode haver atenuação da onda transmitido (NBR 8802, 1994, BUNGEY, 1989).

Em estudo realizado por Yaman et al. (2001), comparando os métodos direto e indireto de transmissão de onda, constatou-se similaridade entre as medições de transmissão indireta e direta em lajes com propriedades uniformes ao longo da espessura. No entanto Câmara (2006) verificou que, ao efetuar-se as leituras indiretas de ultra-som na face superior da peça, obtém-se valores de velocidade de propagação de onda menores que nas laterais, já que, por efeito de exsudação, forma-se no local uma camada mais porosa e menos resistente.

Em pavimentos de concreto normalmente não se tem acesso para efetuar medidas de ultra-som pelo método direto, sendo necessária a adoção do método indireto. Para tal, fixa-se o transdutor emissor em um ponto e desloca-se o transdutor receptor, fazendo leituras sucessivas a distâncias crescentes, pré-estabelecidas em relação ao emissor (Figura 3.7). A seguir, plota-se um gráfico de distância *versus* tempo, e a velocidade de propagação na peça é a tangente da reta que une estes pontos (Figura 3.8).

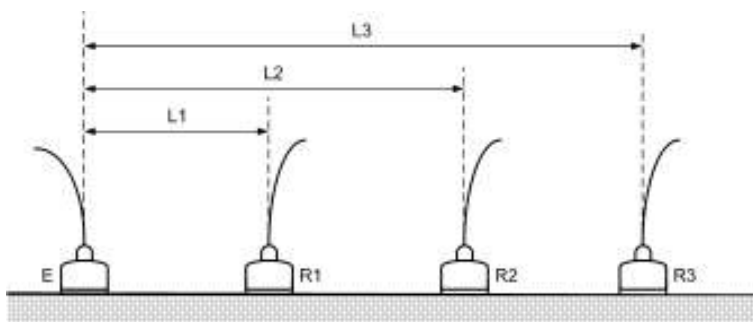


Figura 3.7 Transmissão indireta. Fonte: NBR 8802 (1994).

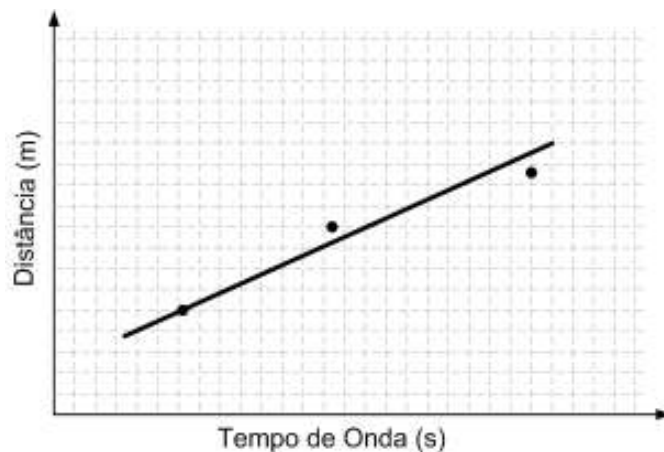


Figura 3.8 Gráfico para a obtenção da Velocidade de onda para a Transmissão indireta.

Como há alterações nas características do concreto com o aumento da idade, como a resistência mecânica, por exemplo, estas podem ser percebidas pelas variações na velocidade de propagação da onda ultra-sônica, que aumenta com o aumento da resistência nas pequenas idades, o que se confirma na Equação 3.21, quando, aumentando-se o módulo de elasticidade do concreto, aumenta-se a velocidade, já que a massa específica se mantém praticamente constante e o coeficiente de Poisson não se modifica sensivelmente. Assim, monitorando-se as alterações na sua velocidade, pode-se estimar o ganho de resistência da mistura com o passar do tempo.

Além disso, o ensaio de ultra-som é facilmente realizado em campo, e em sua forma de transmissão indireta é uma alternativa viável para o monitoramento do ganho de resistência em pavimentos de concreto, já que geralmente tem-se somente a face superior disponível para realização de ensaios.

3.2.2 Vantagens e limitações

O ensaio de ultra-som é um ensaio de baixo custo, muito confiável e de fácil manuseio, além de ser um ensaio totalmente não-destrutivo. Entretanto, são precisos alguns cuidados, como o uso de algum material que garanta o perfeito contato entre o transdutor e a superfície da peça, que deve ser lisa e sem revestimentos, para que haja adequada

condição para a transmissão da onda. Também são necessários cuidado e conhecimento da técnica para a correta interpretação dos resultados (MALHOTRA, 1984).

A resistência do concreto não pode ser diretamente estimada a partir de velocidades de propagação de onda ultra-sônica. Este ensaio somente fornece um indicativo da qualidade do material, sempre comparativamente e preferencialmente em conjunto com outro ensaio não-destrutivo, como a esclerometria. Isto ocorre, segundo Sturup et al. (1984), devido a diversos fatores intervenientes, como presença de fissuras, vazios, bem como outros tipos de descontinuidades, além da presença de armaduras. Ainda, idade, teor de umidade e propriedades e proporcionamento de materiais, também interferem nos valores de velocidade de onda. Porém, quando têm-se uma curva de calibração para a mistura em questão, pode-se fazer uma estimativa direta da resistência a partir da velocidade de onda.

3.2.3 Aplicações

O ensaio de ultra-som é muito utilizado para avaliar a qualidade do concreto. Pode ser aplicado na detecção de fissuras, vazios, deterioração por diversos fatores, como efeito gelo-degelo, ataques químicos ou ainda danos provocados pelo fogo.

Conforme citado anteriormente, quando utilizado em conjunto com outros métodos não destrutivos, ou com curvas de correlação pré-estabelecidas, pode ser utilizado para estimar a resistência do concreto.

De acordo com o ACI 228 (1989), a relação entre o ganho de resistência e o aumento da velocidade de onda não é linear, esta relação não é a mesma em idades iniciais e avançadas. A velocidade aumenta com o aumento da resistência, porém não na mesma proporção, sendo que, a partir de certo nível de resistência, o aumento desta passa a não ser detectado pelo ultra-som.

3.2.4 Fatores que influenciam os resultados do ensaio

Segundo Bungey (1989), muitas variáveis no concreto influenciam na velocidade da onda ultra-sônica, entre elas as proporções da mistura, tipo e tamanho do agregado, idade do concreto, teor de umidade. Porém Lin, Lai e Yen (2003) ressaltam que alguns fatores que afetam significativamente a velocidade de propagação de onda não têm influência muito grande sobre a resistência do concreto. Por exemplo, aumentar o teor de agregado em uma mistura com relação água/cimento superior a 0,50 ocasiona uma diminuição acentuada na velocidade de onda mas causa pouca perda de resistência.

A seguir são descritos os fatores intervenientes e de que forma alteram a velocidade de onda.

3.2.4.1 Condições da superfície

Segundo Naik, Malhotra e Popovics (2004), deve haver um total acoplamento entre o transdutor e a peça, sem a existência de ar entre eles, bem como uma adequada pressão de contato, para que não ocorram erros devidos à transmissão da onda pelo ar. Para isso, a superfície da peça de concreto deve ser plana e livre de imperfeições, para que haja um perfeito posicionamento dos transdutores para a emissão e captação da onda. Pode-se utilizar para isso materiais que promovam a regularização da superfície, como graxa, vaselina, entre outros. Superfícies que receberam revestimento devem ser evitadas, já que o concreto nesta superfície pode não ser representativo daquele do restante da peça. Em superfícies extremamente rugosas, deve-se aplicar uma fina camada de resina tipo epóxi ou de uma argamassa de pega rápida (GRULLÓN et al., 2004, NAIK, MALHOTRA E POPOVICS, 2004).

3.2.4.2 Agregados

De acordo com Naik, Malhotra e Popovics (2004), tanto o teor quanto o tipo de agregado interferem na velocidade de onda ultra-sônica.

Agregados graúdos e miúdos têm módulo de elasticidade e velocidade de propagação da onda maiores do que o da pasta de cimento e, portanto, concretos com agregados de massas específicas maiores ou com maiores quantidades de agregado têm maior velocidade de propagação da onda ultra-sônica (CHUNG e LAW, 1983). Sturup et al. (1984) afirmam que a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas no concreto é maior do que na argamassa, que é maior do que na pasta, para um determinado nível de resistência.

Evangelista (2002) apresenta uma compilação de diversos estudos sobre a influência da dimensão do agregado graúdo na velocidade de onda, de onde se conclui que, quanto maior a Dimensão Máxima Característica do agregado graúdo utilizado, para a mesma quantidade, maior será a velocidade de propagação de onda na peça.

3.2.4.3 Proporções da mistura

Segundo Malhotra (1984), para uma mesma resistência à compressão, concretos leves têm velocidade de propagação menor do que concretos normais.

Sturup et al. (1984) afirmam que o nível de influência do proporcionamento da mistura na velocidade de onda é maior em idades maiores, sendo pouco significativa nas pequenas idades.

3.2.4.4 Tipo do cimento

Evangelista (2002) encontrou, comparando concretos com cimento CPIII e CPV, e mesma ordem de resistência, valores maiores de velocidade de propagação de onda para este último da ordem de 5%. Já Sturup et al. (1984) compararam concretos de Cimento Portland comum e de Alta Resistência Inicial, não encontrando diferenças significativas entre eles.

3.2.4.5 Temperatura

A velocidade passa a ser influenciada pela temperatura quando esta está acima de 30°C ou abaixo de 5°C. Entre estas temperaturas as influências não são significativas (NAIK, MALHOTRA E POPOVICS, 2004). Bungey (1989) mostra uma figura de Jones e Facaoaru que estima o efeito da temperatura na velocidade de onda (Figura 3.9). Já a BS 1881: Part 203(1986) fornece uma tabela para a correção das velocidades em temperaturas extremas.

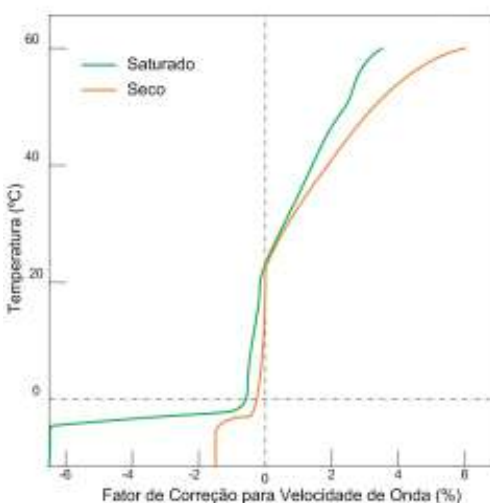


Figura 3.9 Efeito da temperatura. Fonte: Jones e Facaoaru (1974 apud Bungey, 1989).

Evangelista (2002) afirma que, para temperaturas de 40°C a 60°C ocorrem microfissuras internas no concreto, que não correspondem à redução na resistência à compressão, porém há a redução da velocidade. Já quando o concreto congela, a velocidade é maior, pois há água congelada em seu interior.

Meneghetti (1999) afirma que a velocidade de propagação de onda diminui com o aumento da temperatura.

3.2.4.6 Teor de umidade do concreto

Segundo Chung e Law (1983), o teor de umidade do concreto tem uma pequena influência na velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, sendo que esta aumenta com a umidade do concreto, e isto ocorre com maior intensidade em concretos com níveis de resistência menores (Grullón et al., 2004). Já a resistência à compressão, de acordo com Naik, Malhotra e Popovics (2004), diminui com o aumento da umidade da peça.

Bungey (1989) e Naik, Malhotra e Popovics (2004) afirmam que a velocidade em um concreto saturado pode ser cerca de 4 a 5% maior que no mesmo concreto em uma condição seca.

3.2.4.7 Presença de armaduras e fissuras

Carino (2004) afirma que, quando não há influência da armadura no concreto, a onda ultra-sônica tende a percorrer o menor caminho, uma linha reta entre os dois transdutores. Porém quando há presença de barras de aço localizadas paralelamente ao caminho das ondas, elas podem percorrer parte do caminho através destas barras. Como, segundo o ACI 228.1R-89 (1989), a velocidade de onda é aproximadamente 40 % maior no aço do que no concreto, a primeira onda a chegar ao transdutor-receptor percorreu o concreto e o aço, o que acarreta um menor tempo de propagação e uma maior velocidade aparente de propagação.

A influência das armaduras é função do diâmetro das barras e da sua posição em relação à direção da trajetória das ondas ultra-sônicas (GRULLÓN et al., 2004, CARINO, 2004). Segundo Bungey (1989), armaduras na direção longitudinal interferem mais do que na direção transversal. Além disso, na direção longitudinal, barras com diâmetro inferior a 20 mm praticamente não interferem em resultados para concretos com velocidades de onda acima dos 4 Km/s, porém barras com diâmetro superior a 6mm exercem influência significativa.

De acordo com Bungey (1989), nestes casos, utilizam-se fatores de correção, como os propostos pelas normas BS 1881: Part 203(1986) e RILEM NTD1(1972).

Dornelles et al. (2004) afirmam que, em presença de armaduras, o teor de umidade da peça influi nos resultados de velocidade de propagação de onda, exigindo um fator de correção diferente para regiões com alta e baixa densidade de armadura. Este fator é importante quando são feitas medidas em concretos nas idades iniciais, já que o teor de umidade da peça é alto.

Já a presença de fissuras no concreto forçam a onda a contorná-las, tornando o caminho percorrido maior (Sturup et al., 1984).

3.2.4.8 Comprimento de propagação de onda, forma da peça e frequência do transdutor-emissor

Bungey (1989) recomenda um comprimento mínimo para propagação das ondas:

- 100 mm para o concreto com agregado de dimensão máxima menor que 30 mm;
- 150 mm para o concreto com agregado de dimensão máxima menor que 45 mm.

O transdutor mais utilizado em concreto é o de 54 kHz, mas também são adotados os de frequências entre 20 e 200 kHz. O fator preponderante na escolha da frequência do transdutor é o tamanho da peça, já que a distância a ser percorrida não pode ser inferior ao comprimento da onda (λ), onde:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (3.24)$$

Onde:

V: velocidade da onda;

f: frequência de vibração.

A dimensão máxima dos agregados graúdos também deve ser inferior ao comprimento da onda, para evitar a redução da energia da onda e a possível perda de sinal no receptor (Bungey, 1989).

3.2.5 Normalização

No Brasil existe uma normalização vigente para o ensaio de ultra-som, a NBR 8802 (1994). Há também uma norma para o Mercosul, a NM 58 (1996). Além destas, também adota-se a norma americana, a ASTM C597 (1983). Por ser um teste muito difundido, a maioria dos países tem normalização própria para ensaios de ultra-som. Um estudo comparativo entre algumas destas normalizações pode ser encontrado em Komlos et al. (1996).

3.3 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS A PAVIMENTOS DE CONCRETO

Métodos não destrutivos podem ser utilizados em pavimentos de concreto para monitorar seu ganho de resistência com o passar do tempo, bem como para avaliar o estado de deterioração em estruturas prontas. No primeiro caso, pode-se utilizar métodos como ultra-som e maturidade a fim de estimar a resistência à tração na flexão, compressão ou módulo de elasticidade, monitorando sua evolução para permitir a liberação do tráfego assim que o pavimento indicar, por meio destes métodos, ter atingido os valores mínimos dos parâmetros especificados. Isso permite que se utilize métodos de aceleração do processo de hidratação do cimento, quando necessário, para antecipar a liberação (PINTO, 2004a).

Whiting et al. (1994) compararam os métodos da maturidade, velocidade da onda ultra-sônica, cilindros curados à mesma temperatura do pavimento e cilindros isolados termicamente para avaliar a precisão em relação à estimativa de resistência à compressão de vários pavimentos de concreto *fast track*. Os autores concluíram que o método da

maturidade estimou resistências mais próximas das obtidas por testemunhos retirados dos pavimentos, como pode ser visualizado nas Figuras 3.10 e 3.11.

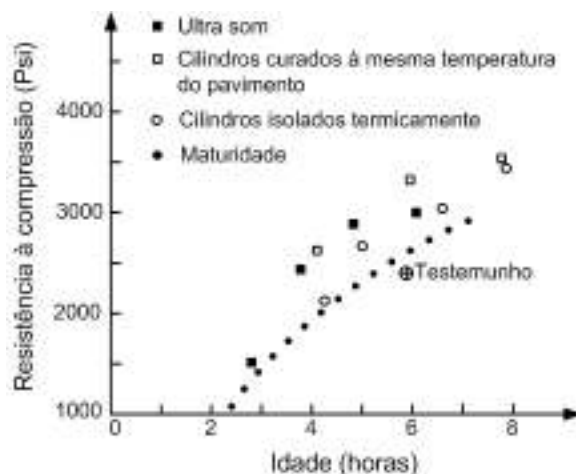


Figura 3.10 Comparação de diferentes métodos na estimativa da resistência (WHITING et al., 1994).

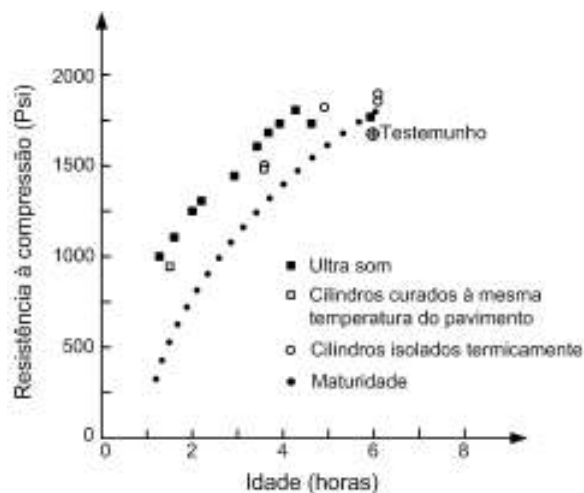


Figura 3.11 Comparação de diferentes métodos na estimativa da resistência (WHITING et al., 1994).

Delatte, Williamson e Fowler (2000) estudaram a evolução da resistência à compressão, compressão diametral, aderência à tração e ao cisalhamento na interface, em pavimentos de concreto aderidos, muito utilizados em reparos e também em tabuleiros de pontes, onde é extremamente importante a aderência entre o concreto novo e a camada inferior. Desenvolveram curvas de maturidade para estes diferentes parâmetros.

Yaman et al. (2001) compararam o uso dos métodos direto e indireto de transmissão de onda ultra-sônica em lajes de concreto, representando um tabuleiro de ponte, e concluíram que os dois métodos fornecem resultados similares em seus ensaios, sendo viável então a utilização em pavimentos, onde somente o método indireto é possível de ser adotado, na face superior da placa.

Estas aplicações vêm mostrar a flexibilidade, eficiência e praticidade do uso de ensaios não destrutivos em pavimentos de concreto.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Objetivando contribuir para a difusão do pavimento de concreto de concreto *fast track* no Brasil, procurou-se realizar um programa experimental que contribuísse para preencher as lacunas referentes ao assunto, de forma a torná-lo prática freqüente em nosso país, buscando analisar possíveis traços a serem adotados com esta tecnologia.

Desta forma, foram estudados diferentes traços de concreto utilizados em pavimentos de concreto *fast track*, internacionalmente, ou em pavimentos de concreto empregados no Brasil, fazendo-se pequenas modificações de forma a atender os requisitos necessários para obter altas resistências iniciais e uso de materiais disponíveis na região da Grande Florianópolis.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental foi dividido em duas etapas: primeiramente caracterizou-se as Energias Aparentes de Ativação para cinco diferentes misturas, através de ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, ultra-som e início e fim de pega. A partir destes resultados, foram construídas as curvas de maturidade para cada mistura, de modo a possibilitar a escolha da mais apropriada para o uso brasileiro. Posteriormente, na segunda etapa, para a mistura mais adequada, moldou-se uma placa de pavimento em tamanho real, monitorou-se o ganho de resistência do concreto e submeteu-se a placa à carga.

Na primeira etapa, foram estudados cinco diferentes traços, sendo:

- Traço I: Traço do pavimento de concreto do Túnel Antonieta de Barros, em Florianópolis;
- Traço II: Traço para um possível uso em pavimentos de concreto *fast track*, utilizando agregados semelhantes aos do Traço I;

- Traço III: Traço do pavimento rígido da BR 290 (Free-Way), executado pela concessionária Concepa;
- Traço IV: Adaptação do Traço III, com algumas modificações, visando acelerar o ganho de resistência e adaptando os materiais de forma a permitir a execução do concreto por uma concreteira da região;
- Traço V: Adaptação do Traço IV, com modificações na relação água/materiais secos, a fim de melhorar a trabalhabilidade para viabilizar a execução do concreto por uma concreteira da região, bem como a posterior moldagem da placa de concreto;

Os traços que seguiram outros já estudados procuraram manter a granulometria dos agregados semelhante ao original.

Realizaram-se ensaios para a obtenção dos valores de Energia Aparente de Ativação para cada mistura, a partir de diferentes parâmetros, e posteriormente traçar-se curvas de maturidade para cada um destes. Para o Traço I os ensaios em concreto e de resistência à compressão em argamassa fazem parte do trabalho de Hadlich e Pflieger (2006), justificando-se assim eventuais diferenças entre procedimentos de moldagem e ensaio.

A Figura 4.1 mostra um fluxograma ilustrando o programa experimental.

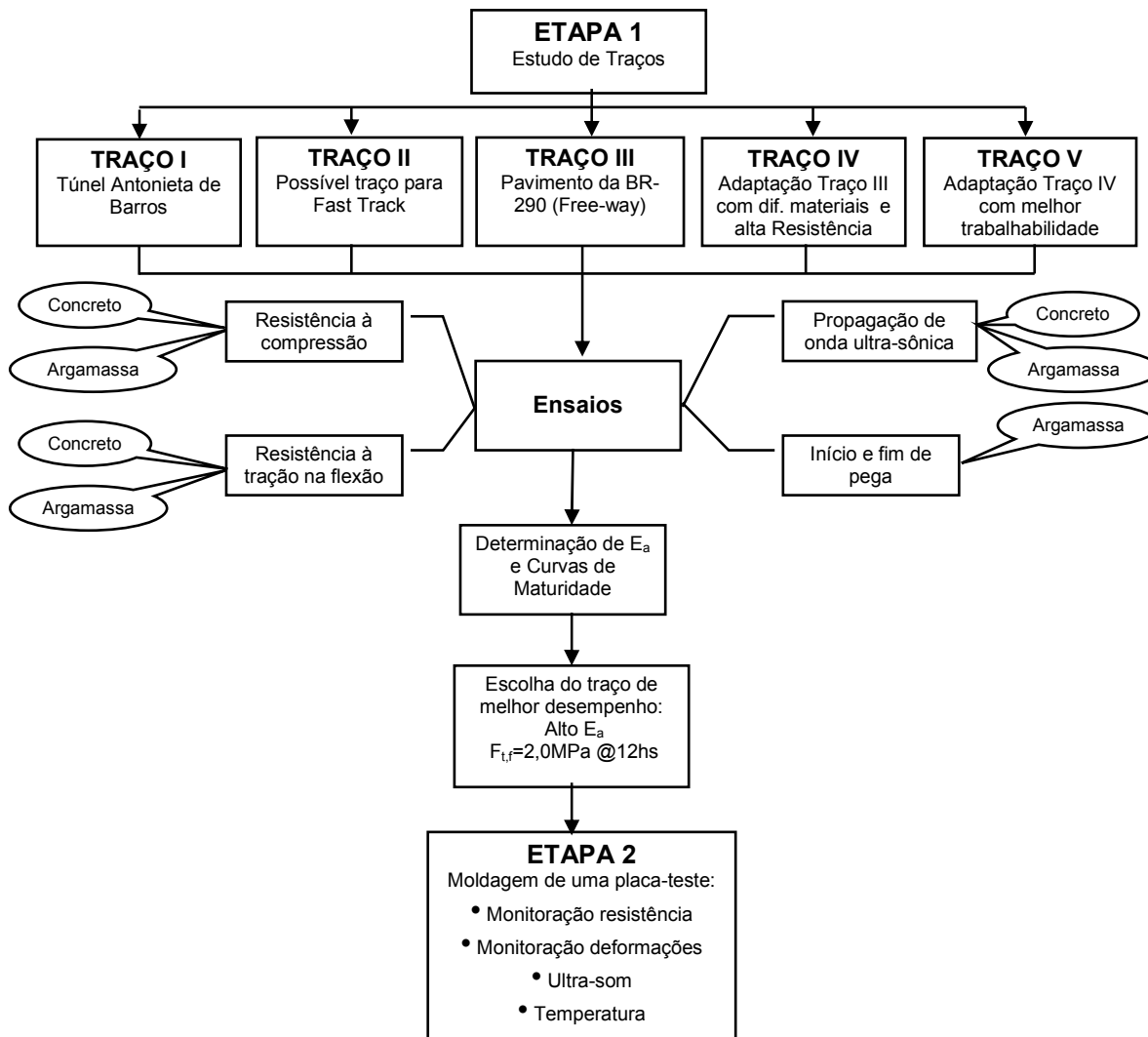


Figura 4.1 Fluxograma do Programa Experimental.

As características de cada traço estudado, bem como os ensaios realizados, são descritos a seguir.

4.2 TRAÇOS ESTUDADOS

No desenvolvimento desta pesquisa buscou-se um traço que fosse apropriado ao uso brasileiro em aplicações do tipo *fast track*, a partir dos cinco traços estudados. Do traço em massa do concreto chegou-se aos traços de argamassa para E_a e para pega, processos descritos posteriormente nos itens 4.3.2.1.1 e 4.3.2.1.5. Os traços estudados seguiram

basicamente os que serviram como referência, sofrendo apenas modificações nos agregados, utilizando os disponíveis na região.

Na produção dos concretos foi utilizado cimento, areia, brita, água e aditivo, porém os proporcionamentos e as características dos materiais variaram em cada traço, devido às necessidades de cada um. A seguir serão especificados os traços estudados, e no Anexo A são descritas as características de cada um destes materiais, para cada traço. A água utilizada em todos os traços é potável, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Florianópolis.

Primeiramente estudou-se o Traço I, utilizado no pavimento do túnel Antonieta de Barros, executado na cidade de Florianópolis em 2002, conforme Giublin et al. (2003). Foram necessárias pequenas modificações na granulometria dos agregados, de forma a adaptar-se ao produto atualmente disponível no mercado, além da mudança no aditivo plastificante por outro semelhante, já que o utilizado originalmente não é mais fabricado.

O Traço II foi dosado a partir do método da PCA (2002), utilizando os mesmos materiais do Traço I, porém com modificações, visando acelerar o ganho de resistência.

No Traço III estudou-se o traço do pavimento rígido da BR 290 (Free-Way), executado pela concessionária Concepa, segundo Giublin [200-]. Mantiveram-se os materiais, apenas com pequena variação na granulometria dos agregados, e com uma modificação no tipo de aditivo, passando de plastificante para superplastificante, visando uma melhor trabalhabilidade.

O Traço IV é uma adaptação do Traço III, utilizando materiais disponíveis na concreteira, além do cimento CPV, visando uma aceleração no ganho da resistência, e a modificação no tipo de aditivo, para diminuir a relação água/cimento, promovendo assim uma melhor trabalhabilidade.

O Traço V é uma adaptação do Traço IV, utilizando exatamente os mesmos materiais, mas com o aumento da relação água/materiais secos, a fim de melhorar a trabalhabilidade para viabilizar a execução do concreto por uma concreteira da região, bem como a posterior moldagem da placa de concreto.

Os traços dos concretos moldados são descritos na Tabela 4.1, que também indica o tipo de material utilizado em cada mistura, caracterizados no Anexo A.

Tabela 4.1 Traços de concreto estudados

		Traço (kg/m ³)				
		I	II	III	IV	V
Cimento	Tipo	CPI ARI RS (1)	CPI ARI RS (1)	CPII-Z	CPI ARI RS (2)	CPI ARI RS (2)
	Consumo	455	468	411	422	538
Areia	Tipo	A	B	C	D	D
	Quantidade	678.0	720.7	807.0	711.9	640.2
Brita	Tipo	A	C	A	F	F
	Quantidade	528.0	510.1	167.7	958.4	861.9
Aditivo	Tipo	Lignosulfonato	Lignosulfonato	Naftaleno	Éster policarboxílico modificado	Éster policarboxílico modificado
	Quantidade	2.73	3.74	4.31	4.22	5.38
a/c		0.44	0.42	0.39	0.30	0.30

Como os ensaios para a obtenção da Energia de Ativação e dos tempos de início e fim de pega são realizados em argamassa, foram feitas as modificações nos traços dos concretos já descritas anteriormente. Os traços utilizados nas argamassas para os ensaios para a obtenção da Energia Aparente de Ativação e para o início e fim de pega estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Traços de Argamassas

		Materiais	Traço I	Traço II	Traço III	Traço IV	Traço V
Argamassa (Ea)	Cimento		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Areia média		2.32	2.18	2.72	1.59	1.12
	Areia fina		-	-	-	0.68	0.48
	Água		0.44	0.42	0.39	0.30	0.30
	Aditivo		0.006	0.008	0.010	0.010	0.010
Argamassa (Pega)	Cimento		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Areia média		1.49	1.54	1.96	1.69	1.19
	Areia fina		-	-	-	0.72	0.51
	Água		0.44	0.42	0.39	0.30	0.30
	Aditivo		0.006	0.008	0.010	0.010	0.010

4.3 PROGRAMA DE ENSAIOS REALIZADOS

Os experimentos realizados foram referentes a ensaios de obtenção da Energia Aparente de Ativação das misturas (através de ensaios mecânicos de resistência à compressão e à tração na flexão em argamassas, ensaios de propagação de onda ultrassônica e de início e fim de pega), caracterização das propriedades mecânicas destas (resistência à compressão e à tração na flexão em concreto), e posteriormente a simulação de uma placa de pavimento em tamanho real, monitorando-se o ganho de resistência, aplicando-se um carregamento, monitorando-se tensões e deformações.

Todas as atividades, com exceção daquelas especificadas no decorrer do texto, foram desenvolvidas no Grupo de Pesquisas e Ensaios não Destrutivos (GPEND), no Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) e no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEC/UFSC), no período de julho de 2005 a novembro de 2006.

4.3.1 Fatores não controláveis

Existem variáveis no processo de produção dos concretos e argamassas, bem como na realização dos ensaios, as quais não podem ser controladas pela equipe técnica, podendo provocar erros experimentais. Estas variáveis são a temperatura e umidade relativa ambiente na data da mistura e moldagem dos corpos-de-prova, operador, efeito da betonada.

4.3.2 Ensaios realizados

A seguir serão descritos os ensaios realizados durante o programa experimental.

4.3.2.1 Obtenção dos Valores de Energia Aparente de Ativação

Segundo a ASTM C 1074 (1998), a presença de agregado graúdo não interfere nos valores de Energia Aparente de Ativação. Portanto, utilizou-se argamassa para a obtenção deste parâmetro. Os processos de produção das argamassas, bem como os processos para a obtenção de cada parâmetro, estão descritos a seguir.

4.3.2.1.1 Produção da Argamassa

Segundo a ASTM C 1074 (1998), para ensaios de Energia de Ativação proporciona-se uma mistura de argamassa usando a proporção agregado miúdo/cimento (em massa) igual à proporção agregado graúdo/cimento da mistura de concreto. Além disso, mantém-se a relação água/materiais cimentícios e a proporção de aditivo.

Para a confecção das argamassas utilizou-se uma argamassadeira, tipo misturador planetário de eixo vertical. O processo de mistura foi colocar o cimento e a areia, misturando-os por um minuto, adicionar a água, misturar por mais dois minutos e em seguida o aditivo, misturando por mais três minutos. À exceção do Traço IV, onde, devido à especificações do fabricante do aditivo superplastificante utilizado, modificou-se o processo de mistura, colocando a água com o aditivo, adicionando-se o cimento durante um minuto, misturando por um minuto, acrescentando a areia por um minuto e meio, misturando-se por mais um minuto e meio. Após este procedimento, iniciou-se então a moldagem dos corpos-de-prova nas fôrmas já com desmoldante.

A cura das argamassas se deu em câmaras climatizadas à temperatura constante de 13 ou 15°C, 30 e 50°C ($\pm 2^\circ\text{C}$), inicialmente nas fôrmas cobertas com filme plástico e, após o desmolde, em cura imersa.

O ambiente de temperatura controlada, de 13 ou 15°C, foi obtido utilizando-se caixa de isopor com água à temperatura constante, bombeando-a do interior da caixa para uma serpentina em uma geladeira, voltando a água resfriada à caixa. O monitoramento da temperatura da água se deu através de um termostato que acionava uma bomba para a circulação da água pela serpentina sempre que sua temperatura ultrapassasse a especificada.

Os corpos-de-prova permaneciam imersos em água nesse ambiente climatizado após o desmolde.

O ambiente de temperatura controlada de 30°C consistiu em uma caixa semelhante à anterior, porém o termostato monitorava a temperatura acionando um aquecedor de água sempre que a temperatura ficava abaixo do especificado. Igualmente os corpos-de-prova permaneciam imersos.

Já para a temperatura controlada de 50°C foi utilizado um ambiente igual ao de 30°C, e alguns dos traços utilizaram uma câmara climática com temperatura e umidade controladas (Figura 4.2). Também nesta temperatura os corpos-de-prova permaneciam imersos.



Figura 4.2 Câmara climática.

4.3.2.1.2 Resistência à compressão

O procedimento ASTM C 1074 (1998) prevê seis idades de ruptura para a obtenção da curva de desenvolvimento da resistência com o tempo. Para isso, estabelece que o primeiro ensaio deve ser realizado na idade em que a argamassa tenha atingido a resistência à compressão de 4 MPa, aproximadamente. O tempo que se passou desde o momento da adição da água à mistura até o alcance desta resistência passa a ser a idade inicial. Os ensaios subseqüentes devem ser realizados em idades duplicadas com relação à idade

inicial, até a obtenção das seis idades de ruptura. Por exemplo, se o primeiro ensaio for realizado a 7 horas, os seguintes deverão ser realizados a 14, 28, 56, 112 e 224 horas de idade. Para o cálculo da resistência média na idade de ruptura, foram utilizados pelo menos três exemplares.

Foram moldados 18 corpos-de-prova nas dimensões 5,0x5,0x5,0 cm, em duas camadas, aplicando-se em cada uma delas 32 golpes, segundo recomendações da ASTM C 109a (2002), Figura 4.3. Procedeu-se então o arrasamento da argamassa, cobriu-se as fôrmas com filme plástico a fim de evitar a evaporação de água, e em seguida colocou-se os moldes metálicos nas câmaras climáticas.



Figura 4.3 Produção dos corpos-de-prova cúbicos de argamassa.

Uma hora antes do primeiro ensaio, os corpos-de-prova foram retirados das fôrmas e colocados em cura imersa na temperatura indicada. No momento do ensaio os corpos-de-prova foram retirados da água, secados superficialmente e submetidos à carga, seguindo as recomendações da ASTM C 109a (2002).

4.3.2.1.3 Resistência à tração na flexão

O procedimento para a produção da argamassa, bem como os traços, foram os mesmos dos corpos-de-prova de resistência à compressão, citados no item 4.2.2.1.1. Foram moldados, para cada traço, 18 corpos-de-prova nas dimensões 4,0x4,0x16,0 cm, em duas camadas, aplicando-se em cada uma delas 12 golpes com um soquete retangular de base

8x2cm, feito de material não absorvente e não abrasivo, segundo a ASTM C 348 (2002), Figura 4.4. Após seguiu-se o mesmo procedimento dos corpos-de-prova de resistência à compressão para o arrasamento, à proteção contra a evaporação de água, à cura em câmara climática e os procedimentos anteriores ao ensaio.



Figura 4.4 Produção dos corpos-de-prova cúbicos de argamassa.

Como não há especificações normativas para ensaios para obtenção de Energia Aparente de Ativação para resistência à tração na flexão, as idades de ruptura adotadas foram as mesmas utilizadas para os ensaios de resistência à compressão. Assim, três exemplares foram submetidos ao ensaio de flexão à três pontos, com carga centrada e distância entre os apoios de 12 cm, de acordo com a ASTM C 348 (2002).

4.3.2.1.4 *Ultra-som*

Para a obtenção da Energia Aparente de Ativação a partir da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, utilizaram-se os mesmos corpos-de-prova de argamassa do ensaio de resistência à tração na flexão, descritos no item 4.2.2.1.3, realizando leituras de ultra-som imediatamente antes da ruptura dos exemplares.

Para estes ensaios foi utilizado o equipamento Pundit, com transdutores de diâmetro 25 mm e frequência de 200 kHz, seguindo as recomendações da NBR 8802 (1994), não havendo assim problemas quanto ao comprimento de onda. Foram ensaiados três corpos-de-prova para cada idade, coincidente com as idades de ruptura. A transmissão da onda

ultra-sônica foi direta, através do comprimento da peça, sendo feitas duas leituras em cada corpo-de-prova.

4.3.2.1.5 Início e fim de pega

Alternativamente, realizaram-se ensaios de início e fim de pega a fim de caracterizar os valores de Energia Aparente de Ativação das misturas também a partir deste parâmetro, seguindo os procedimentos apresentados por Pinto e Hover (1999). Neste caso, obtém-se dois valores para Energia Aparente de Ativação, um para o intervalo antes da pega e outro para o intervalo durante a pega, ou seja, entre o início e o fim de pega.

Para este ensaio a ASTM C 403 (1996) recomenda que seja produzida uma mistura de concreto e que esta seja passada em uma peneira de abertura 4,75mm, e a argamassa passante seja utilizada nos testes, de forma a evitar que a presença do agregado graúdo interfira nos resultados de penetração. Porém, como simplificação, foi produzida uma argamassa em traço semelhante ao do concreto equivalente, apenas com a supressão do agregado graúdo do traço. Para produção de argamassa foi adotado o mesmo processo descrito no Item 4.3.2.1.1.

Foram utilizados moldes cilíndricos de PVC de 152 mm de diâmetro, colados com silicone em um fundo de vidro. Para cada traço foram curados três corpos-de-prova em cada temperatura, sendo utilizadas três temperaturas distintas. A argamassa produzida foi colocada nos moldes em uma camada, com uma altura mínima de 152 mm, respeitando uma distância mínima de 13 mm do topo do corpo-de-prova, e recebeu 30 golpes com soquete metálico. Em dois exemplares por temperatura foi inserido um termopar para monitorar a temperatura durante o processo. Os corpos-de-prova foram então cobertos com filme plástico para evitar a evaporação de água e colocados em seus respectivos ambientes de temperatura controlada.

Durante o processo de cura, os corpos-de-prova foram retirados das câmaras e a água de exsudação presente na superfície foi retirada. Após cada leitura os corpos-de-prova eram novamente cobertos e levados à câmara climática.

O ensaio de resistência à penetração consiste na obtenção da força necessária para que uma agulha, de conhecido diâmetro, penetre 25mm na argamassa em um período de 10 segundos. A resistência à penetração é calculada a partir da pressão de contato da agulha na argamassa.

O momento em que a resistência à penetração atinge 3,4 MPa corresponde ao início de pega, enquanto 27,6 MPa é considerado o fim de pega da mistura (ASTM C 403, 1996).

Com os dados de início e fim de pega para cada temperatura, chega-se a valores de Energia de Ativação para antes da pega e durante a pega.

4.3.2.2 Obtenção das Curvas de Maturidade

Na utilização do Método da Maturidade, precisa-se conhecer o ganho da resistência com o tempo, em condições de temperatura controlada. A partir daí, a resistência do concreto em qualquer regime de temperatura pode ser estimada a partir das funções de maturidade (Pinto, 2004a). Para obter-se tal informação, moldaram-se corpos-de-prova de concreto para ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão.

4.3.2.2.1 Produção do Concreto

A mistura do concreto foi executada mecanicamente, através de uma betoneira intermitente de queda livre e eixo inclinado, com pás solidárias a cuba, e capacidade de mistura de 350 litros. Antes da concretagem a betoneira recebeu uma imprimação com argamassa.

Todos os materiais foram dosados em massa, inclusive a água. A seqüência de colocação dos materiais foi a seguinte: agregado graúdo, uma parte da água, o cimento, o agregado miúdo e o restante da água, e por fim o aditivo, à exceção do Traço IV, onde, devido à especificações do aditivo utilizado, a seqüência de colocação dos materiais modificada foi a seguinte: agregado graúdo, água, aditivo, cimento, agregado miúdo.

O Traço V foi dosado em uma central de concreto, em um caminhão betoneira, sendo a ordem de mistura dos materiais para este traço a seguinte: brita, água, cimento, aditivo e areia.

A determinação da consistência do concreto foi realizada através do ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump Test), de acordo com a NBR 7223 (1992).

Foi adotado o processo de adensamento mecânico (vibrador de agulha), seguindo as prescrições da NBR 5738 (1994), exceto no Traço I, onde os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados em quatro camadas, e o adensamento foi manual, aplicando-se 30 golpes em cada camada, e os corpos-de-prova prismáticos foram moldados em duas camadas com 128 golpes em cada uma.

Foram moldados para cada traço 18 corpos-de-prova prismáticos 15 x 15 x 50 cm, e 18 corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões 15x30 cm.

As fôrmas utilizadas foram confeccionadas em compensado plastificado, para corpos-de-prova prismáticos, e para corpos-de-prova cilíndricos foram utilizadas fôrmas metálicas. Como desmoldante foi utilizada uma emulsão à base de ácidos graxos.

Concluído o adensamento, as fôrmas foram cobertas com plástico, objetivando-se atenuar os efeitos de retração do concreto pela evaporação da água de amassamento nas primeiras horas após a concretagem, permanecendo nas fôrmas em torno de 24 horas. Em seguida, foram desmoldados e colocados em câmara úmida, com temperatura média de 26,5°C e umidade relativa superior a 95%, até atingir a idade de ensaio, quando três exemplares de cada tipo foram ensaiados.

4.3.2.2.2 Ensaio de Resistência à compressão simples

A NBR 5739 (1994) estabelece o método de ensaio de resistência à compressão do concreto como a aplicação controlada de uma carga vertical centrada na face do corpo-de-prova cilíndrico de concreto, ficando este corpo-de-prova disposto entre os pratos de compressão da máquina de ensaio. Foram ensaiados três exemplares para cada idade de 1,

3, 7, 14, 21 e 28 dias, após terem sua base e topo fresados com a finalidade de regularizar a superfície para a aplicação da carga, exceto o Traço 1, onde foram capeados com enxofre.

4.3.2.2.3 Ensaio de Resistência à tração na flexão

Os corpos-de-prova prismáticos de concreto foram submetidos à ensaio de resistência à tração na flexão com quatro pontos, com distância entre os apoios de 45cm e distância entre os pontos de aplicação de carga de 15cm, seguindo os procedimentos da NBR 12142 (1991). Nos apoios e pontos de aplicação de carga foram colocadas borrachas para uniformizar a aplicação da carga.

4.3.2.2.4 Ensaio de Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-sônicas

Imediatamente antes da ruptura dos corpos-de-prova de concreto foram realizados, nestes, ensaios de Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-sônicas, onde também foi utilizado o equipamento Pundit, porém os transdutores adotados foram de diâmetro de 50mm e frequência de 54kHz. Utilizou-se nos cilindros a transmissão direta através do comprimento da peça, sendo feitas duas leituras em cada corpo-de-prova. Já nos prismas de concreto foram realizados ensaios com transmissão direta ao longo da peça, sendo duas medidas em cada peça, e transmissão indireta na face lateral, fixando-se um transdutor a 10 cm da face e o outro transdutor movendo-se em pontos a cada 10 cm do anterior, gerando um total de três leituras. Para a obtenção da velocidade de propagação da onda, utilizou-se então o procedimento descrito no Item 3.2.1.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos diversos ensaios realizados para caracterizar cada mistura, bem como os resultados do programa experimental, obtendo-se, para cada parâmetro, os valores de Energia Aparente de Ativação, além das respectivas curvas de maturidade.

5.1 Traço I

5.1.1 Ensaios em argamassa

Conforme descrito anteriormente, para cada traço foram realizados ensaios em argamassa de resistência à compressão, à tração na flexão, ultra-som e início e fim de pega, para argamassas curadas a três temperaturas distintas.

Para cada idade foram ensaiados três corpos-de-prova à compressão, à tração na flexão e para a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas nas argamassas. As médias das resistências obtidas no Traço I estão descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em argamassas para o Traço I

13°C				30°C				50°C			
Idade (hs)	f _c (MPa)	f _{t,f} (MPa)	Vel. Média (m/s)	Idade (hs)	f _c (MPa)	f _{t,f} (MPa)	Vel. Média (m/s)	Idade (hs)	f _c (MPa)	f _{t,f} (MPa)	Vel. Média (m/s)
33	3,5	2,46	4103	16	4,3	3,19	4181	7,6	3,8	0,50	2413
66	21,0	5,18	4573	32	22,7	5,82	4547	15,9	23,6	4,72	3887
132	29,2	6,30	5425*	64	29,6	6,52	4902	30,4	22,8	5,57	4059
264	35,2	6,67	4724	128	32,3	6,50	5458*	61,7	24,0*	6,12	4160
529	39,1	7,18	4781	256	39,7	7,26	4918	122,8	38,0	5,68*	4303
1058	44,4	7,18	4980	512	39,5	6,72	5258	245,4	42,0	6,59	4378

As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram o ganho de resistência com o tempo para as três temperaturas de cura das argamassas do Traço I, enquanto a Figura 5.3 mostra a evolução da velocidade de propagação de onda para estas.

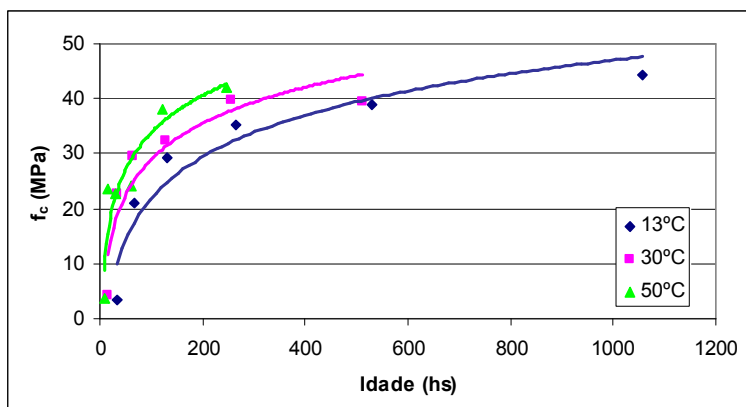


Figura 5.1 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço I.

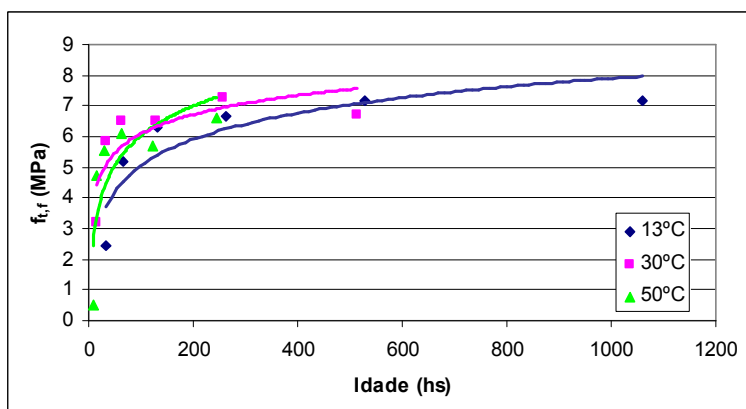


Figura 5.2 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço I.

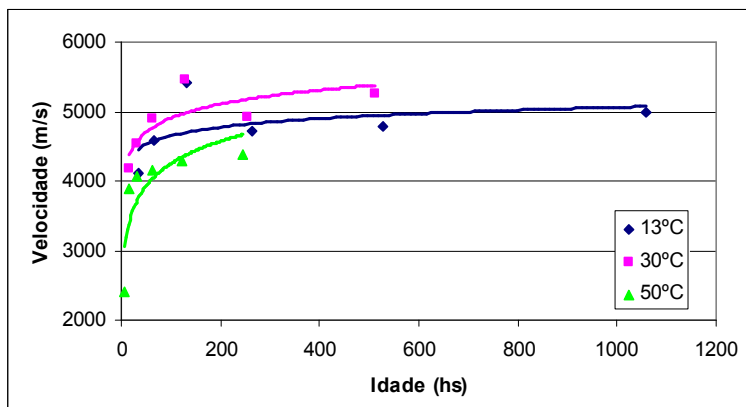


Figura 5.3 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em argamassas para o Traço I.

Nos ensaios de início e fim de pega também foram testados três exemplares em cada temperatura, sendo que os resultados estão ilustrados na Figura 5.4, onde as linhas vermelhas indicam a resistência à penetração correspondente ao início (3,5 MPa) e ao fim de pega (27,6 MPa).

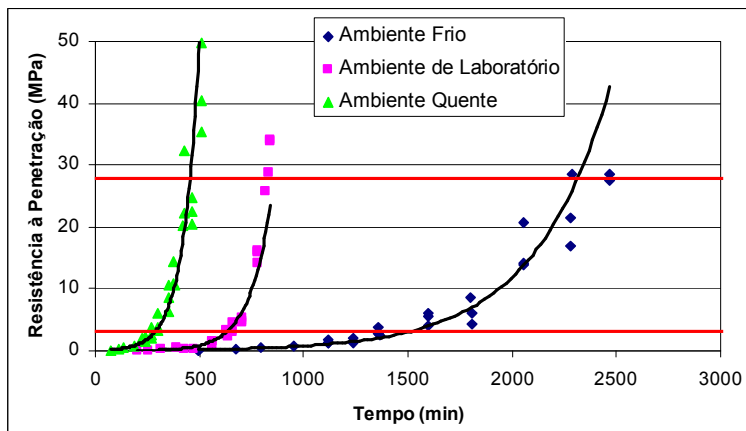


Figura 5.4 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço I.

A partir do método proposto pela ASTM C 403 (1992), utilizando regressão linear em um gráfico log-log, obtiveram-se os tempos de início e fim de pega para cada ambiente. Os termopares inseridos em dois dos corpos-de-prova de cada ambiente foram programados para efetuar uma leitura a cada minuto, e fazer uma média destas a cada dez leituras. Dos valores obtidos, tomou-se a média dos dois exemplares, do momento em que se adicionou

água à mistura até o momento em que se caracterizou o início de pega, e a partir daí até o fim de pega. Estes valores estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço I.

	Início de Pega		Fim de Pega	
	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)
Ambiente Frio	1461	9,0	2421	9,7
Ambiente de Laboratório	658	29,4	834	28,4
Ambiente Quente	285	38,6	463	50,0*

* Temperatura estimada devido à perda das leituras por defeito no equipamento.

5.1.2 Ensaio em concreto

Para os corpos-de-prova de concreto, em cada idade, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e ultra-som direto nos cilindros e direto e indireto nos prismas. Os resultados para o Traço I podem ser visualizados na Tabela 5.3 e nas Figuras 5.5 e 5.6.

Tabela 5.3 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som, em concretos, para o Traço I.

Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{t,r}$ (MPa)	Velocidade (m/s)		
			Cilindro		Prisma
			Direto	Direto	Indireto
1	16,23	3,32	4051	4144	3830
3	18,59	4,65	4183	4230	4112
7	28,84	5,02	4430	4371	3889
14	40,69	5,18	4481	4360	4114
21	45,20	5,25	4558	4416	-
28	36,55	5,12	4523	4553	4088

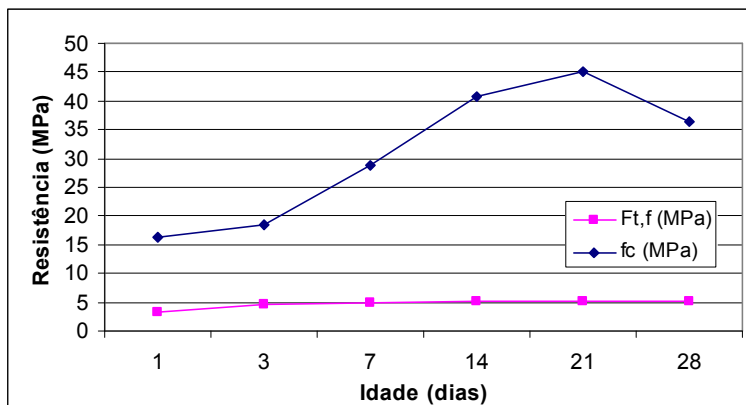


Figura 5.5 Evolução com a idade da resistência à compressão e à tração na flexão, em concreto, para o Traço I.

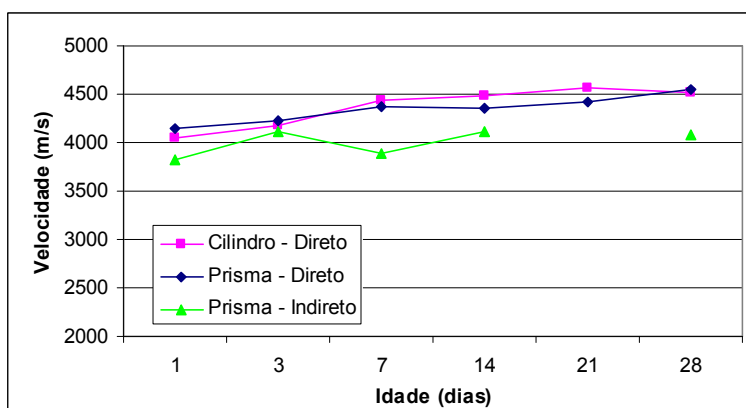


Figura 5.6 Evolução com a idade da velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço I.

Percebe-se que a resistência à compressão aos 28 dias diminuiu em relação as anteriores, não seguindo a evolução esperada. Apesar de improvável, este resultado partiu de uma média de três exemplares abaixo do esperado, não se encontrando justificativa para esta anomalia.

5.1.3 Curvas de Maturidade

A Energia Aparente de Ativação é obtida relacionando-se o inverso da temperatura com o logaritmo natural de K_t , no chamado gráfico de Arrhenius, como exemplificado na Figura 5.7. Faz-se uma regressão linear com o coeficiente angular da reta sendo

proporcional ao valor de E_a . Seguindo esta metodologia, foram confeccionados gráficos de Arrhenius para os resultados de resistência à compressão, de tração na flexão, velocidade de onda ultra-sônica e início e fim de pega. Os valores obtidos de Energia Aparente de Ativação estão apresentados na Tabela 5.4.

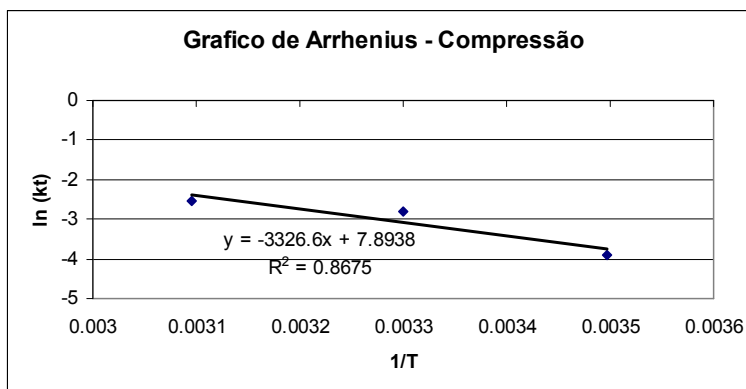


Figura 5.7 Exemplo de Gráfico de Arrhenius.

Tabela 5.4 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço I.

	Compressão	Tração na flexão	Ultra-som	Pega	
				Antes	Durante
E_a (KJ/mol)	27,7	32,7	24,9	38,0	31,7

Para a obtenção das curvas de maturidade, utilizou-se a função FHP, Equação 3.14, com Temperatura de Referência de 20°C, e valores de Energia Aparente de Ativação da Tabela 5.4. As curvas de maturidade estão apresentadas nas Figuras 5.8 a 5.10.

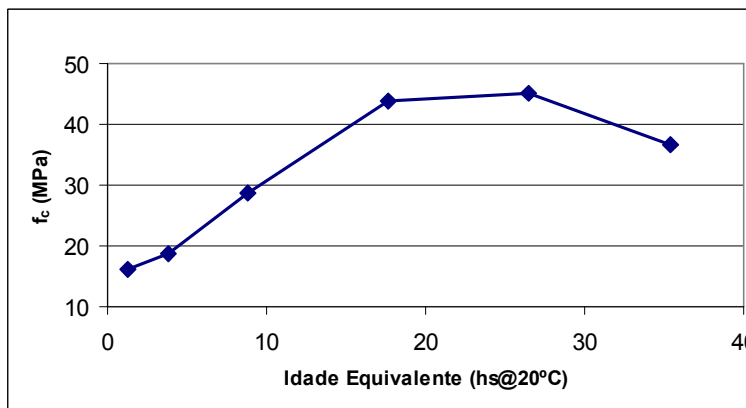


Figura 5.8 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço I.

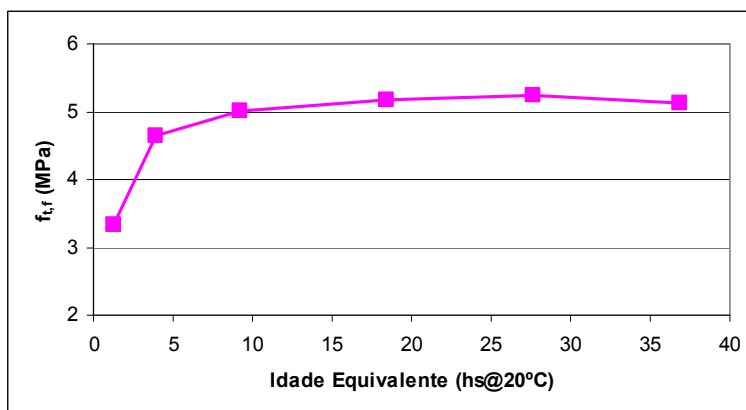


Figura 5.9 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço I.

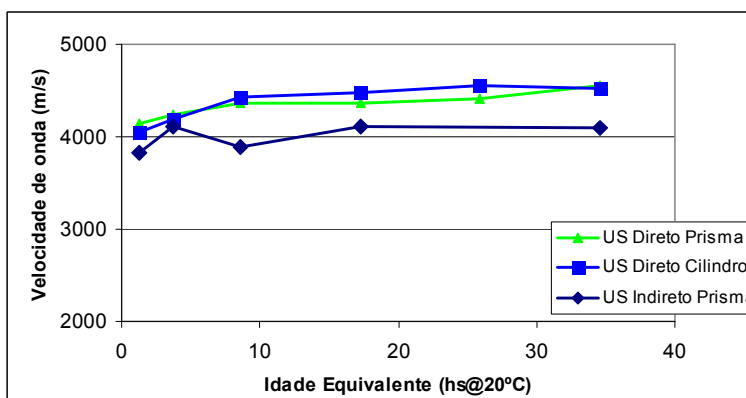


Figura 5.10 Curva de Maturidade para as Velocidades de onda Ultra-sônica do Traço I.

5.2 Traço II

5.2.1 Ensaios em argamassa

No Traço II, as argamassas foram curadas em temperaturas de 15, 30 e 50°C. Os resultados médios obtidos para resistência à compressão, tração na flexão e para a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas estão descritos na Tabela 5.5, e suas evoluções ilustradas nas Figuras 5.11 a 5.13.

Tabela 5.5 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em argamassas para o Traço II.

15°C				30°C				50°C			
Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,r}$ (MPa)	Vel, Média (m/s)	Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,r}$ (MPa)	Vel, Média (m/s)	Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,r}$ (MPa)	Vel, Média (m/s)
33	3,88	2,49	3979	21	10,33	2,59	3666	12	5,06	0,71	2474
66	12,50	7,31	4909	42	24,75	5,41	4165	24	16,37	5,66	4185
132	32,87	5,82	4842	84	29,33	6,48	4164	48	24,99	5,63	4176
264	31,23	4,31*	4083	168	31,33	6,10*	4119	96	28,35	6,25	4275
528	34,92	5,84*	4169	336	38,54	8,70	-	192	40,05	7,06	4385
1056	22,25	9,11	4496	672	40,71	7,93	4524	384	46,11	6,82	4325

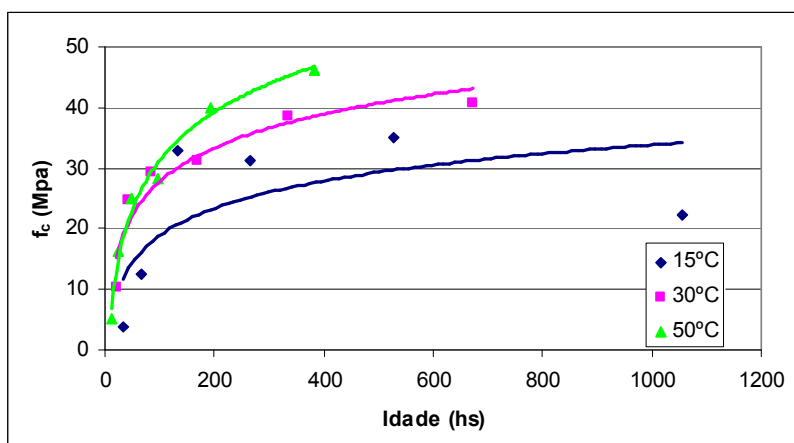


Figura 5.11 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço II.

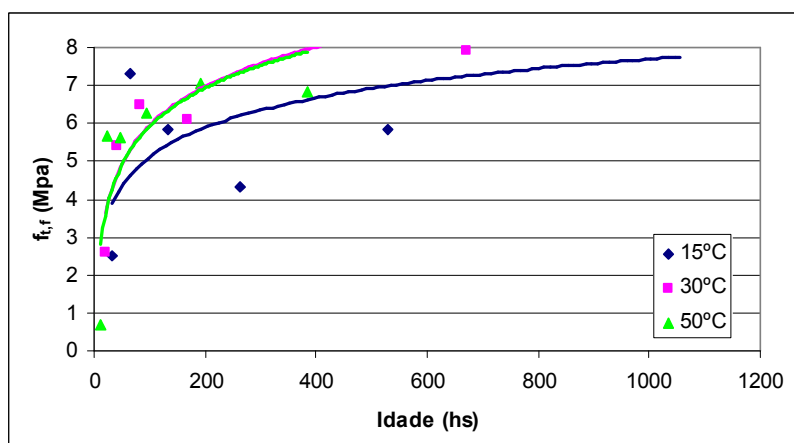


Figura 5.12 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço II.

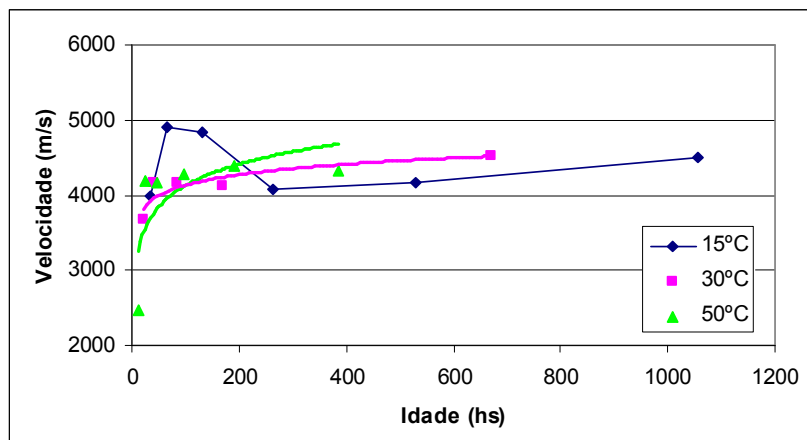


Figura 5.13 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em argamassas para o Traço II.

Os resultados dos ensaios de início e fim de pega para cada ambiente estão ilustrados na Figura 5.14, e a Tabela 5.6 mostra os tempos e temperaturas de início e fim de pega.

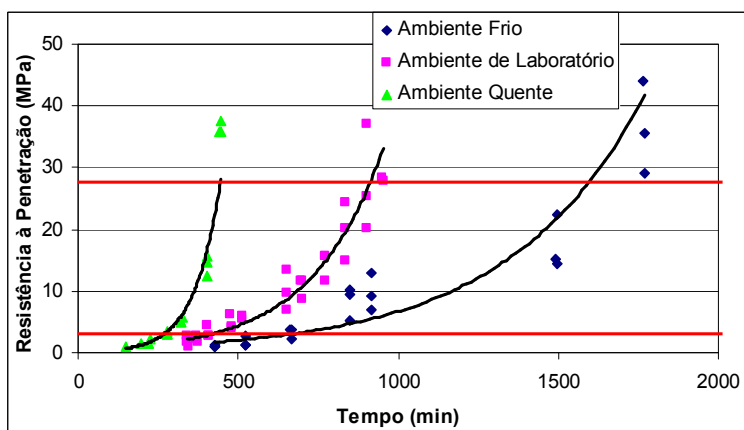


Figura 5.14 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço II.

Tabela 5.6 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço II.

	Início de Pega		Fim de Pega	
	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)
Ambiente Frio	634	23,9	1637	22,0
Ambiente de Laboratório	346	33,1	755	32,9
Ambiente Quente	274	41,0	455	50,4

5.2.2 Ensaio em concreto

Para os ensaios em concreto, a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e ultra-som direto nos cilindros e direto e indireto nos prismas podem ser visualizados na Tabela 5.7 e nas Figuras 5.15 e 5.16.

Tabela 5.7 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em concretos para o Traço II.

Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	Velocidade (m/s)		
			Cilindro		Prisma
			Direto	Direto	Indireto
1	19,7	3,70	3977	4144	3872
3	28,0	4,81	4340	4274	3837
7	40,4	5,19	4559	4434	4051
14	44,2	6,33	4461	4439	4113
21	45,8	5,97	4439	4489	4238
28	40,3	5,88	4497	4492	4152

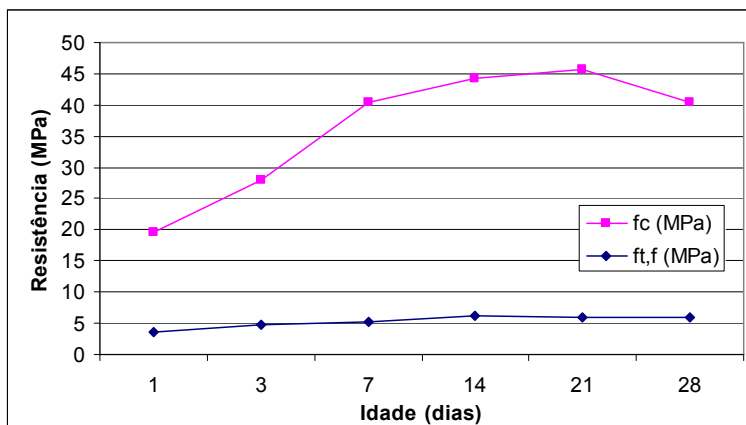


Figura 5.15 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão em concreto para o Traço II.

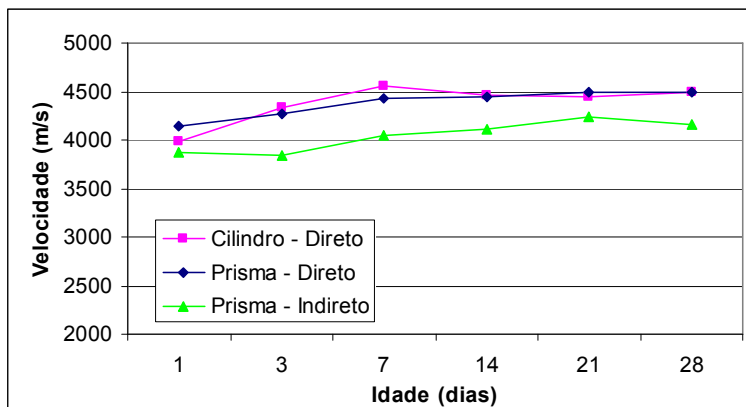


Figura 5.16 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço II.

Assim como no Traço I, houve um decréscimo na resistência à compressão dos concretos aos 28 dias, fato sem motivo aparente.

Foi adotado um exemplar de concreto prismático e outro cilíndrico, para os quais foi monitorado o ultra-som em cada idade, sempre no mesmo corpo-de-prova, chamado de “Referência”. Os resultados estão descritos na Tabela 5.8 e Figura 5.17.

Tabela 5.8 Resultados da evolução com a idade, da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência para o Traço II.

Idade (dias)	Velocidade (m/s)		
	Cilindro	Prisma	
	Direto	Direto	Indireto
3	4260	4260	3755
7	4435	4441	3986
14	4451	4398	3852
21	4373	4511	4545
28	4413	4519	4137

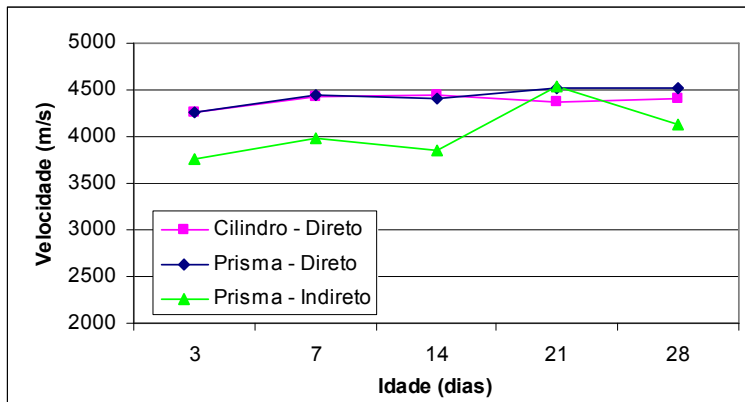


Figura 5.17 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência para o Traço II.

Os resultados de velocidade de onda ultra-sônica nos concretos teve uma evolução esperada, não havendo diferenças significativas entre os valores dos exemplares ensaiados para o de referência. Ainda assim, os resultados obtidos pelo método direto foram satisfatórios em relação aos do método indireto.

5.2.3 Curvas de Maturidade

Neste traço, os valores de velocidade de ultra-som em argamassa não permitiram que se encontrasse o valor de Energia de Ativação deste parâmetro para esta mistura, portanto, não foi possível traçar a curva de maturidade. As curvas de maturidade para resistência à compressão e à tração na flexão para o Traço II estão apresentadas nas Figuras 5.18 e 5.19.

Tabela 5.9 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço II.

	Compressão	Tração na flexão	Pega	
			Antes	Durante
Ea (KJ/mol)	19,7	26,2	38,5	47,1

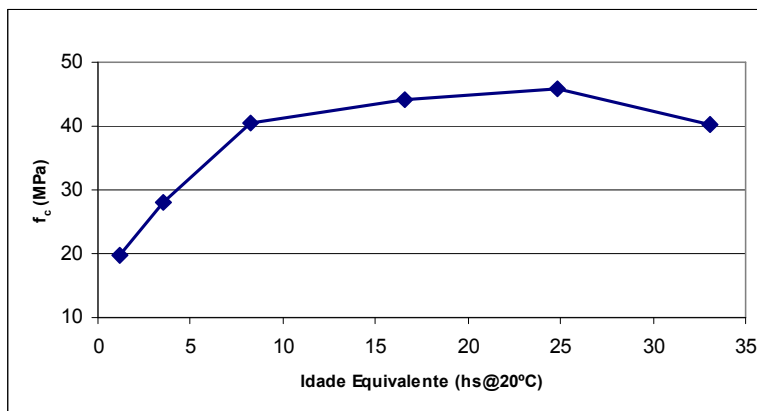


Figura 5.18 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço II.

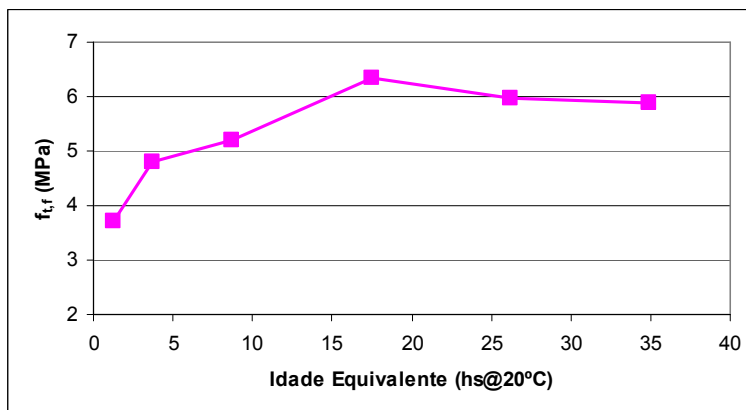


Figura 5.19 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço II.

5.3 Traço III

5.3.1 Ensaios em argamassa

Para o Traço III, os resultados de ensaios em argamassa estão demonstrados na Tabela 5.10 e Figuras 5.20 a 5.22. Durante a realização dos ensaios na temperatura de 15°C, houve problemas com o aparelho de ultra-som, o que provocou a perda do último resultado.

Tabela 5.10 Resultados da evolução com a idade, da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som, em argamassas, para o Traço III.

15°C				30°C				50°C			
Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,r}$ (MPa)	Vel, Média (m/s)	Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,r}$ (MPa)	Vel, Média (m/s)	Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,r}$ (MPa)	Vel, Média (m/s)
25	5,53	0,73	2591	15	4,42	0,78	2848	5,5	2,95	0,51	2245
50	7,33	0,99	2942	30	6,61	1,00	3231	11,0	8,97	1,28	2886
101	9,30	1,09	3080	60	8,54	1,09	2685	22,0	11,51	1,58	2988
201	9,92	1,30	3024	134	9,24	1,51	3046	44,0	14,60	1,50	3394
403	10,86	1,50	3238	240	9,48	1,41	3017	88,0	19,77	1,96	3423
818	11,93	1,70	-	480	10,58	1,80	3197	176,0	24,79	2,35	3861

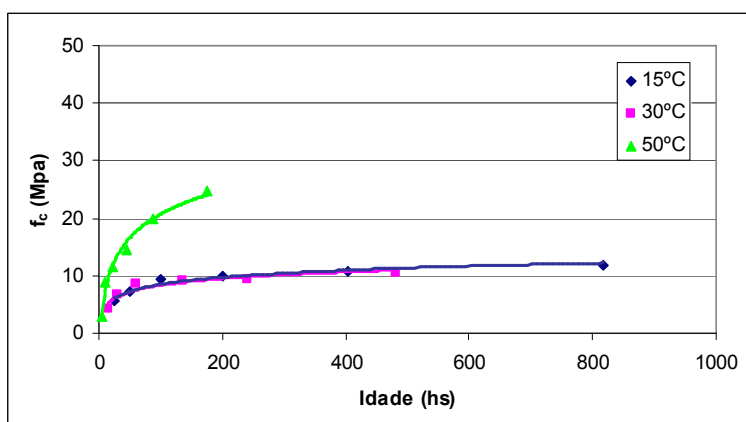


Figura 5.20 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço III.

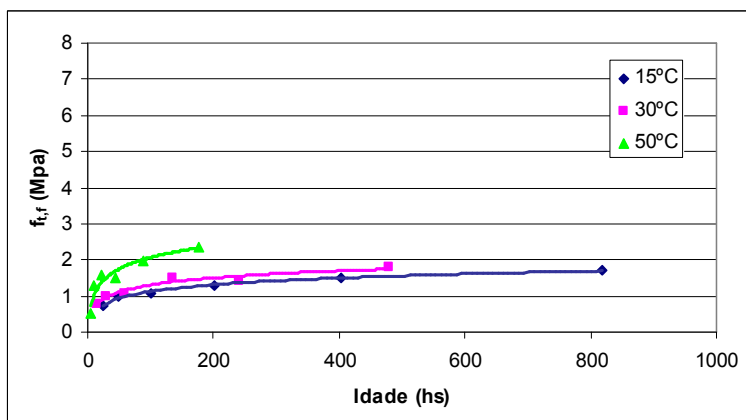


Figura 5.21 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço III.

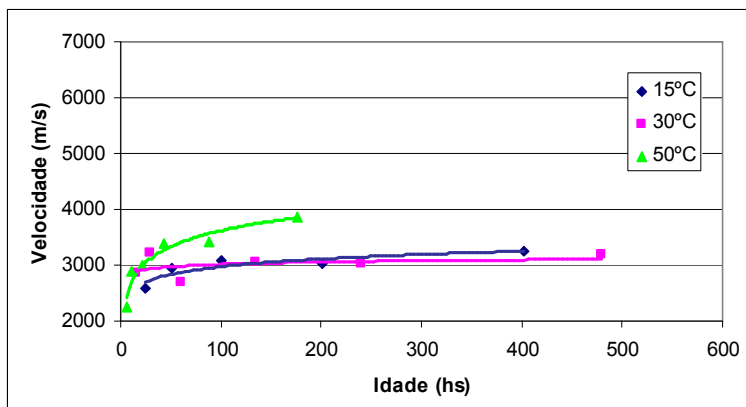


Figura 5.22 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica, em argamassas, para o Traço III.

Os resultados de Início e Fim de pega para o Traço III estão ilustrados na Figura 5.23 e os tempos e temperaturas calculados para estes valores são os mostrados na Tabela 5.11.

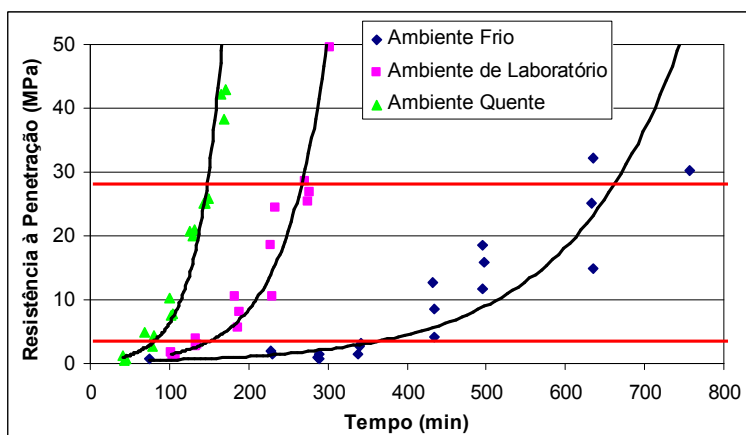


Figura 5.23 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço III.

Tabela 5.11 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço III.

	Início de Pega		Fim de Pega	
	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)
Ambiente Frio	362	16,9	629	12,7
Ambiente de Laboratório	144	27,9	264	32,0
Ambiente Quente	74	31,5	148	42,3

5.3.2 Ensaio em concreto

Para os corpos-de-prova de concreto, os resultados obtidos foram os da Tabela 5.12, ilustrados nas Figuras 5.24 e 5.25.

Tabela 5.12 Resultados da evolução com a idade, da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som, em concretos, para o Traço III.

Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	Velocidade (m/s)		
			Cilindro		Prisma
			Direto	Direto	Indireto
1	22,77	3,40	4110	4090	3804
3	29,33	4,19	4298	4247	4099
7	35,44	4,04	-	4462	4043
14	41,02	4,77	4507	4480	3849
21	36,91	5,37	4566	4516	4032
28	40,23	5,53	4652	4448	3975

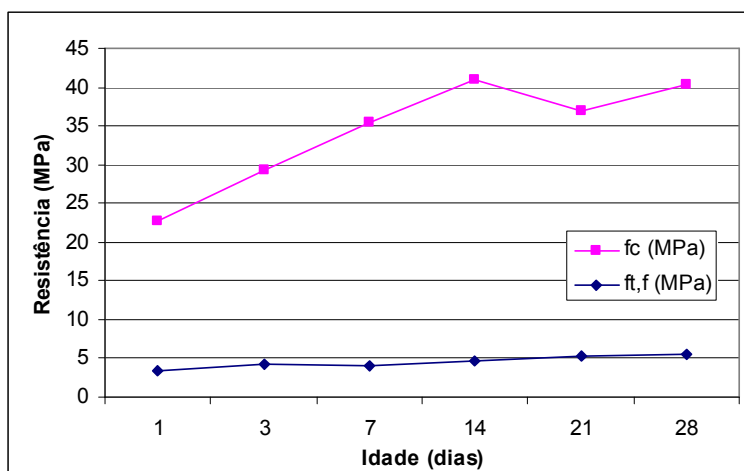


Figura 5.24 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão, em concreto, para o Traço III.

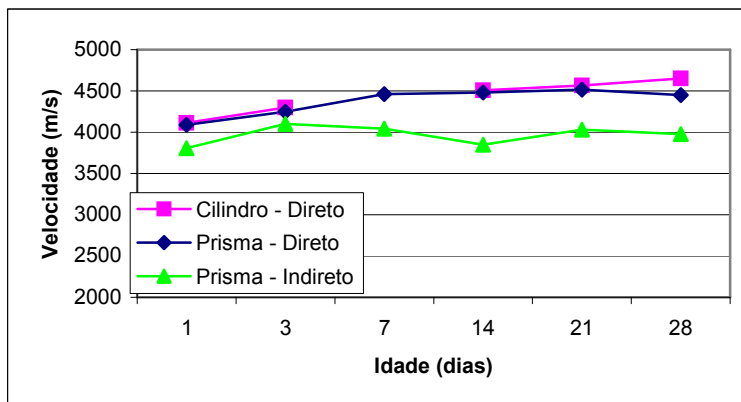


Figura 5.25 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço III.

Neste traço, os resultados aos 21 e 28 dias para resistência à tração na flexão foram abaixo do esperado. O comportamento da velocidade de onda ultra-sônica foi satisfatória, à exceção do método indireto, que não apresentou evolução coerente.

Para os corpos-de-prova de Referência, os valores de velocidade de propagação de onda ultra-sônica para cada idade são descritos na Tabela 5.13 e sua evolução pode ser vista na Figura 5.26.

Tabela 5.13 Resultados da evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência, para o Traço III.

Idade (dias)	Velocidade (m/s)		
	Cilindro	Prisma	
	Direto	Direto	Indireto
1	4096	4006	3745
3	4315	4219	3749
7	-	4395	4273
14	4534	4431	3891
21	4555	4460	4174
28	4602	4462	4149

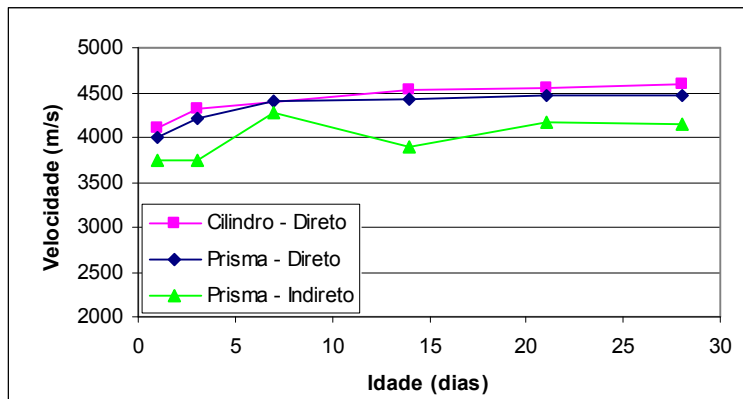


Figura 5.26 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência para o Traço III.

5.3.3 Curvas de Maturidade

Com os resultados de ultra-som neste traço não foi possível chegar a valores de Energia Aparente de Ativação, e portanto, traçar as curvas de maturidade para este parâmetro. Para os demais, os resultados são expressos a seguir.

Tabela 5.14 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço III.

	Compressão	Tração na flexão	Pega	
			Antes	Durante
Ea (KJ/mol)	38,65	41,25	79,1	33,06

O valor de Energia Aparente de Ativação encontrado para antes da pega foi muito alto, provavelmente tendo ocorrido algum erro durante o processo, devendo então ser desprezado.

As curvas de maturidade para resistência à compressão e à tração na flexão para o Traço III estão apresentadas nas Figuras 5.27 e 5.28.

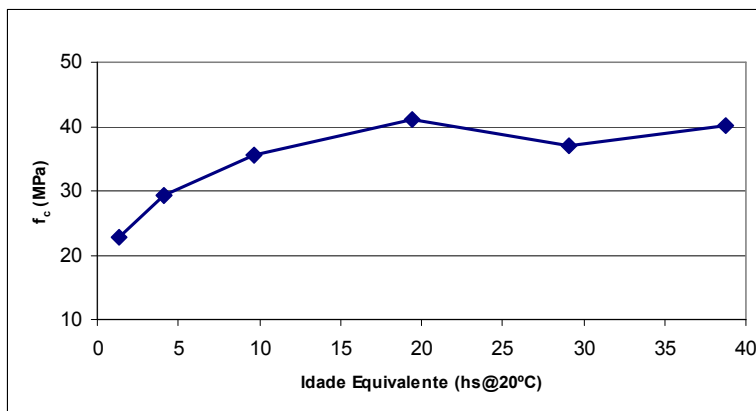


Figura 5.27 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço III.

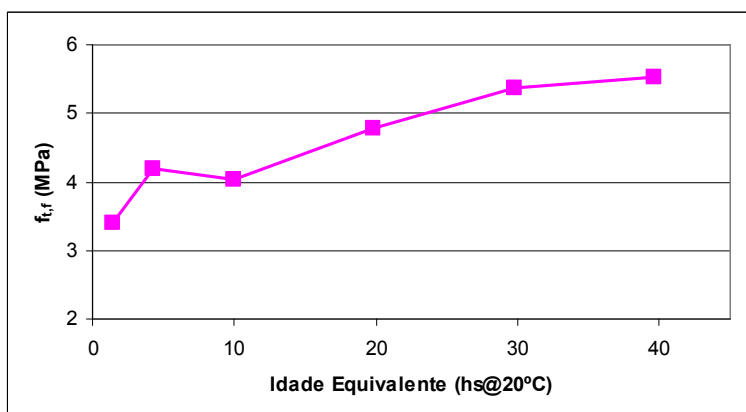


Figura 5.28 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço III.

5.4 Traço IV

Para o Traço IV, durante a realização dos ensaios, ocorreu um problema no equipamento utilizado no ensaio de ultra-som, havendo assim interrupção neste ensaio, tanto para argamassa quanto para concreto.

5.4.1 Ensaios em argamassa

Os resultados obtidos para resistência à compressão e tração na flexão em argamassas para o Traço IV são listados na Tabela 5.15 e Figuras 5.29 e 5.30.

Tabela 5.15 Resultados da evolução com a idade, da Resistência à compressão e à tração na flexão, em argamassas, para o Traço IV.

15°C			30°C			50°C		
Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	Idade (hs)	f_c (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)
14	11,84	1,39	7	2,37	0,36	4	6,19	0,48
28	40,25	5,10	14	33,31	5,83	8	36,45	5,46
56	48,72	6,85	28	51,85	7,37	16	47,74	6,16
112	53,92	6,99	56	52,34	7,31	32	49,95	7,36
224	55,98	7,74	112	47,76	8,20	64	52,02	7,80
448	71,16	7,48	224	49,87	8,96	128	57,15	7,28

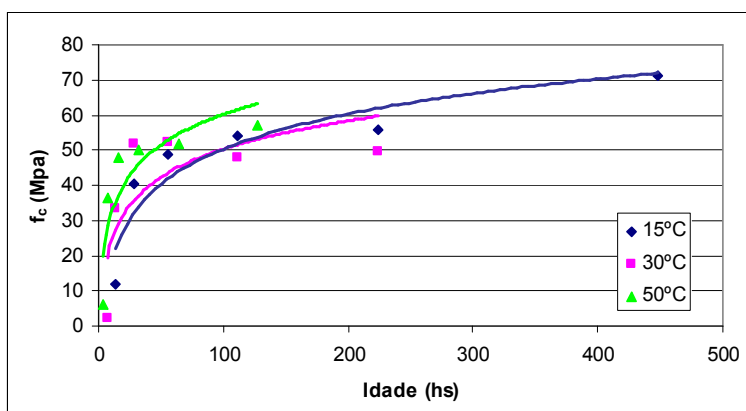


Figura 5.29 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço IV.

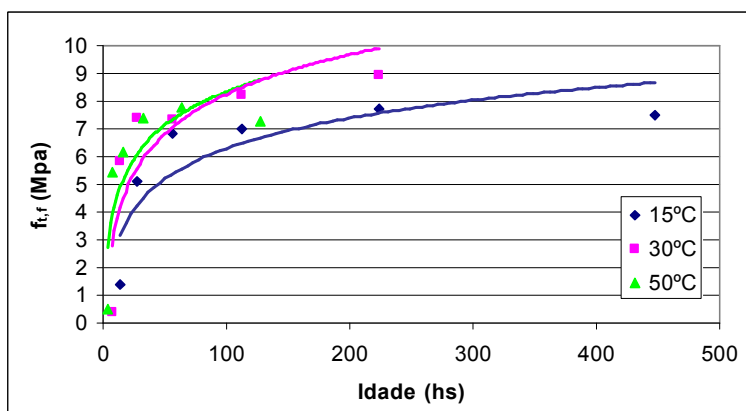


Figura 5.30 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço IV.

Os resultados de Início e Fim de pega para o Traço IV estão ilustrados na Figura 5.31, e os tempos e temperaturas calculados para estes valores são os mostrados na Tabela 5.16.

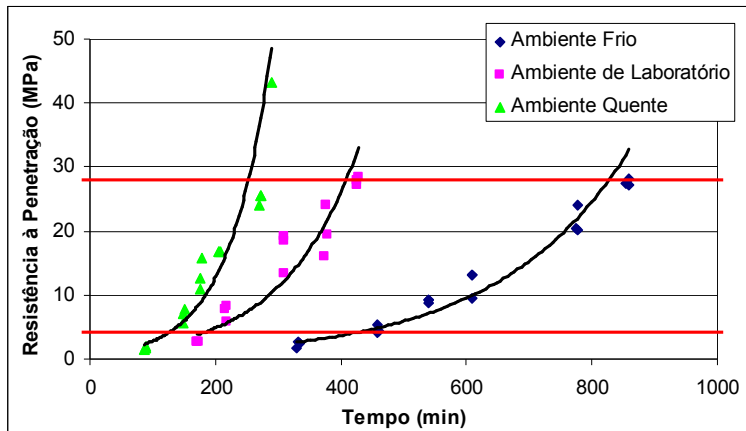


Figura 5.31 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço IV.

Tabela 5.16 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço IV.

	Início de Pega		Fim de Pega	
	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)
Ambiente Frio	405	15,0	853	10,0
Ambiente de Laboratório	176	34,3	411	37,8
Ambiente Quente	115	34,1	250	45,7

Note-se que as temperaturas para o início de pega no ambiente de laboratório e no ambiente quente foram muito semelhantes, inclusive sendo a segunda inferior à primeira, devendo provavelmente ter ocorrido algum erro durante as leituras de temperatura.

5.4.2 Ensaio em concreto

Os resultados de resistência em concreto estão demonstrados na Tabela 5.17. Os resultados de ultra-som que puderam ser realizados também estão descritos. Suas evoluções são ilustradas na Figura 5.32.

Tabela 5.17 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em concretos para o Traço IV.

Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	Velocidade (m/s)		
			Cilindro		Prisma
			Direto	Direto	Indireto
1	41,73	5,27	4831	4788	4450
3	53,67	6,80	4835	4773	4586
7	65,13	8,34	4964	4907	4446
14	67,02	9,75	-	4840	3833
21	71,70	8,97	-	-	-
28	76,68	8,09	-	-	-

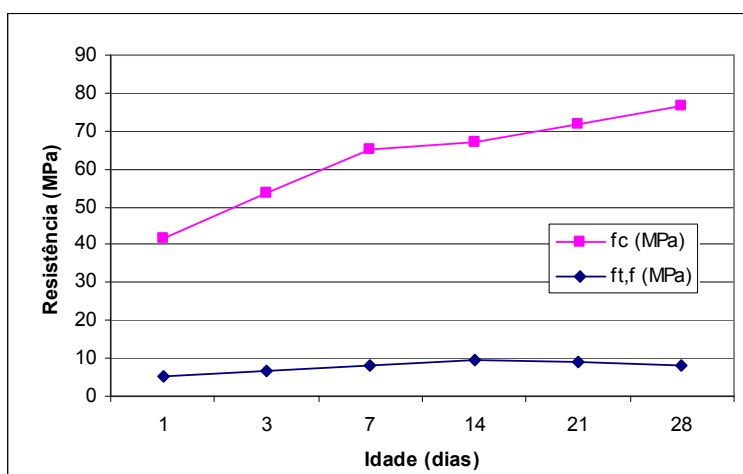


Figura 5.32 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão em concreto, para o Traço IV.

Percebe-se que este traço adquiriu altas resistências tanto à compressão quanto à tração na flexão, podendo inclusive ser considerado um concreto de alto desempenho. Por este motivo, houve certa dificuldade na realização das rupturas dos corpos-de-prova cilíndricos, visto que seu modo de ruptura era brusco, inclusive provocando explosão. Na tração na flexão, ouve um decréscimo na resistência nas ultimas duas idades, porém ainda assim os resultados foram acima do esperado, sendo que já no primeiro dia atingiu mais de 5 MPa.

5.4.3 Curvas de Maturidade

Os valores obtidos de Energia Aparente de Ativação estão apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço IV.

	Compressão	Tração na flexão	Pega	
			Antes	Durante
Ea (KJ/mol)	38,0	31,6	40,0	22,9

Os valores de Energia Aparente de Ativação para a pega, antes e durante, tiveram diferença significativa, podendo essa inclusive ter ocorrido devido à incoerência no valor de temperatura média, citado anteriormente.

As curvas de maturidade para o Traço IV estão apresentadas nas Figuras 5.33 e 5.34.

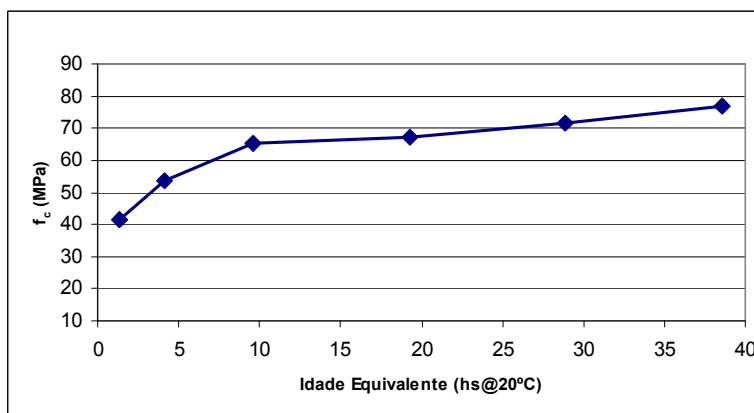


Figura 5.33 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço IV.

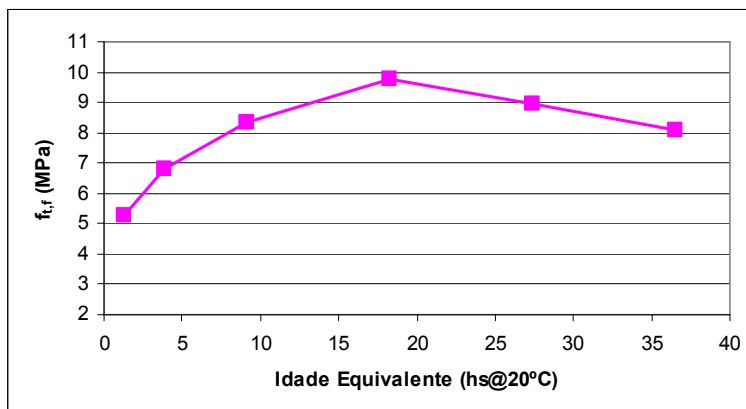


Figura 5.34 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço IV.

5.5 Traço V

5.5.1 Ensaios em argamassa

Os resultados obtidos para resistência à compressão e tração na flexão, em argamassas para o Traço V, são listados na Tabela 5.19 e Figuras 5.35 a 5.37.

Tabela 5.19 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em argamassas para o Traço V.

15°C				30°C				50°C			
Idade (hs)	f _c (MPa)	f _{t,f} (MPa)	Vel, Média (m/s)	Idade (hs)	f _c (MPa)	f _{t,f} (MPa)	Vel, Média (m/s)	Idade (hs)	f _c (MPa)	f _{t,f} (MPa)	Vel, Média (m/s)
18	5,74	3,84	4102	11	12,39	3,25	3656	9	10,57	3,40	3646
36	29,17	5,97	4676	22	45,94	9,33	4587	18	36,90	8,72	4448
72	42,57	7,59	4667	44	56,52	9,61	4679	37	40,28	10,12	4629
144	40,08	8,40	4758	88	55,86	10,08	4824	73	41,76	12,04	4753
288	52,42	9,18	4964	176	66,91	12,00	4810	147	51,58	11,97	4761
576	50,59	8,89	4965	352	68,56	10,04	4964	293	68,56	14,88	4964

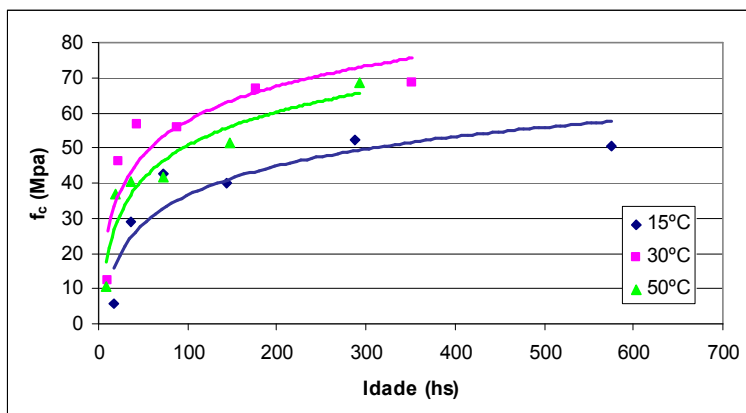


Figura 5.35 Evolução com a idade da Resistência à compressão em argamassas para o Traço V.

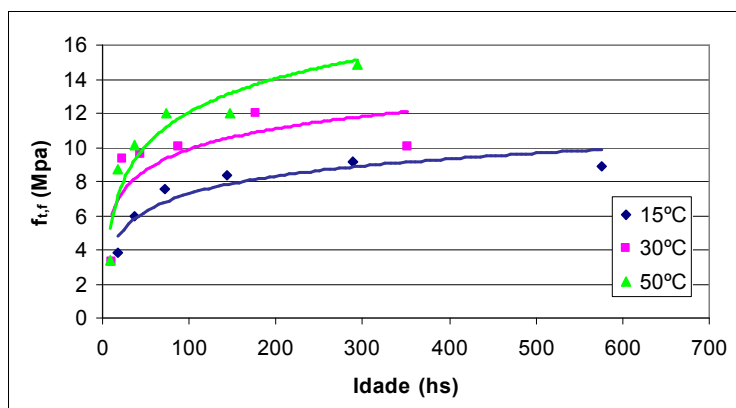


Figura 5.36 Evolução com a idade da Resistência à tração na flexão em argamassas para o Traço V.

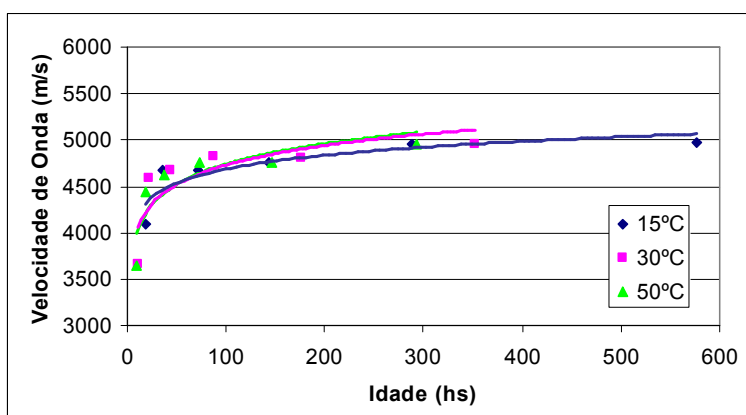


Figura 5.37 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em argamassas para o Traço V.

Os resultados de início e fim de pega para o Traço V estão ilustrados na Figura 5.38 e os tempos e temperaturas calculados para estes valores são os mostrados na Tabela 5.20.

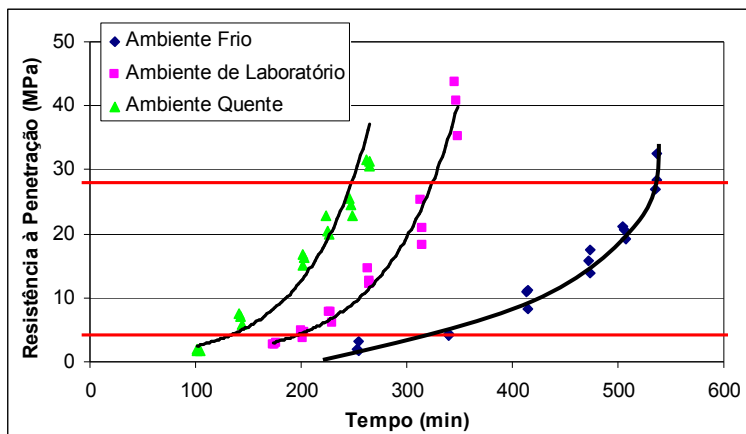


Figura 5.38 Evolução da Resistência à penetração para as três temperaturas para o Traço V.

Tabela 5.20 Tempo e Temperaturas de Início e Fim de Pega para o Traço V.

	Início de Pega		Fim de Pega	
	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)	Tempo (min)	Temperatura Média (°C)
Ambiente Frio	302	18,5	560	15,7
Ambiente de Laboratório	188	27,8	325	32,0
Ambiente Quente	122	24,6	249	42,8

Novamente aqui as temperaturas médias para antes da pega tiveram valores inconsistentes, podendo novamente influenciar nos valores de Energia Aparente de Ativação, o que foi constatado mais tarde. Ainda, percebe-se que o tempo decorrente até o início de pega, para um ambiente de laboratório, levaria a pouco mais de três horas de possibilidade de uso do concreto, desde sua dosagem até o final de seu lançamento, vibração e acabamento, fator preponderante em obras, e crucial na execução da placa de pavimento executada posteriormente.

5.5.2 Ensaio em concreto

Neste traço, por ter sido escolhido para a utilização no ensaio da placa, executou-se também ensaios de resistência com 12 horas de idade, visando um conhecimento da curva de maturidade mais representativo nas primeiras idades. Os resultados de resistência em concreto estão demonstrados na Tabela 5.21. Suas evoluções são ilustradas nas Figuras 5.39 e 5.40.

Tabela 5.21 Resultados da evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão e Ultra-som em concretos para o Traço V.

Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	Velocidade (m/s)		
			Cilindro		Prisma
			Direto	Direto	Indireto
0,5	9,8	3,18	-	-	-
1	33,5	4,62	4344	4341	4496
3	38,6	5,37	4567	4584	4127
7	44,1	5,55	4623	4520	4504
14	43,9	6,57	4657	4504	3472
21	49,8	6,53	4846	4647	4214
28	47,1	7,15	4747	4650	4330

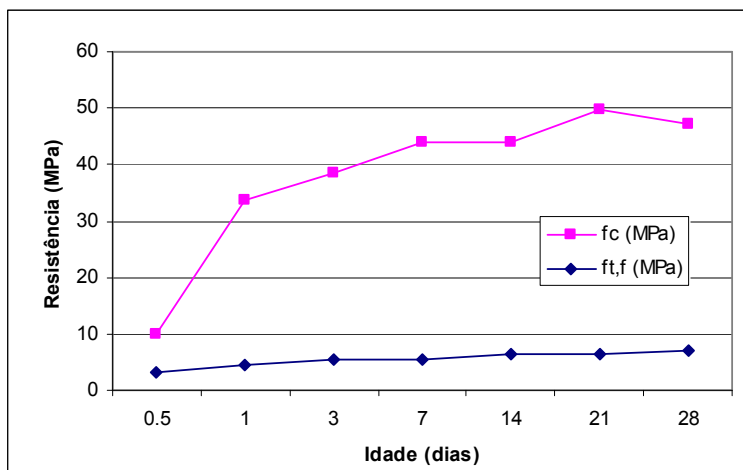


Figura 5.39 Evolução com a idade da Resistência à compressão e à tração na flexão em concreto para o Traço V.

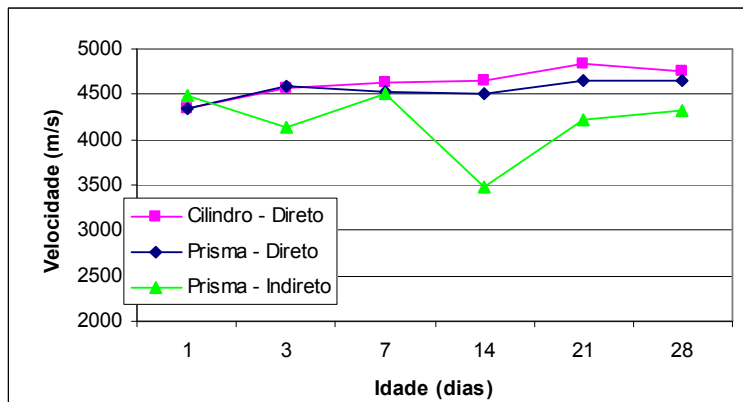


Figura 5.40 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto para o Traço V.

Percebe-se que a resistência à tração na flexão em apenas 12 horas já atingiu mais de 3 MPa, fator decisivo na liberação ao tráfego.

Foi adotado um exemplar de cada tipo, para os quais foi monitorado o ultra-som em cada idade, sempre no mesmo corpo-de-prova, chamado de “Referência”. Os resultados para os corpos-de-prova de “Referência” estão descritos na Tabela 5.22 e Figura 5.41.

Tabela 5.22 Resultados da evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência, para o Traço V.

Idade (dias)	Velocidade (m/s)		
	Cilindro	Prisma	
	Direto	Direto	Indireto
1	4286	4202	3709
3	4484	4535	4016
7	4532	4543	4359
14	4478	4535	3983
21	4922	4698	4159
28	4644	4657	4205

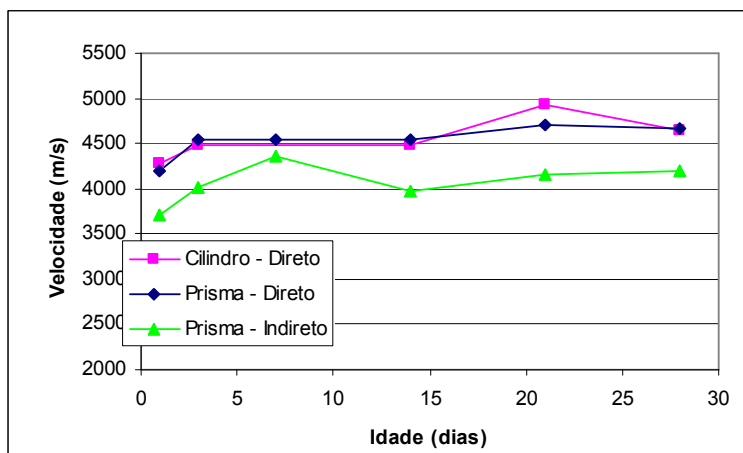


Figura 5.41 Evolução com a idade da Velocidade de propagação de onda ultra-sônica em concreto, nos exemplares de Referência, para o Traço V.

Mais uma vez o método indireto de propagação de ondas ultra-sônicas não forneceu dados confiáveis.

5.5.3 Curvas de Maturidade

Os valores obtidos de Energia Aparente de Ativação para o Traço V estão apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 Valores de Energia Aparente de Ativação para o Traço V.

	Compressão	Tração na flexão	Ultra-som	Pega	
				Antes	Durante
Ea (KJ/mol)	30,2	24,6	15,4	38,0	31,7

Conforme observado anteriormente, incoerências nas temperaturas médias influenciaram na Energia Aparente de Ativação para antes da pega, sendo o valor calculado incoerente. Além disso, o valor encontrado para a Energia Aparente de Ativação pelo ultra-som ficou aquém do esperado, devendo também ser ignorado.

Para a obtenção das curvas de maturidade do Traço V, que seriam utilizadas posteriormente para a análise da placa, a temperatura de um corpo-de-prova foi monitorada.

A evolução da temperatura com o tempo até a idade de um dia, quando os corpos-de-prova foram colocados em câmara climatizada, está demonstrada na Figura 5.42.

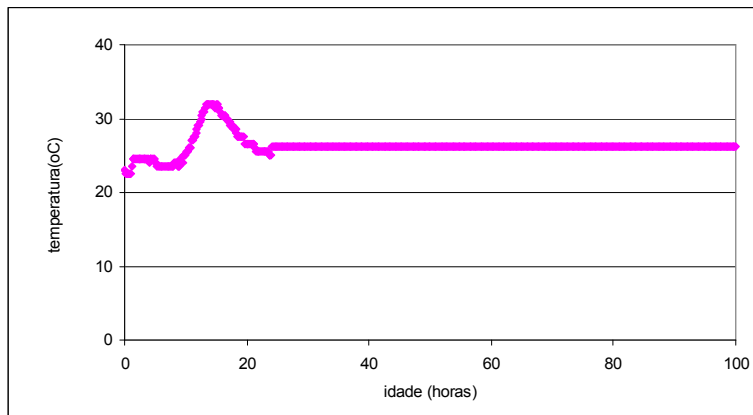


Figura 5.42 Evolução da temperatura com o tempo para os corpos-de-prova de concreto.

A relação entre a Idade Real e a Idade Equivalente para esta mistura, a partir da Energia Aparente de Ativação para a compressão, é ilustrada na Figura 5.43.

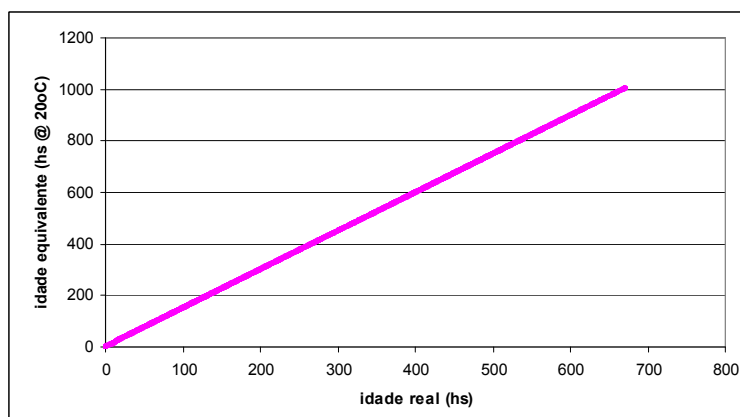


Figura 5.43 Relação entre idade real e equivalente para compressão para o Traço V.

As curvas de maturidade para o Traço V estão apresentadas nas Figuras 5.44 a 5.46.

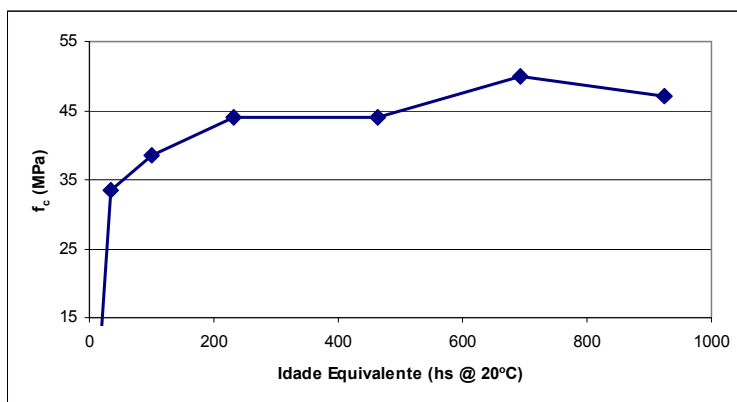


Figura 5.44 Curva de Maturidade para Resistência à compressão do Traço V.

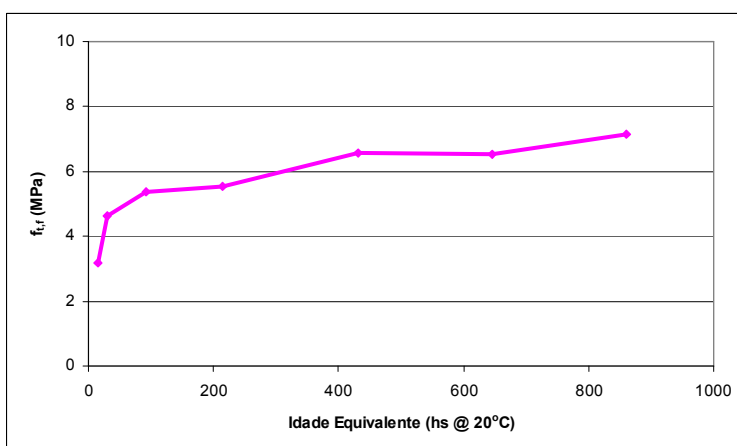


Figura 5.45 Curva de Maturidade para Resistência à tração na flexão do Traço V.

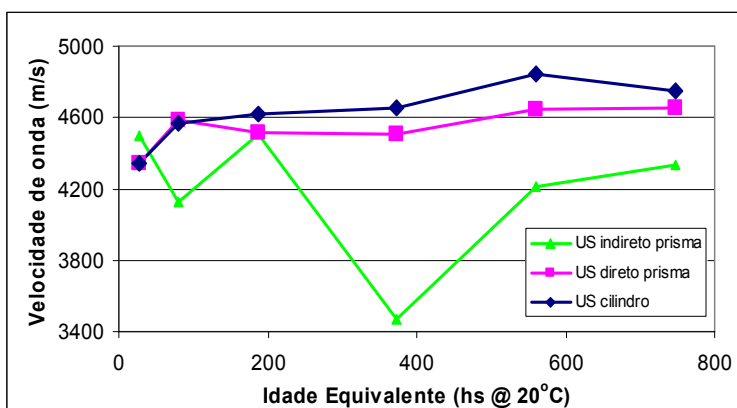


Figura 5.46 Curvas de Maturidade para Velocidade de onda ultra-sônica do Traço V.

A Tabela 5.24 traz um resumo dos principais resultados dos cinco traços estudados, a fim de facilitar a comparação entre eles.

Tabela 5.24 Resumo dos resultados dos traços estudados.

		Traço					
		I	II	III	IV	V	
Cimento	Tipo	CPI ARI RS (1)	CPI ARI RS (1)	CPII-Z	CPI ARI RS (2)	CPI ARI RS (2)	
	Consumo (kg/m ³)	I	II	III	IV	V	
	a/c	0,44	0,42	0,39	0,30	0,30	
	Abatimento (mm)	120	30	200	30	120	
Idade até $f_c \approx$ 4MPa (hs)	15°C	33	33	25	14	18	
	30°C	16	21	15	7	11	
	50°C	7,6	14,0	5,5	4,0	9,0	
$f_{t,f}$ em \approx 200 hs	15°C	6,67	3,90	1,40	7,74	6,15	
	30°C	7,26	5,00	1,40	8,96	8,00	
	50°C	6,59	4,73	2,50	7,80	8,00	
Ultra-som em \approx 200 hs	15°C	4724	4083	3024	-	4964	
	30°C	4918	4120	3017	-	4900	
	50°C	4378	4385	3861	-	4900	
Pega (min)	Início	Frio	1461	634	362	405	302
		Ambiente	658	346	144	176	188
		Quente	285	274	74	115	122
	Fim	Frio	2421	1637	629	853	560
		Ambiente	834	755	264	411	325
	Quente	463	455	148	250	249	
	f_c concreto (28 dias) (Mpa)	45,0	45,8	40,3	76,7	50,0	
	$f_{t,f}$ concreto (28 dias) (Mpa)	5,25	5,97	5,53	9,75	7,15	
E_a (kJ/mol)	f_c	27,7	19,7	38,7	38,0	46,4	
	$f_{t,f}$	32,7	26,2	41,3	31,6	35,9	
	Ultra-som	24,9	-	-	-	15,4	
	Pega antes	38,0	38,5	79,1	40,0	47,4	
	Pega durante	31,7	47,1	33,1	22,9	20,8	
	$f_{t,f}$ (Mpa) (1 dia)	3,32	3,70	3,40	5,27	4,62	

6 PLACA DE CONCRETO

Definido o Traço V como o adequado aos materiais encontrados na região e disponíveis na concreteira, e satisfazendo as exigências de resistência, executou-se em laboratório uma placa em tamanho real de 3,5 x 4,5 metros e 20 cm de espessura, sobre uma camada de aproximadamente 42 cm de brita graduada, com dimensões em planta superiores às da placa, conforme descrito posteriormente, representando uma placa de concreto para utilização em pavimento de concreto *fast track*.

Esta placa foi submetida a um carregamento estático, simulando a presença de um caminhão com eixo simples de roda dupla. A carga máxima permitida para o tráfego em rodovias é de 8,2 tf, porém, considerando a eventualidade de veículos trafegando com excesso de carga, foi adotado uma carga de 2,5 tf em cada pneu, com roda dupla, totalizando 10 tf por eixo. Transdutores de deslocamento e *strain gages* foram posicionados em pontos específicos, permitindo o monitoramento do comportamento da placa durante a ação do carregamento imposto.

Sendo o intuito deste trabalho a aplicação da mistura escolhida (Traço V) para pavimentos de concreto *fast track*, foram definidas as idades para a realização dos ensaios através das curvas de maturidade, previamente determinadas para esta mistura. Assim, termopares foram inseridos na placa em posições específicas, com a temperatura sendo continuamente monitorada.

Definiu-se que o ensaio seria executado assim que o concreto atingisse um nível de resistência à tração equivalente a duas vezes o valor da maior tensão de tração desenvolvida na placa pelo carregamento imposto. Desta forma, fez-se necessário a execução de uma análise numérica da placa, a fim de obter previamente os níveis de tensão a qual ela estaria submetida na realização do ensaio.

A Figura 6.1 mostra um fluxograma ilustrando a modelagem e execução da placa de concreto.

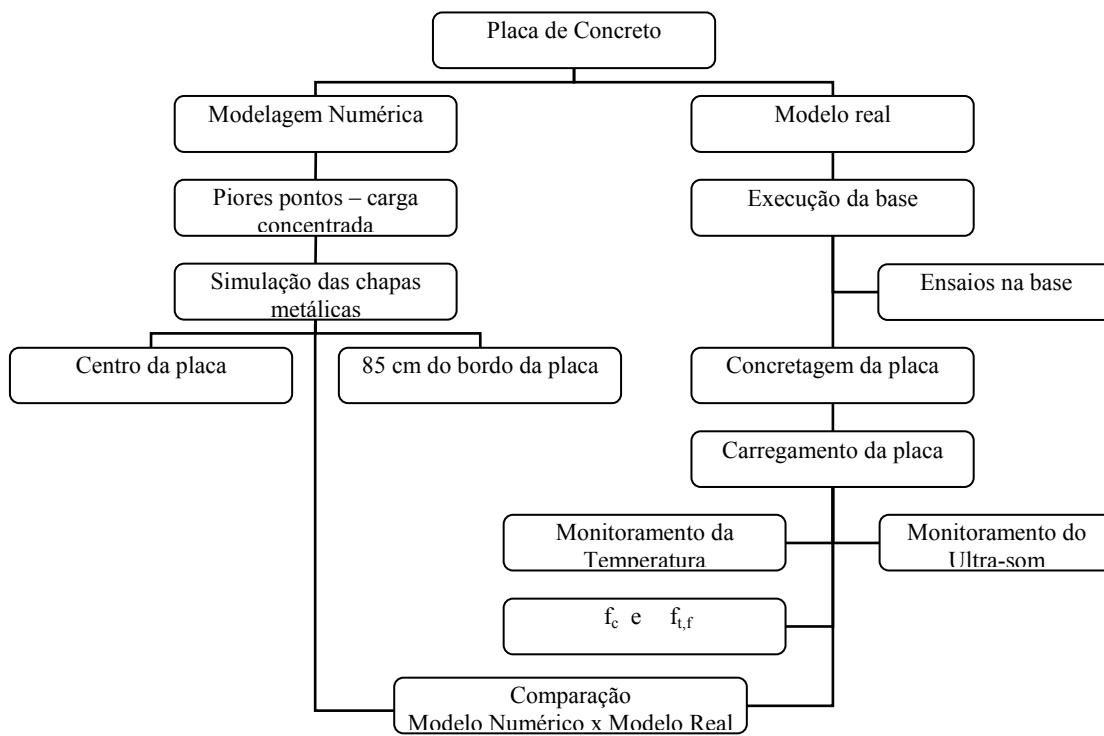


Figura 6.1 Fluxograma da modelagem e execução da placa de concreto.

Nos itens a seguir descrevem-se os procedimentos adotados na análise numérica da placa, bem como os seguidos na execução desta e na realização do ensaio.

6.1 Modelagem numérica

Foi realizada uma análise elástica linear da placa utilizando o programa *Ansys Workbench*, baseado no método dos elementos finitos. Para tanto, foi modelada a placa de concreto, nos tamanhos reais de 3,5x4,5x0,2m, e também uma camada de base de brita graduada retangular nas dimensões 5,40x4,70 m, com espessura de 40 cm. As propriedades dos materiais foram adotadas conforme dados obtidos experimentalmente: para o concreto, foi executado um ensaio para a obtenção do Módulo de Elasticidade, segundo a NBR 8522 (1984), e para a base, foi realizada uma retroanálise a partir da deformação obtida no ensaio

da base (Item 6.2.1), buscando no programa Ansys um módulo de elasticidade que resultasse em uma deformação de 1 mm para uma carga de 7 tf, obtidos experimentalmente (Item 6.3.1). Para isso, foi simulada somente a base nas dimensões descritas acima, e sobre ela uma chapa metálica de raio 14,35 cm, onde foi aplicada a carga distribuída (Figura 6.2), Os valores de Coeficiente de Poisson foram admitidos segundo valores usuais para estes materiais.

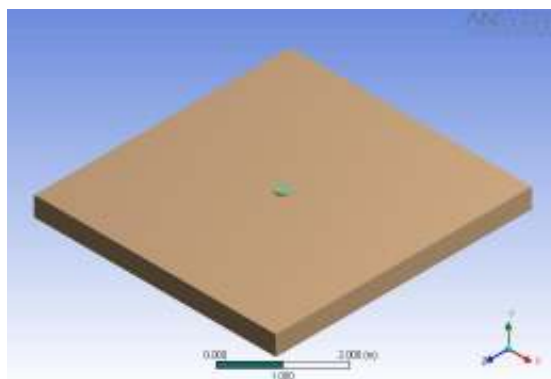


Figura 6.2 Retroanálise para a obtenção do módulo de elasticidade da base.

As propriedades adotadas na modelagem são as descritas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Propriedades dos materiais adotadas na modelagem da placa.

	Módulo de Young E (MPa)	Coefficiente de Poisson ν
Concreto	21400	0,20
Brita Graduada	115	0,35

Na definição das vinculações de apoio, a camada de brita graduada foi restringida em sua base à translação ao longo do eixo vertical. Já a camada de concreto apenas foi considerada apoiada sobre a base.

Primeiramente, visando escolher os pontos críticos para a aplicação da carga, foi feita uma análise dos pontos que provocariam maiores esforços de tração, aplicando-se cargas concentradas de 5 tf em pontos a partir do centro da placa, a cada 15 cm nas duas direções, totalizando 28 pontos de aplicação de carga, conforme demonstrado na Figura 6.3.

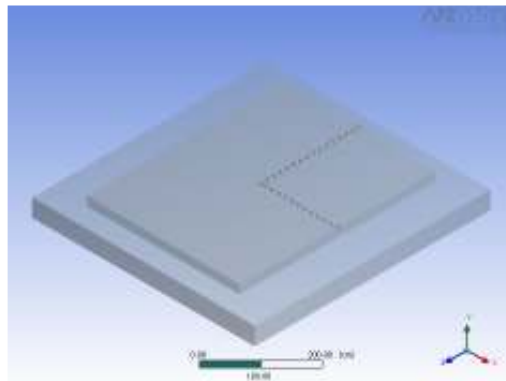


Figura 6.3 Pontos de aplicação das cargas concentradas para a escolha da pior situação.

Para este modelo foi gerada uma malha (Figura 6.4) com 8139 elementos na placa e 416 na base. Na placa, o elemento adotado foi o Solid 187, que é um elemento sólido tridimensional com dez nós, e três graus de liberdade em cada nó: translações nas direções x , y e z conforme a Figura 6.5. Já na base, foi utilizado um elemento Solid 186, Figura 6.6, elemento tridimensional com 20 nós com três graus de liberdade por nó: translação nas direções x , y e z (ANSYS, 2006).

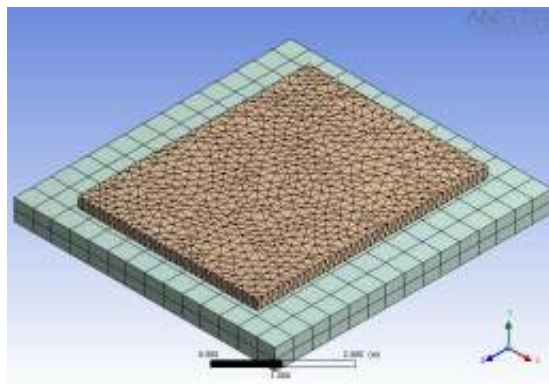


Figura 6.4 Malha de elementos gerada.

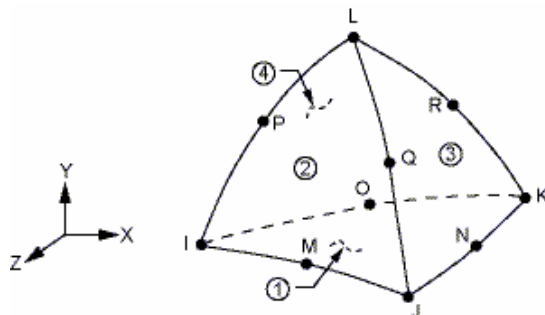


Figura 6.5 Elemento Solid 187 (Fonte: Ansys, 2006).

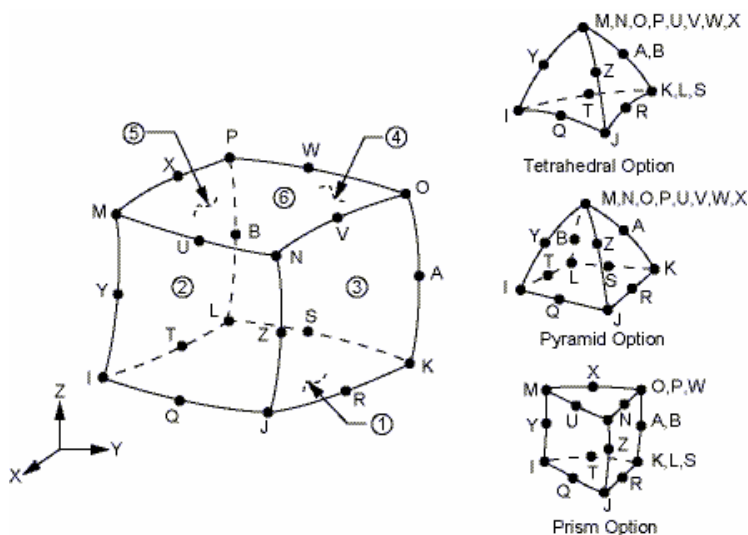


Figura 6.6 Elemento Solid 186 (Fonte: Ansys, 2006).

Entre a placa e a camada de base foi considerada uma região de contato com coeficiente de atrito de 1,7, seguindo as recomendações de Rodrigues e Pitta [200-?], onde utilizou-se elementos do tipo Targe170, usados para representar contatos associados entre elementos, os quais revestem os elementos sólidos representando o limite de um corpo deformável. Estes estão em contato com um conjunto de elementos na outra superfície, os elementos do Tipo Conta174, utilizados para representar o contato e o deslizamento entre faces com elementos Target e uma face deformável, definida por este elemento (ANSYS, 2006).

A numeração dos pontos seguiu a ordem indicada na Figura 6.7. As tensões normais e deformações nas direções longitudinal (z) e transversal (x), resultantes da aplicação do carregamento de 5 tf nestes pontos, estão apresentadas nas Figuras 6.8 e 6.9 para os pontos

da placa imediatamente inferiores à aplicação da carga, ou seja, 20 cm abaixo da superfície da placa, onde ocorreram os maiores níveis de tensão e deformação por tração, sempre no momento em que a carga está sendo aplicada naquele ponto, semelhante a uma linha de influência.

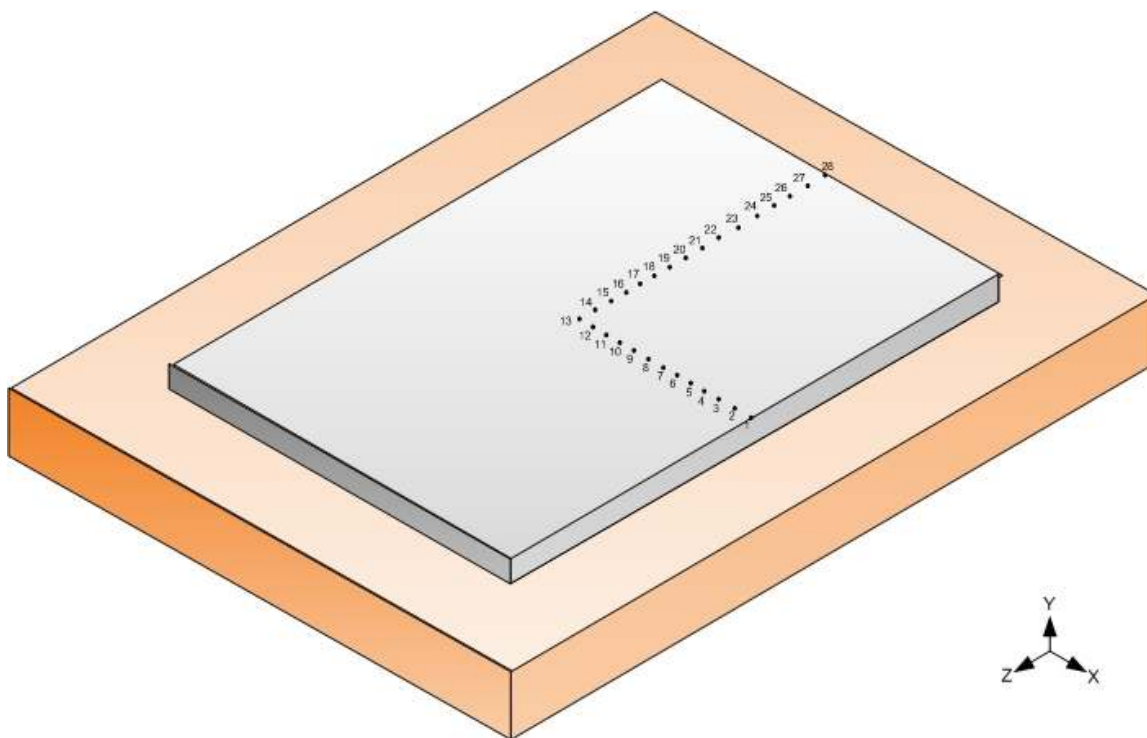


Figura 6.7 Pontos de aplicação da carga na simulação numérica.

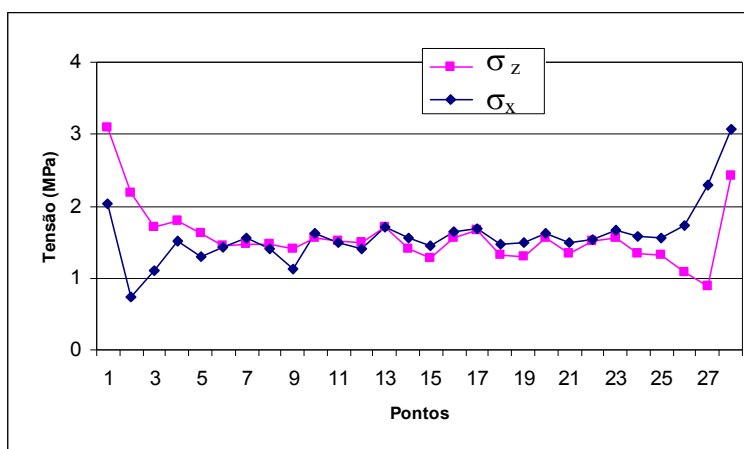


Figura 6.8 Tensões nos pontos da placa.

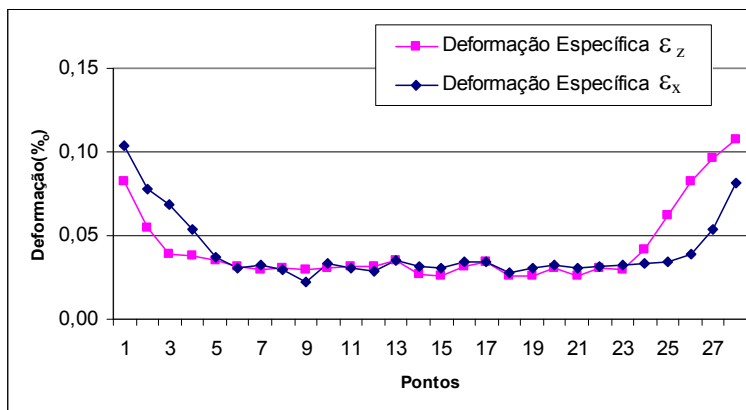


Figura 6.9 Deformações nos pontos da placa.

Nas Figuras 6.8 e 6.9 nota-se que as maiores tensões e deformações ocorrem próximo ao bordo da placa. Porém, conforme descrito no Item 2.4.1, a grande maioria dos veículos trafega com a roda a 60 cm do bordo da placa, onde segundo DNIT (2004) ocorreriam as piores situações, conforme descrito no Item 2.4.1.1. Porém, na análise realizada, o ponto que apresentou maiores níveis de tensão e deformação foi a cerca de 85 cm do bordo, ponto adotado para análise mais detalhada, conforme descrito a seguir.

Posteriormente, para a mesma placa, foram simuladas duas chapas metálicas de raio 10,8 cm e espessura de 2 cm, espaçadas de 31 cm entre eixos, dimensões usuais em dimensionamentos de pavimentos, simulando as rodas duplas do veículo, onde foram aplicadas cargas distribuídas de 2,5 tf em cada uma delas, simulando o ensaio realizado em laboratório, ilustradas na Figura 6.10. Estas cargas foram aplicadas no centro da placa e a 85 cm do bordo.

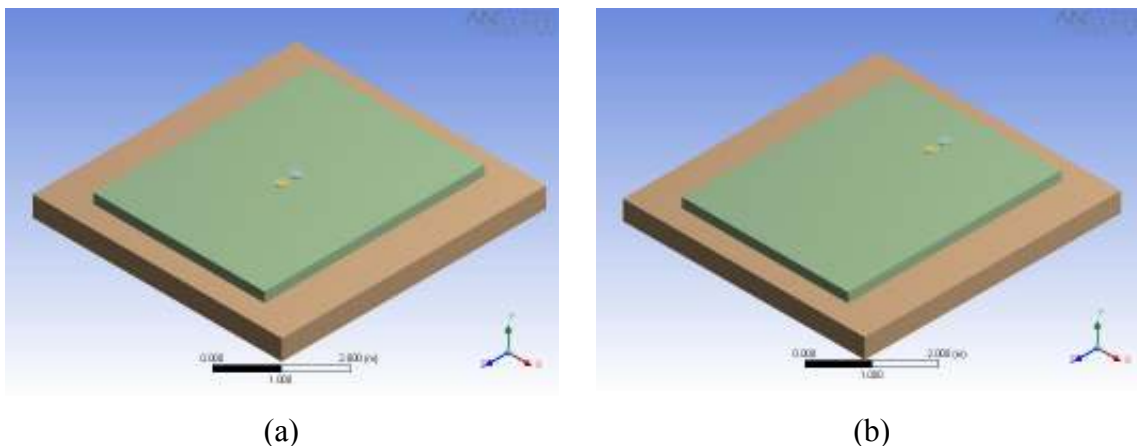


Figura 6.10 Geometria da placa com as chapas metálicas para a aplicação de carga. (a) Carga no centro. (b) Carga a 85 cm do bordo.

Todas as condições de malha, restrições e características dos materiais foram iguais às do modelo anterior. Os resultados obtidos, para tensões e deformações, nas piores situações no fundo da placa, são mostrados na Tabela 6.2 e nas Figuras 6.11 a 6.14.

Tabela 6.2 Tensões e deformações na placa.

	σ_x (MPa)	σ_z (MPa)	ϵ_x (m/m)	ϵ_z (m/m)
Carga no Centro	0,96	0,72	$3,92 \times 10^{-5}$	$2,47 \times 10^{-5}$
Carga a 85 cm do bordo	0,89	0,68	$3,50 \times 10^{-5}$	$2,39 \times 10^{-5}$

Como os valores de σ_x máximos provocados por esta carga na placa são da ordem de 0,9 MPa, pode-se aplicar este carregamento na placa, ou seja, liberá-la ao tráfego, no momento em que esta atingir a resistência de 2 MPa, sem causar danos à estrutura.

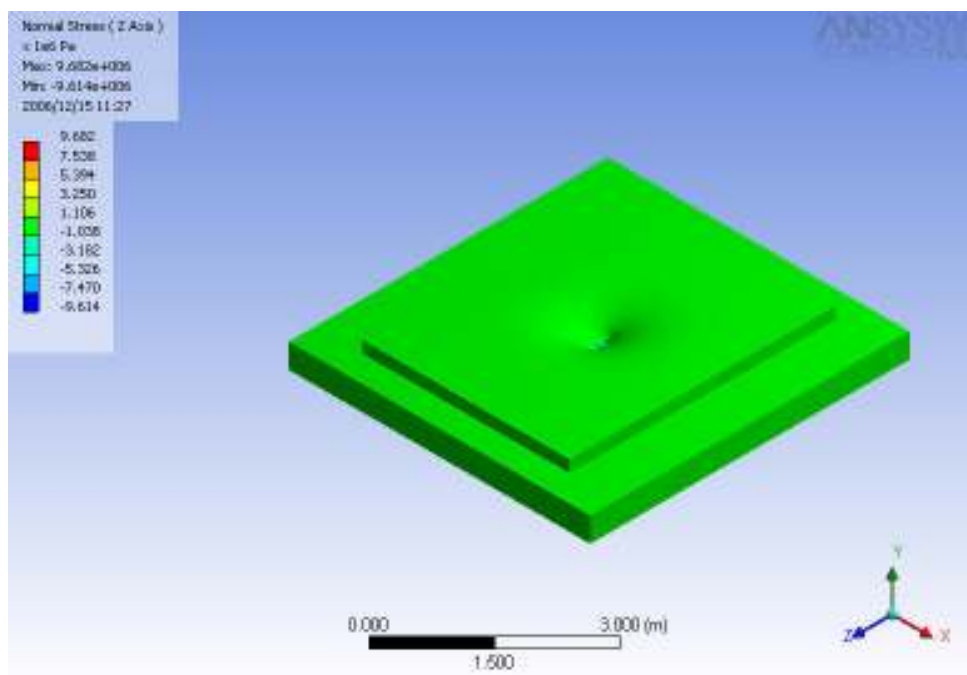
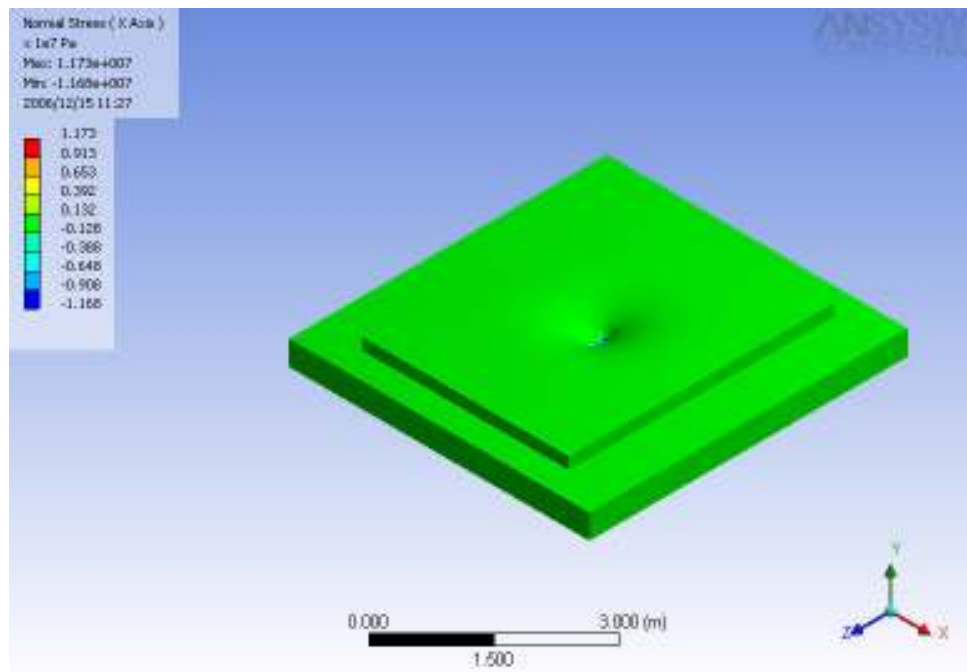
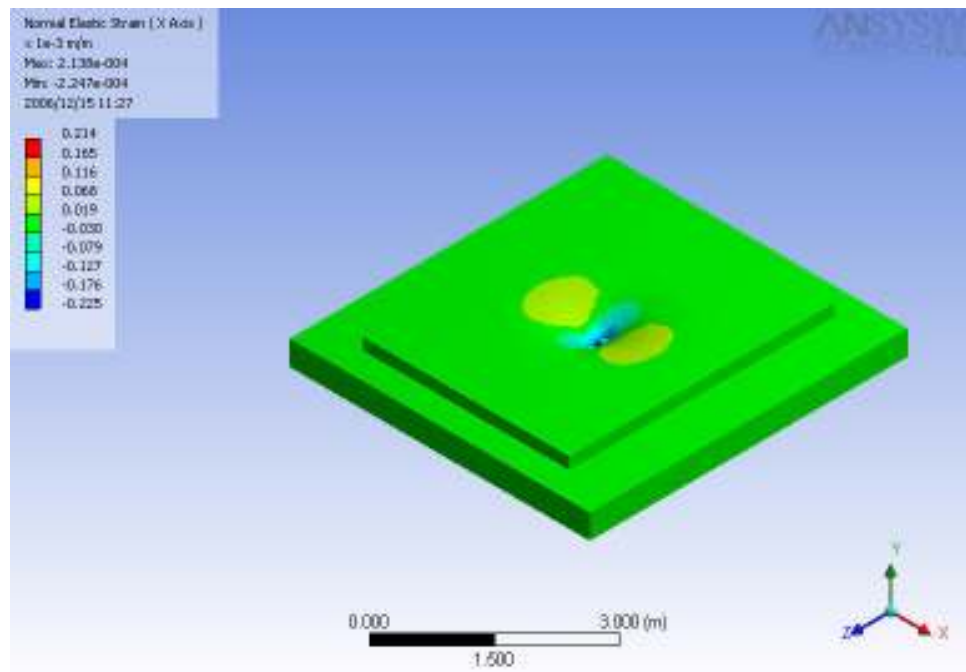
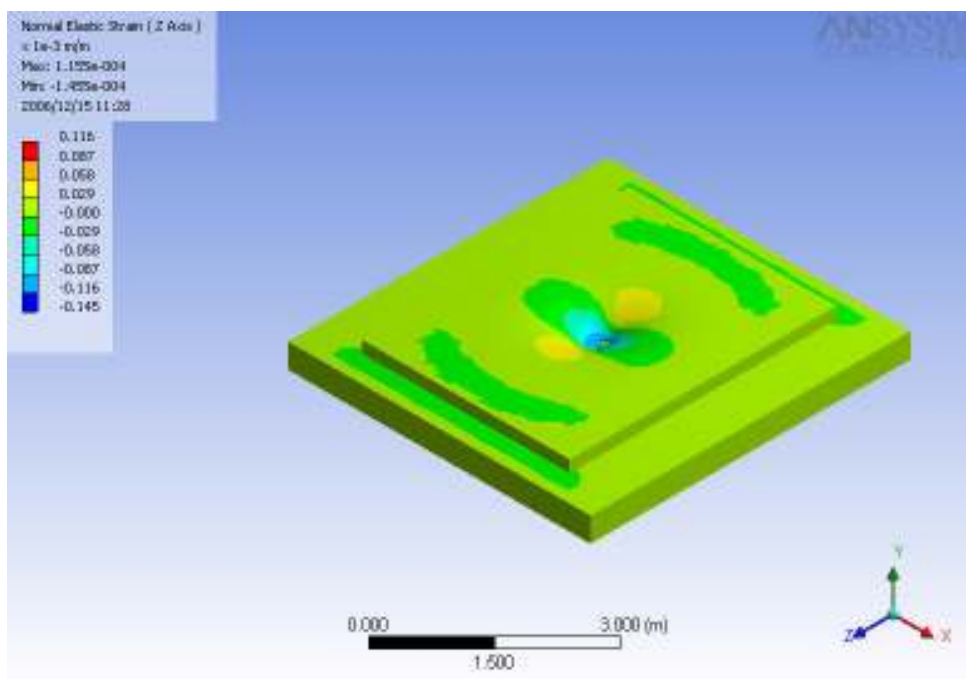


Figura 6.11 Tensões na placa para carga no centro. (a) Tensão no eixo x. (b) Tensão no eixo z.

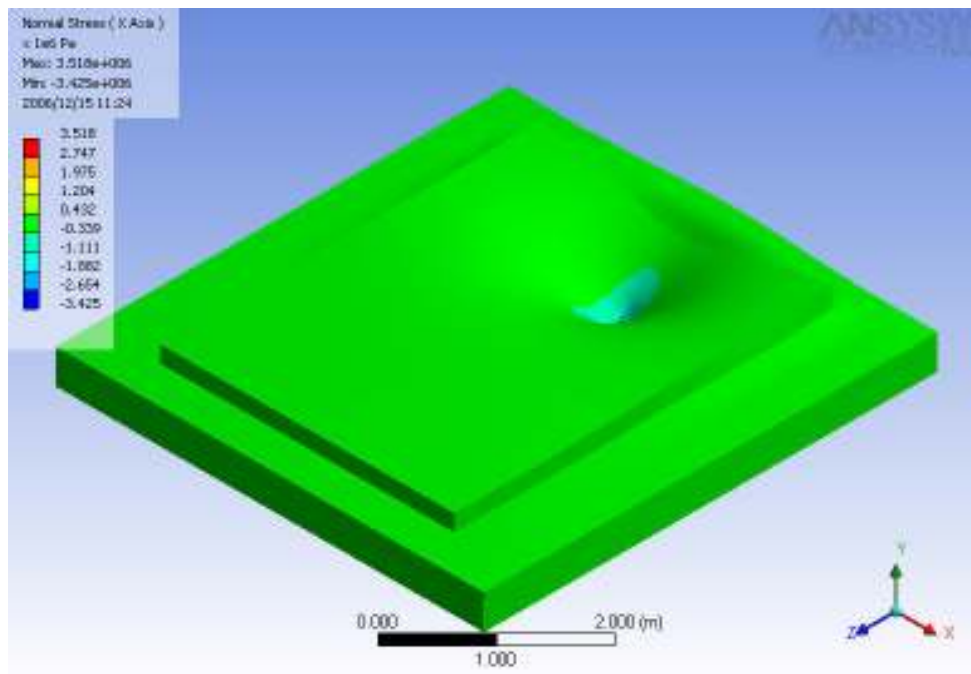


(a)

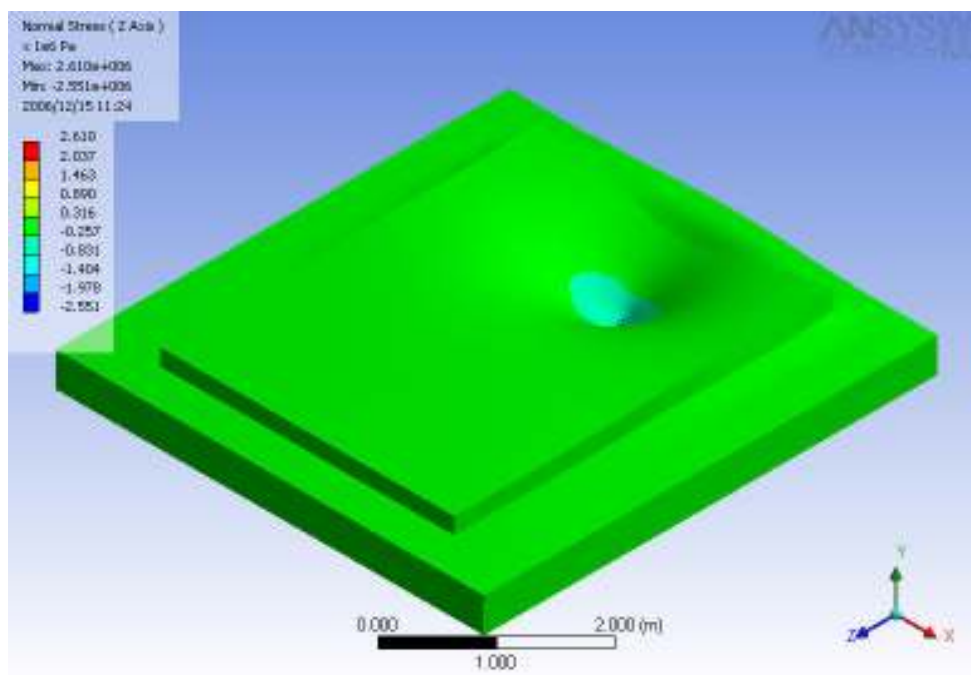


(b)

Figura 6.12 Deformações na placa para carga no centro. (a) Deformação no eixo x. (b) Deformação no eixo z.

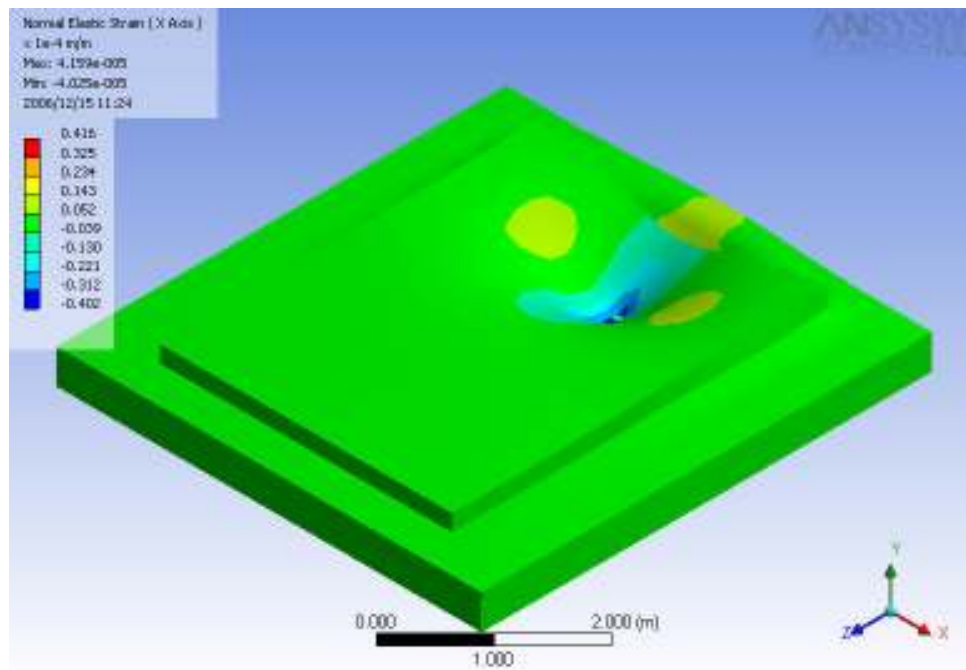


(a)

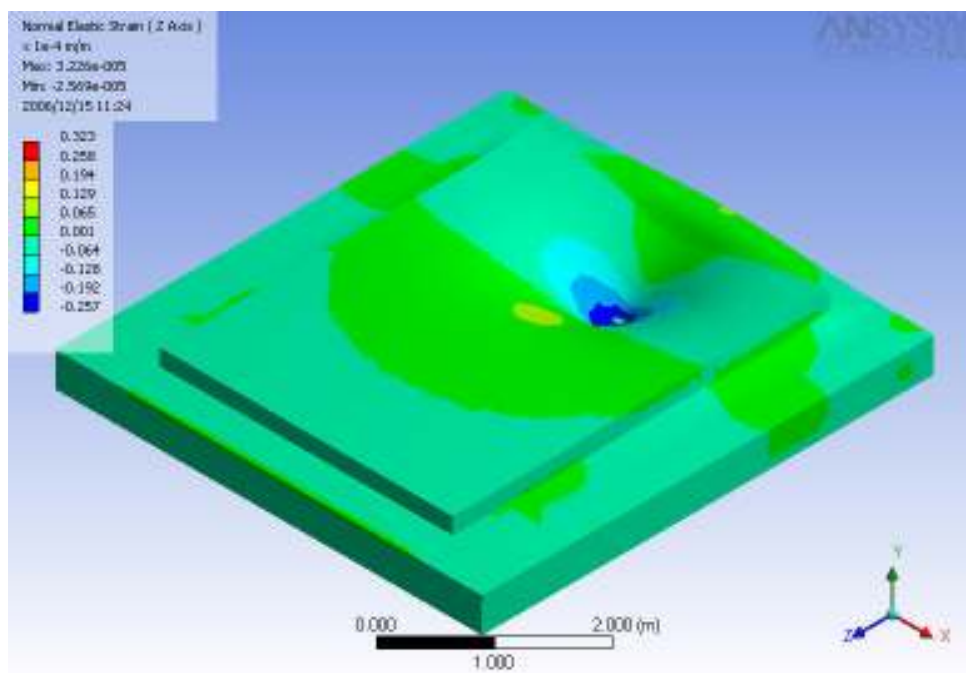


(b)

Figura 6.13 Tensões na placa para carga a 85 cm do bordo. (a) Tensão no eixo x. (b) Tensão no eixo z.



(a)



(b)

Figura 6.14 Deformações na placa para carga a 85 cm do bordo. (a) Deformação no eixo x. (b) Deformação no eixo z.

Percebe-se que o nível de tensões e deformações provocados pela carga aplicada no centro da placa é significativamente inferior aos provocados pela aplicação da carga a 85 cm do bordo, o que já era esperado, mesmo partindo das teorias demonstradas no Capítulo 2.

6.2 Execução e testes

6.2.1 Base de brita graduada

A base em brita graduada foi executada em três camadas, de aproximadamente 15 cm de espessura cada, sobre placas de compensado posicionadas em cima de uma laje de reação, ficando a espessura final, após a compactação, em torno de 42 cm. Nas laterais foi formado um talude. Para a compactação de cada camada foi utilizado um rolo de chapa liso vibratório com dois tambores, pesando 1250 kg (Figura 6.15).



Figura 6.15 Compactação da base.

Após executada esta camada de base, foi aplicada uma emulsão asfáltica, e após sua cura foi verificado o coeficiente de recalque da base, aplicando-se uma carga sobre chapa de aço circular e monitorada a deformação vertical em 6 pontos (Figura 6.16), permitindo assim também a visualização da bacia de deformações sofridas pela base. A fim de verificar

a influência da área de aplicação da carga, foram testados dois tipos de chapas de aço circulares, sendo a primeira com raio 10,8cm, e a segunda com raio 14,35 cm e espessuras de 2 cm.



Figura 6.16 Instrumentação para o ensaio da base.

A disposição dos transdutores de deslocamento no ensaio da base foi a demonstrada nas Figuras 6.17 e 6.18.

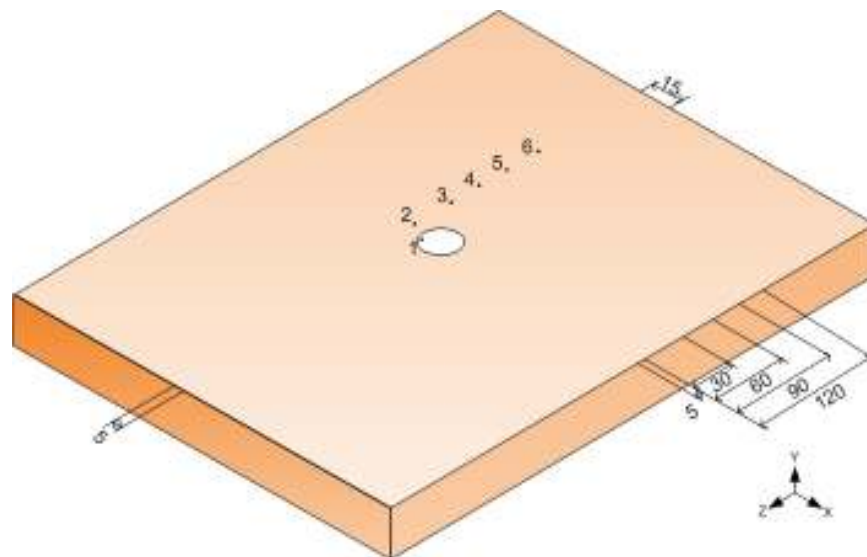


Figura 6.17 Localização dos transdutores de deslocamento para o ensaio da base para a chapa de raio 10,8 cm.

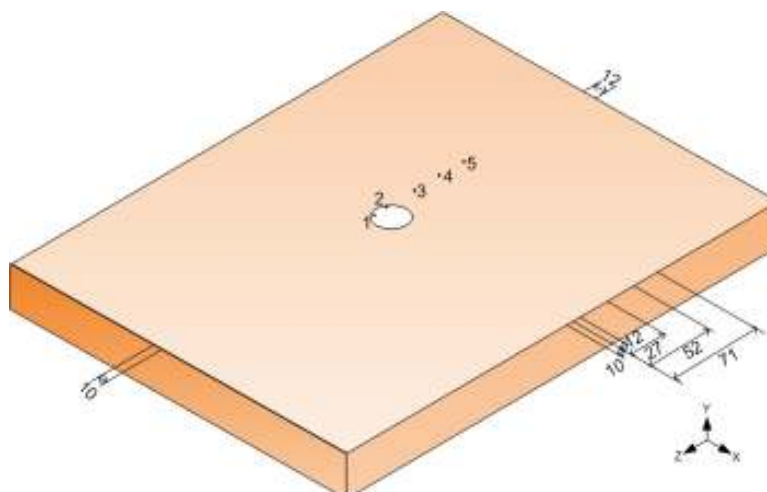


Figura 6.18 Localização dos transdutores de deslocamento para o ensaio da base para a chapa de raio 14,35 cm.

6.2.2 Placa de concreto

Sobre a base de brita graduada e a emulsão asfáltica, foi colocada uma lona a fim de diminuir o atrito da placa com a base. A seguir foi executada a placa de concreto com 20 cm de espessura. Para tal, foi dosado em uma concreteira 4m^3 do concreto do Traço V, colocado sobre a base com fôrmas laterais limitando suas dimensões. O adensamento foi feito através de vibradores de agulha, e posteriormente feito o arrasamento e alisamento da superfície. Durante o processo de concretagem, devido à alta temperatura ambiente no dia, bem como o tempo de transporte da usina até o laboratório, houve uma significativa perda na trabalhabilidade do concreto, sendo necessária a redosagem do aditivo no terço final da placa, e ainda, posteriormente, o acréscimo de água no final da concretagem, para tornar viável o lançamento do concreto. O tempo de dosagem do concreto na usina foi de 36 minutos, e sua temperatura na saída foi de $36,2^\circ\text{C}$. No início do lançamento do concreto a temperatura era de $37,5^\circ\text{C}$, 1 hora e 15 minutos após a dosagem. O tempo de lançamento foi de 1 hora e 18 minutos.

No interior do concreto, nos pontos imediatamente abaixo do eixo da célula de carga, foram inseridos extensômetros de imersão, a fim de monitorar as deformações, para posterior obtenção das tensões no fundo da placa. Como não é possível inserir extensômetros na face inferior da placa, foram colocados quatro deles em diferentes alturas

em um mesmo ponto da placa, para que, considerando um comportamento linear, fosse possível estimar a deformação ocorrente na face inferior. Utilizou-se então, em cada ponto, três extensômetros de imersão e um de superfície (Figura 6.19), dispostos conforme ilustrado na Figura 6.20.



Figura 6.19 Extensômetros: (a) de imersão. (b) de superfície.

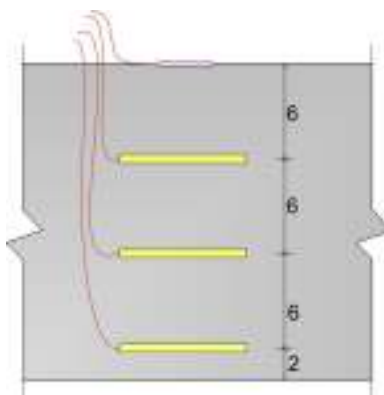


Figura 6.20 Disposição dos extensômetros na altura da placa.

Além disso, foram inseridos termopares a fim de monitorar a temperatura da placa para estimar a resistência através do método da maturidade. A localização dos termopares é dada pela Figura 6.21, com as medidas em centímetros. O canal 1 foi inserido em um corpo-de-prova de 15x30 cm.

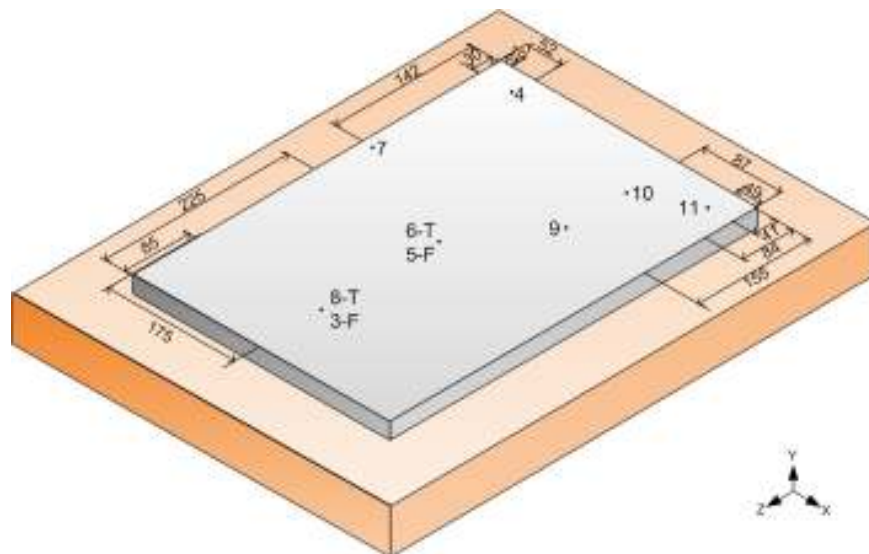


Figura 6.21 Localização dos termopares na placa.

Os termopares indicados com T (topo) foram colocados juntamente com o extensômetro de imersão a 14 cm do fundo da placa. Já os termopares indicados com F (fundo) foram colocados juntamente com o extensômetro de imersão a 2 cm do fundo da placa. Os demais foram inseridos aproximadamente à meia profundidade na placa.

Foram montados dois pórticos metálicos sobre a estrutura, nos quais foram fixados macacos hidráulicos com células de carga para a aplicação de carga à estrutura, nos pontos definidos a partir da análise numérica: no centro da placa e a 85 cm do bordo (Figura 6.22). Sob a célula de carga, foi fixada uma viga metálica para distribuir a carga sobre duas chapas metálicas de raio 10,8 cm, espaçadas entre si de 31 cm entre eixos, simulando os pneus de um veículo de carga, conforme descrito no Item 6.1. Para proporcionar a uniformização na distribuição das tensões sobre a placa de pavimento, entre esta e as chapas metálicas foi colocada uma borracha de neoprene de espessura 6 mm.

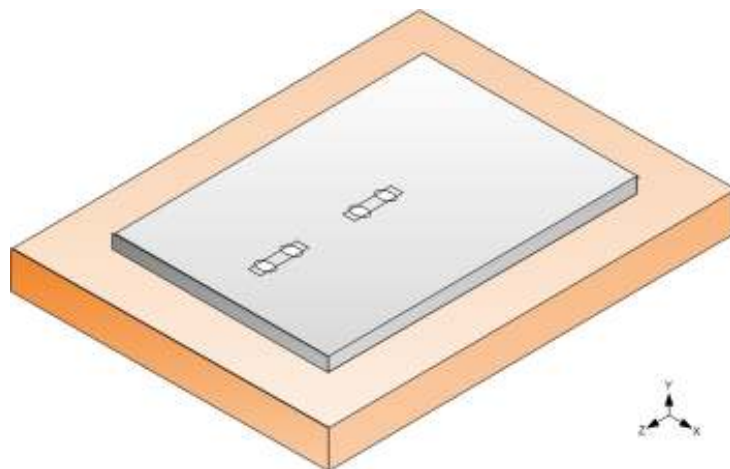


Figura 6.22 Posicionamento dos pontos de aplicação de carga.

Através do monitoramento da temperatura e do ultra-som, utilizaram-se as curvas de maturidade para estimar a resistência do concreto. A partir daí, na idade determinada por esta estimativa para a resistência à tração na flexão de 2 MPa, iniciaram-se os ensaios. Primeiramente, no ponto a 85 cm do bordo e, posteriormente, no centro da placa.

Para o monitoramento dos deslocamentos verticais, para cada um dos ensaios foram posicionados transdutores de deslocamento em diversos pontos da placa, ilustrados nas Figuras 6.23 e 6.24 para os ensaios a 85 cm do bordo e no centro da placa, respectivamente (Figura 6.25), com as medidas em centímetros.

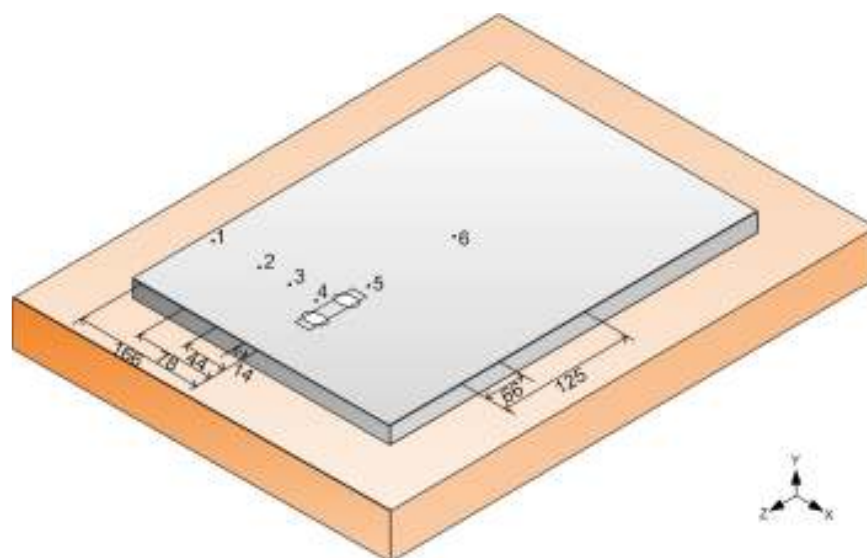


Figura 6.23 Localização dos transdutores de deslocamento para a carga a 85 cm do bordo da placa.

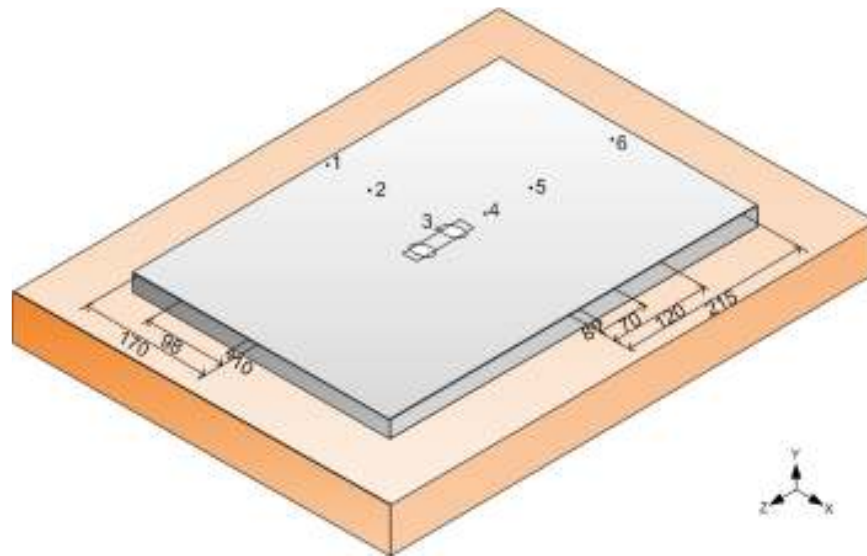


Figura 6.24 Localização dos transdutores de deslocamento para a carga no centro da placa.



Figura 6.25 Fixação dos transdutores de deslocamento.

Paralelamente ao ensaio da placa, foram rompidos corpos-de-prova de 10x20 cm para resistência à compressão e de 15x15x50 cm para resistência à tração na flexão. Aos 28 dias de idade, para fins de caracterização, foram também rompidos corpos-de-prova de 15x30 cm para resistência à compressão e corpos-de-prova para resistência à tração na flexão.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos.

6.3 Resultados

6.3.1 Base

Conforme descrito anteriormente, o ensaio da base foi executado com duas chapas metálicas de diferentes raios. Para a configuração de ensaio descrita anteriormente na Figura 6.17, a chapa de raio 10,8 cm apresentou os resultados mostrados na Figura 6.26 até a carga máxima de 13.524 kgf.

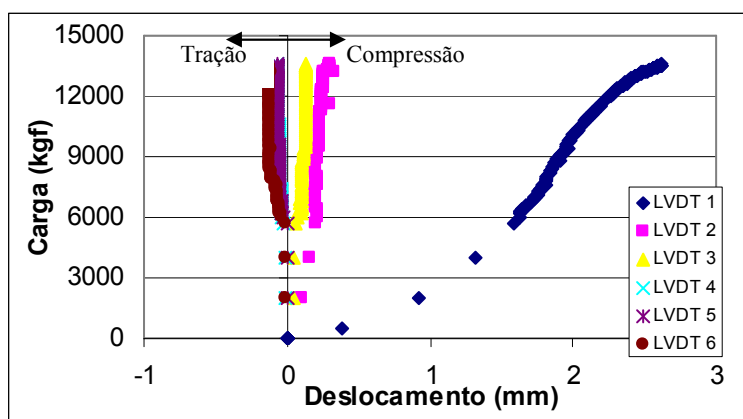


Figura 6.26 Comportamento da base quando utilizada chapa de raio 10,8 cm.

Percebe-se o grande deslocamento para transdutores perto da placa, diminuindo com o afastamento desta, chegando a deslocamentos negativos, indicativo de que há subida de material após determinada distância da carga, conforme o esperado, o que pode ser visualizado, para a carga máxima e duas cargas intermediárias, na bacia de deformações mostrada na Figura 6.27.

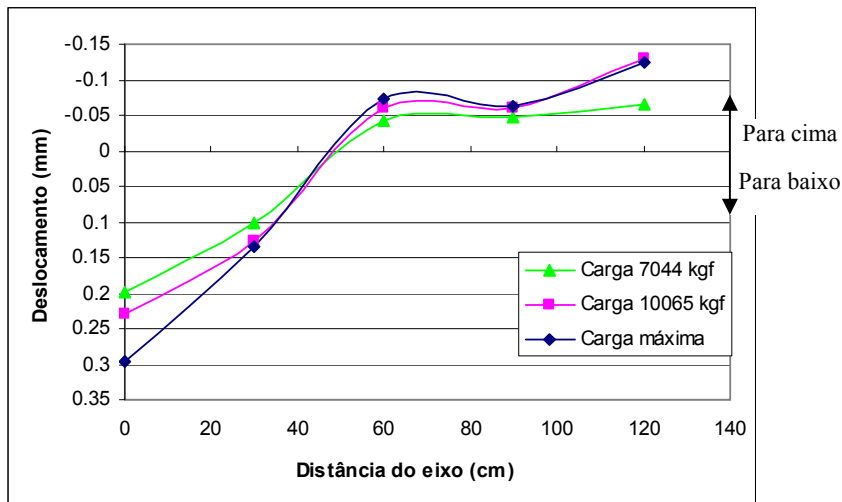


Figura 6.27 Bacia de deformações quando utilizada chapa de raio 10,8 cm.

Para a chapa de raio 14,35 cm, com a localização dos transdutores de deslocamento ilustradas anteriormente na Figura 6.18, os resultados são apresentados na Figura 6.28 até a carga máxima, de 7.911 kgf.

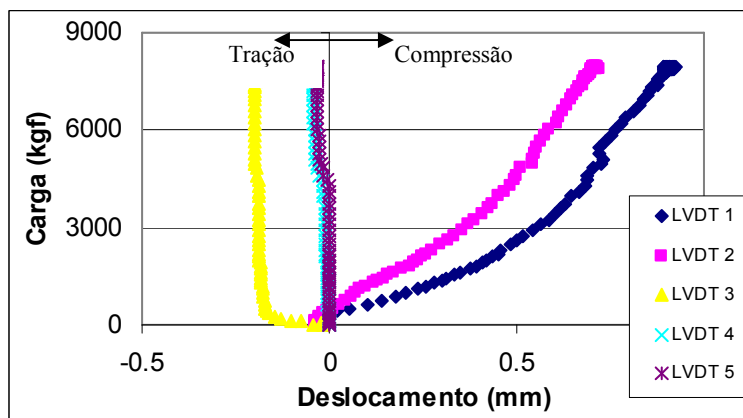


Figura 6.28 Comportamento da base quando utilizada chapa de raio 14,35 cm.

Ocorre o mesmo comportamento quanto à bacia de deformações identificado na chapa anterior, podendo também ser visualizado na Figura 6.29 para a carga máxima e duas cargas intermediárias.

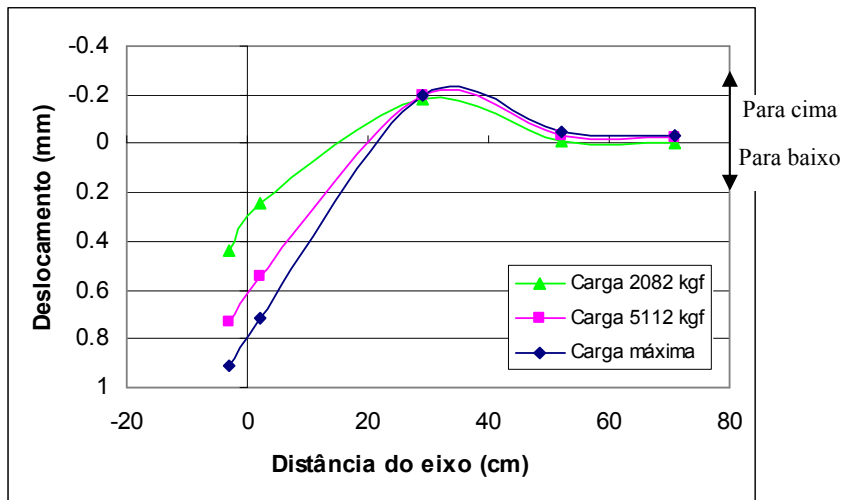


Figura 6.29 Bacia de deformações quando utilizada chapa de raio 14,35 cm.

Traçou-se então curvas tensão *versus* deslocamento provocadas pelas chapas de 10,8 cm e 14,35 cm sobre a base de brita graduada quando aplicado o carregamento, considerando-se apenas o trecho onde o material apresenta comportamento elástico, Figura 6.30, onde percebe-se que estas possuem a mesma inclinação, ou seja, o mesmo Coeficiente de Recalque, o que indica que não houve influência do diâmetro da chapa, ou seja, da área de aplicação da carga no nível de tensões analisado.

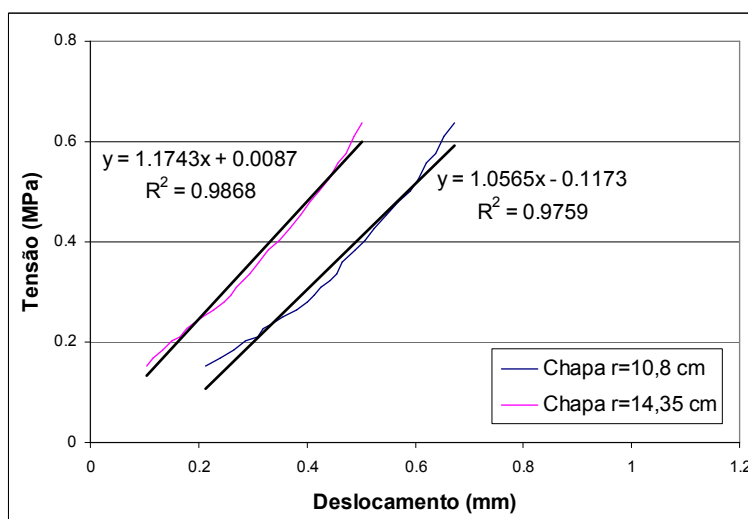


Figura 6.30 Comparação entre as tensões provocadas pelas duas chapas.

A partir daí, obtém-se o valor de coeficiente de recalque de aproximadamente 100 MPa/m.

6.3.2 Placa

Conforme descrito anteriormente, foram realizados dois ensaios na placa, um a 85 cm do bordo e outro no centro da placa, aqui denominados de canto e meio, respectivamente.

Para determinar o momento do início do primeiro ensaio, foi estimada a resistência a partir do método da maturidade, utilizando a curva de maturidade desenvolvida anteriormente. As temperaturas adquiridas com os termopares estão demonstradas na Figura 6.31, onde se percebe a grande diferença de temperatura da placa para o corpo-de-prova (Canal 1), o que já era esperado. Assim, volta-se a destacar a importância do uso de ensaios não destrutivos no monitoramento da resistência, já que tal diferença de temperatura certamente acarreta grandes variações no ganho de resistência, não fornecendo os corpos-de-prova estimativas muito confiáveis quanto à resistência real da estrutura.

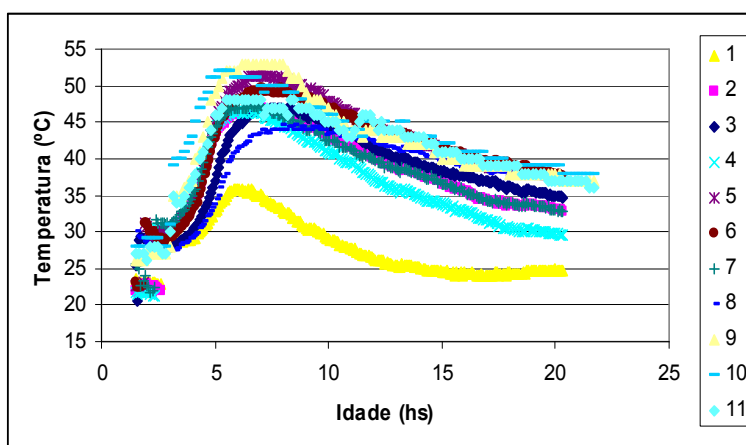


Figura 6.31 Perfil de Temperaturas.

A temperatura ambiente no momento da concretagem foi muito alta. Além disso, devido à grande massa de concreto moldada, o calor liberado pela hidratação do cimento

foi muito alto, como percebe-se na Figura 6.31, ultrapassando os 50°C, o que acelerou ainda mais o ganho de resistência do concreto. Com isso, depois de findados os trabalhos de concretagem, houveram erros na estimativa do tempo necessário para o ganho da resistência necessária a partir dos dados dos corpos-de-prova executados anteriormente, sendo que, até a montagem dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios, a resistência já havia ultrapassado o esperado. O início dos ensaios se deu após 10 horas da mistura do concreto. Nesse momento, as idades equivalentes, para cada ponto onde foi monitorada a temperatura, foram as demonstradas na Tabela 6.3. Percebe-se que os valores de Idade Equivalente dependem da propriedade estudada, visto que foram utilizados diferentes valores de Energia Aparente de Ativação para cada parâmetro.

Tabela 6.3 Idades equivalentes.

Termopar	Idade Equivalente (hs @ 20°C)		
	Compressão	Tração na Flexão	Ultra-som
1	17,16	15,94	10,67
2	29,95	22,26	12,63
3	29,22	22,37	12,54
4	29,49	21,54	12,60
5	36,97	25,31	13,50
6	33,84	24,08	13,13
7	31,04	22,20	12,83
8	25,98	20,88	12,11
9	40,40	16,15	13,88
10	39,95	16,10	13,95
11	33,56	16,06	13,27

Focando a curva de maturidade para tração na flexão nas idades iniciais (Figura 6.32), onde podem-se visualizar as idades equivalentes mostradas na Tabela 6.3, é possível estimar a resistência à tração na flexão através desta. Os valores estimados são demonstrados na Tabela 6.4.

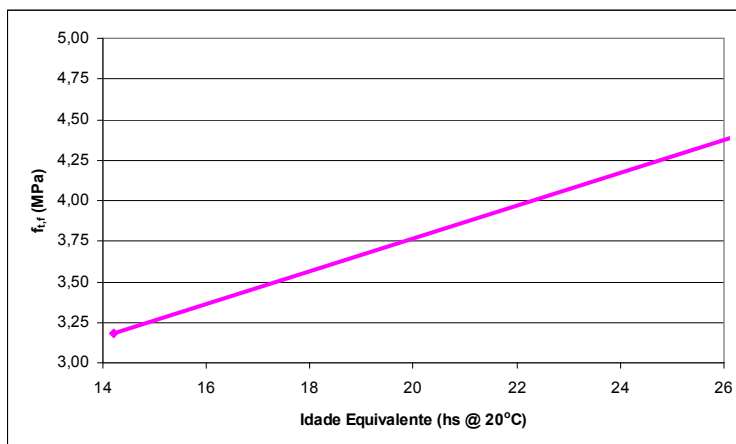


Figura 6.32 Curva de maturidade para tração na flexão nas primeiras idades.

Tabela 6.4 Resistência à tração na flexão estimada pela curva de maturidade.

Termopar	f _{t,r} (MPa)
1	3,22
2	3,82
3	3,85
4	3,76
5	4,10
6	3,95
7	3,82
8	3,72
9	3,25
10	3,25
11	3,20

Também percebe-se novamente a grande diferença entre resultados no corpo-de-prova e na estrutura, podendo, em obras, ocasionar a liberação tardia ao tráfego.

Traçando-se uma curva de tendência para a curva de maturidade da resistência à tração na flexão com as médias das temperaturas obtidas através dos termopares nos canais 2 a 11, pode-se estimar o tempo que seria necessário para que o concreto atingisse a resistência à tração na flexão de 2 MPa, o que pode ser visualizado na Figura 6.33.

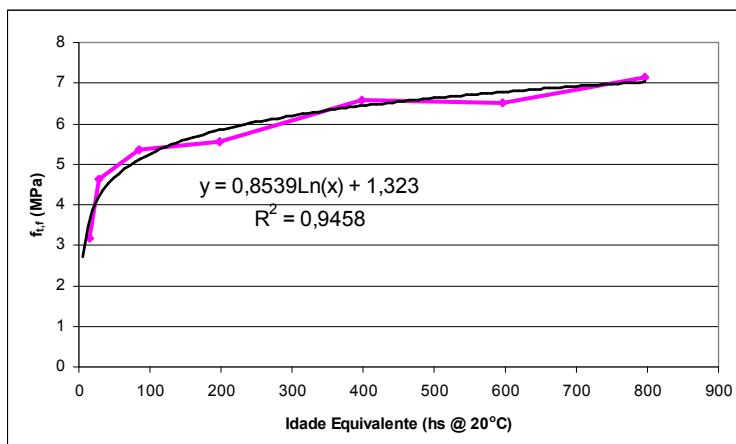


Figura 6.33 Curva de tendência para a curva de maturidade para tração na flexão para o Traço V.

Focando-se no início da curva, pode-se perceber que, de acordo com a curva de tendência, a idade equivalente relativa à resistência à tração na flexão de 2 MPa é de aproximadamente quatro horas, como pode ser visto na Figura 6.34, o que se daria em torno de quatro horas de idade real.

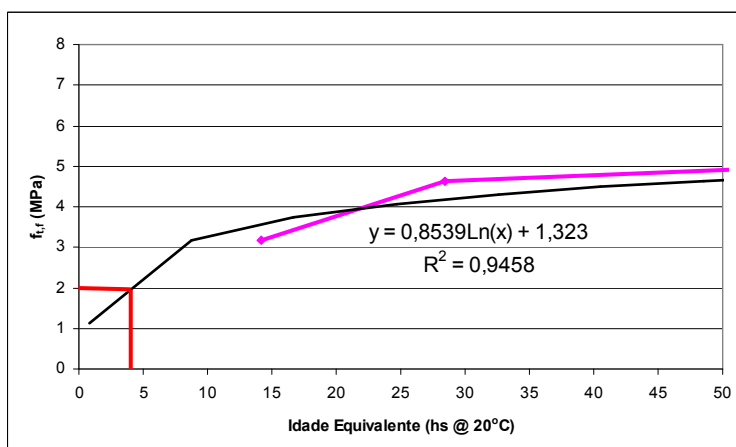


Figura 6.34 Estimativa da Idade Equivalente para a resistência à tração na flexão de 2MPa.

Visto que a evolução da resistência deu-se mais rápido do que o esperado, o monitoramento com ultra-som também foi prejudicado, ficando um intervalo grande de tempo sem medidas. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6.35.

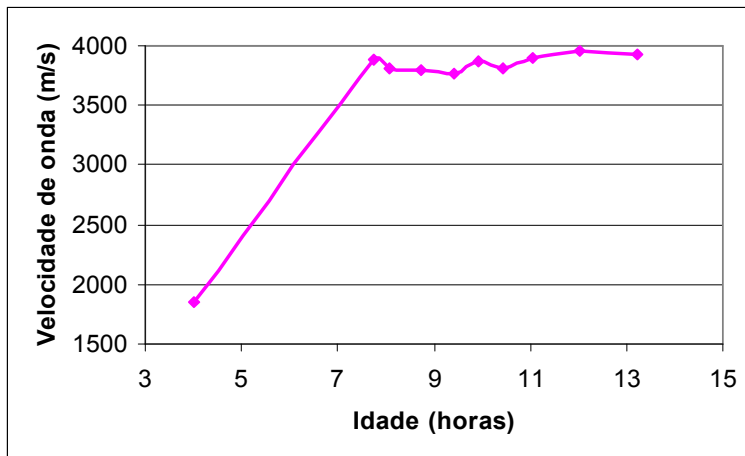


Figura 6.35 Ultra-som na placa.

6.3.2.1 Ensaio a 85 cm do bordo da Placa

Para o ensaio no canto da placa, os resultados obtidos para os transdutores de deslocamento, nas posições descritas anteriormente, na Figura 6.23, foram os ilustrados na Figura 6.36. Alguns transdutores apresentaram problemas, não fornecendo leituras (LVDT 3). Percebe-se que o transdutor mais próximo ao ponto de aplicação da carga (LVDT 4) apresenta deslocamentos positivos, enquanto os transdutores mais distantes (LVDT 1 e 6) têm deslocamentos negativos, conforme o esperado.

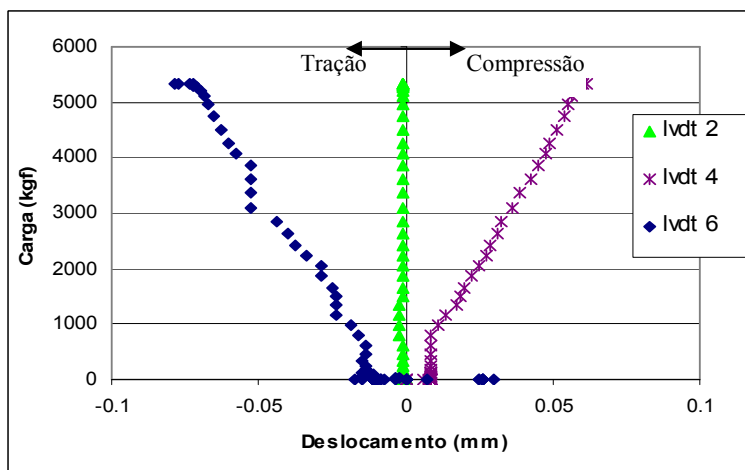


Figura 6.36 Resultados dos transdutores de deslocamento para o ensaio no canto da placa.

Já para os *strain gages* logo abaixo do local do carregamento, as deformações ocorridas estão representadas na Figura 6.37. O *strain gage* de superfície foi danificado durante o ensaio, não fornecendo resultados. O *strain gage* denominado “A” está a 18cm da superfície, o “B” a 12cm e o “C” a 6cm.

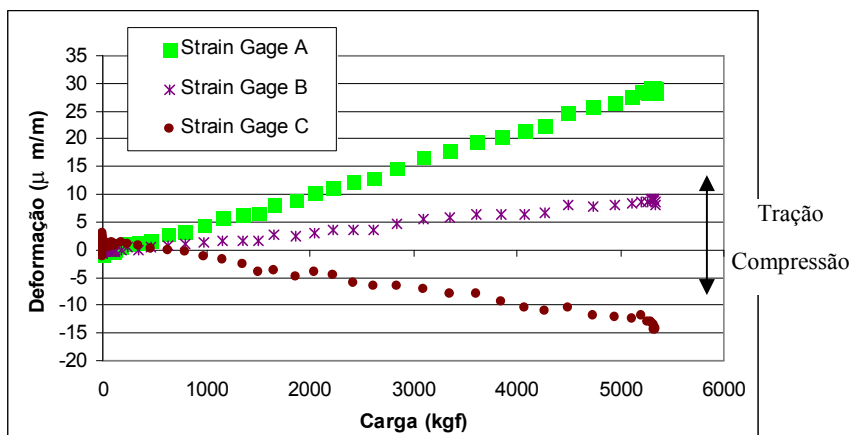


Figura 6.37 Resultados dos *strain gages* para o ensaio no canto da placa.

Como era esperado, em diferentes alturas da placa ocorrem diferentes deformações, de forma linear, sendo possível com estes resultados localizar a posição da linha neutra da seção, bem como estimar-se as deformações no fundo da placa, ilustradas na Figura 6.39. Para esta estimativa, verificou-se que os dados, fornecidos pelos *strain gages*, eram confiáveis, bastando uma interpolação linear para estimar-se a deformação no fundo da placa, conforme a Figura 6.38.

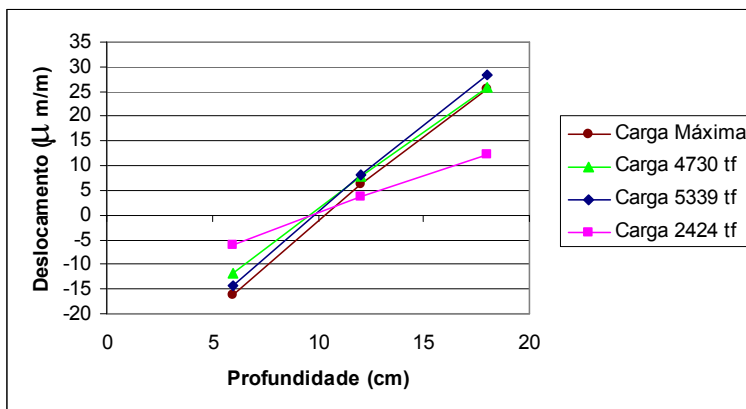


Figura 6.38 Linhas de Deformações com as estimativas para o fundo da placa em diferentes níveis de carregamento (eixo x).

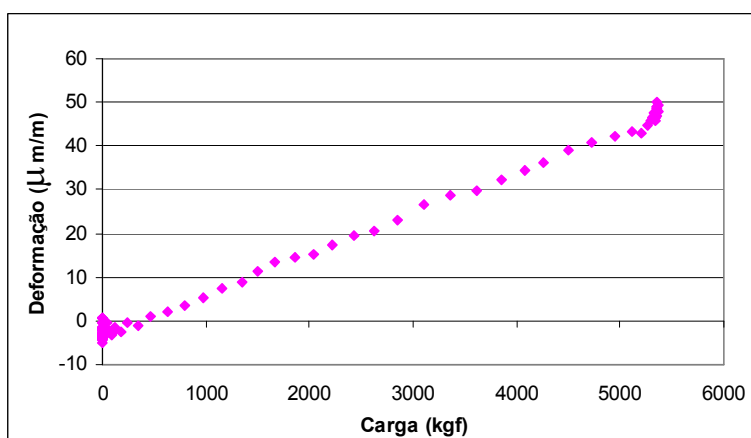


Figura 6.39 Estimativa das deformações no fundo da placa para o ensaio no canto da placa (eixo x).

A bacia de deformações para a carga máxima aplicada e uma carga intermediária foi a seguinte, desconsiderando o LVDT 3 que não apresentou resultados (Figura 6.40).

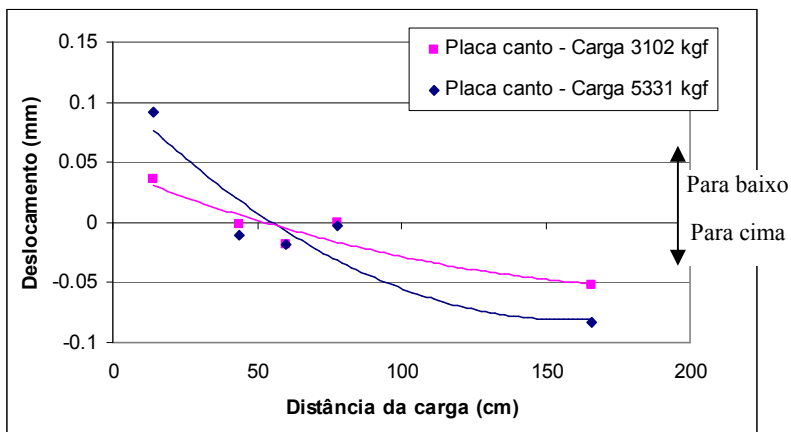


Figura 6.40 Bacia de deformações para o ensaio no canto da placa.

Este comportamento indica que em pontos próximos à aplicação da carga há um afundamento, e pouco mais distante há uma tendência de subida da estrutura, comportamento semelhante ao observado no ensaio da base.

A Figura 6.41 mostra o comportamento dos transdutores de deslocamento no ponto mais próximo e no ponto mais distante do eixo da aplicação da carga medidos.

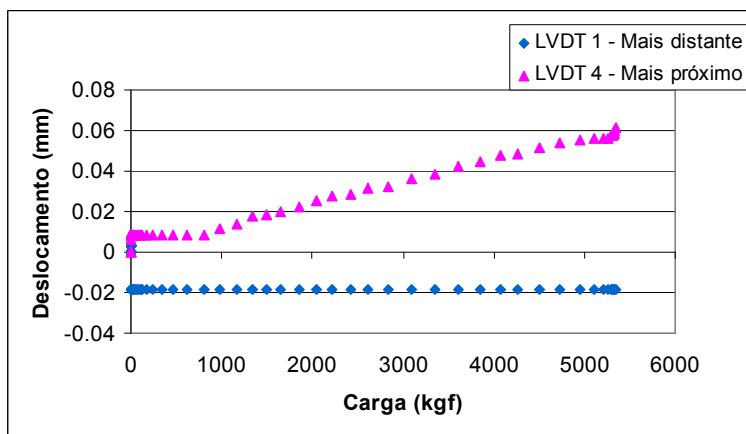


Figura 6.41 Resultados dos transdutores de deslocamento mais próximo e mais distante do ponto de aplicação de carga, para o ensaio no canto da placa.

No instante em que este carregamento foi aplicado à placa, os corpos-de-prova rompidos forneceram os seguintes resultados (Tabela 6.5):

Tabela 6.5 Resistência dos Corpos-de-Prova no instante do ensaio no canto da placa.

	Idade (horas)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Compressão	10:09	8,95	9,21	0,56
	10:12	8,76		
	10:16	9,85		
	10:20	8,48		
	10:24	9,45		
	10:27	9,78		
Tração na Flexão	10:39	2,43	2,57	0,29
	10:42	2,38		
	10:47	2,90		

Os resultados de resistência à tração na flexão foram abaixo do estimado através da curva de maturidade que, para as medidas de temperatura obtidas no corpo-de-prova (Canal 1), indicavam a resistência de 3,22 MPa. Isto pode ter ocorrido provavelmente pela necessidade de acréscimo de água ao concreto pela perda de trabalhabilidade durante a concretagem, justamente no concreto utilizado nos corpos-de-prova de tração.

Porém, apesar disso, percebe-se que a resistência à tração na flexão é da ordem de 28% da resistência à compressão, comportamento normal em idades iniciais, conforme descrito em Rheinheimer et al. (2006).

Contudo, com esta idade, a partir da estimativa pela curva de maturidade, bem como da ruptura dos corpos-de-prova, a resistência à tração na flexão obtida foi acima do estabelecido para a aplicação da carga, simulando a liberação ao tráfego nesta idade.

6.3.2.2 Ensaio no centro da Placa

Já para o ensaio no meio da placa, os resultados obtidos para os transdutores de deslocamento, nas posições descritas anteriormente (Figura 6.27), foram os ilustrados na Figura 6.42. Os transdutores de número 2 e 4 falharam e, portanto, não forneceram dados.

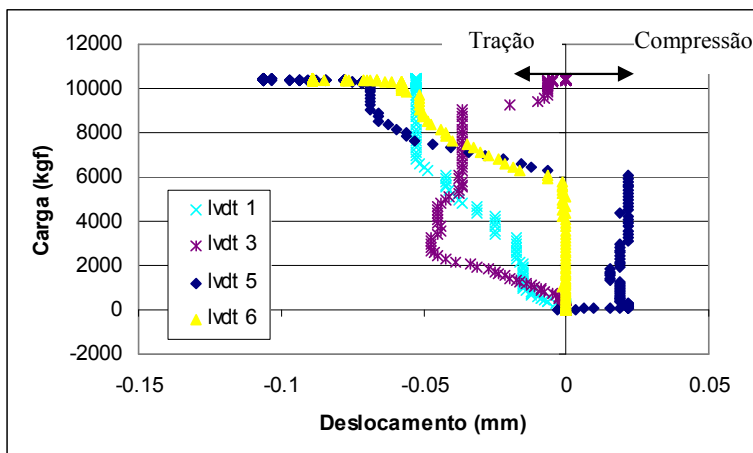


Figura 6.42 Resultados dos transdutores de deslocamento para o ensaio no meio da placa.

Estes resultados de transdutores de deslocamento não foram satisfatórios, já que não apresentaram um comportamento coerente. Provavelmente tenha ocorrido algum erro durante a realização do ensaio.

As deformações ocorridas nos *strain gages* logo abaixo do local do carregamento estão representadas na Figura 6.43. O *strain gage* de imersão localizado mais acima na placa foi danificado durante o ensaio, não fornecendo resultados. O *strain gage* denominado “H” esta colado na superfície, o “F” está a 12cm da superfície e o “E” a 18cm.

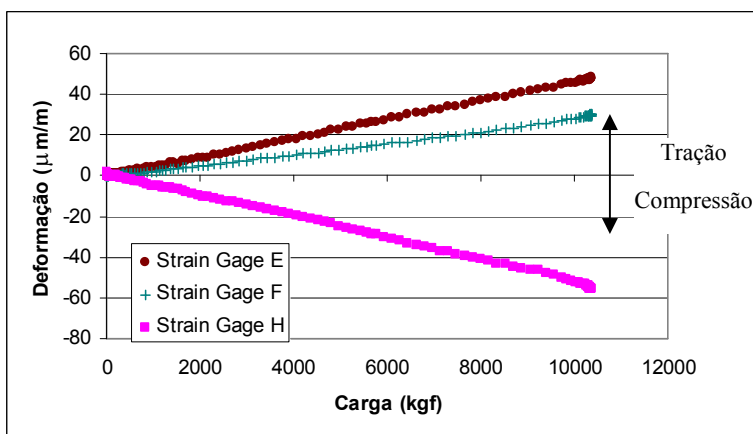


Figura 6.43 Resultados dos *strain gages* para o ensaio no meio da placa.

Da mesma maneira, a partir dos dados obtidos nos *strain gages*, estimou-se as deformações no fundo da placa, ilustradas na Figura 6.45. Para esta estimativa, verificou-se que os dados fornecidos pelos *strain gages* de superfície não eram lineares com os fornecidos pelos *strain gages* de imersão, não sendo possível estimar o deslocamento no fundo da placa a partir de todos os dados. Portanto, para a estimativa acima, foram traçadas linhas de tendência, extrapolando-se linearmente a reta para estimar-se a deformação no fundo da placa, conforme a Figura 6.44.

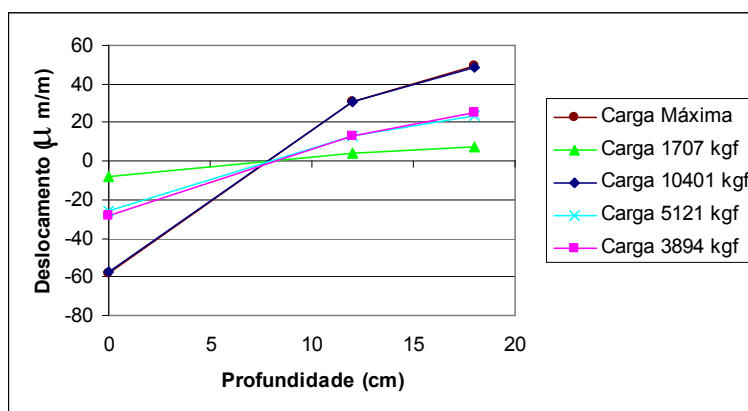


Figura 6.44 Linhas de Deformações com as estimativas para o fundo da placa em diferentes níveis de carregamento.

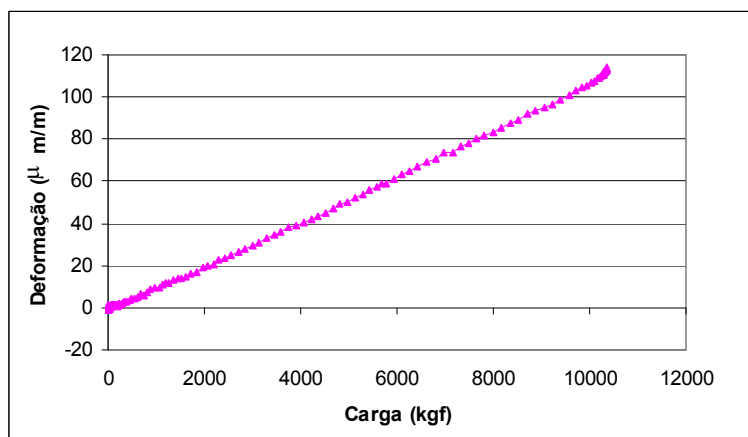


Figura 6.45 Estimativa das deformações no fundo da placa para o ensaio no meio da placa.

A bacia de deformações para a carga máxima aplicada e uma carga intermediária foi mostrada na Figura 6.46, considerando os quatro transdutores demonstrados na Figura 6.42.

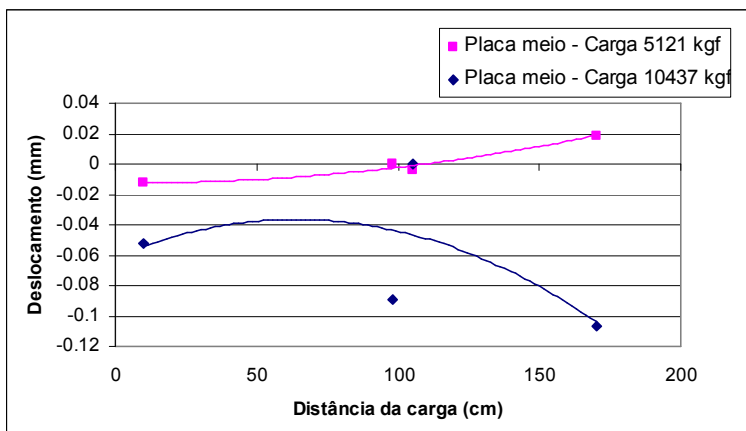


Figura 6.46 Bacia de deformações para o ensaio no meio da placa.

A Figura 6.47 mostra o comportamento dos transdutores de deslocamento no ponto mais próximo e no ponto mais distante do eixo da aplicação da carga medidos.

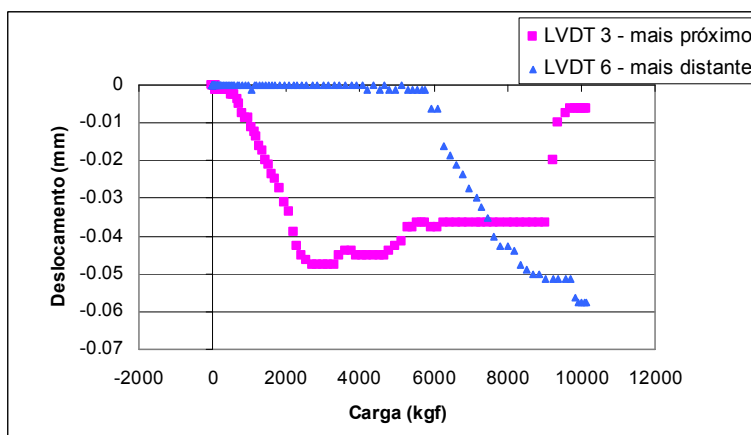


Figura 6.47 Resultados dos transdutores de deslocamento mais próximo e mais distante do ponto de aplicação de carga, para o ensaio no meio da placa.

No instante em que este carregamento foi aplicado ao centro da placa, os corpos-de-prova rompidos forneceram os seguintes resultados (Tabela 6.6):

Tabela 6.6 Resistência dos Corpos-de-Prova no instante do ensaio no centro da placa.

	Idade (horas)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)
Compressão	12:40	11,92	12,13
	12:43	12,72	
	12:45	11,75	
Tração na Flexão	12:25	2,58	2,74
	12:30	2,89	

Neste instante a relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão já passou a ser da ordem de 23%.

Os resultados de resistência à tração na flexão e à compressão foram abaixo do estimado através da curva de maturidade que, para as medidas de temperatura obtidas no corpo-de-prova (Canal 1), indicavam a resistência de 3,90 MPa e 22,5 MPa, respectivamente. O motivo provavelmente seria o mesmo do ensaio no canto da placa.

Aos 28 dias foram ensaiados três corpos-de-prova de resistência à compressão e três corpos-de-prova de resistência à tração na flexão, cujos resultados foram os mostrados na Tabela 6.7, sendo a relação entre as resistências da ordem de 11%.

Tabela 6.7 Resultados de resistência aos 28 dias.

	Compressão	Tração na Flexão
Resistência (MPa)	54,21	6,37
	52,68	6,23
	53,99	5,67
Média	53,63	6,09

6.3.2.3 Comparação entre modelo numérico e modelo real

Simulando-se numericamente a evolução da aplicação da carga até a máxima, nas duas situações estudadas, com as mesmas características do modelo numérico anterior, pode-se comparar os resultados de deformação ao longo do eixo x (mesma direção onde

foram inseridos os *strain gages*), com os estimados pelos *strain gages* durante a prova-de-carga (Figuras 6.39 e 6.44), como mostrado nas Figuras 6.48 e 6.49 para a carga a 85 cm do bordo da placa e no centro da placa, respectivamente.

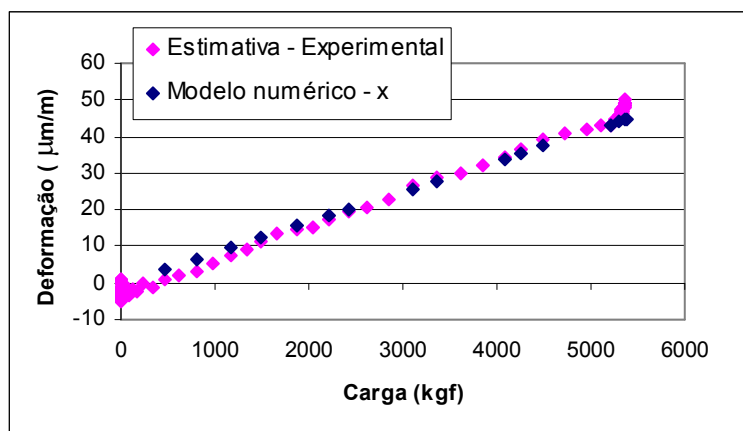


Figura 6.48 Comparação entre resultados do modelo numérico e da prova de carga para a placa de pavimento com carga aplicada a 85 cm do bordo.

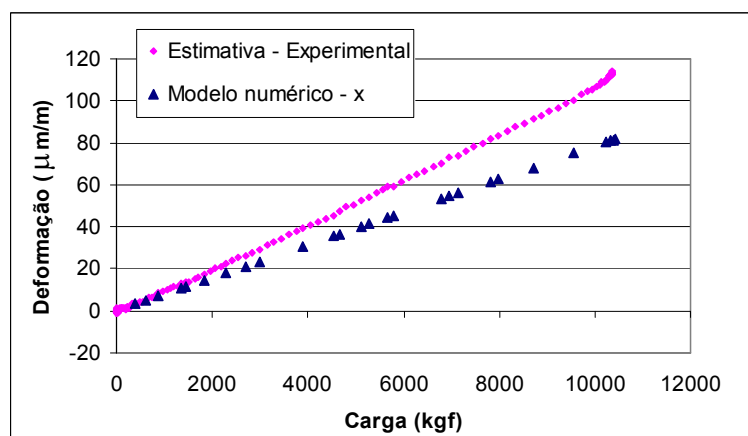


Figura 6.49 Comparação entre resultados do modelo numérico e da prova de carga para a placa de pavimento com carga aplicada no centro.

Percebe-se que para a carga aplicada a 85 cm do bordo da placa os resultados para deformação fornecidos pelos *strain gages* durante o ensaio foram exatamente os mesmos obtidos durante a simulação numérica. Já para a carga no centro da placa, o comportamento real foi diferente do estimado pelo programa numérico, provavelmente pela não linearidade dos valores obtidos com os *strain gages* durante o ensaio.

Também pode-se considerar que a curva do modelo teórico é mais baixa que do modelo experimental por diferenças no módulo de elasticidade do concreto, o que implicaria em uma maior deformabilidade da estrutura real em comparação com o modelo numérico, já que o ensaio de módulo foi realizado com 12 horas de idade.

Também pode-se estimar a tensão através das equações da teoria de Westergaard. Considerando então:

$$E = 4.10^{10} Pa$$

$$\nu = 0,2$$

$$k = 100 Pa / m$$

E sendo a carga de 2,5 tf equivalente a uma pressão de 669.057 Pa, ou 25 KN, sobre a área de uma chapa metálica onde foram aplicadas as cargas, com $a=0,108 m$, pode-se calcular, a partir da Equação 2.8, o Raio de Rigidez Relativa:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} = \sqrt[4]{\frac{4.10^{10} \cdot 0,2^3}{12(1-(0,2)^2)100.10^6}} = 0,726m \quad (6.1)$$

A partir daí, pode-se calcular a tensão de tração máxima na placa provocada pela carga aplicada, calculada pela Equação 2.10:

$$\sigma_i = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{\lambda}{a} + 0,6159 \right) = \frac{3(1+0,2)25}{2\pi(0,2)^2} \left(\ln \frac{0,4639}{0,108} + 0,6159 \right) = 0,74MPa \quad (6.2)$$

Se comparados com os valores encontrados na simulação numérica, ou os valores obtidos experimentalmente, considerando que nestes cálculos supõe-se uma única área circular onde se aplicam as cargas, percebe-se que o nível de tensão está dentro da ordem de grandeza encontrada nas outras situações. Deve-se levar em consideração que este cálculo é apenas para uma das rodas, sendo que, para verificar o efeito das duas, semelhante ao ensaio em tamanho real, é preciso fazer uma superposição de efeitos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivos estudar diferentes traços para pavimentos de concreto *fast track*, construindo suas curvas de maturidade, visando proporcionar o monitoramento do ganho de resistência através de alguns parâmetros: resistência à compressão, resistência à tração na flexão, ultra-som e início e fim de pega. Os cinco traços estudados utilizaram diferentes proporcionamentos, bem como diferentes materiais disponíveis na região da grande Florianópolis, variando tipo de cimento, de agregados e de aditivos. A partir daí, buscou-se conhecer o comportamento de um dos traços estudados em uma estrutura em tamanho real, moldando-se então uma placa de pavimento e monitorando-se seu comportamento quanto ao ganho de resistência com o tempo e a distribuição de tensões e deformação quando submetida a carregamento.

Deve-se levar em consideração que as conclusões apresentadas a seguir são baseadas em estudos realizados em laboratório, havendo diferenças importantes para um possível concreto executado em um canteiro de obras, sendo recomendado antes da aplicação destes traços um estudo do comportamento *in loco*, ou outras pesquisas que complementem os estudos apresentados neste trabalho.

7.1 CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos durante o programa experimental, pode-se dizer que os traços estudados podem ser utilizados em pavimentos de concreto *fast track*, já que atendem aos requisitos de resistências altas em pequenas idades. O pavimento de concreto *fast track* já vem sendo aplicado em algumas obras no Brasil, mas sua potencialidade técnica permite que este uso seja bastante ampliado, já que obedece a exigências de altas resistências em poucas horas. Os materiais existentes na região da grande Florianópolis permitem este tipo de uso. Podem-se citar as seguintes conclusões:

- Quanto à resistência

Sendo o critério para a liberação ao tráfego de 60% da resistência final, que normalmente se especifica em 4,5MPa para a resistência à tração na flexão, percebe-se que todos os traços atingem esta resistência com um dia, sendo possíveis de serem utilizados em pavimentos de concreto *fast track*, permitindo a liberação ao tráfego rapidamente.

Alguns dos traços estudados, como os traços IV e V, podem ser considerados concretos de alto desempenho, já que atingiram níveis de resistência bastante elevados aos 28 dias.

O Traço V, escolhido para a moldagem da placa de pavimento, apresentou resultados extremamente satisfatórios, tendo em 12 horas ultrapassado em mais de 50% a resistência mínima exigida para a liberação ao tráfego estabelecida como 2 MPa. Além disso, ficou evidente a alta relação entre resistência à tração na flexão e à compressão em idades iniciais, relação esta que foi diminuindo com o passar do tempo.

- Quanto ao ultra-som

O ensaio de ultra-som nem sempre se mostrou eficiente, sendo em alguns traços impossível traçar uma curva de maturidade ou obter valores de Energia Aparente de Ativação a partir deste parâmetro.

O ensaio de ultra-som na sua forma de medida indireta não apresentou bons resultados, ficando muitas vezes impossível estimar a resistência a partir das curvas de maturidade deste parâmetro, além da grande variabilidade de resultados.

Na forma de medida direta, os resultados obtidos nos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos de concreto foram sempre muito semelhantes, diferindo das observações de Câmara (2006).

Os resultados de velocidade de ultra-som no modo indireto foram, em todos os casos, inferiores à velocidade pelo modo direto. Esta diferença era esperada, visto que a camada superficial da peça, onde ocorre a propagação da onda na leitura indireta, possui maior concentração de finos devido a efeitos de exsudação, não sendo representativa do concreto do restante da peça.

Os dados obtidos através de ensaios em corpos-de-prova de referência, analisados em todas as idades, não apresentaram diferenças significativas em relação aos corpos-de-prova ensaiados com ultra-som e posteriormente rompidos, havendo assim pouca interferência no fato de mudarem-se os exemplares ensaiados ao longo do tempo.

- Quanto ao início e fim de pega

Os resultados de início e fim de pega permitiram obter valores de Energia Aparente de Ativação para antes e durante a pega, confirmado dados da literatura de que estes são diferentes, sendo, em todos os casos, maiores para antes da pega, quando a mistura é mais sensível à variações de temperatura. Estes valores também deram um indicativo desta sensibilidade, o que foi sentido no momento da concretagem da placa, quando a elevada temperatura ambiente acelerou o processo de pega.

O tempo decorrido até o início da pega foi um indicativo importante para a decisão do tempo disponível para o transporte e lançamento do concreto para a placa de concreto, mostrando-se crítico para a mistura do Traço V.

Em alguns casos valores errôneos de temperatura média levaram a estimativas incorretas de Energias Aparentes de Ativação para antes da pega.

- Quanto à placa de pavimento

Dentro da análise numérica realizada previamente, simulando a placa de pavimento, percebeu-se o aumento das tensões e deformações quando o carregamento foi aplicado junto ao bordo, em relação ao carregamento mais ao centro da placa, confirmando as teorias.

A partir dos ensaios realizados na base de brita graduada, foi feita uma retroanálise que forneceu o valor de Módulo de Elasticidade utilizado posteriormente na modelagem da placa. A comparação entre duas chapas metálicas de diferentes diâmetros para a aplicação da carga mostrou que estas não influenciavam no coeficiente de recalque da base, sendo indiferente seu uso no ensaio.

Com o monitoramento da temperatura para a estimativa da resistência pela curva de maturidade, evidenciou-se a diferença de temperatura entre os diversos pontos da placa, e, principalmente, entre a estrutura e o corpo-de-prova, demonstrando mais uma vez a necessidade de uso de ensaios não destrutivos para a predição da resistência do concreto, visto que o exemplar não demonstra com fidelidade a evolução da resistência do concreto da estrutura, que liberou muito calor durante a hidratação do cimento, atingindo temperaturas até 60% maiores do que o corpo-de-prova.

A instrumentação da placa não foi de todo eficiente, já que alguns equipamentos não forneceram resultados durante os ensaios, prejudicando a análise.

Comparando os resultados obtidos na prova-de-carga com os resultados da simulação numérica, percebe-se que para a carga a 85 cm do bordo da placa as deformações foram praticamente as mesmas durante a aplicação da carga, até a máxima, comprovando a eficiência do modelo numérico na predição destes valores. Já para a carga no centro da placa, a estimativa do modelo foi um pouco diferente da estimativa para deformação no fundo da placa através dos resultados fornecidos pelos *strain gages*. Isto pode ter ocorrido pelo mau desempenho destes equipamentos neste ensaio, já que não forneceram dados lineares de deformação na altura da placa.

Quanto à comparação com os valores obtidos nas equações da Westergaard, a tensão encontrada está na mesma ordem de grandeza das obtidas pelo método numérico.

O ensaio da placa poderia ter sido realizado com idade bastante inferior às dez horas em que foi feito. Portanto, pode-se afirmar, através dos resultados e estimativas de resistência, que um pavimento de concreto *fast track* executado *in loco*, se submetido às mesmas condições climáticas, e com o mesmo traço estudado nesta pesquisa, poderia ser liberado ao tráfego com segurança antes de seis horas após a moldagem.

7.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A técnica do pavimento de concreto *fast track* não é muito divulgada no Brasil, por isso seu uso ainda é muito restrito. Assim, o conhecimento de seu comportamento, bem

como técnicas e misturas possíveis de serem utilizadas precisam ser estudadas para a ampliação de seu uso em nosso país. O uso de métodos não destrutivos para o acompanhamento do desenvolvimento da resistência é eficiente e prático, caracterizando adequadamente este parâmetro. Durante o desenvolvimento deste trabalho, surgiram diversos assuntos, os quais dentro deste contexto, precisariam ser estudados mas que, devido às restrições de tempo e recursos, não puderam ser inseridos na pesquisa. Como sugestão de novos trabalhos, bem como de prosseguimento deste, propõe-se estudar os seguintes aspectos:

- Uso de adições no concreto para pavimentos de concreto *fast track*, visando diminuir o consumo de cimento, e assim o custo, e buscando aumentar sua resistência em pequenas idades;
- monitoramento do ganho de resistência do concreto em pequenas idades, a partir de outros ensaios não destrutivos além dos adotados neste trabalho;
- estudo de outros traços, com agregados de granulometria mais apropriada para pavimentos;
- verificação da durabilidade de placas de pavimento de concreto *fast track* em idades mais avançadas, em relação à danos por fadiga, verificando a possibilidade de danos dependendo do tempo de abertura ao tráfego;
- aplicação desta técnica em um pavimento de uma via de tráfego pesado, submetendo a placa à cargas reais, e monitorando seu desempenho;
- monitoramento da temperatura dos corpos-de-prova de concreto e de argamassa, não considerando como suas as temperaturas do ambiente;
- moldagem de placas de concreto unidas entre si por barras de transferência, e aplicação de cargas móveis cíclicas, como simuladores de tráfego.

Bibliografia

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI - 228 - 1R – 89: In Place Methods for Determination of Strength of Concrete**. Detroit, 26pp. 1989.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **Accelerated Rigid Paving Techniques**. Concrete Paving Technology: Fast-Track Concrete Pavements. Special Project 201, FHWA-SA-94-080, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Approach**. Annual Book of ASTM Standards, 1998.

_____. **ASTM C 494: Specification for Chemical Admixtures for Concrete**. Annual Book of ASTM Standards, 1992.

_____. **ASTM C 597: Standard Method for Pulse Velocity Through Concrete**. Annual Book of ASTM Standards, 1983.

_____. **ASTM C 348/02: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic cement Mortars**. Annual Book of ASTM Standards, 2002.

_____. **ASTM C 109/C 109M-02. Standard Test Method for compressive Strength of Hydraulic cement Mortars**. Annual Book of ASTM Standards, 2002.

_____. **ASTM C 403/95: Standard Test Method for Time of Setting of concrete mixtures by penetration resistance**. Annual Book of ASTM Standards, 1996.

_____. **ASTM C 597. Standard test method for pulse velocity through concrete**. Annual Book of ASTM Standards, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, Disponível em: <www.abcp.com.br>. Acesso em: Setembro 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5738: Moldagem e Cura de Corpos-de-prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5739: Ensaio de Compressão de corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto.** Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 7217: Agregado - Determinação da Composição Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7223: Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.** Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7251: Agregado em Estado Solto - Determinação da Massa Unitária.** Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7583: Execução de Pavimentos de Concreto Simples por meio Mecânico.** Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-sônica.** Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 9776: Agregados - Determinação da Massa Específica Agregados Miúdos por Meio do frasco de Chapman.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9937: Agregados Determinação da Absorção e da Massa específica de Agregado Graúdo.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ANSARI, F.; LUKE, A.; VITILLO, N. P.; BLANK, N.; TURHAN, I. Developing Fast Track Concrete for Pavement Repair. **Concrete International**. p 24-29, May 1997.

ANSYS RELEASE 10.0 **Documentation for ANSYS Workbench**. Basic Analysis Guide. SAS IP, Inc, 2006.

ARNESEN, T. O., Maturity Testing is the Future. **Concrete International**. p 58-59, September, 2003.

AVENI, M., Accelerated Paving Methods Reduce Road Repair Time. **Civil Engineering**, p 19, September, 2001.

BALBO, J. T. Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Simples. In: **Congresso Brasileiro do Concreto, 45º**, Vitória, 2003. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003 (CD-ROM).

BICKLEY, J. A., **Field Manual for Maturity and Pullout Testing on Highway Structures**. Strategic Highway Research Program. 1993. p. 11-16. Toronto, Canadá.

BRITO, L. A. T., **Dados Concepa** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por leliobrito@terra.com.br em 19 jul. 2006.

BULL, J. W.; WOODFORD, C. H. Design of Precast Concrete Pavement Units for Rapid Maintenance of Runways. **Computer & Structures**, Vol. 64, No. 1-4, pp. 857-864, 1997.

BUNGEY, J. H., 1989, **The Testing of Concrete in Structures**, 2 ed., London, Surrey University Press.

CÂMARA, E. **Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos Utilizados na Grande Florianópolis Através de Ensaios Não Destrutivos**. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2006.

CARINO, N. J., LEW, H. S.; Temperature Effects on Strength-Maturity Relations of Mortar. **ACI Journal**, V. 80, N. 3, p. 177-182. May-June 1983.

CARINO, N. J., The Maturity Method. In: **CRC Handbook on nondestructive testing of concrete**. V. M. Malhotra and N. J. Carino. Eds. CRC Press: 2004. p. 101-146.

CARINO, N. J., The Maturity Method: Theory and Application. **Cement, Concrete and Aggregates**, CCAGDP, V. 6, N.2, Winter 1984, p. 61-73.

CARVALHO, A. G., **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem**. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002, 134 p.

CHENGJU, G., Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength. **ACI Materials Journal**, V. 86, N. 4, p. 341-353. July-August 1989.

CHUNG, H. W., LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique, **Concrete International**, October 1983, pp.42-49 .

COMITÊ MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 58: Concreto Endurecido: Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-sônica**. 1996.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. Disponível em:
<<http://www.comunidadeconstrucao.com.br/>> . Acesso em Setembro 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa Rodoviária 2005**. Disponível em:< <http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em Setembro 2005.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa Rodoviária 2006**. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/>>. Acesso em Novembro 2006.

COSTA, D. G., **Análise Numérica Não-linear de Placas Rígidas de Concreto Estruturalmente Armado Sobre Base Elástica**. Dissertação - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004, 205 p.

COTERA S., M. G., El Concreto Fast Track en reparación y Rehabilitación de pavimentos. **Seminario Mantenimiento de Pavimentos de Concreto**. Lima, 1993.

DEGUSSA, **Mastermix 398N2**. Disponível em: <http://www.degussa-cc.com.br/dcc_listaproduto.asp?IdProduto=136> . Acessado em: Março 2006.

DELATTE, N. J., WILLIAMSON, M. S., FOWLER, D. W. Bond Strength Development with Maturity of High-Early-Strength Bonded Concrete Overlays. **ACI Materials Journal**, V. 97, N. 2, p. 201-207. March-April 2000.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/default.asp>>. Acesso em Setembro 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentos Rígidos**. 2. ed. 223p. Rio de Janeiro, 2004.

DORNELLES, F. L., PINTO, R. C. A., e PADARATZ, I. J., 2004. Influência do Posicionamento da Armadura em Medições de Ultra-som para Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto. **Encontro Nacional Betão Estrutural 2004**, Actas, Porto, Portugal, pp. 1015-1022.

EVANGELISTA, A. C. J., **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos**. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002, 219 p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, **Accelerated Rigid Paving Techniques**, Special Project 201, FHWA-SA-94-080, 1994.

FREIELEBEN-HANSEN, P. e PEDERSEN, E. J., 1977. **Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete**. Nordisk Betong, Vol. 1, pp. 21-25.

GIUBLIN, C. R.; MARTINS, L. O.; SAITO, J.; KRÜGER, N. A.. Pavimento de Concreto dos Túneis da Via Expressa Sul em Florianópolis/SC. In: **Reunião Anual de Pavimentação**, 34^a, Campinas, 2003.

GIUBLIN, C. R.; **Concreto Utilizado no Whitetopping da Rodovia BR 290 – Free-way**. Curitiba, [200-].

GIUSTI, R. J. **Pavimento de Concreto Feito para Durar**. Disponível em: <<http://www.interobras.com.br/artigos/abcp/>>. Acesso em Setembro 2005.

GONÇALVES, F. P., **O diagnóstico e a Manutenção dos Pavimentos**. Notas de aula, 1999.

GRACE, **Daracem 19, Informação Técnica**, Disponível em: <www.gracecontruction.com>. Acessado em: Maio 2006a.

_____. **ADVA Cast, Informação do Produto**, Disponível em: <www.gracecontruction.com>. Acessado em: Julho 2006b.

GRULLÓN, M., BARBOSA, P., MEDEIROS, M., HELENE, P. R. L.; Correlação entre Resistência à Compressão e Ultra-Som: Influência da Dosagem e da Umidade. In: **Congresso Brasileiro do Concreto, 46º**, Florianópolis, 2004. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004a (CD-ROM).

HADLICH, A. R., PFLEGER, V., **Ensaio não Destrutivo de Maturidade: Princípios e Desenvolvimento da Técnica na UFSC**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

HALL, K. T., **State of the art and Practice in Rigid Pavement Design**. A2B02: Committee on Rigid Pavement Design, 2006.

HENDRIKX, L. Use of Fast Track Concrete Paving for Restauration Work. In: **International Symposium on Concrete Roads**, 8th. Lisbon, 1998. Theme II – Progress in Concrete Road Materials and in the Construction Process, p 69-71.

KOMLOS, K. et al., Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards. **Cement and Concrete Composites**. No. 18, June 1996, pp 357-364.

LEE, E. B., HARVEY, J. T., THOMAS, D. **Integrated Design/ Construction/Operations Analysis for Fast-track Urban Freeway Reconstruction**. Technical Memorandum, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley / University of California Davis, 35p. 2003.

LIN, Y., LAI, C. P., YEN, T. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete, **ACI Materials Journal**, January-February 2003, pp. 21-28.

LUKE, A., HSU, C. T. T., PUNURAI, S., **Implementation of Concrete Maturity Meters**. New Jersey Research Project and New Jersey Department of Transportation, 115p. 2002.

MALHOTRA, V. M., 1984. In Situ / Nondestructive Testing of Concrete - A Global Review. **In Situ / Nondestructive Testing of Concrete**, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit.

MANCIO, M., HARVEY, J. T., ALI, A., ZHANG, J., **Evaluation of the Maturity Method for Flexural Strength Estimation in Concrete Pavement**. Partnered Pavement Research Center, California Department of Transportation. 2004.

McINTOSH, J. D., Electrical Curing of Concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 1, n. 1, p. 21-28, 1949.

MEDEIROS, H. A., Ponte sem Transtornos. **Comunidade da Construção**. Disponível em: <www.comunidadedaconstrucao.com.br>. Acesso em: Outubro 2006.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. 574p. Rio de Janeiro, 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MENEGHETTI, L. C., 1999. **Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos nas Primeiras Idades Através de Ultra-som**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

NAIK, T. R., MALHOTRA, V. M., e POPOVICS, J.S., 2004. **The Ultrasonic Pulse Velocity Method**. In: Handbook on Non-destructive Testing of Concrete, V. M. Malhotra and N.J. Carino, Eds. CRC Press, Chap. 8.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997, 2ª ed. 828p.

NURSE, R. W., Steam Curing of Concrete. **Magazine of Concrete Research**. London, v. 1, n. 2, 1949, p 79-88.

Obras Viales, **Diseño Estructural de Pavimentos Rígidos**. Disponível em: <<http://icc.ucv.cl/obrasviales/pavimentos%20rigidos.htm>>. Acesso em: Setembro 2005.

OLIVEIRA, P. L., **Projeto Estrutural de Pavimentos Rodoviários e de Pisos Industriais de Concreto**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000, 218 p.

PEREIRA, D. S., **Estudo do Comportamento de Pavimentos de Concreto Simples em Condições de Aderência entre Placa de Concreto e Base Cimentada ou Asfáltica**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – SP, 2003, 315 p.

PERUZZO, T. M., CANTO, E. L., **Química na Abordagem do Cotidiano**. Editora Moderna. São Paulo, 1993.

PIMENTEL, C. **Vem aí uma “Solução Concreta” para as Estradas Brasileiras**. Brasília, 2005. In: Radiobrás. Disponível em: <<http://www.radiobras.gov.br>>. Acesso em Setembro 2005.

PINTO, R. C. A., 1997. **The Effects of Curing Temperatures on the Development of Mechanical Properties of Fresh and Hardened High Strength Silica Fume Mixtures – a Maturity Approach.** Tese de Doutorado, Universidade de Cornell, EUA.

PINTO, R. C. A., Determinação da Energia Aparente de Ativação da Hidratação do Cimento, **E-mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, Vol. 1, No. 2, 2004b. Disponível em: <<http://www.e-mat.info>>

PINTO, R. C. A., HOBBS, S. V., HOVER, K. C.. The Maturity Approach in Concrete Technology – Going Beyond Compressive Strength, **5th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology**, ACI SP-200, Cingapura, 2001.

PINTO, R. C. A., HOVER, K. C. Estimation of Modulus of Elasticity in High-Performance Concrete Mix At Earlier And Later Ages. **High-Performance Concrete: Performance and Quality of Concrete Structures.** ACI SP-186. 1999.

PINTO, R. C. A.. Aplicação do Método da maturidade em pavimentos de concreto. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 46º, Florianópolis, 2004. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004a (CD-ROM).

PINTO, R. C. A.. O Método da Maturidade e sua Utilização em Construção civil. In: **Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**, 29º, Punta Del Este, 2000. Anais... Punta Del Este, 2000.

PINTO, R. C. de A., PADARATZ, I. J., ANDRADE, L. de B., FEY E. O método da maturidade para tempo de desforma e descimbramento de elementos estruturais: Estudo de caso. **44º Congresso Brasileiro do Concreto**, Belo Horizonte, 2002.

PITTA, M. R. **Pavimento de Concreto: um Moderno ovo de Colombo?**, 1996.

PLOWMAN, J. M., Maturity and the Strength of Concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 8, n. 22, 1956, p. 13-22.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Design and Control of Concrete Mixtures.** 14ª Edição. 2002.

Pundit Manual, CNS Eletronics Ltda., London., 76pp., 1994.

RHEINHEIMER, V., PINTO, R. C. A., HADLICH, A. R., PFLEGER, V., Relação entre Resistências à Tração na Flexão e Compressão em Concretos e Argamassas para um Pavimento *Fast Track*. In: **Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**, 32º, Campinas, 2006. Anais... Campinas, 2006.

RODRIGUES, P. P. F., PITTA, M. R., **Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Estruturalmente Armados**. [200-?].

SALVADOR FILHO, J. A. A., **Cura Térmica dos Concretos de Alto Desempenho: Análise das Propriedades Reo-mecânicas Utilizando o Método da Maturidade**. Dissertação de Mestrado, FEIS/Unesp Ilha Solteira – SP, 2001, 91 p.

SAUL, A. G. A., Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 2, n. 6, 1951, p. 127-140.

STURRUP, V. R., VECCHIO, F. J., and CARATIN, H., 1984. Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength. **In Situ/Nondestructive Testing of Concrete**. Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp.201-228.

SUBRAMANIAM, K. V., MOHSEN, J. P., SHAW, C. K., SHAH, S. P. , Ultrasonic Technique for Monitoring Concrete Strength Gain at Early Age, **ACI Materials Journal**, September-October 2002, pp. 458-462.

TRITSCH, S. L., Temperature Management of Slabs. **Accelerated Rigid Paving Techniques**, Special Project 201, FHWA-SA-94-080, 1994.

VIEIRA, A., CARNEIRO, L. A. V., MOREIRA JÚNIOR, G. S. D., RAMOS, K. O.; Dimensionamento de Pavimentos de Concreto: Automatização do Método PCA/84. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 46º, Florianópolis, 2004. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004 (CD-ROM).

VIEIRA, L. B. P., D'AQUINO, E. L.; . In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 45º, Vitória, 2003. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003 (CD-ROM).

VOIGT, G. F., **Fast Full-depth pavement repair**. American Concrete Pavement Association. [199-?].

WHITING, D.; NAGI, M.; OKAMOTO, P. A. Early Strength Gain of Rapid Highway Repair Concrete. **Concrete International**. p 28-35, August, 1994.

YAMAN, I.O. et al., 2001, Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission, **ACI Materials Journal**, November-December, pp. 450-457.

ANEXO A - Caracterização dos materiais

A.1 Agregados

Os ensaios de granulometria, dimensão máxima característica, o módulo de finura foram realizados seguindo recomendações da NBR 7217 (1994). Já nos ensaios para obtenção da Massa Específica em agregado miúdo foram utilizadas as recomendações da NBR 9776 (1987) e em agregado graúdo a NBR 9937 (1987). Para a Massa Unitária seguiu-se a NBR 7251 (1982).

A.1.1 Agregado miúdo

O agregado miúdo dos tipos A, B e C são de origem quartzosa, provenientes de cava, na cidade de Canelinha, disponíveis comercialmente. As características físicas e a distribuição granulométrica dos mesmos, seguindo a NBR NM 248 (2003), estão apresentadas nas Tabelas A.1 a A.3.

Tabela A.1 Caracterização do agregado miúdo Tipo A.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret. Acum.
4,8	0,05	0,05
2,4	4,05	4,10
1,2	25,89	29,99
0,6	35,66	65,66
0,3	19,62	85,28
0,15	8,29	93,57
Fundo	6,43	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		2,4
Módulo de Finura		2,79
Massa Unitária		1,54
Massa Específica		2,58

Tabela A.2 Caracterização do agregado miúdo Tipo B.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret, Acum,
4,8	0,00	0,00
2,4	4,36	4,36
1,2	17,35	21,71
0,6	25,73	47,44
0,3	18,30	65,74
0,15	18,58	84,31
Fundo	15,69	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		2,4
Módulo de Finura		2,24
Massa Unitária		1,54
Massa Específica		2,57

Tabela A.3 Caracterização do agregado miúdo Tipo C.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret, Acum,
4,8	0,08	0,08
2,4	3,12	3,20
1,2	17,40	20,60
0,6	29,74	50,34
0,3	19,42	69,76
0,15	17,46	87,22
Fundo	4,00	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		2,4
Módulo de Finura		2,31
Massa Unitária		1,33
Massa Específica		2,61

Os agregados miúdos tipo D e E foram utilizados como composição de 70% de areia industrial e 30% de areia fina, conforme adotado na concreteira. As características físicas e a distribuição granulométrica dos mesmos estão apresentadas nas Tabelas A.4 e A.5.

Tabela A.4 Caracterização do agregado miúdo Tipo D – Areia Industrial.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret, Acum,
4,8	0,00	0,00
2,4	0,02	0,02
1,2	0,04	0,06
0,6	0,08	0,14
0,3	1,34	1,48
0,15	68,03	69,51
0,075	29,37	98,88
Fundo	1,12	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		0,3
Módulo de Finura		0,71
Massa Unitária		1,26
Massa Específica		2,64

Tabela A.5 Caracterização do agregado miúdo Tipo E – Areia Fina.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret, Acum,
4,8	3,49	3,49
2,4	26,09	29,58
1,2	23,07	52,65
0,6	16,68	69,33
0,3	11,35	80,68
0,15	8,16	88,84
0,075	5,58	94,42
Fundo	5,58	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		4,8
Módulo de Finura		3,25
Massa Unitária		1,09
Massa Específica		2,63

A.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo, dos tipos A até E, são de origem granítica, proveniente de mineradora abastecida pela formação rochosa da região geológica de Florianópolis, disponíveis comercialmente, No própria mineradora, sempre que necessário, o agregado é lavado para retirada de impurezas, Para aproximar a distribuição granulométrica da utilizada nos pavimentos, em alguns casos foi feita uma composição de dois tipos de brita. As características físicas e a distribuição granulométrica das mesmas, seguindo NBR NM 248 (2003), estão apresentadas nas Tabelas A.6 a A.10.

Tabela A. 6 Caracterização do agregado graúdo Tipo A.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret. Acum.
19	0,00	0,00
12,7	0,45	0,45
9,5	3,19	3,63
4,8	78,58	82,21
2,4	17,29	99,50
1,2	0,50	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		9,5
Módulo de Finura		5,85
Massa Unitária		1,32
Massa Específica		2,61

Tabela A.7 Caracterização do agregado graúdo Tipo B.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret. Acum.
19	5,28	5,28
12,7	73,20	78,48
9,5	18,16	96,64
4,8	3,36	100,00
2,4	0,00	100,00
1,2	0,00	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		25
Módulo de Finura		7,02
Massa Unitária		1,36
Massa Específica		2,64

Tabela A.8 Caracterização do agregado graúdo Tipo C.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret. Acum.
19	0,54	0,54
12,7	53,65	54,18
9,5	28,97	83,15
4,8	16,85	100,00
2,4	0,00	100,00
1,2	0,00	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		19
Módulo de Finura		6,84
Massa Unitária		1,40
Massa Específica		2,63

Tabela A.9 Caracterização do agregado graúdo Tipo D.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret. Acum.
19	85,72	85,72
12,7	14,19	99,91
9,5	0,03	99,94
4,8	0,06	100,00
2,4	0,00	100,00
1,2	0,00	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		25
Módulo de Finura		7,86
Massa Unitária		1,36
Massa Específica		2,64

Tabela A.10 Caracterização do agregado graúdo Tipo E.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret. Acum.
25	1,86	1,86
19	13,91	15,77
12,7	81,82	97,59
9,5	1,48	99,07
4,8	0,93	100,00
2,4	0,00	100,00
1,2	0,00	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		25
Módulo de Finura		4,15
Massa Unitária		1,40
Massa Específica		2,70

O agregado graúdo Tipo F foi o disponível na concreteira. Não é de granulometria e dimensões apropriadas ao uso em pavimentos, porém seu uso se fez necessário devido a restrições construtivas. Suas características estão descritas na Tabela A.11.

Tabela A.11 Caracterização do agregado graúdo Tipo F.

Peneira (mm)	% Retido	% Ret. Acum.
25	0,00	0,00
19	0,16	0,16
12,7	38,14	38,29
9,5	36,07	74,36
4,8	25,64	100,00
2,4	0,00	100,00
1,2	0,00	100,00
TOTAL	100,00	100,00
Dimensão Máxima Característica		19
Módulo de Finura		3,75
Massa Unitária		1,35
Massa Específica		2,67

A.2 Cimentos

O cimento Portland CPV – ARI RS, denominado como (1), é o fabricado pela Votorantim Cimentos, cuja caracterização físico-mecânica, fornecida pelo mesmo, pode ser visualizada na Tabela A.12.

Tabela A.12 Caracterização físico-mecânica do cimento CPV – ARI RS (1).

<i>Ensaio Físicos</i>					
<i>Item de Controle</i>	<i>Unid.</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Material Retido #200 (mesh)	%	0,11	0,06	0,00	0,20
Material Retido #325 (mesh)	%	0,93	0,24	0,40	1,50
Blaine	cm ² /g	4923	57	4820	5030
Água de Consistência	%	30,13	0,14	29,90	30,40
Início de Pega	Horas	03:41	00:08	03:20	03:55
Fim de Pega	Horas	04:44	00:09	04:20	05:00
Expansibilidade a Quente	mm	0,00	0,00	0,00	0,00
Resistência 1 dia	MPa	24,13	0,80	22,40	26,20
Resistência 3 dias	MPa	33,69	0,81	32,10	34,90
Resistência 7 dias	MPa	38,03	0,69	36,50	39,30
Resistência 28 dias	MPa	47,79	0,84	46,60	49,70
<i>Ensaio Químicos</i>					
<i>Item de Controle</i>	<i>Unid.</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Perda ao Fogo	%	3,33	0,16	3,05	3,63
SiO ₂	%	23,42	0,45	22,80	24,38
Al ₂ O ₃	%	7,04	0,23	6,69	7,48
Fe ₂ O ₃	%	3,37	0,07	3,24	3,46
CaO	%	51,93	0,48	50,92	52,78
MgO	%	5,67	0,07	5,57	5,84
K ₂ O	%	1,05	0,02	1,02	1,10
Na ₂ O	%	0,07	0,00	0,07	0,07
SO ₃	%	3,39	0,12	3,18	3,58
Resíduo Insolúvel	%	11,97	0,91	10,24	13,58
CO ₂	%	2,13	0,14	1,95	2,36

O cimento do tipo Portland CII-Z é fabricado pela Votorantim Cimentos, e sua caracterização físico-mecânica, fornecida pelo fabricante, pode ser visualizada na Tabela A.13.

Tabela A.13 Caracterização físico-mecânica do cimento CPHI-Z.

<i>Ensaio Físicos</i>					
<i>Item de Controle</i>	<i>Unid.</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Material Retido #200 (mesh)	%	1,55	0,39	0,80	2,10
Material Retido #325 (mesh)	%	10,00	1,29	7,20	12,60
Blaine	cm ² /g	3614	95	3350	3840
Água de Consistência	%	28,26	0,18	28,00	29,50
Início de Pega	Horas	4:22	0:12	3:35	4:40
Fim de Pega	Horas	5:30	0:14	4:35	5:50
Expansibilidade a Quente	mm	0,45	0,49	0,00	2,00
Resistência 1 dia	MPa	-	-	-	-
Resistência 3 dias	MPa	24,26	0,69	22,60	25,40
Resistência 7 dias	MPa	28,99	0,71	27,70	30,40
Resistência 28 dias	MPa	37,22	0,48	36,40	37,90
<i>Ensaio Químicos</i>					
<i>Item de Controle</i>	<i>Unid.</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Perda ao Fogo	%	4,67	0,31	4,15	5,33
SiO ₂	%	23,71	3,16	22,74	33,50
Al ₂ O ₃	%	7,15	0,30	6,72	7,82
Fe ₂ O ₃	%	3,24	0,05	3,10	3,33
CaO	%	52,95	0,48	51,92	53,90
MgO	%	5,90	0,09	5,65	6,04
K ₂ O	%	1,05	0,03	0,99	1,11
Na ₂ O	%	0,07	0,00	0,06	0,08
SO ₃	%	2,80	0,15	2,58	3,09
Resíduo Insolúvel	%	12,17	0,63	10,90	13,31
CO ₂	%	3,91	0,21	3,52	4,26

O cimento Portland CPV – ARI RS (2) é fabricado pela Itambé Cimentos, e é o cimento utilizado na concreteira, cuja caracterização físico-mecânica, fornecida pelo fabricante, pode ser visualizada na Tabela A.14.

Tabela A.14 Caracterização físico-mecânica do cimento CPV – ARI RS (2).

<i>Ensaio Físicos</i>					
<i>Item de Controle</i>	<i>Unid.</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Material Retido #200 (mesh)	%	0,18	0,04	0,10	0,20
Material Retido #325 (mesh)	%	1,23	0,12	1,10	1,40
Blaine	cm ² /g	4,913	38,89	4,860	4,980
Água de Consistência	%	29,6	0,2	29,2	29,9
Início de Pega	Horas	2:13	0:04	2:05	2:20
Fim de Pega	Horas	3:00	0:00	3:00	3:00
Expansibilidade a Quente	mm	0,50	0,00	0,50	0,50
Resistência 1 dia	MPa	24,0	0,4	23,7	24,9
Resistência 3 dias	MPa	34,8	0,4	34,4	35,4
Resistência 7 dias	MPa	40,6	0,7	39,8	42,0
Resistência 28 dias	MPa	48,9	0,5	48,2	49,5
<i>Ensaio Químicos</i>					
<i>Item de Controle</i>	<i>Unid.</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Perda ao Fogo	%	3,76	0,17	3,37	4,00
SiO ₂	%	22,49	0,12	22,27	22,70
Al ₂ O ₃	%	6,25	0,08	6,15	6,41
Fe ₂ O ₃	%	3,19	0,01	3,17	3,20
CaO	%	54,64	0,49	53,99	55,53
MgO	%	4,56	0,17	4,36	4,88
Equivalente Alcalino	%	0,83	0,01	0,81	0,84
SO ₃	%	3,05	0,04	2,95	3,10
Resíduo Insolúvel	%	11,82	0,41	11,20	12,26
CaO Livre	%	1,36	0,14	1,18	1,54

A.3 Aditivos

Para a obtenção de uma trabalhabilidade adequada do concreto e seguindo os traços estudados, foram utilizados aditivos cujos dados técnicos podem ser visualizados nas Tabelas A.15 a A.17.

Tabela A.15 Caracterização do aditivo - Lignosulfonato (Fonte: Degussa, 2006).

Função Principal:	Plastificante Multidosagem (Polifuncional)
Ação secundária:	Redutor de água
Base química:	Lignosulfonatos e aditivos especiais
Aspecto:	Líquido
Cor:	Castanho
Densidade:	1,19 a 1,23g/cm ³
pH:	7 a 9
Teor de Sólidos:	39 a 44%

Tabela A.16 Caracterização do aditivo - Naftaleno (Fonte: Grace, 2006a).

Função Principal:	Superplastificante ASTM C494 Tipo A - G e ASTM C1017 Tipo I
Ação secundária:	Redutor de água de alto desempenho
Base química:	Naftaleno
Aspecto:	Líquido
Dosagem:	0,8 a 2,0% da massa de cimento
Densidade:	1,18 kg/l

Tabela A.17- Caracterização do aditivo – Éster Policarboxílico (Fonte: Grace, 2006b).

Função Principal:	Superplastificante ASTM C494 Tipo F
Ação secundária:	Redutor de água de alto desempenho
Base química:	Éster policarboxílico modificado
Aspecto:	Líquido
Dosagem:	0,2 a 1,0% da massa de cimento
Densidade:	1,08 kg/l

ANEXO B – Resultados Individuais no estudo dos Traços

Os resultados individuais para cada exemplar dos Traços I a V estão descritos nas tabelas a seguir. As medidas B1, B2, C1 e C2 representam duas medidas em cada sentido da face do corpo-de-prova onde foi aplicado o carregamento, conforme a Figura B.1.

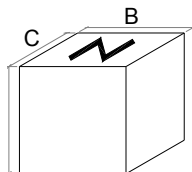


Figura B.1 Medidas da face de aplicação do carregamento.

B.1 Traço I

Tabela B.1 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço I para a temperatura de 13°C.

13° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
33	9,02	3,55	3,51	50	50	51	51
	8,72	3,52		49	49	50	50
	8,62	3,45		50	50	50	50
66	56,85	22,62	20,99	50	50	50	51
	54,15	21,12		51	51	50	51
	47,55	19,23		49	49	50	50
132	74,40	29,85	29,22	49	49	50	51
	66,75	26,15		50	50	51	51
	81,00	31,68		50	51	51	50
264	90,00	35,96	35,16	49	49	51	51
	85,05	33,38		51	51	51	50
	92,25	36,12		50	51	51	50
528	93,10	37,00	39,06	50	50	51	50
	98,00	38,45		50	51	51	51
	105,10	41,72		50	50	51	51
1056	115,70	45,16	44,36	50	51	51	51
	114,40	45,63		50	50	50	50
	107,40	42,29		50	50	51	50

Tabela B.2 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço I para a temperatura de 30°C.

30° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
16	9,88	3,86	4,34	50	50	51	51
	11,66	4,54		50	51	51	50
	12,08	4,64		52	51	50	51
32	57,30	21,78	22,69	52	51	51	51
	56,91	21,89		50	50	52	52
	61,60	24,40		49	49	51	51
64	75,85	29,46	29,58	50	50	51	51
	78,85	29,92		51	51	52	51
	77,05	29,34		51	51	52	52
128	82,35	32,81	32,28	49	49	51	51
	88,50	34,53		50	50	51	51
	76,05	29,51		50	50	51	52
256	106,40	42,38	39,74	50	50	50	50
	92,05	36,78		49	49	51	51
	94,40	37,10		50	50	51	51
512	105,00	40,48	39,48	50	50	52	52
	82,10	32,21		50	50	51	51
	97,30	38,48		49	49	51	52

Tabela B.3 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço I para a temperatura de 50°C.

50° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
7,67	8,70	3,31	3,81	51	51	51	52
	10,85	4,16		50	51	52	51
	10,10	3,97		49	49	51	52
15,33	58,25	21,86	23,64	51	51	52	52
	61,25	23,54		50	50	52	52
	65,40	25,53		50	50	52	51
30,67	46,90	18,26	22,79	50	50	51	51
	56,80	21,67		51	51	52	52
	74,20	28,43		51	51	51	51
61,33	97,60	37,61*	24,03	51	51	51	51
	54,65	21,33		50	50	51	52
	46,65	18,07*		51	51	52	50
122,67	70,25	26,72	38,03	52	50	52	52
	93,35	35,85		50	50	52	52
	93,90	36,06		50	51	51	51
245,33	105,70	40,21	42,03	51	51	52	52
	118,9	44,84		51	51	52	52
	116,1	44,78		50	50	51	53

Tabela B.4 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço I para a temperatura de 13°C.

13° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
33	16,0	16,0	39,4	39,7	92,10	2,58	2,46	4061	4103
	16,0	16,0	39,3	39,1	83,00	2,32		4092	
	16,0	16,0	38,5	38,7	88,64	2,48		4156	
66	16,2	16,2	37,8	36,7	186,40	5,22	5,18	4414	4573
	16,0	16,0	35,3	35,1	181,60	5,08		4558	
	16,0	16,0	33,7	33,8	187,20	5,24		4748	
132	16,0	16,0	29,2	29,5	241,20	6,75	6,30	5479	5425
	16,0	16,0	30,0	30,2	230,20	6,45		5333	
	16,0	16,0	29,3	29,5	203,50	5,70		5461	
264	16,4	16,4	34,5	34,7	253,40	7,10	6,67	4754	4724
	16,2	16,2	34,1	34,1	237,10	6,64		4751	
	16,1	16,1	34,5	35,5	224,10	6,27		4667	
528	16,0	16,0	34,5	33,7	263,60	7,38	7,18	4748	4781
	16,0	16,0	33,5	33,3	267,30	7,48		4805	
	16,0	16,0	33,6	33,4	238,20	6,67		4790	
1056	16,0	16,0	32,3	33,0	263,40	7,38	7,18	4954	4980
	16,0	16,0	32,6	32,4	232,40	6,51		4938	
	16,0	16,0	31,7	31,9	273,70	7,66		5047	

Tabela B.5 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço I para a temperatura de 30°C.

30° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
16	16,1	16,1	38,8	37,9	105,10	2,94	3,19	4248	4181
	16,4	16,4	40,0	39,6	110,90	3,11		4141	
	16,2	16,2	39,7	39,0	126,30	3,54		4154	
32	16,0	16,0	35,3	36,1	221,70	6,21	5,82	4533	4547
	16,0	16,0	35,7	35,3	193,50	5,42		4533	
	16,0	16,0	35,0	35,6	208,60	5,84		4577	
64	16,0	16,0	31,7	31,7	224,60	6,29	6,52	5047	4902
	16,0	16,0	33,9	34,0	256,70	7,19		4720	
	15,9	15,9	33,4	32,2	217,10	6,08		4938	
128	16,1	16,1	29,6	29,5	242,10	6,78	6,50	5458	5458
	16,1	16,1	30,6	30,9	217,50	6,09		5261	
	16,0	16,0	28,7	28,3	236,70	6,63		5654	
256	16,0	16,0	32,6	33,2	271,20	7,59	7,26	4908	4918
	16,1	16,1	32,5	32,5	266,70	7,47		4954	
	16,1	16,1	33,0	32,9	240,10	6,72		4894	
512	16,1	16,1	30,7	30,1	252,00	7,06	6,72	5349	5258
	16,0	16,0	31,2	31,9	229,50	6,43		5128	
	16,0	16,0	30,5	30,2	238,10	6,67		5298	

Tabela B.6 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço I para a temperatura de 50°C.

50° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
7,67	16,0	16,0	68,8	69,3	17,60	0,49	0,50	2326	2413
	16,2	16,2	69,5	72,7	15,90	0,45		2331	
	16,2	16,2	62,7	63,3	20,50	0,57		2584	
15,33	16,2	16,2	40,4	40,3	169,20	4,74	4,72	4020	3887
	16,2	16,2	42,3	42,1	164,00	4,59		3848	
	16,2	16,2	42,7	42,7	172,70	4,84		3794	
30,67	16,1	16,1	39,9	39,7	204,00	5,71	5,57	4055	4059
	16,1	16,1	40,0	40,3	189,00	5,29		4025	
	16,1	16,1	39,3	39,8	203,50	5,70		4097	
61,33	16,1	16,1	38,8	39,1	206,50	5,78	6,12	4149	4160
	16,1	16,1	38,9	39,0	224,90	6,30		4139	
	16,1	16,1	38,4	38,8	224,50	6,29		4193	
122,67	16,1	16,1	37,6	37,2	204,60	5,73	5,68	4328	4303
	16,0	16,0	37,4	36,9	211,60	5,92		4336	
	16,0	16,0	38,3	37,7	192,10	5,38		4244	
245,33	16,2	16,2	38,1	37,3	234,50	6,57	6,59	4343	4378
	16,0	16,0	37,1	36,6	254,80	7,13		4372	
	16,0	16,0	36,2	36,2	216,90	6,07		4420	

Tabela B.7 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 1 dia.

Ensaio 1 Dia													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som					Resistência				
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	51,0	51,0	20,2	45,0	70,7	3830	123,5	123,4	4144	25,40	3,39	3,32
	2	51,0	51,0	21,8	49,5	76,4		122,4	122,3		27,25	3,63	
	3	51,0	51,0	21,7	48,5	73,4		123,7	123,5		22,15	2,95	
Cilindro	1	30,0	30,0				4051	73,3	74,2	4051	267,00	15,11	16,23
	2	29,9	29,9	-				74,6	74,9		258,20	14,61	
	3	30,4	30,2					74,8	76,7		335,00	18,96	

Tabela B.8 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 3 dias.

Ensaio 3 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,1	50,1	18,6	42,3	18,6	4112	118,7	118,6	4230	35,95	4,79	4,65
	2	50,1	50,1	19,6	45,0	19,6		117,7	118,6		36,35	4,85	
	3	50,1	50,1	21,0	45,2	21,0		119,1	119,0		32,25	4,30	
Cilindro	1	30,0	30,0					71,9	72,3		361,60	20,46	18,59
	2	30,0	30,0					73,6	72,0	4183	291,40	16,49	
	3	30,1	30,1					71,5	72,5		332,80	18,83	

Tabela B.9 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 7 dias.

Ensaio 7 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,1	50,2	18,4	42,9	68,6	3889	115,5	114,1	4371	36,60	4,88	5,02
	2	50,1	50,2	18,0	44,6	71,7		115,5	113,6		36,94	4,93	
	3	50,1	50,2	21,5	46,5	72,0		116,5	116,6		39,35	5,25	
Cilindro	1	30,0	29,9					68,0	67,8		566,00	32,03	28,84
	2	30,2	29,9					69,9	67,4	4430	478,00	27,05	
	3	30,1	30,1					68,2	68,2		485,00	27,45	

Tabela B.10 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 14 dias.

Ensaio 14 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,0	50,1	24,3	50,3	72,6	4114	113,6	115,1	4360	40,15	5,35	5,18
	2	50,2	50,1	24,1	51,4	74,3		115,4	115,3		35,14	4,69	
	3	50,3	50,1	25,6	51,3	72,7		116,1	116,2		41,30	5,51	
Cilindro	1	30,0	30,2					67,4	68,7		611,00	34,58*	43,74
	2	29,9	30,0					67,2	67,3	4481	812,50	45,98	
	3	30,1	30,0					66,5	67,2		733,50	41,51	

Tabela B.11 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 21 dias.

Ensaio 21 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,2	20,6	45,8	105,4	2222	114,3	114,0	4416	40,00	5,33	5,25
	2	50,2	50,2	20,4	45,4	105,6		113,6	113,9		38,55	5,14	
	3	50,1	50,0	18,5	41,6	103,2		114,4	113,1		39,55	5,27	
Cilindro	1	30,0	30,0					66,3	66,6		745,50	42,19	
	2	30,0	30,0				-	66,1	66,3	4558	809,50	45,81	45,20
	3	30,1	30,1					66,1	65,3		841,00	47,59	

Tabela B.12 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço I para a idade de 28 dias.

Ensaio 28 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,1	50,1	20,2	44,1	69,0	4088	112,7	109,7	4553	36,95	4,93	5,12
	2	50,1	50,1	22,6	46,4	70,8		110,5	112,6		40,30	5,37	
	3	50,2	50,2	18,0	42,9	67,8		112,6	110,1		37,90	5,05	
Cilindro	1	30,0	30,1					65,7	65,6		595,50	33,70	
	2	30,0	29,9				-	66,6	66,8	4523	772,00	43,69	36,55
	3	30,0	30,0					66,8	67,0		570,00	32,26	

B.2 Traço II

Tabela B.13 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço II para a temperatura de 15°C.

15° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
33	14,68	5,99*	3,88	49	48	51	50
	10,26	3,95		49	50	53	52
	9,52	3,81		49	50	51	50
66	30,94	12,01	12,50	51	51	50	51
	32,78	12,98		50	50	50	51
	67,50	27,00*		51	49	50	50
132	42,55	16,69*	32,87	51	52	50	49
	81,85	32,10		51	51	50	50
	85,80	33,65		51	51	50	50
264	90,00	34,66	31,23	53	53	49	49
	57,50	22,11*		51	51	51	51
	72,30	27,81		50	50	52	52
528	77,40	31,60	34,92	48	49	50	51
	101,60	39,45		51	51	50	51
	84,30	33,72		50	50	50	50
1056	28,26	11,19*	22,25	50	50	50	51
	58,10	22,78		51	50	50	51
	56,45	21,71		50	50	52	52

Tabela B.14 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço II para a temperatura de 30°C.

30° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
21	29,22	11,23	10,33	51	51	51	51
	24,44	9,49		50	51	51	51
	24,42	10,28		48	50	48	49
42	39,25	15,54*	24,75	50	50	50	51
	69,00	27,33		51	50	50	50
	56,55	22,18		52	50	50	50
84	76,30	31,14	29,33	48	50	50	50
	73,30	28,75		52	50	50	50
	68,85	28,11		50	51	49	48
168	82,10	31,57	31,33	51	50	52	51
	78,55	31,42		51	50	51	48
	80,65	31,01		50	51	51	52
336	99,00	40,00	38,54	49	50	50	50
	92,00	37,93		48	50	49	50
	96,10	37,69		50	50	51	51
672	60,60	24,49*	40,71	48	50	50	51
	82,20	33,22		51	50	48	50
	120,50	48,20		50	50	49	51

Tabela B.15 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço II para a temperatura de 50°C.

50° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
12	12,72	5,09	5,06	50	51	49	50
	12,40	5,06		50	50	48	50
	12,30	5,02		50	50	49	49
24	35,58	14,67	16,37	49	49	50	49
	28,56	11,66		50	49	49	50
	55,80	22,78		50	50	49	49
48	39,05	15,31*	24,99	50	51	50	51
	67,65	26,53		51	51	50	50
	59,20	23,45		50	51	50	50
96	20,16	7,60	28,35	52	53	52	49
	13,42	5,26		50	49	51	52
	68,04	28,35*		50	50	48	48
192	102,58	41,87	40,05	49	50	50	49
	96,54	38,23		51	50	50	50
	27,44	11,09*		50	50	49	50
384	104,70	42,31	46,11	49	49	50	51
	117,60	45,67		50	50	52	51
	128,40	50,35		50	50	51	51

Tabela B.16 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço II para a temperatura de 15°C.

15° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
33	16,0	15,8	38,1	38,3	0,86	2,41	2,49	4173	3979
	16,0	16,0	43,9	44,3	0,52	1,46*		3644	
	15,9	15,9	39,2	38,6	0,92	2,58		4119	
66	15,9	16,0	33,3	34,3	-	-	7,31	4789	4909
	16,2	16,2	32,6	33,5	2,82	7,90		4969	
	16,0	16,0	32,2	32,5	2,40	6,72		4968	
132	15,9	16,0	33,4	33,3	1,68	4,70	5,82	4789	4841
	16,0	16,1	32,8	33,0	2,88	8,06		4893	
	15,8	16,0	34,6	34,9	1,68	4,70		4595*	
264	16,0	15,9	38,6	39,2	1,60	4,48	4,31	4132	4082
	16,1	16,1	45,8	42,7	1,48	4,14		3770*	
	15,9	15,8	39,3	43,1	0,96	2,69*		4033	
528	16,0	16,1	40,9	41,4	2,12	5,94	5,84	3924	4169
	15,9	16,0	37,1	37,2	1,94	5,43		4299	
	15,9	15,8	37,8	37,0	2,20	6,16		4283	
1056	16,0	16,1	35,3	35,3	3,18	8,90	9,11	4546	4496
	16,0	16,1	36,4	36,2	3,24	9,07		4433	
	16,0	16,1	35,7	35,6	3,34	9,35		4508	

Tabela B.17 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço II para a temperatura de 30°C.

30° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
21	15,9	16,1	44,1	46,7	1,06	2,97	2,59	3628	3666
	16,1	16,2	43,6	45,3	1,04	2,91		3704	
	15,5	15,5	54,3	57,2	0,68	1,90		2855*	
42	15,5	15,8	38,1	38,6	1,90	5,32	5,41	4108	4165
	15,9	15,9	37,3	37,5	1,96	5,49		4263	
	16,0	16,0	38,8	38,9	1,94	5,43		4124	
84	16,1	16,0	40,3	40,4	2,18	6,10	6,48	3983*	4164
	16,1	16,2	38,5	38,4	2,38	6,66		4206	
	15,9	16,0	38,7	38,9	2,38	6,66		4121	
168	15,9	16,0	38,2	37,9	1,96	5,49	6,10	4208	4119
	15,9	16,0	38,6	39,6	2,46	6,89		4132	
	16,2	16,0	40,1	40,6	2,12	5,94		4015	
336	16,1	16,0	25,1	25,7	2,88	8,06	8,70	6394	6282
	16,1	16,0	26,3	26,4	3,30	9,24		6103	
	16,0	16,0	25,3	25,2	3,14	8,79		6349	
672	16,0	16,0	35,2	35,2	2,80	7,84	7,93	4545	4524
	16,0	16,0	35,5	35,7	3,26	9,13		4507	
	16,0	16,0	35,4	35,4	2,44	6,83		4520	

Tabela B.18 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço II para a temperatura de 50°C.

50° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μs)		Carga Ruptura (KN)	f _{tf} (MPa)	f _{tf} média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
12	16,1	16,1	66,6	66,1	0,26	0,73	0,71	2436	2474
	16,1	16,0	67,6	67,4	0,28	0,78		2381	
	16,0	16,0	61,4	63,2	0,22	0,62		2606	
24	16,0	16,0	38,0	38,5	1,86	5,21	5,66	4211	4185
	16,0	16,0	38,4	38,4	2,10	5,88		4167	
	16,0	16,0	38,6	38,3	2,10	5,88		4178	
48	16,0	16,0	38,2	38,2	2,10	5,88	5,63	4188	4176
	16,0	16,0	38,0	37,9	1,92	5,38		4222	
	16,1	16,1	39,5	39,1	0,16	0,45*		4118	
96	16,0	15,9	37,5	37,3	2,60	7,28	6,25	4276	4275
	16,0	16,0	36,5	36,5	1,90	5,32		4384	
	16,0	16,0	38,8	38,4	2,20	6,16		4167	
192	16,2	16,2	37,0	37,1	2,54	7,11	7,06	4378	4385
	16,2	16,3	37,0	37,2	2,50	7,00		4392	
	16,0	16,0	36,5	36,0	1,18	3,30*		4444*	
384	16,1	16,1	37,7	37,6	2,26	6,33	6,82	4282*	4325
	16,3	16,2	37,6	37,9	2,62	7,34		4322	
	16,1	16,1	37,2	37,5	2,43	6,80		4328	

Tabela B.19 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 1 dia.

Ensaio 1 Dia												
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som				Resistência				
	(cm)		Medida Indireta (μs)	Média (m/s)	Medida Direta (μs)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)		
Prisma	1	50,3	50,4	19,7	44,9	72,2	122,7	122,5	4144	26,12	3,48	3,70
	2	50,7	50,3	18,5	43,3	68,5	123,6	119,9	27,90	3,72		
	3	50,4	50,5	19,0	44,4	71,5	120,2	121,4	29,28	3,90		
Cilindro	1	29,7	30,2				74,3	75,5	3977	352,35	19,94	19,68
	2	28,0	29,4	-			75,3	75,6	322,60	18,26		
	3	30,3	30,1				71,1	75,0	368,35	20,84		

Tabela B.20 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 3 dias.

Ensaio 3 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,3	26,2	47,8	78,5	3837	118,5	118,0	4274	32,55	4,34	4,81
	2	50,3	50,2	19,2	43,7	68,3		115,2	116,5		36,80	4,91	
	3	50,5	50,3	20,6	50,6	75,2		117,5	120,4		38,95	5,19	
Cilindro	1	30,1	30,0				4340	68,4	68,8	4340	553,50	31,32	27,98
	2	30,1	30,0	-				69,2	69,2		419,50	23,74*	
	3	30,0	30,0					70,6	69,0		510,50	28,89	

Tabela B.21 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 7 dias.

Ensaio 7 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,1	14,5	40,7	68,8	4051	114,1	113,5	4434	38,45	5,13	5,19
	2	50,3	50,4	17,4	40,0	63,4		113,5	113,5		38,50	5,13	
	3	50,3	50,2	17,0	41,5	65,5		112,7	112,7		39,75	5,30	
Cilindro	1	29,7	30,0				4559	64,8	64,0	4559	570,00	32,26	40,37
	2	30,0	30,0	-				65,6	64,8		812,00	45,95	
	3	29,7	30,0					66,8	67,5		758,00	42,89	

Tabela B.22 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 14 dias.

Ensaio 14 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,2	17,9	42,7	66,8	4113	113,5	113,5	4439	50,45	6,73	6,33
	2	50,2	50,3	20,4	46,6	72,8		113,8	113,4		49,70	6,63	
	3	50,2	50,4	24,6	48,1	69,7		113,6	111,4		42,35	5,65	
Cilindro	1	30,0	30,0				4461	66,5	66,2	4461	797,50	45,13	44,17
	2	29,4	29,6	-				67,3	66,1		751,50	42,53	
	3	29,5	29,6					66,8	66,3		792,80	44,86	

Tabela B.23 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 21 dias.

Ensaio 21 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,2	21,5	46,3	68,0	4238	112,1	112,2	4489	46,20	6,16	5,97
	2	50,4	50,3	24,2	45,5	72,5		112,6	110,6		43,60	5,81	
	3	50,3	50,6	22,5	44,6	69,0		112,0	113,2		44,60	5,95	
Cilindro	1	29,5	29,5	-	-	-	65,5	66,1	4439	772,00	43,69	45,78	
	2	29,7	29,6				66,7	67,8		862,50	48,81		
	3	29,6	29,6				66,8	67,0		792,50	44,85		

Tabela B.24 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço II para a idade de 28 dias.

Ensaio 28 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,3	21,1	44,0	69,4	4152	110,5	111,9	4492	49,40	6,59	5,88
	2	50,0	49,8	20,3	46,3	68,5		111,5	110,9		43,35	5,78	
	3	50,0	49,8	22,6	50,0	70,1		112,5	110,8		39,60	5,28	
Cilindro	1	29,0	29,3	-	-	-	66,3	65,8	4497	691,00	39,10	40,33	
	2	29,6	29,5				64,9	64,9		788,00	44,59		
	3	29,5	29,5				65,2	65,2		659,00	37,29		

Tabela B.25 Resultados de ultra-som para concreto do Traço II para o corpo-de-prova de Referência.

Idade (dias)	Cilindro			Prisma						
	Medida direta			Medida indireta			Medida direta			
	Tempo (μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade (m/s)	Tempo (μ s)	Tempo (μ s)	Tempo (μ s)	Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)	Tempo (μ s)	Tempo (μ s)
3	70,2	69,7	4260	19,3	47,5	72,5	3755	117,8	118,1	4260
7	66,2	68,2	4435	18,5	45,3	68,6	3986	113,5	112,8	4441
14	67,6	66,3	4451	17,6	42,6	69,5	3852	113,1	115,4	4398
21	68,8	67,5	4373	24,7	47,1	68,7	4545	110,4	112,4	4510
28	66,3	65,8	4413	21,1	44	69,4	4137	110,5	111,9	4518

B.3 Traço III

Tabela B.26 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço III para a temperatura de 15°C.

15° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
25,17	14,40	5,76	5,53	49	50	50	51
	13,96	5,64		49	49	51	50
	13,22	5,19		49	50	52	51
50,33	17,56	7,24	7,33	50	50	49	48
	17,16	6,86		50	50	50	50
	20,08	7,87		50	50	52	50
100,67	24,42	9,58	9,30	51	51	50	50
	21,86	8,66		50	50	50	51
	23,94	9,67		50	50	50	49
201,33	23,34	9,34	9,92	51	51	49	49
	25,50	10,00		50	50	51	51
	26,58	10,42		50	51	50	51
402,67	30,28	11,76	10,86	51	50	51	51
	24,56	9,73		50	50	51	50
	28,02	11,10		50	50	51	50
817,83	28,80	11,41	11,93	50	50	50	51
	38,50	15,10		51	52	50	49
	23,40	9,27		50	51	50	50

Tabela B.27 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço III para a temperatura de 30°C.

30° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
15	11,36	4,37	4,42	51	51	51	51
	10,46	4,06		51	50	51	51
	12,06	4,82		50	51	49	50
30	17,42	6,77	6,61	51	52	50	50
	9,68	3,84*		50	48	51	52
	16,80	6,46		51	52	51	50
60	17,02	9,58	8,54	19	50	52	51
	18,32	7,48		51	50	48	49
	21,38	8,55		49	50	50	51
134	22,46	8,98	9,24	51	50	49	50
	13,70	5,54*		49	48	51	51
	22,58	9,50		49	49	48	49
269	28,18	11,05	9,48	50	50	51	51
	24,46	9,59		50	50	51	51
	19,72	7,81		50	50	51	50
537	25,60	10,45	10,58	48	50	50	50
	29,98	11,99		49	50	51	50
	23,92	9,29		51	51	51	50

Tabela B.28 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço III para a temperatura de 50°C.

50° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
5,5	7,32	2,82	2,95	50	50	52	52
	7,70	2,99		52	52	49	50
	7,24	3,05		50	50	50	45
11,0	19,02	7,46	8,97	50	51	51	50
	24,52	9,71		50	50	51	50
	24,34	9,74		50	50	50	50
22,0	29,92	12,09	11,51	50	50	50	49
	26,84	10,63		50	51	50	50
	29,22	11,81		49	50	50	50
44,0	41,55	15,68	14,60	53	53	50	50
	34,65	13,45		51	50	52	50
	38,85	14,66		50	50	52	54
88,0	50,20	20,08	19,77	50	50	50	50
	48,90	19,56		50	50	50	50
	49,20	19,68		50	50	50	50
176,0	62,90	25,16	24,77	50	50	50	50
	62,70	25,08		50	50	50	50
	60,30	24,12		50	50	50	50

Tabela B.29 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço III para a temperatura de 15°C.

15° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
25,17	15,9	15,9	61,9	61,1	0,36	1,01	1,09	2602	2591
	16,0	16,0	62,7	62,2	0,14	0,39		2572	
	16,1	16,0	61,8	63,2	0,42	1,18		2597	
50,33	16,0	16,0	57,6	57,7	0,56	1,57	1,47	2778	2942
	15,9	16,0	54,0	53,4	0,52	1,46		2987	
	16,2	16,2	52,9	54,8	0,5	1,40		3062	
100,67	16,0	16,0	52,7	53,2	0,56	1,57	1,62	3036	3080
	16,0	16,0	52,7	52,3	0,62	1,74		3059	
	15,9	16,0	50,7	50,9	0,56	1,57		3146	
201,33	16,0	16,1	56,4	55,2	0,76	2,13	1,94	2908	3024
	16,1	16,1	52,2	52,9	0,7	1,96		3084	
	16,0	15,9	51,8	52,2	0,62	1,74		3079	
402,67	16,0	16,0	49,9	49,6	0,78	2,18	2,24	3226	3238
	16,1	16,0	49,1	49,8	0,76	2,13		3269	
	16,0	16,0	50,0	49,7	0,86	2,41		3219	
817,83	-	-	-	-	0,96	2,69	2,54	-	-
	-	-	-	-	0,88	2,46		-	
	-	-	-	-	0,88	2,46		-	

Tabela B.30 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço III para a temperatura de 30°C.

30° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
15	16,1	16,0	55,0	54,9	0,46	1,29	1,16	2923	2848
	16,0	16,0	57,4	57,1	0,38	1,06		2802	
	16,0	16,0	56,8	57,1	0,40	1,12		2817	
30	16,0	16,0	48,5	47,8	0,58	1,62	1,49	3347	3231
	16,0	16,0	50,6	49,7	0,60	1,68		3219	
	15,9	16,0	51,6	51,0	0,42	1,18		3127	
60	16,0	16,0	58,2	58,8	0,62	1,74	1,62	2749	2685
	16,0	16,0	60,1	60,9	0,60	1,68		2662	
	16,1	16,1	60,9	61,5	0,52	1,46		2644	
134	16,0	16,0	52,9	53,4	0,80	2,24	2,26	3025	3046
	16,0	16,0	52,4	52,1	0,80	2,24		3071	
	16,0	16,0	52,6	53,3	0,82	2,30		3042	
269	16,2	16,1	54,0	53,9	0,86	2,41	2,11	2996	3017
	16,0	16,0	55,9	56,6	0,70	1,96		2862	
	16,0	16,0	50,1	56,6	0,70	1,96		3194	
537	16,0	16,0	49,5	49,6	0,88	2,46	2,69	3232	3197
	15,9	16,0	50,1	50,3	0,94	2,63		3184	
	16,0	16,0	50,6	50,4	1,06	2,97		3175	

Tabela B.31 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço III para a temperatura de 50°C.

50° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
5,5	16,0	16,0	75,0	77,9	0,26	0,73	0,76	2133	2245
	16,0	16,0	67,4	68,1	0,28	0,78		2374	
	16,0	16,0	72,9	71,8	0,12*	0,34		2228	
11,0	16,0	16,1	55,4	57,9	0,82	2,30	1,90	2897	2886
	15,8	15,9	56,0	56,3	0,62	1,74		2830	
	16,0	16,0	54,6	55,1	0,60	1,68		2930	
22,0	15,9	16,0	52,4	55,6	0,80	2,24	2,35	3044	2988
	16,2	16,2	53,7	52,8	0,82	2,30		3068	
	16,0	16,0	56,1	58,2	0,90	2,52		2852	
44,0	16,0	16,0	46,8	46,7	0,68	1,90	2,24	3426	3394
	16,0	16,0	45,1	44,7	0,72	2,02		3579	
	15,9	16,0	50,3	50,2	1,00	2,80		3177	
88,0	16,0	16,0	48,3	47,9	1,10	3,08	2,93	3340	3423
	16,0	16,0	47,2	47,1	1,05	2,94		3397	
	16,0	16,0	45,3	45,7	0,99	2,77		3532	
176,0	16,0	16,0	42,3	42,4	1,20	3,36	3,51	3783	3861
	16,0	16,0	42,1	42,8	1,21	3,39		3800	
	16,0	16,0	40,0	41,0	1,35	3,78		4000	

Tabela B.32 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 1 dia.

Ensaio 1 Dia													
Corpo de prova	Comprimento (cm)		Ultra-Som						Resistência				
			Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)	
Prisma	1	50,7	50,2	19,9	48,0	71,2	3804	122,6	122,7	4091	23,32	3,11	3,40
	2	50,2	50,0	27,6	53,2	88,4		125,6	124,4		23,75	3,17	
	3	50,2	50,3	23,1	46,7	70,0		120,0	122,0		29,32	3,91	
Cilindro	1	29,7	29,8					72,5	71,9		365,50	20,68	
	2	29,5	29,5					71,0	70,3	4111	445,50	25,21	22,77
	3	29,7	29,5					73,4	73,2		396,00	22,41	

Tabela B.33 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 3 dias.

Ensaio 3 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som					Resistência				
		(cm)		Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,2	22,2	49,9	73,7	4099	118,6	117,7	4247	30,35	4,05	4,19
	2	50,2	50,3	33,7	49,3	77,6		118,0	117,7		31,95	4,26	
	3	50,4	50,3	21,2	45,2	71,3		120,3	117,8		31,90	4,25	
Cilindro	1	30,0	29,9					70,9	68,8		512,00	28,97	29,33
	2	30,0	30,0					69,7	69,9	4298	519,50	29,40	
	3	29,8	30,0					70,2	68,6		523,50	29,62	

Tabela B.34 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 7 dias.

Ensaio 7 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som					Resistência				
		(cm)		Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,1	16,6	42,3	67,9	4043	112,3	111,5	4462	28,75	3,83	4,04
	2	50,2	50,2	16,7	40,3	65,2		113,0	112,3		31,90	4,25	
	3	50,2	50,2	18,7	42,4	67,4		112,5	113,2		30,35	4,05	
Cilindro	1	19,8	19,8					65,6	65,9		606,50	34,32	35,44
	2	19,8	19,9					66,1	66,2	3008	612,00	34,63	
	3	19,5	19,5					64,3	65,2		660,50	37,38	

Tabela B.35 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 14 dias.

Ensaio 14 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som					Resistência				
		(cm)		Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,2	14,1	42,7	69,8	3849	110,1	114,2	4480	33,90	4,52	4,77
	2	50,0	50,1	17,5	43,5	89,4		112,1	111,8		34,75	4,63	
	3	50,3	50,1	21,2	46,8	68,2		112,4	111,0		38,65	5,15	
Cilindro	1	30,1	30,1					67,3	66,6		684,50	38,73	41,02
	2	29,7	30,0					67,2	66,0	4507	730,00	41,31	
	3	29,5	29,5					64,1	65,7		760,00	43,01	

Tabela B.36 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 21 dias.

Ensaio 21 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som						Resistência			
	(cm)		Medida Indireta (μs)			Média (m/s)	Medida Direta (μs)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)	
Prisma	1	50,2	50,3	18,4	40,8	66,8	4032	111,3	111,7	4516	40,80	5,44	5,37
	2	50,3	50,2	16,9	47,0	68,8		109,4	109,7		36,70	4,89	
	3	50,2	50,2	21,3	45,5	69,5		112,2	113,1		43,40	5,79	
Cilindro	1	29,7	29,8					63,7	65,5		652,00	36,90	
	2	29,3	29,4				-	64,6	65,0	4567	722,50	40,89	36,91
	3	29,6	29,7					64,9	65,0		582,50	32,96	

Tabela B.37 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço III para a idade de 28 dias.

Ensaio 28 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som						Resistência			
	(cm)		Medida Indireta (μs)			Média (m/s)	Medida Direta (μs)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)	
Prisma	1	50,2	50,2	14,5	42,5	66,8	3975	112,2	111,9	4448	41,00	5,47	5,53
	2	50,2	50,2	19,9	47,2	70,3		110,3	117,7		46,50	6,20	
	3	50,4	48,8	19,5	43,5	67,7		111,2	111,1		36,85	4,91	
Cilindro	1	30,0	30,0					63,3	65,0		684,50	38,73	
	2	29,8	29,9				-	63,5	64,1	4652	715,00	40,46	40,23
	3	29,5	29,4					64,3	63,7		733,50	41,51	

Tabela B.38 Resultados de ultra-som para concreto do Traço III para o corpo-de-prova de Referência.

Idade (dias)	Cilindro						Prisma					
	Medida direta			Medida indireta			Medida direta			Medida indireta		
	Tempo (μs)	Velocidade (m/s)		Tempo (μs)	Velocidade (m/s)		Tempo (μs)	Velocidade (m/s)		Tempo (μs)	Velocidade (m/s)	
1	72,6	71,2	4096	26,7	53,6	80,1	3745	125,7	123,8		4006	
3	68,4	68,1	4315	21,6	45	74,7	3749	117,1	118,0		4219	
7	-	-	-	15,8	39,3	62,6	4273	113,1	112,6		4395	
14	65,1	64,8	4534	19	41,8	70,2	3891	113,4	110,5		4431	
21	65,3	64,0	4555	19	42,1	66,9	4174	111,5	110,9		4460	
28	64,3	63,7	4602	19,5	43,5	67,7	4149	111,2	111,1		4462	

B.4 Traço IV

Tabela B.39 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço IV para a temperatura de 15°C.

15° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
14	29,10	11,30	11,84	50	50	51	52
	32,24	12,52		52	50	51	50
	32,24	11,71		51	51	53	55
28	102,60	39,88	40,25	49	49	51	54
	97,70	37,57		51	50	52	51
	109,30	43,29		51	50	50	50
56	133,30	48,88	48,72	50	51	54	54
	121,90	47,33		51	51	50	51
	131,10	49,94		50	50	51	54
112	122,10	48,86	53,92	51	51	49	49
	155,70	60,45		51	50	51	51
	131,10	52,45		50	49	51	50
224	117,20	44,63	55,98	53	51	50	51
	170,80	67,64		50	50	51	50
	143,40	55,68		52	50	51	50
448	203,00	79,61	71,16	50	52	50	50
	185,00	73,28		49	50	51	51
	157,60	60,60		52	51	51	50

Tabela B.40 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço IV para a temperatura de 30°C.

30° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
7	6,24	2,52	2,37	50	50	50	49
	5,08	2,12		48	48	50	50
	6,20	2,48		50	50	50	50
14	87,65	34,37	33,31	50	50	51	51
	84,20	34,02		50	50	49	50
	81,40	32,24		50	50	51	50
28	55,95	22,16*	51,85	51	50	50	50
	126,20	52,03		49	49	50	49
	130,40	51,67		49	49	51	52
56	121,10	47,49	52,34	51	51	50	50
	138,00	55,76		50	50	50	49
	135,80	53,78		50	50	51	50
112	129,60	53,98	47,76	50	49	48	49
	103,60	41,08		52	52	48	49
	124,20	48,23		50	50	51	52
224	128,70	52,01	49,87	50	51	49	49
	114,20	45,23		51	50	50	50
	130,80	52,37		52	51	49	48

Tabela B.41 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço IV para a temperatura de 50°C.

50° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
4	13,42	5,06	6,19	51	51	52	52
	15,08	5,97		50	49	51	51
	19,24	7,55		50	50	51	51
8	94,10	37,64	36,45	50	50	50	50
	84,05	33,96		50	50	50	49
	100,10	37,76		51	50	53	52
16	141,10	55,88	47,74	50	50	50	51
	112,80	44,24		50	50	51	51
	109,80	43,09		49	49	52	52
32	129,20	48,75	49,95	50	50	53	53
	143,00	57,22		49	49	51	51
	117,40	43,86		51	50	53	53
64	147,50	57,84	52,02	50	51	50	51
	123,20	50,29		49	49	50	50
	119,80	47,92		49	50	50	51
128	146,10	59,63	57,15	49	50	50	49
	148,30	58,16		51	51	50	50
	135,50	53,66		50	50	50	51

Tabela B.42 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço IV para a temperatura de 15°C.

15° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
14	16,1	16,1	46,3	46,6	0,68	1,90	2,07	3477	3434
	16,0	16,0	48,4	48,6	0,58	1,62		3306	
	16,2	16,1	45,9	46,0	0,80	2,24		3519	
28	16,0	15,9	36,0	35,7	2,62	7,34	7,62	4468	4452
	15,9	16,0	36,0	36,2	2,66	7,45		4431	
	16,0	16,0	35,9	36,1	2,88	8,06		4457	
56	16,1	16,1	34,7	34,9	3,68	10,30	10,23	4640	4640
	16,2	16,2	35,2	35,0	3,74	10,47		4629	
	16,0	16,0	34,9	34,4	3,54	9,91		4651	
112	-	-	-	-	4,02	11,26	10,43	-	-
	-	-	-	-	3,34	9,35		-	
	-	-	-	-	3,82	10,70		-	
224	-	-	-	-	4,10	11,48	11,55	-	-
	-	-	-	-	4,02	11,26		-	
	-	-	-	-	4,26	11,93		-	
448	-	-	-	-	3,94	11,03	11,16	-	-
	-	-	-	-	3,90	10,92		-	
	-	-	-	-	4,12	11,54		-	

Tabela B.43 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço IV para a temperatura de 30°C.

30° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{i,f}$ (MPa)	$f_{i,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
7	-	-	-	-	0,20	0,56	0,54	-	-
	-	-	-	-	0,16	0,45		-	
	-	-	-	-	0,22	0,62		-	
14	-	-	-	-	3,08	8,62	8,70	-	-
	-	-	-	-	3,16	8,85		-	
	-	-	-	-	3,08	8,62		-	
28	-	-	-	-	0,48	1,34*	11,00	-	-
	-	-	-	-	4,14	11,59		-	
	-	-	-	-	3,72	10,42		-	
56	-	-	-	-	3,48	9,74	10,92	-	-
	-	-	-	-	3,74	10,47		-	
	-	-	-	-	4,48	12,54		-	
112	-	-	-	-	4,30	12,04	12,25	-	-
	-	-	-	-	4,64	12,99		-	
	-	-	-	-	4,18	11,70		-	
224	-	-	-	-	4,68	13,10	13,38	-	-
	-	-	-	-	4,77	13,36		-	
	-	-	-	-	4,89	13,69		-	

Tabela B.44 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço IV para a temperatura de 50°C.

50° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
4	15,9	15,9	60,3	59,9	0,20	0,56	0,71	2654	2795
	16,0	15,9	59,4	57,4	0,28	0,78		2779	
	16,0	16,0	54,2	54,6	0,28	0,78		2952	
8	16,0	16,0	37,3	38,2	3,16	8,85	8,16	4290	4295
	16,0	16,0	36,9	37,2	2,54	7,11		4336	
	16,1	16,1	38,3	37,8	3,04	8,51		4259	
16	16,1	16,1	36,0	35,2	3,24	9,07	9,20	4574	4583
	16,1	16,1	35,9	34,9	3,18	8,90		4613	
	16,1	16,1	35,6	35,3	3,44	9,63		4561	
32	16,0	16,0	50,0	43,0	4,08	11,42	10,99	3721	4494
	15,9	15,9	29,5	29,7	3,92	10,98		5390	
	16,0	16,0	36,6	40,7	3,78	10,58		4372	
64	-	-	-	-	4,08	11,42	11,65	-	-
	-	-	-	-	4,16	11,65		-	
	-	-	-	-	4,24	11,87		-	
128	-	-	-	-	3,62	10,14	10,86	-	-
	-	-	-	-	3,84	10,75		-	
	-	-	-	-	4,18	11,70		-	

Tabela B.45 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 1 dia.

Ensaio 1 Dia													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som						Resistência			
		(cm)		Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,2	16,6	38,8	62,9	4450	105,7	107,8	4788	41,00	5,47	5,27
	2	50,1	50,1	19,9	41,2	65,0		108,3	108,2		35,15	4,69	
	3	50,2	50,3	21,5	40,3	64,7		107,6	104,8		42,45	5,66	
Cilindro	1	29,9	29,9					62,1	62,4		661,50	37,43	
	2	30,0	30,1					63,5	63,2	4831	840,00	47,53	41,73
	3	30,0	30,1					62,1	62,5		711,00	40,23	

Tabela B.46 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 3 dias.

Ensaio 3 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som					Resistência				
		(cm)		Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,1	50,2	20,6	43,1	64,7	4586	105,8	106,6	4773	50,60	6,75	6,80
	2	50,2	50,2	22,9	59,6	97,3		105,7	105,1		52,90	7,05	
	3	50,1	50,2	18,3	41,0	61,4		106,2	105,1		49,40	6,59	
Cilindro	1	30,5	30,4					63,0	63,7		876,00	49,57	
	2	30,3	30,3			-		63,4	62,9	4835	702,50	39,75	53,67
	3	30,4	30,3					62,8	63,0		1021,00	57,78	

Tabela B.47 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 7 dias.

Ensaio 7 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som					Resistência				
		(cm)		Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	49,9	16,0	37,6	61,9	4446	103,6	102,9	4907	58,00	7,73	8,34
	2	50,0	50,2	16,7	37,9	60,7		102,5	103,0		62,50	8,33	
	3	50,2	49,8	15,2	36,8	60,2		102,0	103,3		67,10	8,95	
Cilindro	1	29,4	29,5					59,6	59,5		1094,00	61,91	
	2	29,6	29,7			-		60,6	60,0	4964	1137,00	64,34	65,13
	3	29,5	29,5					60,1	60,4		1222,00	69,15	

Tabela B.48 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 14 dias.

Ensaio 14 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som					Resistência				
		(cm)		Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,2	14,1	42,7	69,8	3849	110,1	114,2	4480	33,90	4,52	4,77
	2	50,0	50,1	17,5	43,5	89,4		112,1	111,8		34,75	4,63	
	3	50,3	50,1	21,2	46,8	68,2		112,4	111,0		38,65	5,15	
Cilindro	1	30,1	30,1					67,3	66,6		684,50	38,73	
	2	29,7	30,0			-		67,2	66,0	4507	730,00	41,31	41,02
	3	29,5	29,5					64,1	65,7		760,00	43,01	

Tabela B.49 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 21 dias.

Ensaio 21 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som						Resistência			
	(cm)		Medida Indireta (μs)			Média (m/s)	Medida Direta (μs)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)	
Prisma	1	50,2	50,3	18,4	40,8	66,8	4032	111,3	111,7	4516	40,80	5,44	5,37
	2	50,3	50,2	16,9	47,0	68,8		109,4	109,7		36,70	4,89	
	3	50,2	50,2	21,3	45,5	69,5		112,2	113,1		43,40	5,79	
Cilindro	1	29,7	29,8					63,7	65,5		652,00	36,90	
	2	29,3	29,4					64,6	65,0	4567	722,50	40,89	36,91
	3	29,6	29,7					64,9	65,0		582,50	32,96	

Tabela B.50 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço IV para a idade de 28 dias.

Ensaio 28 Dias													
Corpo de prova	Comprimento			Ultra-Som						Resistência			
	(cm)		Medida Indireta (μs)			Média (m/s)	Medida Direta (μs)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)	
Prisma	1	50,2	50,2	14,5	42,5	66,8	3975	112,2	111,9	4448	41,00	5,47	5,53
	2	50,2	50,2	19,9	47,2	70,3		110,3	117,7		46,50	6,20	
	3	50,4	48,8	19,5	43,5	67,7		111,2	111,1		36,85	4,91	
Cilindro	1	30,0	30,0					63,3	65,0		684,50	38,73	
	2	29,8	29,9					63,5	64,1	4652	715,00	40,46	40,23
	3	29,5	29,4					64,3	63,7		733,50	41,51	

Tabela B.51 Resultados de ultra-som para concreto do Traço IV para o corpo-de-prova de Referência.

Idade (dias)	Cilindro				Prisma					
	Medida direta		Medida indireta		Medida indireta		Medida direta			
	Tempo (μs)	Velocidade (m/s)	Tempo (μs)	Velocidade (m/s)	Tempo (μs)	Velocidade (m/s)	Tempo (μs)	Velocidade (m/s)		
1	72,6	71,2	4096	26,7	53,6	80,1	3745	125,7	123,8	4006
3	68,4	68,1	4315	21,6	45	74,7	3749	117,1	118,0	4219
7	-	-	-	15,8	39,3	62,6	4273	113,1	112,6	4395
14	65,1	64,8	4534	19	41,8	70,2	3891	113,4	110,5	4431
21	65,3	64,0	4555	19	42,1	66,9	4174	111,5	110,9	4460
28	64,3	63,7	4602	19,5	43,5	67,7	4149	111,2	111,1	4462

B.5 Traço V

Tabela B.52 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço V para a temperatura de 15°C.

15° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
18	13,50	5,14	5,74	51	51	51	52
	17,80	6,85		50	50	52	52
	12,95	5,24		48	49	52	50
36	82,25	31,65	29,17	49	50	53	52
	82,65	31,47		51	53	51	50
	56,00	24,40		51	51	45	45
72	92,00	36,08	42,57	50	50	51	51
	117,30	48,88		50	50	48	48
	105,80	42,75		50	49	50	50
144	80,50	33,88	40,08	48	48	50	49
	82,50	33,33		49	50	50	50
	128,60	53,03		50	50	48	49
288	65,10	26,04	52,42	50	50	50	50
	121,40	47,61		50	50	51	51
	134,50	57,23		50	50	47	47
576	136,80	54,72	50,59	50	50	50	50
	73,70	31,70		46	47	50	50
	123,20	46,45		52	51	52	51

Tabela B.53 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço V para a temperatura de 30°C.

30° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
11	29,40	12,25	12,39	50	50	48	48
	33,20	12,64		51	50	52	52
	31,30	12,27		52	50	50	50
22	115,20	46,55	45,94	50	50	50	49
	85,20	34,42		49	50	50	50
	117,90	45,33		51	51	51	51
44	135,10	56,29	56,52	48	48	50	50
	150,60	57,40		49	50	53	53
	146,70	55,86		52	52	51	50
88	158,20	60,23	55,86	51	51	52	51
	157,80	67,09		47	49	49	49
	127,40	51,49		51	50	49	49
176	187,30	77,22	66,91	50	49	49	49
	180,10	72,78		51	50	49	49
	123,00	50,72		50	50	48	49
352	146,80	57,56	68,56	50	51	50	51
	55,90	21,72		52	52	49	50
	211,00	79,56		51	51	52	52

Tabela B.54 Resultados de Resistência à compressão para argamassa do Traço V para a temperatura de 50°C.

50° C							
Idade (horas)	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Medidas (mm)			
				B1	B2	C1	C2
9,2	16,30	6,39	10,57	50	50	51	51
	28,10	11,02		50	50	51	51
	35,36	14,29		50	49	50	50
18,3	98,10	38,85	36,90	51	50	51	49
	83,70	33,15		50	50	50	51
	98,70	38,71		50	50	51	51
36,7	84,10	32,65	40,28	51	50	51	51
	113,70	45,50		50	48	51	51
	109,90	42,68		50	50	51	52
73,3	92,38	36,59	41,76	50	50	51	50
	115,70	46,75		50	50	49	50
	105,90	41,94		51	50	50	50
146,7	96,50	39,00	51,58	49	49	51	50
	159,30	66,38		50	50	48	48
	123,40	49,36		50	50	50	50
293,3	160,90	63,09	70,35	50	51	50	51
	154,50	60,02		52	52	49	50
	205,80	77,60		51	51	52	52

Tabela B.55 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço V para a temperatura de 15°C.

15° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
18	16,1	16,1	39,2	39,5	1,38	3,86	3,84	4107	4102
	16,1	16,2	39,3	39,5	1,20	3,36		4109	
	16,1	16,2	39,8	39,5	1,36	3,81		4089	
36	16,1	16,1	34,4	35,1	2,10	5,88	5,97	4680	4676
	16,0	16,0	36,0	35,1	2,12	5,94		4558	
	16,0	16,0	33,4	35,4	2,18	6,10		4790	
72	16,0	16,0	34,0	34,1	2,32	6,50	7,59	4706	4667
	16,1	16,1	34,1	33,9	3,10	8,68		4749	
	16,1	16,0	37,7	35,3	-	-		4547	
144	16,1	16,0	34,1	33,9	3,32	9,30	8,40	4735	4758
	16,0	16,1	33,2	33,3	2,74	7,67		4834	
	16,0	16,0	34,2	34,0	2,94	8,23		4706	
288	16,0	16,1	32,3	32,4	4,08	11,42	9,18	4969	4964
	16,0	16,0	32,4	32,5	2,86	8,01		4938	
	16,0	16,0	32,2	32,1	2,90	8,12		4984	
576	16,0	16,1	32,0	32,2	3,28	9,18	8,89	5016	4965
	16,1	16,2	32,7	32,3	3,24	9,07		5000	
	16,1	16,1	33,0	33,2	3,00	8,40		4879	

Tabela B.56 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço V para a temperatura de 30°C.

30° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
11	16,1	16,1	45,6	45,7	1,04	2,91	3,25	3531	4656
	16,2	16,3	42,5	42,7	1,22	3,42		3824	
	16,4	16,4	45,7	45,4	1,22	3,42		3612	
22	16,1	16,1	35,3	35,1	3,14	8,79	9,33	4587	4587
	16,1	16,1	35,4	35,0	3,34	9,35		4600	
	16,1	16,2	35,4	35,3	3,52	9,86		4575	
44	16,0	16,0	34,4	34,3	3,44	9,63	9,61	4665	4679
	16,0	16,1	33,9	33,9	3,06	8,57		4735	
	16,0	16,0	34,9	34,5	3,80	10,64		4638	
88	16,0	16,0	34,0	34,3	3,36	9,41	10,08	4706	4824
	16,0	16,0	34,6	31,8	-	-		5031	
	16,0	16,0	33,8	34,2	3,84	10,75		4734	
176	16,0	16,1	33,5	33,6	3,78	10,58	12,00	4791	4810
	16,1	16,0	33,4	33,0	3,62	10,14		4864	
	16,0	16,0	33,5	33,6	5,46	15,29		4776	
352	16,1	16,1	32,4	32,5	3,62	10,14	10,04	4969	4964
	16,0	16,0	32,4	32,2	3,60	10,08		4969	
	16,1	16,1	32,5	32,6	3,54	9,91		4954	

Tabela B.57 Resultados de Resistência à tração na flexão e ultra-som para argamassa do Traço V para a temperatura de 50°C.

50° C									
Idade (hs)	Dimensões (cm)		Ultra-som (μ s)		Carga Ruptura (KN)	$f_{t,f}$ (MPa)	$f_{t,f}$ média (MPa)	Velocidade de onda (m/s)	Velocidade Média (m/s)
9,2	16,2	16,2	44,4	43,9	1,02	2,86	3,40	3690	3646
	16,2	16,2	44,9	50,0	1,12	3,14		3608	
	16,2	16,2	44,7	44,5	1,50	4,20		3640	
18,3	16,1	16,0	35,2	35,4	2,98	8,34	8,72	4560	4448
	16,2	16,0	36,6	36,9	3,10	8,68		4399	
	16,1	16,1	38,2	36,7	3,26	9,13		4387	
36,7	16,0	16,0	35,0	34,7	3,40	9,52	10,12	4611	4629
	15,9	16,1	34,5	34,6	3,44	9,63		4638	
	16,0	16,1	34,6	34,7	4,00	11,20		4639	
73,3	16,1	16,0	33,8	33,9	4,22	11,82	12,04	4749	4753
	16,1	16,1	34,0	33,8	4,58	12,82		4763	
	16,0	16,0	33,7	33,8	4,10	11,48		4748	
146,7	16,0	16,0	33,2	33,4	4,48	12,54	11,97	4819	4761
	15,9	15,9	33,8	33,8	3,94	11,03		4704	
	15,9	15,9	33,4	33,5	4,40	12,32		4760	
293,3	16,1	16,1	32,4	32,5	5,06	14,17	14,88	4969	4964
	16,0	16,0	32,4	32,2	5,94	16,63		4969	
	16,1	16,1	32,5	32,6	4,94	13,83		4954	

Tabela B.58 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 1 dia.

Ensaio 1 Dia													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som					Resistência				
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,1	50,1	20,0	23,6	22,6	4496	117,0	117,7	4341	32,24	4,30	4,62
	2	50,1	50,1	44,6	49,8	48,4		115,8	116,3		35,24	4,70	
	3	50,1	50,1	70,1	71,6	70,9		115,4	115,7		36,40	4,85	
Cilindro	1	29,8	29,8	-			4344	72,3	72,6	4344	603,50	34,15	33,54
	2	29,8	29,8					71,1	68,6		560,50	31,72	
	3	29,8	29,8					72,6	71,7		614,00	34,75	

Tabela B.59 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 3 dias.

Ensaio 3 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som					Resistência				
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,1	50,2	21,0	44,2	68,4	4127	111,4	110,2	4584	37,15	4,95	5,37
	2	50,2	50,2	20,8	44,5	68,2		111,5	111,8		45,90	6,12	
	3	50,1	50,1	15,8	32,9	65,0		111,3	109,4		37,80	5,04	
Cilindro	1	29,8	29,7	-			4567	66,0	65,2	4567	715,00	40,46	38,55
	2	29,9	29,8					65,3	65,6		566,50	32,06	
	3	29,6	29,6					65,1	65,1		762,00	43,12	

Tabela B.60 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 7 dias.

Ensaio 7 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som					Resistência				
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,1	50,1	20,2	44,6	71,9	4504	112,9	111,8	4520	39,75	5,30	5,55
	2	50,4	50,1	19,6	42,1	62,9		112,2	111,9		41,65	5,55	
	3	50,2	50,4	26,1	43,8	65,7		111,1	111,6		43,55	5,81	
Cilindro	1	29,8	29,8	-			4623	64,6	65,6	4623	765,00	43,29	44,07
	2	29,7	29,8					65,9	65,3		798,00	45,16	
	3	29,9	29,9					64,5	65,2		773,50	43,77	

Tabela B.61 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 14 dias.

Ensaio 14 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,4	50,1	19,2	45,5	69,7	3472	111,6	111,5	4504	46,90	6,25	6,57
	2	50,3	50,1	21,3	45,4	72,4		113,4	113,5		54,45	7,26	
	3	50,2	50,2	25,7	66,6	104,1		112,7	113,2		46,55	6,21	
Cilindro	1	29,8	29,9	-				64,9	65,3	4657	881,50	49,88	43,90
	2	29,8	30,0					64,1	66,3		559,50	31,66	
	3	29,8	29,8					65,7	66,5		886,50	50,17	

Tabela B.62 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 21 dias.

Ensaio 21 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,2	50,5	20,7	47,6	69,4	4214	109,4	109,2	4647	50,60	6,75	6,53
	2	50,1	50,2	17,2	42,2	65,4		111,6	110,3		46,85	6,25	
	3	50,1	50,3	16,9	40,3	62,3		108,7	108,1		49,45	6,59	
Cilindro	1	29,8	29,7	-				62,2	61,6	4846	867,00	49,06	49,84
	2	29,8	29,8					61,5	62,3		809,00	45,78	
	3	29,9	29,8					61,6	62,9		966,00	54,66	

Tabela B.63 Resultados de Resistência à compressão, tração na flexão e ultra-som para concreto do Traço V para a idade de 28 dias.

Ensaio 28 Dias													
Corpo de prova	Comprimento (cm)			Ultra-Som						Resistência			
				Medida Indireta (μ s)			Média (m/s)	Medida Direta (μ s)		Média (m/s)	KN	MPa	Média (MPa)
Prisma	1	50,0	50,0	15,8	38,6	60,9	4330	108,3	109,2	4650	57,60	7,68	7,15
	2	50,0	50,0	16,8	38,3	62,7		109,3	108,6		51,85	6,91	
	3	50,2	50,3	14,0	39,3	61,5		108,1	107,7		51,40	6,85	
Cilindro	1	30,0	30,1	-				63,3	63,6	4747	937,00	53,02	47,14
	2	30,0	29,9					63,2	63,5		871,00	49,29	
	3	30,0	30,0					64,7	64,5		691,00	39,10	

Tabela B.64 Resultados de ultra-som para concreto do Traço IV para o corpo-de-prova de Referência.

Idade (dias)	Cilindro			Prisma						
	Medida direta			Medida indireta				Medida direta		
	Tempo (μ s)		Velocidade (m/s)	Tempo (μ s)			Velocidade (m/s)	Tempo (μ s)		Velocidade (m/s)
1	70,7	69,3	4286	21,9	49,8	75,8	3709	119,1	119,6	4202
3	67,4	66,4	4484	19,1	43,8	68,9	4016	110,2	111,4	4535
7	66,3	66,1	4532	17,7	38,9	63,5	4359	110,1	111,1	4543
14	66,4	67,6	4478	16,5	42,2	66,7	3983	110,1	111,5	4535
21	61,2	60,7	4922	16,4	42,2	64,4	4159	106,7	107,2	4698
28	64,7	64,5	4644	14,0	39,3	61,5	4205	108,1	107,7	4657

ANEXO C – Resultados Individuais da Placa de Concreto

C.1 Ensaio da Base

Tabela C.1 Resultados do Ensaio da Base com a chapa de raio 10,8 cm.

Carga (kgf)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	LVDT 5 (mm)	LVDT 6 (mm)
15	0	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
24	-0,003125	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
15	0	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
0	0	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
-9	0	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
-24	0	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
27	0	-0,02125	0	-0,00125	0	-0,0025
9	0	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
0	0	-0,02125	0	-0,0025	0	-0,0025
453	0,3875	0,00875	0	-0,00375	0	-0,0025
2019	0,928125	0,09625	0	-0,01125	0	-0,005
3996	1,31875	0,16	0	-0,0175	0	-0,00625
5682	1,590625	0,20375	0	-0,02375	0	-0,01125
6015	1,628125	0,21875	0	-0,0325	-0,0275	-0,0375
6156	1,628125	0,2175	0	-0,035	-0,0325	-0,0425
6219	1,634375	0,21625	0	-0,0375	-0,0325	-0,0525
6303	1,634375	0,21625	0	-0,0375	-0,03375	-0,05375
6378	1,65	0,21125	0	-0,0375	-0,03375	-0,05625
6453	1,665625	0,1975	0	-0,0375	-0,03375	-0,055
6531	1,66875	0,1975	0	-0,0375	-0,03375	-0,055
6597	1,671875	0,1975	0	-0,0375	-0,03625	-0,05625
6660	1,703125	0,1975	0	-0,04	-0,0425	-0,06
6753	1,7125	0,1975	0	-0,04	-0,045	-0,06125
6810	1,715625	0,1975	0	-0,04	-0,045	-0,0625
6891	1,728125	0,1975	0	-0,04125	-0,04625	-0,0625
6963	1,734375	0,1975	0	-0,04125	-0,04625	-0,065
7044	1,740625	0,1975	0	-0,04125	-0,0475	-0,065
7098	1,75	0,20125	0	-0,04125	-0,0475	-0,0675
7209	1,75	0,20125	0	-0,0425	-0,05125	-0,07
7278	1,75625	0,20125	0	-0,04375	-0,055	-0,0725
7347	1,765625	0,20125	0	-0,045	-0,05625	-0,07375
7437	1,775	0,20125	0	-0,045	-0,05625	-0,075
7506	1,78125	0,20125	0	-0,04625	-0,0575	-0,07625
7578	1,790625	0,2125	0	-0,04625	-0,0575	-0,07875
7647	1,80625	0,2125	0	-0,04625	-0,0575	-0,07375

7770	1,809375	0,21875	0	-0,04625	-0,0575	-0,08
7857	1,809375	0,21875	0	-0,0575	-0,0575	-0,105
7938	1,8125	0,21875	0	-0,0575	-0,0575	-0,11125
8010	1,8125	0,20875	0	-0,0575	-0,0575	-0,1075
8112	1,828125	0,2025	0	-0,0575	-0,0575	-0,11
8187	1,834375	0,2025	0	-0,0575	-0,0575	-0,11375
8262	1,8375	0,20125	0	-0,0575	-0,0575	-0,115
8334	1,84375	0,2025	0	-0,0575	-0,0575	-0,115
8412	1,85	0,205	0	-0,0575	-0,0575	-0,11875
8526	1,859375	0,205	0	-0,0575	-0,0575	-0,11875
8571	1,8625	0,205	0	-0,0575	-0,0575	-0,11875
8655	1,871875	0,205	0	-0,0575	-0,0575	-0,12
8727	1,88125	0,205	0	-0,0575	-0,0575	-0,12
8817	1,90625	0,2075	0	-0,0575	-0,0575	-0,12125
8934	1,88125	0,22125	0	-0,0575	-0,0575	-0,12625
8997	1,90625	0,2225	0	-0,0575	-0,05875	-0,12625
9054	1,909375	0,2225	0	-0,0575	-0,05875	-0,12625
9123	1,91875	0,2225	0	-0,0575	-0,05875	-0,12625
9219	1,925	0,2225	0	-0,0575	-0,05875	-0,12625
9315	1,934375	0,2225	0	-0,0575	-0,05875	-0,12625
9378	1,975	0,19875	0	-0,05875	-0,05875	-0,11625
9477	1,95625	0,22625	0	-0,05875	-0,06	-0,11875
9537	1,95625	0,23	0	-0,05875	-0,06	-0,12875
9609	1,95625	0,23	0	-0,05875	-0,06	-0,12875
9696	1,9625	0,23	0	-0,05875	-0,06125	-0,12875
9780	1,96875	0,23	0	-0,05875	-0,06125	-0,12875
9825	1,978125	0,23	0	-0,05875	-0,06125	-0,12875
9870	1,9875	0,23	0	-0,05875	-0,06125	-0,12875
9972	1,996875	0,23	0	-0,05875	-0,06125	-0,12875
10065	2,003125	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10131	2,009375	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10212	2,01875	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10263	2,025	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10335	2,0375	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10410	2,04375	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10488	2,053125	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10524	2,059375	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10614	2,065625	0,23	0	-0,06	-0,06125	-0,12875
10668	2,075	0,23	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
10776	2,084375	0,23	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
10830	2,09375	0,23	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
10878	2,1	0,23	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
10941	2,109375	0,235	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
11022	2,115625	0,235	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
11061	2,121875	0,235	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
11124	2,13125	0,235	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875

11202	2,140625	0,235	0	-0,06125	-0,06125	-0,12875
11235	2,146875	0,23625	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11286	2,15625	0,24	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11361	2,165625	0,24	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11427	2,171875	0,24	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11481	2,178125	0,24	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11532	2,1875	0,24	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11577	2,190625	0,24	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11625	2,2	0,245	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11697	2,209375	0,245	0	-0,0625	-0,06125	-0,12875
11754	2,21875	0,245	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
11784	2,225	0,245	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
11856	2,234375	0,24625	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
11910	2,2375	0,245	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
11985	2,246875	0,245	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
11994	2,253125	0,25	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
12018	2,2625	0,25	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
12087	2,26875	0,25	0	-0,06375	-0,06125	-0,12875
12117	2,275	0,25	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12195	2,28125	0,25	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12213	2,290625	0,25	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12270	2,296875	0,25	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12279	2,303125	0,25	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12360	2,309375	0,255	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12390	2,31875	0,255	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12417	2,325	0,255	0	-0,065	-0,06125	-0,12875
12459	2,33125	0,255	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12507	2,3375	0,255	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12528	2,34375	0,25875	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12549	2,35	0,25875	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12591	2,359375	0,25875	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12657	2,3625	0,25875	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12642	2,371875	0,25875	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12699	2,378125	0,25875	0	-0,06625	-0,06125	-0,12875
12720	2,384375	0,25875	0	-0,0675	-0,06125	-0,12875
12756	2,3875	0,25875	0	-0,0675	-0,06125	-0,12875
12792	2,39375	0,25875	0	-0,0675	-0,06125	-0,12875
12816	2,4	0,25875	0	-0,0675	-0,06125	-0,12875
12834	2,40625	0,25875	0	-0,0675	-0,06125	-0,12875
12876	2,4125	0,25875	0	-0,0675	-0,06125	-0,12875
12918	2,41875	0,25875	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
12933	2,425	0,25875	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
12981	2,43125	0,25875	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
12975	2,4375	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
13017	2,440625	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
13026	2,446875	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875

13032	2,453125	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
13080	2,459375	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
13104	2,465625	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
13098	2,471875	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
13137	2,478125	0,26375	0	-0,06875	-0,06125	-0,12875
13176	2,48125	0,26375	0	-0,07	-0,06125	-0,12875
13191	2,484375	0,26375	0	-0,07	-0,06125	-0,12875
13194	2,490625	0,2675	0	-0,07	-0,06125	-0,12875
13188	2,496875	0,29375	0	-0,07	-0,06125	-0,11375
13221	2,509375	0,2925	0	-0,07	-0,06125	-0,1275
13236	2,521875	0,32375	0	-0,07125	-0,06125	-0,1375
13266	2,528125	0,29125	0	-0,0725	-0,06125	-0,12875
13275	2,5375	0,29125	0	-0,0725	-0,06125	-0,1275
13290	2,5375	0,30125	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13293	2,534375	0,30125	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13308	2,540625	0,30125	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13326	2,54375	0,30125	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13353	2,559375	0,29875	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13371	2,55625	0,2975	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13395	2,559375	0,29875	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13386	2,559375	0,2975	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13386	2,5625	0,2975	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13419	2,56875	0,29875	0	-0,0725	-0,0625	-0,12875
13422	2,58125	0,2975	0	-0,0725	-0,0625	-0,12625
13443	2,584375	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,125
13437	2,5875	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,125
13455	2,590625	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,125
13461	2,59375	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,125
13479	2,603125	0,29625	0	-0,0725	-0,0625	-0,125
13497	2,603125	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13485	2,609375	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13476	2,609375	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13509	2,6125	0,29625	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13497	2,6125	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13554	2,615625	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13524	2,61875	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13509	2,621875	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375
13506	2,625	0,295	0	-0,0725	-0,0625	-0,12375

Tabela C.2 Resultados do Ensaio da Base com a chapa de raio 14,35 cm.

Carga	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	LVDT 4	LVDT 5
-6	-0,003125	-0,03125	-0,01875	0	0
0	-0,00625	-0,035	-0,0175	0	0
33	-0,00625	-0,0375	-0,02	0	0
27	-0,003125	-0,0375	-0,045	0	0
96	-0,00625	-0,035	-0,0775	0	-0,00125
99	-0,003125	-0,0325	-0,10375	0	0
159	-0,00625	-0,02875	-0,12875	-0,00125	-0,00125
249	-0,003125	-0,025	-0,145	-0,0025	0
345	-0,003125	-0,0175	-0,15875	-0,0025	-0,00125
450	0,021875	-0,00625	-0,1675	-0,0025	0
510	0,05625	0,01	-0,17	-0,0025	0
648	0,1	0,02625	-0,17125	-0,00375	-0,00125
726	0,140625	0,0425	-0,17375	-0,00375	0
888	0,175	0,0575	-0,17625	-0,00375	-0,00125
987	0,20625	0,07	-0,1775	-0,00375	0
1092	0,234375	0,0825	-0,17875	-0,0025	0
1194	0,259375	0,09875	-0,18	-0,00375	-0,00125
1308	0,28125	0,11625	-0,18125	-0,00375	-0,00125
1356	0,303125	0,13	-0,1825	-0,0025	0
1458	0,3125	0,1425	-0,18375	-0,00375	-0,00125
1530	0,33125	0,15625	-0,18375	-0,00375	0
1614	0,35	0,1725	-0,18375	-0,00375	0
1713	0,375	0,19375	-0,185	-0,00375	0
1818	0,39375	0,2125	-0,185	-0,00375	0
1899	0,40625	0,22375	-0,185	-0,00375	-0,00125
1995	0,41875	0,235	-0,18625	-0,00625	0
2082	0,4375	0,24625	-0,18625	-0,01125	0
2181	0,45	0,25875	-0,18625	-0,01125	0
2322	0,459375	0,27625	-0,18625	-0,01125	0
2475	0,484375	0,295	-0,1875	-0,01125	0
2601	0,5	0,315	-0,1875	-0,01125	0
2760	0,51875	0,33375	-0,1875	-0,01125	-0,00125
2925	0,540625	0,3525	-0,1875	-0,01125	0
3099	0,5625	0,37	-0,1875	-0,01125	0
3237	0,584375	0,3875	-0,18875	-0,01125	0
3399	0,6	0,40625	-0,18875	-0,01125	0
3600	0,615625	0,4225	-0,18875	-0,01125	0
3720	0,63125	0,4375	-0,18875	-0,0125	0
3945	0,646875	0,4525	-0,18875	-0,01375	0
4116	0,665625	0,4675	-0,18875	-0,015	0
4275	0,68125	0,48125	-0,19	-0,01625	-0,00125
4446	0,690625	0,49375	-0,19	-0,0175	-0,005
4611	0,690625	0,50125	-0,19125	-0,0275	-0,015
4812	0,703125	0,5125	-0,19125	-0,03	-0,0175
4974	0,728125	0,545	-0,1975	-0,03375	-0,02125

5112	0,73125	0,545	-0,1975	-0,03625	-0,025
5301	0,71875	0,5475	-0,2	-0,0375	-0,02625
5487	0,721875	0,55375	-0,2	-0,03875	-0,0275
5676	0,7375	0,56625	-0,2	-0,04	-0,02875
5850	0,75	0,5775	-0,2	-0,04	-0,02875
6024	0,765625	0,5875	-0,1975	-0,04	-0,03
6225	0,778125	0,60625	-0,2	-0,04125	-0,03
6393	0,790625	0,615	-0,19875	-0,0425	-0,03125
6558	0,8125	0,62625	-0,19875	-0,0425	-0,03125
6741	0,828125	0,63375	-0,19875	-0,0425	-0,03125
6942	0,8375	0,64375	-0,19875	-0,0425	-0,0325
7089	0,846875	0,6525	-0,19875	-0,04375	-0,0325
7194	0,853125	0,66	-0,19875	-0,045	-0,03375
7323	0,8625	0,6675	-0,19875	-0,045	-0,03375
7392	0,875	0,675	-0,19625	-0,045	-0,03375
7485	0,878125	0,67875	-0,195	-0,045	-0,03375
7563	0,878125	0,68125	-0,19625	-0,045	-0,03375
7614	0,884375	0,685	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7638	0,884375	0,68875	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7725	0,8875	0,69125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7716	0,89375	0,695	-0,19625	-0,045	-0,03375
7824	0,896875	0,6975	-0,19625	-0,045	-0,03375
7788	0,896875	0,69875	-0,19625	-0,045	-0,03375
7800	0,89375	0,7	-0,19625	-0,04625	-0,035
7860	0,89375	0,70125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7899	0,890625	0,7025	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7917	0,89375	0,7025	-0,19625	-0,045	-0,03375
7941	0,890625	0,70375	-0,19625	-0,045	-0,03375
7956	0,890625	0,705	-0,19625	-0,04625	-0,035
7971	0,89375	0,705	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7950	0,9	0,70875	-0,19625	-0,04625	-0,035
7941	0,903125	0,71	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7929	0,9	0,71	-0,19625	-0,04625	-0,035
7908	0,90625	0,71	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7932	0,903125	0,71	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7938	0,9	0,71	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7914	0,925	0,71	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7917	0,921875	0,71125	-0,19625	-0,04625	-0,035
7923	0,921875	0,71125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7905	0,921875	0,71125	-0,195	-0,045	-0,03375
7914	0,921875	0,71125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7929	0,915625	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7917	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,035
7908	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,035
7908	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7875	0,90625	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7920	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375

7920	0,9125	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7869	0,9125	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7908	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7917	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,045	-0,03375
7911	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7878	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7923	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7908	0,909375	0,7125	-0,19625	-0,04625	-0,03375
7887	0,9125	0,7125	-0,195	-0,045	-0,03375
7899	0,909375	0,7125	-0,1975	-0,04625	-0,03375
7911	0,9125	0,71875	-0,19875	-0,04625	-0,03375

C.2 Ensaio da Placa – Carga no centro

Tabela C.3 Resultados dos Transdutores de Deslocamento no Ensaio da Placa para carga aplicada no centro.

Carga (kgf)	LVDT 1 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 4 (mm)	LVDT 5 (mm)	LVDT 6 (mm)
30	0	0	0	0,003125	0
42	0	0	0	0,00625	0
51	0	0	0	0,009375	0
54	0	0	0	0,015625	0
75	0	0	0	0,01875	0
78	0	-0,00125	0	0,021875	0
102	0	-0,00125	0	0,021875	0
90	0	-0,00125	0	0,021875	0
108	0	-0,00125	0	0,021875	0
114	0	-0,00125	0	0,021875	0
129	0	-0,00125	0	0,021875	0
159	0	-0,00125	0	0,021875	0
183	0	-0,00125	0	0,021875	0
198	0	-0,00125	0	0,021875	0
225	0	-0,00125	0	0,021875	0
258	0	-0,00125	0	0,021875	0
288	0	-0,00125	0	0,021875	0
324	-0,00375	-0,00125	0	0,021875	0
360	-0,00625	-0,00125	0	0,01875	0
402	-0,00625	-0,00125	0	0,01875	0
441	-0,0075	-0,00125	0	0,01875	0
489	-0,00875	-0,0025	0	0,01875	0
549	-0,00875	-0,0025	0	0,01875	0
603	-0,01	-0,0025	0	0,01875	0
669	-0,0125	-0,00375	0	0,01875	0
732	-0,0125	-0,005	0	0,01875	0
801	-0,0125	-0,0075	0	0,01875	0
870	-0,01375	-0,00875	0	0,01875	0
957	-0,015	-0,00875	0	0,01875	0

1050	-0,015	-0,01125	0	0,01875	-0,00125
1119	-0,015	-0,0125	0	0,01875	0
1197	-0,015	-0,01375	0	0,01875	0
1272	-0,015	-0,01625	0	0,01875	0
1350	-0,015	-0,0175	0	0,015625	0
1443	-0,015	-0,02	0	0,015625	0
1527	-0,015	-0,02125	0	0,015625	0
1626	-0,015	-0,02375	0	0,015625	0
1707	-0,015	-0,025	0	0,015625	0
1827	-0,015	-0,0275	0	0,015625	0
1953	-0,015	-0,03125	0	0,01875	0
2061	-0,015	-0,03375	0	0,01875	0
2181	-0,01625	-0,03875	0	0,01875	0
2292	-0,0175	-0,0425	0	0,01875	0
2424	-0,0175	-0,045	0	0,01875	0
2556	-0,0175	-0,04625	0	0,01875	0
2697	-0,0175	-0,0475	0	0,01875	0
2844	-0,0175	-0,0475	0	0,01875	0
2991	-0,0175	-0,0475	0	0,01875	0
3141	-0,0175	-0,0475	0	0,021875	0
3288	-0,0175	-0,0475	0	0,021875	0
3441	-0,025	-0,045	0	0,021875	0
3591	-0,025	-0,04375	0	0,021875	0
3753	-0,025	-0,04375	0	0,021875	0
3897	-0,025	-0,045	0	0,021875	0
4050	-0,025	-0,045	0	0,021875	0
4212	-0,025	-0,045	0	0,021875	-0,00125
4362	-0,03125	-0,045	0	0,01875	0
4521	-0,03125	-0,045	0	0,021875	-0,00125
4671	-0,03125	-0,045	0	0,021875	0
4806	-0,03625	-0,04375	0	0,021875	-0,00125
4959	-0,0375	-0,0425	0	0,021875	-0,00125
5121	-0,03875	-0,04125	0	0,021875	0
5280	-0,04	-0,0375	0	0,021875	-0,00125
5427	-0,04125	-0,0375	0	0,021875	-0,00125
5565	-0,0425	-0,03625	0	0,021875	-0,00125
5664	-0,0425	-0,03625	0	0,021875	-0,00125
5781	-0,0425	-0,03625	0	0,021875	-0,00125
5946	-0,0425	-0,0375	0	0,021875	-0,00625
6102	-0,0425	-0,0375	0	0,021875	-0,00625
6270	-0,04875	-0,03625	0	-0,00625	-0,01625
6423	-0,05	-0,03625	0	-0,0125	-0,01875
6621	-0,05125	-0,03625	0	-0,015625	-0,02125
6801	-0,0525	-0,03625	0	-0,021875	-0,02375
6960	-0,0525	-0,03625	0	-0,028125	-0,0275
7146	-0,0525	-0,03625	0	-0,034375	-0,03
7308	-0,0525	-0,03625	0	-0,040625	-0,0325
7476	-0,0525	-0,03625	0	-0,046875	-0,035
7650	-0,0525	-0,03625	0	-0,053125	-0,04
7821	-0,0525	-0,03625	0	-0,05625	-0,0425
7992	-0,0525	-0,03625	0	-0,05625	-0,0425
8163	-0,0525	-0,03625	0	-0,059375	-0,04375

8346	-0,0525	-0,03625	0	-0,0625	-0,0475
8517	-0,0525	-0,03625	0	-0,065625	-0,04875
8706	-0,0525	-0,03625	0	-0,065625	-0,05
8877	-0,0525	-0,03625	0	-0,065625	-0,05
9051	-0,0525	-0,03625	0	-0,06875	-0,05125
9228	-0,0525	-0,02	0	-0,06875	-0,05125
9390	-0,0525	-0,01	0	-0,06875	-0,05125
9567	-0,0525	-0,0075	0	-0,06875	-0,05125
9720	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,05125
9837	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,05625
9933	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,0575
10026	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,0575
10089	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,0575
10146	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,0575
10185	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,0575
10218	-0,0525	-0,00625	0	-0,06875	-0,0575
10242	-0,0525	-0,00625	0	-0,071875	-0,0575
10266	-0,0525	-0,00625	0	-0,071875	-0,0575
10275	-0,0525	-0,00625	0	-0,071875	-0,0575
10293	-0,0525	-0,00625	0	-0,071875	-0,0575
10302	-0,0525	-0,00625	0	-0,071875	-0,0575
10308	-0,0525	-0,00625	0	-0,071875	-0,0575
10320	-0,0525	-0,00625	0	-0,071875	-0,0575
10326	-0,0525	-0,00625	0	-0,075	-0,06125
10329	-0,0525	-0,005	0	-0,075	-0,06375
10335	-0,0525	-0,005	0	-0,078125	-0,06625
10341	-0,0525	-0,00625	0	-0,078125	-0,06625
10341	-0,0525	-0,005	0	-0,078125	-0,06625
10344	-0,0525	-0,005	0	-0,078125	-0,06625
10353	-0,0525	-0,005	0	-0,078125	-0,06625
10356	-0,0525	-0,005	0	-0,078125	-0,06625
10362	-0,0525	-0,005	0	-0,084375	-0,06875
10362	-0,0525	-0,005	0	-0,084375	-0,07
10362	-0,0525	-0,005	0	-0,084375	-0,07125
10368	-0,0525	-0,005	0	-0,0875	-0,07125
10368	-0,0525	-0,005	0	-0,084375	-0,07625
10377	-0,0525	-0,005	0	-0,090625	-0,0775
10377	-0,0525	-0,005	0	-0,09375	-0,0775
10377	-0,0525	-0,005	0	-0,09375	-0,0775
10380	-0,0525	-0,005	0	-0,09375	-0,0775
10386	-0,0525	-0,005	0	-0,09375	-0,0775
10383	-0,0525	-0,005	0	-0,09375	-0,0775
10392	-0,0525	-0,005	0	-0,096875	-0,0775
10380	-0,0525	-0,005	0	-0,090625	-0,0775
10389	-0,0525	-0,005	0	-0,09375	-0,0775
10398	-0,0525	-0,005	0	-0,096875	-0,0775
10395	-0,0525	-0,005	0	-0,096875	-0,085
10398	-0,0525	0	0	-0,103125	-0,08875
10395	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,103125	-0,08875
10395	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10395	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875

10398	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10404	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10395	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10398	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10398	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10398	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10407	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10395	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10407	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10407	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10404	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10407	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10407	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10407	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10401	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10395	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10395	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10407	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10413	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10413	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10410	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10422	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10419	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10419	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10422	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10431	-0,0525	0	0	-0,103125	-0,08875
10434	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10425	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10431	-0,0525	0	0	-0,103125	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10437	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10431	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10440	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10434	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10434	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10437	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10437	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10434	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10434	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875

10434	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10431	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10428	-0,0525	0	0	-0,103125	-0,08875
10431	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875
10437	-0,0525	0	0	-0,10625	-0,08875

Tabela C.4 Resultados dos *Strain Gages* no Ensaio da Placa para carga aplicada no centro.

Carga (kgf)	Strain Gage A ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage B ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage C ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage D ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage E ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage F ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage G ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage H ($\mu\text{m/m}$)
-3	0,72	0,72	2,398E-14	2,398E-14	0,96	0,24	0,72	0,2274882
6	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,24	1,279E-13	0,72	0,9099526
-3	-0,72	-0,72	2,398E-14	2,398E-14	-0,48	1,279E-13	0,96	0,9099526
0	0,48	0,48	2,398E-14	2,398E-14	0,72	1,279E-13	1,2	0,6824645
0	-0,48	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	-0,24	0,96	0,6824645
-6	0,48	0,48	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	1,44	0,6824645
0	-8,527E-14	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,24	1,279E-13	1,92	0,6824645
0	-0,72	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	1,279E-13	2,16	0,4549763
9	-0,48	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	-0,24	1,279E-13	2,4	0,9099526
3	-0,48	-0,48	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	-0,24	2,4	0,6824645
0	-0,48	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	-0,24	1,279E-13	2,4	0,9099526
-6	0,48	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,48	0,24	2,64	0,9099526
9	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,24	1,279E-13	2,4	1,5924171
12	-0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	1,279E-13	2,16	0,6824645
6	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	2,64	1,1374408
15	-8,527E-14	0,24	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	1,279E-13	2,64	0,4549763
0	-8,527E-14	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	2,64	1,1374408
6	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	2,64	0,9099526
15	-0,72	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	1,279E-13	2,4	0,6824645
15	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,96	0,24	2,64	0,9099526
9	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	0,24	2,64	0,9099526
12	0,48	0,72	2,398E-14	2,398E-14	0,96	1,279E-13	2,64	0,2274882
15	-0,48	-0,48	2,398E-14	2,398E-14	0,24	-0,24	2,4	0,9099526
15	-8,527E-14	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	2,64	0,6824645
9	-0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,96	1,279E-13	2,4	0,2274882
21	-0,48	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	3,73E-14	-0,24	2,4	0,4549763
18	-0,24	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	2,4	-2,109E-15
21	-0,72	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,24	1,279E-13	2,16	-2,109E-15
30	-0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	0,72	1,279E-13	2,4	0,2274882
27	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	0,72	1,279E-13	2,64	0,2274882
30	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,72	1,279E-13	2,64	0,2274882
42	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	0,24	1,279E-13	2,4	-2,109E-15
51	-0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	2,4	-0,2274882
54	0,48	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,96	0,24	2,64	-0,2274882
75	-0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	0,48	1,279E-13	2,4	-0,4549763
78	-0,72	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,72	1,279E-13	2,16	-0,2274882
102	-0,48	0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,96	0,24	2,64	-0,2274882
90	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	1,2	0,24	2,64	-0,4549763
108	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	1,2	0,24	2,64	-0,4549763

114	-0,72	-0,48	2,398E-14	2,398E-14	0,72	1,279E-13	2,16	-0,6824645
129	-0,24	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,96	1,279E-13	2,4	-0,6824645
159	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	1,2	0,24	2,4	-0,4549763
183	-0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	0,72	0,24	2,64	-0,4549763
198	-0,48	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,72	0,24	2,4	-2,109E-15
225	-8,527E-14	0,24	2,398E-14	2,398E-14	1,44	0,48	2,4	-0,6824645
258	-0,24	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	0,96	0,48	2,4	-0,4549763
288	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	1,44	0,48	2,64	-0,9099526
324	0,72	0,48	2,398E-14	2,398E-14	1,68	0,72	2,64	-1,3649289
360	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	1,68	0,72	2,88	-1,3649289
402	-0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	1,68	0,48	2,64	-1,3649289
441	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	1,68	0,72	2,64	-1,5924171
489	0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	2,4	0,96	2,88	-2,0473934
549	-0,24	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	2,16	0,96	2,64	-2,2748815
603	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	2,4	1,2	2,64	-2,5023697
669	0,96	0,48	2,398E-14	2,398E-14	3,36	1,44	3,12	-2,957346
732	-0,24	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	2,88	1,44	2,64	-2,957346
801	-0,96	-0,48	2,398E-14	2,398E-14	3,12	1,44	2,64	-3,8672986
870	0,24	0,48	2,398E-14	2,398E-14	4,32	1,92	3,12	-4,0947867
957	0,24	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	4,08	2,16	2,64	-4,7772512
1050	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	4,32	2,16	2,64	-5,2322275
1119	0,48	0,48	2,398E-14	2,398E-14	5,04	2,64	2,88	-5,2322275
1197	-8,527E-14	0,24	2,398E-14	2,398E-14	5,28	2,64	3,12	-5,6872038
1272	-8,527E-14	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	5,28	2,64	2,64	-5,9146919
1350	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	6,24	3,12	3,12	-6,1421801
1443	0,48	0,48	2,398E-14	2,398E-14	6,48	3,12	3,36	-6,8246445
1527	-0,24	-0,24	2,398E-14	2,398E-14	6	3,36	2,88	-6,8246445
1626	0,48	3,375E-14	2,398E-14	2,398E-14	6,96	3,84	3,12	-7,0521327
1707	0,24	0,24	2,398E-14	2,398E-14	7,2	3,84	2,88	-7,9620853
1827	0,48	0,24	2,398E-14	2,398E-14	7,68	4,08	3,12	-8,6445498
1953	0,72	0,24	2,398E-14	2,398E-14	8,64	4,56	3,36	-9,5545024
2061	0,72	0,24	2,398E-14	2,398E-14	8,88	4,8	3,36	-10,236967
2181	0,48	0,24	2,398E-14	2,398E-14	9,12	5,04	2,64	-10,691943
2292	0,72	0,72	2,398E-14	2,398E-14	10,32	5,52	3,36	-11,374408
2424	0,96	0,48	2,398E-14	2,398E-14	10,56	5,76	3,6	-11,829384
2556	0,96	0,48	2,398E-14	2,398E-14	11,04	6,24	3,36	-12,739336
2697	0,72	0,24	2,398E-14	2,398E-14	12	6,48	3,36	-12,966825
2844	1,2	0,72	2,398E-14	2,398E-14	12,48	6,96	3,84	-13,649289
2991	1,2	0,72	2,398E-14	2,398E-14	13,2	7,44	4,08	-14,331754
3141	1,2	0,24	2,398E-14	2,398E-14	14,16	7,92	3,84	-15,014218
3288	1,68	0,72	2,398E-14	2,398E-14	14,88	8,4	4,08	-15,924171
3441	1,92	0,72	2,398E-14	2,398E-14	15,6	8,64	3,6	-16,606635
3591	1,68	0,72	2,398E-14	2,398E-14	16,32	9,12	3,6	-17,516588
3753	1,92	0,96	2,398E-14	2,398E-14	17,52	9,6	4,56	-18,199052
3897	2,16	1,2	2,398E-14	2,398E-14	17,76	9,84	3,84	-19,109005
4050	1,68	0,72	2,398E-14	2,398E-14	18,24	10,32	3,6	-19,791469
4212	2,4	1,2	2,398E-14	2,398E-14	19,44	10,8	4,56	-20,018957
4362	1,92	0,72	2,398E-14	2,398E-14	19,68	10,8	3,6	-21,383886
4521	1,44	0,24	2,398E-14	2,398E-14	20,16	11,28	3,6	-22,066351

4671	1,92	0,72	2,398E-14	2,398E-14	21,36	12	3,84	-22,748815
4806	3,36	1,68	2,398E-14	2,398E-14	22,8	12,48	4,32	-23,43128
4959	1,92	0,48	2,398E-14	2,398E-14	22,56	12,72	3,84	-24,56872
5121	2,64	0,96	2,398E-14	2,398E-14	23,76	13,2	4,56	-25,478673
5280	2,16	0,48	2,398E-14	2,398E-14	24	13,44	3,84	-26,388626
5427	2,64	1,2	2,398E-14	2,398E-14	25,2	14,16	3,84	-27,298578
5565	2,88	1,44	2,398E-14	2,398E-14	25,92	14,4	3,84	-28,208531
5664	2,88	1,2	2,398E-14	2,398E-14	26,64	14,88	4,56	-28,663507
5781	2,16	0,72	2,398E-14	2,398E-14	26,64	14,88	4,08	-28,890995
5946	2,4	0,72	2,398E-14	2,398E-14	27,12	15,36	2,64	-30,255924
6102	3,36	1,2	2,398E-14	2,398E-14	28,32	16,08	3,6	-30,938389
6270	2,4	0,72	2,398E-14	2,398E-14	28,8	16,32	3,36	-31,848341
6423	2,4	0,72	2,398E-14	2,398E-14	30	16,56	3,36	-32,985782
6621	2,64	0,72	2,398E-14	2,398E-14	30,72	17,28	3,6	-33,895735
6801	2,88	0,96	2,398E-14	2,398E-14	31,2	17,76	3,36	-34,578199
6960	3,84	1,44	2,398E-14	2,398E-14	32,64	18,72	2,4	-35,71564
7146	2,4	0,48	2,398E-14	2,398E-14	32,4	18,48	0,72	-36,853081
7308	3,6	1,2	2,398E-14	2,398E-14	33,84	19,44	1,68	-37,308057
7476	3,36	0,96	2,398E-14	2,398E-14	34,08	19,68	0,96	-38,672986
7650	3,84	1,2	2,398E-14	2,398E-14	35,04	20,4	-1,528E-13	-39,35545
7821	4,08	1,44	2,398E-14	2,398E-14	36,24	20,88	-0,48	-40,037915
7992	4,08	1,44	2,398E-14	2,398E-14	36,96	21,36	6,72	-40,720379
8163	4,08	1,44	2,398E-14	2,398E-14	37,68	21,84	12,72	-41,85782
8346	3,84	1,2	2,398E-14	2,398E-14	38,4	22,56	-1,528E-13	-43,222749
8517	3,84	0,96	2,398E-14	2,398E-14	38,88	23,04	11,52	-43,450237
8706	4,56	1,68	2,398E-14	2,398E-14	40,32	23,52	25,92	-44,815166
8877	4,56	1,68	2,398E-14	2,398E-14	40,8	24,24	38,88	-45,270142
9051	4,8	1,68	2,398E-14	2,398E-14	41,52	24,72	49,44	-46,180095
9228	5,04	1,68	2,398E-14	2,398E-14	42,24	25,2	60,48	-46,635071
9390	5,28	1,92	2,398E-14	2,398E-14	43,2	25,92	70,32	-47,545024
9567	4,8	1,44	2,398E-14	2,398E-14	43,44	26,4	75,84	-48,909953
9720	5,52	1,92	2,398E-14	2,398E-14	44,64	27,12	83,04	-49,819905
9837	5,52	1,92	2,398E-14	2,398E-14	45,12	27,6	83,76	-50,729858
9933	5,28	1,92	2,398E-14	2,398E-14	45,12	27,84	98,4	-51,63981
10026	5,04	1,44	2,398E-14	2,398E-14	45,84	28,08	103,68	-52,094787
10089	5,28	1,68	2,398E-14	2,398E-14	46,08	28,32	108	-52,777251
10146	5,76	2,16	2,398E-14	2,398E-14	46,8	28,8	114,96	-53,004739
10185	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	46,56	28,8	102	-53,232227
10218	6,24	2,4	2,398E-14	2,398E-14	47,04	29,04	147,36	-53,232227
10242	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,04	29,28	127,68	-53,459716
10266	5,52	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,28	29,28	123,6	-53,687204
10275	5,28	1,44	2,398E-14	2,398E-14	47,04	29,28	109,68	-53,914692
10293	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,28	29,52	118,8	-54,14218
10302	6	2,4	2,398E-14	2,398E-14	47,52	29,76	148,8	-54,369668
10308	6,24	2,4	2,398E-14	2,398E-14	47,52	29,76	138	-54,597156
10320	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,76	29,76	134,16	-54,824645
10326	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,28	29,76	120,48	-55,052133
10329	5,04	1,44	2,398E-14	2,398E-14	47,28	29,52	104,88	-54,824645
10335	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	47,52	30	118,08	-55,052133

10341	5,76	1,68	2,398E-14	2,398E-14	47,52	30	128,64	-55,279621
10341	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,76	29,76	122,4	-55,279621
10344	5,52	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,76	30	123,36	-55,279621
10353	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	47,76	30	127,44	-55,507109
10356	5,28	1,68	2,398E-14	2,398E-14	47,52	29,76	133,92	-55,734597
10362	5,28	1,44	2,398E-14	2,398E-14	47,76	29,76	73,92	-55,734597
10362	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48	30	136,56	-55,507109
10362	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,24	148,32	-55,734597
10368	5,28	1,68	2,398E-14	2,398E-14	47,52	30	117,84	-55,962085
10368	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48	30,24	136,8	-55,734597
10377	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48	30,24	123,6	-55,962085
10377	5,52	1,44	2,398E-14	2,398E-14	47,76	30	56,16	-55,962085
10377	5,76	1,68	2,398E-14	2,398E-14	47,76	30,24	90,72	-56,189573
10380	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48	30,24	116,64	-56,189573
10386	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48	30,24	-11153,28	-56,417062
10383	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48	30,24	-11153,28	-56,417062
10392	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	48	30,24	-11153,28	-56,64455
10380	6,24	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,72	-11153,28	-56,64455
10389	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,48	-11153,28	-56,64455
10398	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,48	-11153,28	-56,64455
10395	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,24	-11153,28	-56,64455
10398	6,72	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,48	-11153,28	-56,872038
10395	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,48	-11153,28	-56,64455
10401	6,96	2,64	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,72	-11153,28	-55,962085
10395	6,72	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-55,962085
10395	6,48	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,72	-11153,28	-56,417062
10398	6,24	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,72	-11153,28	-56,64455
10404	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,72	-11153,28	-56,872038
10401	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,48	-11153,28	-56,872038
10395	5,04	1,44	2,398E-14	2,398E-14	48	30,48	-11153,28	-56,872038
10401	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,72	-11153,28	-57,099526
10398	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,099526
10398	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,48	-11153,28	-57,099526
10401	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,48	-11153,28	-57,327014
10401	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,48	-11153,28	-57,554502
10398	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,327014
10407	5,76	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,327014
10395	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,48	-11153,28	-57,327014
10407	5,28	1,44	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,48	-11153,28	-57,327014
10401	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,96	-11153,28	-57,327014
10407	6,24	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,327014
10404	6,48	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,327014
10401	6,48	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,96	-11153,28	-57,327014
10407	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,327014
10407	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,72	-11153,28	-57,327014
10407	6,24	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,099526
10401	5,76	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,72	-11153,28	-57,327014
10401	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	48,24	30,48	-11153,28	-57,327014
10395	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,72	-11153,28	-57,554502

10395	6,72	2,4	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,72	-11153,28	-56,872038
10407	6,48	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,327014
10413	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,72	-11153,28	-57,554502
10413	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,72	-11153,28	-57,781991
10410	6,24	2,4	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,96	-11153,28	-57,781991
10422	5,76	1,68	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,781991
10419	5,04	1,44	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,48	-11153,28	-58,009479
10419	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,72	-11153,28	-57,327014
10422	6,48	2,4	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,96	-11153,28	-57,554502
10428	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,72	-11153,28	-58,009479
10431	6,48	2,16	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,96	-11153,28	-57,327014
10434	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,96	-11153,28	-57,781991
10428	6,48	2,4	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,96	-11153,28	-57,781991
10428	5,52	1,44	2,398E-14	2,398E-14	48,72	30,72	-11153,28	-57,099526
10428	6,48	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,96	-11153,28	-56,872038
10425	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,72	-11153,28	-57,099526
10431	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,72	-11153,28	-57,327014
10428	4,8	1,2	2,398E-14	2,398E-14	48,48	30,48	-11153,28	-57,781991
10428	6	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,72	-11153,28	-57,327014
10437	5,76	1,68	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,72	-11153,28	-57,554502
10431	6	1,68	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,72	-11153,28	-58,009479
10440	6,96	2,64	2,398E-14	2,398E-14	49,44	30,96	-11153,28	-58,009479
10434	6,48	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,44	30,96	-11153,28	-57,781991
10428	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,44	30,72	-11153,28	-58,009479
10434	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,72	-11153,28	-57,781991
10437	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,44	30,72	-11153,28	-58,236967
10437	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,72	-11153,28	-58,009479
10434	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,68	30,96	-11153,28	-58,009479
10434	5,52	1,68	2,398E-14	2,398E-14	49,2	30,48	-11153,28	-57,781991
10434	6	1,92	2,398E-14	2,398E-14	49,44	30,72	-11153,28	-58,009479
10431	5,76	1,92	2,398E-14	2,398E-14	49,44	30,72	-11153,28	-58,009479
10428	6,24	2,16	2,398E-14	2,398E-14	49,68	30,72	-11153,28	-58,009479
10431	6,24	1,92	2,398E-14	2,398E-14	49,44	30,96	-11153,28	-58,236967
10437	5,04	1,44	2,398E-14	2,398E-14	48,96	30,48	-11153,28	-57,781991

C.2 Ensaio da Placa – Carga a 85 cm do bordo

Tabela C.5 Resultados dos Transdutores de Deslocamento no Ensaio da Placa para carga aplicada a 85cm do bordo.

Carga (kgf)	LVDT 1 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 4 (mm)	LVDT 5 (mm)	LVDT 6 (mm)
-1,1916	0	0	0	0	-0,0175
1,1916	0	0	0	0	-0,00375
0	0	0	0	0	0,0075
-2,3832	0	0	0,00625	0	-0,015
0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,00875

0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,00875
-3,5748	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01
-3,5748	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01
0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01
0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01
-2,3832	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01
-2,3832	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01
0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01
0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-1,1916	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-1,1916	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
0	0,003125	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-2,3832	0,003125	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
0	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-2,3832	0,003125	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-1,1916	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-2,3832	0	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-2,3832	0,003125	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-2,3832	0,003125	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
-2,3832	0,003125	-0,00125	0,00875	0	-0,00875
0	0,003125	-0,00125	0,00875	0	-0,0075
0	0	-0,00125	0,00875	0	0,03
1,1916	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0,02625
2,3832	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0,025
1,1916	0	-0,00125	0,00875	0	0,025
2,3832	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0,02625
4,7664	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0,02625
3,5748	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0,02625
4,7664	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0,02625
5,958	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0
7,1496	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0
4,7664	0,003125	-0,00125	0,00875	0	0
7,1496	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	0
8,3412	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	0
11,916	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	0
19,0656	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,00375
26,2152	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
33,3648	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,0025
47,664	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,015
66,7296	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
89,37	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,01125
110,8188	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,0125
123,9264	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,0125
125,118	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,015
179,9316	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,01375
235,9368	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,01375
338,4144	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,015

469,4904	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,01375
626,7816	-0,01875	-0,00125	0,00875	0	-0,01375
800,7552	-0,01875	-0,0025	0,00875	0	-0,01625
981,8784	-0,01875	-0,0025	0,01125	0	-0,01875
1161,81	-0,01875	-0,0025	0,01375	0	-0,02375
1347,7	-0,01875	-0,0025	0,0175	0	-0,02375
1497,841	-0,01875	-0,00125	0,01875	0	-0,02375
1658,707	-0,01875	-0,00125	0,02	0	-0,025
1863,662	-0,01875	-0,00125	0,0225	0	-0,02875
2044,786	-0,01875	-0,00125	0,025	0	-0,02875
2222,334	-0,01875	-0,00125	0,0275	0	-0,03375
2424,906	-0,01875	-0,00125	0,02875	0	-0,0375
2620,328	-0,01875	-0,00125	0,03125	0	-0,04
2844,349	-0,01875	-0,00125	0,0325	0	-0,04375
3102,926	-0,01875	-0,00125	0,03625	0	-0,0525
3360,312	-0,01875	-0,00125	0,03875	0	-0,0525
3612,931	-0,01875	-0,00125	0,0425	0	-0,0525
3856,018	-0,01875	-0,00125	0,045	0	-0,0525
4076,464	-0,01875	-0,00125	0,0475	0	-0,0575
4265,928	-0,01875	-0,00125	0,04875	0	-0,06
4498,29	-0,01875	-0,00125	0,05125	0	-0,0625
4730,652	-0,01875	-0,00125	0,05375	0	-0,065
4949,906	-0,01875	-0,00125	0,055	0	-0,0675
5108,389	-0,01875	-0,00125	0,05625	0	-0,06875
5206,1	-0,01875	-0,00125	0,05625	0	-0,07
5264,489	-0,01875	-0,00125	0,05625	0	-0,07125
5293,087	-0,01875	-0,00125	0,0575	0	-0,0725
5310,961	-0,01875	-0,00125	0,0575	0	-0,0725
5318,111	-0,01875	-0,00125	0,0575	0	-0,0725
5327,644	-0,01875	-0,00125	0,05875	0	-0,07375
5335,985	-0,01875	-0,00125	0,06	0	-0,0775
5339,56	-0,01875	-0,00125	0,06125	0	-0,07875

Tabela C.6 Resultados dos Transdutores de Deslocamento no Ensaio da Placa para carga aplicada a 85cm do bordo.

Carga (kgf)	Strain Gage A ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage B ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage C ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage D ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage E ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage F ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage G ($\mu\text{m/m}$)	Strain Gage H ($\mu\text{m/m}$)
-1,1916	-0,24	-5,5E-14	0,24	0,227488	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,24	-0,22749
1,1916	0,24	-5,5E-14	0,24	-1,4E-14	0,24	-3,6E-15	1,776E-13	-0,45498
0	1,78E-14	-5,5E-14	-0,48	0,227488	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,24	-1,13744
-2,3832	-0,24	-5,5E-14	-0,48	-1,4E-14	-0,24	-0,48	1,776E-13	-0,22749
0	-0,72	-0,48	-1,2	0,227488	-0,72	-0,24	-0,24	-1,13744
0	-0,48	-0,48	0,96	0,227488	-0,48	-0,24	-0,72	-0,22749
-3,5748	-0,24	-0,24	2,16	0,227488	-4,5E-14	0,24	-1,2	0,227488
-3,5748	0,48	0,48	2,88	0,227488	0,48	0,24	-0,72	0,682464
0	-0,96	-0,72	1,2	0,227488	-0,72	-0,24	-1,44	-1,13744

0	-0,24	-0,24	2,16	0,227488	-0,24	-3,6E-15	-0,96	-0,45498
-2,3832	1,78E-14	0,24	2,4	0,227488	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,96	-1,13744
-2,3832	1,78E-14	0,24	2,64	0,227488	0,24	0,24	-0,96	-0,45498
0	-0,48	-0,48	1,68	0,227488	-0,24	-3,6E-15	-1,2	-0,22749
0	-0,72	-0,72	1,44	0,454976	-0,48	-3,6E-15	-0,96	-0,22749
0	-0,72	-0,48	2,16	0,227488	-0,24	-3,6E-15	-0,96	-1,13744
-1,1916	-0,24	-5,5E-14	1,2	0,454976	-0,24	-3,6E-15	-0,96	-0,90995
-1,1916	-0,24	-5,5E-14	0,96	0,454976	-0,24	-3,6E-15	-0,72	-0,90995
0	-0,24	-5,5E-14	0,96	0,227488	-0,48	-0,48	-0,72	-1,13744
-2,3832	-0,48	-0,24	0,96	0,227488	-0,48	-0,24	-0,72	-1,36493
0	-0,24	-5,5E-14	1,2	0,227488	-4,5E-14	-0,24	-0,48	-0,90995
-2,3832	1,78E-14	-5,5E-14	1,2	0,227488	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,48	-1,36493
-1,1916	-0,96	-0,48	1,2	0,454976	-0,72	-0,24	-0,48	-0,45498
-2,3832	-0,24	-0,24	1,44	0,454976	-0,24	-3,6E-15	-0,72	0,227488
-2,3832	-0,24	-0,24	1,92	0,454976	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,48	-0,68246
-2,3832	1,78E-14	-5,5E-14	1,68	0,227488	-0,24	-0,24	-0,48	-0,45498
-2,3832	-0,24	-5,5E-14	2,16	0,227488	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,48	-2E-14
0	-0,48	-0,48	1,92	0,454976	-0,24	-3,6E-15	-0,72	-0,45498
0	-0,24	-5,5E-14	1,2	-1,4E-14	-0,24	-3,6E-15	-0,48	-0,90995
1,1916	-0,72	-0,48	1,2	-0,22749	-0,48	-0,24	-0,72	-1,13744
2,3832	-0,48	-0,24	0,72	-1,4E-14	-0,48	-0,24	-0,96	-0,90995
1,1916	-0,24	-0,24	0,96	0,227488	-0,48	-0,24	-0,72	-0,68246
2,3832	-0,24	-0,24	1,44	-1,4E-14	-4,5E-14	-0,24	-0,48	-0,22749
4,7664	-0,96	-0,72	0,48	-0,22749	-0,72	-0,24	-0,72	-0,22749
3,5748	-0,48	-0,48	1,2	-0,22749	-0,24	-0,24	-0,72	-0,90995
4,7664	-0,48	-0,48	1,44	-0,22749	-4,5E-14	-0,24	-0,48	-0,68246
5,958	1,78E-14	-5,5E-14	2,4	-0,45498	0,24	0,24	-0,48	-0,68246
7,1496	1,78E-14	-5,5E-14	1,92	-0,45498	0,24	-3,6E-15	-0,48	-0,90995
4,7664	-0,48	-0,24	1,44	-0,68246	-0,24	-3,6E-15	-0,48	-1,13744
7,1496	1,78E-14	-5,5E-14	1,44	-0,68246	-4,5E-14	-0,24	-0,48	-1,59242
8,3412	-0,24	-0,24	0,48	-0,68246	-0,24	-0,24	-0,72	-1,13744
11,916	-0,48	-0,24	0,96	-0,90995	-0,24	-3,6E-15	-0,72	-0,90995
19,0656	-0,24	-5,5E-14	0,48	-2,04739	-0,24	0,24	-1,68	-2E-14
26,2152	-0,48	-0,48	0,96	-2,72986	-0,48	-0,24	-0,96	-0,68246
33,3648	-0,48	-0,48	1,2	-3,8673	-0,24	-0,24	-0,72	-1,36493
47,664	0,24	0,24	0,72	-5,23223	-0,24	-0,24	-0,48	-1,81991
66,7296	-0,48	-0,48	0,48	-7,96209	-0,48	-0,24	-0,48	-1,36493
89,37	-0,24	-0,48	1,2	-8,41706	-0,24	-0,48	-0,48	-0,68246
110,8188	-0,48	-0,48	0,72	-8,18957	-0,72	-0,24	-0,48	-1,36493
123,9264	1,78E-14	-5,5E-14	0,96	-8,18957	-0,48	-3,6E-15	-0,48	-0,90995
125,118	1,78E-14	-0,24	0,72	-7,27962	-0,48	-0,24	-0,48	-0,45498
179,9316	0,48	-5,5E-14	1,44	-4,32227	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,24	-0,90995
235,9368	0,96	0,48	0,96	1,819905	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,24	-0,68246
338,4144	1,2	-5,5E-14	0,72	-10,0095	-0,24	-3,6E-15	-0,48	-0,68246
469,4904	1,68	0,48	0,24	-36,8531	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,48	-0,22749
626,7816	2,64	0,72	-8,2E-14	-132,171	0,24	-3,6E-15	-0,48	-0,68246
800,7552	3,36	0,96	-0,48	-618,313	-0,24	-3,6E-15	-0,48	-1,81991
981,8784	4,32	1,2	-1,2	-440,417	0,24	-3,6E-15	-0,48	-1,81991

1161,81	5,76	1,68	-1,68	-318,938	0,48	0,24	-0,24	-1,36493
1347,7	6,24	1,68	-2,64	-367,621	-4,5E-14	-3,6E-15	-0,48	-2,04739
1497,841	6,72	1,68	-4,08	-403,109	-4,5E-14	-0,24	-0,72	-1,59242
1658,707	8,16	2,64	-3,84	-446,559	0,48	-3,6E-15	-0,24	-2,27488
1863,662	8,88	2,4	-4,8	-524,588	-4,5E-14	0,24	-0,48	-1,81991
2044,786	10,32	3,12	-4,08	-560,531	0,72	0,48	-0,24	-2,27488
2222,334	11,28	3,6	-4,56	-581,232	0,96	0,48	-0,24	-3,18483
2424,906	12,24	3,6	-6	-592,152	0,72	0,48	-0,48	-1,59242
2620,328	12,96	3,6	-6,48	-578,73	0,72	0,48	-0,48	-2,27488
2844,349	14,88	4,56	-6,48	-577,592	1,2	0,48	-0,24	-2,27488
3102,926	16,8	5,52	-7,2	-571,678	1,44	0,48	-0,24	-3,63981
3360,312	17,76	5,76	-7,92	-551,886	1,2	0,72	-0,48	-3,8673
3612,931	19,68	6,24	-7,92	-577,137	1,68	0,72	-0,48	-3,8673
3856,018	20,4	6,24	-9,36	-579,185	1,68	0,72	-0,72	-4,09479
4076,464	21,6	6,48	-10,32	-552,114	1,44	0,72	-0,72	-4,09479
4265,928	22,32	6,72	-11,04	-535,735	1,44	0,72	-0,96	-4,32227
4498,29	24,72	8,16	-10,32	-517,081	2,16	1,2	-0,48	-4,77725
4730,652	25,68	7,92	-11,76	-485,46	1,92	0,96	-0,72	-3,8673
4949,906	26,64	8,16	-12,24	-469,081	2,16	1,2	-0,96	-4,77725
5108,389	27,6	8,4	-12,48	-445,649	1,92	1,2	-1,2	-5,45972
5206,1	28,56	8,64	-12	-426,768	2,4	1,44	-0,96	-5,91469
5264,489	28,32	8,64	-12,96	-417,668	1,92	1,44	-1,2	-5,00474
5293,087	29,28	9,12	-12,96	-401,744	2,4	1,44	-0,96	-4,54976
5310,961	29,04	9,12	-13,2	-379,223	1,92	1,44	-1,2	-5,45972
5318,111	29,52	9,12	-13,44	-372,853	2,4	1,2	-0,96	-5,6872
5327,644	29,04	8,88	-14,4	-367,621	1,92	1,2	-1,2	-4,77725
5335,985	29,04	8,64	-14,16	-363,071	1,68	1,2	-1,44	-5,6872
5339,56	28,32	8,16	-14,4	-357,839	1,44	1,2	-1,68	-5,00474
5343,134	29,28	8,88	-13,68	-367,166	1,92	1,44	-0,96	-5,91469
5349,092	29,76	9,36	-13,2	-353,289	2,64	1,68	-0,96	-5,45972
5349,092	29,52	9,36	-13,92	-343,735	2,16	1,44	-0,96	-5,6872
5352,667	30	9,36	-14,16	-338,047	2,4	1,44	-1,2	-5,45972
5357,434	29,28	9,12	-14,88	-328,493	1,92	1,2	-1,44	-5,91469
5358,625	29,76	9,12	-15,36	-310,976	2,16	1,2	-1,2	-6,59716
5362,2	29,76	9,12	-14,64	-298,464	2,4	1,44	-1,2	-5,91469
5362,2	29,76	9,12	-14,88	-288	1,92	1,2	-1,2	-6,36967
5363,392	29,76	8,88	-14,64	-284,588	1,92	1,2	-1,2	-5,45972
5364,583	30,24	9,6	-14,16	-274,351	2,64	1,68	-0,96	-6,14218
5366,966	30,24	9,6	-14,4	-266,161	2,64	1,44	-0,96	-6,14218
5366,966	30,24	9,36	-14,4	-255,697	2,64	1,68	-0,96	-5,45972
5371,733	29,28	8,88	-15,6	-245,915	1,68	1,2	-0,96	-6,14218
5370,541	29,28	8,64	-15,6	-237,725	1,44	1,2	-1,2	-6,14218
5369,35	29,76	9,12	-14,88	-233,175	2,16	1,2	-0,96	-6,36967
5370,541	29,76	8,88	-15,12	-232,948	1,92	1,2	-0,96	-5,91469
5371,733	29,76	9,12	-14,88	-225,213	1,92	1,44	-0,96	-5,45972
5372,924	30	9,12	-15,12	-217,479	2,16	1,44	-0,96	-5,91469
5374,116	30	9,6	-14,88	-211,791	2,16	1,2	-0,96	-6,82464
5374,116	30,48	9,6	-14,88	-205,877	2,4	1,44	-0,96	-7,05213

5371,733	29,76	8,88	-15,6	-191,773	1,92	1,44	-1,2	-6,82464
5372,924	30,72	9,84	-13,92	-6941,12	2,88	1,44	-0,48	-7,05213
5374,116	30,72	9,6	-14,88	-6941,12	2,64	1,44	-0,72	-7,05213
5372,924	30,24	9,36	-14,88	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-5,23223
5372,924	30	8,88	-14,88	-6941,12	1,92	1,2	-0,72	-6,36967
5372,924	30,24	9,12	-14,64	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-5,6872
5371,733	30,24	9,12	-14,88	-6941,12	2,4	1,2	-0,72	-5,91469
5374,116	30,72	9,36	-14,4	-6941,12	2,64	1,68	-0,72	-5,91469
5370,541	30	8,64	-14,64	-6941,12	1,68	1,44	-1,2	-6,82464
5372,924	30,24	9,12	-14,16	-6941,12	2,4	1,44	-1,2	-6,14218
5372,924	29,76	8,64	-14,64	-6941,12	1,68	1,2	-1,2	-6,59716
5371,733	30,48	9,36	-13,92	-6941,12	2,4	1,68	-0,96	-7,05213
5372,924	30	9,12	-14,64	-6941,12	2,16	1,68	-1,2	-5,45972
5372,924	30	9,12	-14,64	-6941,12	1,92	1,44	-0,96	-5,91469
5372,924	30,96	9,84	-13,92	-6941,12	2,88	1,44	-0,72	-5,23223
5371,733	30,24	9,36	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-0,96	-6,36967
5371,733	30,24	9,12	-15,36	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-5,91469
5372,924	30,72	9,6	-14,88	-6941,12	2,4	1,44	-1,44	-6,14218
5370,541	30,48	9,6	-15,12	-6941,12	2,4	1,44	-1,2	-6,14218
5371,733	30,96	9,6	-14,64	-6941,12	2,64	1,68	-1,2	-6,59716
5368,158	30,72	9,6	-14,88	-6941,12	2,64	1,44	-1,2	-6,59716
5368,158	30	8,88	-15,6	-6941,12	1,92	1,44	-1,44	-6,82464
5370,541	29,76	8,64	-15,6	-6941,12	1,92	1,44	-1,44	-6,36967
5371,733	31,2	9,84	-14,64	-6941,12	2,88	1,68	-0,96	-6,59716
5369,35	30,24	9,12	-15,36	-6941,12	2,16	1,44	-1,2	-7,05213
5366,966	30	8,88	-16,08	-6941,12	1,68	1,2	-1,44	-6,82464
5365,775	30,24	9,12	-15,6	-6941,12	1,92	1,2	-1,2	-6,59716
5365,775	30,48	9,36	-15,36	-6941,12	2,4	1,44	-1,2	-6,82464
5365,775	30,48	9,12	-15,6	-6941,12	2,16	1,44	-1,2	-6,82464
5365,775	30,24	9,6	-15,36	-6941,12	2,16	1,44	-1,2	-6,36967
5364,583	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-7,05213
5363,392	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-6,82464
5365,775	30,24	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,44	-1,2	-7,05213
5363,392	30,24	9,12	-15,36	-6941,12	1,92	1,2	-0,96	-7,05213
5362,2	30,72	9,6	-14,64	-6941,12	2,4	1,68	-0,96	-7,05213
5363,392	31,2	9,84	-13,44	-6941,12	2,88	1,92	-0,48	-7,05213
5359,817	30,72	9,6	-14,4	-6941,12	2,64	1,44	-0,72	-7,05213
5359,817	30,24	9,12	-15,12	-6941,12	2,16	1,44	-0,96	-7,27962
5359,817	30	9,12	-15,36	-6941,12	1,92	1,44	-0,96	-7,7346
5361,008	30,48	9,36	-15,12	-6941,12	2,16	1,44	-0,48	-7,50711
5358,625	31,2	9,84	-14,64	-6941,12	2,88	1,44	-0,24	-7,27962
5357,434	30,48	9,36	-15,36	-6941,12	2,4	1,44	-0,48	-7,05213
5357,434	30,48	9,36	-15,12	-6941,12	2,16	1,44	-0,48	-6,59716
5356,242	30,24	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,44	-1,2	-6,36967
5355,05	30,48	9,36	-14,16	-6941,12	2,4	1,68	-0,96	-6,59716
5353,859	30,48	9,36	-14,16	-6941,12	2,4	1,68	-0,72	-7,27962
5352,667	30,72	9,36	-14,4	-6941,12	2,64	1,68	-0,72	-6,82464
5355,05	30,48	9,12	-15,84	-6941,12	2,16	1,2	-0,96	-6,36967

5352,667	30,24	9,12	-15,6	-6941,12	1,92	1,2	-1,2	-7,27962
5352,667	30,24	9,12	-14,64	-6941,12	2,16	1,2	-0,96	-7,05213
5353,859	30,96	9,84	-13,2	-6941,12	2,88	1,68	-0,72	-6,36967
5351,476	30,72	9,36	-14,16	-6941,12	2,64	1,68	-0,96	-6,59716
5351,476	30,48	9,36	-14,16	-6941,12	2,4	1,44	-0,72	-7,05213
5351,476	30,24	9,12	-14,64	-6941,12	2,16	1,44	-0,72	-7,50711
5349,092	30,48	8,88	-14,64	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-7,50711
5347,901	30,72	9,36	-14,88	-6941,12	2,16	1,44	-0,72	-7,27962
5347,901	30,24	8,88	-14,88	-6941,12	2,4	1,2	-0,72	-6,82464
5346,709	30,96	9,6	-15,12	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-6,82464
5345,518	30,24	9,12	-15,6	-6941,12	1,92	0,96	-0,96	-7,27962
5345,518	30,72	9,36	-15,12	-6941,12	2,4	1,2	-0,72	-7,50711
5345,518	30	8,88	-15,84	-6941,12	1,92	0,96	-0,96	-7,50711
5344,326	30,48	9,12	-15,84	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-7,27962
5341,943	30,72	9,36	-15,12	-6941,12	2,4	1,44	-0,72	-6,36967
5343,134	30,48	8,88	-15,36	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-6,59716
5340,751	30,48	9,12	-15,12	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-6,82464
5340,751	30,48	8,88	-15,6	-6941,12	2,16	1,2	-0,96	-7,05213
5339,56	30,48	9,12	-15,36	-6941,12	2,16	1,2	-0,96	-7,05213
5339,56	30,72	9,36	-14,88	-6941,12	2,64	1,44	-0,72	-7,27962
5339,56	30,72	9,12	-15,12	-6941,12	2,64	1,44	-1,2	-7,05213
5337,176	30,48	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-6,82464
5337,176	29,76	8,64	-15,6	-6941,12	1,44	1,2	-1,44	-6,14218
5335,985	30,48	9,12	-14,4	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-6,59716
5335,985	30,24	8,88	-14,88	-6941,12	1,92	1,2	-1,2	-6,82464
5333,602	30,48	9,12	-14,64	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-6,59716
5334,793	30,72	9,36	-14,4	-6941,12	2,64	1,44	-0,96	-7,05213
5333,602	31,2	9,6	-14,16	-6941,12	2,88	1,44	-0,96	-7,05213
5330,027	30,72	9,36	-14,64	-6941,12	2,16	1,44	-0,96	-7,05213
5330,027	30,48	9,12	-14,64	-6941,12	2,4	1,44	-1,2	-7,27962
5332,41	30,96	9,36	-14,4	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-6,82464
5333,602	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-7,27962
5328,835	30,48	9,36	-14,16	-6941,12	2,4	1,44	-1,2	-6,59716
5327,644	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-7,05213
5331,218	30,72	9,36	-13,92	-6941,12	2,64	1,44	-1,2	-6,59716
5328,835	31,2	9,84	-13,92	-6941,12	2,64	1,44	-1,2	-5,45972
5328,835	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	1,92	1,2	-1,2	-6,36967
5331,218	25,44	6,24	-16,08	-6941,12	-0,96	-0,72	-0,96	-6,82464
5326,452	30,48	9,12	-14,88	-6941,12	1,92	1,2	-1,2	-6,82464
5325,26	30,72	9,36	-15,12	-6941,12	2,4	1,2	-0,96	-7,27962
5324,069	30	8,88	-16,56	-6941,12	1,68	0,96	-1,2	-6,59716
5321,686	30,48	9,12	-15,84	-6941,12	1,92	0,96	-1,2	-5,6872
5322,877	30,48	8,88	-15,36	-6941,12	1,92	0,96	-0,96	-6,36967
5322,877	29,76	8,64	-15,84	-6941,12	1,44	0,96	-1,44	-6,59716
5322,877	30,72	9,36	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-1,2	-7,05213
5322,877	30,72	9,36	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-0,96	-6,59716
5316,919	31,44	9,84	-14,64	-6941,12	2,88	1,2	-0,72	-6,36967
5321,686	30,72	9,12	-15,36	-6941,12	2,4	1,2	-0,96	-7,05213

5320,494	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-6,36967
5319,302	30,96	9,6	-14,16	-6941,12	2,64	1,44	-0,72	-6,14218
5177,502	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	2,4	1,2	-0,96	-7,05213
5183,46	29,76	9,12	-16,32	-6941,12	1,92	0,96	-1,2	-6,82464
5185,843	30	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-0,96	-7,05213
5183,46	30,24	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-6,59716
5184,652	30,48	9,36	-14,4	-6941,12	2,4	1,44	-0,96	-6,59716
5183,46	30,48	9,36	-14,88	-6941,12	2,4	1,2	-0,96	-7,05213
5185,843	30,24	9,12	-15,12	-6941,12	2,4	1,2	-1,2	-7,05213
5183,46	30,24	9,12	-14,4	-6941,12	2,4	1,2	-1,2	-7,50711
5183,46	29,76	8,88	-14,88	-6941,12	2,4	1,2	-1,44	-7,50711
5182,268	30	9,12	-15,36	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-7,05213
5183,46	30,24	9,12	-15,12	-6941,12	2,16	1,2	-1,2	-6,82464
5185,843	30	9,12	-15,84	-6941,12	1,92	0,96	-1,2	-7,05213
5181,077	30	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	0,96	-0,96	-6,36967
5181,077	29,52	8,88	-15,36	-6941,12	1,44	1,2	-1,44	-6,14218
5178,694	29,52	8,4	-14,4	-6941,12	1,68	1,2	-1,2	-6,36967
5177,502	30,48	9,36	-14,16	-6941,12	2,64	1,44	-0,96	-6,59716
5176,31	30	8,88	-14,4	-6941,12	1,92	1,2	-0,96	-6,36967
5178,694	30,24	9,12	-14,64	-6941,12	2,16	1,2	-0,96	-6,36967
5175,119	30	8,88	-13,92	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-5,91469
5175,119	30,24	9,36	-14,4	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-6,59716
5176,31	29,52	8,64	-15,12	-6941,12	1,92	0,96	-0,72	-5,45972
5173,927	30,24	9,12	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-0,72	-7,27962
5176,31	30,24	9,12	-14,4	-6941,12	2,4	1,2	-0,72	-6,36967
5171,544	30	9,12	-14,16	-6941,12	2,16	1,2	-0,48	-5,6872
5172,736	30,24	9,12	-14,16	-6941,12	2,4	0,96	-0,72	-7,05213
5171,544	30	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-6,14218
5171,544	30	8,88	-14,4	-6941,12	1,92	0,96	-0,72	-6,36967
5171,544	30,24	8,88	-14,16	-6941,12	2,4	1,2	-0,48	-6,36967
5170,352	30,24	9,36	-14,64	-6941,12	2,16	1,2	-0,48	-7,05213
5169,161	30,24	9,36	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-0,72	-5,23223
5169,161	30,48	9,36	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-0,72	-6,59716
5167,969	30,72	9,6	-14,16	-6941,12	2,64	1,44	-0,48	-6,14218
5171,544	30	8,88	-14,64	-6941,12	1,92	1,2	-0,48	-6,59716
5172,736	30,48	9,36	-14,16	-6941,12	2,64	1,2	-0,24	-6,36967
5170,352	30	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-0,48	-6,59716
5170,352	30	8,88	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-0,48	-6,36967
5169,161	30,24	9,12	-14,16	-6941,12	2,4	1,44	-0,48	-7,27962
5167,969	30,72	9,6	-13,68	-6941,12	2,64	1,44	-0,48	-6,82464
5169,161	29,76	8,88	-14,4	-6941,12	1,92	1,2	-0,72	-7,7346
5169,161	30	8,88	-14,88	-6941,12	1,92	1,2	-0,72	-8,18957
5167,969	29,76	8,88	-15,36	-6941,12	1,92	0,96	-0,96	-7,96209
5166,778	29,76	8,88	-15,6	-6941,12	1,92	0,96	-0,72	-6,82464
5166,778	30,48	9,36	-15,12	-6941,12	2,64	1,2	-0,72	-6,59716
5164,394	30,48	9,12	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-0,48	-6,59716
5164,394	29,52	8,88	-14,88	-6941,12	1,44	0,96	-0,72	-6,82464
5164,394	30,24	9,12	-14,16	-6941,12	2,16	1,44	-0,48	-7,7346

5166,778	30	9,12	-14,64	-6941,12	1,92	1,2	-0,48	-7,50711
5162,011	30	8,88	-15,12	-6941,12	1,92	0,96	-0,72	-7,50711
5160,82	30,24	9,36	-15,12	-6941,12	2,16	1,2	-0,48	-7,05213
5163,203	30	9,36	-15,36	-6941,12	2,16	0,96	-0,48	-7,96209
5163,203	30	8,88	-15,36	-6941,12	1,92	0,96	-0,48	-7,05213
5162,011	30,72	9,36	-14,4	-6941,12	2,4	1,44	-0,24	-8,41706
5159,628	30,24	9,36	-14,4	-6941,12	2,16	1,2	-0,48	-6,82464
5160,82	30,48	9,36	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-0,24	-6,36967
5162,011	30,24	9,12	-13,68	-6941,12	2,4	1,44	-0,48	-7,27962
5159,628	30,24	9,12	-14,16	-6941,12	2,16	1,44	-0,48	-6,82464
5160,82	30	8,88	-14,64	-6941,12	1,92	1,2	-0,72	-7,50711
5159,628	29,76	8,88	-14,88	-6941,12	1,68	1,2	-0,72	-7,27962
5160,82	30,24	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-6,59716
5158,436	30,24	9,12	-14,88	-6941,12	2,16	1,2	-0,72	-5,91469
5158,436	29,52	8,4	-16,32	-6941,12	1,44	0,96	-0,96	-6,82464
5156,053	29,76	8,88	-15,84	-6941,12	1,68	0,96	-0,72	-7,7346
5158,436	29,52	8,4	-15,36	-6941,12	1,68	0,96	-0,96	-7,27962
5156,053	30	8,88	-14,64	-6941,12	2,16	1,2	-0,48	-7,27962
5157,245	29,76	8,64	-15,6	-6941,12	1,44	0,96	-0,72	-7,05213
5157,245	30,48	9,36	-14,64	-6941,12	2,4	1,2	-0,48	-6,59716
5156,053	29,76	8,64	-15,36	-6941,12	1,92	0,96	-0,72	-6,14218
5153,67	29,76	8,88	-14,88	-6941,12	1,92	1,2	-0,72	-7,05213
3686,81	23,52	6,96	-11,76	-6941,12	1,92	0,96	-0,48	-7,05213
3360,312	21,6	6,24	-11,52	-6941,12	1,2	0,48	-0,48	-6,59716
3045,73	20,4	6	-11,04	-6941,12	1,68	0,48	-0,48	-6,59716
2731,147	18,96	5,52	-10,32	-6941,12	1,44	0,48	-0,48	-5,45972
2495,21	17,52	4,8	-9,36	-6941,12	1,2	0,48	-0,48	-5,00474
2278,339	16,08	4,32	-9,12	-6941,12	0,72	0,48	-0,48	-5,6872
2107,94	15,6	4,32	-8,64	-6941,12	1,2	0,48	-0,24	-5,00474
1933,967	14,4	3,84	-7,68	-6941,12	1,2	0,48	-0,48	-4,54976
1758,802	13,44	3,84	-7,92	-6941,12	0,72	0,24	-0,24	-4,77725
1578,87	12,48	3,36	-7,2	-6941,12	0,72	0,24	-0,24	-5,00474
1376,298	12,24	3,84	-4,8	-6941,12	1,68	0,48	0,48	-5,00474
1186,834	10,32	2,4	-5,28	-6941,12	0,72	0,24	1,776E-13	-4,77725