

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Proposta para simplificação de ensaios destrutivos e não-  
destrutivos para o monitoramento do ganho de resistência de  
pavimentos de concreto para *fast-track***

**Ângela Azevedo de Azevedo**

Porto Alegre  
2008

ÂNGELA AZEVEDO DE AZEVEDO

**PROPOSTA PARA SIMPLIFICAÇÃO DE ENSAIOS  
DESTRUTIVOS E NÃO-DESTRUTIVOS PARA O  
MONITORAMENTO DO GANHO DE RESISTÊNCIA DE  
PAVIMENTOS DE CONCRETO PARA *FAST-TRACK***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.  
Orientação: Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti

Porto Alegre  
2008

A994p

Azevedo, Ângela Azevedo de

Proposta para simplificação de ensaios destrutivos e não-destrutivos para o monitoramento do ganho de resistência de pavimentos de concreto para fast-track / Ângela Azevedo de Azevedo. – 2008.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2008.

Orientação: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti

1. Pavimentos de concreto – Ensaios. 2. Ultra-som. 3. Pavimentação. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Ceratti, Jorge Augusto Pereira, orient. III. Título.

CDU-625.8(043)

**PROPOSTA PARA SIMPLIFICAÇÃO DE ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO-DESTRUTIVOS PARA O MONITORAMENTO DO GANHO DE RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PARA *FAST-TRACK***

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Geotencia, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2 de outubro de 2008.

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dr. pela Universidade de São Paulo  
orientador

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro  
orientador

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC / UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Deividi da Silva Pereira (UFSC)**  
Dr. pela Universidade de São Paulo

**Prof. Hélio Adão Greven**  
Dr. pela *Universität Hannover*

**Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto (UFSC)**  
Dr. pela *Cornell University*

**Prof. Ângela Borges Masuero (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aos meus pais Tasso (in memorium) e Maria pelo carinho,  
compreensão, amizade, estímulo e exemplo de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Católica de Pelotas, por ter me concedido o afastamento integral das minhas atividades de docente, pelo período de quatro anos.

À Professora Denise Carpena Coitinho Dal Molin, pela valiosa orientação, pelo estímulo, pelo apoio nas horas difíceis, por sua amizade e pela convivência agradável durante estes anos de desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Jorge Augusto Pereira Ceratti, pela orientação, boa vontade e pelos ensinamentos na área de pavimentação.

Ao Prof. Roberto Pinto, pelos valiosos ensinamentos que me passou por e-mail, telefone, conversas no Ibracon e nas visitas que realizei a Universidade Federal de Santa Catarina.

À colega Vanessa R., pelas dicas na realização do ensaio de maturidade e troca de informações que muito colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao Professor José Luiz Duarte Ribeiro pela competente orientação na análise dos resultados deste trabalho.

À colega e amiga do NORIE Geilma, pelo auxílio na análise dos resultados, utilizando ferramentas estatísticas.

Aos amigos do NORIE e LEME, Fontes, Flávio, Airton, Eder e Rafael, pela dedicação e eficiência no auxílio do desenvolvimento dos trabalhos de laboratório.

Ao Professor Luiz Carlos, pelo empréstimo do ultra-som do LEME, contribuindo para que eu pudesse realizar a parte experimental do meu trabalho no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pelotas.

Ao Grupo de Materiais do NORIE, em especial a Angela M., Lucília, Patrícia L., Simone V. e Edna, pelos auxílios e relevantes contribuições prestadas durante a realização desta tese.

A uma amiga muito especial do NORIE, Cris, pela amizade, pelo companheirismo, pelo estímulo e pelo auxílio sempre que precisei pela dificuldade de realizar o doutorado no PPGEC e morar em Pelotas.

À secretária do NORIE, Simone, pela amizade, boa vontade e competência, que muito me ajudou em função da dificuldade de me encontrar distante do NORIE.

Às secretárias do PPGEC, em especial a Liliani, pela amizade, competência e colaboração, atendendo minhas solicitações à distância sempre com brevidade e boa vontade.

Ao laboratorista do LEC/UCPel, Martin e aos alunos do Curso de Engenharia Civil da UCPel, Mônica, Catiane, Fernando, Fernanda e Daiana, pela amizade, pelo apoio e pela ajuda na realização dos ensaios deste trabalho. Todos trabalharam como bolsistas voluntários, sendo sempre muito responsáveis, críticos e cumpridores das suas tarefas, realizando ensaios em fins de semana, feriados, nos horários mais variados, inclusive de madrugada, sempre me acompanhando com muita boa vontade e dedicação.

Aos colegas e amigos de Pelotas, Maria Tereza, Viviane e Prof. Castelar, pela troca de idéias e contribuições valiosas para este trabalho.

À Associação Brasileira de Cimento Portland, em especial aos engenheiros Márcio Pitta (in memorium) e Roberto Giublin, pelo recurso financeiro, o qual foi indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

Às empresas que doaram os materiais necessários para o experimento, Areal Baronesa Extração e Comércio de Areia, Silveira, BASF Construction Chemicals, e Cimentos Itambé.

Aos meus irmãos Eduardo pela colaboração na área de informática, Renato pelo auxílio na execução de alguns ensaios e Gilberto por sua grande amizade e estímulo em todas as horas.

À minha cunhada Maria Ivonete por sua amizade, companheirismo estímulo e ajuda nas minhas tarefas diárias, possibilitando que eu me dedicasse integralmente à tese na etapa final.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>  | 17 |
| 1.1      | Justificativa do Tema  | 20 |
| 1.2      | Objetivos  | 23 |
| 1.2.1    | Objetivo principal   | 23 |
| 1.2.2    | Objetivos específicos  | 23 |
| 1.3      | Estrutura da Pesquisa  | 24 |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>   | 25 |
| 2.1      | Pavimento <i>Fast-Track</i>  | 25 |
| 2.2      | Método da Maturidade   | 30 |
| 2.3      | Ultra-Som  | 37 |
| 2.3.1    | Evolução técnica   | 38 |
| 2.3.2    | Princípio de funcionamento   | 38 |
| 2.3.3    | Normas e especificações  | 40 |
| 2.3.4    | Fatores que afetam a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas | 41 |
| 2.4      | Considerações Finais   | 44 |
| <b>3</b> | <b>ESTUDOS PRELIMINARES</b>  | 46 |
| 3.1      | Planejamento do Experimento  | 49 |
| 3.1.1    | Definição das variáveis de resposta ou dependentes                   | 49 |
| 3.1.2    | Escolha dos fatores controláveis ou variáveis independentes          | 49 |
| 3.2      | Ensaio Realizados  | 49 |
| 3.2.1    | Resistência à tração na flexão                                       | 50 |
| 3.2.2    | Ultra-som  | 50 |
| 3.3      | Materiais Utilizados   | 51 |
| 3.3.1    | Cimento  | 51 |
| 3.3.2    | Agregado miúdo   | 52 |
| 3.3.3    | Agregado graúdo  | 53 |
| 3.3.4    | Água   | 54 |
| 3.3.5    | Aditivo Superplastificante   | 54 |
| 3.4      | Dosagem  | 54 |
| 3.5      | Moldagem   | 55 |
| 3.6      | Adensamento  | 56 |
| 3.7      | Cura   | 56 |
| 3.8      | Resultados Obtidos   | 57 |
| 3.8.1    | Resistência à tração na flexão                                       | 57 |
| 3.8.2    | Ultra-som  | 62 |
| <b>4</b> | <b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>   | 69 |
| 4.1      | Planejamento do Experimento  | 69 |
| 4.1.1    | Definição das variáveis de resposta ou independentes                 | 71 |
| 4.1.2    | Escolha dos fatores controláveis ou variáveis dependentes            | 71 |
| 4.2      | Ensaio Realizados  | 71 |
| 4.2.1    | Resistência à compressão simples                                     | 72 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.2.2    | Resistência à tração na flexão.....   | 72         |
| 4.2.3    | Maturidade.....   | 73         |
| 4.2.4    | Ultra-som.....  | 81         |
| 4.3      | Caracterização dos Materiais Utilizados.....  | 84         |
| 4.3.1    | Cimento Portland de alta resistência inicial.....   | 84         |
| 4.3.2    | Agregado miúdo.....   | 85         |
| 4.3.3    | Agregado graúdo.....  | 85         |
| 4.3.4    | Água.....   | 85         |
| 4.3.5    | Aditivo superplastificante.....   | 85         |
| 4.4      | Dosagem.....  | 86         |
| 4.4.1    | Procedimentos adotados para a realização da dosagem.....  | 86         |
| 4.4.2    | Resultados obtidos da dosagem.....  | 89         |
| 4.5      | Moldagem.....   | 92         |
| 4.6      | Adensamento.....  | 96         |
| 4.7      | Cura.....   | 97         |
| <b>5</b> | <b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....</b>   | <b>99</b>  |
| 5.1      | Ensaio Realizados.....  | 99         |
| 5.1.1    | Concretos de referência.....  | 99         |
| 5.1.2    | Maturidade.....   | 103        |
| 5.1.3    | Ultra-som.....  | 163        |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>  | <b>185</b> |
| 6.1      | Conclusões.....   | 185        |
| 6.1.1    | Comparação de tamanhos de corpos-de-prova prismáticos utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão..... | 185        |
| 6.1.2    | Concretos de referência.....  | 186        |
| 6.1.3    | Maturidade.....   | 187        |
| 6.1.4    | Ultra-som.....  | 188        |
| 6.1.5    | Conclusões finais.....  | 189        |
| 6.2      | Sugestões para futuros trabalhos.....   | 190        |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>191</b> |
|          | <b>ANEXO A.....</b>   | <b>197</b> |
|          | <b>ANEXO B.....</b>   | <b>228</b> |
|          | <b>ANEXO C.....</b>   | <b>244</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão (PINTO, 2000).....   | 30 |
| Figura 2: esquema de funcionamento do ultra-som (CARINO, 1997).....   | 39 |
| Figura 3: tipos de transmissão utilizados no ensaio de ultra-som a) transmissão direta; b) transmissão semi-direta; c) transmissão indireta (RODRIGUES, 2003) ..... | 40 |
| Figura 4: fôrmas prismáticas utilizadas nos ensaios.....  | 48 |
| Figura 5: esquema de apoio e aplicação de carga utilizado no corpo-de-prova 100x100x350mm.....  | 50 |
| Figura 6: curva granulométrica da areia.....  | 52 |
| Figura 7: curva granulométrica da brita .....   | 53 |
| Figura 8: moldagem dos corpos-de-prova prismáticos (a) mistura do concreto; (b) moldagem dos CPs; (c) CPs 100 x 100 x 350mm e (d) CPs 150 x 150 x 500mm.....        | 55 |
| Figura 9: processo de adensamento utilizado no concreto (a) CPs 150 x 150 x 500mm; (b) CPs 100 x 100 x 350mm .....  | 56 |
| Figura 10: corpos-de-prova em processo inicial de cura (a) CPs cilíndricos; (b) CPs prismáticos.....  | 57 |
| Figura 11: resistência à tração na flexão versus a/c para diferentes tamanhos de CP.....  | 59 |
| Figura 12: influência da relação água/cimento na resistência à tração na flexão.....  | 61 |
| Figura 13: dispositivo empregado para execução do ensaio de resistência à tração na flexão .....  | 62 |
| Figura 14: execução do ensaio de ultra-som pelo método indireto .....   | 63 |
| Figura 15: velocidade de pulso ultra-sônico versus a/c para diferentes tamanhos de CP .....   | 65 |
| Figura 16: resistência à tração na flexão versus velocidade ultra-sônica de CPs 150x150x500mm utilizando o método direto.....                                       | 66 |
| Figura 17: resistência à tração na flexão versus velocidade ultra-sônica de CPs 100x100x350mm utilizando o método direto.....                                       | 66 |
| Figura 18: resistência à tração na flexão versus velocidade ultra-sônica de CPs 150x150x500mm utilizando o método indireto .....                                    | 67 |
| Figura 19: resistência à tração na flexão versus velocidade ultra-sônica de CPs 100x100x350mm utilizando o método indireto .....                                    | 68 |
| Figura 20: fluxograma com os tipos de corpos-de-prova utilizados e ensaios realizados neste trabalho.....   | 70 |
| Figura 21: dispositivo para o ensaio de resistência à tração na flexão acoplado na prensa ....  | 72 |
| Figura 22: fôrmas para argamassa utilizadas no ensaio de maturidade a) 40x40x160mm; b) 50x50x50mm.....  | 74 |
| Figura 23: fôrma para concreto, 100x100x350mm, utilizada no ensaio .....  | 74 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 24: fôrma para pasta, 12,5x12,5x12,5mm.....   | 74  |
| Figura 25: tanque para a temperatura de 10°C .....   | 75  |
| Figura 26: detalhes do tanque de temperatura de 10°C a) vista interna; b) detalhe do agitador de água.....                               | 75  |
| Figura 27: tanque para ser utilizado com temperatura de 30°C a) vista geral; b) detalhe da parte interna; c) detalhe da resistência..... | 76  |
| Figura 28: tensão de ruptura x tempo .....   | 79  |
| Figura 29: exemplo de gráfico de Arrhenius .....   | 80  |
| Figura 30: curva de maturidade para resistência à compressão.....  | 81  |
| Figura 31: realização da aferição do ultra-som a) aferição do equipamento; b) leitura do tempo .....                                     | 82  |
| Figura 32: ensaio de ultra-som pelo método direto .....  | 82  |
| Figura 33: ensaio de ultra-som pelo método indireto com 3 pontos a) realização do ensaio; b) leitura do tempo .....                      | 83  |
| Figura 34: ensaio de ultra-som pelo método indireto com 2 pontos .....   | 83  |
| Figura 35: medição do corpo-de-prova com paquímetro .....  | 84  |
| Figura 36: execução do ensaio de abatimento de tronco de cone a) moldagem; b) medida do abatimento (slump).....                          | 90  |
| Figura 37: diagrama de dosagem dos concretos ensaiados .....   | 91  |
| Figura 38: argamassadeira utilizada para produção das argamassas.....  | 95  |
| Figura 39: adensamento do corpo-de-prova 50x50x50mm.....   | 96  |
| Figura 40: adensamento do corpo-de-prova 40x40x160mm.....  | 97  |
| Figura 41: influência da relação água/cimento e da idade na resistência à compressão do concreto .....                                   | 101 |
| Figura 42: influência da relação água/cimento e da idade na resistência à tração na flexão do concreto .....                             | 103 |
| Figura 43: resistência à compressão versus idade, CP 50x50x50mm, 10°C .....  | 106 |
| Figura 44: resistência à compressão versus idade, CP 50x50x50mm, 30°C .....  | 109 |
| Figura 45: resistência à compressão versus idade, CP 50x50x50mm, 50°C .....  | 112 |
| Figura 46: gráficos de Arrhenius para os CPs 50x50x50mm para (a) a/c = 0,25; (b) a/c = 0,35 e (c) a/c = 0,45 .....                       | 114 |
| Figura 47: curvas de maturidade para os corpos-de-prova 50x50x50mm.....  | 115 |
| Figura 48: resistência à tração versus idade, CP 40x40x160mm, 10°C .....   | 118 |
| Figura 49: resistência à tração versus idade, CP 40x40x160mm, 30°C .....   | 121 |
| Figura 50: resistência à tração versus idade, CP 40x40x160mm, 50°C .....   | 124 |
| Figura 51: gráficos de Arrhenius para os CPs 40x40x160mm para (a) a/c = 0,25; (b) a/c = 0,35 e (c) a/c = 0,45 .....                      | 126 |
| Figura 52: curvas de maturidade para os corpos-de-prova 40x40x160mm.....   | 127 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 53: resistência à compressão versus idade, metades dos CPs prismáticos, 10°C.....  | 129 |
| Figura 54: resistência à compressão versus idade, metades dos CPs prismáticos, 30°C.....  | 131 |
| Figura 55: resistência à compressão versus idade, metades dos CPs prismáticos, 50°C.....  | 134 |
| Figura 56: gráficos de Arrhenius para as metades dos CPs 40x40x160mm para (a) a/c = 0,25; (b) a/c = 0,35 e (c) a/c = 0,45 ..... | 136 |
| Figura 57: curvas de maturidade para as metades dos corpos-de-prova 40x40x160mm .....   | 137 |
| Figura 58: resistência à tração versus idade, CP 100x100x350mm, 10°C .....  | 140 |
| Figura 59: resistência à tração versus idade, CP 100x100x350mm, 30°C .....  | 143 |
| Figura 60: resistência à tração versus idade, CP 100x100x350mm, 50°C .....  | 146 |
| Figura 61: gráficos de Arrhenius para os CPs 100x100x350mm para (a) a/c = 0,25; (b) a/c = 0,35 e (c) a/c = 0,45 .....           | 148 |
| Figura 62: curvas de maturidade para as os corpos-de-prova 100x100x350mm .....  | 149 |
| Figura 63: resistência à compressão versus idade, CP 12,5x12,5x12,5mm, 10°C .....   | 151 |
| Figura 64: resistência à compressão versus idade, CP 12,5x12,5x12,5mm, 30°C .....   | 153 |
| Figura 65: resistência à compressão versus idade, CP 12,5x12,5x12,5mm, 50°C .....   | 155 |
| Figura 66: gráficos de Arrhenius para os CPs 12,5x12,5x12,5mm para (a) a/c = 0,25; (b) a/c = 0,35 e (c) a/c = 0,45 .....        | 157 |
| Figura 67: curvas de maturidade para as os corpos-de-prova 12,5x12,5x12,5mm .....   | 158 |
| Figura 68: influência do tipo de corpo-de-prova na energia aparente de ativação.....  | 161 |
| Figura 69: correlação entre ftf e ftf previsto - método da maturidade.....  | 162 |
| Figura 70: correlação entre ftf e ftf previsto – MD .....   | 176 |
| Figura 71: curva de calibração utilizando o MD .....  | 177 |
| Figura 72: correlação entre ftf e ftf previsto – MI 3P.....   | 177 |
| Figura 73: curva de calibração utilizando o MI 3P .....   | 178 |
| Figura 74: correlação entre ftf e ftf previsto – MI 2P.....   | 179 |
| Figura 75: curva de calibração utilizando o MI 2P .....   | 180 |
| Figura 76: correlação entre ftf e ftf previsto para idades de até 24 horas – MD .....   | 180 |
| Figura 77: correlação entre ftf e ftf previsto para idades de até 24 horas – MI 3P .....  | 181 |
| Figura 78: correlação entre ftf e ftf previsto para idades de até 24 horas – MI 2P .....  | 181 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Exemplos de traços de pavimentos de concreto (RHEINHEIMER, 2006).....  | 28 |
| Tabela 2: Valores de energia aparente de ativação para cimentos nacionais (PINTO, 2004a).....  | 34 |
| Tabela 3: Valores de energia aparente de ativação de estudos internacionais (PINTO, 2004b).....  | 35 |
| Tabela 4: valores de energia aparente de ativação para traços de argamassa (RHEINHEIMER, 2006).....  | 35 |
| Tabela 5: Normas para a determinação da velocidade ultra-sônica através do concreto (KOMLOS et al., 1996).....   | 41 |
| Tabela 6: Efeito da temperatura na velocidade ultra-sônica (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1986).....  | 43 |
| Tabela 7: Fatores e seus respectivos níveis .....  | 49 |
| Tabela 8: caracterização química, física e mecânica do cimento .....   | 51 |
| Tabela 9: características físicas da areia.....  | 52 |
| Tabela 10: características físicas da brita .....  | 53 |
| Tabela 11: proporcionamento dos concretos, em massa .....  | 54 |
| Tabela 12: resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 150x150x500mm.....   | 58 |
| Tabela 13: resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 100x100x350mm.....   | 59 |
| Tabela 14: análise de variância para diferentes tamanhos de CP .....   | 60 |
| Tabela 15: velocidade de pulso ultra-sônico (V) pelo método direto (MD) e indireto (MI) de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 150x150x500mm..... | 63 |
| Tabela 16: velocidade de pulso ultra-sônico (V) pelo método direto (MD) e indireto (MI) de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 100x100x350mm..... | 64 |
| Tabela 17: traços de concreto e argamassa.....   | 77 |
| Tabela 18: tempos para atingir 4MPa de resistência à compressão em diferentes temperaturas e $a/c = 0,35$ .....  | 78 |
| Tabela 19: resultado dos tempos para as diferentes temperaturas.....   | 78 |
| Tabela 20: tempos e tensões médias de ruptura para a temperatura de 10°C.....  | 79 |
| Tabela 21: dados obtidos no software .....   | 80 |
| Tabela 22: valores de resistência média à compressão do concreto.....  | 81 |
| Tabela 23: caracterização química, física e mecânica do cimento .....  | 85 |
| Tabela 24: valores determinados para 1:m e suas relações água/cimento.....   | 87 |
| Tabela 25: determinação do teor ideal de argamassa .....   | 88 |
| Tabela 26: proporções de agregados secos totais e traços unitários.....  | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 27: traços utilizados referente a 20,00kg de brita .....   | 89  |
| Tabela 28: resistência à compressão dos diferentes traços .....   | 91  |
| Tabela 29: proporcionamento dos concretos, em massa .....   | 92  |
| Tabela 30: traços de argamassas utilizados .....  | 92  |
| Tabela 31: cronograma de moldagem dos diferentes traços de concreto curados em câmara úmida.....                        | 93  |
| Tabela 32: cronograma de moldagem dos diferentes traços de concreto curados em tanques com distintas temperaturas ..... | 93  |
| Tabela 33: cronograma de moldagem das argamassas .....  | 95  |
| Tabela 34: cronograma de moldagem das pastas .....  | 96  |
| Tabela 35: resistência à compressão – concreto – câmara úmida .....   | 100 |
| Tabela 36: resistência à tração na flexão – concreto – câmara úmida.....  | 102 |
| Tabela 37: tempos de ruptura dos primeiros pontos, em horas .....   | 104 |
| Tabela 38: índice de consistência das argamassas dos CPs cúbicos .....  | 104 |
| Tabela 39: resistência à compressão – argamassa – curada a 10°C.....  | 105 |
| Tabela 40: resistência à compressão – argamassa – curada a 30°C.....  | 108 |
| Tabela 41: resistência à compressão – argamassa – curada a 50°C.....  | 111 |
| Tabela 42: dados obtidos no software para os corpos-de-prova 50x50x50mm .....   | 113 |
| Tabela 43: energia aparente de ativação para os CPs 50x50x50mm.....   | 115 |
| Tabela 44: índice de consistência das argamassas dos CPs prismáticos .....  | 116 |
| Tabela 45: resistência à tração – argamassa – curada a 10°C.....  | 117 |
| Tabela 46: resistência à tração – argamassa – curada a 30°C.....  | 120 |
| Tabela 47: resistência à tração – argamassa – curada a 50°C.....  | 123 |
| Tabela 48: dados obtidos no software para os corpos-de-prova 40x40x160mm, resistência à tração.....                     | 125 |
| Tabela 49: energia aparente de ativação para os CPs 40x40x160mm.....  | 127 |
| Tabela 50: resistência à compressão – argamassa – metades dos CPs 40x40x160 mm – curada a 10°C .....                    | 128 |
| Tabela 51: resistência à compressão – argamassa – metades dos CPs 40x40x160 mm – curada a 30°C .....                    | 130 |
| Tabela 52: resistência à compressão – argamassa – metades dos CPs 40x40x160 mm – curada a 50°C .....                    | 133 |
| Tabela 53: dados obtidos no software para as metades dos CPs 40x40x160mm, ensaiadas à compressão .....                  | 135 |
| Tabela 54: energia aparente de ativação para as metades dos CPs 40x40x160mm .....                                       | 137 |
| Tabela 55: resistência à tração – concreto – curado a 10°C .....  | 139 |
| Tabela 56: resistência à tração – concreto – curado a 30°C .....  | 142 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 57: resistência à tração – concreto – curado a 50°C .....   | 145 |
| Tabela 58: dados obtidos no software para os corpos-de-prova 100x100x350 mm .....                                      | 147 |
| Tabela 59: energia aparente de ativação os CPs 100x100x350mm.....  | 149 |
| Tabela 60: resistência à compressão – pasta – curada a 10°C .....  | 150 |
| Tabela 61: resistência à compressão – pasta – curada a 30°C .....  | 152 |
| Tabela 62: resistência à compressão – pasta – curada a 50°C .....  | 154 |
| Tabela 63: dados obtidos no software para os corpos-de-prova 12,5x12,5x12,5mm .....                                    | 156 |
| Tabela 64: energia aparente de ativação dos CPs 12,5x12,5x12,5mm.....  | 158 |
| Tabela 65: valores de energia aparente de ativação para os diferentes CPs.....   | 159 |
| Tabela 66: análise de variância para os diferentes tipos de CPs .....  | 160 |
| Tabela 67: comparação múltipla de médias entre os diferentes CPs.....  | 161 |
| Tabela 68: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 10°C – a/c = 0,25.....   | 164 |
| Tabela 69: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 10°C – a/c = 0,35.....   | 165 |
| Tabela 70: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 10°C – a/c = 0,45.....   | 166 |
| Tabela 71: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 30°C – a/c = 0,25.....   | 167 |
| Tabela 72: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 30°C – a/c = 0,35.....   | 168 |
| Tabela 73: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 30°C – a/c = 0,45.....   | 169 |
| Tabela 74: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 50°C – a/c = 0,25.....   | 170 |
| Tabela 75: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 50°C – a/c = 0,35.....   | 171 |
| Tabela 76: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento<br>a 50°C – a/c = 0,45.....   | 172 |
| Tabela 77: velocidade de pulso ultra-sônico de corpos-de-prova de concreto curado em<br>câmara úmida – a/c = 0,25..... | 173 |
| Tabela 78: velocidade de pulso ultra-sônico de corpos-de-prova de concreto curado em<br>câmara úmida – a/c = 0,35..... | 174 |
| Tabela 79: velocidade de pulso ultra-sônico de corpos-de-prova de concreto curado em<br>câmara úmida – a/c = 0,45..... | 175 |
| Tabela 80: valores de medianas para os três métodos de ultra-som.....  | 182 |
| Tabela 81: valores de desvio padrão robusto para os três métodos de ultra-som.....                                     | 182 |

## RESUMO

AZEVEDO, Â. A. de. Proposta para simplificação de ensaios destrutivos e não-destrutivos para o monitoramento do ganho de resistência de pavimentos de concreto para *fast-track*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A construção de pavimento de concreto de cimento Portland para liberação rápida, conhecido como *fast-track*, é uma boa solução principalmente para reparos em locais onde não se pode interromper o tráfego por um período muito grande, cujas técnicas são abrangentes, servindo para obras de construção, reconstrução ou para execução de camadas superpostas. Normalmente o ensaio utilizado para verificar a resistência do concreto para pavimentação é o de resistência à tração na flexão. Em função da grande variabilidade deste ensaio e da demora dos resultados, uma vez que o corpo-de-prova é normalmente ensaiado em laboratório na idade em que se deseja saber a resistência, engenheiros que executam ou fiscalizam obras de pavimento de concreto para *fast-track* demonstram certa insatisfação com relação a este procedimento. Alternativamente, uma opção promissora para este monitoramento é a utilização dos ensaios de maturidade e ultra-som, que avaliam indiretamente a resistência do concreto *in situ*. Para contribuir nesta área do conhecimento, realizaram-se ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, maturidade e ultra-som (método direto e indireto), em concretos, argamassas e pastas com cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), para avaliar a possibilidade de correlações entre os ensaios de resistência à tração na flexão e os de ultra-som e maturidade. Os fatores controláveis foram a relação água/cimento (0,25-0,35-0,45) e a idade (1-2-3-7-28 dias). A diferença dos resultados de energia aparente de ativação (maturidade) utilizando diferentes tipos de corpos-de-prova não foi significativa em relação ao corpo-de-prova recomendado pela ASTM C 1074. Encontrou-se um coeficiente de correlação de 95,4% entre os resultados de resistência à tração na flexão dos ensaios e os previstos pelo ensaio de maturidade. Não se constatou diferença significativa entre os resultados de velocidade ultra-sônica para os diferentes métodos de ultra-som utilizados. Todos os métodos de ultra-som apresentaram bons coeficientes de correlação com a resistência à tração na flexão, sendo que para o método indireto com três pontos de recepção obteve-se um coeficiente de correlação de 80,8% para as idades de até 24 horas e de 76,4% considerando todas as idades ensaiadas. Portanto, tanto o ensaio de ultra-som como o de maturidade mostraram-se eficazes para estimar a resistência à tração em idades iniciais, o que pode facilitar o controle de concreto para *fast-track* em campo.

Palavras-chave: pavimento de concreto; fast-track; maturidade; ultra-som

## ABSTRACT

AZEVEDO, Â. A. de. A proposal to simplify destructive and non-destructive testing aiming at monitoring strength gain in *fast-track* concrete pavements. 2008. Dissertation (Doctorate Program in Engineering) – Post-graduation Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The construction of concrete pavement made of Portland cement for fast use, known as fast-track, is a good solution, mainly for restoration in places where traffic cannot be disrupted for long. Fast-track concrete pavement techniques are broad, and can be used for construction, reconstruction, and resurfacing. For determining concrete strength in pavement, the flexural strength test is usually used. Since this test presents high variability and demands more time because the specimen is usually tested in laboratories at certain selected ages, engineers who carry out or monitor fast-track concrete pavement projects have shown some dissatisfaction with this procedure. Alternatively, a promising option to monitor this work is the use of maturity and ultra-sound tests, which evaluate concrete strength directly *in situ*. In order to contribute to this area of knowledge, I have carried out flexural strength, compressive strength, and maturity and ultra-sound (direct and indirect methods) tests in concrete, mortar, and Portland cement paste with high early strengths (CPV-ARI) to evaluate possible correlations among the flexural strength tests and the maturity and ultra-sound ones. The controllable factors were the water-cement ratio (0.25-0.35-0.45) and the age (1-2-3-7-28 days). The difference in the results of the apparent activation energy (maturity), using different types of specimens, was not meaningful if compared to the specimen recommended in ASTM C 1074. Among the results of the flexural strength tests and the ones obtained in the maturity test, the correlation coefficient has been found to be 95.4%. No meaningful difference was found among the results of ultra-sonic speed for the different ultra-sound methods. All ultra-sound methods have shown good correlation coefficients with flexural strength: for the indirect method with three reception points, the correlation coefficient has been found to be 80.8% at ages up to 24 hours, and 76.4% at all test ages. Therefore, both the ultra-sound and the maturity tests have proven to be efficient to estimate tensile strength at early ages; thus, help control fast-track concrete in the field.

Key-words: concrete pavement; fast-track; maturity; ultra-sound

# 1 INTRODUÇÃO

A rodovia, na condição de modalidade de transporte mais utilizada no Brasil, foi o segmento bastante afetado pelas acomodações sucessivas da economia à nova realidade decorrente das crises vividas pelo País nesses últimos anos, o mesmo ocorrendo com as vias urbanas.

Mais de 80% das rodovias federais brasileiras estão deterioradas a tal ponto que já ameaçam a expansão econômica puxada pelas exportações e pelo agronegócio. Resultados obtidos pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), em 2004, relatam que dos 74.681km de rodovias pesquisadas, em todo o Brasil, 56,1% da extensão, ou seja, quase 42 mil quilômetros apresentavam, na época, pavimento em estado deficiente, ruim ou péssimo e 74,7% têm algum grau de imperfeição.

Dadas às condições da malha viária nacional, parece que a tendência do investimento em rodovias é mais para reabilitação e construção de projetos menores do que para construção de rodovias novas, haja visto o programa de concessões e as intervenções realizadas em âmbito federal e estadual.

Como efeito da precariedade ou ausência da conservação, as rodovias, vias urbanas, entre outros, deterioraram-se. Uma das razões para tantos problemas é o uso inadequado do pavimento asfáltico, que é uma opção válida em ruas de trânsito leve, mas não nas vias de intenso movimento, como avenidas e estradas, que suportam veículos pesados. Nessas condições, os técnicos preferem indicar o pavimento de concreto, cuja rigidez garante resistência e durabilidade.

Chambon *apud* Pereira (2001) destaca o excelente desempenho do pavimento de concreto quando submetido a tráfego pesado, e o baixo nível de manutenção requerido, salientando como vantajoso o emprego do concreto de cimento Portland na pavimentação.

Nos Estados Unidos, aproximadamente 20% das estradas utilizam o concreto. Na Alemanha praticamente todas as estradas de alta velocidade são de concreto. Na América Latina, o Chile é o país que mais usa concreto em sua malha rodoviária. Dos quase um milhão e setecentos mil quilômetros da malha rodoviária nacional (federal, estadual e municipal), apenas 165 mil estão pavimentadas, e apenas 2% têm pavimentação de concreto (GIUSTI, 2005).

Segundo Pimentel *apud* Rheinheimer (2006), 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 de 40 a 50 anos.

O concreto exige menos gastos públicos com iluminação e garante maior visibilidade “sob neblina” em função da cor clara. Aumenta ainda a segurança nas estradas, pois diminui a distância de frenagem em quase 40%. Estudos internacionais demonstram que para carros de passeio a economia no consumo de combustível gira em torno de 11% e para caminhões, pode ser de até 20% quando se trafega sobre o pavimento de concreto (ABCP, 2005; PITTA, 1996).

A pavimentação de concreto foi utilizada intensamente nas estradas brasileiras até a década de 50, conforme demonstra o histórico apresentado por Giublin (2002) na sua dissertação de mestrado. O Brasil foi um dos pioneiros a construir pavimentos de concreto na América do Sul. Em 1925, no estado do Rio Grande do Sul, ruas da cidade de Pelotas já possuíam este tipo de pavimento. O desenvolvimento dos pavimentos flexíveis, aliado aos preços oferecidos, fez mais intenso o uso dessa alternativa.

Segundo Pereira (2001), hoje em dia os custos iniciais para a construção de pavimentos de concreto têm sido reduzidos para o caso de rodovias de elevado volume de tráfego, tornando-o competitivo, ainda mais se observados os baixos custos de manutenção necessários durante sua vida de serviço. Parte da redução do valor inicial dos pavimentos de concreto deve-se à importação de equipamentos de pavimentação, que acabaram por possibilitar uma grande produtividade e melhor qualidade de acabamento.

As autoridades da área de transportes enfrentam grandes desafios provocados pelo aumento do volume de tráfego. Os órgãos responsáveis precisam reparar ou substituir

pavimentos velhos e deteriorados simultaneamente à manutenção do fluxo de tráfego nessas estruturas.

Os métodos tradicionais de construção, recuperação ou substituição de pavimento não são mais aceitáveis devido ao crescente número de veículos e à impaciência do usuário em razão da interrupção do tráfego, principalmente quando as soluções tradicionais se dão em áreas urbanas de congestionamento severo.

A construção de pavimento de concreto de cimento Portland para liberação rápida, conhecido como *fast-track*, resolve problemas dessa natureza, proporcionando pavimentos de alta qualidade e durabilidade para utilização rápida, cujas técnicas são abrangentes, servindo para obras de construção, reconstrução ou para execução de camadas superpostas. Esta técnica é aplicada com frequência nos Estados Unidos, sendo possível construir um trecho de pista durante a madrugada e liberá-lo ao tráfego logo pela manhã.

Normalmente a resistência do concreto é determinada através do ensaio de resistência à compressão, utilizando corpos-de-prova cilíndricos, ou resistência à tração na flexão, utilizando corpos-de-prova prismáticos. Segundo Arnesen (2003), o deslocamento de equipamentos específicos ao local da obra, para a obtenção dos resultados destes ensaios *in loco*, tornaria o procedimento caro e demorado.

Alternativamente, uma opção promissora para este monitoramento é a utilização de ensaios não destrutivos para avaliação da resistência do material. Dentre alguns dos métodos não destrutivos aplicados ao concreto, podem-se citar o da maturidade (estima a resistência do material através de um índice de maturidade que leva em consideração a história de temperatura do material ao longo do tempo) e o do ultra-som (relaciona velocidade de propagação da onda ultra-sônica com resistência), que avaliam indiretamente a resistência do concreto *in situ*.

Alguns trabalhos nacionais (PINTO, 2000; SALVADOR FILHO, 2001; RODRIGUES, 2003; HASPARYK, 2005; RHEINHEIMER, 2006, CLARO et al., 2007) têm sido desenvolvidos utilizando estes métodos de ensaio não destrutivos para determinação da resistência à compressão ou tração na flexão do concreto, obtendo resultados satisfatórios. Entretanto, existem algumas lacunas para serem investigadas, conforme apresentado na seqüência do trabalho.

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Os pavimentos de concreto de cimento Portland há muitas décadas têm sido utilizados no país, tendo um impulso marcante em meados dos anos 90 quando passou a ser objeto crescente de interesse nos meios rodoviários brasileiros. Este fato talvez explique porque o desenvolvimento científico nesta área seja limitado, uma vez que até hoje existem muitas lacunas a serem estudadas.

Em reunião realizada na Associação Brasileira de Cimento Portland de São Paulo, com a presença dos Engenheiros Márcio Pitta (ABCP), Rubens Curti (ABCP), Leovaldo Foganhole (ABCP) e Dalter Godinho (Grossi & Godinho Engenharia), vários questionamentos, sugestões e comentários foram feitos com relação ao tema pavimento de concreto para rápida liberação ao tráfego (*fast-track*). Uma das preocupações foi com relação a metodologias e procedimentos viáveis para liberação do tráfego, uma vez que ensaios convencionais em laboratório dificultam esta avaliação.

Normalmente o ensaio utilizado para verificar a resistência do concreto para pavimentação é o de resistência à tração na flexão, descrito na NBR 12142 (ABNT,1991). Em algumas situações é usado o ensaio de resistência à compressão, segundo a NBR 5739 (ABNT, 1994).

Em função da grande variabilidade dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão e da demora dos resultados, uma vez que o corpo-de-prova é normalmente ensaiado em laboratório na idade em que se deseja saber a resistência, engenheiros que executam ou fiscalizam obras de pavimento de concreto *fast-track*, e têm a responsabilidade de liberar o tráfego, demonstram certa insatisfação com relação a este procedimento.

Uma alternativa, que facilitaria o controle de liberação de tráfego, é a utilização de ensaios não destrutivos, que permitem avaliar indiretamente a resistência do concreto *in situ*.

Vários questionamentos surgem, então, quando se pretende utilizar estes ensaios para estimar a resistência à tração de um pavimento de concreto para *fast-track*:

- a) a energia aparente de ativação da hidratação do cimento é um parâmetro que indica a sensibilidade térmica de uma mistura de concreto e que pode ser determinada através de diversos procedimentos. Os mais indicados são os ensaios calorimétricos ou diretamente a partir da dependência do grau de hidratação com a temperatura. O procedimento ASTM C 1074 (1998) apresenta uma metodologia para obtenção da energia aparente de ativação a partir de ensaios de resistência à compressão de argamassas curadas em temperaturas distintas. Será que no cálculo das idades equivalentes a partir da função de maturidade de Freiesleben – Hansen e Pedersen (FHP), o valor da energia aparente de ativação dado pela metodologia da ASTM C 1074 (1998) se aplicaria para estimar a resistência à tração na flexão (parâmetro mais utilizado para controle de pavimentos)? O procedimento ASTM C 1074 (1998) avalia a energia aparente de ativação a partir de ensaios de compressão e foi desenvolvido para estimar resistência à compressão. Rheinheimer et al. (2006) encontraram resultados distintos para a energia aparente de ativação, realizando ensaios de resistência à compressão e tração na flexão em corpos-de-prova de argamassa. Por exemplo, o valor de energia aparente de ativação encontrado através do ensaio de compressão foi de 20,8kJ/mol e o do ensaio de tração na flexão de 41,4kJ/mol.
- b) será que a energia aparente de ativação estimada em corpos-de-prova de argamassa é a mesma se forem utilizados corpos-de-prova de concreto ou de pasta de cimento?
- c) as boas correlações existentes entre energia aparente de ativação, ultrassom e resistência à compressão para concretos convencionais continuam válidas para concretos de alta resistência (utilizados em pavimento *fast-track*)? E são válidos para a resistência à tração na flexão? Segundo Pinto (1997), os efeitos da temperatura sobre o ganho de resistência à compressão têm sido modelados com sucesso pelo método da maturidade para concretos de resistência normal, havendo bem menos experiência com concretos de alta resistência.

Para tentar elucidar estas questões e contribuir no sentido de facilitar a liberação de tráfego em pavimento de concreto *fast-track* através do uso de ensaios *in situ*, com

menores custos, maior rapidez e facilidade, mas ao mesmo tempo com segurança quanto aos resultados obtidos, foi estruturada esta pesquisa. Os concretos foram dosados para alcançar altas resistências mecânicas, ficando na faixa de 50 a 85MPa à compressão, aos 28 dias, garantindo resistências à tração na flexão de 4,3 a 7,0MPa em 24 horas, adequadas para pavimentos fast-track.

Utilizaram-se diferentes tipos de corpos-de-prova para a determinação da energia aparente de ativação, quais sejam, de argamassa, de concreto e de forma inédita de pasta, com a finalidade de comparar os resultados obtidos.

Convencionalmente, o ensaio utilizado para determinar a resistência à tração do concreto para pavimento é o de tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos de concreto. A ASTM C 1074 (1998) recomenda a utilização de corpos-de-prova cúbicos de argamassa para obter a resistência à compressão da mistura e posterior determinação da energia aparente de ativação. Com a utilização dos diferentes tipos de corpos-de-prova, alguns ensaiados à compressão e outros à tração na flexão, pode-se verificar a influência do tipo de corpo-de-prova e do esforço a que o mesmo foi submetido no resultado final.

Aproveitando os corpos-de-prova utilizados para o ensaio de maturidade, que são rompidos em baixas idades (a partir de 3 horas), foram realizadas leituras de velocidade ultra-sônica para verificar a adequabilidade do ensaio para estimar a resistência à tração do concreto.

Portanto, optou-se pelos ensaios de maturidade por haver poucas experiências da utilização deste com concretos de alta resistência e pelo de ultra-som para determinação da resistência do concreto à tração principalmente nas primeiras idades, por se tratar de concreto para fast-track.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta pesquisa é propor a simplificação de ensaios destrutivos e não-destrutivos para o monitoramento do ganho de resistência de pavimentos de concreto para *fast-track*, através do método da maturidade, ultra-som e resistência à tração na flexão.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) verificar se existe diferença significativa entre os resultados obtidos em corpos-de-prova de dimensões 100x100x350mm e de dimensões 150x150x500mm (estabelecido pela norma) para realização dos ensaios de resistência à tração na flexão;
- b) verificar se existe diferença significativa entre os resultados dos 3 tipos de corpos-de-prova (pasta, argamassa e concreto) utilizados para a determinação da energia aparente de ativação, através da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão;
- c) estabelecer curvas de correlação entre os resultados de resistência à tração na flexão e os resultados de maturidade;
- d) verificar se existe diferença significativa entre os três métodos de ultra-som utilizados (direto, indireto com 2 pontos e indireto com 3 pontos);
- e) estabelecer curvas de correlação entre os resultados de resistência à tração na flexão e os resultados de ultra-som;
- f) verificar a influência da relação água/cimento e da idade nos resultados dos ensaios de maturidade, de ultra-som, de resistência à tração na flexão e à compressão.

### 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa estrutura-se em seis capítulos, conforme a descrição realizada na seqüência.

No primeiro capítulo, que constitui a “Introdução”, encontra-se a justificativa do tema, os objetivos principal e específicos, as delimitações e a estrutura da pesquisa.

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre pavimento *fast-track*, ensaios de maturidade e ultra-som.

No terceiro capítulo, apresentam-se os estudos preliminares realizados, onde se estudou a influência do tamanho do corpo-de-prova prismático na obtenção da resistência à tração na flexão.

O quarto capítulo apresenta o programa experimental, compreendendo aspectos relacionados com o planejamento do experimento, descrição dos ensaios realizados, dos materiais utilizados e do método de dosagem adotado.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o programa experimental, juntamente com a análise e discussão dos mesmos.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o tema proposto para este trabalho e com os objetivos estabelecidos no capítulo 1, nos itens subseqüentes é apresentada uma breve revisão sobre pavimento *fast-track* e os ensaios de maturidade e ultra-som.

### 2.1 PAVIMENTO *FAST-TRACK*

Os avanços ocorridos na tecnologia do concreto, nos aditivos, métodos de projeto, normas de controle de qualidade, entre outros, estão contribuindo para avanços significativos no desenvolvimento do pavimento de concreto no país.

*Fast-track* é o nome que tem sido usado para caracterizar a tecnologia que permite liberar o tráfego sobre pavimentos de concreto em um dia ou menos. É uma solução atrativa tanto para a iniciativa privada como para o governo, já que esta tecnologia impõe um curto tempo de interrupção do tráfego quando da reabilitação de rodovias ou vias urbanas.

Segundo dados da Federal Highway Administration (1994), o pavimento de concreto *fast-track* surgiu em 1986, em Buena Vista Country, nos Estados Unidos.

O concreto *fast-track* foi utilizado no estado de Iowa (EUA) com a finalidade de minimizar o tempo de interrupção de rodovias. Resistências à tração na flexão do concreto acima de 2,9MPa foram obtidas em 12 horas. O Departamento de Transportes de Iowa admite um mínimo de resistência igual a 2,5MPa para abertura ao tráfego, tendo, portanto, uma boa margem de segurança para aplicação do processo (GODINHO e GROSSI, 2000).

A execução de *fast-track* implica vários procedimentos para acelerar o processo construtivo, sem que sejam aumentadas a jornada de trabalho e a mão de obra, ou que

haja mudanças na programação das tarefas. Deve-se, sim, fazer algumas modificações nas especificações e nos processos construtivos, o que implica freqüentemente em um concreto de alta resistência inicial, mas que pode incluir também a revisão dos critérios de liberação, etapas construtivas, execução de juntas e responsabilidades do operário.

As técnicas construtivas de *fast-track* permitem aos engenheiros propor a alternativa de pavimento rígido em projetos, antes considerada impraticável devido aos longos períodos de cura. Algumas especificações exigem períodos de 5 a 14 dias, ou até 28 dias, para concretos ditos comuns. Com esta técnica a aquisição de resistência no pavimento permite a liberação ao tráfego com bem menos tempo.

Segundo Balbo (2004), a recente modernização de equipamentos para pavimentação e o avanço tecnológico de misturas de concreto de alta resistência inicial tornam viável a utilização destes pavimentos.

É importante salientar que uma análise completa de dosagem em laboratório é essencial para a especificação de um traço de concreto *fast-track*. Os estudos de laboratório devem determinar as características do concreto nos estados fresco e endurecido para os materiais em questão, além de verificar a compatibilidade química entre eles.

Várias combinações de materiais podem resultar em ganho de resistência; assim, não há necessariamente uma especificação de proporcionamento para *fast-track*. A obtenção de concretos de alta resistência é possível utilizando-se os materiais disponíveis no local, como cimento, agregados, aditivos e adições. Cabe salientar que o uso de cimentos especiais, aditivos e adições podem produzir resultados satisfatórios.

De acordo com a American Concrete Pavement Association, pode-se utilizar qualquer tipo de cimento para execução de pavimento de concreto *fast-track*, desde que a sua resistência à compressão em 12 horas de idade seja no mínimo de 9MPa (SILVA et al., 2006).

Quando se proporciona um concreto para *fast-track*, deve ser considerada a influência adicional do calor de hidratação, da distribuição granulométrica dos agregados, do teor de ar incorporado, da temperatura da água de amassamento, do processo de cura, da ambiência e da temperatura da sub-base, uma vez que estes fatores podem influenciar a evolução da resistência do concreto a curto e longo prazo.

Segundo Ansari et al. (1997), o ganho de resistência em concreto *fast-track* é função da temperatura inicial da mistura.

A tecnologia *fast-track* pode ser empregada em diversos locais, tais como auto-estradas, rodovias, vias urbanas, interseções e aeroportos.

Pode-se citar como experiência da aplicação desta tecnologia, *fast-track*, a reconstrução de uma via arterial urbana em Denver (Estados Unidos), que reduziu 75 dias no cronograma original de 200 dias (GODINHO e GROSSI, 2000).

Outra aplicação foi a solução adotada por Carvalho, Hallack e Silva (1996) na construção do pavimento na Via Anchieta (no trecho conhecido como “Curva da Onça”), utilizando *whitetopping*<sup>1</sup>, prevendo o uso de concreto de alta resistência inicial, de modo a permitir a liberação ao tráfego em três dias.

Na Bélgica, mais de 30.000m<sup>2</sup> de rodovias foram reparadas utilizando a tecnologia *fast-track* (HENDRIKX, 1998).

Segundo Silva et al. (2006), a primeira experiência brasileira de pavimento de concreto *fast-track* foi realizada no Corredor Viário Guarapiranga (SP), em 2003. O cimento utilizado foi o de alta resistência inicial (consumo de 413kg/m<sup>3</sup>), relação água/cimento de 0,38, aditivos plastificante e um superplastificante (base carboxilato). A temperatura ambiente foi de 24°C e a temperatura de lançamento de 33,5°C. A previsão da resistência do concreto foi efetuada através do ensaio de maturidade.

Rheinheimer (2006) apresenta uma tabela com informações sobre pavimentos *fast-track* executados nos Estados Unidos, em aeroportos, rodovias, interseções, ruas e estradas com pequeno volume de tráfego e projetos industriais. Nesta tabela são apresentados dados relativos ao traço, critério para abertura ao tráfego, resistência mecânica, entre outros (Tabela 1).

---

<sup>1</sup> Uma camada de concreto de cimento Portland, com mais de 100 mm de espessura, sobreposto ao pavimento asfáltico existente.

Tabela 1: Exemplos de traços de pavimentos de concreto (RHEINHEIMER, 2006)

|                                   |                              | A                   | B               | C               | D               | E               | F            | G                | H               | I                 |       |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------|-----------------|-------------------|-------|
| Espessura (cm)                    |                              | 25,4                | 26,7            | 26,7            | 10,2            | 30,48           | -            | -                | -               | 18                |       |
| Cimento                           | Tipo                         | Tipo I <sup>2</sup> | Tipo III        | Tipo III        | Tipo III        | Tipo I          | Tipo I       | Tipo I           | Tipo III        | CPV <sup>3</sup>  |       |
|                                   | Consumo (kg/m <sup>3</sup> ) | 341,41              | 290,56          | 338,23          | 323,25          | 324,61          | 362,75       | 320,07           | 340,5           | 455               |       |
| a/c                               |                              | 0,42                | 0,415           | 0,376           | 0,42            | 0,35            | 0,41         | 0,41             | 0,49            | 0,44              |       |
| Critério para abertura ao tráfego | Flexão                       | -                   | 2,76MPa<br>12hs | 2,76MPa<br>12hs | -               | 3,1MPa<br>24hs  | -            | -                | 12 a 24hs       | 4,4MPa<br>28 dias |       |
|                                   | Compressão                   | 17,25MPa<br>12hs    | -               | -               | 20,7MPa<br>24hs | -               | -            | -                |                 | 24MPa<br>28 dias  |       |
| Resistência nos ensaios (MPa)     | Flexão                       | 24hs                | -               | -               | 5,175           | -               | -            | -                | -               | -                 |       |
|                                   |                              | 28 dias             | -               | -               | -               | -               | -            | -                | -               | 5,54              |       |
|                                   |                              | outros              | -               | 2,97MPa<br>12hs | 4,07MPa<br>12hs | -               | -            | 3,97MPa<br>6,5hs | 400MPa<br>7hs   | -                 | -     |
|                                   | Compressão                   | 24hs                | 28,77           | -               | -               | 20,87           | -            | 25,32            | 24,39           | -                 | -     |
|                                   |                              | 28 dias             | 38,85           | -               | -               | -               | -            | 40,57            | 36,54           | -                 | 39,26 |
|                                   |                              | outros              | 15MPa<br>6hs    | -               | -               | 8,28MPa<br>12hs | 4MPa<br>48hs | 19,09MPa<br>6hs  | 16,31MPa<br>6hs | 7,94MPa<br>7,8hs  | -     |

Sendo:

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

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

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

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

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

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

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

H: Pavimento 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).

<sup>2</sup> Os cimentos Tipo I e III corresponde aos da ASTM.

<sup>3</sup> O cimento CPV corresponde ao cimento Tipo III ASTM.

Segundo Godinho e Grossi (2000), em resumo, estes são os fatores que indicam os pavimentos do tipo *fast-track*:

- a) permitem aos engenheiros considerar o concreto para obras imaginadas impraticáveis, em razão dos longos períodos de cura;
- b) têm bom desempenho sob solicitações diversas de tráfego e condições de aplicação;
- c) amenizam o congestionamento na região da obra durante a restauração, execução de camada superposta ou reconstrução de auto-estradas de grande importância;
- d) reduzem o tempo de acesso normal de residentes e comerciantes às suas casas ou locais de trabalho;
- e) permitem aos órgãos rodoviários reconstruírem interseções em vez de executar camadas superpostas para corrigir deformações excessivas de trilhas de roda, deterioração da superfície, ondulações acentuadas e outros problemas de segurança;
- f) reduzem o tempo de modo a permitir que o construtor possa iniciar a pavimentação das faixas de placas intermediárias em pátios de estacionamento de aeronaves, pistas de pouso e de taxiamento.

Para utilização de pavimento de concreto para *fast-track*, necessita-se determinar a resistência do concreto em idades iniciais, muitas vezes em horas, dependendo da exigência de projeto, conforme exposto anteriormente. Nestas situações torna-se necessário a realização de ensaios que determinem a resistência do concreto na obra, tendo uma resposta imediata, dispensando o método tradicional de avaliação da resistência do concreto de moldar corpos-de-prova prismáticos e ensaiar em laboratório à tração na flexão.

Dois tipos de ensaios que podem ser utilizados nestas situações são os de maturidade e ultra-som. Uma revisão bibliográfica destes ensaios é apresentada nos itens 2.2 e 2.3, a seguir.

## 2.2 MÉTODO DA MATURIDADE

O concreto é um material de construção que adquire resistência com o tempo, passando pelos processos de pega e endurecimento. Estes processos são causados pela hidratação do cimento (reação química) e bastante afetados pela temperatura de cura do concreto. Como se sabe, a velocidade das reações é acelerada em altas temperaturas e retardada em baixas temperaturas.

Na Figura 1 (PINTO, 2000), observa-se que um concreto com relação água/cimento de 0,30 apresenta diversas curvas de desenvolvimento de sua resistência à compressão com o tempo, dependendo da temperatura do material.

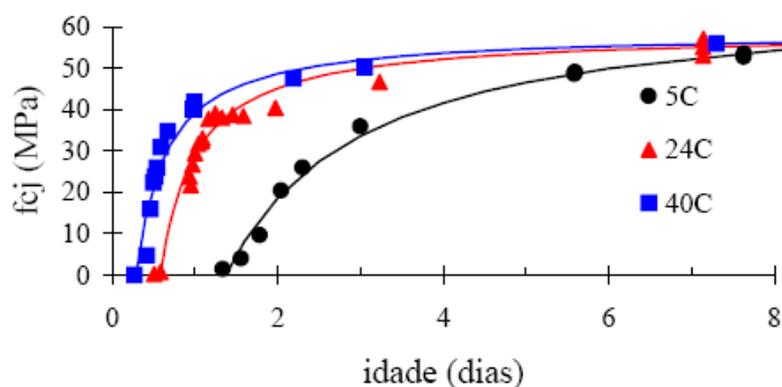


Figura 1: influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão (PINTO, 2000)

À medida que a hidratação evolui, os produtos da reação preenchem os vazios existentes, tornando a matriz menos porosa. Diminuindo a porosidade do concreto, as resistências à tração e à compressão, o módulo de elasticidade e a microestrutura vão se desenvolvendo.

O método da maturidade estima o desenvolvimento das propriedades do concreto relacionando-as com o histórico de temperaturas durante a cura, sendo o cálculo realizado através de equações de maturidade que envolvem as variáveis tempo e

temperatura, incorporando em seu desenvolvimento um parâmetro associado à sensibilidade térmica do material (SALVADOR FILHO, 2001 e PINTO, 2004b).

Para um estudo mais aprofundado sobre o método da maturidade, indica-se a leitura de dois artigos internacionais, Malhotra (1971) e Carino (1991), e um nacional, Pinto (2000).

O método da maturidade foi inicialmente desenvolvido com a finalidade de estimar a resistência à compressão do concreto com base na sua história de temperatura. Saul (1951) relacionou maturidade com resistência à compressão, denominando como “lei do ganho de resistência com maturidade: 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”.

A temperatura de cura afeta o desenvolvimento da resistência à compressão e a resistência última ( $f_{c\infty}$ ) do material. Diante disso, Carino (1991) propôs uma relação da maturidade com o grau relativo de desenvolvimento da resistência à compressão, modificando a lei de 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 relativa qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o grau de maturidade”.

As funções de maturidade encontradas na literatura podem ser divididas em duas categorias: as empíricas e as que levam em consideração o desenvolvimento da hidratação do cimento.

Nurse (1949) sugeriu que o produto do tempo e temperatura avaliaria os efeitos de cura a vapor no ganho de resistência à compressão. Nurse-Saul propuseram uma equação empírica (Equação 1) para estimar a maturidade da mistura.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

M = grau de maturidade atingido no tempo t;

T = temperatura do concreto durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ ;

$T_o$  = temperatura de base;

$\Delta t$  = incremento de tempo.

Rastrup (1954) introduziu o termo idade equivalente ( $t_e$ ), que indica a idade necessária para que o concreto continuamente mantido a uma temperatura  $T_r$  atinja a mesma resistência quando submetido a temperaturas reais T. A função de Nurse-Saul assume a seguinte forma, como mostra a Equação 2. Normalmente, utiliza-se 20°C como temperatura de referência.

$$t_e = \sum_0^t \frac{T - T_o}{T_r - T_o} \cdot \Delta t \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

$T_r$  = temperatura de referência;

$t_e$  = idade equivalente na temperatura de referência  $T_r$  (h).

Vinte e três anos depois, Freiesleben – Hansen e Pedersen (1977) sugeriram uma nova equação originada do modelo de Arrhenius, sendo que este parâmetro está relacionado com a cinética das reações de hidratação do cimento.

Para que as reações químicas da hidratação do cimento ocorram, é necessário que as moléculas possuam energia cinética suficiente para transformar os reagentes em produtos. Em reações exotérmicas (hidratação do cimento) o estado de energia dos reagentes é maior que o dos produtos. Assim, Arrhenius introduziu o conceito de energia de ativação que é a diferença entre a energia necessária para o início das reações e a quantidade de energia dos reagentes.

Segundo Arrhenius, a velocidade de uma reação química é função da chamada taxa constante ( $k_t$ ), conforme Equação 3.

$$k_t = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

$k_t$  = taxa constante;

$E$  = energia de ativação;

$R$  = constante universal dos gases (8,314J/mol.K);

$T$  = temperatura absoluta;

$A$  = constante ou fator de frequência.

Considerando que o cimento Portland é um material heterogêneo composto por diferentes fases que reagem a taxas diferentes em idades distintas, o termo energia aparente de ativação é mais apropriado em se tratando dos processos de hidratação do cimento. Este conceito introduz um valor médio de energia de ativação para as diversas reações de hidratação que ocorrem simultaneamente.

A função desenvolvida por Freiesleben – Hansen e Pedersen (FHP) é a mais usual internacionalmente para aplicação do método da maturidade e a que melhor representa a dependência térmica do desenvolvimento das propriedades do concreto, conforme descrito na Equação 4.

$$t_e = \sum_0^t \left[ \exp \frac{E_a}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right] \cdot \Delta t \quad (\text{Equação 4})$$

onde:

$t_e$  = idade equivalente à temperatura de referência  $T_r$ ;

$E_a$  = energia aparente de ativação;

$T$  = média da temperatura em um intervalo de tempo  $\Delta t$ ;

$T_r$  = temperatura de referência;

$R$  = constante universal dos gases (8,314J/mol.K);

$\Delta t$  = intervalo de tempo.

Freiesleben – Hansen e Pedersen (1977) estabelecem que para temperaturas  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  deve-se usar o valor da energia aparente de ativação de 33500J/mol e para temperaturas  $< 20^{\circ}\text{C}$  valor segundo a Equação 5.

$$E_a = 33500 + 1470 (20 - T) \text{ J/mol} \quad (\text{Equação 5})$$

O valor da energia aparente de ativação não é constante durante todo o processo de hidratação do cimento. Em idades iniciais a taxa de evolução da hidratação é regida pelo tempo que os reagentes levam para se transformar em produtos e após este período, as reações são menos sensíveis à temperatura. Entretanto, segundo Pinto (2004b), a maioria dos pesquisadores não adota valores decrescentes para energia aparente de ativação.

Na Tabela 2 são apresentados alguns valores de energia aparente de ativação encontrados pelos pesquisadores para cimentos nacionais (PINTO, 2004a). Salienta-se que não são dadas informações mais detalhadas a respeito dos proporcionamentos dos traços, o que poderia justificar as grandes diferenças encontradas para a energia aparente de ativação com um mesmo tipo de cimento.

Tabela 2: Valores de energia aparente de ativação para cimentos nacionais (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        |

O procedimento ASTM C 1074 (1998) indica um valor entre 40 e 50kJ/mol para concretos com cimento tipo I ASTM, equivalente ao cimento brasileiro CP I.

Segundo Pinto (2004b), a literatura apresenta valores diversos de energia aparente de ativação, dependendo da mistura estudada. A diversidade nos valores listados na Tabelas 2 e 3 demonstra que a energia aparente de ativação depende da mistura, principalmente da relação água/cimento e do tipo e finura do cimento utilizado, além de ser também influenciada pela presença de aditivos químicos e adições minerais.

Tabela 3: Valores de energia aparente de ativação de estudos internacionais (PINTO, 2004b)

| Autor                | Ea<br>(kJ/mol) |
|----------------------|----------------|
| Bye (1983)           | de 40 a 50     |
| Carino (1984)        | 41             |
| Schindler (2004)     | de 37,3 a 42,5 |
| Carino e Tank (1989) | de 44 a 64     |

Na Tabela 4 apresentam-se valores de energia aparente de ativação, encontrados por Rheinheimer (2006), avaliando cinco traços distintos de argamassa.

Tabela 4: valores de energia aparente de ativação para traços de argamassa (RHEINHEIMER, 2006)

| Ea<br>(kJ/mol)   | Traço   |          |           |          |         |
|------------------|---------|----------|-----------|----------|---------|
|                  | Traço I | Traço II | Traço III | Traço IV | Traço V |
| Compressão       | 27,7    | 19,7     | 38,7      | 38,0     | 46,4    |
| Tração na flexão | 32,7    | 26,2     | 41,3      | 31,6     | 35,9    |

Nos traços I e II foi utilizado cimento CPV-ARI RS e aditivo lignosulfonado, no traço III cimento CPII-Z e aditivo naftaleno e nos traços IV e V cimento CPV-ARI RS e aditivo éster policarboxílico modificado.

Pinto (2004b) salienta que quanto maior o valor da energia aparente de ativação, mais sensível será a evolução da reação às variações de temperatura, uma vez que mais energia será necessária para o início das reações químicas. Cita como exemplo que a taxa de evolução de uma reação química com um valor de energia de ativação de 60 kJ/mol é aproximadamente 20 vezes mais elevada a 60°C do que a 20°C. Entretanto,

para uma energia de ativação de 20kJ/mol, a taxa de evolução da reação química é apenas 3 vezes mais elevada a 60°C do que a 20°C.

O método da maturidade pode ser utilizado para avaliar o tempo necessário para desforma, aplicação de cargas de protensão ou construção, liberação de pavimentos de concreto ao tráfego, entre outras aplicações.

Foi desenvolvido com a finalidade de estimar a resistência à compressão. Entretanto, segundo Pinto et al. (2001), o método da maturidade pode ter uma aplicação bem mais ampla, já que relaciona o conceito de maturidade com o desenvolvimento do grau de hidratação do cimento. Sendo assim, a princípio, qualquer propriedade mecânica ou física do concreto que tenha relação com o grau de hidratação do cimento poderá ser modelada por este método.

Em revisão realizada, a única norma encontrada sobre maturidade foi a da American Society for Testing and Materials (ASTM). O procedimento da ASTM C 1074 (1998) descreve um método experimental para obtenção da energia aparente de ativação do cimento, através da determinação da evolução da resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa submetidos a três condições isotérmicas de cura diferentes. Com os valores dos pares resistência x idade, através de cálculos especificados na ASTM, obtém-se os dados necessários para traçar o gráfico de Arrhenius (inverso da temperatura x logaritmo natural de kt). A energia aparente de ativação é o coeficiente angular da reta deste gráfico.

Paralelamente acompanha-se a evolução da resistência à compressão de corpos-de-prova de concreto. Baseado nas funções citadas anteriormente, transforma-se a idade real do concreto em idade equivalente, podendo-se então traçar o gráfico resistência à compressão do concreto x idade equivalente. A resistência do concreto passa a ser então a mesma para qualquer temperatura de cura em uma mesma idade equivalente. Para outras temperaturas a resistência do concreto pode ser estimada pela combinação entre tempo e temperatura, através da idade equivalente.

Portanto, o método da maturidade permite estimar a resistência à compressão do concreto a partir de seu histórico de temperatura e da determinação prévia da energia aparente de ativação do concreto utilizado, sendo de grande importância para estimar,

por exemplo, o tempo necessário para um pavimento de concreto adquirir a resistência para liberação ao tráfego.

Whiting et al. *apud* Rheinheimer (2006), avaliaram a precisão em relação à estimativa da resistência à compressão de pavimentos *fast-track*, comparando os métodos da maturidade, velocidade do pulso ultra-sônico, corpos-de-prova cilíndricos curados a mesma temperatura do pavimento e corpos-de-prova cilíndricos isolados termicamente, concluindo que o método da maturidade estimou resistências mais próximas das obtidas por testemunhos retirados do pavimento.

Na revisão bibliográfica deste item observou-se que existe uma diferença nos valores obtidos para a energia aparente de ativação, encontrados por diferentes pesquisadores, para um mesmo tipo de cimento.

Constatou-se que pesquisadores determinaram a energia aparente de ativação utilizando corpos-de-prova de argamassa submetidos ao ensaio de compressão e de tração na flexão, encontrando valores distintos.

Poucos trabalhos foram realizados utilizando o ensaio de maturidade para determinação da resistência à tração, de pavimentos de concreto, em idades iniciais. Não se encontrou trabalhos que determinassem a energia aparente de ativação utilizando corpos-de-prova de concreto ou de pasta.

## 2.3 ULTRA-SOM

A NBR 8802 (ABNT, 1994) prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultra-sônicos, através de um componente de concreto.

Este ensaio tem como principais aplicações:

- a) verificar a homogeneidade do concreto;
- b) detectar eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições;

- c) monitorar variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio ambiente;
- d) estimar a resistência do concreto.

### 2.3.1 Evolução técnica

O desenvolvimento do método da propagação de ondas ultra-sônicas começou na década de 40, simultaneamente no Canadá e na Inglaterra. Leslie e Chessman no Canadá desenvolveram um instrumento chamado Sinoscópio e Jones na Inglaterra o Ultrasonic Concrete Tester. Basicamente as diferenças dos aparelhos situavam-se na frequência de ressonância dos transdutores (RODRIGUES, 2003).

O uso do ultra-som em estruturas foi viabilizado, no início dos anos 70, com o surgimento do PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Tester), por ser um aparelho portátil, de pouco peso, com bateria própria e com a apresentação do tempo de propagação da onda ultra-sônica em mostrador digital. O PUNDIT pode ser usado em peças de concreto com comprimento de até 20 metros, por utilizar frequências da ordem de 50kHz (HAMASSAKI, 1986; REPETTE, 1991; MENEGHETTI, 1999 e RODRIGUES, 2003).

### 2.3.2 Princípio de funcionamento

Um pulso de frequência ultra-sônica é gerado e transmitido para um transdutor eletro-acústico em contato com a superfície de concreto. As vibrações são recebidas e convertidas em sinal elétrico pelo segundo transdutor eletro-acústico, após passar através do concreto. Na Figura 2 observa-se um circuito básico de funcionamento do ultra-som.

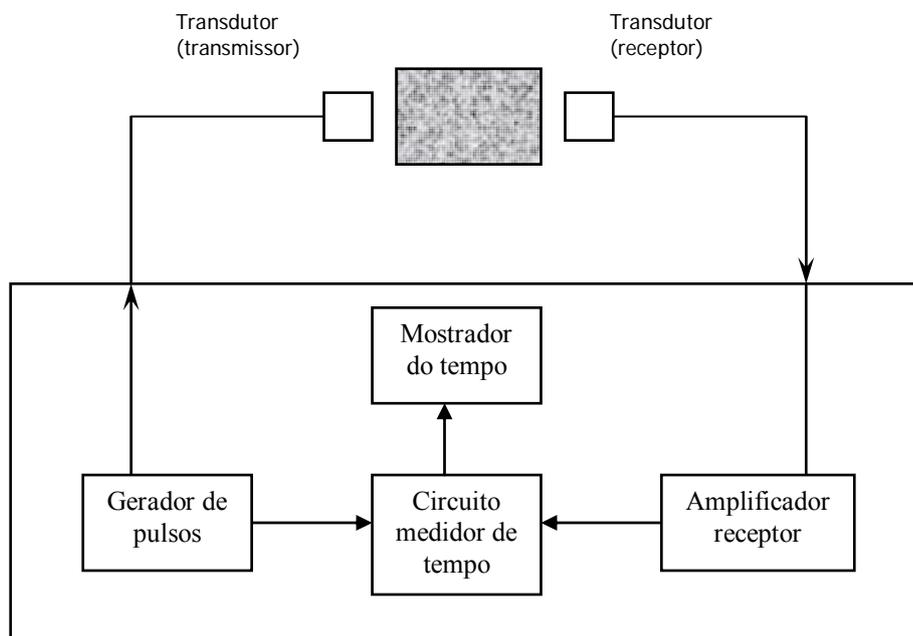


Figura 2: esquema de funcionamento do ultra-som (CARINO, 1997)

Na Figura 3 são apresentados os três tipos de transmissão, direta – semi-direta – indireta, utilizados na realização do ensaio de ultra-som (RODRIGUES, 2003).

A precisão do ensaio será maior quando os transdutores estão localizados em faces opostas do concreto, com transmissão direta. Os outros dois tipos de transmissão, semi-direta e indireta, devem ser usados quando não for possível acessar dois lados opostos do concreto, lembrando sempre que a precisão do ensaio será inferior àquela obtida com a transmissão direta (NEVILLE e BROOKS, 1997).

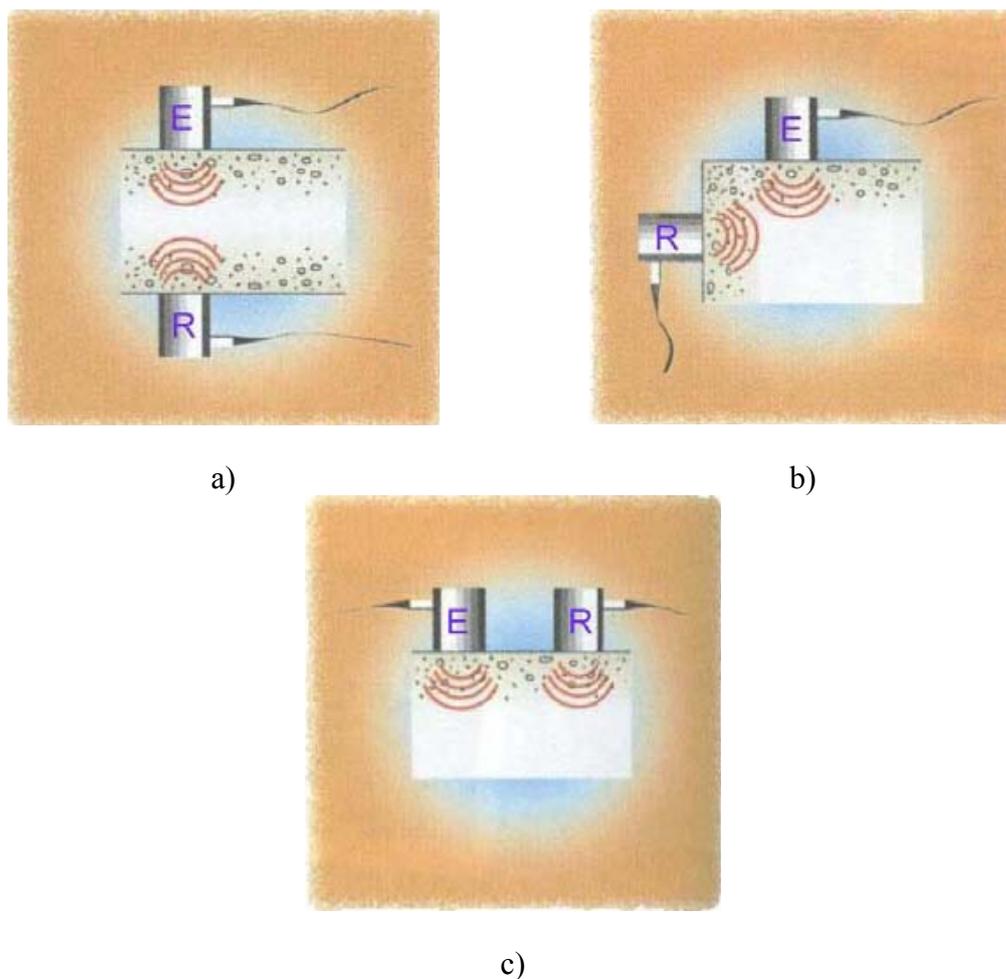


Figura 3: tipos de transmissão utilizados no ensaio de ultra-som  
a) transmissão direta; b) transmissão semi-direta; c) transmissão indireta (RODRIGUES, 2003)

### 2.3.3 Normas e especificações

A determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica é um dos ensaios não destrutivos mais difundidos, devido a sua simplicidade, rapidez de obtenção dos resultados e baixo custo.

Este método tem a vantagem de não se limitar a uma avaliação superficial das características do concreto, estendendo-se a toda a sua massa (CÁNOVAS, 1988).

A maioria dos países tem procedimentos padronizados para execução deste ensaio, determinação da resistência do concreto através da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, conforme pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5: Normas para a determinação da velocidade ultra-sônica através do concreto (KOMLOS et al., 1996)

| País/Instituto   | Designação        | Ano  |
|------------------|-------------------|------|
| Alemanha         | ISO/DIN 8047      | 1976 |
| Bélgica          | NBN 15-229        | 1983 |
| Brasil           | NBR 8802          | 1994 |
| Bulgária         | BDS 15013-80      | 1981 |
| Dinamarca        | DS 423.33         | 1984 |
| Escandinávia     | NT BUILD 213      | 1983 |
| Reino Unido      | BS 1881: Part 203 | 1994 |
| Espanha          | UNE 83-308-86     | 1983 |
| Estados Unidos   | ASTM C 597        | 1986 |
| Hungria          | MI 07-3318        | 1974 |
| Ioguslândia      | JUS U.M1.042      | 1972 |
| México           | NOM-C-275-1986    | 1987 |
| Polônia          | PN-N-06261        | 1984 |
| República Tcheca | CSN 731371        | 1986 |
| RILEM            | NDT 1             | 1983 |
| Romênia          | C-26-72           | 1986 |
| Rússia           | GOST 17624        | 1983 |
| Suécia           | SS 137240         | 1980 |
| Venezuela        | COVENIN 1691-80   | 1982 |

Análise realizada por Komlos et al. (1996) em oito destas normas (BS, ASTM, RILEM, DIN/ISO 8047 e 1048, GOST, STN e MI) mostrou que a maioria foi escrita na década de 80, ou antes.

Segundo Swamy e Ai-Hamed (1984), métodos combinados para determinação da resistência envolvendo a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas têm sido usados satisfatoriamente em várias situações em diversos países.

#### 2.3.4 Fatores que afetam a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas

Existe dificuldade em relacionar velocidade ultra-sônica e resistência à compressão do concreto, devido à influência de alguns fatores como idade, condições de cura e umidade, proporção da mistura, tipo de agregado e tipo de cimento (CÁNOVAS, 1988).

Segundo Danieletto (1986), realizar o ensaio de ultra-som é relativamente fácil, sendo, entretanto, mais importante saber interpretar os resultados.

Na seqüência serão feitos comentários de alguns dos fatores que afetam a velocidade de pulso.

#### 2.3.4.1 Agregado graúdo

Vários pesquisadores relatam que a relação entre a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e a resistência à compressão varia com as características do agregado graúdo, uma vez que ele é o maior constituinte do concreto.

Kaplan *apud* Hamassaki (1986) concluiu que concretos com semelhantes resistências à compressão podem ter diferentes velocidades de ondas ultra-sônicas em função do tipo de agregado utilizado.

Sturup, Vecchio e Caratin (1984) constataram que a dimensão máxima do agregado graúdo também exerce influência nas correlações entre velocidade ultra-sônica e resistência à compressão. Em pesquisa realizada, verificaram que o concreto dosado com agregado de dimensão máxima maior apresentou resistência mais baixa para um dado nível de velocidade de pulso.

#### 2.3.4.2 Tipo de cimento

Concretos moldados com diferentes tipos de cimento apresentaram consideráveis mudanças no comportamento nas idades iniciais, já em idades mais avançadas, não apresentam uma tendência significativa nesse sentido (STURRUP, VECCHIO e CARATIN, 1984).

Elvery e Ibrahim, *apud* Hamassaki (1986), realizaram trabalho com cimentos dos tipos Portland comum, alta resistência inicial e aluminoso, em idades de 10 a 48 horas, concluindo que o concreto com cimento aluminoso, para um mesmo nível de resistência, apresentou resultados de velocidade ultra-sônica menores que os concretos com cimento de alta resistência inicial e Portland comum. Apenas nas primeiras horas o concreto com cimento de alta resistência inicial apresentou velocidade de ondas ultra-sônicas menores que os concretos com cimento Portland comum.

Foi realizado estudo da influência do cimento em concreto de alta resistência, onde resultados semelhantes foram obtidos, ou seja, o tipo de cimento exerceu influência sobre a velocidade de propagação somente nas primeiras idades (RAVINDRARAJAH, 1992).

### 2.3.4.3 Umidade do concreto

Segundo Bungey (1982), quando os poros do concreto encontram-se preenchidos com água, verificam-se aumentos de até 5% nos valores de velocidade ultra-sônica, variando com a porosidade do concreto.

Trabalho realizado por Sturup, Vecchio e Caratin (1984) em pastas, argamassas e concretos comprova que a presença de umidade nestas misturas faz aumentar a velocidade de pulso ultra-sônico. Por exemplo, para um concreto de resistência de 20MPa, foi encontrada uma velocidade ultra-sônica de aproximadamente 4500m/s para o concreto na condição saturada e de aproximadamente 3900m/s na condição seca.

Ravindrarajah (1992) encontrou resultados semelhantes ao analisar o efeito das condições de cura sobre a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em todas as idades do concreto.

### 2.3.4.4 Temperatura do concreto

Elvery e Ibrahim (1976) encontraram em ensaios realizados que, na idade de sete horas, a velocidade de pulso passou de 0,35 para 4,2km/s e a resistência de 0,05 para 14MPa, para uma variação de temperatura de 5 para 60°C. Em idades avançadas, o efeito da temperatura tornou-se menos pronunciado.

Entretanto, Sturup, Vecchio e Caratin (1984) não conseguiram estabelecer uma relação lógica da velocidade de pulso e resistência com a temperatura.

O efeito da temperatura sobre os valores de velocidade ultra-sônica através do concreto é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Efeito da temperatura na velocidade ultra-sônica  
(BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 1986)

| Temperatura<br>(°C) | Índice de correção para a velocidade ultra-sônica |                   |
|---------------------|---|-------------------|
|                     | Concreto seco ao ar                               | Concreto saturado |
| 60                  | + 5 %   | + 4 %             |
| 40                  | + 2 %   | + 1,7 %           |
| 20                  | 0   | 0                 |
| 0                   | - 0,5 %   | - 1 %             |
| - 4                 | - 1,5 %   | - 7,5 %           |

Resultados encontrados por Meneghetti (1999) indicaram que a temperatura de hidratação não exerce influência ordenada sobre a velocidade de pulso ultra-sônico, para certo nível de resistência.

#### 2.3.4.5 Presença de armadura

Segundo Bauer (1987), quando se realiza o ensaio de ultra-som em peças de concreto armado, os resultados podem ser alterados em função da presença da armadura, devido à diferença das condições de propagação da onda no aço e no concreto, uma vez que a velocidade de propagação da onda ultra-sônica através do aço é cerca de 40% maior que a do concreto.

A BS 1881 Part 203 (1986) apresenta fórmulas para cálculo da velocidade ultra-sônica no concreto armado para duas situações distintas: quando as barras estão dispostas paralelamente ou transversalmente à direção de propagação da onda.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na revisão bibliográfica realizada neste capítulo, constataram-se algumas lacunas de conhecimento que foram consideradas para a realização deste trabalho.

Existe uma diferença nos valores de energia aparente de ativação encontrados por diferentes pesquisadores que utilizaram o mesmo tipo de cimento. Para contribuir nesta área do conhecimento determinaram-se a energia aparente de ativação para diferentes relações água/cimento, utilizando o cimento Portland de alta resistência inicial e um tipo de aditivo superplastificante.

Não se encontrou trabalho sobre determinação da energia aparente de ativação utilizando corpos-de-prova de concreto ou de pasta. Nesta pesquisa determinou-se de forma inédita a energia aparente de ativação de diferentes tipos de corpos-de-prova, quais sejam, argamassa, concreto e pasta.

Existem poucas experiências do uso do método da maturidade com concretos de alta resistência inicial. Neste trabalho determinou-se a resistência do concreto, através do ensaio de maturidade, em idades iniciais, por se tratar de concreto para *fast-track*.

Na revisão bibliográfica do ensaio de ultra-som verificou-se que alguns pesquisadores encontraram resultados satisfatórios na determinação de resistências do concreto e verificação da microestrutura do concreto. Optou-se por realizar o ensaio de ultra-som utilizando o método de transmissão direta e indireta para determinação da resistência à tração do concreto. Desta forma, pode-se verificar estatisticamente se existe diferença significativa entre os métodos de transmissão da velocidade de pulso ultra-sônico com a finalidade de comprovar a eficiência do método indireto para ser utilizado em pavimentos de concreto.

Ambos ensaios foram realizados para determinar principalmente a resistência à tração na flexão dos concretos em idades iniciais, por se tratar de concreto para *fast-track*.

Primeiramente, apresentam-se no capítulo 3 estudos realizados para investigar a possibilidade de utilizar corpos-de-prova de dimensões menores do que as indicadas pela norma brasileira para o ensaio de resistência à tração na flexão, já que o número de variáveis envolvidas no programa experimental da tese teria de ser reduzido caso os corpos-de-prova fossem moldados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2003).

### 3 ESTUDOS PRELIMINARES

Na NBR 7583 (ABNT, 1986), procedimento de execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico, consta que o controle tecnológico para pavimentação deve ser realizado pela verificação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos, confeccionados e curados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003).

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, a NBR 5738 (ABNT, 2003) recomenda a utilização de moldes prismáticos com dimensões escolhidas preferencialmente entre as dimensões básicas de 150, 250 e 450mm, onde os corpos-de-prova deverão ter seção transversal quadrada, o comprimento deve ser pelo menos 50mm maior que o vão de ensaio e 50mm maior que três vezes a dimensão do lado da seção transversal do corpo-de-prova.

A NBR 5738 (ABNT, 2003) também estabelece que a dimensão básica dos moldes prismáticos deve atender a expressão  $d \geq 4D$ , sendo que  $d$  é a dimensão básica do molde e  $D$  é a dimensão máxima característica do agregado.

Neste capítulo estuda-se a viabilidade de utilizarem-se corpos-de-prova de dimensões menores que as preconizadas pela NBR 5738 (ABNT, 2003) para o ensaio de resistência à tração na flexão. Vários foram os motivos que levaram a este estudo de redução de tamanho dos corpos-de-prova prismáticos. Estão citados, a seguir, os principais:

- a) elevada massa do corpo-de-prova de 150x150x500mm (aproximadamente 27kg) para ser manuseado, tanto para movimentá-lo dentro do laboratório, como para posicioná-lo na máquina de ensaio;
- b) necessidade de mais de uma pessoa para realização do ensaio, em função da massa do corpo-de-prova;
- c) consumo elevado de materiais constituintes do concreto;
- d) grande espaço para armazenagem dos corpos-de-prova logo após a moldagem e posteriormente para realização da cura.

Alguns pesquisadores realizaram trabalhos semelhantes, com o objetivo de comparar resultados de corpos-de-prova prismáticos de dimensões menores com os preconizados pela NBR 5738 (ABNT, 2003), para o ensaio de tração na flexão, conforme relatado a seguir.

Em pesquisa analisando a resistência à tração na flexão do concreto, Balbo (1999) encontrou resultado estatisticamente equivalente para corpos-de-prova de 150x150x500mm e para corpos-de-prova com dimensões menores, com comprimento mais comum de 320mm e seção transversal de aproximadamente 70mm.

Cervo (2004) realizou estudo comparando resultados do ensaio de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos de dimensões convencionais (150x150x500mm), com valores obtidos em amostras com dimensões reduzidas (100x100x400mm), concluindo que é viável o emprego de corpos-de-prova de dimensões reduzidas, sem necessidade de fatores de correção.

Ensaio para determinação da fadiga e tenacidade utilizando corpos-de-prova prismáticos de dimensões menores que as recomendadas pela NBR 5738 (ABNT, 2003) já foram realizados por vários pesquisadores.

Foram utilizados por Oh (1991) corpos-de-prova prismáticos nas dimensões de 100x100x500mm para determinar o comportamento à fadiga do concreto em flexão.

Amostras prismáticas nas dimensões de 100x100x300mm foram utilizadas por Hsu e Gao (1998) com a finalidade de determinar a resistência à fadiga em concretos submetidos à tensão de compressão uniaxial, realizando ensaios estáticos e dinâmicos.

Raithby e Galloway (1974) realizaram testes em prismas, adensados em mesa vibratória, com dimensões de 102x102x510mm, com a finalidade de estudar as condições de umidade, idade e taxa de carregamento na fadiga do concreto simples em flexão.

Guimarães et al. (2000) determinaram a tenacidade à flexão em concretos reforçados com fibra de aço, em corpos-de-prova prismáticos com dimensões de 100x100x400mm, adensados em mesa vibratória.

A International Organization for Standardization (ISO/FDIS 1920-3) “Testing of Concrete – Making and Curing Test Specimens”, norma padrão internacional que prescreve a moldagem e cura de amostras de concreto, indica para moldagem de corpos-de-prova prismáticos dimensões distintas das padronizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (CERVO, 2004).

Considerando o exposto, e tentando verificar a possibilidade de reduzir o tamanho dos corpos-de-prova preconizados pela NBR 5738 (ABNT, 2003) para a execução desta tese, realizou-se um estudo experimental para estabelecer estatisticamente a equivalência de resultados, entre diferentes tamanhos de corpos-de-prova no ensaio de resistência à tração na flexão.

Para os ensaios, foram adotados corpos-de-prova prismáticos de 100x100x350mm e de 150x150x500mm (NBR 5738, 2003) para determinação da resistência à tração na flexão (Figura 4). As dimensões dos corpos-de-prova 100x100x350mm obedecem ao estabelecido pela norma brasileira, que o comprimento do corpo-de-prova deve ser 50mm maior que três vezes a dimensão do lado da seção transversal do mesmo. Foram analisadas três relações água/cimento características do concreto *fast-track* para que as conclusões pudessem ser mais abrangentes. Uma descrição do programa experimental é feita a seguir.



Figura 4: fôrmas prismáticas utilizadas nos ensaios

### 3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Apresenta-se na Tabela 7 os fatores e seus respectivos níveis.

#### 3.1.1 Definição das variáveis de resposta ou dependentes

As variáveis de resposta consideradas para avaliar o comportamento do concreto foram:

- a) resistência à tração na flexão (ftf): esta é a propriedade mais importante para avaliar o concreto utilizado em pavimento;
- b) velocidade de pulso ultra-sônico: utilizou-se o ensaio de ultra-som com a finalidade de verificar a correlação desta variável com a resistência à tração na flexão.

Realizou-se o ensaio de ultra-som e posteriormente o de tração na flexão em todos os corpos-de-prova de concreto.

#### 3.1.2 Escolha dos fatores controláveis ou variáveis independentes

- a) relação água/cimento: 0,25 – 0,35 – 0,45;
- b) tamanho do corpo-de-prova: 100x100x350mm e 150x150x500mm.

Com o objetivo de facilitar o entendimento das figuras e tabelas deste capítulo, denominou-se o corpo-de-prova de dimensões 100x100x350mm de “menor”, o de dimensões 150x150x500mm, de “maior”.

Tabela 7: Fatores e seus respectivos níveis

| Fatores     | Níveis |      |       |
|-------------|--------|------|-------|
|             | (- 1)  | 0    | (+ 1) |
| Relação a/c | 0,25   | 0,35 | 0,45  |
| Tamanho     | menor  | ---  | maior |

### 3.2 ENSAIOS REALIZADOS

O experimento consistiu na realização de ensaios de resistência à tração na flexão e ultra-som para a idade de 28 dias.

### 3.2.1 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo a NBR 12142 (ABNT, 1991), em corpos-de-prova prismáticos de duas dimensões diferentes, 150x150x500mm e 100x100x350mm. Na Figura 5 apresenta-se o esquema de apoio e aplicação de carga utilizado para ruptura do corpo-de-prova 100x100x350mm. A distância entre o apoio extremo do corpo-de-prova e sua seção transversal externa foi tomada proporcionalmente ao corpo-de-prova padrão, resultando em 17,5mm, o que definiu distância entre os apoios de 315mm (com distâncias de 105mm entre os terços médios do vão de 350mm).

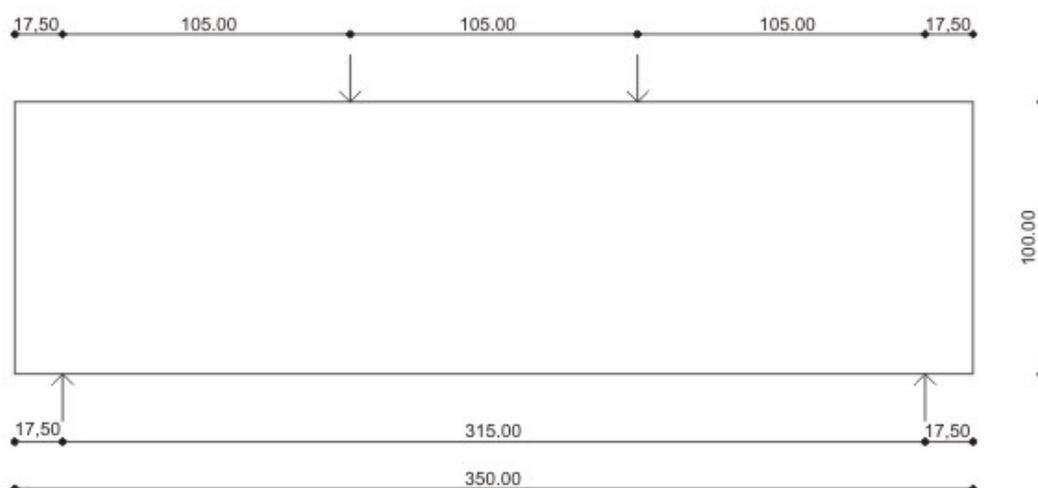


Figura 5: esquema de apoio e aplicação de carga utilizado no corpo-de-prova 100x100x350mm

### 3.2.2 Ultra-som

O ensaio de velocidade de pulso ultra-sônico foi realizado segundo a NBR 8802 (ABNT, 1994), utilizando o tipo de transmissão direta, em corpos-de-prova prismáticos de concreto de dimensões 100x100x350mm e 150x150x500mm. Utilizou-se o mesmo corpo-de-prova para ambos ensaios, realizando o ensaio de ultra-som e posteriormente o de resistência à tração na flexão.

Os ensaios de resistência à tração na flexão e de ultra-som foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Católica de Pelotas.

### 3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a moldagem dos corpos-de-prova de concreto, foram utilizados materiais disponíveis na região de Pelotas, selecionando-se os que apresentavam as características mais adequadas para a fabricação de concreto para *fast-track*. Os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova estão descritos e caracterizados na seqüência.

#### 3.3.1 Cimento

O cimento utilizado no experimento foi o Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), por se tratar de um dos cimentos indicados para pavimento de concreto fast-track devido a sua alta resistência inicial, além de ter a vantagem de ser resistente a sulfatos. Neste trabalho, o cimento teve origem de um único lote de fabricação. As características químicas, físicas e mecânicas do cimento foram cedidas pelo fornecedor e encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8: caracterização química, física e mecânica do cimento

| <b>Características</b> | <b>Determinações</b>                      | <b>Valores</b>        |
|------------------------|---|-----------------------|
| Químicas               | Perda ao Fogo – PF                        | 3,04%                 |
|                        | Resíduo Insolúvel – RI                    | 0,9%                  |
|                        | Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>      | 3,41%                 |
|                        | Equivalente Alcalino em Na <sub>2</sub> O | 0,68%                 |
|                        | Óxido de Magnésio – MgO                   | 6,35%                 |
| Físicas                | Finura - Resíduo # 200                    | 0,1%                  |
|                        | Finura - Resíduo # 325                    | 1,0%                  |
|                        | Área Específica (Blaine)                  | 456m <sup>2</sup> /kg |
|                        | Água da Pasta de Consistência Normal      | 29,4%                 |
|                        | Início de Pega                            | 189min                |
|                        | Fim de Pega                               | 255min                |
|                        | Expansibilidade a quente                  | 0,77mm                |
|                        | Massa Específica                          | 3,12g/cm <sup>3</sup> |
| Mecânicas              | Resistência à Compressão 1 dia            | 27,5MPa               |
|                        | Resistência à Compressão 3 dias           | 35,5MPa               |
|                        | Resistência à Compressão 7 dias           | 40,0MPa               |
|                        | Resistência à Compressão 28 dias          | 46,5MPa               |

### 3.3.2 Agregado miúdo

Para a confecção dos corpos-de-prova, utilizou-se areia de origem quartzosa, classificada segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005) como zona ótima. Apresenta-se na Tabela 9 a caracterização desta areia e na Figura 6 a curva granulométrica da areia utilizada.

Tabela 9: características físicas da areia

| Determinações                          | Valores obtidos               |                               |           | Método de ensaio |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-----------|------------------|
|  | Abertura da peneira ABNT (mm) | Porcentagem retida (em massa) |           |                  |
|  |                               | Individual                    | Acumulada |                  |
| Composição granulométrica              | 4,8                           | 0                             | 0         | NBR NM 248       |
|  | 2,4                           | 1                             | 1         |                  |
|  | 1,2                           | 13                            | 14        |                  |
|  | 0,6                           | 37                            | 51        |                  |
|  | 0,3                           | 42                            | 93        |                  |
|  | 0,15                          | 6                             | 99        |                  |
|  | fundo                         | 1                             | 100       |                  |
| Dimensão máxima característica (mm)    | 2,4                           |                               |           | NBR NM 248       |
| Módulo de finura                       | 2,58                          |                               |           | NBR NM 248       |
| Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> ) | 2,65                          |                               |           | NBR NM 52        |

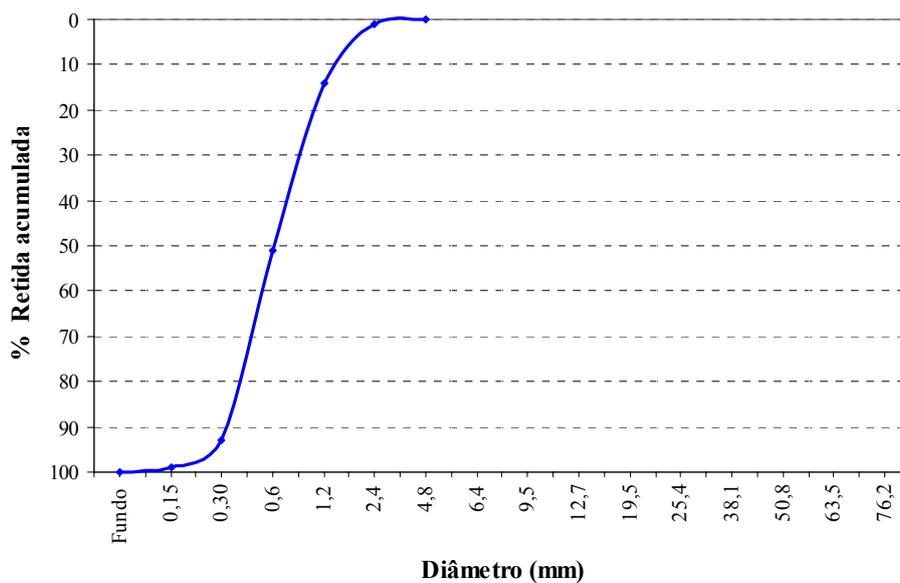


Figura 6: curva granulométrica da areia

### 3.3.3 Agregado graúdo

Utilizou-se para a confecção dos corpos-de-prova, brita de origem granítica, lavada e seca ao ar. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), os limites da composição granulométrica da brita utilizada enquadram-se na zona granulométrica 9,5/25. Apresentam-se na Tabela 10 as características da brita e na Figura 7, a curva granulométrica.

Tabela 10: características físicas da brita

| Determinações                          | Valores obtidos               |                               |           | Método de ensaio |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-----------|------------------|
|  | Abertura da peneira ABNT (mm) | Porcentagem retida (em massa) |           |                  |
|  |                               | Individual                    | Acumulada |                  |
| Composição granulométrica              | 25                            | 0                             | 0         | NBR NM 248       |
|  | 19                            | 5                             | 5         |                  |
|  | 12,5                          | 46                            | 51        |                  |
|  | 9,5                           | 26                            | 77        |                  |
|  | 6,3                           | 22                            | 99        |                  |
|  | 4,8                           | 1                             | 100       |                  |
| Dimensão máxima característica (mm)    | 19                            |                               |           | NBR NM 248       |
| Módulo de finura                       | 6,82                          |                               |           | NBR NM 248       |
| Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> ) | 2,68                          |                               |           | NBR NM 53        |

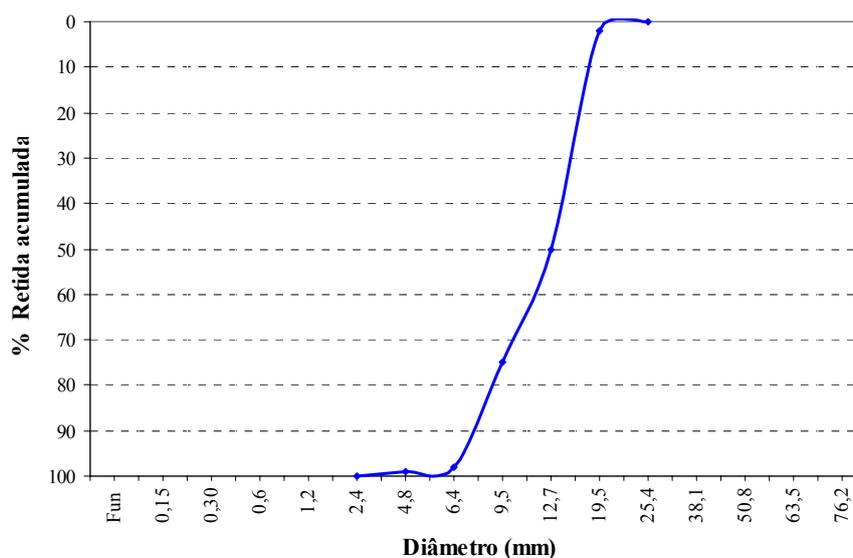


Figura 7: curva granulométrica da brita

### 3.3.4 Água

Para a confecção dos corpos-de-prova foi utilizada água da rede de abastecimento local.

### 3.3.5 Aditivo Superplastificante

Para as 3 relações água/cimento, tornou-se necessário o uso de aditivo superplastificante, a fim de se obter uma consistência de  $50 \pm 10$ mm. Neste trabalho foi utilizado aditivo superplastificante de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado (policarboxilatos).

## 3.4 DOSAGEM

Utilizou-se método de dosagem do IPT/EPUSP modificado, desenvolvido por Cremonini et al. (2001) para concreto de alta resistência inicial. Os parâmetros de dosagem utilizados foram a obtenção de um abatimento de tronco de cone de  $50 \pm 10$ mm, a manutenção de um teor de argamassa de 52% e a fixação da relação água/materiais secos em 6%. A redução da trabalhabilidade, devido às baixas relações água/cimento, foi compensada com a utilização de aditivo superplastificante em teores que variaram de 0,6 a 0,7 em relação à massa de cimento.

A Tabela 11 apresenta os traços, em massa, resultantes da dosagem. A quantidade de água foi calculada levando-se em consideração o fato de que aproximadamente 60% da quantidade do aditivo utilizado é constituído de água.

Tabela 11: proporcionamento dos concretos, em massa

| Relação a/c | Cimento | Agregado miúdo | Agregado graúdo | Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|---------|----------------|-----------------|---|
| 0,25        | 1       | 1,18           | 2,01            | 566,32                                  |
| 0,35        | 1       | 1,98           | 2,76            | 408,57                                  |
| 0,45        | 1       | 2,80           | 3,50            | 319,17                                  |

### 3.5 MOLDAGEM

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu um planejamento prévio, realizado em função do número de fôrmas disponíveis e da capacidade de mistura da betoneira. Foram feitas 2 betonadas para cada traço (T1 e T2). A moldagem foi executada de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003), conforme pode ser observado na Figura 8.

A operação de mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia de mesmo traço do concreto.



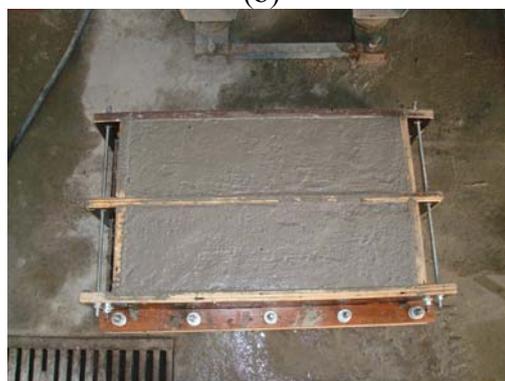
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8: moldagem dos corpos-de-prova prismáticos (a) mistura do concreto; (b) moldagem dos CPs; (c) CPs 100 x 100 x 350mm e (d) CPs 150 x 150 x 500mm

### 3.6 ADENSAMENTO

O processo de adensamento adotado foi mecânico (vibrador de agulha), seguindo as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2003), conforme ilustra a Figura 9.



(a)



(b)

Figura 9: processo de adensamento utilizado no concreto (a) CPs 150 x 150 x 500mm; (b) CPs 100 x 100 x 350mm

### 3.7 CURA

Para atingir as propriedades desejadas é importante que a cura seja realizada de maneira adequada.

Após a concretagem, os corpos-de-prova foram cobertos com placas de vidro (Figura 10), permanecendo nas formas por 24 horas. A seguir, estes corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida até a idade do ensaio, 28 dias, com temperatura controlada de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa superior a 95%, conforme a NBR 9479 (ABNT, 2006).



Figura 10: corpos-de-prova em processo inicial de cura (a) CPs cilíndricos; (b) CPs prismáticos

### 3.8 RESULTADOS OBTIDOS

Neste item são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios executados no programa experimental deste estudo preliminar, descrito anteriormente.

#### 3.8.1 Resistência à tração na flexão

Foram moldados 12 corpos-de-prova para cada relação água/cimento (0,25 – 0,35 – 0,45), 6 para cada dimensão (150x150x500mm – 100x100x350mm), sendo 3 de cada tamanho por betonada. Na Tabela 12 apresentam-se todos os resultados e a média dos corpos-de-prova de dimensões 150x150x500mm e na Tabela 13 os de dimensões 100x100x350mm. Todos os corpos-de-prova foram rompidos com 28 dias de idade.

Tabela 12: resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 150x150x500mm

| a/c  | Traço             | ftf (MPa) | ftf média (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
|------|-------------------|-----------|-----------------|-------------|-----------|
| 0,25 | T1 A <sup>4</sup> | 9,73      | 9,71            | 0,41        | 4,27      |
|      | T1 B              | 9,10      |                 |             |           |
|      | T1 C              | 9,80      |                 |             |           |
|      | T2 A              | 10,24     |                 |             |           |
|      | T2 B              | 10,01     |                 |             |           |
|      | T2 C              | 9,38      |                 |             |           |
| 0,35 | T1 A              | 7,52      | 8,02            | 0,47        | 5,90      |
|      | T1 B              | 7,88      |                 |             |           |
|      | T1 C              | 7,77      |                 |             |           |
|      | T2 A              | 7,79      |                 |             |           |
|      | T2 B              | 8,83      |                 |             |           |
|      | T2 C              | 8,30      |                 |             |           |
| 0,45 | T1 A              | 4,22      | 3,97            | 0,26        | 6,43      |
|      | T1 B              | 3,61      |                 |             |           |
|      | T1 C              | 3,71      |                 |             |           |
|      | T2 A              | 4,05      |                 |             |           |
|      | T2 B              | 4,21      |                 |             |           |
|      | T2 C              | 4,01      |                 |             |           |

Obs.: D. P. – desvio padrão

C. V. – coeficiente de variação

<sup>4</sup> Foram realizadas 2 betonadas de cada traço (T1 e T2), moldando-se 3 corpos-de-prova de cada betonada (A, B e C).

Tabela 13: resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 100x100x350mm

| a/c  | Traço | ftf (MPa) | ftf média (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
|------|-------|-----------|-----------------|-------------|-----------|
| 0,25 | T1 A  | 7,63      | 9,49            | 1,10        | 11,63     |
|      | T1 B  | 10,09     |                 |             |           |
|      | T1 C  | 9,92      |                 |             |           |
|      | T2 A  | 10,01     |                 |             |           |
|      | T2 B  | 10,58     |                 |             |           |
|      | T2 C  | 8,70      |                 |             |           |
| 0,35 | T1 A  | 7,49      | 7,56            | 0,78        | 10,39     |
|      | T1 B  | 8,19      |                 |             |           |
|      | T1 C  | 7,16      |                 |             |           |
|      | T2 A  | 8,22      |                 |             |           |
|      | T2 B  | 6,21      |                 |             |           |
|      | T2 C  | 8,07      |                 |             |           |
| 0,45 | T1 A  | 4,10      | 4,22            | 0,34        | 8,00      |
|      | T1 B  | 3,77      |                 |             |           |
|      | T1 C  | 4,12      |                 |             |           |
|      | T2 A  | 4,25      |                 |             |           |
|      | T2 B  | 4,30      |                 |             |           |
|      | T2 C  | 4,80      |                 |             |           |

Apresentam-se na Figura 11 os resultados médios do ensaio de resistência à tração na flexão para as três relações água/cimento e os dois tamanhos de corpos-de-prova estudados, ensaiados com 28 dias de idade.

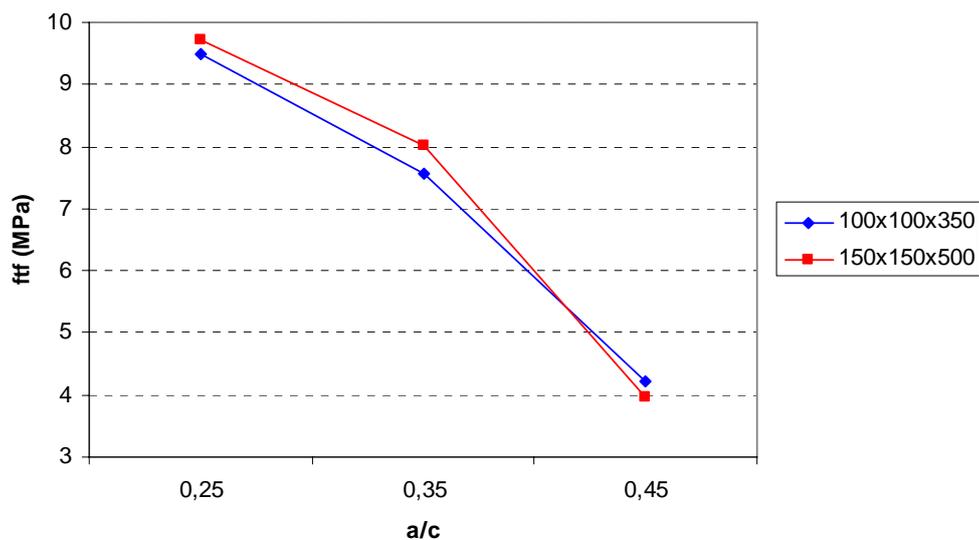


Figura 11: resistência à tração na flexão versus a/c para diferentes tamanhos de CP

Pode-se visualizar na Figura 11 que para as relações água/cimento de 0,25 e 0,35, os valores de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova de dimensões 150x150x500mm foram levemente superiores aos de dimensões 100x100x350mm, ocorrendo o inverso para a relação água/cimento de 0,45. Como era esperado, quanto maior a relação água/cimento, menor a resistência à tração na flexão.

Para comprovar estatisticamente a influência de cada uma das variáveis e possíveis interações existentes entre elas, realizou-se a análise de variância, apresentada na Tabela 14.

Tabela 14: análise de variância para diferentes tamanhos de CP

| Fator           | SQ      | GDL | MQ     | F       | Valor de p |
|-----------------|---------|-----|--------|---------|------------|
| a/c             | 188,764 | 2   | 94,382 | 235,120 | 0,000 *    |
| Tamanho         | 0,181   | 1   | 0,181  | 0,450   | 0,507      |
| a/c x Tamanho   | 0,792   | 2   | 0,396  | 0,987   | 0,385      |
| Erro            | 12,043  | 30  | 0,401  |         |            |
| Total corrigido | 201,780 | 35  |        |         |            |

Obs.: O fator com efeito significativo está assinalado com \*.

onde:

F = estatística F, valor calculado;

P = nível de significância associado ao valor calculado de F;

SQ = soma dos quadrados;

GDL = graus de liberdade;

MQ = média dos quadrados.

Na Figura 12 apresenta-se a influência da relação água/cimento, único fator significativo, na resistência à tração na flexão.

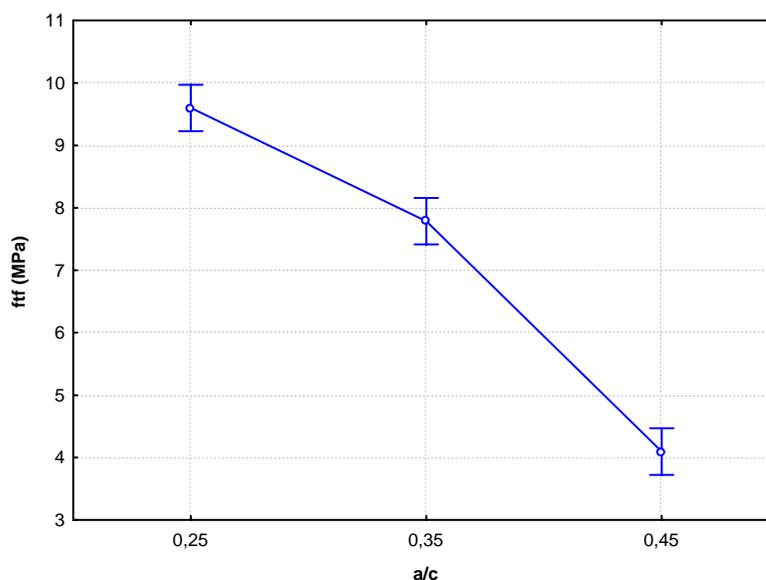


Figura 12: influência da relação água/cimento na resistência à tração na flexão

Observa-se na Figura 12 que conforme aumenta a relação água/cimento, diminui a resistência à tração na flexão, resultado já esperado. Na Tabela 7 podem-se visualizar os fatores e seus respectivos níveis.

Como o tamanho dos corpos-de-prova não apresentou diferença significativa, resultado já encontrado por Cervo (2004), optou-se por utilizar no programa experimental da tese o corpo-de-prova de dimensões 100x100x350mm, em função das vantagens expostas anteriormente.

Na Figura 13 pode-se visualizar o dispositivo empregado para execução do ensaio de resistência à tração na flexão realizado neste experimento. Alguns corpos-de-prova romperam no terço médio da distância entre os elementos de apoio, outros a ruptura ocorreu fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% de “l” (315mm). Em nenhum caso o corpo-de-prova rompeu além dos 5% citado anteriormente, portanto todos os ensaios realizados tiveram validade.



Figura 13: dispositivo empregado para execução do ensaio de resistência à tração na flexão

### 3.8.2 Ultra-som

Realizou-se o ensaio de velocidade de pulso ultra-sônico (V) utilizando os tipos de transmissão direta (MD) e indireta (MI) nos corpos-de-prova prismáticos de concreto de dimensões 150x150x500mm e 100x100x350mm, apresentando os resultados nas Tabelas 15 e 16, respectivamente. Os ensaios foram realizados nos mesmos corpos-de-prova do ensaio de resistência à tração na flexão, podendo-se desta forma tentar relacionar os resultados dos dois ensaios. O ensaio de ultra-som foi realizado com 28 dias de idade. Na Figura 14 pode-se visualizar o ensaio de ultra-som pelo método indireto.

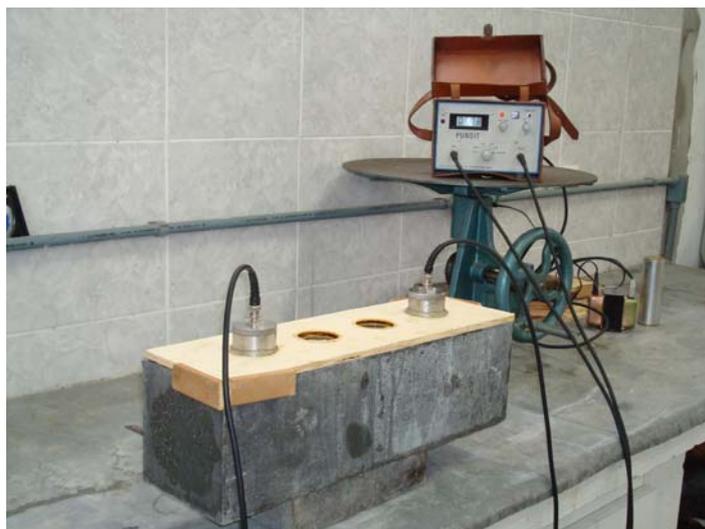


Figura 14: execução do ensaio de ultra-som pelo método indireto

Tabela 15: velocidade de pulso ultra-sônico (V) pelo método direto (MD) e indireto (MI) de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 150x150x500mm

| a/c  | Traço | MD<br>V<br>(km/s) | MD<br>Vméd<br>(km/s) | D. P.<br>(MPa) | C. V.<br>(%) | MI<br>V<br>(km/s) | MI<br>Vméd<br>(km/s) | D. P.<br>(MPa) | C. V.<br>(%) |
|------|-------|-------------------|----------------------|----------------|--------------|-------------------|----------------------|----------------|--------------|
| 0,25 | T1 A  | 4,96              | 4,92                 | 0,07           | 1,48         | 4,78              | 4,76                 | 0,04           | 0,93         |
|      | T1 B  | 4,93              |                      |                |              | 4,76              |                      |                |              |
|      | T1 C  | 4,77              |                      |                |              | 2,66 *            |                      |                |              |
|      | T2 A  | 4,94              |                      |                |              | 4,75              |                      |                |              |
|      | T2 B  | 4,96              |                      |                |              | 4,81              |                      |                |              |
|      | T2 C  | 4,94              |                      |                |              | 4,69              |                      |                |              |
| 0,35 | T1 A  | 4,83              | 4,85                 | 0,02           | 0,47         | 4,64              | 4,65                 | 0,03           | 0,57         |
|      | T1 B  | 4,83              |                      |                |              | 4,63              |                      |                |              |
|      | T1 C  | 4,86              |                      |                |              | 4,66              |                      |                |              |
|      | T2 A  | 4,88              |                      |                |              | 4,67              |                      |                |              |
|      | T2 B  | 4,85              |                      |                |              | 4,62              |                      |                |              |
|      | T2 C  | 4,82              |                      |                |              | 4,69              |                      |                |              |
| 0,45 | T1 A  | 4,31              | 4,34                 | 0,03           | 0,73         | ---               | --- (1)              | --- (1)        | --- (1)      |
|      | T1 B  | 4,33              |                      |                |              | ---               |                      |                |              |
|      | T1 C  | 4,32              |                      |                |              | ---               |                      |                |              |
|      | T2 A  | 4,33              |                      |                |              | ---               |                      |                |              |
|      | T2 B  | 4,34              |                      |                |              | ---               |                      |                |              |
|      | T2 C  | 4,40              |                      |                |              | ---               |                      |                |              |

(1) Dados perdidos em função de problemas no equipamento

O valor de velocidade assinalado com asterisco no método indireto, para a relação água/cimento de 0,25 (2,66) não foi considerado para calcular a média por se tratar de um valor espúrio, conforme análise estatística realizada. O valor de velocidade de pulso ultra-sônico, obtido através do método indireto, para a relação água/cimento 0,45, não foi medido pois no momento da leitura o aparelho de ultra-som não estava funcionando.

Tabela 16: velocidade de pulso ultra-sônico (V) pelo método direto (MD) e indireto (MI) de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 100x100x350mm

| a/c  | Traço | MD V (km/s) | MD Vméd (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | MI V (km/s) | MI Vméd (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
|------|-------|-------------|----------------|-------------|-----------|-------------|----------------|-------------|-----------|
| 0,25 | T1 A  | 4,95        | 4,98           | 0,02        | 0,43      | 4,75        | 4,77           | 0,04        | 0,94      |
|      | T1 B  | 4,98        |                |             |           | 4,77        |                |             |           |
|      | T1 C  | 4,96        |                |             |           | 4,83        |                |             |           |
|      | T2 A  | 4,99        |                |             |           | 4,71        |                |             |           |
|      | T2 B  | 4,98        |                |             |           | 4,80        |                |             |           |
|      | T2 C  | 5,01        |                |             |           | 4,73        |                |             |           |
| 0,35 | T1 A  | 4,99        | 4,95           | 0,02        | 0,44      | 4,73        | 4,73           | 0,03        | 0,68      |
|      | T1 B  | 4,96        |                |             |           | 4,75        |                |             |           |
|      | T1 C  | 4,96        |                |             |           | 4,67        |                |             |           |
|      | T2 A  | 4,94        |                |             |           | 4,75        |                |             |           |
|      | T2 B  | 4,93        |                |             |           | 4,75        |                |             |           |
|      | T2 C  | 4,94        |                |             |           | 4,71        |                |             |           |
| 0,45 | T1 A  | 4,63        | 4,63           | 0,05        | 1,10      | 4,28        | 4,26           | 0,07        | 1,71      |
|      | T1 B  | 4,56        |                |             |           | 4,16        |                |             |           |
|      | T1 C  | 4,57        |                |             |           | 4,27        |                |             |           |
|      | T2 A  | 4,67        |                |             |           | 4,38        |                |             |           |
|      | T2 B  | 4,68        |                |             |           | 4,27        |                |             |           |
|      | T2 C  | 4,65        |                |             |           | 4,22        |                |             |           |

Na Figura 15 podem-se visualizar os resultados médios do ensaio de ultra-som, métodos direto e indireto, para os dois tamanhos de corpos-de-prova.

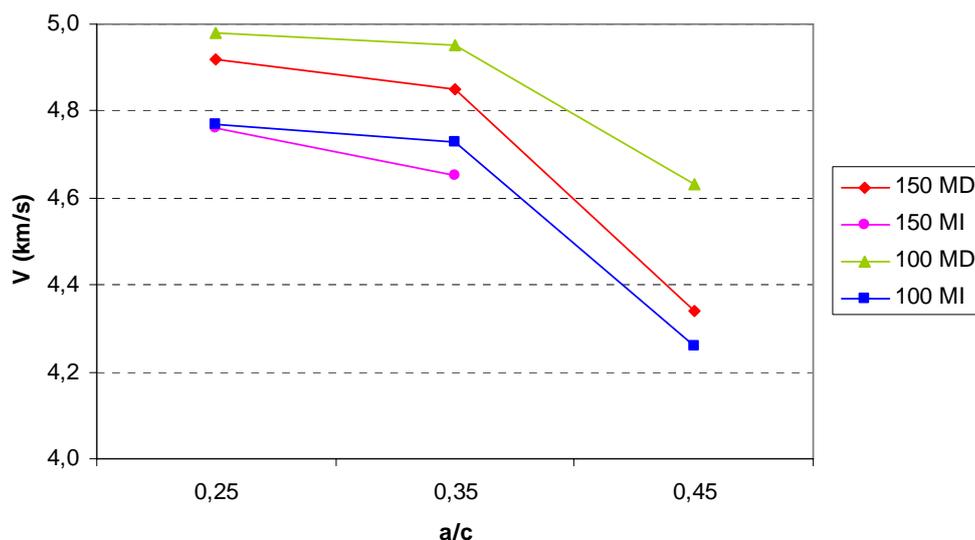


Figura 15: velocidade de pulso ultra-sônico versus a/c para diferentes tamanhos de CP

Como era esperado, com o aumento da relação água/cimento ocorreu um decréscimo na velocidade de pulso ultra-sônico, tanto no método direto como no indireto, independente das dimensões dos corpos-de-prova.

Observam-se na Figura 15 que os corpos-de-prova de dimensões 100x100x350mm apresentaram resultados de velocidade de pulso ultra-sônico um pouco superiores que os de dimensões 150x150x350mm, independente do método utilizado.

Apresenta-se, na Figura 16, um gráfico de correlação dos resultados de resistência à tração na flexão e velocidade ultra-sônica de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 150x150x500mm, utilizando o método direto.

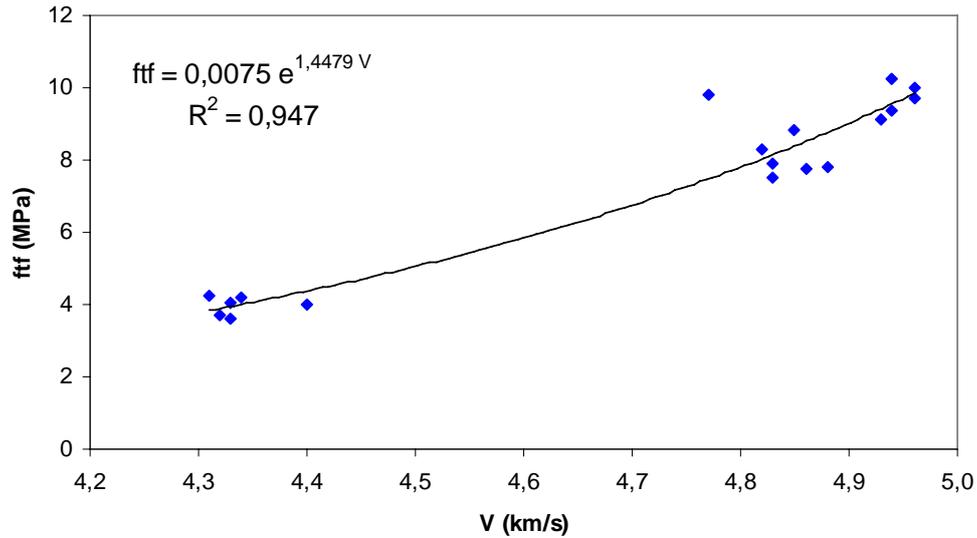


Figura 16: resistência à tração na flexão versus velocidade ultra-sônica de CPs 150x150x500mm utilizando o método direto

Apresenta-se, na Figura 17, um gráfico de correlação dos resultados de resistência à tração na flexão e velocidade ultra-sônica de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 100x100x350mm, utilizando o método direto.

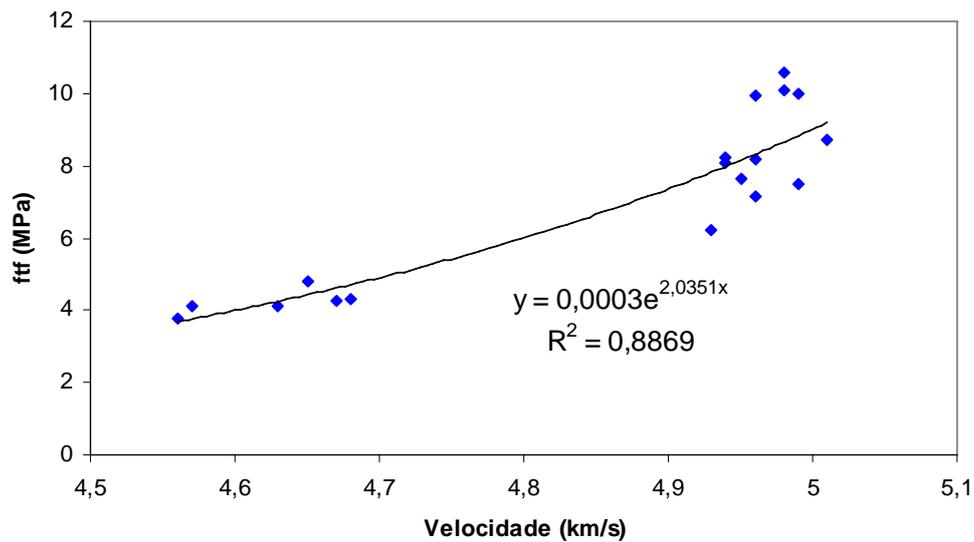


Figura 17: resistência à tração na flexão versus velocidade ultra-sônica de CPs 100x100x350mm utilizando o método direto

Conforme se pode observar nas Figuras 16 e 17, encontraram-se bons coeficientes de correlação tanto para os corpos-de-prova de dimensões 150x150x150mm ( $R^2 = 94,7\%$ ), como para os 100x100x350mm ( $R^2 = 88,7\%$ ), utilizando o método direto de ultra-som.

Apresenta-se, na Figura 18, um gráfico de correlação dos resultados de resistência à tração na flexão e velocidade ultra-sônica de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 150x150x500mm, utilizando o método indireto.

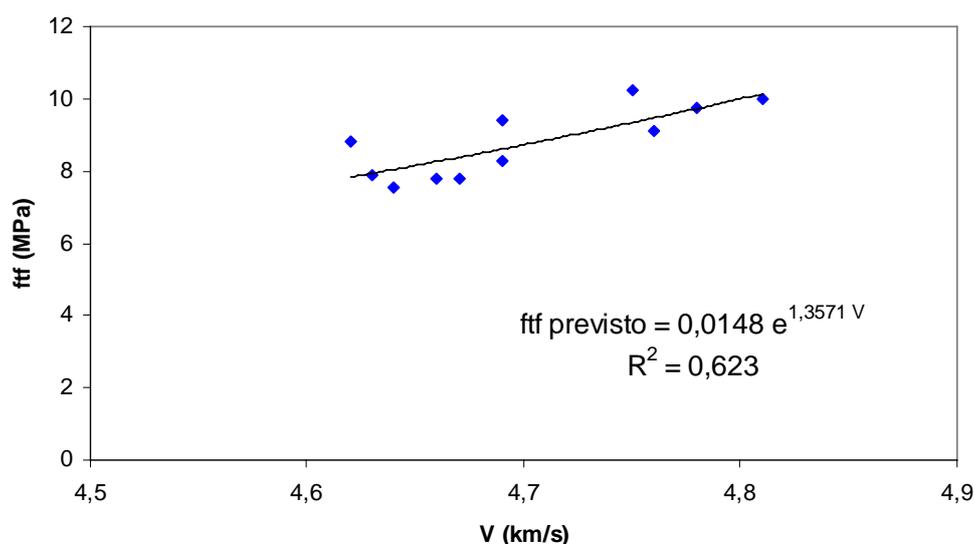


Figura 18: resistência à tração na flexão versus velocidade ultra-sônica de CPs 150x150x500mm utilizando o método indireto

Apresenta-se, na Figura 19, um gráfico de correlação dos resultados de resistência à tração na flexão e velocidade ultra-sônica de corpos-de-prova prismáticos de dimensões 100x100x350mm, utilizando o método indireto.

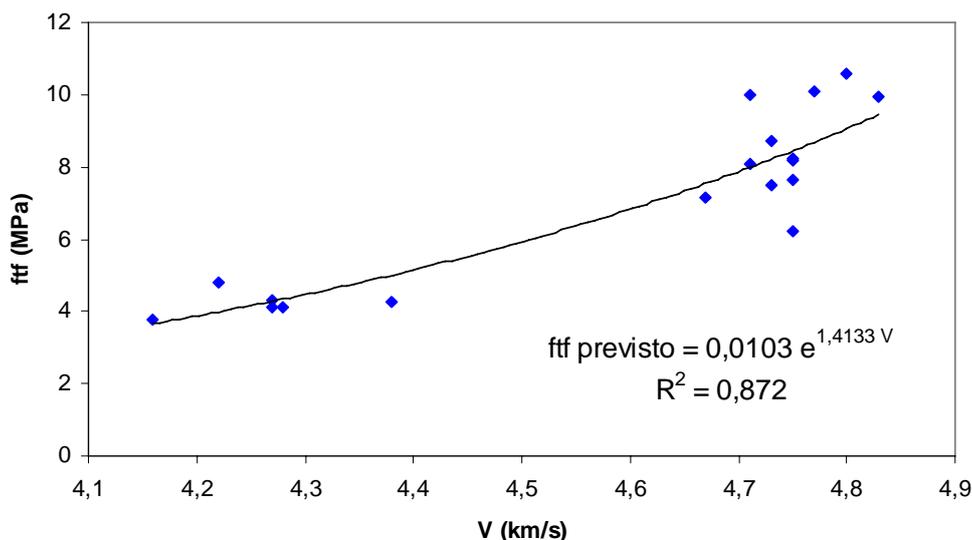


Figura 19: resistência à tração na flexão versus velocidade ultrassônica de CPs 100x100x350mm utilizando o método indireto

Para os gráficos de correlação apresentados nas Figuras 18 e 19, utilizando o método indireto, encontrou-se um baixo coeficiente de correlação para os corpos-de-prova de dimensões 150x150x500mm ( $R^2 = 62,3\%$ ) e para os corpos-de-prova de dimensões menores (100x100x350mm), encontrou-se um coeficiente de correlação de 87,2%, considerado bom. Acredita-se que o coeficiente de correlação do corpo-de-prova de dimensões 100x100x350mm foi baixo, em razão de não terem sido utilizados os valores da relação água/cimento 0,45 no gráfico de correlação.

Considerando os bons resultados dos coeficientes de correlação encontrados entre resistência à tração na flexão e velocidade de ultra-som (Figuras 16, 17 e 19), optou-se por dar continuidade ao ensaio de ultra-som no programa experimental deste trabalho, buscando determinar as relações existentes entre este e o ensaio de resistência à tração na flexão para concretos de alta resistência nas primeiras idades.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **4.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO**

A execução dos experimentos foi desenvolvida no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Católica de Pelotas, durante os meses de dezembro de 2007 e de janeiro a maio de 2008.

Realizou-se um estudo comparativo de diferentes tamanhos de corpos-de-prova prismáticos, um preconizado pela NBR 5738 (ABNT, 2003) e outro com dimensões de 100x100x350mm, para o ensaio de resistência à tração na flexão, apresentado no capítulo 3.

No programa experimental deste trabalho realizaram-se ensaios destrutivos de resistência à tração na flexão e resistência à compressão de concretos curados em câmara úmida e rompidos as idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias, chamados no fluxograma de concretos de referência.

Ensaio não destrutivos de maturidade e ultra-som também foram realizados. Com a finalidade de determinar a energia aparente de ativação no ensaio de maturidade, utilizaram-se diferentes tipos de corpos-de-prova. A ASTM C 1074 (1998) preconiza o corpo-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm, submetido ao ensaio de compressão. Neste trabalho utilizaram-se também corpos-de-prova de argamassa de dimensões 40x40x160mm, de concreto com dimensões 100x100x350mm determinando a resistência à tração na flexão e corpos-de-prova de pasta de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, submetido ao ensaio de resistência à compressão. Para o ensaio de ultra-som utilizou-se o tipo de transmissão direta e indireta com três e dois pontos de recepção. Na Figura 20 apresenta-se um fluxograma dos ensaios realizados neste trabalho.

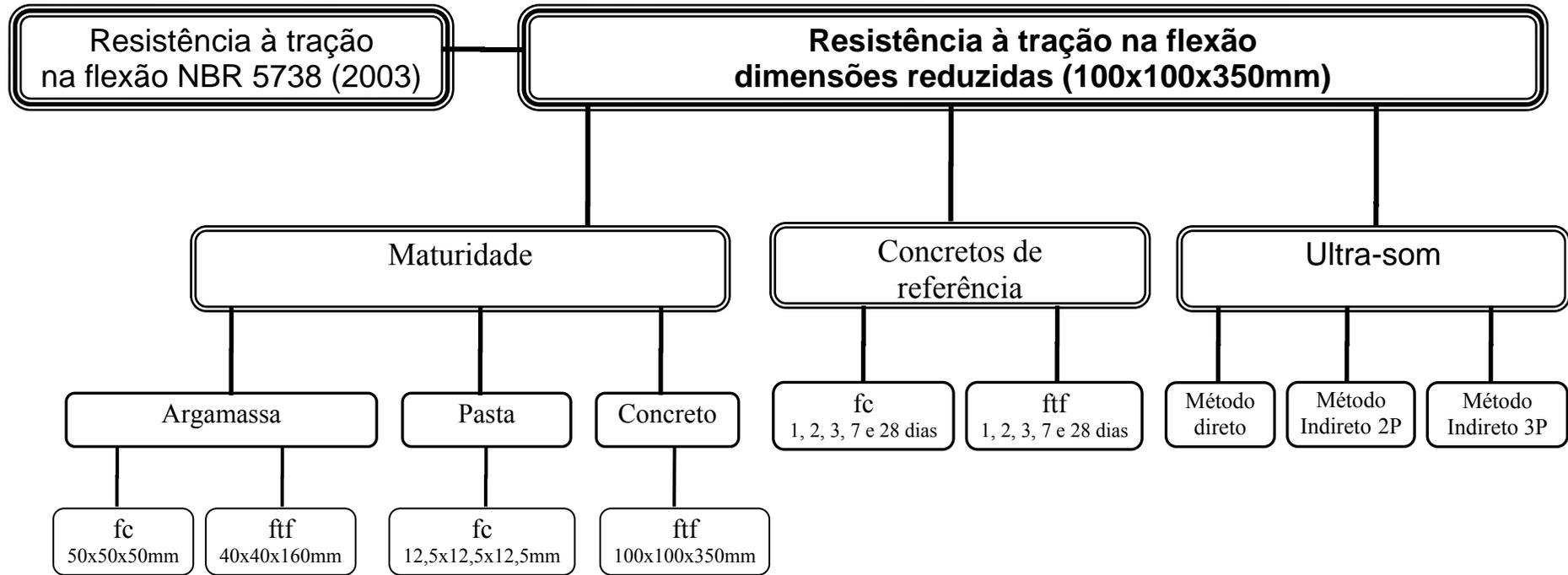


Figura 20: fluxograma com os tipos de corpos-de-prova utilizados e ensaios realizados neste trabalho

#### 4.1.1 Definição das variáveis de resposta ou independentes

As duas primeiras variáveis de resposta foram obtidas através de ensaios destrutivos do concreto (concretos de referência): o de resistência à tração na flexão, por ser o mais utilizado hoje em dia para avaliar a resistência de pavimento de concreto, e o de resistência à compressão por também ser usado em algumas situações.

A variável de maturidade já é empregada internacionalmente para controle da resistência do pavimento de concreto e a velocidade de pulso ultra-sônico é obtida com muita facilidade, além de ser bastante eficiente para determinar a resistência à compressão do concreto, sendo ambas variáveis obtidas por ensaios não destrutivos.

- a) resistência à tração na flexão (ftf);
- b) resistência à compressão (fc);
- c) curva da maturidade;
- d) velocidade do pulso ultra-sônico (V).

#### 4.1.2 Escolha dos fatores controláveis ou variáveis dependentes

Foram analisadas 3 relações água/cimento, características de concreto para *fast-track*, para que as conclusões possam ser feitas dentro de uma faixa de relação água/cimento. As idades de 1, 2 e 3 dias têm a finalidade de avaliar as propriedades de um concreto para *fast-track* e as restantes são idades padrão de ensaio do concreto.

- a) relação água/cimento: 0,25 – 0,35 – 0,45
- b) idade: 1 – 2 – 3 – 7 e 28 dias

## 4.2 ENSAIOS REALIZADOS

O experimento consistiu na realização de ensaios destrutivos, resistência à compressão simples e resistência à tração na flexão; e de ensaios não destrutivos, maturidade e ultra-som.

#### 4.2.1 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples seguiu as prescrições da Norma Brasileira NBR 5739 (ABNT, 1994), em corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 100x200mm.

O ensaio foi realizado nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias.

#### 4.2.2 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo o ensaio de dois cutelos (NBR 12142, 1991), em corpos-de-prova prismáticos de concreto de dimensões 100x100x350mm.

Para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão foi adquirido o dispositivo conforme Figura 21.



Figura 21: dispositivo para o ensaio de resistência à tração na flexão acoplado na prensa

O ensaio foi realizado nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias.

### 4.2.3 Maturidade

O ensaio de maturidade foi realizado segundo a norma ASTM C 1074 (1998). Para a determinação da energia aparente de ativação a norma preconiza o uso de corpos-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm para determinação da resistência à compressão. Neste trabalho utilizou-se o corpo-de-prova recomendado pela norma e outros três tipos de corpos-de-prova com a finalidade de verificar estatisticamente se existe diferença significativa entre os resultados dos diferentes corpos-de-prova. Portanto foram moldados corpos-de-prova de quatro dimensões, dois de argamassa, um de concreto e um de pasta. Os corpos-de-prova de argamassa têm as seguintes dimensões: 50x50x50mm (conforme a norma) e 40x40x160mm. As dimensões dos corpos-de-prova de concreto são 100x100x350mm e dos de pasta 12,5x12,5x12,5mm.

Todos os corpos-de-prova, tanto os de concreto, como os de argamassa e pasta, foram curados de acordo com a ASTM C 1074 (1998), em tanques com três condições isotérmicas de temperaturas. As temperaturas utilizadas neste ensaio foram escolhidas em função da realidade de clima da nossa região e da temperatura superficial do concreto, 10, 30 e 50°C.

A energia aparente de ativação do cimento foi determinada utilizando corpos-de-prova de resistência à compressão de argamassa (ASTM C 1074, 1998) e, alternativamente, de resistência à compressão de pasta e de resistência à tração na flexão de argamassa e de concreto.

Para os corpos-de-prova de argamassa 40x40x160mm e de concreto 100x100x350mm - ensaio de tração na flexão - foram utilizadas as mesmas idades de ruptura dos corpos-de-prova de argamassa 50x50x50mm - ensaio de compressão - sendo o procedimento de determinação das idades deste último, de acordo com a ASTM C 1074 (1998). Não foi possível utilizar as mesmas idades de ruptura para as pastas, em função das mesmas não poderem ser desmoldadas na idade indicada. Para o cálculo da resistência média na idade de ruptura, foram utilizados três exemplares.

Nas Figuras 22, 23 e 24 podem-se observar as fôrmas que foram utilizadas no ensaio de maturidade, sendo que duas delas (50x50x50mm e 100x100x350mm) foram confeccionadas especificamente para esta tese.



a)

b)

Figura 22: fôrmas para argamassa utilizadas no ensaio de maturidade a) 40x40x160mm; b) 50x50x50mm



Figura 23: fôrma para concreto, 100x100x350mm, utilizada no ensaio



Figura 24: fôrma para pasta, 12,5x12,5x12,5mm

Também foi necessário confeccionar 3 tanques isotérmicos de diferentes temperaturas para viabilizar a execução do ensaio de maturidade. O tanque apresentado nas Figuras 25 e 26 funcionou com temperatura de 10°C e o da Figura 27 com temperatura de 30°C. Outro tanque igual ao da Figura 27 foi confeccionado para trabalhar com a temperatura de 50°C.



Figura 25: tanque para a temperatura de 10°C



a)



b)

Figura 26: detalhes do tanque de temperatura de 10°C a) vista interna; b) detalhe do agitador de água

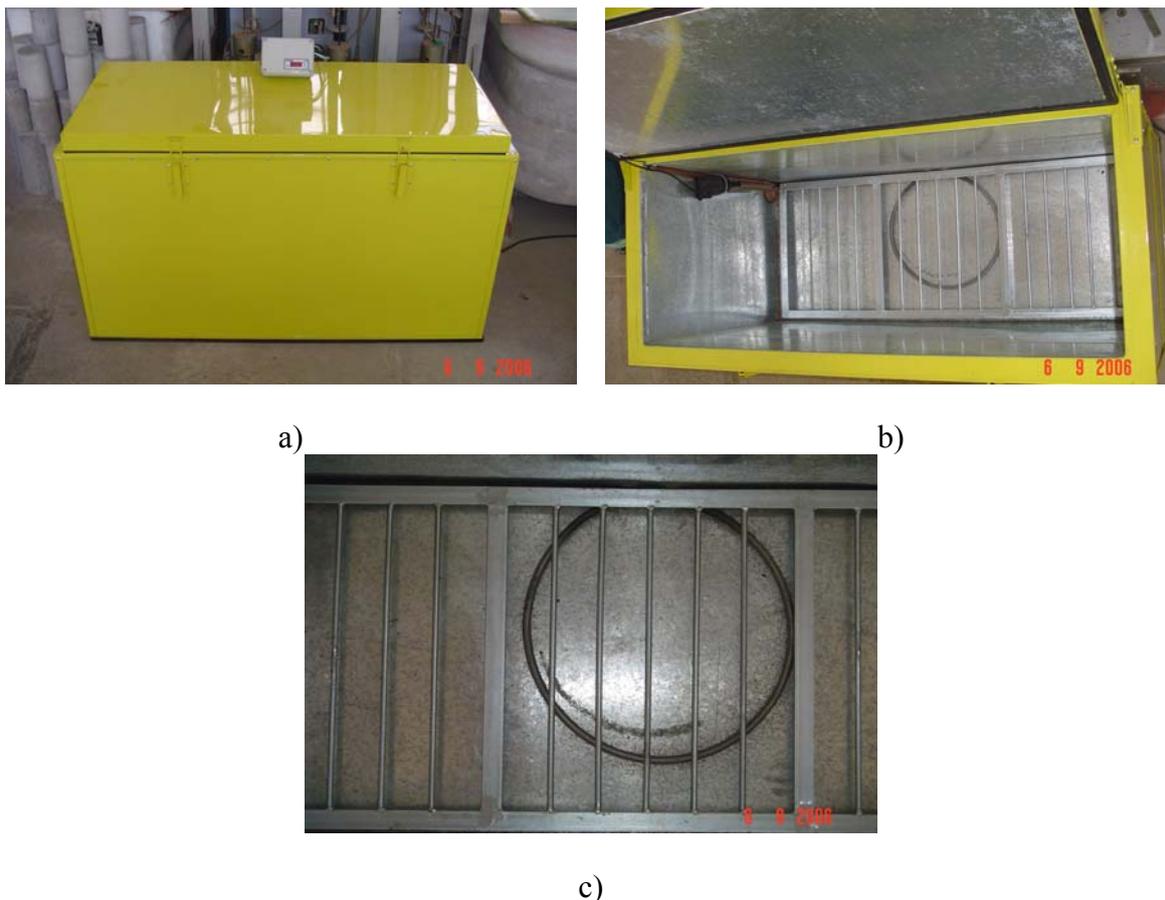


Figura 27: tanque para ser utilizado com temperatura de 30°C a) vista geral; b) detalhe da parte interna; c) detalhe da resistência

Para um melhor entendimento do ensaio da maturidade, apresenta-se a seguir a metodologia de execução e cálculos do mesmo, cujos dados foram obtidos no programa experimental desta tese.

O procedimento ASTM C 1074 (1998) indica que o primeiro ensaio de compressão seja realizado na idade de duas vezes o tempo final de pega, e que quando o ensaio de pega das misturas não for realizado, sugere que o primeiro ensaio seja quando o corpo-de-prova atinge uma resistência à compressão em torno de 4MPa (procedimento adotado neste trabalho). Esta sugestão aliada às outras 5 idades necessárias são, de acordo com a ASTM C 1074 (1998), suficientes para que se possa obter uma descrição da curva de desenvolvimento da resistência no tempo, permitindo que os parâmetros  $f_{c\infty}$ ,  $k_t$  e  $t_0$  possam ser obtidos através de uma regressão não-linear.

Inicialmente foram moldados corpos-de-prova (CPs) de argamassa com dimensões 50x50x50mm, com a finalidade de determinar a primeira idade de ruptura dos CPs. Os moldes utilizados estão apresentados na Figura 22 (b).

Os corpos-de-prova foram curados em tanques com três condições isotérmicas de temperaturas, 10, 30 e 50°C, conforme Figuras 25, 26 e 27.

O traço de argamassa utilizado foi determinado segundo a orientação da ASTM C 1074 (1998), que diz que se deve utilizar as relações areia/cimento, em massa, igual à relação agregado graúdo/cimento das misturas de concreto, mantendo-se para a pasta de cimento da argamassa, a relação água/materiais cimentícios e a quantidade de aditivo utilizadas no concreto. Apresentam-se na Tabela 17 os traços de concreto e argamassa utilizados no programa experimental.

Tabela 17: traços de concreto e argamassa

| Material    | Quantidade (kg) |           |
|-------------|-----------------|-----------|
|             | Concreto        | Argamassa |
| Cimento     | 1               | 1         |
| Areia       | 1,98            | 2,76      |
| Brita       | 2,76            | ---       |
| a/c         | 0,35            | 0,35      |
| Aditivo (%) | 0,60            | 0,60      |

Os corpos-de-prova foram desmoldados, divididos e colocados nos três tanques com temperaturas distintas. Conforme descrito na norma, determina-se a primeira idade quando se atinge a tensão de ruptura à compressão de 4MPa e a partir desta idade obtém-se as outras multiplicando a idade inicial por dois para obter o segundo ponto e assim por diante, até obter seis pontos. Como exemplo apresenta-se os tempos de ruptura para a temperatura de 10°C: 13:46, 27:32, 55:04, 110:08, 220:16, 440:32 (horas:minutos). Na Tabela 18 apresentam-se os tempos de ruptura para as três temperaturas estudadas, para a relação água/cimento de 0,35.

Tabela 18: tempos para atingir 4MPa de resistência à compressão em diferentes temperaturas e a/c = 0,35

| 10°C          |             |              | 30°C          |             |              | 50°C          |             |              |
|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| Tempo (h:min) | Carga (kgf) | Tensão (MPa) | Tempo (h:min) | Carga (kgf) | Tensão (MPa) | Tempo (h:min) | Carga (kgf) | Tensão (MPa) |
| 12:40         | 630         | 2,52         | 6:16          | 460         | 1,84         | 3:19          | 280         | 1,12         |
| 12:59         | 720         | 2,88         | 6:36          | 650         | 2,60         | 3:30          | 310         | 1,24         |
| 13:16         | 800         | 3,20         | 6:50          | 750         | 3,00         | 3:40          | 550         | 2,20         |
| 13:25         | 840         | 3,36         | 7:00          | 930         | 3,72         | 3:50          | 760         | 3,04         |
| 13:43         | 960         | 3,84         | 7:01          | 960         | 3,84         | 3:55          | 960         | 3,84         |
| 13:46         | 1000        | 4,00         | 7:03          | 960         | 3,84         | 3:57          | 990         | 3,96         |
| 13:48         | 1000        | 4,00         | 7:05          | 1010        | 4,04         | 3:58          | 1040        | 4,16         |
| 13:49         | 1010        | 4,04         | 7:07          | 1020        | 4,08         | 4:01          | 1110        | 4,44         |

Na Tabela 19 apresenta-se com quantas horas foi atingida a tensão de ruptura de 4,0MPa para as diferentes temperaturas para a relação água/cimento de 0,35. Estes tempos foram os utilizados para os ensaios de ruptura das argamassas à compressão.

Tabela 19: resultado dos tempos para as diferentes temperaturas

| Temperatura (°C) | Tempo (h:min) |
|------------------|---------------|
| 10               | 13:46         |
| 30               | 7:05          |
| 50               | 3:58          |

Posteriormente foram moldados 54 corpos-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm. Destes 54 CPs, foram colocados 18 em cada tanque (10, 30 e 50°C), sendo utilizados três exemplares para o cálculo da resistência média na idade de ruptura.

Com os tempos e as tensões de ruptura, utiliza-se um programa computacional que faz uma regressão não-linear para obter os melhores valores das variáveis investigadas, “ $f_{c\infty}$  (resistência última)”, “ $kt$  (taxa constante)” e “ $t_0$  (idade quando se inicia o desenvolvimento de  $f_c$ )” para as três temperaturas. Estas variáveis são as admitidas pela ASTM C 1074 (1998) para modelar o desenvolvimento da resistência à compressão no tempo matematicamente através da Equação 6:

$$f_{c\infty} = \frac{kt(t-t_0)}{1+kt(t-t_0)} \quad \text{(Equação 6)}$$

Na Tabela 20 e na Figura 28 podem-se visualizar os tempos e as tensões de ruptura para a temperatura de 10°C.

Tabela 20: tempos e tensões médias de ruptura para a temperatura de 10°C

| Tempo (h) | Tensão (MPa) |
|-----------|--------------|
| 13,8      | 4,16         |
| 27,5      | 24,00        |
| 55,1      | 44,80        |
| 110,1     | 59,01        |
| 220,3     | 64,60        |
| 440,5     | 66,27        |

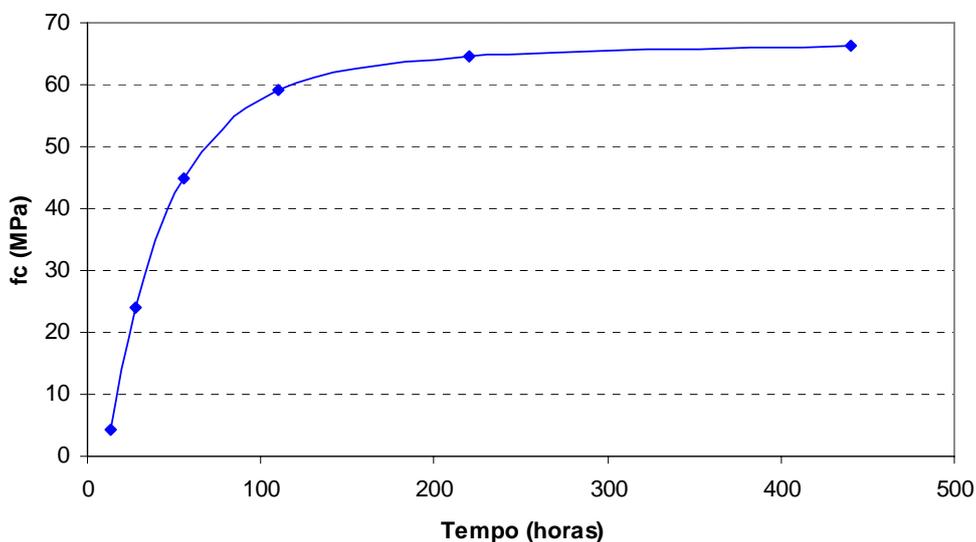


Figura 28: tensão de ruptura x tempo

Na Tabela 21 apresentam-se os valores dos parâmetros da equação matemática que melhor se ajustaram aos dados experimentais, para as três temperaturas estudadas e relação água/cimento de 0,35.

Tabela 21: dados obtidos no software

| T  | $fc_{\infty}$ | kt     | $t_0$   | $R^2$  | $\ln(kt)$ | 1/T    |
|----|---------------|--------|---------|--------|-----------|--------|
| 10 | 72,4219       | 0,0371 | 12,4537 | 0,9958 | -3,2928   | 0,0035 |
| 30 | 62,8714       | 0,1121 | 6,7129  | 0,9978 | -2,1881   | 0,0033 |
| 50 | 54,1379       | 0,2574 | 3,9341  | 0,9934 | -1,3570   | 0,0031 |

A energia aparente de ativação é obtida relacionando-se o inverso da temperatura com o logaritmo natural de “kt”, no chamado gráfico de Arrhenius, como exemplificado na Figura 29. Faz-se uma regressão linear com o coeficiente angular da reta, sendo proporcional ao valor de “Ea”.

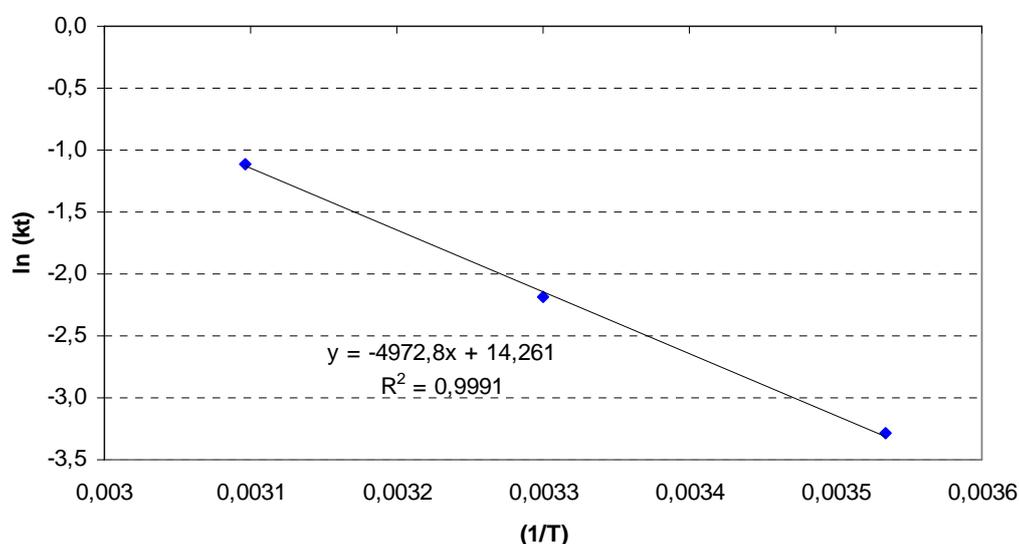


Figura 29: exemplo de gráfico de Arrhenius

O valor da energia aparente de ativação (Ea) é o coeficiente angular da reta, multiplicado pela constante universal dos gases (8,314J/mol), 41,34kJ/mol.

Para a obtenção da curva de maturidade, calculou-se a idade equivalente ( $t_e$ ) utilizando a função FHP, Equação 4, com temperatura de referência de 20°C, e valor da energia aparente de ativação de 41,34kJ/mol. Utilizou-se os valores de resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto (100x200mm) curados em câmara úmida, a temperatura de 24°C e rompidos em diferentes idades, conforme apresentado na Tabela

22. O traço deste concreto está apresentado na Tabela 17. Apresenta-se a curva de maturidade na Figura 30.

Tabela 22: valores de resistência média à compressão do concreto

| Idade (dias) | Tensão (MPa) |
|--------------|--------------|
| 1            | 46,20        |
| 2            | 52,52        |
| 3            | 56,72        |
| 7            | 65,41        |
| 28           | 71,24        |

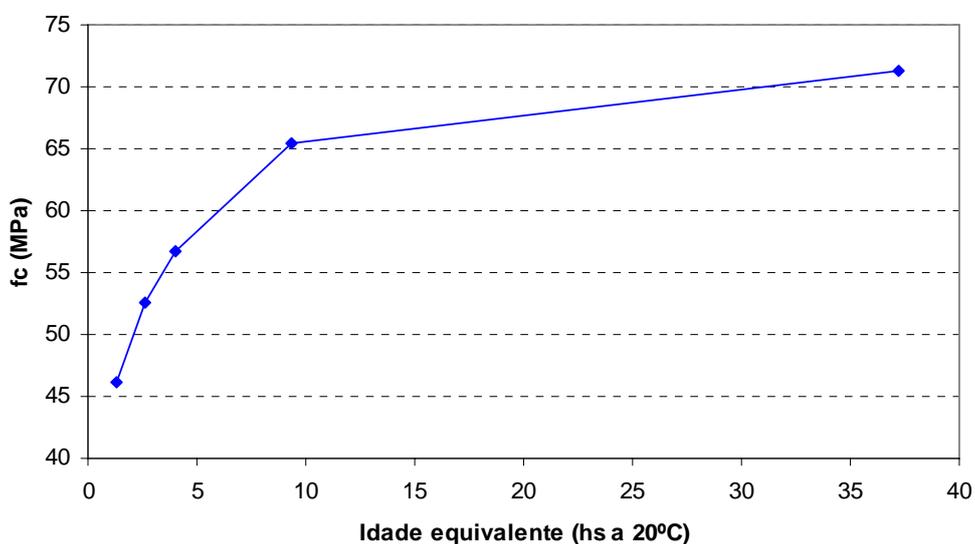


Figura 30: curva de maturidade para resistência à compressão

#### 4.2.4 Ultra-som

O ensaio de velocidade de pulso ultra-sônico seguiu as prescrições da NBR 8802 (ABNT, 1994), utilizando os tipos de transmissão direta e indireta. No tipo de transmissão indireta realizou-se o ensaio com 2 e com 3 pontos de recepção da onda, com a finalidade de verificar qual deles fornecia resultados mais próximos do método direto. Foi realizado em corpos-de-prova de concreto de dimensões 100x100x350mm em condição de câmara úmida e tanques de 10, 30 e 50°C. Na Figura 31 pode-se

visualizar o aparelho sendo aferido, nas Figuras 32, 33 e 34 apresenta-se a execução do ensaio de ultra-som pelo método direto, método indireto 3 pontos e método indireto 2 pontos respectivamente e na Figura 35 a medição do corpo-de-prova com paquímetro.



a)



b)

Figura 31: realização da aferição do ultra-som a) aferição do equipamento; b) leitura do tempo



Figura 32: ensaio de ultra-som pelo método direto



a)



b)

Figura 33: ensaio de ultra-som pelo método indireto com 3 pontos a) realização do ensaio; b) leitura do tempo



Figura 34: ensaio de ultra-som pelo método indireto com 2 pontos



Figura 35: medição do corpo-de-prova com paquímetro

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Para a moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados materiais disponíveis na região de Pelotas, selecionando-se os que apresentavam as características mais adequadas para a fabricação de concreto para *fast-track*. Os materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova estão descritos e caracterizados na seqüência.

#### 4.3.1 Cimento Portland de alta resistência inicial

O cimento utilizado no experimento foi o Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). A escolha deste tipo de cimento deveu-se ao fato de se tratar de concreto para *fast-track*. O cimento teve origem de um único lote de fabricação. As características químicas, físicas e mecânicas do cimento foram cedidas pelo fornecedor e encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23: caracterização química, física e mecânica do cimento

| <b>Características</b> | <b>Determinações</b>             | <b>Valores</b>          |
|------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Químicas               | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 4,19%                   |
|                        | SiO <sub>2</sub>                 | 19,51%                  |
|                        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 2,59%                   |
|                        | CaO                              | 60,45%                  |
|                        | MgO                              | 4,74%                   |
|                        | SO <sub>3</sub>                  | 3,20%                   |
|                        | Perda ao fogo                    | 3,22%                   |
|                        | CaO livre                        | 1,33%                   |
|                        | Resíduo insolúvel                | 0,84%                   |
|                        | Equivalente alcalino             | 0,54%                   |
| Físicas                | Expansibilidade a quente         | 0,7mm                   |
|                        | Tempo de início de pega          | 2h:15mim                |
|                        | Tempo de fim de pega             | 3h:09mim                |
|                        | Consistência normal              | 29,4%                   |
|                        | Blaine                           | 4.357cm <sup>2</sup> /g |
|                        | # 200                            | 0,22%                   |
|                        | # 325                            | 1,41%                   |
| Mecânicas              | Resistência à compressão 1 dia   | 23,1MPa                 |
|                        | Resistência à compressão 3 dias  | 33,8MPa                 |
|                        | Resistência à compressão 7 dias  | 39,7MPa                 |
|                        | Resistência à compressão 28 dias | 48,7MPa                 |

#### 4.3.2 Agregado miúdo

O agregado utilizado nos ensaios do programa experimental deste trabalho é o mesmo caracterizado no item 3.3.2.

#### 4.3.3 Agregado graúdo

Utilizou-se o mesmo agregado graúdo dos ensaios preliminares, caracterizado no item 3.3.3.

#### 4.3.4 Água

Para a confecção dos corpos-de-prova foi utilizada água da rede de abastecimento local.

#### 4.3.5 Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado foi o mesmo dos ensaios preliminares, identificado no item 3.3.5.

## 4.4 DOSAGEM

Inicialmente realizou-se a dosagem do concreto, utilizando o método do IPT/EPUSP modificado, desenvolvido por Cremonini et al. (2001) para concreto de alta resistência inicial.

Com o objetivo de alcançar elevadas resistências com o menor consumo de cimento possível, os autores propuseram um método adaptado para o concreto de alta resistência, a partir do método experimental IPT/EPUSP, utilizado para dosagem de concreto convencional. Este método de dosagem de concreto de alta resistência propõe as seguintes considerações:

- a) fixação de uma baixa relação água/materiais secos ( $H$ );
- b) determinação do teor de argamassa ( $\alpha$ );
- c) utilização de material pozolânico (sílica ativa, cinza volante e outros) como substituição de parte do volume de material cimentante.

### 4.4.1 Procedimentos adotados para a realização da dosagem

Seguindo as considerações propostas anteriormente, apresenta-se o procedimento adotado neste trabalho para a dosagem do concreto.

#### 4.4.1.1 Fixação da relação água/materiais secos

Adotou-se o valor de  $H = 6\%$ .

#### 4.4.1.2 Cálculo da relação água/cimento

Estabelecido o valor de  $H$ , calculou-se a relação água/cimento através da “Lei de Lyse”, conforme as Equações 7 e 8. Determinou-se traços com diferentes relações  $1:m$  (cimento : agregados secos totais, em massa), e para cada valor de  $m$  calculou-se um valor de relação água/cimento.

$$H (\%) = \frac{a/c}{1+m} \quad (\text{Equação 7})$$

$$a/c = H (\%) \times (1+m) \quad (\text{Equação 8})$$

Apresenta-se na Tabela 24 os valores determinados para  $1:m$  e suas respectivas relações água/cimento.

Tabela 24: valores determinados para  $1:m$  e suas relações água/cimento

| $1:m$   | $a/c$ |
|---------|-------|
| 1 : 2,5 | 0,21  |
| 1 : 4,0 | 0,30  |
| 1 : 5,5 | 0,39  |
| 1 : 6,5 | 0,47  |

#### 4.4.1.3 Determinação do teor de argamassa ( $\alpha$ )

O teor ideal de argamassa foi determinado experimentalmente (Tabela 25), utilizando-se os materiais disponíveis na região, seguindo-se o procedimento recomendado por Helene e Terzian (1992). Através de um traço piloto  $1:m$ , definiu-se, por tentativas e observações práticas, o teor de argamassa que proporcionou a mistura mais homogênea. O traço piloto utilizado foi de 1:4 e o teor ideal de argamassa encontrado foi de 52%.

Tabela 25: determinação do teor ideal de argamassa

| $\alpha$  | Traço unitário       | Areia        |           | Cimento     |           | Água        |           |
|-----------|----------------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|           |                      | Traço        | Acréscimo | Traço       | Acréscimo | Traço       | Acréscimo |
| 42        | 1 : 1,1 : 2,9        | 7,59         |           | 6,90        |           | 2,07        |           |
|           |                      |              | 0,98      |             | 0,24      |             | 0,07      |
| 44        | 1 : 1,2 : 2,8        | 8,57         |           | 7,14        |           | 2,14        |           |
|           |                      |              | 1,06      |             | 0,27      |             | 0,08      |
| 46        | 1 : 1,3 : 2,7        | 9,63         |           | 7,41        |           | 2,22        |           |
|           |                      |              | 1,14      |             | 0,28      |             | 0,09      |
| 48        | 1 : 1,4 : 2,6        | 10,77        |           | 7,69        |           | 2,31        |           |
|           |                      |              | 1,23      |             | 0,31      |             | 0,09      |
| 50        | 1 : 1,5 : 2,5        | 12,00        |           | 8,00        |           | 2,40        |           |
|           |                      |              | 1,33      |             | 0,33      |             | 0,10      |
| <b>52</b> | <b>1 : 1,6 : 2,4</b> | <b>13,33</b> |           | <b>8,33</b> |           | <b>2,50</b> |           |
|           |                      |              | 1,45      |             | 0,37      |             | 0,11      |
| 54        | 1 : 1,7 : 2,3        | 14,78        |           | 8,70        |           | 2,61        |           |
|           |                      |              | 1,58      |             | 0,39      |             | 0,12      |
| 56        | 1 : 1,8 : 2,2        | 16,36        |           | 9,09        |           | 2,73        |           |
|           |                      |              | 1,74      |             | 0,43      |             | 0,13      |
| 58        | 1 : 1,9 : 2,1        | 18,10        |           | 9,52        |           | 2,86        |           |
|           |                      |              | 1,90      |             | 0,48      |             | 0,14      |
| 60        | 1 : 2,0 : 2,0        | 20,00        |           | 10,00       |           | 3,00        |           |

## 4.4.1.4 Desdobramento do traço

Conhecendo-se o teor ideal de argamassa ( $\alpha$ ) e a proporção de agregados secos totais ( $m$ ) definidos previamente, calculou-se o traço unitário 1:a:p (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo, em massa), conforme as Equações 9 e 10.

$$a = \alpha \times (1 + m) - 1 \quad (\text{Equação 9})$$

$$p = m - a \quad (\text{Equação 10})$$

Apresenta-se na Tabela 26 as proporções de agregados secos totais ( $m$ ) e os traços unitários utilizados.

Tabela 26: proporções de agregados secos totais e traços unitários

| 1:m     | Traço unitário  |
|---------|-----------------|
| 1 : 2,5 | 1 : 0,82 : 1,68 |
| 1 : 4,0 | 1 : 1,60 : 2,40 |
| 1 : 5,5 | 1 : 2,38 : 3,12 |
| 1 : 6,5 | 1 : 2,90 : 3,60 |

#### 4.4.1.5 Dosagem de aditivo superplastificante

Com a finalidade de obter a consistência desejada,  $50 \pm 10$ mm, utilizou-se aditivo superplastificante. A dosagem utilizada foi a mínima possível para atingir a consistência requerida, ficando entre 0,53% e 0,97%.

#### 4.4.2 Resultados obtidos da dosagem

Neste item são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos concretos, com a finalidade de traçar o diagrama de dosagem.

Na Tabela 27 apresentam-se os traços utilizados, referente a 20,00kg de brita, e seus respectivos abatimentos de tronco de cone.

Tabela 27: traços utilizados referente a 20,00kg de brita

|                 | Traços  |         |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
|                 | 1 : 2,5 | 1 : 4,0 | 1 : 5,5 | 1 : 6,5 |
| brita (kg)      | 20,00   | 20,00   | 20,00   | 20,00   |
| cimento (kg)    | 11,90   | 8,33    | 6,41    | 5,56    |
| areia (kg)      | 9,76    | 13,33   | 15,26   | 16,12   |
| água (kg)       | 2,50    | 2,50    | 2,50    | 2,62    |
| aditivo (%)     | 0,97    | 0,53    | 0,60    | 0,60    |
| a/c             | 0,21    | 0,30    | 0,39    | 0,47    |
| abatimento (mm) | 50      | 60      | 55      | 55      |

A determinação da consistência do concreto foi realizada através do ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test), de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), conforme pode ser observado na Figura 36.



a)

b)

Figura 36: execução do ensaio de abatimento de tronco de cone  
a) moldagem; b) medida do abatimento (slump)

Foram moldados 8 corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 100 x 200mm, para cada traço, sendo rompidos dois para cada idade. As idades ensaiadas foram 1, 3, 7 e 28 dias. O adensamento utilizado foi mecânico (vibrador de agulha), conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003).

Concluído o adensamento, as formas foram cobertas com placas de vidro, com o objetivo de evitar a evaporação da água de amassamento dos corpos-de-prova para o meio ambiente nas primeiras horas após a concretagem. Depois de desmoldados, os corpos-de-prova foram colocados em câmara úmida, até a idade de ruptura, com temperatura controlada de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa superior a 95%, conforme a NBR 9479 (ABNT, 2006).

Apresenta-se na Tabela 28 os resultados de resistência à compressão dos traços 1 : 2,5, 1 : 4,0, 1 : 5,5 e 1 : 6,5. Na Figura 37 apresenta-se o diagrama de dosagem dos concretos ensaiados.

Tabela 28: resistência à compressão dos diferentes traços

| Idade<br>(dias) | Traços  |         |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
|                 | 1 : 2,5 | 1 : 4,0 | 1 : 5,5 | 1 : 6,5 |
| 1               | 58,06   | 34,06   | 21,52   | 22,28   |
| 1               | 62,71   | 35,01   | 20,37   | 20,69   |
| 3               | 78,30   | 63,03   | 48,26   | 40,36   |
| 3               | 79,83   | 63,79   | 49,02   | 39,60   |
| 7               | 82,76   | 75,12   | 49,97   | 42,34   |
| 7               | 84,03   | 70,35   | 50,80   | 43,29   |
| 28              | 82,89   | 75,44   | 55,39   | 48,70   |
| 28              | 95,49   | 76,71   | 51,88   | 55,39   |

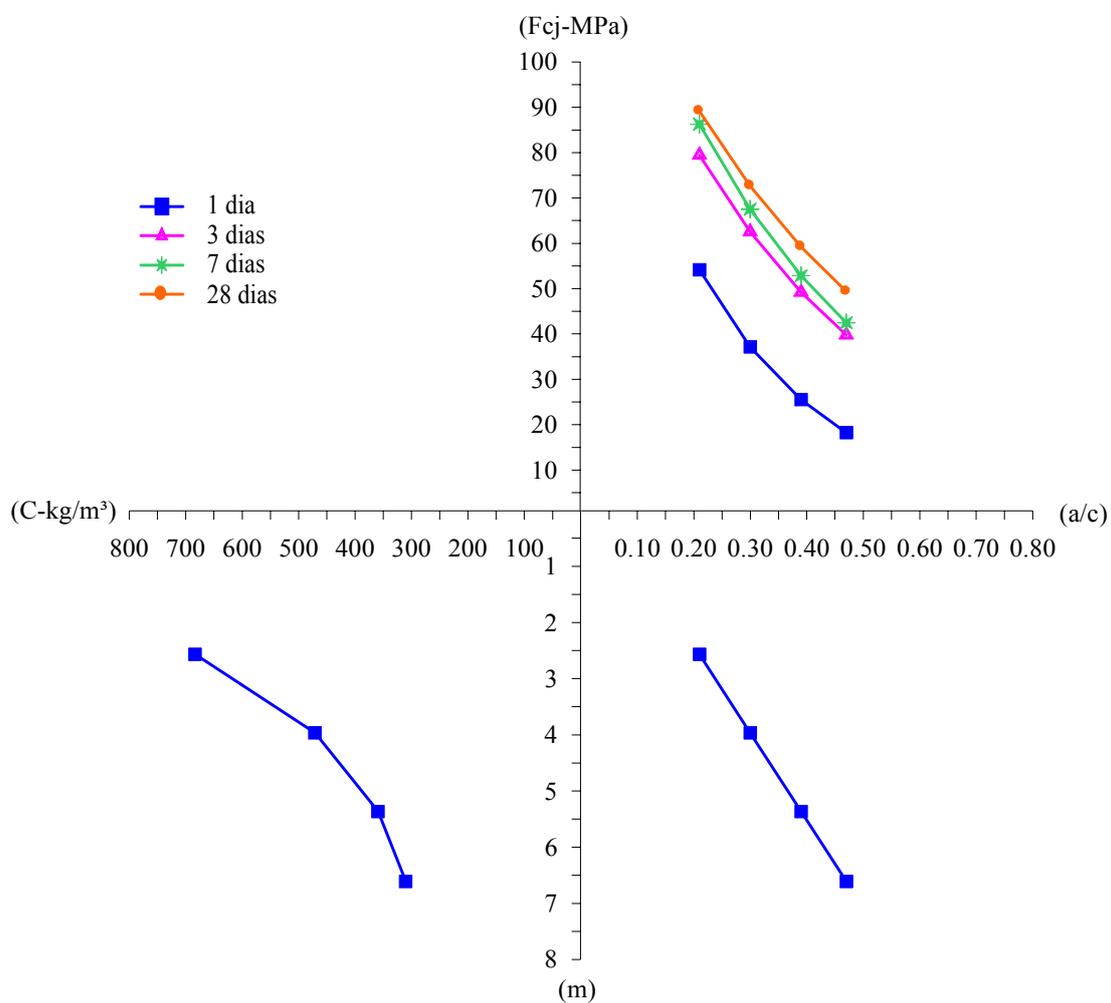


Figura 37: diagrama de dosagem dos concretos ensaiados

Os traços de concreto utilizados no programa experimental (Tabela 29) foram obtidos do diagrama de dosagem apresentado na Figura 37.

Tabela 29: proporcionamento dos concretos, em massa

| a/c  | Cimento | Agregado miúdo | Agregado graúdo | Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|---------|----------------|-----------------|---|
| 0,25 | 1       | 1,18           | 2,01            | 566,32                                  |
| 0,35 | 1       | 1,98           | 2,76            | 408,57                                  |
| 0,45 | 1       | 2,80           | 3,50            | 319,17                                  |

Para a obtenção dos traços de argamassa foram utilizadas as relações areia/cimento, em massa, igual à relação agregado graúdo/cimento das misturas de concreto, mantendo-se para a pasta de cimento da argamassa, a relação água/materiais cimentícios e a quantidade de aditivo utilizados no concreto (ASTM C 1074, 1998). Apresentam-se na Tabela 30 os traços de argamassa utilizados na tese.

Tabela 30: traços de argamassas utilizados

| a/c  | Cimento | Agregado miúdo |
|------|---------|----------------|
| 0,25 | 1       | 2,01           |
| 0,35 | 1       | 2,76           |
| 0,45 | 1       | 3,50           |

Para confecção dos traços de pasta, utilizaram-se as mesmas relações água/cimento dos concretos e das argamassas, mantendo a porcentagem de aditivo utilizada para cada traço.

#### 4.5 MOLDAGEM

Foram moldados corpos-de-prova de concreto prismáticos 100x100x350mm e cilíndricos de dimensões 100x200mm.

A moldagem dos corpos-de-prova de concreto seguiu um planejamento prévio, realizado em função do número de formas disponíveis, do tamanho dos tanques de cura e da capacidade de mistura da betoneira.

Foram realizadas três betonadas para cada traço (T1, T2 e T3), conforme pode ser observado nas Tabelas 31 e 32. Na Tabela 31 apresenta-se o cronograma de moldagem dos corpos-de-prova de concreto curados em câmara úmida e na Tabela 32, dos corpos-de-prova de concreto curados em tanques com água com temperaturas de 10, 30 e 50°C (ensaio de maturidade). O cronograma de moldagem e ruptura detalhado dos corpos-de-prova de concreto utilizados no ensaio de maturidade encontram-se no Anexo A.

Para cada relação água/cimento, foram moldados 15 corpos-de-prova para serem curados em câmara úmida, utilizando-se 3 para cada idade de ruptura. Para cada tanque e relação água/cimento, foram moldados 18 corpos-de-prova, sendo utilizados 3 para cada idade de ruptura. A moldagem dos corpos-de-prova de concreto foi executada de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003).

Tabela 31: cronograma de moldagem dos diferentes traços de concreto curados em câmara úmida

| a/c  | T1 – T2 – T3 |
|------|--------------|
| 0,25 | 11/12/07     |
| 0,35 | 12/12/07     |
| 0,45 | 08/01/08     |

Tabela 32: cronograma de moldagem dos diferentes traços de concreto curados em tanques com distintas temperaturas

| a/c  | 2008        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | Temperatura |       |       |       |       |       |       |       |       |
|      | 10°C        |       |       | 30°C  |       |       | 50°C  |       |       |
|      | T1          | T2    | T3    | T1    | T2    | T3    | T1    | T2    | T3    |
| 0,25 | 21/02       | 25/02 | 27/02 | 24/01 | 28/01 | 30/01 | 29/01 | 30/01 | 06/02 |
| 0,35 | 24/01       | 30/01 | 11/02 | 08/02 | 13/02 | 14/02 | 12/02 | 13/02 | 14/02 |
| 0,45 | 28/01       | 06/02 | 08/02 | 21/02 | 25/02 | 27/02 | 22/01 | 22/01 | 22/01 |

A operação de mistura dos materiais foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de mistura de 320 litros, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia de mesmo traço do concreto.

Todos os materiais foram dosados em massa. A seqüência de colocação dos materiais na betoneira em movimento foi mantida constante para todas as misturas:

- a) 100% da brita + 30% da água;
- b) 100% do cimento + 70% da água;
- c) 80% do aditivo;
- d) 100% da areia;
- e) 20% do aditivo (permitindo ajustes finais no traço).

O tempo de mistura dos traços de concreto foi mantido o mesmo para todas as misturas, conforme descrito na seqüência:

- a) brita + água + cimento → 1 minuto;
- b) + aditivo → 2 minutos e 30 segundos;
- c) + areia → 3 minutos.

O cronograma de moldagem das argamassas está apresentado na Tabela 33. A moldagem dos corpos-de-prova de argamassa também seguiu um planejamento prévio, em função do número de formas disponíveis e da capacidade de mistura da argamassadeira (Figura 38). A mistura de todos os corpos-de-prova de argamassa seguiu as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 1996). O cronograma de moldagem e ruptura detalhado dos corpos-de-prova de argamassa utilizados no ensaio de maturidade encontram-se no Anexo A.



Figura 38: argamassadeira utilizada para produção das argamassas

Tabela 33: cronograma de moldagem das argamassas

| a/c  | Temperatura |          |          |
|------|-------------|----------|----------|
|      | 10°C        | 30°C     | 50°C     |
| 0,25 | 04/03/08    | 24/01/08 | 29/01/08 |
| 0,35 | 11/02/08    | 06/03/08 | 12/02/08 |
| 0,45 | 06/02/08    | 21/02/08 | 22/01/08 |

Para cada relação água/cimento e temperatura, foram moldados 18 corpos-de-prova nas dimensões 50x50x50mm e 18 corpos-de-prova nas dimensões 40x40x160mm, utilizando-se 3 para cada idade de ruptura.

Foram moldados 18 corpos-de-prova de pasta com dimensões 12,5x12,5x12,5mm, misturando-se manualmente por 4 minutos (KANTRO, 1980) e logo a seguir preenchendo as formas metálicas. Para a determinação da resistência média à compressão foram utilizados 3 corpos-de-prova para cada idade de ensaio. Apresenta-se na Tabela 34 o cronograma de moldagem das pastas.

Tabela 34: cronograma de moldagem das pastas

| a/c  | Temperatura |          |          |
|------|-------------|----------|----------|
|      | 10°C        | 30°C     | 50°C     |
| 0,25 | 14/04/08    | 07/04/08 | 31/03/08 |
| 0,35 | 14/04/08    | 23/04/08 | 31/03/08 |
| 0,45 | 14/04/08    | 23/04/08 | 31/03/08 |

#### 4.6 ADENSAMENTO

O processo de adensamento adotado para os corpos-de-prova de concreto foi mecânico (vibrador de agulha), seguindo as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2003).

Para os corpos-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm, o adensamento foi manual, em duas camadas, aplicando-se em cada uma delas 32 golpes com um soquete retangular de base 13x25mm feito de material não absorvente e não abrasivo (Figura 39), conforme as recomendações da ASTM C 109/C 109M (2002).



Figura 39: adensamento do corpo-de-prova 50x50x50mm

Os corpos-de-prova de argamassa de dimensões 40x40x160mm também foram adensados manualmente, em duas camadas, aplicando-se em cada uma delas 12 golpes

com um soquete retangular de base 80x20mm feito de material não absorvente e não abrasivo (Figura 40), segundo a ASTM C 348 (2002).



Figura 40: adensamento do corpo-de-prova 40x40x160mm

Não foi necessário realizar adensamento nos corpos-de-prova de pasta.

#### 4.7 CURA

Após as concretagens os corpos-de-prova utilizados para os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão foram cobertos com placas de vidro, permanecendo nas formas por 24 horas. A seguir, estes corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida até a idade dos ensaios (1, 2, 3, 7 e 28 dias), com temperatura controlada de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa superior a 95%, conforme a NBR 9479 (ABNT, 2006).

Os outros corpos-de-prova de concreto, os de argamassa e os de pasta, utilizados para o ensaio da maturidade, logo após a concretagem foram colocados nos tanques com três

temperaturas distintas, 10, 30 e 50°C. Uma hora antes do primeiro ensaio todos foram desmoldados e submersos em água dentro dos tanques, permanecendo até a idade dos ensaios.

## **5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS**

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios executados no programa experimental, descrito no capítulo 4. Os modelos de regressão não-linear e as análises de variância para os modelos de regressão estão apresentados no Anexo C.

### **5.1 ENSAIOS REALIZADOS**

#### **5.1.1 Concretos de referência**

##### **5.1.1.1 Resistência à compressão**

Na Tabela 35 apresentam-se os valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova de concreto que foram curados em câmara úmida até as idades de ensaio, 1, 2, 3, 7 e 28 dias.

Tabela 35: resistência à compressão – concreto – câmara úmida

| Traço | Idade (dias) | Relação água/cimento |              |             |           |          |              |             |           |          |              |             |           |
|-------|--------------|----------------------|--------------|-------------|-----------|----------|--------------|-------------|-----------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       |              | 0,25                 |              |             |           | 0,35     |              |             |           | 0,45     |              |             |           |
|       |              | fc (MPa)             | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 1            | 57,61                | 59,06        | 2,90        | 4,90      | 44,24    | 46,20        | 1,83        | 3,96      | 35,91    | 35,82        | 0,64        | 1,79      |
| T 2   |              | 57,17                |              |             |           | 47,87    |              |             |           | 35,14    |              |             |           |
| T 3   |              | 62,39                |              |             |           | 46,47    |              |             |           | 36,41    |              |             |           |
| T 1   | 2            | 57,61                | 58,21        | 0,52        | 0,89      | 54,11    | 52,52        | 2,48        | 4,73      | 41,89    | 42,63        | 0,66        | 1,55      |
| T 2   |              | 58,57                |              |             |           | 53,79    |              |             |           | 42,84    |              |             |           |
| T 3   |              | 58,44                |              |             |           | 49,66    |              |             |           | 43,16    |              |             |           |
| T 1   | 3            | 79,26                | 82,38        | 3,19        | 3,87      | ---      | 56,72        | 6,22        | 10,96     | 42,34    | 43,63        | 1,12        | 2,56      |
| T 2   |              | 82,25                |              |             |           | 52,33    |              |             |           | 44,31    |              |             |           |
| T 3   |              | 85,63                |              |             |           | 61,12    |              |             |           | 44,24    |              |             |           |
| T 1   | 7            | 90,72                | 85,52        | 6,92        | 8,09      | ---      | 65,41        | 1,12        | 1,72      | 36,92    | 42,46        | 7,21        | 16,98     |
| T 2   |              | 77,67                |              |             |           | 66,21    |              |             |           | 39,85    |              |             |           |
| T 3   |              | 88,17                |              |             |           | 64,62    |              |             |           | 50,61    |              |             |           |
| T 1   | 28           | 77,03                | 84,35        | 10,30       | 12,21     | 67,80    | 71,24        | 3,00        | 4,21      | 43,04    | 36,80        | 5,63        | 15,29     |
| T 2   |              | 79,90                |              |             |           | 72,57    |              |             |           | 32,10    |              |             |           |
| T 3   |              | 96,13                |              |             |           | 73,34    |              |             |           | 35,27    |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 11:

$$f_c = \frac{23,27}{a/c^{0,96}} \times e^{-\left[\left(\frac{0,357}{idade}\right)^{0,894}\right]}$$

(Equação 11)

$$R^2 = 87,0\%$$

Na Figura 41 apresenta-se a influência da relação água/cimento (a/c) e da idade sobre a variável de resposta resistência à compressão ( $f_c$ ) do concreto.

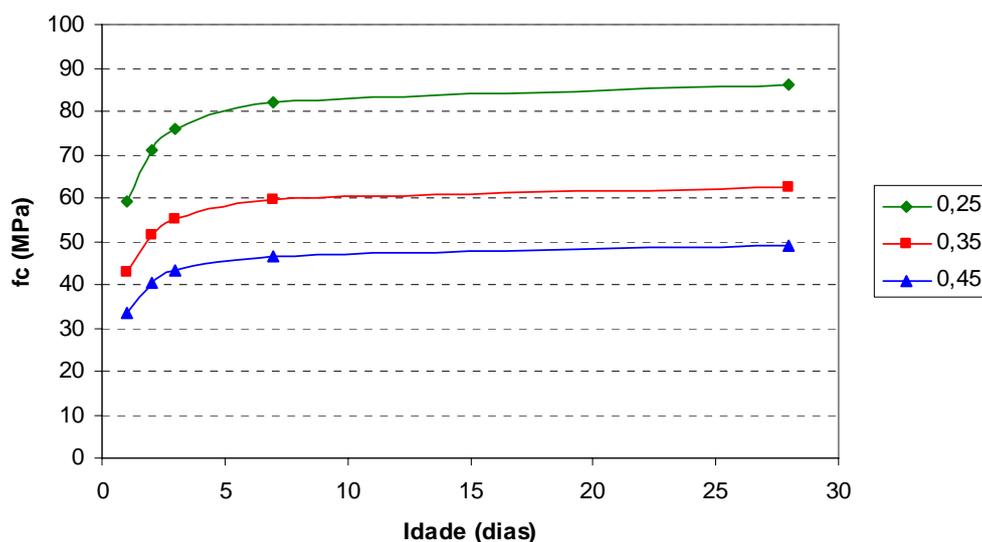


Figura 41: influência da relação água/cimento e da idade na resistência à compressão do concreto

Conforme pode ser observado na Figura 41, a medida que aumentou a relação água/cimento, diminuiu a resistência à compressão do concreto. Com a evolução da idade ocorreu um acréscimo na resistência em todas as relações água/cimento. Ambos comportamentos já eram esperados. Os concretos ficaram na faixa de 50 a 85MPa de resistência à compressão, aos 28 dias de idade.

#### 5.1.1.2 Resistência à tração na flexão

Na Tabela 36 apresentam-se os valores de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova de concreto curados em câmara úmida e rompidos com as idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias.

Tabela 36: resistência à tração na flexão – concreto – câmara úmida

| Traço | Idade (dias) | Relação água/cimento |               |             |           |           |               |             |           |           |               |             |           |
|-------|--------------|----------------------|---------------|-------------|-----------|-----------|---------------|-------------|-----------|-----------|---------------|-------------|-----------|
|       |              | 0,25                 |               |             |           | 0,35      |               |             |           | 0,45      |               |             |           |
|       |              | ftf (MPa)            | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 1            | 7,22                 | 7,00          | 0,58        | 8,35      | 5,25      | 5,32          | 0,19        | 3,48      | 3,89      | 4,19          | 0,33        | 7,85      |
| T 2   |              | 6,33                 |               |             |           | 5,53      |               |             |           | 4,54      |               |             |           |
| T 3   |              | 7,43                 |               |             |           | 5,18      |               |             |           | 4,13      |               |             |           |
| T 1   | 2            | 8,72                 | 8,66          | 0,51        | 5,91      | 8,06      | 7,79          | 0,75        | 9,58      | 4,68      | 5,22          | 0,72        | 13,73     |
| T 2   |              | 8,13                 |               |             |           | 8,37      |               |             |           | 6,03      |               |             |           |
| T 3   |              | 9,15                 |               |             |           | 6,95      |               |             |           | 4,94      |               |             |           |
| T 1   | 3            | 8,98                 | 7,97          | 0,88        | 11,03     | 8,52      | 7,86          | 0,67        | 8,53      | 5,39      | 5,20          | 0,47        | 9,12      |
| T 2   |              | 7,50                 |               |             |           | 7,88      |               |             |           | 5,55      |               |             |           |
| T 3   |              | 7,42                 |               |             |           | 7,18      |               |             |           | 4,66      |               |             |           |
| T 1   | 7            | 10,00                | 9,77          | 0,36        | 3,64      | 8,42      | 8,16          | 0,86        | 10,54     | 5,58      | 6,10          | 0,65        | 10,64     |
| T 2   |              | 9,95                 |               |             |           | 8,86      |               |             |           | 6,83      |               |             |           |
| T 3   |              | 9,36                 |               |             |           | 7,20      |               |             |           | 5,90      |               |             |           |
| T 1   | 28           | 12,09                | 11,05         | 0,93        | 8,41      | 7,11      | 7,03          | 0,42        | 5,99      | 5,36      | 5,99          | 0,83        | 13,81     |
| T 2   |              | 10,30                |               |             |           | 7,40      |               |             |           | 6,93      |               |             |           |
| T 3   |              | 10,76                |               |             |           | 6,57      |               |             |           | 5,69      |               |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 12:

$$ftf = \frac{3,33}{a/c^{0,814}} \times e^{-\left[\left(\frac{0,433}{idade}\right)^{1,133}\right]}$$

(Equação 12)

$$R^2 = 88,1\%$$

Na Figura 42 apresenta-se a influência da relação água/cimento (a/c) e da idade sobre a variável de resposta resistência à tração na flexão ( $f_{tf}$ ) do concreto.

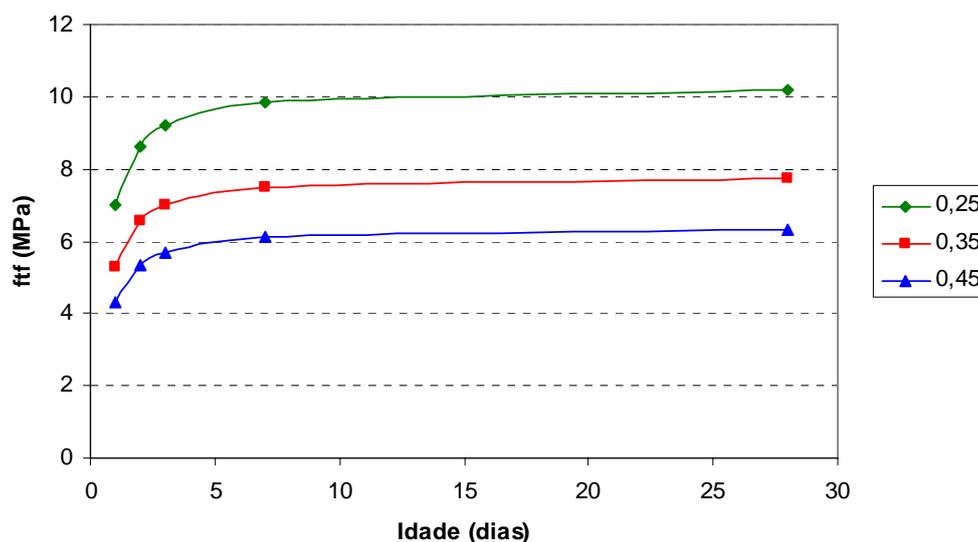


Figura 42: influência da relação água/cimento e da idade na resistência à tração na flexão do concreto

Como era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo de idade ocorreu um incremento na resistência para todas as relações água/cimento (Figura 42). Para 24 horas de idade obteve-se resistências à tração na flexão de 4,33 e 6,99MPa, para as relações água/cimento 0,45 e 0,25, respectivamente, adequadas para pavimento *fast-track*.

### 5.1.2 Maturidade

Inicialmente apresentam-se na Tabela 37 os tempos de ruptura do primeiro ponto dos corpos-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm, para as diferentes temperaturas e relações água/cimento. Conforme comentado no item 4.2.3, todos os corpos-de-prova de argamassa e os de concreto foram rompidos nas mesmas idades do

corpo-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm. Determinaram-se diferentes tempos de ruptura do primeiro ponto para os corpos-de-prova de pasta, também apresentados na Tabela 37.

Tabela 37: tempos de ruptura dos primeiros pontos, em horas

| Argamassas e concreto |             |       |       |
|-----------------------|-------------|-------|-------|
| Temperatura<br>(°C)   | Relação a/c |       |       |
|                       | 0,25        | 0,35  | 0,45  |
| 10                    | 9,47        | 13,77 | 17,80 |
| 30                    | 6,03        | 7,08  | 9,37  |
| 50                    | 3,25        | 3,97  | 4,38  |
| Pasta                 |             |       |       |
| Temperatura<br>(°C)   | Relação a/c |       |       |
|                       | 0,25        | 0,35  | 0,45  |
| 10                    | 22,00       | 26,00 | 31,00 |
| 30                    | 12,00       | 14,00 | 14,00 |
| 50                    | 7,00        | 12,00 | 12,00 |

Realizou-se ensaio de consistência das argamassas utilizadas para moldar os corpos-de-prova cúbicos de dimensões 50x50x50mm, conforme apresentado na Tabela 38.

Tabela 38: índice de consistência das argamassas dos CPs cúbicos

| a/c  | Temperatura<br>(°C) | Traço |     |     |     |
|------|---------------------|-------|-----|-----|-----|
|      |                     | T 1   |     | T 2 |     |
| 0,25 | 10                  | 135   | 136 | 132 | 128 |
|      | 30                  | 147   | 148 | 144 | 145 |
|      | 50                  | 135   | 133 | 140 | 139 |
| 0,35 | 10                  | 198   | 196 | 203 | 198 |
|      | 30                  | 225   | 226 | 231 | 234 |
|      | 50                  | 196   | 193 | 195 | 193 |
| 0,45 | 10                  | 237   | 235 | 235 | 234 |
|      | 30                  | 245   | 245 | 246 | 247 |
|      | 50                  | ---   | --- | --- | --- |

Nas Tabelas 39, 40 e 41 apresentam-se os valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm, para as três relações água/cimento estudadas e suas respectivas idades de ruptura, para as temperaturas de 10, 30 e 50°C respectivamente.

Tabela 39: resistência à compressão – argamassa – curada a 10°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 9,47                 | 1,28     | 1,23         | 0,04        | 3,38      | 13,77      | 3,12     | 4,16         | 0,92        | 22,18     | 17,80      | 13,60    | 13,28        | 1,04        | 7,81      |
| T 2   |                      | 1,22     |              |             |           |            | 4,88     |              |             |           |            | 12,12    |              |             |           |
| T 3   |                      | 1,20     |              |             |           |            | 4,48     |              |             |           |            | 14,12    |              |             |           |
| T 1   | 18,93                | 12,64    | 8,73         | 3,44        | 39,38     | 27,53      | 24,80    | 24,00        | 0,92        | 3,82      | 35,60      | 22,96    | 22,66        | 1,24        | 5,46      |
| T 2   |                      | 7,40     |              |             |           |            | 24,20    |              |             |           |            | 21,30    |              |             |           |
| T 3   |                      | 6,16     |              |             |           |            | 23,00    |              |             |           |            | 23,72    |              |             |           |
| T 1   | 37,87                | 48,00    | 47,23        | 5,39        | 11,41     | 55,07      | 46,20    | 44,80        | 1,31        | 2,93      | 71,20      | 32,56    | 30,85        | 1,49        | 4,83      |
| T 2   |                      | 41,50    |              |             |           |            | 43,60    |              |             |           |            | 30,20    |              |             |           |
| T 3   |                      | 52,20    |              |             |           |            | 44,60    |              |             |           |            | 29,80    |              |             |           |
| T 1   | 75,73                | 74,40    | 65,40        | 7,85        | 12,00     | 110,13     | 60,40    | 59,01        | 4,83        | 8,19      | 142,40     | 37,00    | 36,00        | 1,05        | 2,93      |
| T 2   |                      | 61,80    |              |             |           |            | 63,00    |              |             |           |            | 36,10    |              |             |           |
| T 3   |                      | 60,00    |              |             |           |            | 53,64    |              |             |           |            | 34,90    |              |             |           |
| T 1   | 151,47               | 78,20    | 78,68        | 2,36        | 3,00      | 220,27     | 67,20    | 64,60        | 2,71        | 4,19      | 284,80     | 44,40    | 41,27        | 2,80        | 6,79      |
| T 2   |                      | 81,24    |              |             |           |            | 61,80    |              |             |           |            | 40,40    |              |             |           |
| T 3   |                      | 76,60    |              |             |           |            | 64,80    |              |             |           |            | 39,00    |              |             |           |
| T 1   | 302,93               | 69,60    | 75,07        | 7,18        | 9,57      | 440,53     | 68,40    | 66,27        | 2,10        | 3,17      | 569,60     | 46,40    | 43,89        | 2,20        | 5,02      |
| T 2   |                      | 72,40    |              |             |           |            | 64,20    |              |             |           |            | 42,96    |              |             |           |
| T 3   |                      | 83,20    |              |             |           |            | 66,20    |              |             |           |            | 42,30    |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 13:

$$f_c = \frac{14,0}{a/c^{1,3}} \times e^{-\left[\left(\frac{27,4}{idade}\right)^2\right]} \quad (\text{Equação 13})$$

$$R^2 = 93,6\%$$

Na Figura 43 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 50x50x50mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 10°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

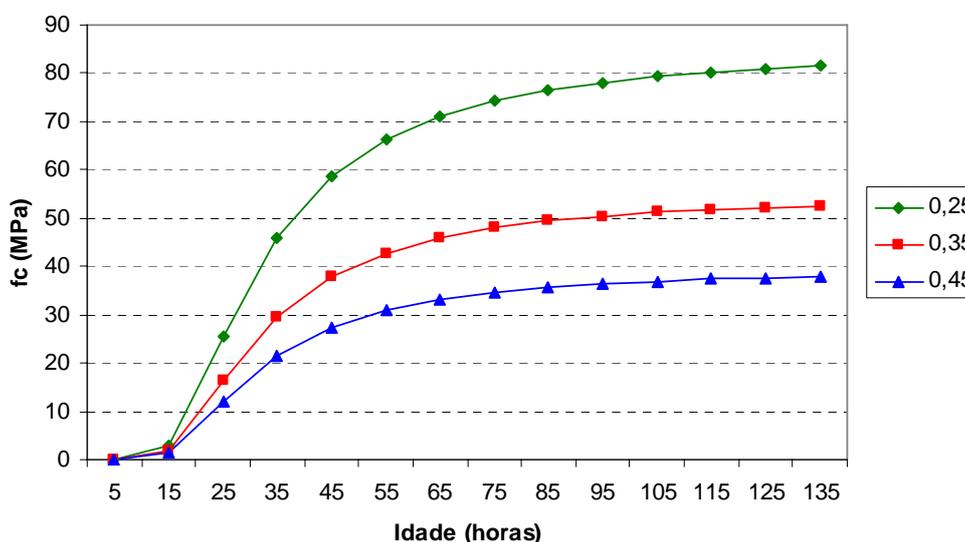


Figura 43: resistência à compressão versus idade, CP 50x50x50mm, 10°C

Utilizando-se a Equação 13 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. O aumento na resistência à compressão das argamassas foi de 77,1% de 35 para 135 horas.

Pinto (2004 b) encontrou o valor de 21,2MPa, de resistência à compressão, para argamassa de relação água/cimento 0,54, temperatura de cura de 5°C em 216 horas de idade de ruptura, utilizando cimento ASTM tipo I (corresponde ao CP I). Rheinheimer (2006), utilizando cimento CP V-ARI RS, relação água/cimento de 0,44 e temperatura de cura de 13°C, encontrou valores de resistência à compressão de argamassas de 21,0MPa com 66 horas de idade. Neste trabalho obteve-se 21,42MPa, para as argamassas com relação água/cimento 0,45, rompidas com 35 horas de idade, conforme pode-se observar na Figura 43.

Tabela 40: resistência à compressão – argamassa – curada a 30°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 6,03                 | 3,64     | 4,04         | 0,59        | 14,65     | 7,08       | 2,80     | 2,80         | 0,24        | 8,57      | 9,37       | 5,84     | 5,57         | 0,61        | 10,87     |
| T 2   |                      | 4,72     |              |             |           |            | 2,56     |              |             |           |            | 4,88     |              |             |           |
| T 3   |                      | 3,76     |              |             |           |            | 3,04     |              |             |           |            | 6,00     |              |             |           |
| T 1   | 12,07                | 53,50    | 51,53        | 1,82        | 3,54      | 14,17      | 29,20    | 27,73        | 2,20        | 7,94      | 18,73      | 21,68    | 21,64        | 0,78        | 3,61      |
| T 2   |                      | 49,90    |              |             |           |            | 25,20    |              |             |           |            | 20,84    |              |             |           |
| T 3   |                      | 51,20    |              |             |           |            | 28,80    |              |             |           |            | 22,40    |              |             |           |
| T 1   | 24,13                | 77,00    | 75,87        | 3,64        | 4,79      | 28,33      | 46,10    | 46,05        | 1,13        | 2,46      | 37,47      | 33,60    | 32,67        | 1,53        | 4,69      |
| T 2   |                      | 78,80    |              |             |           |            | 44,90    |              |             |           |            | 30,90    |              |             |           |
| T 3   |                      | 71,80    |              |             |           |            | 47,16    |              |             |           |            | 33,50    |              |             |           |
| T 1   | 48,27                | 82,00    | 78,60        | 3,86        | 4,91      | 56,67      | 52,16    | 52,35        | 0,77        | 1,47      | 74,93      | 34,90    | 35,03        | 0,15        | 0,44      |
| T 2   |                      | 79,40    |              |             |           |            | 53,20    |              |             |           |            | 35,20    |              |             |           |
| T 3   |                      | 74,40    |              |             |           |            | 51,70    |              |             |           |            | 35,00    |              |             |           |
| T 1   | 96,53                | 76,80    | 78,72        | 7,90        | 10,03     | 113,33     | 56,16    | 58,85        | 2,54        | 4,31      | 149,87     | 36,72    | 37,04        | 1,23        | 3,33      |
| T 2   |                      | 71,96    |              |             |           |            | 59,20    |              |             |           |            | 38,40    |              |             |           |
| T 3   |                      | 87,40    |              |             |           |            | 61,20    |              |             |           |            | 36,00    |              |             |           |
| T 1   | 193,07               | 83,60    | 89,27        | 4,99        | 5,59      | 226,67     | 60,00    | 59,80        | 0,20        | 0,33      | 299,73     | 39,00    | 40,13        | 1,40        | 3,49      |
| T 2   |                      | 93,00    |              |             |           |            | 59,80    |              |             |           |            | 39,70    |              |             |           |
| T 3   |                      | 91,20    |              |             |           |            | 59,60    |              |             |           |            | 41,70    |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 14:

$$f_c = \frac{14,0}{a/c^{1,3}} \times e^{-\left[\left(\frac{10,2}{idade}\right)^2\right]} \quad (\text{Equação 14})$$

$$R^2 = 96,5\%$$

Na Figura 44 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 50x50x50mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 30°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

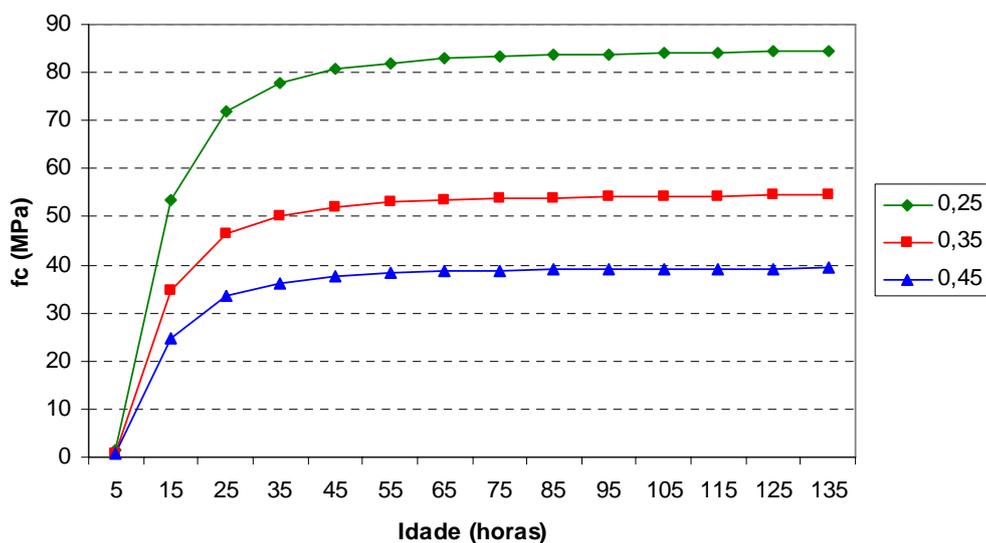


Figura 44: resistência à compressão versus idade, CP 50x50x50mm, 30°C

Utilizando-se a Equação 14 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. O ganho de resistência à compressão de 35 para 135 horas foi de 8,3%.

Pinto (2004 b) encontrou o valor de 25,6MPa, de resistência à compressão, para argamassa de relação água/cimento 0,54, temperatura de cura de 35°C e 24 horas de idade de ruptura, utilizando cimento ASTM tipo I (corresponde ao CP I). Rheinheimer (2006), utilizando cimento CP V-ARI RS, relação água/cimento de 0,44 e temperatura de cura de 30°C, encontrou valores de resistência à compressão de argamassas de 22,7MPa com 32 horas de idade. Neste trabalho obteve-se 24,90MPa, para as argamassas com relação água/cimento 0,45, rompidas com 15 horas de idade, conforme pode-se observar na Figura 44.

Nos dados apresentados na Tabela 41, não foi possível obter os valores do primeiro ponto (3,97 horas) da relação água/cimento 0,35, portanto rompeu-se até o sétimo ponto, obtendo-se desta forma os seis pontos necessários para a determinação da energia aparente de ativação.

Tabela 41: resistência à compressão – argamassa – curada a 50°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 3,25                 | ---      | 1,84         | 0,23        | 12,30     | 7,93       | 30,84    | 28,98        | 2,69        | 9,27      | 4,38       | 4,08     | 4,18         | 0,14        | 3,38      |
| T 2   |                      | 1,68     |              |             |           |            | 25,90    |              |             |           |            | ---      |              |             |           |
| T 3   |                      | 2,00     |              |             |           |            | 30,20    |              |             |           |            | 4,28     |              |             |           |
| T 1   | 6,50                 | 49,70    | 48,57        | 1,27        | 2,61      | 15,87      | 37,40    | 38,83        | 1,32        | 3,40      | 8,77       | 19,60    | 18,97        | 0,59        | 3,09      |
| T 2   |                      | 48,80    |              |             |           |            | 40,00    |              |             |           |            | 18,88    |              |             |           |
| T 3   |                      | 47,20    |              |             |           |            | 39,10    |              |             |           |            | 18,44    |              |             |           |
| T 1   | 13,00                | 65,60    | 62,83        | 3,28        | 5,23      | 31,73      | 46,20    | 46,73        | 1,10        | 2,36      | 17,53      | 24,00    | 26,89        | 2,58        | 9,59      |
| T 2   |                      | 59,20    |              |             |           |            | 48,00    |              |             |           |            | 27,70    |              |             |           |
| T 3   |                      | 63,68    |              |             |           |            | 46,00    |              |             |           |            | 28,96    |              |             |           |
| T 1   | 26,00                | 68,00    | 69,33        | 2,31        | 3,33      | 63,47      | 56,00    | 51,93        | 3,91        | 7,53      | 35,07      | 23,50    | 28,20        | 4,16        | 14,75     |
| T 2   |                      | 68,00    |              |             |           |            | 48,20    |              |             |           |            | 29,70    |              |             |           |
| T 3   |                      | 72,00    |              |             |           |            | 51,60    |              |             |           |            | 31,40    |              |             |           |
| T 1   | 52,00                | 83,40    | 75,45        | 7,08        | 9,39      | 126,93     | 60,80    | 52,87        | 7,71        | 14,58     | 70,13      | 33,40    | 34,79        | 1,24        | 3,57      |
| T 2   |                      | 69,80    |              |             |           |            | 52,40    |              |             |           |            | 35,16    |              |             |           |
| T 3   |                      | 73,16    |              |             |           |            | 45,40    |              |             |           |            | 35,80    |              |             |           |
| T 1   | 104,00               | 78,60    | 76,33        | 2,05        | 2,69      | 253,87     | 44,40    | 45,07        | 4,64        | 10,29     | 140,27     | 33,70    | 33,59        | 0,20        | 0,58      |
| T 2   |                      | 75,80    |              |             |           |            | 40,80    |              |             |           |            | 33,36    |              |             |           |
| T 3   |                      | 74,60    |              |             |           |            | 50,00    |              |             |           |            | 33,70    |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 15:

$$f_c = \frac{12,2}{a/c^{1,3}} \times e^{-\left[\left(\frac{5,18}{idade}\right)^2\right]} \quad (\text{Equação 15})$$

$$R^2 = 96,3\%$$

Na Figura 45 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 50x50x50mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 50°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

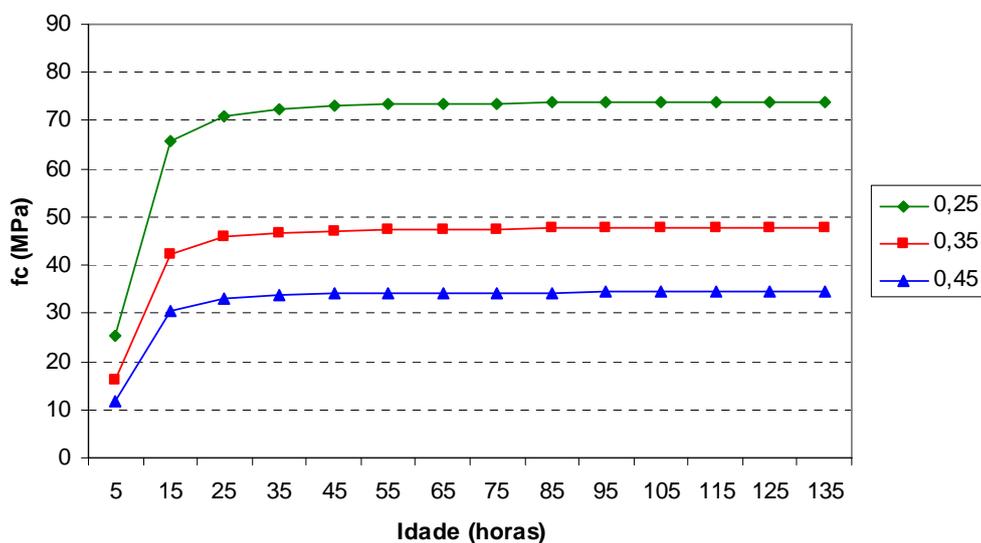


Figura 45: resistência à compressão versus idade, CP 50x50x50mm, 50°C

Utilizando-se a Equação 15 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. Ocorreu um acréscimo na resistência à compressão de 2,1% de 35 para 135 horas de idade.

Pinto (2004 b) encontrou o valor de 23,5MPa, de resistência à compressão, para argamassa de relação água/cimento 0,54, temperatura de cura de 60°C e 15 horas de idade de ruptura, utilizando cimento ASTM tipo I (corresponde ao CP I). Rheinheimer (2006), utilizando cimento CP V-ARI RS, relação água/cimento de 0,44 e temperatura de cura de 50°C, encontrou valores de resistência à compressão de argamassas de 23,6MPa com 15,9 horas de idade. Neste trabalho obteve-se 30,58MPa, para as argamassas com relação água/cimento 0,45, rompidas com 15 horas de idade, conforme pode-se observar na Figura 45.

Apresentam-se na Tabela 42 os dados obtidos no software utilizado para os corpos-de-prova de dimensões 50x50x50mm, para as três temperaturas e três relações água/cimento estudadas. Os valores de  $f_{c\infty}$ ,  $kt$ ,  $t_0$  e  $R^2$  foram obtidos através de gráficos gerados pelo software que se encontram no Anexo B.

Tabela 42: dados obtidos no software para os corpos-de-prova 50x50x50mm

| a/c  | T (°C) | $f_{c\infty}$ | $kt$   | $t_0$   | $R^2$  | $\ln(kt)$ | $1/T$  |
|------|--------|---------------|--------|---------|--------|-----------|--------|
| 0,25 | 10     | 98,3277       | 0,0337 | 10,7876 | 0,9675 | -3,3893   | 0,0035 |
|      | 30     | 90,3855       | 0,1576 | 5,7235  | 0,9917 | -1,8474   | 0,0033 |
|      | 50     | 78,2462       | 0,3321 | 3,0281  | 0,9931 | -1,1024   | 0,0031 |
| 0,35 | 10     | 59,6366       | 0,0487 | 13,7234 | 0,9861 | -3,0221   | 0,0035 |
|      | 30     | 57,4073       | 0,1890 | 6,3855  | 0,9949 | -1,6662   | 0,0033 |
|      | 50     | 49,6308       | 0,4140 | 3,4654  | 0,9960 | -0,8818   | 0,0031 |
| 0,45 | 10     | 41,6692       | 0,0653 | 16,4019 | 0,9938 | -2,7288   | 0,0035 |
|      | 30     | 40,6163       | 0,2545 | 7,7156  | 0,9973 | -1,3684   | 0,0033 |
|      | 50     | 35,5583       | 0,4603 | 3,7032  | 0,9968 | -0,7760   | 0,0031 |

Na Figura 46 apresentam-se os gráficos de Arrhenius para as três relações água/cimento estudadas, para os corpos-de-prova de dimensões 50x50x50mm.

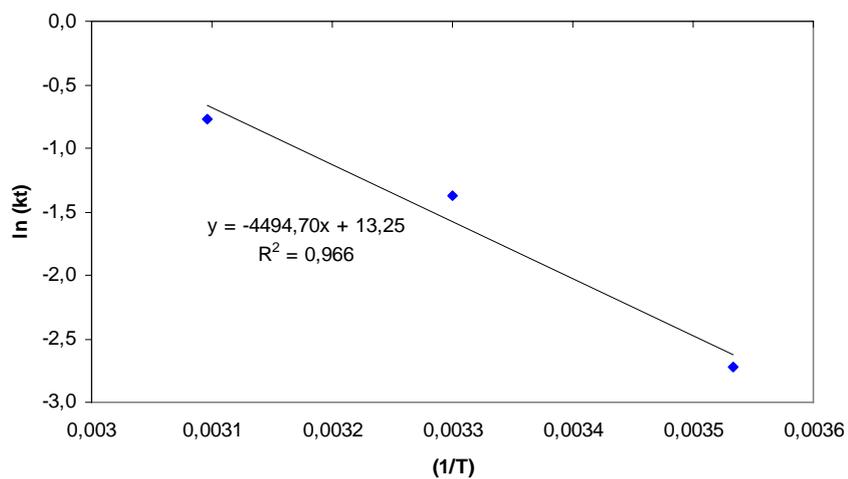
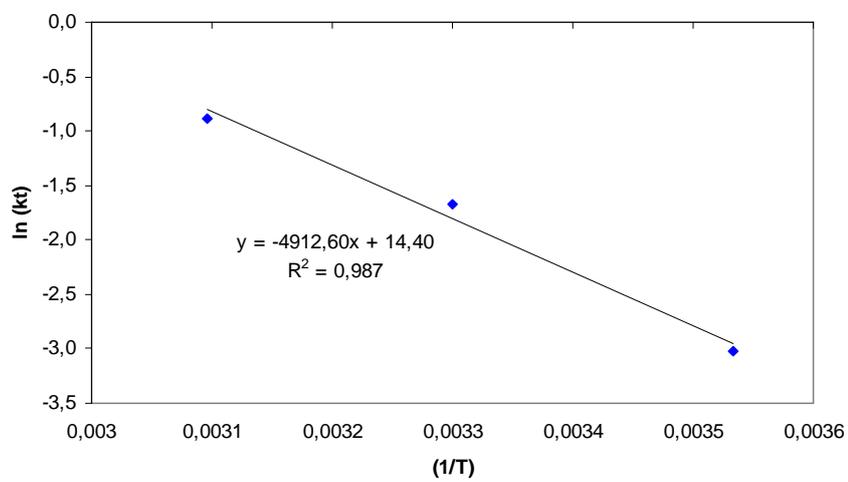
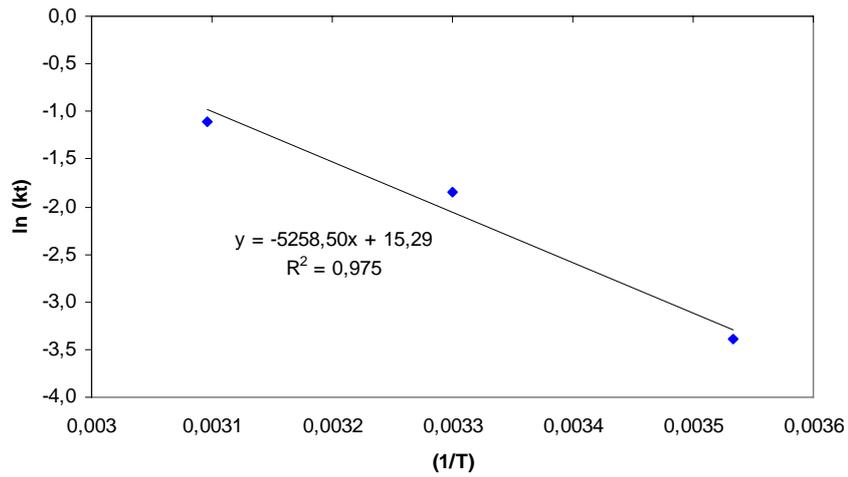


Figura 46: gráficos de Arrhenius para os CPs 50x50x50mm para (a)  $a/c = 0,25$ ; (b)  $a/c = 0,35$  e (c)  $a/c = 0,45$

Os valores de energia aparente de ativação ( $E_a$ ) para os corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 50x50x50mm, para as relações água/cimento estudadas, estão mostrados na Tabela 43.

Tabela 43: energia aparente de ativação para os CPs 50x50x50mm

| a/c  | $E_a$<br>(kJ/mol) |
|------|-------------------|
| 0,25 | 43,72             |
| 0,35 | 40,84             |
| 0,45 | 37,37             |

Apresentam-se na Figura 47 as curvas de maturidade (idade equivalente x resistência à compressão) para os corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 50x50x50mm, ensaiados à compressão, para as relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45.

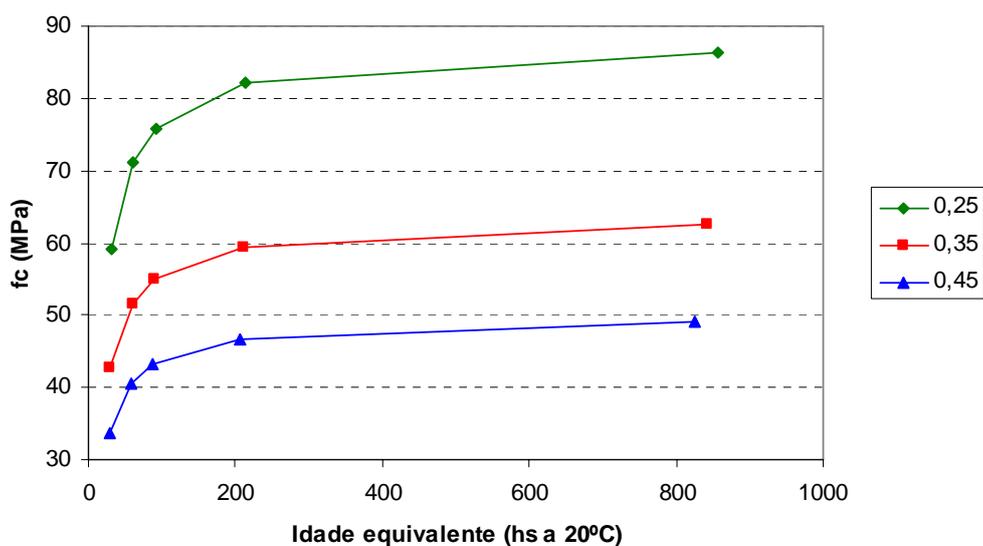


Figura 47: curvas de maturidade para os corpos-de-prova 50x50x50mm

Na Tabela 44 podem-se observar os índices de consistência das argamassas utilizadas para moldar os corpos-de-prova prismáticos de dimensões 40x40x160mm.

Tabela 44: índice de consistência das argamassas dos CPs prismáticos

| a/c  | Temperatura (°C) | Traço |     |     |     |     |     |
|------|------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
|      |                  | T 1   |     | T 2 |     | T 3 |     |
| 0,25 | 10               | 141   | 139 | 140 | 142 | 128 | 129 |
|      | 30               | 147   | 149 | 146 | 148 | 142 | 139 |
|      | 50               | 131   | 131 | 140 | 135 | 141 | 139 |
| 0,35 | 10               | 199   | 206 | 179 | 181 | 197 | 198 |
|      | 30               | 206   | 204 | 210 | 209 | 207 | 206 |
|      | 50               | 205   | 206 | 195 | 196 | 188 | 193 |
| 0,45 | 10               | 228   | 229 | 234 | 240 | 232 | 243 |
|      | 30               | 238   | 239 | 241 | 239 | 252 | 249 |
|      | 50               | ---   | --- | --- | --- | --- | --- |

Nas Tabelas 45, 46 e 47 apresentam-se os valores de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova de argamassa de dimensões 40x40x160mm, para as três relações água/cimento estudadas e suas respectivas idades de ruptura, para as temperaturas de 10, 30 e 50°C respectivamente.

Tabela 45: resistência à tração – argamassa – curada a 10°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 9,47                 | 0,00     | 0,00         | ---         | ---       | 13,77      | 1,40     | 1,40         | ---         | ---       | 17,80      | 2,24     | 2,85         | 0,57        | 19,88     |
| T 2   |                      | 0,00     |              |             |           |            | ---      |              |             |           |            | 2,94     |              |             |           |
| T 3   |                      | 0,00     |              |             |           |            | ---      |              |             |           |            | 3,36     |              |             |           |
| T 1   | 18,93                | 1,96     | 1,21         | 0,65        | 53,29     | 27,53      | 5,04     | 4,11         | 0,98        | 23,94     | 35,60      | 4,20     | 4,39         | 0,32        | 7,37      |
| T 2   |                      | 0,84     |              |             |           |            | 4,20     |              |             |           |            | 4,76     |              |             |           |
| T 3   |                      | 0,84     |              |             |           |            | 3,08     |              |             |           |            | 4,20     |              |             |           |
| T 1   | 37,87                | 7,84     | 6,81         | 0,98        | 14,43     | 55,07      | 7,84     | 7,56         | 0,28        | 3,70      | 71,20      | 5,04     | 5,97         | 0,81        | 13,53     |
| T 2   |                      | 5,88     |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |            | 6,44     |              |             |           |
| T 3   |                      | 6,72     |              |             |           |            | 7,56     |              |             |           |            | 6,44     |              |             |           |
| T 1   | 75,73                | 10,08    | 9,80         | 0,28        | 2,86      | 110,13     | 8,40     | 8,87         | 0,81        | 9,12      | 142,40     | 7,00     | 6,91         | 0,70        | 10,20     |
| T 2   |                      | 9,80     |              |             |           |            | 9,80     |              |             |           |            | 7,56     |              |             |           |
| T 3   |                      | 9,52     |              |             |           |            | 8,40     |              |             |           |            | 6,16     |              |             |           |
| T 1   | 151,47               | 11,76    | 11,01        | 1,80        | 16,35     | 220,27     | 8,68     | 9,80         | 1,28        | 13,09     | 284,80     | 7,84     | 7,37         | 0,43        | 5,80      |
| T 2   |                      | 8,96     |              |             |           |            | 11,20    |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |
| T 3   |                      | 12,32    |              |             |           |            | 9,52     |              |             |           |            | 7,00     |              |             |           |
| T 1   | 302,93               | 11,76    | 11,20        | 0,74        | 6,61      | 440,53     | 10,08    | 9,99         | 0,16        | 1,62      | 569,60     | 7,28     | 7,37         | 0,16        | 2,19      |
| T 2   |                      | 10,36    |              |             |           |            | 9,80     |              |             |           |            | 7,56     |              |             |           |
| T 3   |                      | 11,48    |              |             |           |            | 10,08    |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 16:

$$f_{tf} = \frac{4,59}{a/c^{0,68}} \times e^{-\left[\left(\frac{25,17}{idade}\right)^{1,52}\right]} \quad (\text{Equação 16})$$

$$R^2 = 96,4\%$$

Na Figura 48 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 40x40x160mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 10°C e submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão.

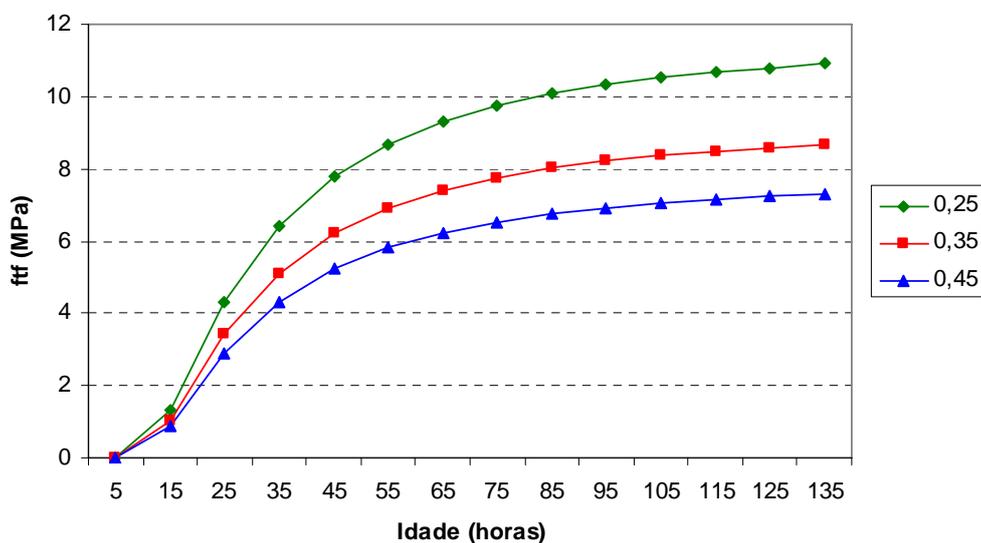


Figura 48: resistência à tração versus idade, CP 40x40x160mm, 10°C

Utilizando-se a Equação 16 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento.

Rheinheimer (2006), utilizando cimento CP V-ARI RS, relação água/cimento 0,44 e temperatura de cura de 13°C, encontrou valores de resistência à tração na flexão de argamassas igual a 2,46MPa com 33 horas de idade. Neste trabalho obteve-se 2,88MPa, para as argamassas com relação água/cimento 0,45, rompidas com 25 horas de idade, conforme pode-se observar na Figura 48.

Tabela 46: resistência à tração – argamassa – curada a 30°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 6,03                 | 0,84     | 0,79         | 0,08        | 10,19     | 7,08       | 0,56     | 0,51         | 0,08        | 15,75     | 9,37       | 0,84     | 0,65         | 0,16        | 24,74     |
| T 2   |                      | 0,70     |              |             |           |            | 0,42     |              |             |           |            | 0,56     |              |             |           |
| T 3   |                      | 0,84     |              |             |           |            | 0,56     |              |             |           |            | 0,56     |              |             |           |
| T 1   | 12,07                | 8,40     | 7,93         | 0,43        | 5,39      | 14,17      | 5,04     | 5,41         | 0,43        | 7,90      | 18,73      | 4,20     | 4,29         | 0,16        | 3,77      |
| T 2   |                      | 7,56     |              |             |           |            | 5,88     |              |             |           |            | 4,20     |              |             |           |
| T 3   |                      | 7,84     |              |             |           |            | 5,32     |              |             |           |            | 4,48     |              |             |           |
| T 1   | 24,13                | 11,48    | 10,64        | 1,01        | 9,49      | 28,33      | 6,72     | 7,37         | 0,70        | 9,56      | 37,47      | 6,02     | 5,93         | 0,29        | 4,92      |
| T 2   |                      | 10,92    |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |            | 5,60     |              |             |           |
| T 3   |                      | 9,52     |              |             |           |            | 8,12     |              |             |           |            | 6,16     |              |             |           |
| T 1   | 48,27                | ---      | 10,78        | 0,20        | 1,84      | 56,67      | 8,54     | 8,35         | 0,21        | 2,56      | 74,93      | 6,44     | 6,72         | 0,48        | 7,22      |
| T 2   |                      | 10,92    |              |             |           |            | 8,12     |              |             |           |            | 6,44     |              |             |           |
| T 3   |                      | 10,64    |              |             |           |            | 8,40     |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |
| T 1   | 96,53                | 11,76    | 11,11        | 1,13        | 10,19     | 113,33     | 7,00     | 8,12         | 1,01        | 12,43     | 149,87     | 6,72     | 7,05         | 0,45        | 6,39      |
| T 2   |                      | 11,76    |              |             |           |            | 8,96     |              |             |           |            | 6,86     |              |             |           |
| T 3   |                      | 9,80     |              |             |           |            | 8,40     |              |             |           |            | 7,56     |              |             |           |
| T 1   | 193,07               | 12,60    | 11,76        | 0,74        | 6,30      | 226,67     | 8,96     | 9,15         | 0,32        | 3,53      | 299,73     | 6,72     | 7,47         | 0,86        | 11,46     |
| T 2   |                      | 11,20    |              |             |           |            | 8,96     |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |
| T 3   |                      | 11,48    |              |             |           |            | 9,52     |              |             |           |            | 8,40     |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 17:

$$f_{tf} = \frac{2,78}{a/c^{1,03}} \times e^{-\left[\left(\frac{9,74}{idade}\right)^{2,62}\right]} \quad (\text{Equação 17})$$

$$R^2 = 96,3\%$$

Na Figura 49 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 40x40x160mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 30°C e submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão.

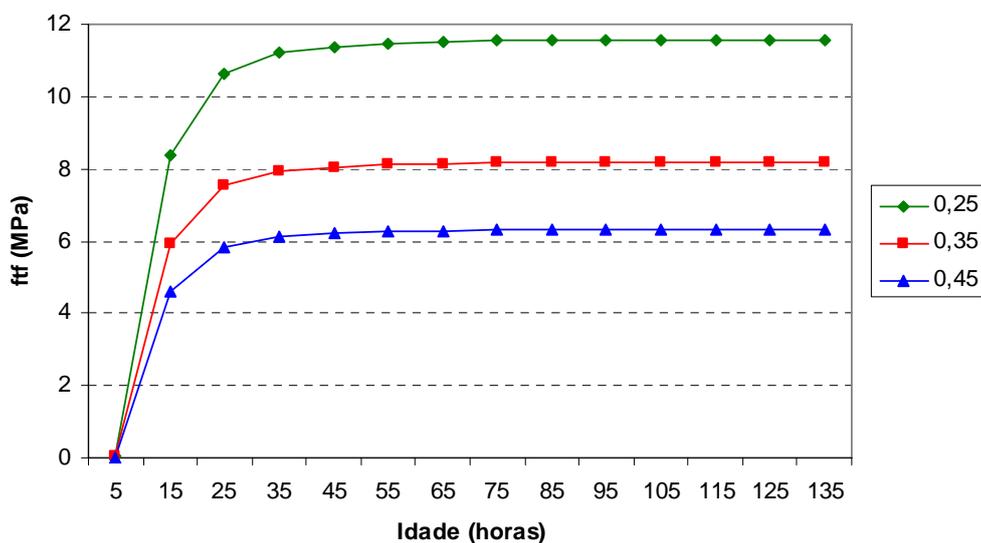


Figura 49: resistência à tração versus idade, CP 40x40x160mm, 30°C

Utilizando-se a Equação 17 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento.

Rheinheimer (2006), utilizando cimento CP V-ARI RS, relação água/cimento 0,44 e temperatura de cura de 30°C, encontrou valores de resistência à tração na flexão de argamassas igual a 5,82MPa com 32 horas de idade. Neste trabalho obteve-se 5,81MPa, para as argamassas com relação água/cimento 0,45, rompidas com 25 horas de idade, conforme pode-se observar na Figura 49.

Nos dados apresentados na Tabela 47, não foi possível obter os valores do primeiro ponto (3,97 horas) da relação água/cimento 0,35, portanto rompeu-se até o sétimo ponto, obtendo-se desta forma os seis pontos necessários para a determinação da energia aparente de ativação.

Tabela 47: resistência à tração – argamassa – curada a 50°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 3,25                 | 0,00     | 0,00         | ---         | ---       | 7,93       | 4,48     | 5,23         | 0,86        | 16,37     | 4,38       | 0,00     | 0,00         | ---         | ---       |
| T 2   |                      | 0,00     |              |             |           |            | 6,16     |              |             |           |            | 0,00     |              |             |           |
| T 3   |                      | 0,00     |              |             |           |            | 5,04     |              |             |           |            | 0,00     |              |             |           |
| T 1   | 6,50                 | 6,72     | 7,51         | 0,93        | 12,41     | 15,87      | 5,60     | 6,25         | 0,58        | 9,32      | 8,77       | 3,08     | 3,08         | 0,00        | 0,00      |
| T 2   |                      | 8,54     |              |             |           |            | 6,72     |              |             |           |            | 3,08     |              |             |           |
| T 3   |                      | 7,28     |              |             |           |            | 6,44     |              |             |           |            | ---      |              |             |           |
| T 1   | 13,00                | 9,10     | 8,87         | 0,40        | 4,56      | 31,73      | 6,16     | 6,91         | 0,65        | 9,36      | 17,53      | 2,80     | 3,50         | 0,99        | 28,28     |
| T 2   |                      | 9,10     |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |            | 4,20     |              |             |           |
| T 3   |                      | 8,40     |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |            | ---      |              |             |           |
| T 1   | 26,00                | 9,24     | 9,24         | 1,40        | 15,15     | 63,47      | 6,72     | 7,00         | 0,28        | 4,00      | 35,07      | 4,76     | 4,85         | 0,16        | 3,33      |
| T 2   |                      | 10,64    |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |            | 4,76     |              |             |           |
| T 3   |                      | 7,84     |              |             |           |            | 7,00     |              |             |           |            | 5,04     |              |             |           |
| T 1   | 52,00                | 10,64    | 10,17        | 0,58        | 5,73      | 126,93     | 7,28     | 7,19         | 0,43        | 5,95      | 70,13      | 3,92     | 4,01         | 0,16        | 4,03      |
| T 2   |                      | 10,36    |              |             |           |            | 7,56     |              |             |           |            | 3,92     |              |             |           |
| T 3   |                      | 9,52     |              |             |           |            | 6,72     |              |             |           |            | 4,20     |              |             |           |
| T 1   | 104,00               | 10,36    | 10,64        | 0,74        | 6,96      | 253,87     | 7,28     | 7,19         | 0,16        | 2,25      | 140,27     | ---      | 4,20         | ---         | ---       |
| T 2   |                      | 11,48    |              |             |           |            | 7,00     |              |             |           |            | 4,20     |              |             |           |
| T 3   |                      | 10,08    |              |             |           |            | 7,28     |              |             |           |            | ---      |              |             |           |

O modelo de comportamento resultante está expresso na Equação 18:

$$f_{tf} = \frac{1,44}{a/c^{1,47}} \times e^{-\left[\left(\frac{4,08}{idade}\right)^{1,04}\right]} \quad (\text{Equação 18})$$

$$R^2 = 85,7\%$$

Na Figura 50 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 40x40x160mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 50°C e submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão.

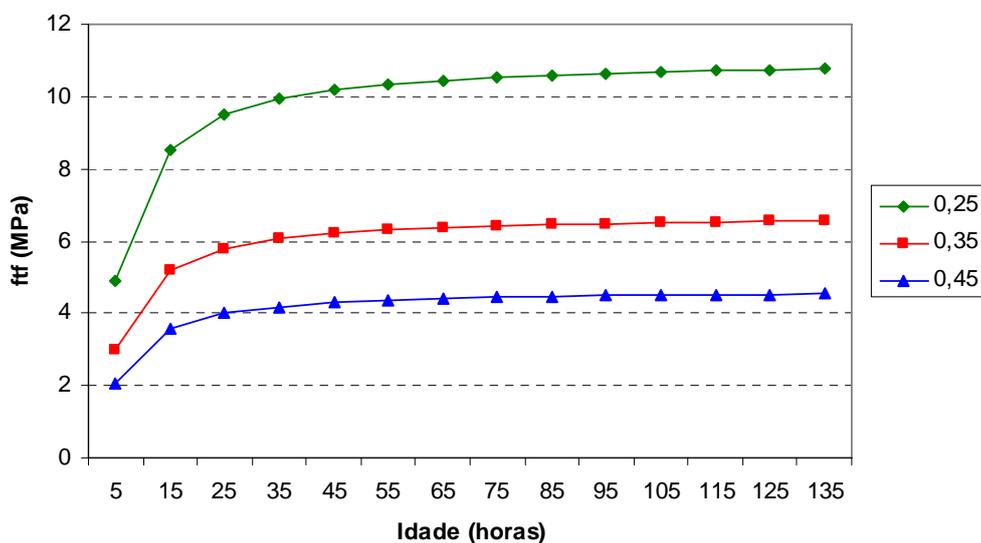


Figura 50: resistência à tração versus idade, CP 40x40x160mm, 50°C

Utilizando-se a Equação 18 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento.

Rheinheimer (2006), utilizando cimento CP V-ARI RS, relação água/cimento 0,44 e temperatura de cura de 50°C, encontrou valores de resistência à tração na flexão de argamassas igual a 0,50MPa com 7,6 horas de idade. Neste trabalho obteve-se 2,07MPa, para as argamassas com relação água/cimento 0,45, rompidas com 5 horas de idade, conforme pode-se observar na Figura 50.

Apresentam-se na Tabela 48 os dados obtidos no software utilizado para os corpos-de-prova de dimensões 40x40x160mm, ensaiados à tração na flexão, para as três temperaturas e três relações água/cimento estudadas. Os valores de  $f_{c\infty}$ ,  $kt$ ,  $t_0$  e  $R^2$  foram obtidos através de gráficos gerados pelo software que se encontram no Anexo B.

Tabela 48: dados obtidos no software para os corpos-de-prova 40x40x160mm, resistência à tração

| a/c  | T (°C) | $f_{c\infty}$ | $kt$   | $t_0$   | $R^2$  | $\ln(kt)$ | 1/T    |
|------|--------|---------------|--------|---------|--------|-----------|--------|
| 0,25 | 10     | 13,0233       | 0,0371 | 9,8304  | 0,9892 | -3,2936   | 0,0035 |
|      | 30     | 12,3024       | 0,2201 | 5,9241  | 0,9893 | -1,5137   | 0,0033 |
|      | 50     | 11,1379       | 0,2419 | 1,6553  | 0,9999 | -1,4191   | 0,0031 |
| 0,35 | 10     | 9,9265        | 0,0485 | 12,2441 | 0,9957 | -3,0262   | 0,0035 |
|      | 30     | 8,5317        | 0,2921 | 6,7258  | 0,9946 | -1,2307   | 0,0033 |
|      | 50     | 6,7767        | 0,2480 | 1,7526  | 0,9999 | -1,3945   | 0,0031 |
| 0,45 | 10     | 8,2113        | 0,0574 | 14,1544 | 0,9976 | -2,8573   | 0,0035 |
|      | 30     | 6,4538        | 0,4666 | 8,3442  | 0,9977 | -0,7622   | 0,0033 |
|      | 50     | 4,6798        | 0,2505 | 1,7998  | 0,9999 | -1,3843   | 0,0031 |

Na Figura 51 apresentam-se os gráficos de Arrhenius para as três relações água/cimento estudadas, para os corpos-de-prova de dimensões 40x40x160mm.

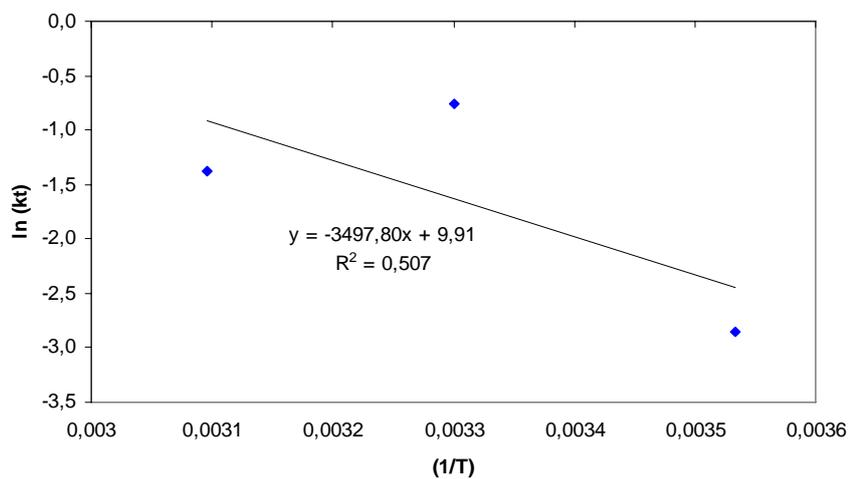
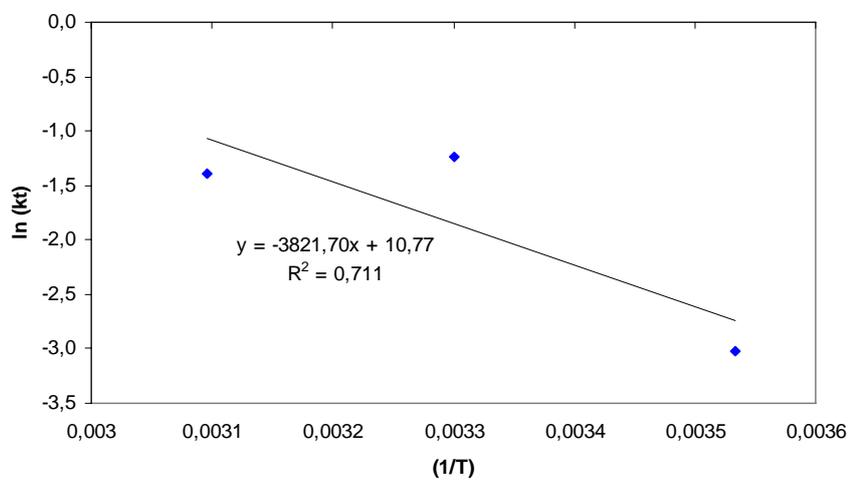
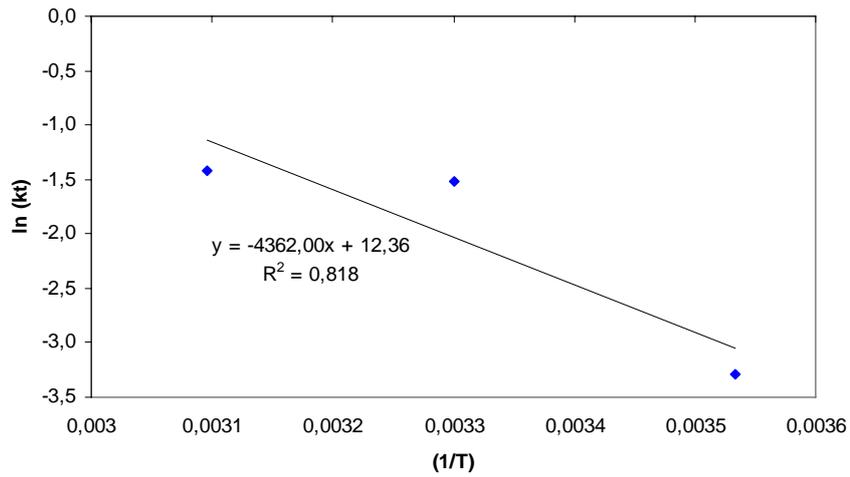


Figura 51: gráficos de Arrhenius para os CPs 40x40x160mm para (a)  $a/c = 0,25$ ; (b)  $a/c = 0,35$  e (c)  $a/c = 0,45$

Apresentam-se na Tabela 49 os valores de energia aparente de ativação ( $E_a$ ) para os corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 40x40x160mm, para as relações água/cimento estudadas.

Tabela 49: energia aparente de ativação para os CPs 40x40x160mm

| a/c  | $E_a$<br>(kJ/mol) |
|------|-------------------|
| 0,25 | 36,27             |
| 0,35 | 31,77             |
| 0,45 | 29,08             |

Apresentam-se na Figura 52 as curvas de maturidade (idade equivalente x resistência à tração na flexão) para os corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 40x40x160mm, ensaiados à tração, para as relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45.

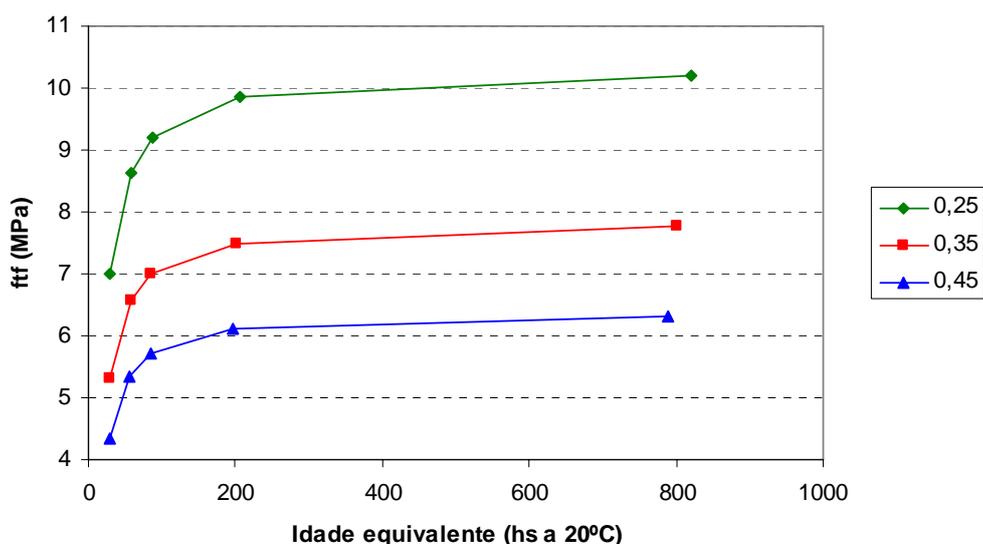


Figura 52: curvas de maturidade para os corpos-de-prova 40x40x160mm

Nas Tabelas 50, 51 e 52 apresentam-se os valores de resistência à compressão das metades dos corpos-de-prova de argamassa de dimensões 40x40x160mm, ensaiados à tração na flexão, para as três relações água/cimento estudadas e suas idades de ruptura, para as temperaturas de 10, 30 e 50°C respectivamente.

Tabela 50: resistência à compressão – argamassa – metades dos CPs 40x40x160 mm – curada a 10°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | Fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 9,47                 | 0,99     | 0,80         | 0,14        | 17,46     | 13,77      | 6,57     | 4,43         | 2,73        | 61,45     | 17,80      | 10,60    | 12,10        | 1,26        | 10,40     |
|       |                      | 0,93     |              |             |           |            | 7,01     |              |             |           |            | 10,48    |              |             |           |
|       |                      | 0,74     |              |             |           |            | ---      |              |             |           |            | 12,52    |              |             |           |
|       |                      | 0,62     |              |             |           |            | ---      |              |             |           |            | 12,46    |              |             |           |
|       |                      | 0,74     |              |             |           |            | 2,05     |              |             |           |            | 13,21    |              |             |           |
| T 3   | 9,47                 | 0,74     | 0,80         | 0,14        | 17,46     | 13,77      | 2,11     | 4,43         | 2,73        | 61,45     | 17,80      | 13,33    | 12,10        | 1,26        | 10,40     |
|       |                      | 8,68     |              |             |           |            | 24,92    |              |             |           |            | 21,51    |              |             |           |
|       |                      | 11,10    |              |             |           |            | 26,60    |              |             |           |            | 19,96    |              |             |           |
| T 2   | 18,93                | 9,05     | 8,44         | 1,54        | 18,28     | 27,53      | 17,36    | 20,40        | 4,21        | 20,65     | 35,60      | 18,17    | 19,80        | 1,58        | 7,98      |
|       |                      | 7,56     |              |             |           |            | 18,60    |              |             |           |            | 17,61    |              |             |           |
|       |                      | 6,82     |              |             |           |            | 17,36    |              |             |           |            | 20,46    |              |             |           |
|       |                      | 7,44     |              |             |           |            | 17,55    |              |             |           |            | 21,08    |              |             |           |
| T 1   | 37,87                | 48,36    | 38,78        | 8,40        | 21,67     | 55,07      | 39,37    | 37,59        | 2,61        | 6,95      | 71,20      | 23,41    | 24,39        | 3,20        | 13,11     |
|       |                      | 48,05    |              |             |           |            | 38,91    |              |             |           |            | 26,97    |              |             |           |
|       |                      | 26,97    |              |             |           |            | 37,82    |              |             |           |            | 28,15    |              |             |           |
|       |                      | 32,86    |              |             |           |            | 36,27    |              |             |           |            | 26,04    |              |             |           |
|       |                      | 38,13    |              |             |           |            | 33,02    |              |             |           |            | 19,84    |              |             |           |
| T 3   | 37,87                | 38,29    | 38,78        | 8,40        | 21,67     | 55,07      | 40,15    | 37,59        | 2,61        | 6,95      | 71,20      | 21,95    | 24,39        | 3,20        | 13,11     |
|       |                      | 67,43    |              |             |           |            | 38,19    |              |             |           |            | 35,50    |              |             |           |
|       |                      | 62,31    |              |             |           |            | 40,98    |              |             |           |            | 37,05    |              |             |           |
|       |                      | 39,84    |              |             |           |            | 52,86    |              |             |           |            | 30,85    |              |             |           |
| T 2   | 75,73                | 47,74    | 54,87        | 9,93        | 18,09     | 110,13     | 44,89    | 43,47        | 5,16        | 11,88     | 142,40     | 35,96    | 33,45        | 3,02        | 9,03      |
|       |                      | 55,49    |              |             |           |            | 43,46    |              |             |           |            | 30,38    |              |             |           |
|       |                      | 56,42    |              |             |           |            | 40,46    |              |             |           |            | 31,00    |              |             |           |
|       |                      | 67,58    |              |             |           |            | 46,50    |              |             |           |            | 37,82    |              |             |           |
| T 1   | 151,47               | 60,14    | 66,20        | 4,42        | 6,67      | 220,27     | 54,41    | 50,12        | 2,94        | 5,86      | 284,80     | 37,67    | 36,14        | 1,95        | 5,41      |
|       |                      | 63,24    |              |             |           |            | 50,69    |              |             |           |            | 34,26    |              |             |           |
|       |                      | 64,48    |              |             |           |            | 47,12    |              |             |           |            | 33,79    |              |             |           |
|       |                      | 69,50    |              |             |           |            | 51,62    |              |             |           |            | 38,13    |              |             |           |
|       |                      | 72,23    |              |             |           |            | 50,38    |              |             |           |            | 35,19    |              |             |           |
| T 3   | 151,47               | 72,23    | 66,20        | 4,42        | 6,67      | 220,27     | 50,38    | 50,12        | 2,94        | 5,86      | 284,80     | 35,19    | 36,14        | 1,95        | 5,41      |
|       |                      | 66,50    |              |             |           |            | 59,52    |              |             |           |            | 40,92    |              |             |           |
|       |                      | 72,85    |              |             |           |            | 61,38    |              |             |           |            | 38,29    |              |             |           |
|       |                      | 53,94    |              |             |           |            | 61,07    |              |             |           |            | 34,41    |              |             |           |
|       |                      | 58,13    |              |             |           |            | 62,00    |              |             |           |            | 32,40    |              |             |           |
| T 2   | 302,93               | 58,13    | 67,92        | 10,28       | 15,13     | 440,53     | 59,52    | 59,52        | 2,43        | 4,07      | 569,60     | 36,12    | 36,92        | 3,20        | 8,67      |
|       |                      | 76,51    |              |             |           |            | 56,42    |              |             |           |            | 36,12    |              |             |           |
|       |                      | 79,61    |              |             |           |            | 56,73    |              |             |           |            | 39,37    |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 19:

$$f_c = \frac{17,66}{a/c^{1,04}} \times e^{-\left[\left(\frac{28,43}{idade}\right)^{1,26}\right]} \quad (\text{Equação 19})$$

$$R^2 = 97,1\%$$

Na Figura 53 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, metades dos de dimensões 40x40x160mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 10°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

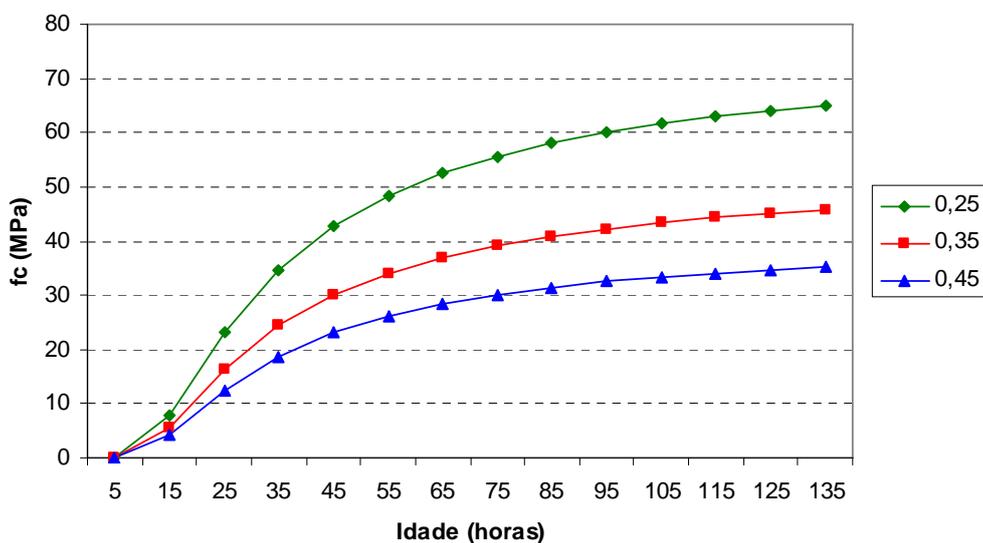


Figura 53: resistência à compressão versus idade, metades dos CPs prismáticos, 10°C

Utilizando-se a Equação 19 foi possível modelar o comportamento das metades dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. Ocorreu um acréscimo na resistência à compressão de 87,6% de 35 para 135 horas de idade.

Tabela 51: resistência à compressão – argamassa – metades dos CPs 40x40x160 mm – curada a 30°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 6,03                 | 6,26     | 5,70         | 0,89        | 15,52     | 7,08       | 3,84     | 3,48         | 0,71        | 20,34     | 9,37       | 4,46     | 4,56         | 0,24        | 5,23      |
| T 2   |                      | 6,57     |              |             |           |            | 3,97     |              |             |           |            | 4,40     |              |             |           |
| T 3   |                      | 6,26     |              |             |           |            | 3,97     |              |             |           |            | 5,02     |              |             |           |
|       |                      | 5,95     |              |             |           |            | 3,97     |              |             |           |            | 4,59     |              |             |           |
|       |                      | 4,65     |              |             |           |            | 2,60     |              |             |           |            | 4,40     |              |             |           |
|       |                      | 4,53     |              |             |           |            | 2,54     |              |             |           |            | 4,46     |              |             |           |
| T 1   | 12,07                | 48,83    | 48,77        | 1,80        | 3,69      | 14,17      | 24,92    | 26,42        | 2,67        | 10,09     | 18,73      | 21,39    | 21,11        | 0,46        | 2,18      |
| T 2   |                      | 48,36    |              |             |           |            | 22,32    |              |             |           |            | 20,89    |              |             |           |
| T 3   |                      | 45,88    |              |             |           |            | 27,90    |              |             |           |            | 21,08    |              |             |           |
|       |                      | 48,21    |              |             |           |            | 30,19    |              |             |           |            | 21,02    |              |             |           |
|       |                      | 50,53    |              |             |           |            | 26,54    |              |             |           |            | 20,46    |              |             |           |
|       |                      | 50,84    |              |             |           |            | 26,66    |              |             |           |            | 21,82    |              |             |           |
| T 1   | 24,13                | 65,72    | 61,11        | 6,23        | 10,20     | 28,33      | 42,94    | 39,84        | 3,08        | 7,74      | 37,47      | 25,11    | 29,26        | 2,83        | 9,69      |
| T 2   |                      | 56,79    |              |             |           |            | 42,63    |              |             |           |            | 27,40    |              |             |           |
| T 3   |                      | 65,57    |              |             |           |            | 35,19    |              |             |           |            | 32,86    |              |             |           |
|       |                      | 68,20    |              |             |           |            | 37,20    |              |             |           |            | 31,81    |              |             |           |
|       |                      | 52,55    |              |             |           |            | 39,99    |              |             |           |            | 29,08    |              |             |           |
|       |                      | 57,82    |              |             |           |            | 41,08    |              |             |           |            | 29,33    |              |             |           |
| T 1   | 48,27                | ---      | 70,71        | 0,38        | 0,54      | 56,67      | 48,83    | 47,06        | 2,73        | 5,79      | 74,93      | 29,61    | 31,62        | 2,38        | 7,53      |
| T 2   |                      | ---      |              |             |           |            | 44,39    |              |             |           |            | 33,79    |              |             |           |
| T 3   |                      | 70,68    |              |             |           |            | 51,62    |              |             |           |            | 29,61    |              |             |           |
|       |                      | 71,24    |              |             |           |            | 44,80    |              |             |           |            | 30,69    |              |             |           |
|       |                      | 70,53    |              |             |           |            | 46,50    |              |             |           |            | 35,34    |              |             |           |
|       |                      | 70,37    |              |             |           |            | 46,25    |              |             |           |            | 30,69    |              |             |           |
| T 1   | 96,53                | 79,52    | 74,51        | 9,45        | 12,68     | 113,33     | 50,38    | 50,07        | 3,57        | 7,13      | 149,87     | 36,89    | 35,51        | 2,16        | 6,09      |
| T 2   |                      | 80,91    |              |             |           |            | 49,79    |              |             |           |            | 33,17    |              |             |           |
| T 3   |                      | 81,07    |              |             |           |            | 51,15    |              |             |           |            | 35,09    |              |             |           |
|       |                      | 80,91    |              |             |           |            | 53,94    |              |             |           |            | 37,36    |              |             |           |
|       |                      | 62,37    |              |             |           |            | 51,77    |              |             |           |            | 32,80    |              |             |           |
|       |                      | 62,31    |              |             |           |            | 43,40    |              |             |           |            | 37,76    |              |             |           |
| T 1   | 193,07               | 84,44    | 73,32        | 12,72       | 17,35     | 226,67     | 53,01    | 54,12        | 4,27        | 7,88      | 299,73     | 39,53    | 39,32        | 2,71        | 6,89      |
| T 2   |                      | 77,81    |              |             |           |            | 52,24    |              |             |           |            | 39,37    |              |             |           |
| T 3   |                      | 79,36    |              |             |           |            | 54,25    |              |             |           |            | 35,71    |              |             |           |
|       |                      | 48,36    |              |             |           |            | 60,76    |              |             |           |            | 39,22    |              |             |           |
|       |                      | 74,90    |              |             |           |            | 56,42    |              |             |           |            | 38,07    |              |             |           |
|       |                      | 75,02    |              |             |           |            | 48,05    |              |             |           |            | 44,02    |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 20:

$$f_c = \frac{12,80}{a/c^{1,26}} \times e^{-\left[\left(\frac{9,76}{idade}\right)^{1,74}\right]} \quad (\text{Equação 20})$$

$$R^2 = 94,0\%$$

Na Figura 54 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, metades dos de dimensões 40x40x160mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 30°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

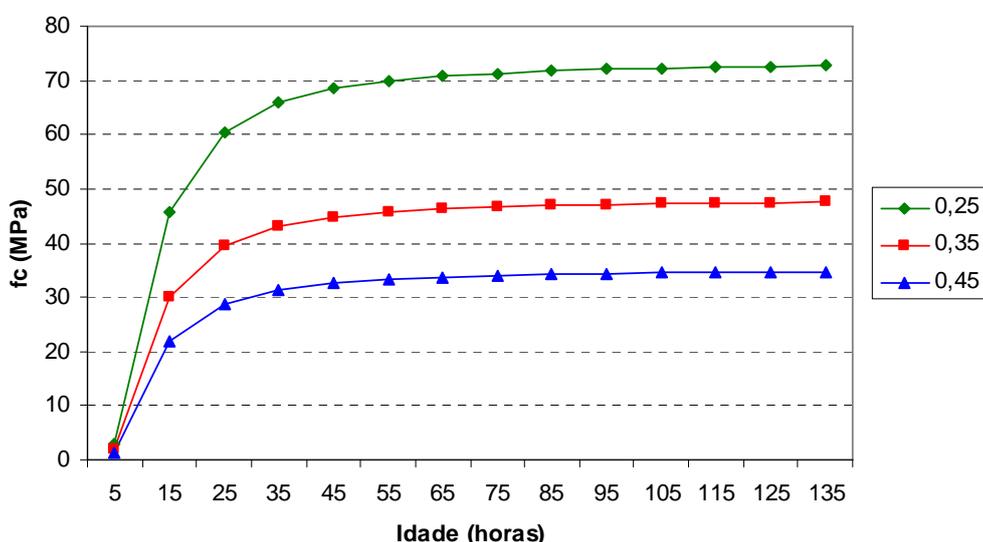


Figura 54: resistência à compressão versus idade, metades dos CPs prismáticos, 30°C

Utilizando-se a Equação 20 foi possível modelar o comportamento das metades dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. Ocorreu um acréscimo na resistência à compressão de 10,3% de 35 para 135 horas de idade.

Nos dados apresentados na Tabela 52, não foi possível obter os valores do primeiro ponto (3,97 horas) da relação água/cimento 0,35, portanto rompeu-se até o sétimo ponto.

Tabela 52: resistência à compressão – argamassa – metades dos CPs 40x40x160 mm – curada a 50°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 1   | 3,25                 | 1,36     | 1,32         | 0,20        | 15,15     | 7,93       | 29,14    | 27,82        | 1,71        | 6,14      | 4,38       | 1,24     | 1,28         | 0,11        | 8,41      |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 2   |                      | 1,49     |              |             |           |            | 29,95    |              |             |           |            | 1,24     |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 3   |                      | 1,24     |              |             |           |            | 27,03    |              |             |           |            | 1,12     |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|       |                      | 1,61     |              |             |           |            | 27,84    |              |             |           |            | 1,36     |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|       |                      | 1,12     |              |             |           |            | 27,90    |              |             |           |            | 1,43     |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 1   |                      | 6,50     |              |             |           |            | 37,20    |              |             |           |            | 42,24    |              |             |           | 5,09   | 12,06 | 15,87 | 38,75 | 40,09 | 2,31   | 5,77  | 8,77  | 18,60 | 19,08 | 0,43 | 2,25 |
| T 2   |                      |          |              |             |           |            | 36,12    |              |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       | 39,22 |       |        |       |       | 18,85 |       |      |      |
| T 3   |                      |          |              |             |           |            | 44,95    |              |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       | 43,56 |       |        |       |       | 19,53 |       |      |      |
|       |                      |          |              |             |           |            | 49,91    |              |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       | 41,08 |       |        |       |       | 19,34 |       |      |      |
|       | 42,16                |          | 41,08        | ---         |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 1   | 13,00                |          | 64,48        | 63,09       | 1,88      | 2,99       | 31,73    | 44,02        | 46,14       | 1,38      | 2,98       |          | 17,53        | 23,56       | 23,92     |        |       |       | 1,37  |       |        |       |       | 5,74  |       |      |      |
| T 2   |                      |          | 63,86        |             |           |            |          | 47,74        |             |           |            |          |              | 23,56       |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 3   |                      |          | 65,72        |             |           |            |          | 45,88        |             |           |            |          |              | 22,69       |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|       |                      |          | 62,00        |             |           |            |          | 46,25        |             |           |            |          |              | 25,89       |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|       |                      | 60,92    | ---          |             |           |            |          | ---          |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 1   |                      | 26,00    | 66,03        |             |           |            |          | 66,00        |             |           |            | 4,26     |              | 6,45        |           | 63,47  | 45,26 | 42,94 |       | 3,61  | 8,41   | 35,07 | 33,36 |       | 32,07 | 1,54 | 4,81 |
| T 2   |                      |          | 65,26        |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |        | 37,51 |       |       |       |        |       | 32,18 |       |       |      |      |
| T 3   |                      |          | ---          |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |        | 44,95 |       |       |       |        |       | 29,57 |       |       |      |      |
|       |                      |          | 59,37        |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |        | 39,22 |       |       |       |        |       | 31,74 |       |       |      |      |
|       | 68,98                |          | 44,64        | 31,62       |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 1   | 52,00                |          | 70,37        | 55,00       | 3,39      | 6,15       | 126,93   |              | 46,04       | 45,65     | 3,43       |          | 7,52         |             | 70,13     |        | 33,98 |       | 27,94 |       |        |       | 2,03  | 7,26  |       |      |      |
| T 2   |                      |          | 57,04        |             |           |            |          |              | 41,23       |           |            |          |              |             |           |        | 26,72 |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 3   |                      |          | 59,99        |             |           |            |          |              | 44,49       |           |            |          |              |             |           |        | 25,79 |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|       |                      |          | 55,86        |             |           |            |          |              | 49,60       |           |            |          |              |             |           |        | 30,07 |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
|       |                      | 54,37    | 44,95        |             |           |            |          | 26,54        |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 1   |                      | 104,00   | 50,69        |             |           |            |          | 70,08        | 3,52        |           |            | 5,02     |              | 253,87      |           | 43,71  | 49,99 | 1,66  |       | 3,31  | 140,27 | 30,75 |       |       | 34,93 | 2,94 | 8,41 |
| T 2   |                      |          | 52,08        |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           | 49,91  |       |       |       |       |        | 27,75 |       |       |       |      |      |
| T 3   |                      |          | 68,05        |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           | 50,07  |       |       |       |       |        | 34,88 |       |       |       |      |      |
|       |                      |          | 67,64        |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           | 47,43  |       |       |       |       |        | 32,86 |       |       |       |      |      |
|       | 65,47                |          | 52,08        | 32,40       |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |        |       |       |       |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 1   | 71,92                |          | 73,01        | 70,08       | 3,52      | 5,02       | 253,87   |              |             | 48,98     | 49,99      |          | 1,66         |             | 3,31      | 140,27 |       |       | 32,40 |       |        | 34,93 | 2,94  | 8,41  |       |      |      |
| T 2   |                      |          | 74,40        |             |           |            |          |              |             | 51,31     |            |          |              |             |           |        |       |       | 38,75 |       |        |       |       |       |       |      |      |
| T 3   |                      |          | 71,92        |             |           |            |          |              |             | 50,07     |            |          |              |             |           |        |       |       | 38,32 |       |        |       |       |       |       |      |      |

O modelo resultante está expresso na Equação 21:

$$f_c = \frac{10,98}{a/c^{1,29}} \times e^{-\left[\left(\frac{5,32}{idade}\right)^{2,77}\right]} \quad (\text{Equação 21})$$

$$R^2 = 94,5\%$$

Na Figura 55 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de argamassa, metades dos de dimensões 40x40x160mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 50°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

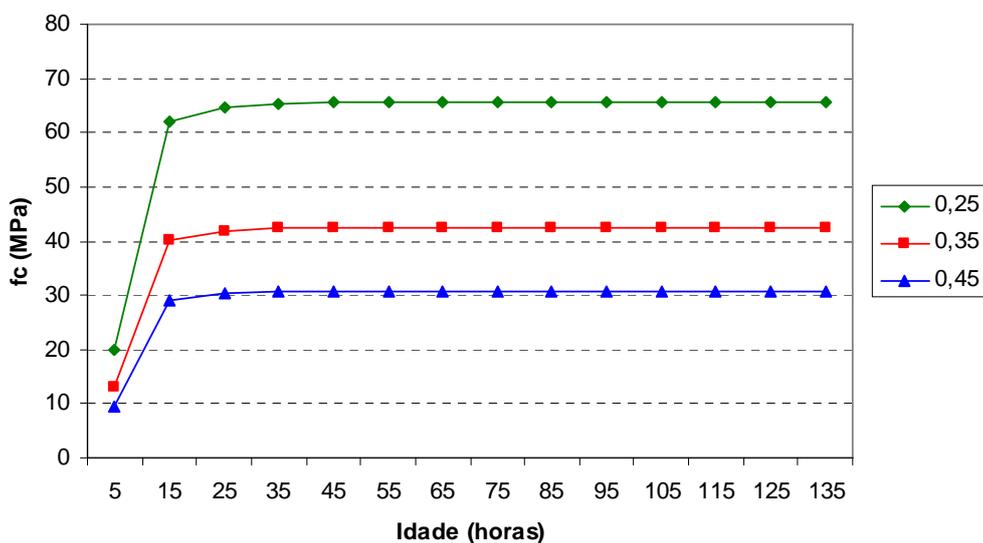


Figura 55: resistência à compressão versus idade, metades dos CPs prismáticos, 50°C

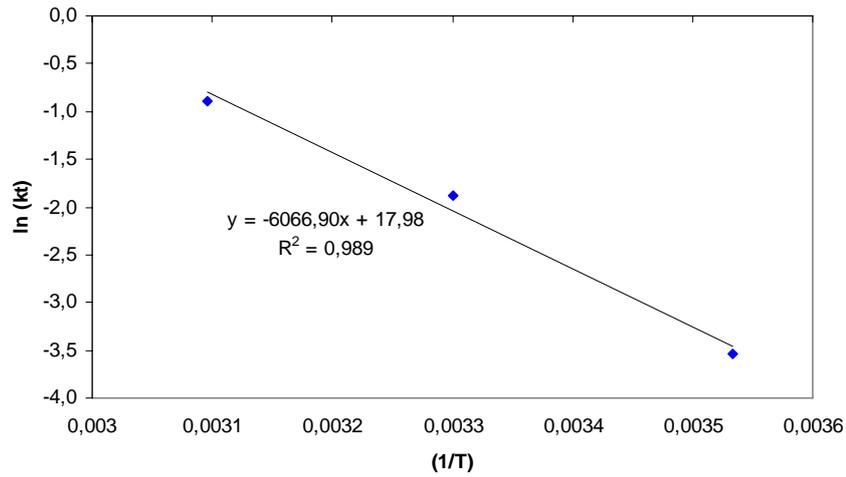
Utilizando-se a Equação 21 foi possível modelar o comportamento das metades dos corpos-de-prova de argamassa ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. Ocorreu um acréscimo na resistência à compressão de 0,5% de 35 para 135 horas de idade.

Apresentam-se na Tabela 53 os dados obtidos no software utilizado para as metades dos corpos-de-prova prismáticos ensaiados à tração na flexão, rompidas à compressão, para as três temperaturas e três relações água/cimento estudadas. Os valores de  $f_{c\infty}$ ,  $k_t$ ,  $t_o$  e  $R^2$  foram obtidos através de gráficos gerados pelo software que se encontram no Anexo B.

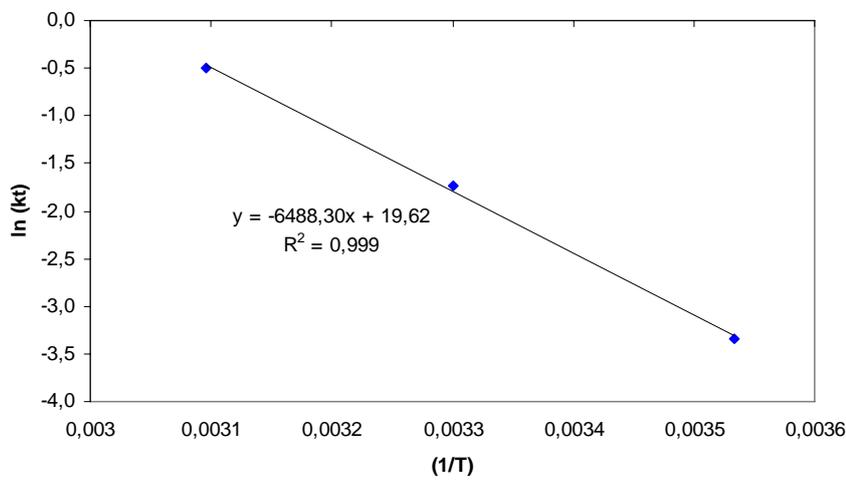
Tabela 53: dados obtidos no software para as metades dos CPs 40x40x160mm, ensaiadas à compressão

| a/c  | T (°C) | $f_{c\infty}$ | $k_t$  | $t_o$   | $R^2$  | $\ln(k_t)$ | $1/T$   |
|------|--------|---------------|--------|---------|--------|------------|---------|
| 0,25 | 10     | 81,1784       | 0,0293 | 9,5883  | 0,9943 | 0,9663     | -3,5315 |
|      | 30     | 77,4835       | 0,1533 | 5,4030  | 0,9949 | 61,2379    | -1,8757 |
|      | 50     | 69,7975       | 0,4117 | 3,2176  | 0,9880 | 66,3521    | -0,8876 |
| 0,35 | 10     | 55,2263       | 0,0354 | 11,6343 | 0,9977 | -3,3942    | -3,3403 |
|      | 30     | 50,0617       | 0,1758 | 5,9676  | 0,9965 | 40,4797    | -1,7385 |
|      | 50     | 44,1118       | 0,6035 | 3,7855  | 0,9952 | 42,5849    | -0,5050 |
| 0,45 | 10     | 41,8849       | 0,0396 | 13,1707 | 0,9987 | -6,0180    | -3,2284 |
|      | 30     | 35,9133       | 0,2198 | 7,1113  | 0,9979 | 29,9579    | -1,5151 |
|      | 50     | 31,6267       | 0,7262 | 4,0889  | 0,9967 | 30,7058    | -0,3199 |

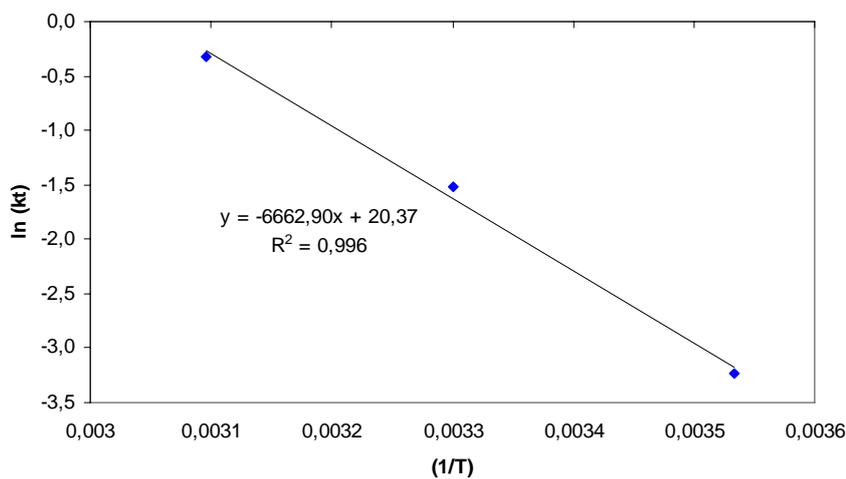
Na Figura 56 apresentam-se os gráficos de Arrhenius para as três relações água/cimento estudadas, para as metades dos corpos-de-prova de dimensões 40x40x160mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 56: gráficos de Arrhenius para as metades dos CPs 40x40x160mm para (a)  $a/c = 0,25$ ; (b)  $a/c = 0,35$  e (c)  $a/c = 0,45$

Apresentam-se na Tabela 54 os valores de energia aparente de ativação ( $E_a$ ) para as metades dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 40x40x160mm, para as relações água/cimento estudadas.

Tabela 54: energia aparente de ativação para as metades dos CPs 40x40x160mm

| a/c  | $E_a$<br>(kJ/mol) |
|------|-------------------|
| 0,25 | 50,44             |
| 0,35 | 53,94             |
| 0,45 | 55,40             |

Apresentam-se na Figura 57 as curvas de maturidade (idade equivalente x resistência à compressão) para as metades dos corpos-de-prova de argamassa, de dimensões 40x40x160mm, ensaiados à compressão, para as relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45.

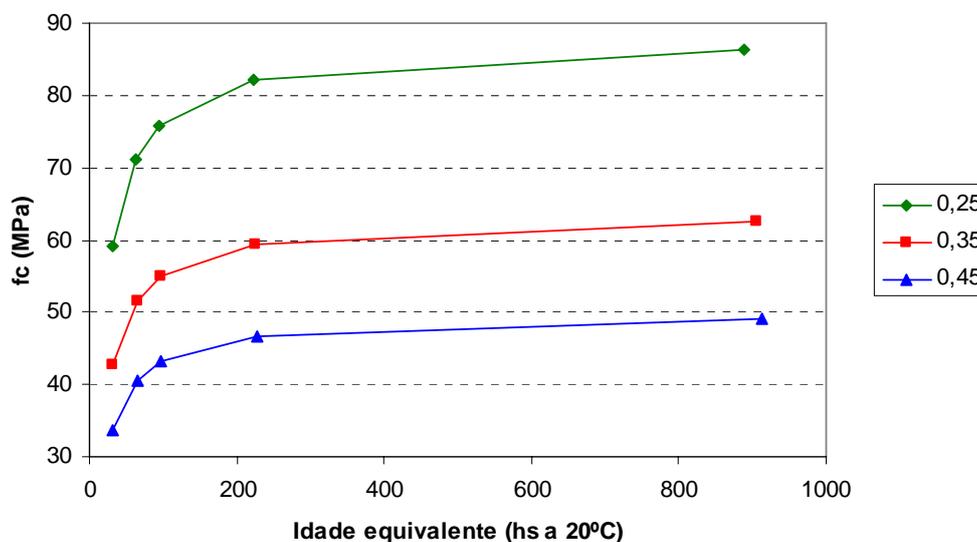


Figura 57: curvas de maturidade para as metades dos corpos-de-prova 40x40x160mm

Nas Tabelas 55, 56 e 57 apresentam-se os valores de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova de concreto de dimensões 100x100x350mm, para as três relações

água/cimento estudadas e suas respectivas idades de ruptura, para as temperaturas de 10, 30 e 50°C respectivamente.

Nos dados apresentados na Tabela 55, não foi possível obter os valores do primeiro ponto (9,47 horas) da relação água/cimento 0,25, portanto rompeu-se até o sétimo ponto, obtendo-se desta forma os seis pontos necessários para a determinação da energia aparente de ativação.

Tabela 55: resistência à tração – concreto – curado a 10°C

| Traço | Relação água/cimento |           |               |             |           |            |           |               |             |           |            |           |               |             |           |
|-------|----------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |           |               |             |           | 0,35       |           |               |             |           | 0,45       |           |               |             |           |
|       | Idade (hs)           | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 18,93                | 1,10      | 1,04          | 0,26        | 24,55     | 13,77      | 0,48      | 0,52          | 0,09        | 17,02     | 17,80      | 1,55      | 1,57          | 0,67        | 42,46     |
| T 2   |                      | 0,76      |               |             |           |            | 0,63      |               |             |           |            | 2,24      |               |             |           |
| T 3   |                      | 1,26      |               |             |           |            | 0,47      |               |             |           |            | 0,91      |               |             |           |
| T 1   | 37,87                | 7,06      | 6,83          | 0,23        | 3,30      | 27,53      | 3,12      | 3,23          | 0,49        | 15,30     | 35,60      | 3,96      | 3,41          | 0,96        | 27,99     |
| T 2   |                      | 6,61      |               |             |           |            | 3,77      |               |             |           |            | 3,97      |               |             |           |
| T 3   |                      | 6,82      |               |             |           |            | 2,80      |               |             |           |            | 2,31      |               |             |           |
| T 1   | 75,73                | 9,23      | 9,49          | 0,92        | 9,67      | 55,07      | 6,43      | 6,61          | 0,16        | 2,43      | 71,20      | 4,50      | 4,34          | 0,19        | 4,41      |
| T 2   |                      | 8,73      |               |             |           |            | 6,74      |               |             |           |            | 4,40      |               |             |           |
| T 3   |                      | 10,51     |               |             |           |            | 6,66      |               |             |           |            | 4,13      |               |             |           |
| T 1   | 151,47               | 9,61      | 9,65          | 0,51        | 5,25      | 110,13     | 7,31      | 7,17          | 0,20        | 2,72      | 142,40     | 6,29      | 5,90          | 0,68        | 11,45     |
| T 2   |                      | 9,17      |               |             |           |            | 6,95      |               |             |           |            | 5,12      |               |             |           |
| T 3   |                      | 10,18     |               |             |           |            | 7,26      |               |             |           |            | 6,29      |               |             |           |
| T 1   | 302,93               | 10,05     | 10,51         | 0,77        | 7,34      | 220,27     | 7,74      | 7,68          | 0,08        | 1,10      | 284,80     | 4,68      | 5,85          | 1,12        | 19,06     |
| T 2   |                      | 10,08     |               |             |           |            | ---       |               |             |           |            | 6,90      |               |             |           |
| T 3   |                      | 11,40     |               |             |           |            | 7,62      |               |             |           |            | 5,98      |               |             |           |
| T 1   | 605,87               | 9,28      | 10,52         | 1,29        | 12,25     | 440,53     | 6,83      | 7,78          | 1,04        | 13,36     | 569,60     | 6,76      | 6,81          | 0,30        | 4,38      |
| T 2   |                      | 10,41     |               |             |           |            | 7,62      |               |             |           |            | 7,13      |               |             |           |
| T 3   |                      | 11,85     |               |             |           |            | 8,89      |               |             |           |            | 6,54      |               |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 22:

$$f_{tf} = \frac{2,63}{a/c^{1,0}} \times e^{-\left[\left(\frac{25,5}{idade}\right)^2\right]} \quad (\text{Equação 22})$$

$$R^2 = 97,5\%$$

Na Figura 58 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de concreto, de dimensões 100x100x350mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 10°C e submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão.

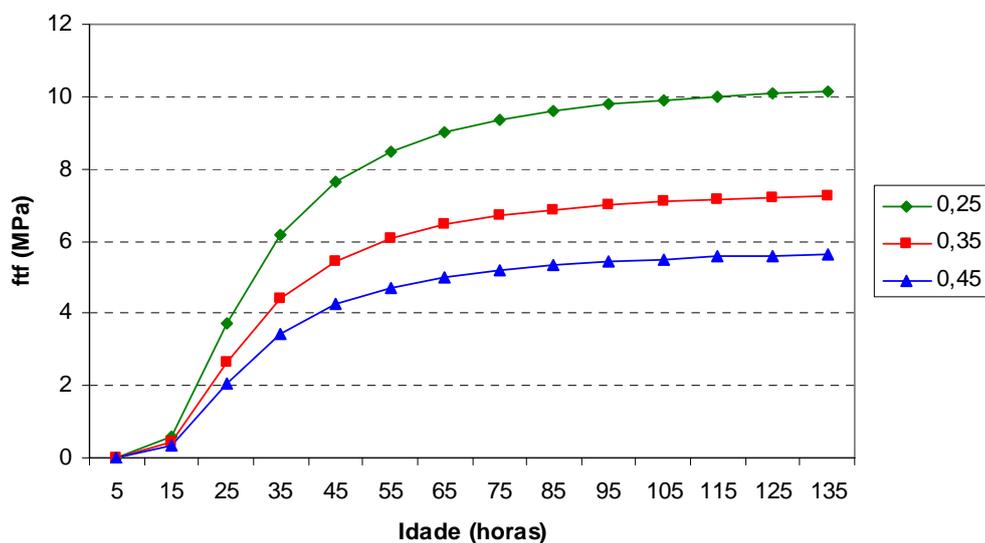


Figura 58: resistência à tração versus idade, CP 100x100x350mm, 10°C

Utilizando-se a Equação 22 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de concreto ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. Ocorreu um acréscimo de resistência à tração na flexão nos corpos-de-prova de concreto de aproximadamente 1200% de 15 para 45 horas. O concreto com

relação água/cimento 0,35, com 25 horas de idade, apresentou 2,65MPa de resistência à tração na flexão, sendo que, o Departamento de Transportes de Iowa admite um mínimo de resistência igual a 2,5MPa para abertura ao tráfego (GODINHO e GROSSI, 2000).

Nos dados apresentados na Tabela 56, não foi possível obter os valores do primeiro ponto (7,08 horas) da relação água/cimento 0,35 e da relação água/cimento 0,45 (9,37 horas), portanto rompeu-se até o sétimo ponto, obtendo-se desta forma os seis pontos necessários para a determinação da energia aparente de ativação.

Tabela 56: resistência à tração – concreto – curado a 30°C

| Traço | Relação água/cimento |           |               |             |           |            |           |               |             |           |            |           |               |             |           |
|-------|----------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |           |               |             |           | 0,35       |           |               |             |           | 0,45       |           |               |             |           |
|       | Idade (hs)           | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 6,03                 | 0,16      | 0,43          | 0,38        | 88,80     | 14,17      | 3,58      | 4,09          | 0,44        | 10,85     | 18,73      | 4,93      | 4,57          | 0,74        | 16,17     |
| T 2   |                      | 0,70      |               |             |           |            | 4,39      |               |             |           |            | 3,72      |               |             |           |
| T 3   |                      | ---       |               |             |           |            | 4,30      |               |             |           |            | 5,06      |               |             |           |
| T 1   | 12,07                | 4,39      | 4,24          | 0,53        | 12,53     | 28,33      | 5,74      | 6,16          | 0,62        | 10,13     | 37,47      | 5,42      | 6,19          | 0,69        | 11,22     |
| T 2   |                      | 3,65      |               |             |           |            | 5,87      |               |             |           |            | 6,77      |               |             |           |
| T 3   |                      | 4,68      |               |             |           |            | 6,88      |               |             |           |            | 6,38      |               |             |           |
| T 1   | 24,13                | 5,95      | 7,61          | 1,43        | 18,86     | 56,67      | 7,07      | 7,33          | 0,28        | 3,77      | 74,93      | 6,19      | 5,78          | 0,38        | 6,59      |
| T 2   |                      | 8,41      |               |             |           |            | 7,30      |               |             |           |            | 5,44      |               |             |           |
| T 3   |                      | 8,46      |               |             |           |            | 7,62      |               |             |           |            | 5,70      |               |             |           |
| T 1   | 48,27                | 6,99      | 8,59          | 1,39        | 16,16     | 113,33     | 8,46      | 8,54          | 0,35        | 4,12      | 149,87     | 6,27      | 6,55          | 0,51        | 7,80      |
| T 2   |                      | 9,48      |               |             |           |            | 8,92      |               |             |           |            | 6,24      |               |             |           |
| T 3   |                      | 9,30      |               |             |           |            | 8,23      |               |             |           |            | 7,14      |               |             |           |
| T 1   | 96,53                | 7,85      | 9,45          | 1,43        | 15,10     | 226,67     | 7,69      | 7,07          | 0,63        | 8,84      | 299,73     | 7,14      | 6,80          | 0,99        | 14,54     |
| T 2   |                      | 9,91      |               |             |           |            | 6,44      |               |             |           |            | 7,58      |               |             |           |
| T 3   |                      | 10,59     |               |             |           |            | 7,08      |               |             |           |            | 5,69      |               |             |           |
| T 1   | 193,07               | 9,38      | 10,89         | 1,34        | 12,35     | 453,33     | ---       | 8,84          | 0,22        | 2,48      | 599,47     | 7,35      | 7,35          | 0,01        | 0,10      |
| T 2   |                      | 11,30     |               |             |           |            | 8,68      |               |             |           |            | 7,36      |               |             |           |
| T 3   |                      | 11,97     |               |             |           |            | 8,99      |               |             |           |            | ---       |               |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 23:

$$f_{tf} = \frac{2,70}{a/c^{1,0}} \times e^{-\left[\left(\frac{12,0}{idade}\right)^2\right]} \quad (\text{Equação 23})$$

$$R^2 = 88,8\%$$

Na Figura 59 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de concreto, de dimensões 100x100x350mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 30°C e submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão.

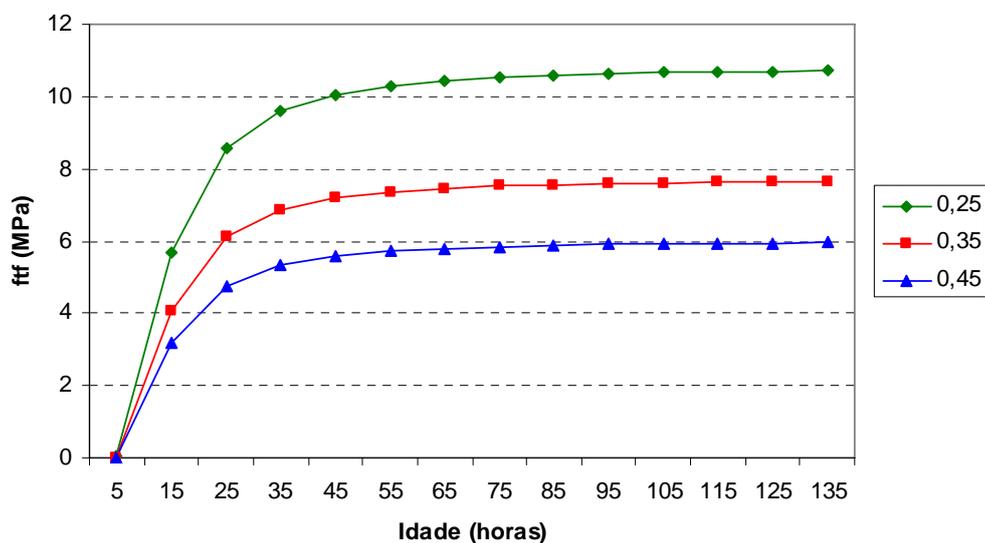


Figura 59: resistência à tração versus idade, CP 100x100x350mm, 30°C

Utilizando-se a Equação 23 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de concreto ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. De 15 para 45 horas de idade ocorreu um incremento de 76,9% na resistência à tração na flexão dos concretos estudados.

Nos dados apresentados na Tabela 57, não foi possível obter os valores do primeiro ponto (3,97 horas) da relação água/cimento 0,35, portanto rompeu-se até o sétimo ponto, obtendo-se desta forma os seis pontos necessários para a determinação da energia aparente de ativação.

Tabela 57: resistência à tração – concreto – curado a 50°C

| Traço | Relação água/cimento |           |               |             |           |            |           |               |             |           |            |           |               |             |           |
|-------|----------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |           |               |             |           | 0,35       |           |               |             |           | 0,45       |           |               |             |           |
|       | Idade (hs)           | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 3,25                 | ---       | 0,12          | ---         | ---       | 7,93       | 4,04      | 3,96          | 0,08        | 1,89      | 4,38       | 1,58      | 1,09          | 0,43        | 38,95     |
| T 2   |                      | 0,12      |               |             |           |            | 3,96      |               |             |           |            | 0,94      |               |             |           |
| T 3   |                      | ---       |               |             |           |            | 3,89      |               |             |           |            | 0,77      |               |             |           |
| T 1   | 6,50                 | 2,62      | 4,24          | 1,64        | 38,53     | 15,87      | 5,63      | 5,12          | 0,73        | 14,32     | 8,77       | 2,84      | 3,03          | 0,52        | 17,24     |
| T 2   |                      | 4,22      |               |             |           |            | 5,45      |               |             |           |            | 3,63      |               |             |           |
| T 3   |                      | 5,89      |               |             |           |            | 4,28      |               |             |           |            | 2,64      |               |             |           |
| T 1   | 13,00                | 7,85      | 7,99          | 0,20        | 2,48      | 31,73      | 5,53      | 5,35          | 0,19        | 3,47      | 17,53      | 3,49      | 3,66          | 0,24        | 6,57      |
| T 2   |                      | ---       |               |             |           |            | 5,37      |               |             |           |            | 3,83      |               |             |           |
| T 3   |                      | 8,13      |               |             |           |            | 5,16      |               |             |           |            | ---       |               |             |           |
| T 1   | 26,00                | 8,77      | 8,14          | 0,95        | 11,64     | 63,47      | 5,25      | 6,32          | 2,15        | 33,95     | 35,07      | 3,84      | 4,25          | 0,44        | 10,27     |
| T 2   |                      | 7,05      |               |             |           |            | 4,92      |               |             |           |            | 4,21      |               |             |           |
| T 3   |                      | 8,60      |               |             |           |            | 8,79      |               |             |           |            | 4,71      |               |             |           |
| T 1   | 52,00                | 8,37      | 8,78          | 0,62        | 7,03      | 126,93     | 6,13      | 5,57          | 0,73        | 13,16     | 70,13      | 3,38      | 3,90          | 0,51        | 12,97     |
| T 2   |                      | 9,49      |               |             |           |            | 5,84      |               |             |           |            | 4,39      |               |             |           |
| T 3   |                      | 8,48      |               |             |           |            | 4,74      |               |             |           |            | 3,92      |               |             |           |
| T 1   | 104,00               | 9,40      | 9,06          | 0,58        | 6,40      | 253,87     | ---       | 5,97          | 0,62        | 10,31     | 140,27     | 5,05      | 4,52          | 0,46        | 10,17     |
| T 2   |                      | 9,39      |               |             |           |            | 6,40      |               |             |           |            | 4,23      |               |             |           |
| T 3   |                      | 8,39      |               |             |           |            | 5,53      |               |             |           |            | 4,28      |               |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 24:

$$f_{tf} = \frac{2,08}{a/c^{1,0}} \times e^{-\left[\left(\frac{5,34}{idade}\right)^2\right]} \quad (\text{Equação 24})$$

$$R^2 = 94,8\%$$

Na Figura 60 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de concreto, de dimensões 100x100x350mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 50°C e submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão.

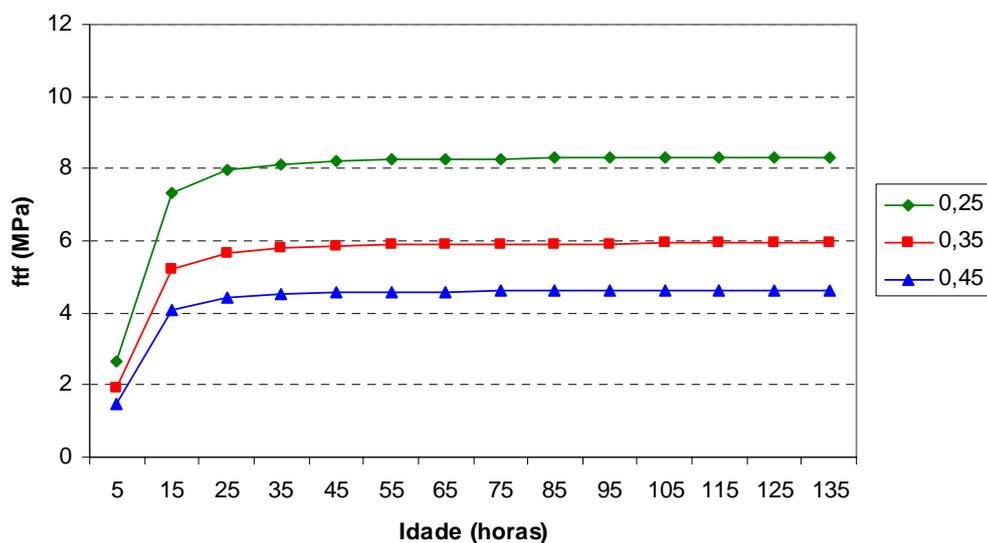


Figura 60: resistência à tração versus idade, CP 100x100x350mm, 50°C

Utilizando-se a Equação 24 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de concreto ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. A resistência à tração na flexão dos concretos aumentou

aproximadamente 12% de 15 para 45 horas de idade, conforme pode ser observado na Figura 60.

Apresentam-se na Tabela 58 os dados obtidos no software utilizado para os corpos-de-prova de dimensões 100x100x350mm, ensaiados à tração na flexão, para as três temperaturas e três relações água/cimento estudadas. Os valores de  $f_{c\infty}$ ,  $kt$ ,  $t_0$  e  $R^2$  foram obtidos através de gráficos gerados pelo software que se encontram no Anexo B.

Tabela 58: dados obtidos no software para os corpos-de-prova  
100x100x350 mm

| a/c  | T<br>(°C) | $f_{c\infty}$ | $kt$   | $t_0$   | $R^2$  | $\ln(kt)$ | $1/T$   |
|------|-----------|---------------|--------|---------|--------|-----------|---------|
| 0,25 | 10        | 12,0311       | 0,0385 | 10,4640 | 0,9706 | -0,2188   | -3,2572 |
|      | 30        | 11,7506       | 0,1112 | 6,0091  | 0,9861 | 8,5478    | -2,1960 |
|      | 50        | 8,8307        | 0,3112 | 3,0572  | 0,9924 | 8,2648    | -1,1674 |
| 0,35 | 10        | 8,0942        | 0,0568 | 13,4334 | 0,9889 | -1,9606   | -2,8684 |
|      | 30        | 8,2166        | 0,1337 | 6,7242  | 0,9917 | 6,2183    | -2,0123 |
|      | 50        | 6,1899        | 0,3887 | 3,5004  | 0,9957 | 5,8653    | -0,9451 |
| 0,45 | 10        | 6,1189        | 0,0760 | 16,0240 | 0,9949 | -5,1697   | -2,5767 |
|      | 30        | 6,2263        | 0,1824 | 8,1294  | 0,9962 | 4,9784    | -1,7015 |
|      | 50        | 4,7801        | 0,4324 | 3,7399  | 0,9966 | 4,5525    | -0,8384 |

Na Figura 61 apresentam-se os gráficos de Arrhenius para as três relações água/cimento estudadas, para os corpos-de-prova de dimensões 100x100x350mm.

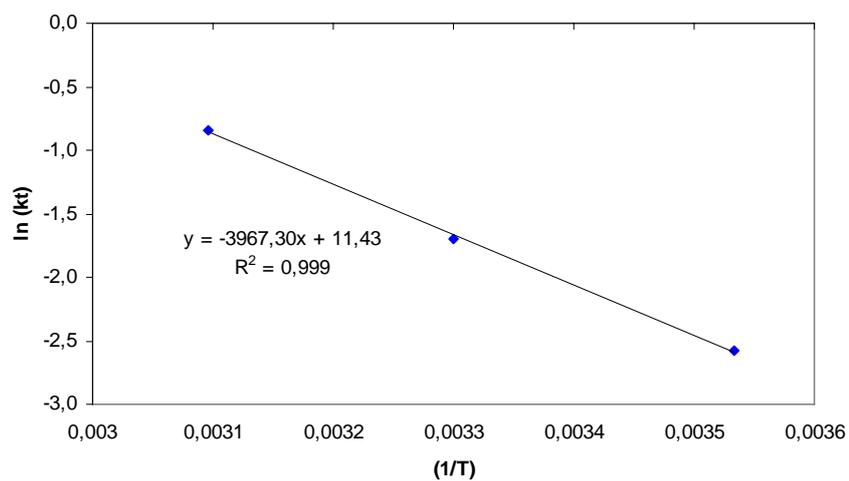
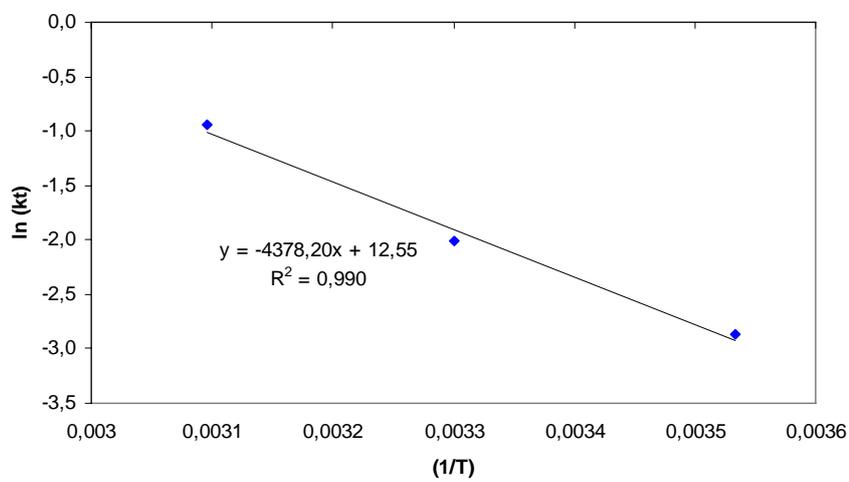
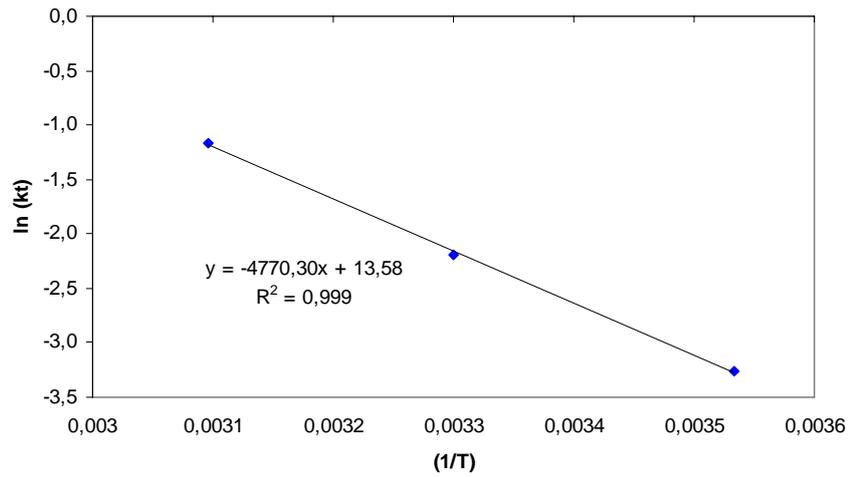


Figura 61: gráficos de Arrhenius para os CPs 100x100x350mm para (a)  $a/c = 0,25$ ; (b)  $a/c = 0,35$  e (c)  $a/c = 0,45$

Apresentam-se na Tabela 59 os valores de energia aparente de ativação ( $E_a$ ) para os corpos-de-prova de concreto, de dimensões 100x100x350mm, para as relações água/cimento estudadas.

Tabela 59: energia aparente de ativação os CPs  
100x100x350mm

| a/c  | $E_a$<br>(kJ/mol) |
|------|-------------------|
| 0,25 | 39,66             |
| 0,35 | 36,40             |
| 0,45 | 32,98             |

Apresentam-se na Figura 62 as curvas de maturidade (idade equivalente x resistência à tração na flexão) para os corpos-de-prova de concreto, de dimensões 100x100x350mm, ensaiados à tração, para as relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45.

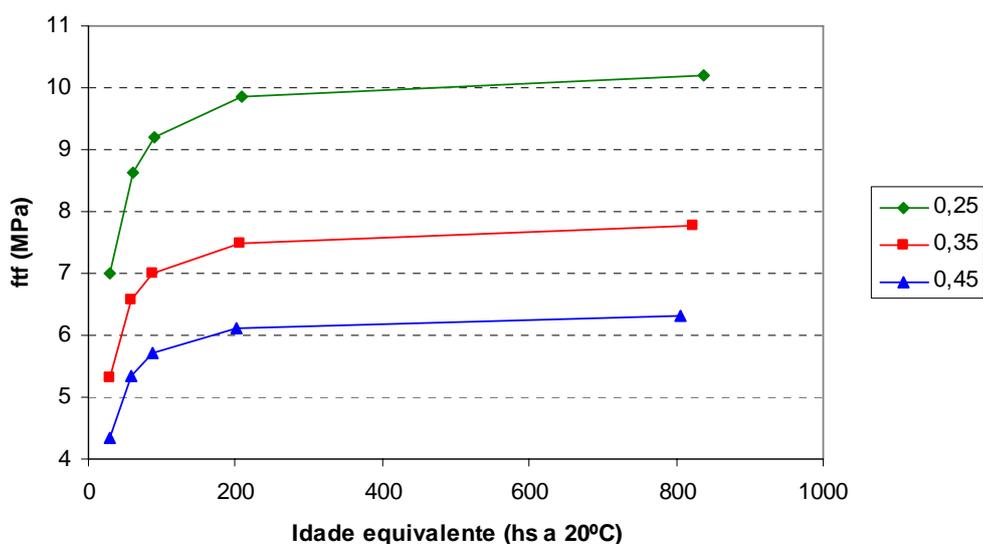


Figura 62: curvas de maturidade para as os corpos-de-prova  
100x100x350mm

Nas Tabelas 60, 61 e 62 apresentam-se os valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova de pasta de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, para as três relações água/cimento estudadas e suas respectivas idades de ruptura, para as temperaturas de 10, 30 e 50°C respectivamente.

Tabela 60: resistência à compressão – pasta – curada a 10°C

| Traço | Relação água/cimento |           |               |             |           |            |           |               |             |           |            |           |               |             |           |
|-------|----------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |           |               |             |           | 0,35       |           |               |             |           | 0,45       |           |               |             |           |
|       | Idade (hs)           | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 22                   | 1,28      | 1,07          | 0,37        | 34,64     | 26         | 2,56      | 1,60          | 0,96        | 60,00     | 31         | 0,00      | 0,00          | ---         | ---       |
| T 2   |                      | 1,28      |               |             |           |            | 0,64      |               |             |           |            | 0,00      |               |             |           |
| T 3   |                      | 0,64      |               |             |           |            | 1,60      |               |             |           |            | 0,00      |               |             |           |
| T 1   | 44                   | 24,96     | 28,37         | 3,52        | 12,42     | 52         | 16,00     | 16,64         | 2,93        | 17,63     | 62         | 20,48     | 21,55         | 0,98        | 4,54      |
| T 2   |                      | 28,16     |               |             |           |            | 14,08     |               |             |           |            | 21,76     |               |             |           |
| T 3   |                      | 32,00     |               |             |           |            | 19,84     |               |             |           |            | 22,40     |               |             |           |
| T 1   | 88                   | 64,00     | 57,39         | 7,08        | 12,34     | 104        | 38,40     | 34,35         | 3,64        | 10,60     | 124        | 17,92     | 16,43         | 1,33        | 8,11      |
| T 2   |                      | 49,92     |               |             |           |            | 33,28     |               |             |           |            | 16,00     |               |             |           |
| T 3   |                      | 58,24     |               |             |           |            | 31,36     |               |             |           |            | 15,36     |               |             |           |
| T 1   | 176                  | 52,48     | 58,03         | 4,85        | 8,35      | 208        | 35,20     | 35,84         | 0,64        | 1,79      | 248        | 21,76     | 27,52         | 9,43        | 34,26     |
| T 2   |                      | 60,16     |               |             |           |            | 36,48     |               |             |           |            | 38,40     |               |             |           |
| T 3   |                      | 61,44     |               |             |           |            | 35,84     |               |             |           |            | 22,40     |               |             |           |
| T 1   | 352                  | 104,96    | 96,64         | 8,32        | 8,61      | 416        | 41,60     | 45,01         | 13,14       | 29,18     | 496        | 38,40     | 40,11         | 4,72        | 11,76     |
| T 2   |                      | 96,64     |               |             |           |            | 33,92     |               |             |           |            | 36,48     |               |             |           |
| T 3   |                      | 88,32     |               |             |           |            | 59,52     |               |             |           |            | 45,44     |               |             |           |
| T 1   | 704                  | 115,20    | 110,72        | 10,65       | 9,62      | 832        | 69,12     | 77,01         | 7,19        | 9,34      | 992        | 50,56     | 49,49         | 0,98        | 1,98      |
| T 2   |                      | 98,56     |               |             |           |            | 78,72     |               |             |           |            | 49,28     |               |             |           |
| T 3   |                      | 118,40    |               |             |           |            | 83,20     |               |             |           |            | 48,64     |               |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 25:

$$f_c = \frac{23,3}{a/c^{1,3}} \times e^{-\left[\left(\frac{113,0}{idade}\right)^{0,65}\right]} \quad (\text{Equação 25})$$

$$R^2 = 92,6\%$$

Na Figura 63 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de pasta, de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 10°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

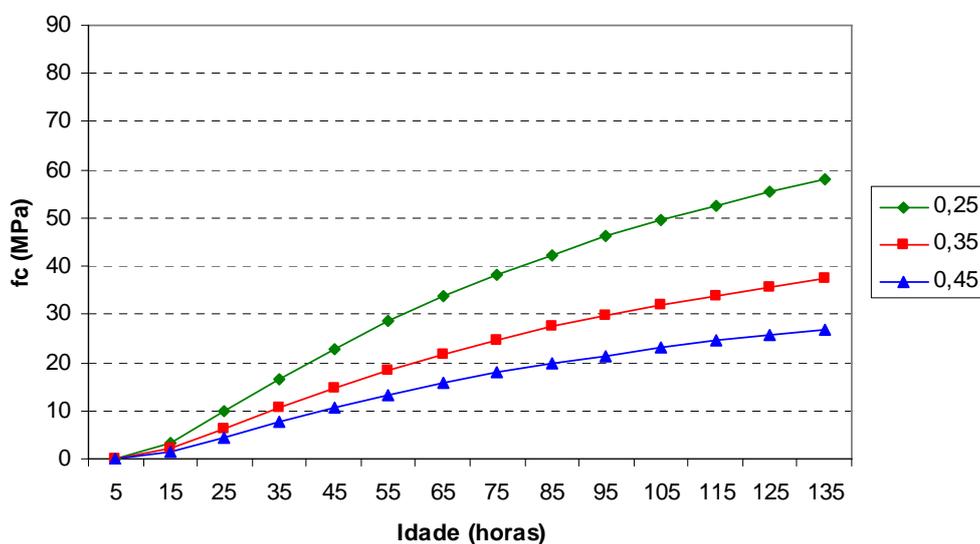


Figura 63: resistência à compressão versus idade, CP 12,5x12,5x12,5mm, 10°C

Utilizando-se a Equação 25 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de pasta ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. O aumento na resistência à compressão das pastas foi de 249,7% de 35 para 135 horas de idade.

Tabela 61: resistência à compressão – pasta – curada a 30°C

| Traço | Relação água/cimento |          |              |             |           |            |          |              |             |           |            |          |              |             |           |
|-------|----------------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|----------|--------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |          |              |             |           | 0,35       |          |              |             |           | 0,45       |          |              |             |           |
|       | Idade (hs)           | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | fc (MPa) | fc méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 12                   | 10,24    | 10,67        | 0,74        | 6,93      | 14         | 1,92     | 2,03         | 0,18        | 9,12      | 14         | 0,00     | 0,00         | ---         | ---       |
| T 2   |                      | 10,24    |              |             |           |            | 1,92     |              |             |           |            | 0,00     |              |             |           |
| T 3   |                      | 11,52    |              |             |           |            | 2,24     |              |             |           |            | 0,00     |              |             |           |
| T 1   | 24                   | 58,88    | 60,59        | 1,96        | 3,23      | 28         | 21,76    | 22,40        | 2,93        | 13,09     | 28         | 10,24    | 9,39         | 0,74        | 7,87      |
| T 2   |                      | 60,16    |              |             |           |            | 25,60    |              |             |           |            | 8,96     |              |             |           |
| T 3   |                      | 62,72    |              |             |           |            | 19,84    |              |             |           |            | 8,96     |              |             |           |
| T 1   | 48                   | 67,84    | 70,40        | 4,43        | 6,30      | 56         | 48,00    | 43,31        | 4,50        | 10,38     | 56         | 25,60    | 20,69        | 4,26        | 20,59     |
| T 2   |                      | 67,84    |              |             |           |            | 39,04    |              |             |           |            | 18,56    |              |             |           |
| T 3   |                      | 75,52    |              |             |           |            | 42,88    |              |             |           |            | 17,92    |              |             |           |
| T 1   | 96                   | 69,12    | 73,39        | 3,70        | 5,04      | 112        | 65,92    | 48,64        | 15,05       | 30,94     | 112        | 30,72    | 30,08        | 2,31        | 7,67      |
| T 2   |                      | 75,52    |              |             |           |            | 38,40    |              |             |           |            | 27,52    |              |             |           |
| T 3   |                      | 75,52    |              |             |           |            | 41,60    |              |             |           |            | 32,00    |              |             |           |
| T 1   | 192                  | 104,96   | 93,01        | 10,35       | 11,12     | 224        | 69,12    | 56,96        | 10,54       | 18,50     | 224        | ---      | ---          | ---         | ---       |
| T 2   |                      | 87,04    |              |             |           |            | 50,56    |              |             |           |            | ---      |              |             |           |
| T 3   |                      | 87,04    |              |             |           |            | 51,20    |              |             |           |            | ---      |              |             |           |
| T 1   | 384                  | 112,64   | 116,91       | 4,16        | 3,56      | 448        | 61,44    | 65,07        | 3,86        | 5,93      | 448        | 39,04    | 49,71        | 9,33        | 18,76     |
| T 2   |                      | 120,96   |              |             |           |            | 64,64    |              |             |           |            | 53,76    |              |             |           |
| T 3   |                      | 117,12   |              |             |           |            | 69,12    |              |             |           |            | 56,32    |              |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 26:

$$f_c = \frac{21,4}{a/c^{1,3}} \times e^{-\left[\left(\frac{32,9}{idade}\right)^{0,65}\right]} \quad (\text{Equação 26})$$

$$R^2 = 90,8\%$$

Na Figura 64 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de pasta, de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 30°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

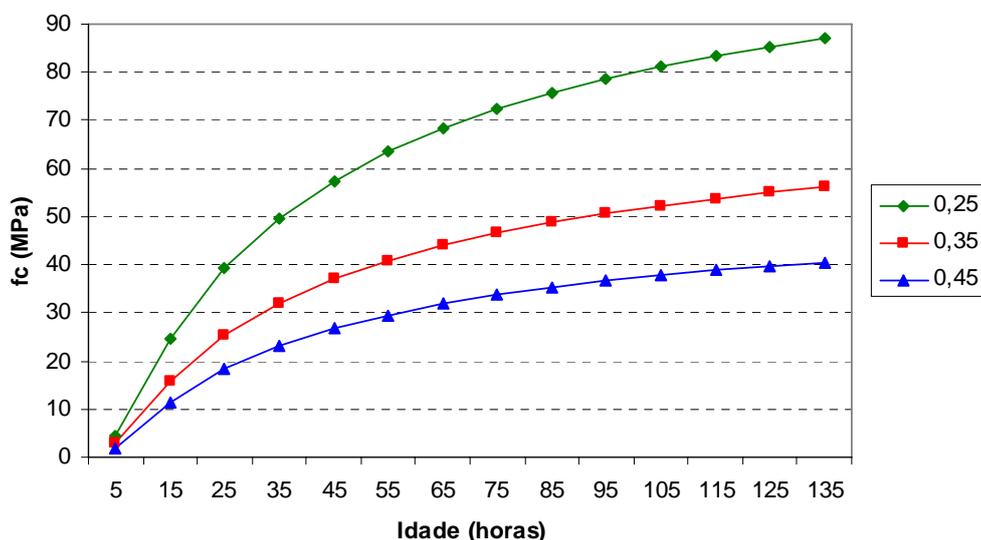


Figura 64: resistência à compressão versus idade, CP 12,5x12,5x12,5mm, 30°C

Utilizando-se a Equação 26 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de pasta ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. O aumento na resistência à compressão das pastas foi de 75,3% de 35 para 135 horas de idade.

Tabela 62: resistência à compressão – pasta – curada a 50°C

| Traço | Relação água/cimento |           |               |             |           |            |           |               |             |           |            |           |               |             |           |
|-------|----------------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|------------|-----------|---------------|-------------|-----------|
|       | 0,25                 |           |               |             |           | 0,35       |           |               |             |           | 0,45       |           |               |             |           |
|       | Idade (hs)           | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | Idade (hs) | ftf (MPa) | ftf méd (MPa) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 7                    | 12,16     | 11,52         | 2,93        | 25,46     | 12         | 24,32     | 27,73         | 3,52        | 12,71     | 12         | 18,56     | 17,92         | 0,64        | 3,57      |
| T 2   |                      | 8,32      |               |             |           |            | 27,52     |               |             |           |            | 17,28     |               |             |           |
| T 3   |                      | 14,08     |               |             |           |            | 31,36     |               |             |           |            | 17,92     |               |             |           |
| T 1   | 14                   | 61,44     | 56,32         | 4,83        | 8,58      | 24         | 44,16     | 42,03         | 3,16        | 7,51      | 24         | 20,48     | 21,33         | 1,48        | 6,93      |
| T 2   |                      | 51,84     |               |             |           |            | 43,52     |               |             |           |            | 23,04     |               |             |           |
| T 3   |                      | 55,68     |               |             |           |            | 38,40     |               |             |           |            | 20,48     |               |             |           |
| T 1   | 28                   | 57,60     | 57,60         | 4,48        | 7,78      | 48         | 53,76     | 53,33         | 5,77        | 10,82     | 48         | 29,44     | 29,44         | 3,20        | 10,87     |
| T 2   |                      | 53,12     |               |             |           |            | 47,36     |               |             |           |            | 26,24     |               |             |           |
| T 3   |                      | 62,08     |               |             |           |            | 58,88     |               |             |           |            | 32,64     |               |             |           |
| T 1   | 56                   | 60,16     | 63,36         | 5,54        | 8,75      | 96         | 56,32     | 60,80         | 7,21        | 11,86     | 96         | 37,76     | 38,61         | 3,91        | 10,13     |
| T 2   |                      | 60,16     |               |             |           |            | 69,12     |               |             |           |            | 35,20     |               |             |           |
| T 3   |                      | 69,76     |               |             |           |            | 56,96     |               |             |           |            | 42,88     |               |             |           |
| T 1   | 112                  | 69,76     | 79,15         | 8,15        | 10,30     | 192        | 60,16     | 62,29         | 2,66        | 4,28      | 192        | 39,68     | 41,39         | 3,52        | 8,52      |
| T 2   |                      | 83,20     |               |             |           |            | 65,28     |               |             |           |            | 45,44     |               |             |           |
| T 3   |                      | 84,48     |               |             |           |            | 61,44     |               |             |           |            | 39,04     |               |             |           |
| T 1   | 224                  | 80,00     | 86,19         | 9,10        | 10,56     | 384        | 62,08     | 75,52         | 12,36       | 16,37     | 384        | 39,68     | 47,36         | 6,77        | 14,30     |
| T 2   |                      | 96,64     |               |             |           |            | 78,08     |               |             |           |            | 52,48     |               |             |           |
| T 3   |                      | 81,92     |               |             |           |            | 86,40     |               |             |           |            | 49,92     |               |             |           |

O modelo resultante está expresso na Equação 27:

$$f_c = \frac{18,0}{a/c^{1,3}} \times e^{-\left[\left(\frac{13,2}{idade}\right)^{0,65}\right]} \quad (\text{Equação 27})$$

$$R^2 = 88,1\%$$

Na Figura 65 apresenta-se o comportamento ao longo do tempo dos corpos-de-prova de pasta, de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, para as três relações água/cimento estudadas. Os corpos-de-prova foram curados em tanque com temperatura de 50°C e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

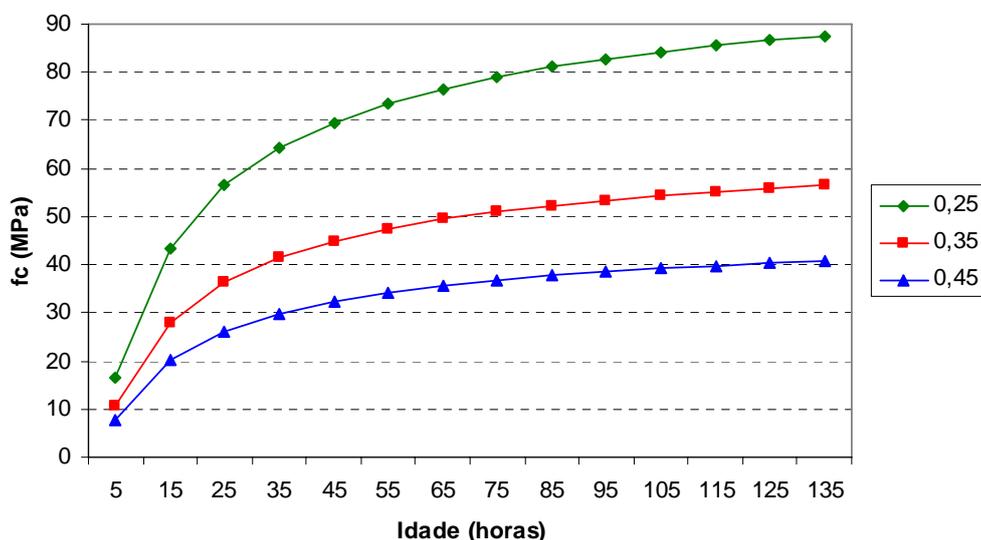


Figura 65: resistência à compressão versus idade, CP 12,5x12,5x12,5mm, 50°C

Utilizando-se a Equação 27 foi possível modelar o comportamento dos corpos-de-prova de pasta ao longo do tempo, para as três relações água/cimento estudadas. Como já era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à compressão diminuiu e com o acréscimo da idade, a resistência aumentou em todas as relações água/cimento. O aumento na resistência à compressão das pastas foi de 36,3% de 35 para 135 horas de idade.

Apresentam-se na Tabela 63 os dados obtidos no software utilizado para os corpos-de-prova de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, ensaiados à compressão, para as três temperaturas e três relações água/cimento estudadas. Os valores de  $f_{c_{\infty}}$ ,  $kt$ ,  $t_0$  e  $R^2$  foram obtidos através de gráficos gerados pelo software que se encontram no Anexo B.

Tabela 63: dados obtidos no software para os corpos-de-prova  
12,5x12,5x12,5mm

| a/c  | T<br>(°C) | $f_{c_{\infty}}$ | $kt$   | $t_0$   | $R^2$  | $\ln(kt)$ | $1/T$   |
|------|-----------|------------------|--------|---------|--------|-----------|---------|
| 0,25 | 10        | 125,5410         | 0,0069 | 12,4685 | 0,9999 | -2,1868   | -4,9711 |
|      | 30        | 117,5394         | 0,0225 | 3,2346  | 0,9996 | 44,1422   | -3,7956 |
|      | 50        | 100,3067         | 0,0524 | 0,8219  | 0,9994 | 72,2462   | -2,9497 |
| 0,35 | 10        | 81,3721          | 0,0069 | 12,5447 | 0,9999 | -1,4505   | -4,9788 |
|      | 30        | 76,3456          | 0,0219 | 2,8649  | 0,9995 | 28,4653   | -3,8208 |
|      | 50        | 66,0723          | 0,0461 | 0,8328  | 0,9992 | 45,8418   | -3,0772 |
| 0,45 | 10        | 59,0025          | 0,0068 | 12,3331 | 0,9998 | -0,9487   | -4,9934 |
|      | 30        | 55,0676          | 0,0219 | 2,8649  | 0,9995 | 20,5319   | -3,8208 |
|      | 50        | 47,6575          | 0,0461 | 0,8328  | 0,9992 | 33,0654   | -3,0772 |

Na Figura 66 apresentam-se os gráficos de Arrhenius para as três relações água/cimento estudadas, para os corpos-de-prova de dimensões 12,5x12,5x12,5mm.

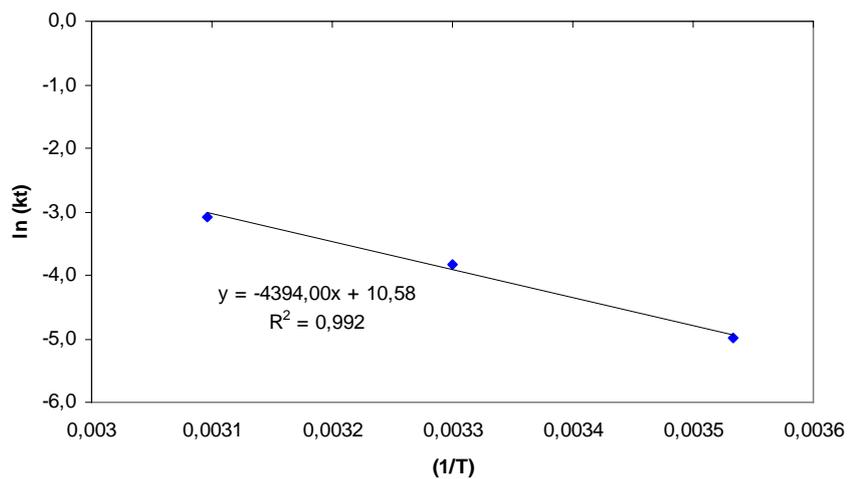
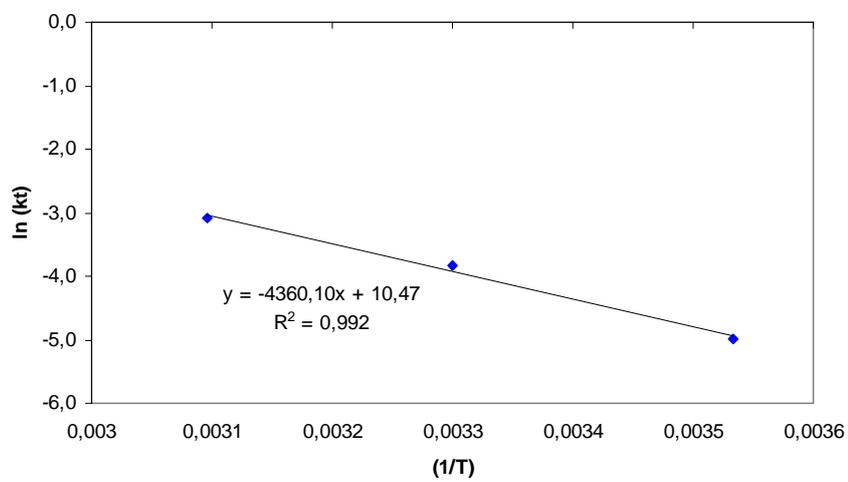
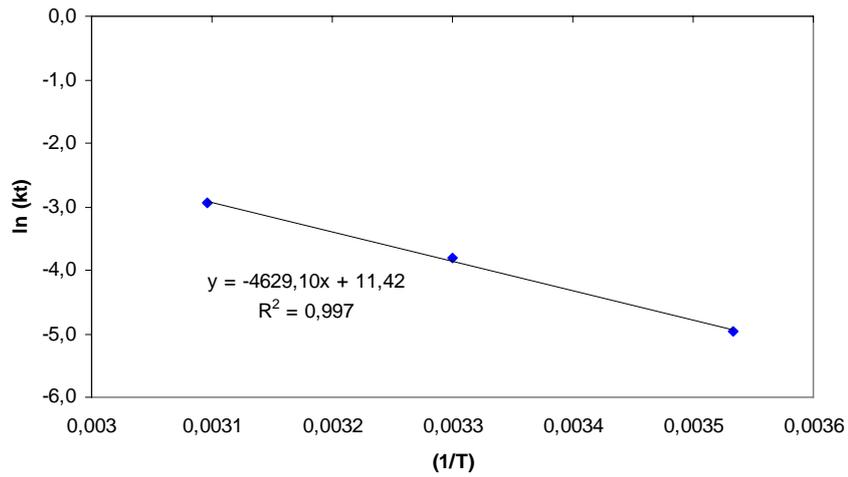


Figura 66: gráficos de Arrhenius para os CPs 12,5x12,5x12,5mm para (a)  $a/c = 0,25$ ; (b)  $a/c = 0,35$  e (c)  $a/c = 0,45$

Apresentam-se na Tabela 64 os valores de energia aparente de ativação ( $E_a$ ) para os corpos-de-prova de pasta, de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, para as relações água/cimento estudadas.

Tabela 64: energia aparente de ativação dos CPs 12,5x12,5x12,5mm

| a/c  | $E_a$<br>(kJ/mol) |
|------|-------------------|
| 0,25 | 38,49             |
| 0,35 | 36,25             |
| 0,45 | 36,53             |

Apresentam-se na Figura 67 as curvas de maturidade (idade equivalente x resistência à compressão) para os corpos-de-prova de pasta, de dimensões 12,5x12,5x12,5mm, ensaiados à compressão, para as relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45.

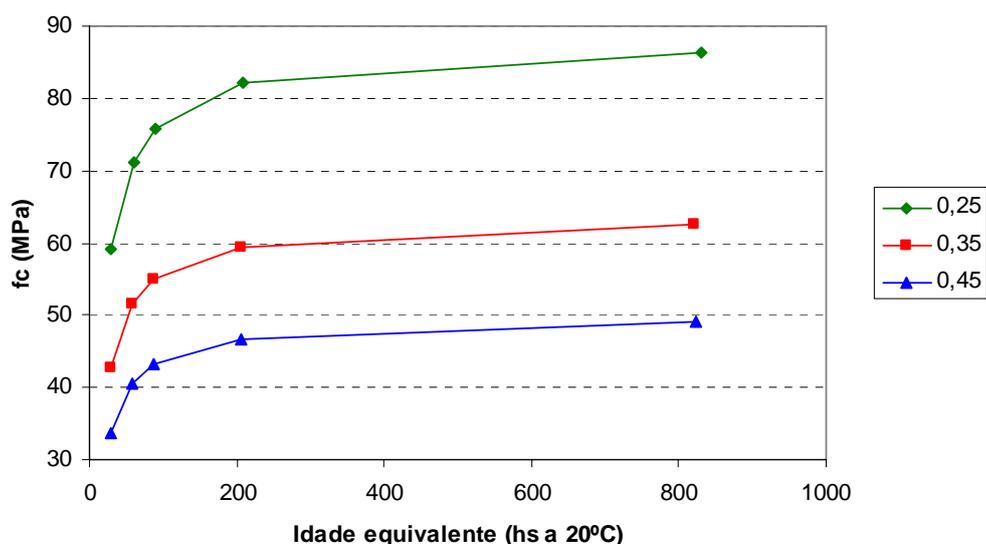


Figura 67: curvas de maturidade para as os corpos-de-prova 12,5x12,5x12,5mm

Na Tabela 65 apresenta-se um resumo dos valores de energia aparente de ativação ( $E_a$ ) encontrados, para os diferentes tipos de corpos-de-prova e para as três relações água/cimento estudadas.

Tabela 65: valores de energia aparente de ativação para os diferentes CPs

| Tipo de material | Dimensões de CP (mm)  | Ea (kJ/mol) |       |       |
|------------------|-----------------------|-------------|-------|-------|
|                  |                       | a/c         |       |       |
|                  |                       | 0,25        | 0,35  | 0,45  |
| Argamassa        | 50x50x50              | 43,72       | 40,84 | 37,37 |
|                  | 40x40x160             | 36,27       | 31,77 | 29,08 |
|                  | metades dos 40x40x160 | 50,44       | 53,94 | 55,40 |
| Concreto         | 100x100x350           | 39,66       | 36,40 | 32,98 |
| Pasta            | 12,5x12,5x12,5        | 38,49       | 36,25 | 36,53 |

O comportamento da energia aparente de ativação (Ea) foi semelhante para quase todos os tipos de corpos-de-prova, à medida que aumentou a relação água/cimento (a/c) diminuiu a Ea. A metade dos corpos-de-prova 40x40x160mm apresentou um comportamento inverso ao dos outros, aumentando os valores de Ea à medida que aumenta a a/c (Tabela 65), não se encontrando uma explicação que justifique tal fato.

A equação de Freiesleben – Hansen e Pedersen (1977), utilizada neste trabalho, originada do modelo de Arrhenius, considera a cinética das reações de hidratação do cimento. Para que as reações químicas da hidratação do cimento ocorram, é necessário que as moléculas possuam energia cinética suficiente para transformar os reagentes em produtos. Em reações exotérmicas (hidratação do cimento) o estado de energia dos reagentes é maior que o dos produtos (PINTO, 2004 b). Portanto, para um mesmo traço, quanto menor a relação água/cimento, maior a energia aparente de ativação (diferença entre a energia necessária para o início das reações e a quantidade de energia dos reagentes).

Valores diversos de energia aparente de ativação foram encontrados por outros pesquisadores utilizando o mesmo cimento deste trabalho, cimento Portland de alta resistência inicial, e corpos-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm (ASTM C 1074, 1998). Barbosa et al. (2002) encontrou 34,5kJ/mol, Pinto et al. (2002) um valor de 50,1kJ/mol, Peres et al. (2003) 29,0kJ/mol e Salvador Filho (2001) 34,5kJ/mol.

Rheinheimer (2006) também encontrou valores distintos de energia aparente de ativação, utilizando corpos-de-prova de argamassa, ensaiados à compressão e à tração na flexão. Determinou os valores de cinco traços diferentes, encontrando por exemplo

para o traço V 46,4kJ/mol para o ensaio de compressão e 35,9kJ/mol para o de tração na flexão.

Em função da diferença de valores encontrados para a energia aparente de ativação por alguns pesquisadores que utilizaram o mesmo tipo de cimento e o mesmo tipo de corpo-de-prova e também devido a resultados distintos encontrados neste trabalho e por Rheinheimer (2006) para diferentes tipos de corpos-de-prova utilizando o mesmo cimento, realizou-se uma análise estatística dos dados obtidos neste trabalho.

Com a finalidade de verificar a existência de diferença significativa entre os diferentes tipos de corpos-de-prova e as três relações água/cimento estudadas, realizou-se uma análise de variância, apresentada na Tabela 66.

Tabela 66: análise de variância para os diferentes tipos de CPs

| Fator            | SQ     | GDL | MQ     | F      | Valor de p |
|------------------|--------|-----|--------|--------|------------|
| a/c              | 29,73  | 2   | 14,87  | 2,156  | 0,178299   |
| Tipo de CP       | 768,62 | 4   | 192,15 | 27,863 | 0,000095 * |
| a/c x Tipo de CP | 104,79 | 8   | 52,40  | 0,7287 | 0,506472   |
| Erro             | 55,17  | 11  | 6,90   |        |            |
| Total corrigido  | 958,31 | 25  |        |        |            |

Obs.: O fator com efeito significativo está assinalado com \*.

onde:

F = estatística F, valor calculado;

P = nível de significância associado ao valor calculado de F;

SQ = soma dos quadrados;

GDL = graus de liberdade;

MQ = média dos quadrados.

Conforme se pode observar na análise de variância (Tabela 66), apenas o tipo de corpo-de-prova apresentou diferença significativa. Na Figura 68 pode-se visualizar a influência do tipo de corpo-de-prova na determinação da energia aparente de ativação.

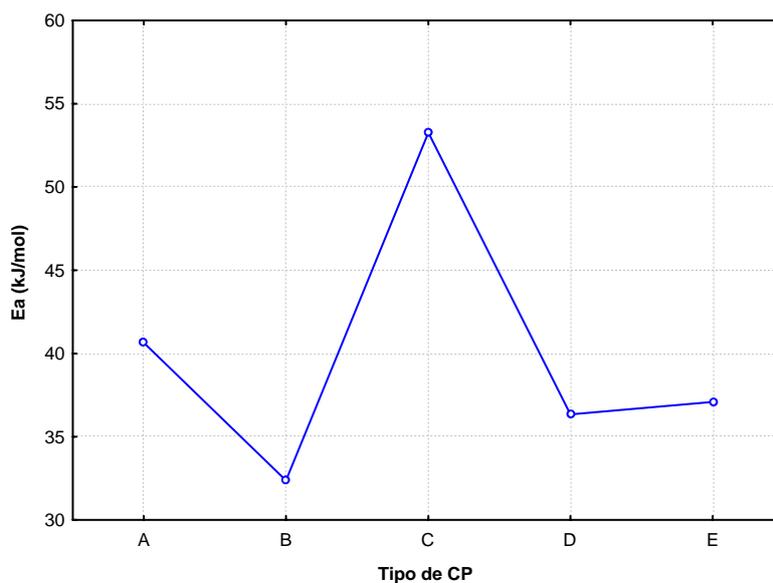


Figura 68: influência do tipo de corpo-de-prova na energia aparente de ativação

onde:

A = corpo-de-prova 50x50x50mm;

B = corpo-de-prova 40x40x160mm;

C = metades dos corpos-de-prova 40x40x160mm;

D = corpo-de-prova 100x100x350mm;

E = corpo-de-prova 12,5x12,5x12,5mm.

Com a finalidade de verificar entre quais tipos de corpos-de-prova existe diferença significativa, realizou-se uma comparação múltipla de médias, apresentada na Tabela 67.

Tabela 67: comparação múltipla de médias entre os diferentes CPs

| Tipo de CP | A        | B        | C        | D        | E        |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| A          |          | 0,357638 | 1,000000 | 1,000000 | 1,000000 |
| B          | 0,357638 |          | 0,019108 | 1,000000 | 1,000000 |
| C          | 1,000000 | 0,019108 |          | 0,357638 | 0,446097 |
| D          | 1,000000 | 1,000000 | 0,357638 |          | 1,000000 |
| E          | 1,000000 | 1,000000 | 0,446097 | 1,000000 |          |

onde:

A = CP 50x50x50mm;

B = CP 40x40x160mm;

C = metades dos CPs 40x40x160mm;

D = CP 100x100x350mm;

E = CP 12,5x12,5x12,5mm.

Conforme se pode observar na Tabela 67, a comparação múltipla de médias indica que só há diferença significativa do tipo de corpo-de-prova “C” (40x40x160mm – compressão) em relação ao tipo “B” (40x40x160mm – tração), entre os demais corpos-de-prova não há diferenças.

Analisando-se os valores obtidos neste trabalho, conclui-se que é possível determinar a energia aparente de ativação utilizando-se os corpos-de-prova 50x50x50mm (argamassa), 40x40x160mm (argamassa), 100x100x350mm (concreto), metades dos 40x40x160mm (argamassa) e 12,5x12,5x12,5mm (pasta), uma vez que nenhum apresentou diferença significativa em relação ao preconizado pela ASTM C 1074 (1998).

Apresenta-se na Figura 69 o gráfico de correlação dos valores de resistência à tração na flexão obtidos nos ensaios versus os valores previstos em função das Equações 13 a 27.

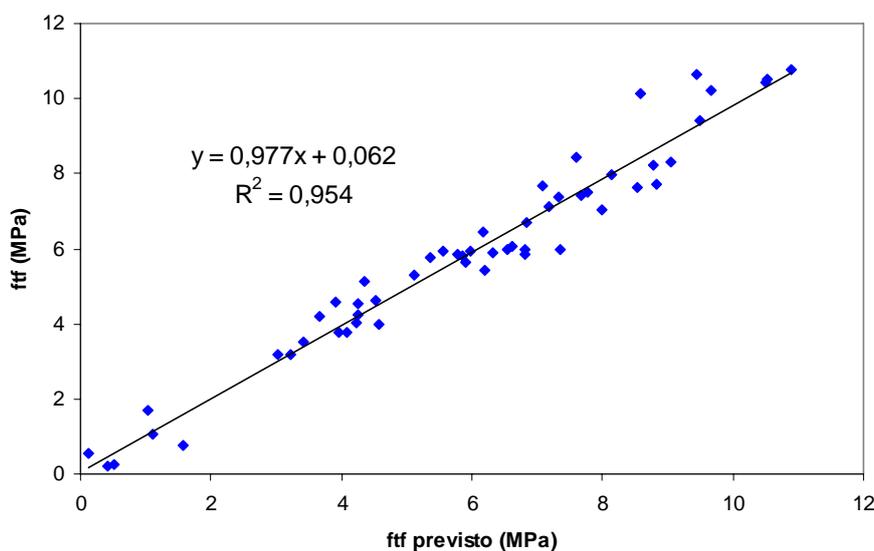


Figura 69: correlação entre ftf e ftf previsto - método da maturidade

Obteve-se um coeficiente de correlação igual a 95,4%, ou seja, é possível determinar a resistência à tração do concreto através do ensaio de maturidade, com 95,4% de certeza.

### 5.1.3 Ultra-som

Conforme exposto anteriormente, realizou-se o ensaio de ultra-som utilizando o tipo de transmissão direta (MD) e indireta com três (MI 3P) e dois (MI 2P) pontos de recepção.

Realizou-se o ensaio de ultra-som nos mesmos corpos-de-prova utilizados para determinar a resistência à tração na flexão do concreto. Primeiramente verificou-se a velocidade de pulso ultra-sônico e posteriormente rompeu-se o corpo-de-prova de concreto de dimensões 100x100x350mm. Este procedimento foi realizado em todos os corpos-de-prova prismáticos de concreto, tanto os curados nos tanques (ensaio de maturidade), como em câmara úmida.

Nas Tabelas 68 a 76 apresentam-se os valores de velocidade de pulso ultra-sônico dos corpos-de-prova de concreto de dimensões 100x100x350mm, para as três relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45 e suas respectivas idades de ruptura, para as temperaturas de 10, 30 e 50°C.

Apresentam-se nas Tabelas 77 a 79 os valores de velocidade de pulso ultra-sônico dos corpos-de-prova de concreto de dimensões 100x100x350mm, para as relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45, respectivamente, nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias.

Tabela 68: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 10°C – a/c = 0,25

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 18,93      | 3,97          | 3,94        | 0,18        | 4,60      | 3,67               | 3,56        | 0,29        | 8,27      | 3,72               | 3,83        | 0,13        | 3,47      |
| T 2   |            | 3,75          |             |             |           | 3,23               |             |             |           | 3,80               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,11          |             |             |           | 3,79               |             |             |           | 3,98               |             |             |           |
| T 1   | 37,87      | 4,73          | 4,72        | 0,06        | 1,18      | 4,40               | 4,51        | 0,12        | 2,67      | 4,71               | 4,74        | 0,05        | 1,10      |
| T 2   |            | 4,66          |             |             |           | 4,50               |             |             |           | 4,71               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,77          |             |             |           | 4,64               |             |             |           | 4,80               |             |             |           |
| T 1   | 75,73      | 4,88          | 4,87        | 0,01        | 0,21      | 4,70               | 4,71        | 0,04        | 0,86      | 4,98               | 4,90        | 0,08        | 1,64      |
| T 2   |            | 4,86          |             |             |           | 4,67               |             |             |           | 4,82               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,87          |             |             |           | 4,75               |             |             |           | 4,89               |             |             |           |
| T 1   | 151,47     | 4,79          | 4,87        | 0,07        | 1,44      | 4,73               | 4,76        | 0,03        | 0,61      | 5,04               | 5,03        | 0,04        | 0,72      |
| T 2   |            | 4,92          |             |             |           | 4,78               |             |             |           | 4,99               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,90          |             |             |           | 4,78               |             |             |           | 5,06               |             |             |           |
| T 1   | 302,93     | 4,91          | 4,96        | 0,05        | 0,91      | 4,78               | 4,83        | 0,04        | 0,84      | 5,00               | 5,07        | 0,07        | 1,29      |
| T 2   |            | 5,00          |             |             |           | 4,85               |             |             |           | 5,13               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,96          |             |             |           | 4,85               |             |             |           | 5,08               |             |             |           |
| T 1   | 605,87     | 4,91          | 4,94        | 0,03        | 0,62      | 4,78               | 4,83        | 0,05        | 0,98      | 4,61               | 4,88        | 0,24        | 4,84      |
| T 2   |            | 4,95          |             |             |           | 4,87               |             |             |           | 4,98               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,97          |             |             |           | 4,85               |             |             |           | 5,05               |             |             |           |

Tabela 69: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 10°C – a/c = 0,35

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 13,77      | 3,64          | 3,65        | 0,19        | 5,21      | 3,40               | 3,33        | 0,27        | 7,99      | 3,36               | 3,43        | 0,23        | 6,64      |
| T 2   |            | 3,84          |             |             |           | 3,56               |             |             |           | 3,68               |             |             |           |
| T 3   |            | 3,46          |             |             |           | 3,04               |             |             |           | 3,24               |             |             |           |
| T 1   | 27,53      | 4,53          | 4,62        | 0,11        | 2,34      | 4,27               | 4,27        | 0,14        | 3,16      | 4,45               | 4,42        | 0,15        | 3,33      |
| T 2   |            | 4,59          |             |             |           | 4,40               |             |             |           | 4,55               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,74          |             |             |           | 4,13               |             |             |           | 4,26               |             |             |           |
| T 1   | 55,07      | 4,77          | 4,78        | 0,05        | 0,96      | 4,55               | 4,53        | 0,03        | 0,56      | 4,75               | 4,77        | 0,03        | 0,73      |
| T 2   |            | 4,83          |             |             |           | 4,50               |             |             |           | 4,81               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,74          |             |             |           | 4,53               |             |             |           | 4,75               |             |             |           |
| T 1   | 110,13     | 4,85          | 4,87        | 0,04        | 0,78      | 4,63               | 4,71        | 0,13        | 2,70      | 4,76               | 4,91        | 0,14        | 2,89      |
| T 2   |            | 4,91          |             |             |           | 4,86               |             |             |           | 5,04               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,84          |             |             |           | 4,65               |             |             |           | 4,94               |             |             |           |
| T 1   | 220,27     | 4,91          | 4,92        | 0,03        | 0,54      | 4,75               | 4,73        | 0,10        | 2,15      | 4,90               | 4,95        | 0,05        | 1,02      |
| T 2   |            | 4,95          |             |             |           | 4,82               |             |             |           | 5,00               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,90          |             |             |           | 4,62               |             |             |           | 4,94               |             |             |           |
| T 1   | 440,53     | 4,98          | 4,97        | 0,02        | 0,31      | 4,84               | 4,82        | 0,04        | 0,78      | 5,03               | 5,05        | 0,12        | 2,40      |
| T 2   |            | 4,97          |             |             |           | 4,85               |             |             |           | 5,18               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,95          |             |             |           | 4,78               |             |             |           | 4,94               |             |             |           |

Tabela 70: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 10°C – a/c = 0,45

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 17,80      | 4,11          | 4,08        | 0,12        | 2,89      | 3,81               | 3,78        | 0,05        | 1,22      | 3,98               | 3,88        | 0,17        | 4,40      |
| T 2   |            | 4,18          |             |             |           | 3,81               |             |             |           | 3,97               |             |             |           |
| T 3   |            | 3,95          |             |             |           | 3,73               |             |             |           | 3,68               |             |             |           |
| T 1   | 35,60      | 4,48          | 4,51        | 0,04        | 0,80      | 4,22               | 4,24        | 0,03        | 0,76      | 4,54               | 4,45        | 0,13        | 2,94      |
| T 2   |            | 4,55          |             |             |           | 4,28               |             |             |           | 4,51               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,50          |             |             |           | 4,23               |             |             |           | 4,30               |             |             |           |
| T 1   | 71,20      | 4,69          | 4,72        | 0,03        | 0,61      | 4,40               | 4,45        | 0,05        | 1,04      | 4,58               | 4,50        | 0,15        | 3,40      |
| T 2   |            | 4,74          |             |             |           | 4,48               |             |             |           | 4,32               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,74          |             |             |           | 4,48               |             |             |           | 4,59               |             |             |           |
| T 1   | 142,40     | 4,79          | 4,79        | 0,03        | 0,63      | 4,56               | 4,57        | 0,02        | 0,38      | 4,81               | 4,76        | 0,04        | 0,85      |
| T 2   |            | 4,76          |             |             |           | 4,59               |             |             |           | 4,74               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,82          |             |             |           | 4,56               |             |             |           | 4,74               |             |             |           |
| T 1   | 284,80     | 4,81          | 4,82        | 0,06        | 1,25      | 4,59               | 4,58        | 0,03        | 0,58      | 4,39               | 4,66        | 0,23        | 4,98      |
| T 2   |            | 4,76          |             |             |           | 4,55               |             |             |           | 4,81               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,88          |             |             |           | 4,60               |             |             |           | 4,77               |             |             |           |
| T 1   | 569,60     | 4,88          | 4,89        | 0,03        | 0,63      | 4,69               | 4,67        | 0,05        | 1,01      | 5,01               | 4,92        | 0,10        | 2,05      |
| T 2   |            | 4,86          |             |             |           | 4,62               |             |             |           | 4,81               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,92          |             |             |           | 4,71               |             |             |           | 4,93               |             |             |           |

Tabela 71: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 30°C – a/c = 0,25

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 6,03       | 1,74          | 1,97        | 0,28        | 14,41     | 1,15               | 1,62        | 0,41        | 25,17     | 1,82               | 1,85        | 0,05        | 2,66      |
| T 2   |            | 1,89          |             |             |           | 1,88               |             |             |           | 1,91               |             |             |           |
| T 3   |            | 2,29          |             |             |           | 1,83               |             |             |           | 1,83               |             |             |           |
| T 1   | 12,07      | 4,46          | 4,64        | 0,29        | 6,17      | 4,04               | 4,27        | 0,32        | 7,39      | 4,27               | 4,51        | 0,35        | 7,79      |
| T 2   |            | 4,97          |             |             |           | 4,63               |             |             |           | 4,91               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,49          |             |             |           | 4,14               |             |             |           | 4,34               |             |             |           |
| T 1   | 24,13      | 4,83          | 4,85        | 0,03        | 0,71      | 4,23               | 4,56        | 0,31        | 6,76      | 4,62               | 4,88        | 0,28        | 5,76      |
| T 2   |            | 4,83          |             |             |           | 4,61               |             |             |           | 4,85               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,89          |             |             |           | 4,84               |             |             |           | 5,18               |             |             |           |
| T 1   | 48,27      | 4,98          | 4,95        | 0,05        | 1,00      | 4,81               | 4,69        | 0,10        | 2,22      | 4,96               | 4,81        | 0,21        | 4,33      |
| T 2   |            | 4,89          |             |             |           | 4,61               |             |             |           | 4,57               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,97          |             |             |           | 4,66               |             |             |           | 4,89               |             |             |           |
| T 1   | 96,53      | 4,78          | 4,85        | 0,07        | 1,37      | 4,49               | 4,66        | 0,15        | 3,13      | 4,80               | 4,89        | 0,09        | 1,84      |
| T 2   |            | 4,87          |             |             |           | 4,72               |             |             |           | 4,89               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,91          |             |             |           | 4,76               |             |             |           | 4,98               |             |             |           |
| T 1   | 193,07     | 4,88          | 4,94        | 0,07        | 1,46      | 4,76               | 4,80        | 0,05        | 0,95      | 5,09               | 5,09        | 0,06        | 1,08      |
| T 2   |            | 4,92          |             |             |           | 4,79               |             |             |           | 5,04               |             |             |           |
| T 3   |            | 5,02          |             |             |           | 4,85               |             |             |           | 5,15               |             |             |           |

Tabela 72: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 30°C – a/c = 0,35

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 14,17      | 4,59          | 4,57        | 0,03        | 0,55      | 4,30               | 4,25        | 0,05        | 1,11      | 4,50               | 4,45        | 0,05        | 1,13      |
| T 2   |            | 4,57          |             |             |           | 4,21               |             |             |           | 4,44               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,54          |             |             |           | 4,23               |             |             |           | 4,40               |             |             |           |
| T 1   | 28,33      | 4,84          | 4,79        | 0,05        | 0,96      | 4,58               | 4,57        | 0,01        | 0,25      | 4,76               | 4,72        | 0,04        | 0,86      |
| T 2   |            | 4,75          |             |             |           | 4,56               |             |             |           | 4,68               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,78          |             |             |           | 4,56               |             |             |           | 4,71               |             |             |           |
| T 1   | 56,67      | 4,83          | 4,86        | 0,03        | 0,63      | 4,60               | 4,66        | 0,06        | 1,18      | 4,77               | 4,83        | 0,06        | 1,24      |
| T 2   |            | 4,87          |             |             |           | 4,71               |             |             |           | 4,89               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,89          |             |             |           | 4,66               |             |             |           | 4,83               |             |             |           |
| T 1   | 113,33     | 4,89          | 4,90        | 0,02        | 0,35      | 4,64               | 4,67        | 0,07        | 1,58      | 4,84               | 4,88        | 0,04        | 0,78      |
| T 2   |            | 4,92          |             |             |           | 4,75               |             |             |           | 4,91               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,89          |             |             |           | 4,61               |             |             |           | 4,90               |             |             |           |
| T 1   | 226,67     | 4,96          | 4,94        | 0,02        | 0,31      | 4,82               | 4,78        | 0,04        | 0,84      | 4,93               | 4,83        | 0,25        | 5,21      |
| T 2   |            | 4,93          |             |             |           | 4,74               |             |             |           | 4,54               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,94          |             |             |           | 4,78               |             |             |           | 5,01               |             |             |           |
| T 1   | 453,33     | ---           | 4,95        | 0,04        | 0,71      | ---                | 4,77        | 0,13        | 2,67      | ---                | 4,99        | 0,08        | 1,70      |
| T 2   |            | 4,92          |             |             |           | 4,68               |             |             |           | 4,93               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,97          |             |             |           | 4,86               |             |             |           | 5,05               |             |             |           |

Tabela 73: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 30°C – a/c = 0,45

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 18,73      | 4,63          | 4,45        | 0,05        | 1,13      | 4,34               | 4,26        | 0,17        | 3,88      | 4,56               | 4,53        | 0,11        | 2,48      |
| T 2   |            | 4,64          |             |             |           | 4,37               |             |             |           | 4,63               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,64          |             |             |           | 4,07               |             |             |           | 4,41               |             |             |           |
| T 1   | 37,47      | 4,75          | 4,72        | 0,04        | 0,86      | 4,48               | 4,46        | 0,03        | 0,56      | 4,73               | 4,72        | 0,01        | 0,21      |
| T 2   |            | 4,78          |             |             |           | 4,43               |             |             |           | 4,72               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,75          |             |             |           | 4,46               |             |             |           | 4,71               |             |             |           |
| T 1   | 74,93      | 4,83          | 4,83        | 0,06        | 1,24      | 4,66               | 4,60        | 0,13        | 2,84      | 4,85               | 4,77        | 0,07        | 1,43      |
| T 2   |            | 4,84          |             |             |           | 4,69               |             |             |           | 4,75               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,82          |             |             |           | 4,45               |             |             |           | 4,72               |             |             |           |
| T 1   | 149,87     | 4,86          | 4,88        | 0,04        | 0,78      | 4,62               | 4,67        | 0,07        | 1,50      | 4,84               | 4,79        | 0,12        | 2,57      |
| T 2   |            | 4,91          |             |             |           | 4,75               |             |             |           | 4,88               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,88          |             |             |           | 4,64               |             |             |           | 4,65               |             |             |           |
| T 1   | 299,73     | 4,91          | 4,83        | 0,25        | 5,21      | 4,73               | 4,72        | 0,02        | 0,49      | 4,89               | 4,97        | 0,13        | 2,56      |
| T 2   |            | 4,93          |             |             |           | 4,73               |             |             |           | 5,12               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,95          |             |             |           | 4,69               |             |             |           | 4,91               |             |             |           |
| T 1   | 599,47     | 4,98          | 4,99        | 0,01        | 0,28      | 4,70               | 4,77        | 0,09        | 1,93      | 4,93               | 4,98        | 0,07        | 1,42      |
| T 2   |            | 5,00          |             |             |           | 4,83               |             |             |           | 5,03               |             |             |           |
| T 3   |            | ---           |             |             |           | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           |

Tabela 74: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 50°C – a/c = 0,25

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 3,25       | ---           | 0,50        | ---         | ---       | ---                | 0,58        | ---         | ---       | ---                | 0,59        | ---         | ---       |
| T 2   |            | 0,50          |             |             |           | 0,58               |             |             |           | 0,59               |             |             |           |
| T 3   |            | ---           |             |             |           | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           |
| T 1   | 6,50       | 3,91          | 4,33        | 0,37        | 8,47      | 3,41               | 4,00        | 0,51        | 12,77     | 3,58               | 4,14        | 0,49        | 11,78     |
| T 2   |            | 4,56          |             |             |           | 4,34               |             |             |           | 4,43               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,53          |             |             |           | 4,24               |             |             |           | 4,42               |             |             |           |
| T 1   | 13,00      | 4,78          | 4,78        | 0,00        | 0,00      | 4,49               | 4,43        | 0,09        | 2,08      | 4,80               | 4,77        | 0,05        | 1,04      |
| T 2   |            | ---           |             |             |           | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           |
| T 3   |            | 4,78          |             |             |           | 4,36               |             |             |           | 4,73               |             |             |           |
| T 1   | 26,00      | 4,66          | 4,76        | 0,09        | 1,83      | ---                | 4,55        | 0,10        | 2,18      | 4,17               | 4,60        | 0,37        | 8,04      |
| T 2   |            | 4,82          |             |             |           | 4,48               |             |             |           | 4,82               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,80          |             |             |           | 4,62               |             |             |           | 4,80               |             |             |           |
| T 1   | 52,00      | 4,83          | 4,84        | 0,02        | 0,48      | 4,75               | 4,62        | 0,13        | 2,70      | 4,98               | 4,88        | 0,12        | 2,53      |
| T 2   |            | 4,87          |             |             |           | 4,62               |             |             |           | 4,91               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,83          |             |             |           | 4,50               |             |             |           | 4,74               |             |             |           |
| T 1   | 104,00     | 4,87          | 4,89        | 0,02        | 0,31      | 4,62               | 4,73        | 0,10        | 2,08      | 4,98               | 5,03        | 0,11        | 2,15      |
| T 2   |            | 4,89          |             |             |           | 4,76               |             |             |           | 5,15               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,90          |             |             |           | 4,81               |             |             |           | 4,95               |             |             |           |

Tabela 75: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 50°C – a/c = 0,35

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 7,93       | 4,57          | 4,54        | 0,06        | 1,42      | 4,06               | 4,18        | 0,10        | 2,42      | 4,10               | 4,30        | 0,17        | 4,05      |
| T 2   |            | 4,59          |             |             |           | 4,23               |             |             |           | 4,42               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,47          |             |             |           | 4,24               |             |             |           | 4,38               |             |             |           |
| T 1   | 15,87      | 4,68          | 4,70        | 0,03        | 0,61      | 4,43               | 4,41        | 0,03        | 0,65      | 4,25               | 4,44        | 0,17        | 3,83      |
| T 2   |            | 4,73          |             |             |           | 4,38               |             |             |           | 4,57               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,68          |             |             |           | 4,43               |             |             |           | 4,51               |             |             |           |
| T 1   | 31,73      | 4,74          | 4,76        | 0,02        | 0,32      | 4,50               | 4,52        | 0,04        | 0,84      | 4,69               | 4,71        | 0,05        | 1,05      |
| T 2   |            | 4,77          |             |             |           | 4,49               |             |             |           | 4,77               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,76          |             |             |           | 4,56               |             |             |           | 4,68               |             |             |           |
| T 1   | 63,47      | 4,78          | 4,80        | 0,02        | 0,36      | 4,52               | 4,59        | 0,06        | 1,26      | 4,68               | 4,76        | 0,09        | 1,79      |
| T 2   |            | 4,81          |             |             |           | 4,62               |             |             |           | 4,75               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,81          |             |             |           | 4,62               |             |             |           | 4,85               |             |             |           |
| T 1   | 126,93     | 4,88          | 4,86        | 0,03        | 0,66      | 4,53               | 4,58        | 0,06        | 1,20      | 4,75               | 4,78        | 0,06        | 1,27      |
| T 2   |            | 4,82          |             |             |           | 4,64               |             |             |           | 4,74               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,87          |             |             |           | 4,58               |             |             |           | 4,85               |             |             |           |
| T 1   | 253,87     | 4,88          | 4,88        | 0,02        | 0,31      | 4,44               | 4,59        | 0,13        | 2,90      | 4,96               | 4,92        | 0,10        | 2,03      |
| T 2   |            | 4,89          |             |             |           | 4,66               |             |             |           | 5,00               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,86          |             |             |           | 4,68               |             |             |           | 4,81               |             |             |           |

Tabela 76: velocidade de pulso ultra-sônico em diferentes idades e relações água/cimento a 50°C – a/c = 0,45

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 4,38       | 3,92          | 3,25        | 0,71        | 21,78     | 2,26               | 2,41        | 0,56        | 23,45     | 3,21               | 2,94        | 0,38        | 13,07     |
| T 2   |            | 3,31          |             |             |           | 3,03               |             |             |           | 3,11               |             |             |           |
| T 3   |            | 2,51          |             |             |           | 1,93               |             |             |           | 2,50               |             |             |           |
| T 1   | 8,77       | 4,35          | 4,40        | 0,08        | 1,78      | 4,16               | 4,10        | 0,09        | 2,08      | 4,35               | 4,15        | 0,19        | 4,50      |
| T 2   |            | 4,36          |             |             |           | 4,00               |             |             |           | 3,98               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,49          |             |             |           | 4,13               |             |             |           | 4,12               |             |             |           |
| T 1   | 17,53      | 4,54          | 4,54        | 0,06        | 1,21      | 4,10               | 4,08        | 0,12        | 2,97      | 4,34               | 4,29        | 0,11        | 2,65      |
| T 2   |            | 4,49          |             |             |           | 4,19               |             |             |           | 4,37               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,60          |             |             |           | 3,95               |             |             |           | 4,16               |             |             |           |
| T 1   | 35,07      | 4,62          | 4,65        | 0,07        | 1,51      | 4,41               | 4,37        | 0,22        | 5,00      | 4,50               | 4,46        | 0,16        | 3,67      |
| T 2   |            | 4,60          |             |             |           | 4,13               |             |             |           | 4,28               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,73          |             |             |           | 4,56               |             |             |           | 4,60               |             |             |           |
| T 1   | 70,13      | 4,71          | 4,69        | 0,05        | 1,01      | 4,43               | 4,43        | 0,06        | 1,24      | 4,62               | 4,67        | 0,12        | 2,63      |
| T 2   |            | 4,64          |             |             |           | 4,48               |             |             |           | 4,58               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,73          |             |             |           | 4,37               |             |             |           | 4,81               |             |             |           |
| T 1   | 140,27     | 4,74          | 4,73        | 0,01        | 0,24      | 4,56               | 4,48        | 0,14        | 3,16      | 4,62               | 4,50        | 0,15        | 3,33      |
| T 2   |            | 4,72          |             |             |           | 4,32               |             |             |           | 4,33               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,74          |             |             |           | 4,57               |             |             |           | 4,54               |             |             |           |

Tabela 77: velocidade de pulso ultra-sônico de corpos-de-prova de concreto curado em câmara úmida – a/c = 0,25

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 1          | 4,86          | 4,86        | 0,01        | 0,12      | 4,64               | 4,69        | 0,07        | 1,45      | 4,72               | 4,71        | 0,10        | 2,13      |
| T 2   |            | 4,86          |             |             |           | 4,77               |             |             |           | 4,61               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,85          |             |             |           | 4,67               |             |             |           | 4,81               |             |             |           |
| T 1   | 2          | 4,88          | 4,89        | 0,01        | 0,12      | 4,47               | 4,55        | 0,07        | 1,54      | 4,75               | 4,70        | 0,08        | 1,66      |
| T 2   |            | 4,89          |             |             |           | 4,58               |             |             |           | 4,61               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,89          |             |             |           | 4,60               |             |             |           | 4,74               |             |             |           |
| T 1   | 3          | 4,90          | 4,89        | 0,02        | 0,31      | 4,62               | 4,60        | 0,02        | 0,33      | 4,77               | 4,80        | 0,03        | 0,55      |
| T 2   |            | 4,89          |             |             |           | 4,60               |             |             |           | 4,82               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,87          |             |             |           | 4,59               |             |             |           | 4,81               |             |             |           |
| T 1   | 7          | 4,94          | 4,92        | 0,02        | 0,35      | 4,75               | 4,64        | 0,09        | 2,00      | 4,90               | 4,80        | 0,21        | 4,28      |
| T 2   |            | 4,91          |             |             |           | 4,58               |             |             |           | 4,93               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,91          |             |             |           | 4,60               |             |             |           | 4,56               |             |             |           |
| T 1   | 28         | 5,01          | 5,00        | 0,02        | 0,46      | 4,83               | 4,83        | 0,06        | 1,14      | 5,04               | 5,01        | 0,03        | 0,60      |
| T 2   |            | 4,97          |             |             |           | 4,78               |             |             |           | 4,98               |             |             |           |
| T 3   |            | 5,01          |             |             |           | 4,89               |             |             |           | 5,01               |             |             |           |

Tabela 78: velocidade de pulso ultra-sônico de corpos-de-prova de concreto curado em câmara úmida – a/c = 0,35

| Traço | Idade (hs) | Método Direto |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|---------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)      | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 1          | 4,59          | 4,59        | 0,03        | 0,65      | 4,12               | 4,21        | 0,12        | 2,86      | 4,38               | 4,46        | 0,07        | 1,59      |
| T 2   |            | 4,62          |             |             |           | 4,29               |             |             |           | 4,52               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,56          |             |             |           | ---(1)             |             |             |           | 4,47               |             |             |           |
| T 1   | 2          | 4,73          | 4,73        | 0,02        | 0,32      | 4,41               | 4,46        | 0,04        | 0,93      | 4,69               | 4,67        | 0,06        | 1,22      |
| T 2   |            | 4,75          |             |             |           | 4,47               |             |             |           | 4,72               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,72          |             |             |           | 4,49               |             |             |           | 4,61               |             |             |           |
| T 1   | 3          | 4,79          | 4,80        | 0,01        | 0,12      | 4,51               | 4,54        | 0,03        | 0,67      | 4,63               | 4,70        | 0,09        | 1,86      |
| T 2   |            | 4,80          |             |             |           | 4,55               |             |             |           | 4,80               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,80          |             |             |           | 4,57               |             |             |           | 4,68               |             |             |           |
| T 1   | 7          | 4,86          | 4,84        | 0,03        | 0,55      | 4,64               | 4,61        | 0,03        | 0,66      | 4,76               | 4,76        | 0,02        | 0,32      |
| T 2   |            | 4,85          |             |             |           | 4,62               |             |             |           | 4,78               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,81          |             |             |           | 4,58               |             |             |           | 4,75               |             |             |           |
| T 1   | 28         | 4,89          | 4,90        | 0,01        | 0,20      | 4,64               | 4,66        | 0,03        | 0,62      | 4,83               | 4,85        | 0,04        | 0,90      |
| T 2   |            | 4,90          |             |             |           | 4,64               |             |             |           | 4,82               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,91          |             |             |           | 4,69               |             |             |           | 4,90               |             |             |           |

<sup>(1)</sup> Dados perdidos em função de problemas no equipamento

Tabela 79: velocidade de pulso ultra-sônico de corpos-de-prova de concreto curado em câmara úmida – a/c = 0,45

| Traço | Idade (hs) | Método Direto      |             |             |           | Método Indireto 3P |             |             |           | Método Indireto 2P |             |             |           |
|-------|------------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|-------------|-----------|
|       |            | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) | V (km/s)           | Vmed (km/s) | D. P. (MPa) | C. V. (%) |
| T 1   | 1          | 4,58               | 4,58        | 0,02        | 0,44      | 4,27               | 4,25        | 0,07        | 1,70      | 4,46               | 4,51        | 0,05        | 1,12      |
| T 2   |            | 4,60               |             |             |           | 4,31               |             |             |           | 4,56               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,56               |             |             |           | 4,17               |             |             |           | 4,52               |             |             |           |
| T 1   | 2          | 4,65               | 4,69        | 0,05        | 1,09      | 4,34               | 4,32        | 0,15        | 3,37      | 4,34               | 4,49        | 0,21        | 4,73      |
| T 2   |            | 4,75               |             |             |           | 4,46               |             |             |           | 4,73               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,68               |             |             |           | 4,17               |             |             |           | 4,39               |             |             |           |
| T 1   | 3          | 4,68               | 4,72        | 0,05        | 1,05      | 4,45               | 4,48        | 0,04        | 0,79      | 4,58               | 4,62        | 0,06        | 1,22      |
| T 2   |            | 4,75               |             |             |           | 4,50               |             |             |           | 4,66               |             |             |           |
| T 3   |            | --- <sup>(1)</sup> |             |             |           | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           |
| T 1   | 7          | ---                | ---         | ---         | ---       | ---                | ---         | ---         | ---       | ---                | ---         | ---         |           |
| T 2   |            | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           |
| T 3   |            | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           | ---                |             |             |           |
| T 1   | 28         | 4,89               | 4,88        | 0,02        | 0,47      | 4,63               | 4,65        | 0,03        | 0,57      | 4,87               | 4,85        | 0,03        | 0,52      |
| T 2   |            | 4,89               |             |             |           | 4,68               |             |             |           | 4,85               |             |             |           |
| T 3   |            | 4,85               |             |             |           | 4,64               |             |             |           | 4,82               |             |             |           |

<sup>(1)</sup> Dados perdidos em função de problemas no equipamento

Apresenta-se na Figura 70 o gráfico de correlação dos valores de resistência à tração na flexão obtidos nos ensaios versus os valores previstos em função da tendência de comportamento do ensaio de ultra-som, obtidos através da Equação 28, utilizando o método direto.

$$f_{tf} \text{ previsto} = 0,00017 \times e^{2,20V_{med}} \quad (\text{Equação 28})$$

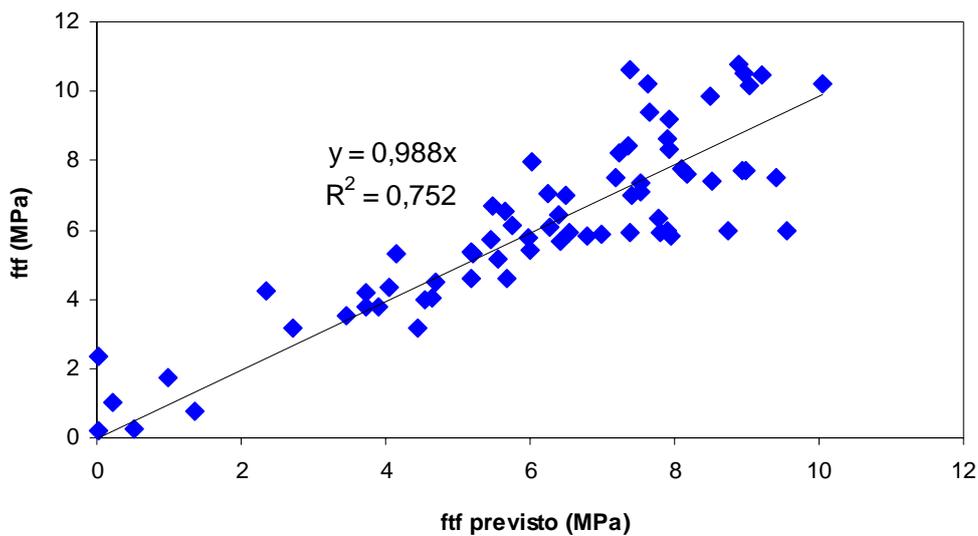


Figura 70: correlação entre ftf e ftf previsto – MD

O gráfico de correlação revela a precisão do método de ultra-som na determinação da resistência à tração do concreto. Obteve-se um coeficiente de correlação igual a 75,2%, ou seja, é possível determinar a resistência à tração do concreto através do ensaio de ultra-som, utilizando o método direto, com 75,2% de certeza.

Na Figura 71 apresenta-se a curva de calibração encontrada para determinar o valor da resistência à tração através da velocidade de pulso ultra-sônico. Esta curva foi encontrada utilizando os valores médios de velocidade encontrados no método de transmissão direta (MD).

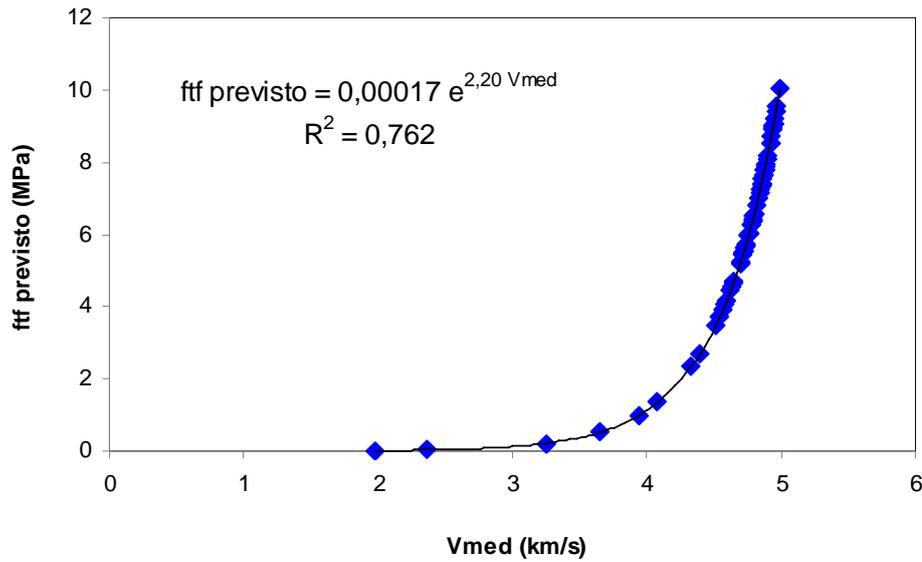


Figura 71: curva de calibração utilizando o MD

Apresenta-se, na Figura 72, o gráfico de correlação dos valores de resistência à tração na flexão obtidos nos ensaios, versus os valores previstos em função da tendência de comportamento do ensaio de ultra-som, obtidos através da Equação 29, utilizando o método indireto com três pontos de recepção.

$$ftf \text{ previsto} = 0,0111 x e^{1,40V_{med}} \quad (\text{Equação 29})$$

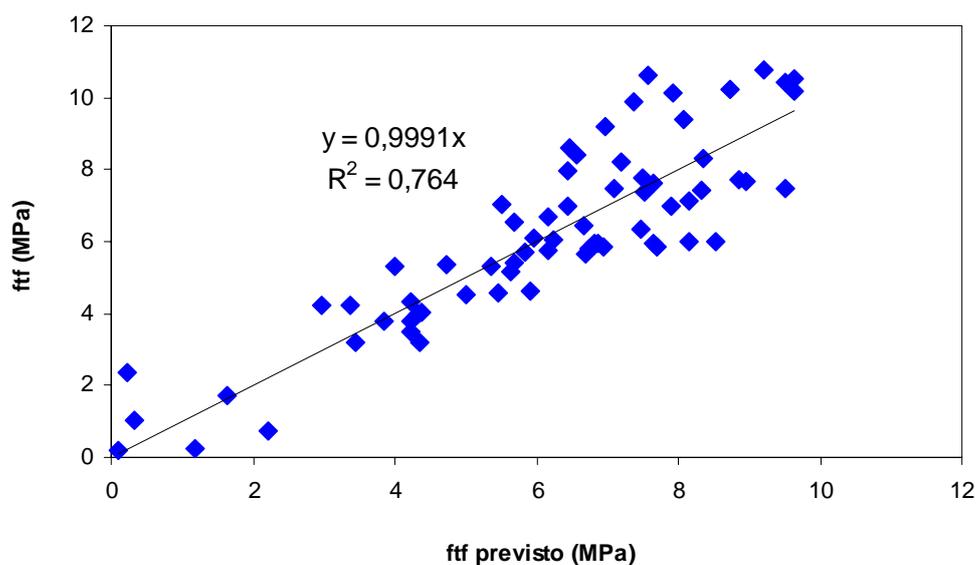


Figura 72: correlação entre ftf e ftf previsto – MI 3P

Obteve-se um coeficiente de correlação igual a 76,4%, ou seja, é possível determinar a resistência à tração do concreto através do ensaio de ultra-som, utilizando o método indireto com três pontos de recepção, com 76,4% de certeza.

Na Figura 73 apresenta-se a curva de calibração encontrada para determinar o valor da resistência à tração através da velocidade de pulso ultra-sônico. Esta curva foi encontrada utilizando os valores médios de velocidade encontrados no método de transmissão indireta, com três pontos de recepção (MI 3P).

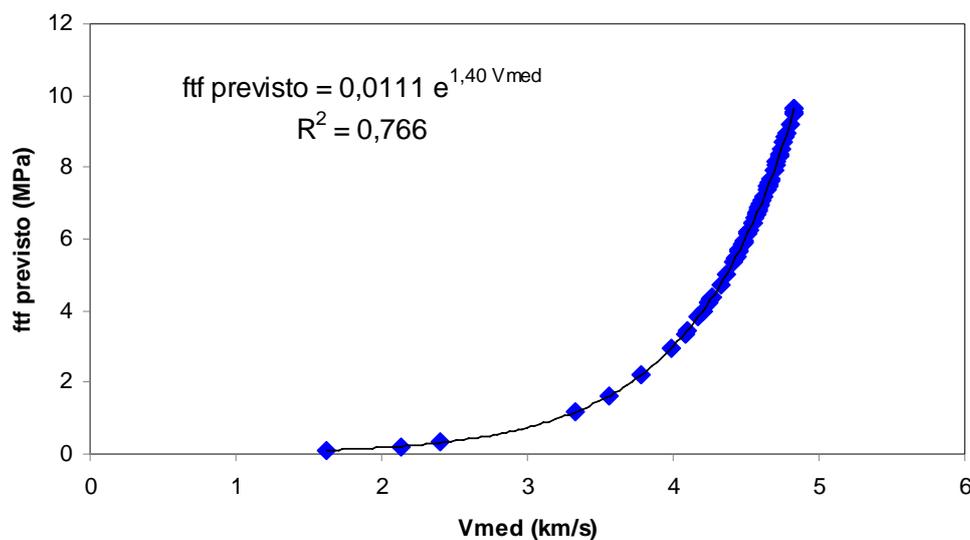


Figura 73: curva de calibração utilizando o MI 3P

Apresenta-se na Figura 74 o gráfico de correlação dos valores de resistência à tração na flexão obtidos nos ensaios, versus os valores previstos em função da tendência de comportamento do ensaio de ultra-som, obtidos através da Equação 30, utilizando o método indireto com dois pontos de recepção.

$$\text{ff previsto} = 0,00856 \times e^{1,40V_{med}} \quad (\text{Equação 30})$$

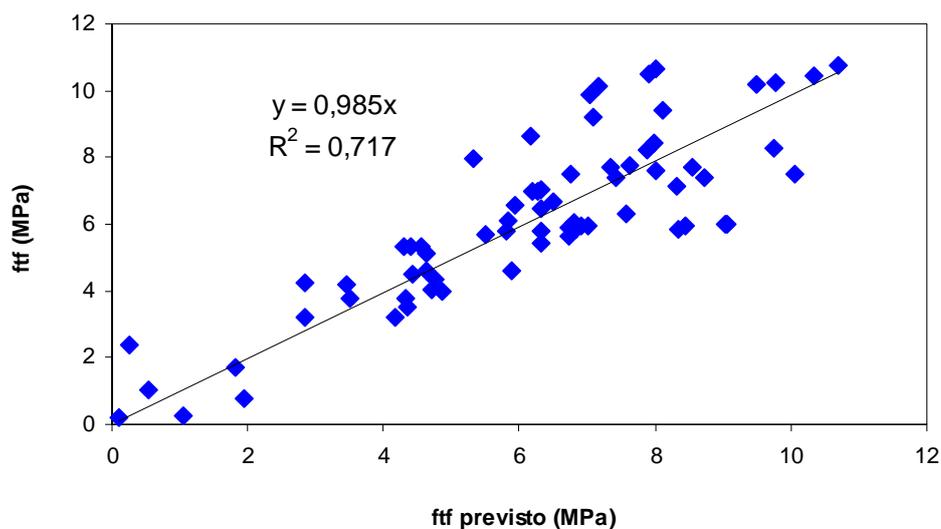


Figura 74: correlação entre  $f_{tf}$  e  $f_{tf}$  previsto – MI 2P

Obteve-se um coeficiente de correlação igual a 71,7%, ou seja, é possível determinar a resistência à tração do concreto através do ensaio de ultra-som, utilizando o método indireto com dois pontos de recepção, com 71,7% de certeza.

Na Figura 75 apresenta-se a curva de calibração encontrada para determinar o valor da resistência à tração através da velocidade de pulso ultra-sônico. Esta curva foi encontrada utilizando os valores médios de velocidade encontrados no método de transmissão indireta, com dois pontos de recepção (MI 2P).

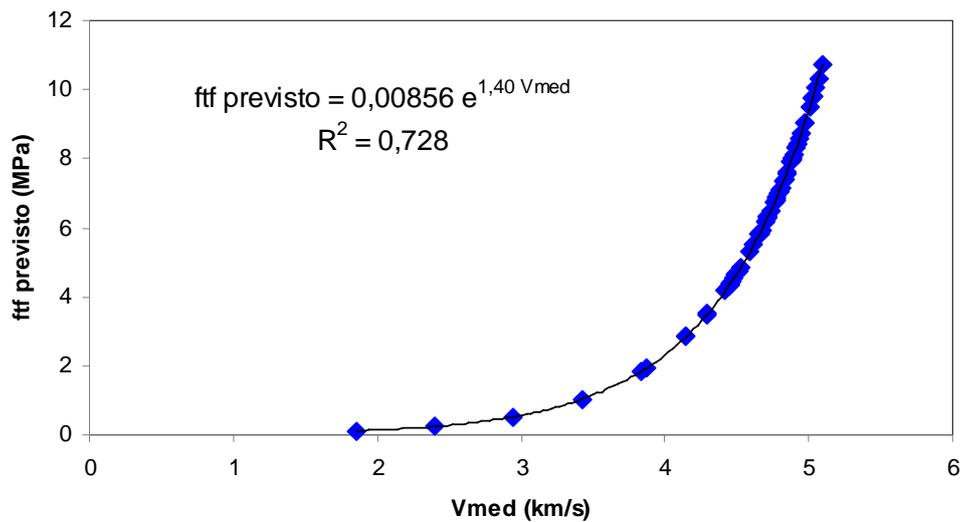


Figura 75: curva de calibração utilizando o MI 2P

Com o objetivo de prever a resistência à tração em idades iniciais, por se tratar de concreto para *fast-track*, utilizaram-se apenas as idades até 24 horas, da câmara úmida, tanques de 10, 30 e 50°C, para determinar os coeficientes de correlação entre os valores determinados nos ensaios de resistência à tração na flexão e os previstos em função da tendência de comportamento do ensaio de ultra-som. Os resultados estão apresentados nas Figuras 76, 77 e 78, para o método direto (MD), método indireto com três (MI 3P) e dois (MI 2P) pontos de recepção, respectivamente.

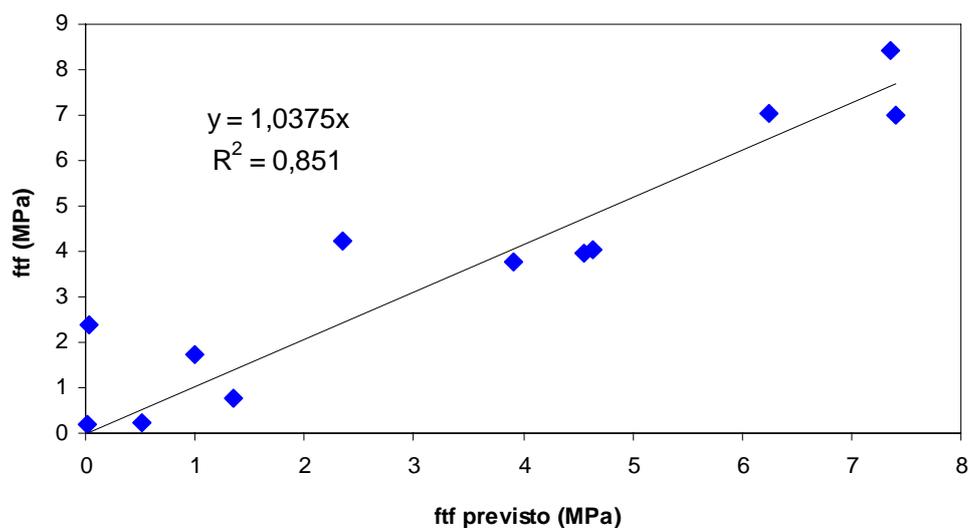


Figura 76: correlação entre  $ff$  e  $ff$  previsto para idades de até 24 horas – MD

Conforme pode ser observado na Figura 76, obteve-se um coeficiente de correlação de 85,1%, maior que o encontrado utilizando todos os valores ( $R^2 = 75,2\%$ ).

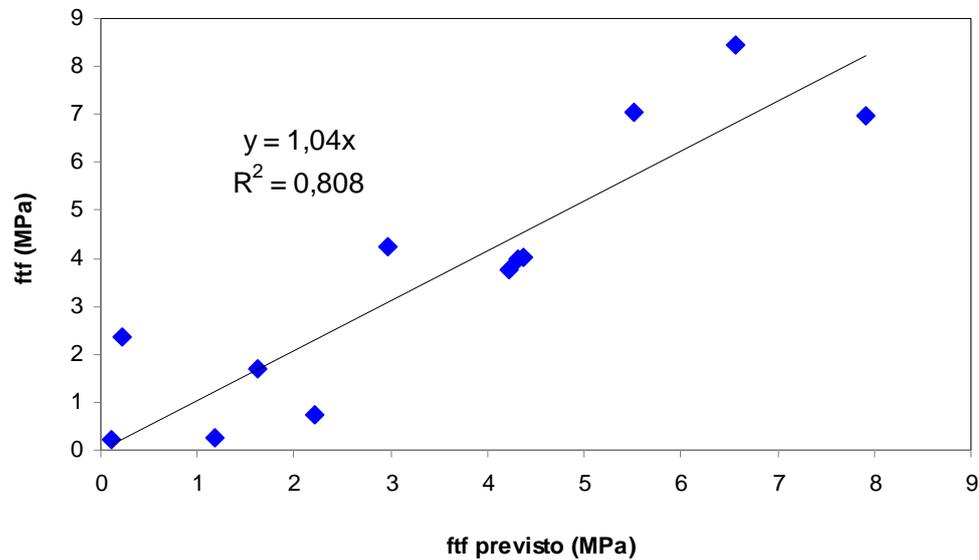


Figura 77: correlação entre  $f_{tf}$  e  $f_{tf}$  previsto para idades de até 24 horas – MI 3P

Para o método indireto com três pontos de recepção, o coeficiente de correlação foi de 80,8%, conforme pode ser observado na Figura 77, também superior ao encontrado utilizando todas as idades,  $R^2 = 76,4\%$ .

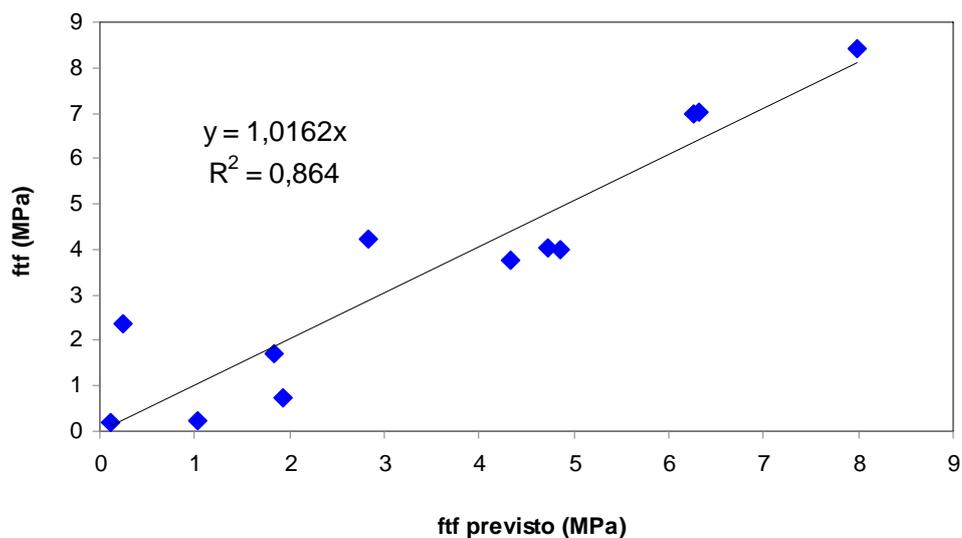


Figura 78: correlação entre  $f_{tf}$  e  $f_{tf}$  previsto para idades de até 24 horas – MI 2P

Novamente o coeficiente de correlação encontrado para as idades de até 24 horas, utilizando o método indireto com dois pontos, foi superior ( $R^2 = 86,4\%$ ) ao encontrado para todas as idades ( $R^2 = 71,7\%$ ).

Realizou-se uma análise estatística descritiva para comparar os diferentes métodos de ultra-som utilizados, método direto (MD), método indireto com dois pontos (MI 2P) e método indireto com três pontos (MI 3P), apresentada nas Tabelas 80 e 81.

Tabela 80: valores de medianas para os três métodos de ultra-som

| Tipo de cura | Medianas     |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
|              | MD           | MI 2P        | MI 3P        |
| Tanque 10°C  | 1,015        | 1,015        | 0,973        |
| Tanque 30°C  | 1,018        | 1,015        | 0,970        |
| Tanque 50°C  | 1,029        | 1,009        | 0,971        |
| Câmara úmida | 1,025        | 1,009        | 0,968        |
| <b>Média</b> | <b>1,022</b> | <b>1,012</b> | <b>0,971</b> |

A mediana é uma medida robusta de tendência central, pois descarta valores atípicos. O método direto gerou valores cerca de 2% superiores a média de todos eles e o método indireto com três pontos gerou valores cerca de 3% inferiores a média de todos eles.

Tabela 81: valores de desvio padrão robusto para os três métodos de ultra-som

| Tipo de cura | Desvio padrão robusto |              |              |
|--------------|-----------------------|--------------|--------------|
|              | MD                    | MI 2P        | MI 3P        |
| Tanque 10°C  | 0,017                 | 0,017        | 0,012        |
| Tanque 30°C  | 0,009                 | 0,015        | 0,020        |
| Tanque 50°C  | 0,022                 | 0,029        | 0,024        |
| Câmara úmida | 0,009                 | 0,012        | 0,009        |
| <b>Média</b> | <b>0,014</b>          | <b>0,018</b> | <b>0,016</b> |

Uma estimativa robusta do desvio padrão pode ser obtida utilizando os percentis de 25 e 75%, desvio padrão =  $3/4 \times (\text{percentil } 75\% - \text{percentil } 25\%)$ . Essa estimativa robusta também descarta dados atípicos. A comparação dos desvios padrões obtidos utilizando os três métodos indica que eles são semelhantes. Não há diferenças significativas entre os desvios padrões obtidos com os três métodos.

Evangelista (2002) realizou estudo utilizando cinco traços diferentes de concreto, encontrando correlações entre resistência à compressão e velocidade de onda ultra-sônica com os seguintes coeficientes de determinação: 0,69 – 0,96 – 0,92 – 0,78 – 0,84. Neste trabalho os coeficientes de determinação utilizando todas as idades foram: 0,75 – 0,76 – 0,72 e utilizando apenas as idades até 24 horas: 0,85 – 0,81 – 0,86.

Machado (2005) testou vários modelos de curvas de correlação entre resistência à compressão e velocidade de pulso ultra-sônico (método direto), concluindo que o ajuste potencial foi o mais adequado por apresentar o maior coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,64$ . Neste trabalho também se utilizou a potência para determinar a curva entre resistência à tração na flexão e velocidade de pulso ultra-sônico, obtendo-se um  $R^2 = 75,2\%$ .

Rheinheimer (2007) relatou que o ensaio de ultra-som na sua forma de medida indireta não apresentou bons resultados, além de ter sido constatada uma grande variabilidade nos mesmos. O contrário foi constatado neste trabalho, encontrando-se bons coeficientes de correlação para o método de transmissão indireta tanto com dois como com três pontos de recepção.

Rheinheimer (2007) encontrou resultados de velocidade de ultra-som no método indireto, em todos os casos, inferiores à velocidade pelo método direto. Segundo a pesquisadora 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 aos efeitos de exsudação, não sendo representativa do concreto do restante da peça. Neste trabalho constatou-se que existem pequenas diferenças entre os valores das medianas utilizando os três métodos de ultra-som e que não há diferenças significativas entre os desvios padrões robustos obtidos com os três métodos (MD, MI 3P e MI 2P). Isto pode ser explicado em função da não existência de exsudação em concreto de alta resistência, em virtude da existência de elevados teores de materiais finos.

Rodrigues (2003) estudou a correlação entre a velocidade ultra-sônica e o módulo de deformação estático do concreto com uso de diferentes tipos de medidores. Segundo a pesquisadora a matriz de correlação que apontou correlação estatisticamente significativa foi apenas entre a velocidade ultra-sônica e o módulo com uso do transdutor resistivo *strain gage*, apresentando um coeficiente de correlação de 0,73.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que tanto o ensaio de ultra-som como o de maturidade mostraram-se eficazes para estimar a resistência à tração em idades iniciais, o que demonstra o potencial da sua utilização no controle de concreto para *fast-track* em campo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas neste capítulo não devem ser tomadas de forma absoluta, pois se referem somente aos dados obtidos de concretos, argamassas e pastas que utilizam tipo, quantidades e qualidades específicas de materiais, técnicas de execução e equipamentos. Sua representatividade deve ser firmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar os obtidos neste estudo.

Os termos apresentados nos modelos de comportamento ajustados aos resultados foram estatisticamente significantes para um nível de confiança de 95% e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos modelos foram bons, indicando que os modelos representam satisfatoriamente o comportamento dos resultados.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados neste trabalho, podem-se enumerar algumas conclusões, todas comprovadas estatisticamente.

#### 6.1.1 Comparação de tamanhos de corpos-de-prova prismáticos utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão

##### 6.1.1.1 Resistência à tração na flexão

Com o objetivo de verificar a possibilidade de utilizar corpos-de-prova menores que os estabelecidos pela norma para realização dos ensaios do programa experimental, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão, aos 28 dias, em corpos-de-prova de dimensões 100x100x350 e 150x150x500mm, para as relações água/cimento de 0,25, 0,35 e 0,45.

Através da análise de variância pode-se constatar que o tamanho dos corpos-de-prova não influenciou significativamente nos resultados. Apenas a relação água/cimento foi

significativa. Como era esperado, quanto maior a relação água/cimento, menor os valores de resistência à tração na flexão.

#### 6.1.1.2 Ultra-som

Realizou-se ensaios de ultra-som, método direto e indireto com três e dois pontos de recepção, nos mesmos corpos-de-prova utilizados para o ensaio de resistência à tração na flexão, aos 28 dias de idade.

Encontrou-se coeficiente de correlação entre os valores de resistência à tração na flexão e velocidade ultra-sônica, para os corpos-de-prova de dimensões 100x100x350mm, método direto, de 88,7% e para o método indireto de 87,2%.

Os corpos-de-prova de dimensões 100x100x350mm apresentaram resultados de velocidade de pulso ultra-sônico um pouco superiores que os de dimensões 150x150x350mm, independente do método utilizado. Como era esperado, com o aumento da relação água/cimento ocorreu um decréscimo na velocidade de pulso ultra-sônico, tanto no método direto como no indireto, independente das dimensões dos corpos-de-prova.

### 6.1.2 Concretos de referência

#### 6.1.2.1 Resistência à compressão

Foram realizados ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova de dimensões 100x200mm, nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias, para as relações água/cimento 0,25, 0,35, e 0,45, curados em câmara úmida.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão foram modelados pela

equação,  $f_c = \frac{23,27}{a/c^{0,96}} \times e^{-\left[\left(\frac{0,357}{idade}\right)^{0,894}\right]}$ , com um coeficiente de determinação de 87,0%.

A medida que aumentou a relação água/cimento, diminuiu a resistência à compressão do concreto. Com a evolução da idade ocorreu um acréscimo na resistência em todas as relações água/cimento. Ambos comportamentos já eram esperados.

### 6.1.2.2 Resistência à tração na flexão

Com o objetivo de estabelecer curvas de correlação entre os resultados de resistência à tração na flexão e os resultados de maturidade e ultra-som, foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova de dimensões 100x100x350mm, nas idades de 1, 2, 3, 7 e 28 dias, para as relações água/cimento 0,25, 0,35 e 0,45, curados em câmara úmida.

O modelo utilizado para os resultados de resistência à tração na flexão foi o da equação

$$f_{tf} = \frac{3,33}{a/c^{0,814}} \times e^{-\left[\left(\frac{0,433}{idade}\right)^{1,133}\right]}, \text{ com um coeficiente de determinação de } 88,1\%.$$

Como era esperado, com o aumento da relação água/cimento, a resistência à tração na flexão diminuiu e com o acréscimo de idade ocorreu um incremento na resistência para todas as relações água/cimento.

### 6.1.3 Maturidade

Com o objetivo de estabelecer curvas de correlação entre os resultados de resistência à tração na flexão e os resultados de maturidade, foram realizados ensaios de maturidade em corpos-de-prova de argamassa de dimensões 50x50x50mm, 40x40x160mm, metades dos corpos-de-prova de 40x40x160mm, em corpos-de-prova de concreto com 100x100x350mm e de pasta de dimensões 12,5x12,5x12,5mm. As idades de ruptura estão descritas no item 5.1.2 e todos corpos-de-prova foram curados em tanques com temperaturas de 10, 30 e 50°C. As relações água/cimento estudadas nestes ensaios foram 0,25, 0,35 e 0,45.

O modelo ajustado para o ensaio de maturidade foi sempre o mesmo, variando apenas

os valores dos parâmetros,  $f_c$  ou  $f_{tf} = \frac{a1}{a/c^{n1}} \times e^{-\left[\left(\frac{b2}{idade}\right)^{n2}\right]}$ . Os coeficientes de

determinação dos modelos ajustados para os resultados dos ensaios realizados foram todos bons, ficando os valores entre 85,7% e 97,5%, sendo que dos quinze modelos ajustados, apenas três apresentaram coeficientes de determinação inferiores a 90%.

O tipo de corpo-de-prova apresentou diferença significativa na análise de variância realizada, constatando-se através da comparação múltipla de médias que só há diferença significativa do corpo-de-prova metades dos 40x40x160mm (compressão) em relação ao 40x40x160mm (flexão). Portanto, conclui-se que é possível determinar a energia aparente de ativação utilizando-se qualquer um dos tipos de corpos-de-prova testados, uma vez que nenhum deu diferença significativa em relação ao preconizado pela norma (50x50x50mm).

Encontrou-se um valor de  $R^2$  de 95,4% para a correlação entre os valores de resistência à tração na flexão encontrados nos ensaios versus os previstos pelos modelos de comportamento dos resultados do ensaio de maturidade, ou seja, é possível determinar a resistência à tração na flexão do concreto através do ensaio de maturidade com 95,4% de certeza.

#### 6.1.4 Ultra-som

Com o objetivo de estabelecer curvas de correlação entre os resultados de resistência à tração na flexão e os resultados de ultra-som, foram realizados ensaios de ultra-som nos mesmos corpos-de-prova de concreto, de dimensões 100x100x350mm, utilizados no ensaio de maturidade. Antes de romper cada corpo-de-prova à tração na flexão, determinava-se a velocidade ultra-sônica pelo método direto e indireto com dois e três pontos de recepção. As idades de ensaios foram as mesmas do ensaio de maturidade, conforme apresentado no item 5.1.3.

Com os gráficos de correlação dos resultados de resistência à tração na flexão dos ensaios versus os previstos pela tendência de comportamento dos resultados do ensaio de ultra-som, encontraram-se os seguintes coeficientes de correlação:  $R^2 = 75,2\%$  (método direto),  $R^2 = 76,4\%$  (método indireto com três pontos) e  $R^2 = 71,7\%$  (método indireto com dois pontos), utilizando os valores de todas as idades ensaiadas.

Como o trabalho trata-se de concreto para fast-track, determinaram-se novos coeficientes de correlação utilizando as idades de até vinte e quatro horas, obtendo-se valores maiores de  $R^2$ . Para o método direto encontrou-se  $R^2 = 85,1\%$ , método indireto com três pontos  $R^2 = 80,8\%$  e método indireto com dois pontos  $R^2 = 86,4\%$ .

As curvas de calibração encontradas com a finalidade de se obter a resistência à tração na flexão através do ensaio de ultra-som deram bons coeficientes de correlação, para o método direto  $R^2 = 76,2\%$ , método indireto com três pontos  $R^2 = 76,6\%$  e com dois pontos  $R^2 = 72,8\%$ .

Através de uma análise estatística descritiva constatou-se que existem pequenas diferenças entre os valores das medianas utilizando os três métodos de ultra-som e que não existem diferenças significativas entre os desvios padrões robustos obtidos com os três métodos (MD, MI 3P e MI 2P).

### 6.1.5 Conclusões finais

Obteve-se neste trabalho resultados que muito contribuirão com o meio técnico. Comprovou-se que é possível determinar a resistência à tração na flexão do concreto utilizando corpos-de-prova de dimensões inferiores às preconizadas pela norma. De forma inédita, demonstrou-se que é viável obter a energia aparente de ativação através de corpos-de-prova de pasta, o que facilita bastante a execução do ensaio de maturidade. Através de correlações realizadas, constatou-se que é possível estimar a resistência à tração do concreto através dos ensaios de maturidade e ultra-som. É importante salientar que todas as análises foram comprovadas estatisticamente, conforme pode ser observado no decorrer deste trabalho.

Portanto, a partir dos resultados encontrados nesta pesquisa, pode-se afirmar que tanto o ensaio de maturidade como o de ultra-som são eficazes para a determinação da resistência à tração do concreto. Além de serem ensaios com menor variabilidade (principalmente o de ultra-som) em relação ao ensaio de resistência à tração na flexão, a sua principal vantagem é que se pode estimar a resistência na hora, não dependendo de ensaios de laboratório.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Em razão de existirem poucos trabalhos nacionais, considerando a nossa realidade de materiais e técnicas, tratando dos ensaios não destrutivos de maturidade e ultra-som aplicados a pavimento de concreto para fast-track, algumas sugestões relacionadas com este trabalho serão enumeradas a seguir.

- a) realizar outros trabalhos determinando a energia aparente de ativação utilizando corpos-de-prova de pasta com a finalidade de comparar os resultados com os obtidos nesta tese;
- b) realizar os ensaios de ultra-som e de maturidade utilizando outros tipos de cimento com a finalidade de correlacionar a resistência à tração na flexão em idades iniciais e os ensaios acima citados;
- c) correlacionar os ensaios de ultra-som e maturidade com a resistência à compressão do concreto em idades iniciais;
- d) realizar em campo os ensaios de ultra-som com a finalidade de comparar com os resultados obtidos em laboratório;
- e) estimar a resistência à tração do concreto em campo, através do monitoramento da temperatura do concreto.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity approach: ASTM C 1074. In: **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 1998.

\_\_\_\_\_. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars: ASTM C 109. In: **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 2002.

\_\_\_\_\_. Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars: ASTM C 348. In: **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia, 2002.

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.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**: NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**: NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregado miúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**: NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Agregado para concreto - Especificação**: NBR 7211. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova**: NBR 9479. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone**: NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.

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

\_\_\_\_\_. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**: NBR 8802. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **Execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico**: NBR 7583. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**: NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003.

BALBO, J. T. **Contribuição à análise estrutural de reforços com camadas ultradelgadas de concreto de cimento Portland sobre pavimentos asfálticos**. São Paulo, 1999. 195p. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

BALBO, J. T., **Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples**, V **Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, São Paulo, 2004, 20p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987. 435 p.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI 1881 – Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, 1986. 20 p.

BUNGEY, J. H. **Testing of concrete in structures**. Blackie Academic e Professional, 1982, 286 p.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1988.

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

CARINO, N. J., The Maturity Method. In: CRC Handbook on nondestructive testing of concrete. V. M. Malhotra and N. J. Carino. Eds. CRC Press: 1991. p. 101-146.

CARVALHO, M. D.; HALLACK, A.; SILVA, E.L.S. Whitetopping: O Caso da Via Anchieta. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador, 1996. v.3, p.1240-1262.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação**. São Paulo, 2004. 220p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CLARO, W. A.; BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. A.; SALLES, F. M. Avaliação da influência do período da cura térmica sobre a resistência dos concretos elaborados com cimentos CPV ARI Plus e CPII F-32, através do Método da Maturidade. In: 49 Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves-RS. **ANAIS DO 49 CBC**. SAO PAULO : IBRACON, 2007. v. 1.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRÂNSITO. **Pesquisa Rodoviária 2004**. Disponível em: <http://www.cnt.org.br>. Acesso em 2004.

CREMONINI, R. A.; DAL MOLIN, D. C. C.; CECCATTO, D. M.; MANCIO, M.; GOULART, J. Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** CD-ROOM.

DANIELLETO, C. C. **Avaliação da resistência do concreto em estruturas prontas**. Porto Alegre, 1986. 175p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

EVANGELISA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Rio de Janeiro, 2002. 219 p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, Accelerated Rigid Paving Techniques, Special Project 201, FHWA-SA-94-080, 1994.

FREIELEBEN-HANSEN, P.; PEDERSEN, E. J. Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, **Nordisk Betong**, Vol. 1, 1977, p. 21-25 (em sueco).

GIUBLIN, C.R. **Diretrizes para o planejamento de canteiros de obra de pavimentação de concreto**. Curitiba, 2002. 169p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Setor de Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

GIUSTI, R. J. **Pavimento de concreto feito para durar**. Disponível em: <http://www.interobras.com.br/artigos/abcp>. Acesso em 2005.

GODINHO, D.P.; GROSSI, L.C. Pavimento de concreto para liberação rápida ao tráfego (fast-track). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS E CONTROLE TECNOLÓGICO, 2000, São Paulo. **Anais...** CD-ROOM.

GUIMARÃES, M. C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; AGOPYAN, V. Análise da repetibilidade do ensaio de tenacidade à flexão para concretos reforçados com fibras de

ação (CRFA). In: **Anais do 42º Congresso Brasileiro do Concreto**, IBRACON (CD Room), Fortaleza, 2000.

HAMASSAKI, L. T. **Utilização do ultra-som em concreto**. São Paulo, 1986. 108p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HASPARYK, N. P. **Investigação de Concretos Afetados pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado**. Porto Alegre, 2005. 326p. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992, 349p.

HENDRIKX, L. Use of Fast Track Concrete Paving for Restauration Work. In: **International Symposium on Concrete Roads, 8<sup>th</sup>**. Lisbon, 1998. Theme II – Progress in Concrete Road Materials and in the Construction Process, p. 69-71.

HSU, T. C.; GAO, L. Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 5, p. 575-581, 1998.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102. 1980.

KOMLOS, K.; POPOVICS, S.; NÜRNBERGEROVÁ, T.; BABÁL, B.; POPOVICS, J. S. Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. **Cement and Concrete Composites**, n. 18 p. 357-364, jun. 1996.

MACHADO, M. D. **Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos**. Rio de Janeiro, 2005. 265 p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MALHOTRA, V. M. Maturity concept and the estimation of concrete strength – A review. **Information circular IC 277**, Department of Energy, Mines and Resources (Canadá), November 1971, 43p.

MENEGHETTI, L. C. **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som**. Florianópolis, 1999. 163p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 6. ed. Singapore: Longman Singapore Publishers Pte Ltd, 1997.

NURSE, R. W. Steam curing of concrete. **Magazine of concrete research**. London, v. 1, n. 2, 1949, p. 79-88.

OH, B. H. Fatigue – life distributions of concrete for various stress levels. **ACI Materials Journal**, n. 88, p. 122-127, 1991.

PEREIRA, D. S. **Estudo de gradientes térmicos e deformações em whitetopping ultradelgado**. São Paulo, 2001. 111p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

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. 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.. 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.A. , **The effect of curing temperatures on the development of mechanical properties of fresh and hardened high strength sílica fume mixtures – a maturity approach**, Tese de Doutorado, Universidade de Cornell, Estados Unidos, 294 pp, 1997.

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.

PITTA, M. R. **Pavimento de concreto: um moderno ovo de Colombo?** 1996.

RAITHBY, K. D.; GALLOWAY, J. W. Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete. In: **ABELES Symposium: Fatigue of Concrete**, Hollywood, 1972-1973. Papers. Detroit, ACI Publication. v. 41, p. 15-34, 1974.

RASTRUP, E. Heat of hydration in concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 16, n. 17, 1954, p. 79-92.

RAVINDRARAJAH, R. S. Evaluation of compressive strength for high-strength concrete by pulse velocity method. Non Destructive Testing of Concrete Elements and Structures: **Proceedings** of sessions sponsored by the Engineering Mechanics Division of the American Society of Civil Engineers in Conjunction with the Structures Congress San Antonio, Texas, Edited by Farhad Ansari and Stein Sture, 1992, p. 115-126.

REPETTE, W. L. **Contribuição à inspeção e à avaliação da segurança de estruturas acabadas de concreto armado**. Porto Alegre, 1991. 169p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RHEINHEIMER, V. **Utilização de Ensaios Não Destrutivos para Pavimentos Fast Track**. Florianópolis, 2006. 43p. Projeto para qualificação de dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

RHEINHEIMER, V.; PINTO, R. C. A.; HADLICH, A. R.; PFLEGER, V. **Obtenção das Curvas de Maturidade para um Pavimento Fast Track**. Anais: XI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, EPUSP 2006, São Paulo, Brasil.

RODRIGUES, G. S. S. **Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultra-sônico: estudo da correlação e fatores influentes**. Goiânia, 2003. 187p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás.

SALVADOR FILHO, J. A. A. Cura térmica dos concretos de alto desempenho: análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade. Ilha Solteira, 2001. 91 p. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista.

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.

SILVA, P. F. A.; ARRUDA, V.; BARBIERI, M. Pavimento de Concreto: "Fast Track". In: **Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto**, IBRACON (CD Room), Rio de Janeiro, 2006.

STURRUP, V. R.; VECCHIO, F. J.; CARATIN, H. Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength. In: *In Situ / Non Destructive Testing of Concrete*, 1984, Detroit. **Proceedings...**, Detroit: American Concrete Institute, 1984, p. 201-217, (Special Publication, 82).

SWAMY, R. N.; AI-HAMED, A. H. The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete. In: *In Situ / Non Destructive Testing of Concrete*, **Proceedings...**, Detroit: American Concrete Institute, 1984, p. 247-276, (Special Publication, 82).

WENDT, S. C. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. Porto Alegre, 2006. Tese (Doutorado a ser defendido). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANEXO A - Cronograma de moldagem e ruptura detalhado dos corpos-de-prova de  
concreto, argamassa e pasta

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                    | T1              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 13:02 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
|                                      | Data            | Idade     |
|                                      | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 17:25 | 4:23      |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 21:48 | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/2008 06:34 | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 00:06 | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 11:10 | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 09:18 | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                    | T2              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 13:18 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
|                                      | Data            | Idade     |
|                                      | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 17:41 | 4:23      |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 22:04 | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/2008 06:50 | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 00:22 | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 11:26 | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 09:34 | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                    | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 13:52 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
|                                      | Data            | Idade     |
|                                      | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/08 18:15   | 4:23      |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/08 22:38   | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/08 7:24    | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/08 0:56    | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/08 12:00   | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/08 10:08   | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                    | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 15:15 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/08 19:38   | 4:23      |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/08 0:01    | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/08 8:47    | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/08 2:19    | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/08 13:23   | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/08 11:31   | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                    | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 15:36 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 19:59 | 4:23      |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/2008 00:22 | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/2008 09:08 | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 02:40 | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 13:44 | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 11:52 | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                    | 3ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 15:43 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/08 20:06   | 4:23      |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/08 0:29    | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/08 9:15    | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/08 2:47    | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/08 13:51   | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/08 11:59   | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                    | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 14:29 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
|                                      | Data            | Idade     |
|                                      | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 18:52 | 4:23      |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 23:15 | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/2008 08:01 | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 01:33 | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 12:37 | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 10:45 | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                    | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 22/1/2008 14:54 |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,45            |           |
|                                      | Data            | Idade     |
|                                      | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 19:17 | 4:23      |
| terça-feira, 22 de janeiro de 2008   | 22/1/2008 23:40 | 8:46:00   |
| quarta-feira, 23 de janeiro de 2008  | 23/1/2008 08:26 | 17:32:00  |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 01:58 | 35:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 13:02 | 70:08:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 11:10 | 140:16:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                    | T1              |           |
| Dia e hora da mistura                | 24/1/2008 09:37 |           |
| Temperatura                          | 30°C            |           |
| a/c                                  | 0,25            |           |
|                                      | Data            | Idade     |
|                                      | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 15:39 | 6:02      |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 21:41 | 12:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 09:45 | 24:08:00  |
| sábado, 26 de janeiro de 2008        | 26/1/2008 09:53 | 48:16:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 10:09 | 96:32:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008  | 1/2/2008 10:41  | 193:04:00 |



|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                    | 3ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 24/1/2008 11:20 |           |
| Temperatura                          | 30°C            |           |
| a/c                                  | 0,25            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 17:22 | 6:02      |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 23:24 | 12:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 11:28 | 24:08:00  |
| sábado, 26 de janeiro de 2008        | 26/1/2008 11:36 | 48:16:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 11:52 | 96:32:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008  | 1/2/2008 12:24  | 193:04:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                    | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 24/1/2008 11:35 |           |
| Temperatura                          | 30°C            |           |
| a/c                                  | 0,25            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 17:37 | 6:02      |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 23:39 | 12:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 11:43 | 24:08:00  |
| sábado, 26 de janeiro de 2008        | 26/1/2008 11:51 | 48:16:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 12:07 | 96:32:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008  | 1/2/2008 12:39  | 193:04:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                    | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura                | 24/1/2008 11:59 |           |
| Temperatura                          | 30°C            |           |
| a/c                                  | 0,25            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 24 de janeiro de 2008  | 24/1/2008 18:01 | 6:02      |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 00:03 | 12:04:00  |
| sexta-feira, 25 de janeiro de 2008   | 25/1/2008 12:07 | 24:08:00  |
| sábado, 26 de janeiro de 2008        | 26/1/2008 12:15 | 48:16:00  |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 12:31 | 96:32:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008  | 1/2/2008 13:03  | 193:04:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                    | T2              |           |
| Dia e hora da mistura                | 28/1/2008 11:00 |           |
| Temperatura                          | 30°C            |           |
| a/c                                  | 0,25            |           |
|                                      | Data            | Idade     |
|                                      | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 17:02 | 6:02      |
| segunda-feira, 28 de janeiro de 2008 | 28/1/2008 23:04 | 12:04:00  |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008   | 29/1/2008 11:08 | 24:08:00  |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008  | 30/1/2008 11:16 | 48:16:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008  | 1/2/2008 11:32  | 96:32:00  |
| terça-feira, 5 de fevereiro de 2008  | 5/2/2008 12:04  | 193:04:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T1              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 28/1/2008 20:00 |           |
| Temperatura                           | 10°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
|                                       | Data            | Idade     |
|                                       | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008    | 29/1/2008 13:48 | 17:48     |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008   | 30/1/2008 07:36 | 35:36:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008   | 31/1/2008 19:12 | 71:12:00  |
| domingo, 3 de fevereiro de 2008       | 3/2/2008 18:24  | 142:24:00 |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008        | 9/2/2008 16:48  | 284:48:00 |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 13:36 | 569:36:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                   | T1              |           |
| Dia e hora da mistura               | 29/1/2008 08:00 |           |
| Temperatura                         | 50°C            |           |
| a/c                                 | 0,25            |           |
|                                     | Data            | Idade     |
|                                     | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 11:15 | 3:15      |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 14:30 | 6:30:00   |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 21:00 | 13:00:00  |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 10:00 | 26:00:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 12:00 | 52:00:00  |
| sábado, 2 de fevereiro de 2008      | 2/2/2008 16:00  | 104:00:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                   | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura               | 29/1/2008 08:30 |           |
| Temperatura                         | 50°C            |           |
| a/c                                 | 0,25            |           |
|                                     | Data            | Idade     |
|                                     | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 11:45 | 3:15      |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 15:00 | 6:30:00   |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 21:30 | 13:00:00  |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 10:30 | 26:00:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 12:30 | 52:00:00  |
| sábado, 2 de fevereiro de 2008      | 2/2/2008 16:30  | 104:00:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                   | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura               | 29/1/2008 08:45 |           |
| Temperatura                         | 50°C            |           |
| a/c                                 | 0,25            |           |
|                                     | Data            | Idade     |
|                                     | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 12:00 | 3:15      |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 15:15 | 6:30:00   |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 21:45 | 13:00:00  |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 10:45 | 26:00:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 12:45 | 52:00:00  |
| sábado, 2 de fevereiro de 2008      | 2/2/2008 16:45  | 104:00:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                   | 3ª              |           |
| Dia e hora da mistura               | 29/1/2008 09:05 |           |
| Temperatura                         | 50°C            |           |
| a/c                                 | 0,25            |           |
|                                     | Data            | Idade     |
|                                     | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 12:20 | 3:15      |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 15:35 | 6:30:00   |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 22:05 | 13:00:00  |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 11:05 | 26:00:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 13:05 | 52:00:00  |
| sábado, 2 de fevereiro de 2008      | 2/2/2008 17:05  | 104:00:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                   | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura               | 29/1/2008 09:26 |           |
| Temperatura                         | 50°C            |           |
| a/c                                 | 0,25            |           |
|                                     | Data            | Idade     |
|                                     | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 12:41 | 3:15      |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 15:56 | 6:30:00   |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 22:26 | 13:00:00  |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 11:26 | 26:00:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 13:26 | 52:00:00  |
| sábado, 2 de fevereiro de 2008      | 2/2/2008 17:26  | 104:00:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                   | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura               | 29/1/2008 09:49 |           |
| Temperatura                         | 50°C            |           |
| a/c                                 | 0,25            |           |
|                                     | Data            | Idade     |
|                                     | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 13:04 | 3:15      |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 16:19 | 6:30:00   |
| terça-feira, 29 de janeiro de 2008  | 29/1/2008 22:49 | 13:00:00  |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 11:49 | 26:00:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 13:49 | 52:00:00  |
| sábado, 2 de fevereiro de 2008      | 2/2/2008 17:49  | 104:00:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                   | T2              |           |
| Dia e hora da mistura               | 30/1/2008 08:00 |           |
| Temperatura                         | 10°C            |           |
| a/c                                 | 0,35            |           |
|                                     | Data            | Idade     |
|                                     | Hora da ruptura |           |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 21:46 | 13:46     |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 11:32 | 27:32:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008 | 1/2/2008 15:04  | 55:04:00  |
| domingo, 3 de fevereiro de 2008     | 3/2/2008 22:08  | 110:08:00 |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008 | 8/2/2008 12:16  | 220:16:00 |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008    | 17/2/2008 16:32 | 440:32:00 |

|                                     |                 |           |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                       | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                   | T2              |           |
| Dia e hora da mistura               | 30/1/2008 08:30 |           |
| Temperatura                         | 50°C            |           |
| a/c                                 | 0,25            |           |
| Data                                | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 11:45 | 3:15      |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 15:00 | 6:30:00   |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008 | 30/1/2008 21:30 | 13:00:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008 | 31/1/2008 10:30 | 26:00:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008 | 1/2/2008 12:30  | 52:00:00  |
| domingo, 3 de fevereiro de 2008     | 3/2/2008 16:30  | 104:00:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                    | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                | 30/1/2008 11:00 |           |
| Temperatura                          | 30°C            |           |
| a/c                                  | 0,25            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008  | 30/1/2008 17:02 | 6:02      |
| quarta-feira, 30 de janeiro de 2008  | 30/1/2008 23:04 | 12:04:00  |
| quinta-feira, 31 de janeiro de 2008  | 31/1/2008 11:08 | 24:08:00  |
| sexta-feira, 1 de fevereiro de 2008  | 1/2/2008 11:16  | 48:16:00  |
| domingo, 3 de fevereiro de 2008      | 3/2/2008 11:32  | 96:32:00  |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008 | 7/2/2008 12:04  | 193:04:00 |

|                                      |                 |           |
|--------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                        | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                    | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                | 6/2/2008 08:30  |           |
| Temperatura                          | 50°C            |           |
| a/c                                  | 0,25            |           |
| Data                                 | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 6 de fevereiro de 2008 | 6/2/2008 11:45  | 3:15      |
| quarta-feira, 6 de fevereiro de 2008 | 6/2/2008 15:00  | 6:30:00   |
| quarta-feira, 6 de fevereiro de 2008 | 6/2/2008 21:30  | 13:00:00  |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008 | 7/2/2008 10:30  | 26:00:00  |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008  | 8/2/2008 12:30  | 52:00:00  |
| domingo, 10 de fevereiro de 2008     | 10/2/2008 16:30 | 104:00:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                      | T2              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 6/2/2008 19:30  |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008   | 7/2/2008 13:18  | 17:48     |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008    | 8/2/2008 07:06  | 35:36:00  |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008         | 9/2/2008 18:42  | 71:12:00  |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 17:54 | 142:24:00 |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 16:18 | 284:48:00 |
| sábado, 1 de março de 2008             | 1/3/2008 13:06  | 569:36:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                      | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 6/2/2008 20:00  |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008   | 7/2/2008 13:48  | 17:48     |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008    | 8/2/2008 07:36  | 35:36:00  |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008         | 9/2/2008 19:12  | 71:12:00  |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 18:24 | 142:24:00 |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 16:48 | 284:48:00 |
| sábado, 1 de março de 2008             | 1/3/2008 13:36  | 569:36:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                      | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 6/2/2008 20:20  |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008   | 7/2/2008 14:08  | 17:48     |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008    | 8/2/2008 07:56  | 35:36:00  |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008         | 9/2/2008 19:32  | 71:12:00  |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 18:44 | 142:24:00 |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 17:08 | 284:48:00 |
| sábado, 1 de março de 2008             | 1/3/2008 13:56  | 569:36:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                      | 3ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 6/2/2008 20:40  |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008   | 7/2/2008 14:28  | 17:48     |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008    | 8/2/2008 08:16  | 35:36:00  |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008         | 9/2/2008 19:52  | 71:12:00  |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 19:04 | 142:24:00 |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 17:28 | 284:48:00 |
| sábado, 1 de março de 2008             | 1/3/2008 14:16  | 569:36:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                      | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 6/2/2008 21:00  |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008   | 7/2/2008 14:48  | 17:48     |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008    | 8/2/2008 08:36  | 35:36:00  |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008         | 9/2/2008 20:12  | 71:12:00  |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 19:24 | 142:24:00 |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 17:48 | 284:48:00 |
| sábado, 1 de março de 2008             | 1/3/2008 14:36  | 569:36:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                      | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 6/2/2008 21:20  |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 7 de fevereiro de 2008   | 7/2/2008 15:08  | 17:48     |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008    | 8/2/2008 08:56  | 35:36:00  |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008         | 9/2/2008 20:32  | 71:12:00  |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 19:44 | 142:24:00 |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 18:08 | 284:48:00 |
| sábado, 1 de março de 2008             | 1/3/2008 14:56  | 569:36:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                      | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 8/2/2008 20:00  |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008         | 9/2/2008 13:48  | 17:48     |
| domingo, 10 de fevereiro de 2008       | 10/2/2008 07:36 | 35:36:00  |
| segunda-feira, 11 de fevereiro de 2008 | 11/2/2008 19:12 | 71:12:00  |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008  | 14/2/2008 18:24 | 142:24:00 |
| quarta-feira, 20 de fevereiro de 2008  | 20/2/2008 16:48 | 284:48:00 |
| segunda-feira, 3 de março de 2008      | 3/3/2008 13:36  | 569:36:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T1              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 8/2/2008 08:00  |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
|                                       | Data            | Idade     |
|                                       | Hora da ruptura |           |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008   | 8/2/2008 15:05  | 7:05      |
| sexta-feira, 8 de fevereiro de 2008   | 8/2/2008 22:10  | 14:10:00  |
| sábado, 9 de fevereiro de 2008        | 9/2/2008 12:20  | 28:20:00  |
| domingo, 10 de fevereiro de 2008      | 10/2/2008 16:40 | 56:40:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 01:20 | 113:20:00 |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008      | 17/2/2008 18:40 | 226:40:00 |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 05:20 | 453:20:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                      | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 11/2/2008 08:00 |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 11 de fevereiro de 2008 | 11/2/2008 21:46 | 13:46     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 11:32 | 27:32:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 15:04 | 55:04:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008   | 15/2/2008 22:08 | 110:08:00 |
| quarta-feira, 20 de fevereiro de 2008  | 20/2/2008 12:16 | 220:16:00 |
| sexta-feira, 29 de fevereiro de 2008   | 29/2/2008 16:32 | 440:32:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                      | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 11/2/2008 08:30 |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 11 de fevereiro de 2008 | 11/2/2008 22:16 | 13:46     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 12:02 | 27:32:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 15:34 | 55:04:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008   | 15/2/2008 22:38 | 110:08:00 |
| quarta-feira, 20 de fevereiro de 2008  | 20/2/2008 12:46 | 220:16:00 |
| sexta-feira, 29 de fevereiro de 2008   | 29/2/2008 17:02 | 440:32:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                      | 11/2/2008 08:50 |           |
| Dia e hora da mistura                  | 2ª              |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 11 de fevereiro de 2008 | 11/2/2008 22:36 | 13:46     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 12:22 | 27:32:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 15:54 | 55:04:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008   | 15/2/2008 22:58 | 110:08:00 |
| quarta-feira, 20 de fevereiro de 2008  | 20/2/2008 13:06 | 220:16:00 |
| sexta-feira, 29 de fevereiro de 2008   | 29/2/2008 17:22 | 440:32:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                      | 3ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 11/2/2008 09:10 |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 11 de fevereiro de 2008 | 11/2/2008 22:56 | 13:46     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 12:42 | 27:32:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 16:14 | 55:04:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008   | 15/2/2008 23:18 | 110:08:00 |
| quarta-feira, 20 de fevereiro de 2008  | 20/2/2008 13:26 | 220:16:00 |
| sexta-feira, 29 de fevereiro de 2008   | 29/2/2008 17:42 | 440:32:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                      | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 11/2/2008 09:30 |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 11 de fevereiro de 2008 | 11/2/2008 23:16 | 13:46     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 13:02 | 27:32:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 16:34 | 55:04:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008   | 15/2/2008 23:38 | 110:08:00 |
| quarta-feira, 20 de fevereiro de 2008  | 20/2/2008 13:46 | 220:16:00 |
| sexta-feira, 29 de fevereiro de 2008   | 29/2/2008 18:02 | 440:32:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                      | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 11/2/2008 09:50 |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 11 de fevereiro de 2008 | 11/2/2008 23:36 | 13:46     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008   | 12/2/2008 13:22 | 27:32:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 16:54 | 55:04:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008   | 15/2/2008 23:58 | 110:08:00 |
| quarta-feira, 20 de fevereiro de 2008  | 20/2/2008 14:06 | 220:16:00 |
| sexta-feira, 29 de fevereiro de 2008   | 29/2/2008 18:22 | 440:32:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T1              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 12/2/2008 16:45 |           |
| Temperatura                           | 50°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
|                                       | Data            | Idade     |
|                                       | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 20:43 | 3:58      |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 00:41 | 7:56:00   |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 08:37 | 15:52:00  |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008 | 14/2/2008 00:29 | 31:44:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 08:13 | 63:28:00  |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008      | 17/2/2008 23:41 | 126:56:00 |
| sábado, 23 de fevereiro de 2008       | 23/2/2008 06:37 | 253:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                     | 1º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 12/2/2008 15:00 |           |
| Temperatura                           | 50°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 18:58 | 3:58      |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 22:56 | 7:56:00   |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 06:52 | 15:52:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 22:44 | 31:44:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 06:28 | 63:28:00  |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008      | 17/2/2008 21:56 | 126:56:00 |
| sábado, 23 de fevereiro de 2008       | 23/2/2008 04:52 | 253:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                     | 2º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 12/2/2008 15:25 |           |
| Temperatura                           | 50°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 19:23 | 3:58      |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 23:21 | 7:56:00   |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 07:17 | 15:52:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 23:09 | 31:44:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 06:53 | 63:28:00  |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008      | 17/2/2008 22:21 | 126:56:00 |
| sábado, 23 de fevereiro de 2008       | 23/2/2008 05:17 | 253:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                     | 3º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 12/2/2008 15:46 |           |
| Temperatura                           | 50°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 19:44 | 3:58      |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 23:42 | 7:56:00   |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 07:38 | 15:52:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 23:30 | 31:44:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 07:14 | 63:28:00  |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008      | 17/2/2008 22:42 | 126:56:00 |
| sábado, 23 de fevereiro de 2008       | 23/2/2008 05:38 | 253:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                     | 1º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 12/2/2008 16:13 |           |
| Temperatura                           | 50°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 20:11 | 3:58      |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 00:09 | 7:56:00   |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 08:05 | 15:52:00  |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 23:57 | 31:44:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 07:41 | 63:28:00  |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008      | 17/2/2008 23:09 | 126:56:00 |
| sábado, 23 de fevereiro de 2008       | 23/2/2008 06:05 | 253:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                     | 2º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 12/2/2008 16:35 |           |
| Temperatura                           | 50°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 12 de fevereiro de 2008  | 12/2/2008 20:33 | 3:58      |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 00:31 | 7:56:00   |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008 | 13/2/2008 08:27 | 15:52:00  |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008 | 14/2/2008 00:19 | 31:44:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 08:03 | 63:28:00  |
| domingo, 17 de fevereiro de 2008      | 17/2/2008 23:31 | 126:56:00 |
| sábado, 23 de fevereiro de 2008       | 23/2/2008 06:27 | 253:52:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                      | T2              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 13/2/2008 08:00 |           |
| Temperatura                            | 30°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
| Data                                   | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 15:05 | 7:05      |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 22:10 | 14:10:00  |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008  | 14/2/2008 12:20 | 28:20:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008   | 15/2/2008 16:40 | 56:40:00  |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 01:20 | 113:20:00 |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008   | 22/2/2008 18:40 | 226:40:00 |
| segunda-feira, 3 de março de 2008      | 3/3/2008 05:20  | 453:20:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                      | T2              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 13/2/2008 15:00 |           |
| Temperatura                            | 50°C            |           |
| a/c                                    | 0,35            |           |
| Data                                   | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 18:58 | 3:58      |
| quarta-feira, 13 de fevereiro de 2008  | 13/2/2008 22:56 | 7:56:00   |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008  | 14/2/2008 06:52 | 15:52:00  |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008  | 14/2/2008 22:44 | 31:44:00  |
| sábado, 16 de fevereiro de 2008        | 16/2/2008 06:28 | 63:28:00  |
| segunda-feira, 18 de fevereiro de 2008 | 18/2/2008 21:56 | 126:56:00 |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008       | 24/2/2008 04:52 | 253:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 14/2/2008 15:00 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008 | 14/2/2008 22:05 | 7:05      |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 05:10 | 14:10:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 19:20 | 28:20:00  |
| sábado, 16 de fevereiro de 2008       | 16/2/2008 23:40 | 56:40:00  |
| terça-feira, 19 de fevereiro de 2008  | 19/2/2008 08:20 | 113:20:00 |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 01:40 | 226:40:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 12:20  | 453:20:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 14/2/2008 08:00 |           |
| Temperatura                           | 50°C            |           |
| a/c                                   | 0,35            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008 | 14/2/2008 11:58 | 3:58      |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008 | 14/2/2008 15:56 | 7:56:00   |
| quinta-feira, 14 de fevereiro de 2008 | 14/2/2008 23:52 | 15:52:00  |
| sexta-feira, 15 de fevereiro de 2008  | 15/2/2008 15:44 | 31:44:00  |
| sábado, 16 de fevereiro de 2008       | 16/2/2008 23:28 | 63:28:00  |
| terça-feira, 19 de fevereiro de 2008  | 19/2/2008 14:56 | 126:56:00 |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 21:52 | 253:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T1              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 21/2/2008 08:00 |           |
| Temperatura                           | 10°C            |           |
| a/c                                   | 0,25            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 17:28 | 9:28      |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 02:56 | 18:56:00  |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 21:52 | 37:52:00  |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 11:44 | 75:44:00  |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 15:28 | 151:28:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 22:56  | 302:56:00 |
| segunda-feira, 17 de março de 2008    | 17/3/2008 13:52 | 605:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T1              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 21/2/2008 08:30 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 17:52 | 9:22      |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 03:14 | 18:44:00  |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 21:58 | 37:28:00  |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 11:26 | 74:56:00  |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 14:22 | 149:52:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 20:14  | 299:44:00 |
| segunda-feira, 17 de março de 2008    | 17/3/2008 07:58 | 599:28:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                     | 1º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 21/2/2008 09:00 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 18:22 | 9:22      |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 03:44 | 18:44:00  |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 22:28 | 37:28:00  |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 11:56 | 74:56:00  |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 14:52 | 149:52:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 20:44  | 299:44:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                     | 2º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 21/2/2008 09:20 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
|                                       | Data            | Idade     |
|                                       | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 18:42 | 9:22      |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 04:04 | 18:44:00  |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 22:48 | 37:28:00  |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 12:16 | 74:56:00  |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 15:12 | 149:52:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 21:04  | 299:44:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                     | 3º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 21/2/2008 09:40 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
|                                       | Data            | Idade     |
|                                       | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 19:02 | 9:22      |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 04:24 | 18:44:00  |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 23:08 | 37:28:00  |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 12:36 | 74:56:00  |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 15:32 | 149:52:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 21:24  | 299:44:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                     | 1º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 21/2/2008 10:00 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
|                                       | Data            | Idade     |
|                                       | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 19:22 | 9:22      |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 04:44 | 18:44:00  |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 23:28 | 37:28:00  |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 12:56 | 74:56:00  |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 15:52 | 149:52:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 21:44  | 299:44:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                     | 2º              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 21/2/2008 10:20 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
|                                       | Data            | Idade     |
|                                       | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 21 de fevereiro de 2008 | 21/2/2008 19:42 | 9:22      |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 05:04 | 18:44:00  |
| sexta-feira, 22 de fevereiro de 2008  | 22/2/2008 23:48 | 37:28:00  |
| domingo, 24 de fevereiro de 2008      | 24/2/2008 13:16 | 74:56:00  |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 16:12 | 149:52:00 |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 22:04  | 299:44:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                      | T2              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 25/2/2008 08:00 |           |
| Temperatura                            | 10°C            |           |
| a/c                                    | 0,25            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 25 de fevereiro de 2008 | 25/2/2008 17:28 | 9:28      |
| terça-feira, 26 de fevereiro de 2008   | 26/2/2008 02:56 | 18:56:00  |
| terça-feira, 26 de fevereiro de 2008   | 26/2/2008 21:52 | 37:52:00  |
| quinta-feira, 28 de fevereiro de 2008  | 28/2/2008 11:44 | 75:44:00  |
| domingo, 2 de março de 2008            | 2/3/2008 15:28  | 151:28:00 |
| sábado, 8 de março de 2008             | 8/3/2008 22:56  | 302:56:00 |
| sexta-feira, 21 de março de 2008       | 21/3/2008 13:52 | 605:52:00 |

|  |                 |           |
|--|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                          | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                      | T2              |           |
| Dia e hora da mistura                  | 25/2/2008 08:30 |           |
| Temperatura                            | 30°C            |           |
| a/c                                    | 0,45            |           |
|  | Data            | Idade     |
|  | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 25 de fevereiro de 2008 | 25/2/2008 17:52 | 9:22      |
| terça-feira, 26 de fevereiro de 2008   | 26/2/2008 03:14 | 18:44:00  |
| terça-feira, 26 de fevereiro de 2008   | 26/2/2008 21:58 | 37:28:00  |
| quinta-feira, 28 de fevereiro de 2008  | 28/2/2008 11:26 | 74:56:00  |
| domingo, 2 de março de 2008            | 2/3/2008 14:22  | 149:52:00 |
| sábado, 8 de março de 2008             | 8/3/2008 20:14  | 299:44:00 |
| sexta-feira, 21 de março de 2008       | 21/3/2008 07:58 | 599:28:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 27/2/2008 08:00 |           |
| Temperatura                           | 10°C            |           |
| a/c                                   | 0,25            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 17:28 | 9:28      |
| quinta-feira, 28 de fevereiro de 2008 | 28/2/2008 02:56 | 18:56:00  |
| quinta-feira, 28 de fevereiro de 2008 | 28/2/2008 21:52 | 37:52:00  |
| sábado, 1 de março de 2008            | 1/3/2008 11:44  | 75:44:00  |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 15:28  | 151:28:00 |
| segunda-feira, 10 de março de 2008    | 10/3/2008 22:56 | 302:56:00 |
| domingo, 23 de março de 2008          | 23/3/2008 13:52 | 605:52:00 |

|                                       |                 |           |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                         | 10 x 10 x 35    |           |
| Nº da concretagem                     | T3              |           |
| Dia e hora da mistura                 | 27/2/2008 08:30 |           |
| Temperatura                           | 30°C            |           |
| a/c                                   | 0,45            |           |
| Data                                  | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 27 de fevereiro de 2008 | 27/2/2008 17:52 | 9:22      |
| quinta-feira, 28 de fevereiro de 2008 | 28/2/2008 03:14 | 18:44:00  |
| quinta-feira, 28 de fevereiro de 2008 | 28/2/2008 21:58 | 37:28:00  |
| sábado, 1 de março de 2008            | 1/3/2008 11:26  | 74:56:00  |
| terça-feira, 4 de março de 2008       | 4/3/2008 14:22  | 149:52:00 |
| segunda-feira, 10 de março de 2008    | 10/3/2008 20:14 | 299:44:00 |
| domingo, 23 de março de 2008          | 23/3/2008 07:58 | 599:28:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                  | 1º              |           |
| Dia e hora da mistura              | 4/3/2008 08:00  |           |
| Temperatura                        | 10°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
| Data                               | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 4 de março de 2008    | 4/3/2008 17:28  | 9:28      |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 02:56  | 18:56:00  |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 21:52  | 37:52:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008    | 7/3/2008 11:44  | 75:44:00  |
| segunda-feira, 10 de março de 2008 | 10/3/2008 15:28 | 151:28:00 |
| domingo, 16 de março de 2008       | 16/3/2008 22:56 | 302:56:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                  | 2º              |           |
| Dia e hora da mistura              | 4/3/2008 08:30  |           |
| Temperatura                        | 10°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
|                                    | Data            | Idade     |
|                                    | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 4 de março de 2008    | 4/3/2008 17:58  | 9:28      |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 03:26  | 18:56:00  |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 22:22  | 37:52:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008    | 7/3/2008 12:14  | 75:44:00  |
| segunda-feira, 10 de março de 2008 | 10/3/2008 15:58 | 151:28:00 |
| domingo, 16 de março de 2008       | 16/3/2008 23:26 | 302:56:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                  | 3º              |           |
| Dia e hora da mistura              | 4/3/2008 08:55  |           |
| Temperatura                        | 10°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
|                                    | Data            | Idade     |
|                                    | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 4 de março de 2008    | 4/3/2008 18:23  | 9:28      |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 03:51  | 18:56:00  |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 22:47  | 37:52:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008    | 7/3/2008 12:39  | 75:44:00  |
| segunda-feira, 10 de março de 2008 | 10/3/2008 16:23 | 151:28:00 |
| domingo, 16 de março de 2008       | 16/3/2008 23:51 | 302:56:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                  | 1º              |           |
| Dia e hora da mistura              | 4/3/2008 09:25  |           |
| Temperatura                        | 10°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
|                                    | Data            | Idade     |
|                                    | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 4 de março de 2008    | 4/3/2008 18:53  | 9:28      |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 04:21  | 18:56:00  |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 23:17  | 37:52:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008    | 7/3/2008 13:09  | 75:44:00  |
| segunda-feira, 10 de março de 2008 | 10/3/2008 16:53 | 151:28:00 |
| segunda-feira, 17 de março de 2008 | 17/3/2008 00:21 | 302:56:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                  | 2º              |           |
| Dia e hora da mistura              | 4/3/2008 09:50  |           |
| Temperatura                        | 10°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
|                                    | Data            | Idade     |
|                                    | Hora da ruptura |           |
| terça-feira, 4 de março de 2008    | 4/3/2008 19:18  | 9:28      |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 04:46  | 18:56:00  |
| quarta-feira, 5 de março de 2008   | 5/3/2008 23:42  | 37:52:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008    | 7/3/2008 13:34  | 75:44:00  |
| segunda-feira, 10 de março de 2008 | 10/3/2008 17:18 | 151:28:00 |
| segunda-feira, 17 de março de 2008 | 17/3/2008 00:46 | 302:56:00 |

|                                  |                 |           |
|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                    | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura            | 6/3/2008 08:00  |           |
| Temperatura                      | 30°C            |           |
| a/c                              | 0,35            |           |
|                                  | Data            | Idade     |
|                                  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 15:05  | 7:05      |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 22:10  | 14:10:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008  | 7/3/2008 12:20  | 28:20:00  |
| sábado, 8 de março de 2008       | 8/3/2008 16:40  | 56:40:00  |
| terça-feira, 11 de março de 2008 | 11/3/2008 01:20 | 113:20:00 |
| sábado, 15 de março de 2008      | 15/3/2008 18:40 | 226:40:00 |

|                                  |                 |           |
|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                    | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura            | 6/3/2008 08:30  |           |
| Temperatura                      | 30°C            |           |
| a/c                              | 0,35            |           |
|                                  | Data            | Idade     |
|                                  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 15:35  | 7:05      |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 22:40  | 14:10:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008  | 7/3/2008 12:50  | 28:20:00  |
| sábado, 8 de março de 2008       | 8/3/2008 17:10  | 56:40:00  |
| terça-feira, 11 de março de 2008 | 11/3/2008 01:50 | 113:20:00 |
| sábado, 15 de março de 2008      | 15/3/2008 19:10 | 226:40:00 |

|                                  |                 |           |
|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                    | 4 x 4 x 16      |           |
| Nº da concretagem                | 3ª              |           |
| Dia e hora da mistura            | 6/3/2008 08:50  |           |
| Temperatura                      | 30°C            |           |
| a/c                              | 0,35            |           |
|                                  | Data            | Idade     |
|                                  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 15:55  | 7:05      |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 23:00  | 14:10:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008  | 7/3/2008 13:10  | 28:20:00  |
| sábado, 8 de março de 2008       | 8/3/2008 17:30  | 56:40:00  |
| terça-feira, 11 de março de 2008 | 11/3/2008 02:10 | 113:20:00 |
| sábado, 15 de março de 2008      | 15/3/2008 19:30 | 226:40:00 |

|                                  |                 |           |
|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                    | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura            | 6/3/2008 09:15  |           |
| Temperatura                      | 30°C            |           |
| a/c                              | 0,35            |           |
|                                  | Data            | Idade     |
|                                  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 16:20  | 7:05      |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 23:25  | 14:10:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008  | 7/3/2008 13:35  | 28:20:00  |
| sábado, 8 de março de 2008       | 8/3/2008 17:55  | 56:40:00  |
| terça-feira, 11 de março de 2008 | 11/3/2008 02:35 | 113:20:00 |
| sábado, 15 de março de 2008      | 15/3/2008 19:55 | 226:40:00 |

|                                  |                 |           |
|----------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                    | 5 x 5 x 5       |           |
| Nº da concretagem                | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura            | 6/3/2008 09:50  |           |
| Temperatura                      | 30°C            |           |
| a/c                              | 0,35            |           |
|                                  | Data            | Idade     |
|                                  | Hora da ruptura |           |
| quinta-feira, 6 de março de 2008 | 6/3/2008 16:55  | 7:05      |
| sexta-feira, 7 de março de 2008  | 7/3/2008 00:00  | 14:10:00  |
| sexta-feira, 7 de março de 2008  | 7/3/2008 14:10  | 28:20:00  |
| sábado, 8 de março de 2008       | 8/3/2008 18:30  | 56:40:00  |
| terça-feira, 11 de março de 2008 | 11/3/2008 03:10 | 113:20:00 |
| sábado, 15 de março de 2008      | 15/3/2008 20:30 | 226:40:00 |

| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                  | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 31/3/2008 08:15 |           |
| Temperatura                        | 50°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
| Data                               | Hora da ruptura | Idade     |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 15:15 | 7:00      |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 22:15 | 14:00:00  |
| terça-feira, 1 de abril de 2008    | 1/4/2008 12:15  | 28:00:00  |
| quarta-feira, 2 de abril de 2008   | 2/4/2008 16:15  | 56:00:00  |
| sábado, 5 de abril de 2008         | 5/4/2008 00:15  | 112:00:00 |
| quarta-feira, 9 de abril de 2008   | 9/4/2008 16:15  | 224:00:00 |

| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                  | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 31/3/2008 08:25 |           |
| Temperatura                        | 50°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
| Data                               | Hora da ruptura | Idade     |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 15:25 | 7:00      |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 22:25 | 14:00:00  |
| terça-feira, 1 de abril de 2008    | 1/4/2008 12:25  | 28:00:00  |
| quarta-feira, 2 de abril de 2008   | 2/4/2008 16:25  | 56:00:00  |
| sábado, 5 de abril de 2008         | 5/4/2008 00:25  | 112:00:00 |
| quarta-feira, 9 de abril de 2008   | 9/4/2008 16:25  | 224:00:00 |

| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                  | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 31/3/2008 10:30 |           |
| Temperatura                        | 50°C            |           |
| a/c                                | 0,35            |           |
| Data                               | Hora da ruptura | Idade     |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 22:30 | 12:00     |
| terça-feira, 1 de abril de 2008    | 1/4/2008 10:30  | 24:00:00  |
| quarta-feira, 2 de abril de 2008   | 2/4/2008 10:30  | 48:00:00  |
| sexta-feira, 4 de abril de 2008    | 4/4/2008 10:30  | 96:00:00  |
| terça-feira, 8 de abril de 2008    | 8/4/2008 10:30  | 192:00:00 |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008  | 16/4/2008 10:30 | 384:00:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
| Nº da concretagem                  | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 31/3/2008 10:40 |           |
| Temperatura                        | 50°C            |           |
| a/c                                | 0,35            |           |
|                                    | Data            | Idade     |
|                                    | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 22:40 | 12:00     |
| terça-feira, 1 de abril de 2008    | 1/4/2008 10:40  | 24:00:00  |
| quarta-feira, 2 de abril de 2008   | 2/4/2008 10:40  | 48:00:00  |
| sexta-feira, 4 de abril de 2008    | 4/4/2008 10:40  | 96:00:00  |
| terça-feira, 8 de abril de 2008    | 8/4/2008 10:40  | 192:00:00 |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008  | 16/4/2008 10:40 | 384:00:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
| Nº da concretagem                  | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 31/3/2008 10:50 |           |
| Temperatura                        | 50°C            |           |
| a/c                                | 0,45            |           |
|                                    | Data            | Idade     |
|                                    | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 22:50 | 12:00     |
| terça-feira, 1 de abril de 2008    | 1/4/2008 10:50  | 24:00:00  |
| quarta-feira, 2 de abril de 2008   | 2/4/2008 10:50  | 48:00:00  |
| sexta-feira, 4 de abril de 2008    | 4/4/2008 10:50  | 96:00:00  |
| terça-feira, 8 de abril de 2008    | 8/4/2008 10:50  | 192:00:00 |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008  | 16/4/2008 10:50 | 384:00:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
| Nº da concretagem                  | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 31/3/2008 11:00 |           |
| Temperatura                        | 50°C            |           |
| a/c                                | 0,45            |           |
|                                    | Data            | Idade     |
|                                    | Hora da ruptura |           |
| segunda-feira, 31 de março de 2008 | 31/3/2008 23:00 | 12:00     |
| terça-feira, 1 de abril de 2008    | 1/4/2008 11:00  | 24:00:00  |
| quarta-feira, 2 de abril de 2008   | 2/4/2008 11:00  | 48:00:00  |
| sexta-feira, 4 de abril de 2008    | 4/4/2008 11:00  | 96:00:00  |
| terça-feira, 8 de abril de 2008    | 8/4/2008 11:00  | 192:00:00 |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008  | 16/4/2008 11:00 | 384:00:00 |

| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                 | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 7/4/2008 08:20  |           |
| Temperatura                       | 30°C            |           |
| a/c                               | 0,25            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| segunda-feira, 7 de abril de 2008 | 7/4/2008 20:20  | 12:00     |
| terça-feira, 8 de abril de 2008   | 8/4/2008 08:20  | 24:00:00  |
| quarta-feira, 9 de abril de 2008  | 9/4/2008 08:20  | 48:00:00  |
| sexta-feira, 11 de abril de 2008  | 11/4/2008 08:20 | 96:00:00  |
| terça-feira, 15 de abril de 2008  | 15/4/2008 08:20 | 192:00:00 |
| quarta-feira, 23 de abril de 2008 | 23/4/2008 08:20 | 384:00:00 |

| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                 | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 7/4/2008 08:10  |           |
| Temperatura                       | 30°C            |           |
| a/c                               | 0,25            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| segunda-feira, 7 de abril de 2008 | 7/4/2008 20:10  | 12:00     |
| terça-feira, 8 de abril de 2008   | 8/4/2008 08:10  | 24:00:00  |
| quarta-feira, 9 de abril de 2008  | 9/4/2008 08:10  | 48:00:00  |
| sexta-feira, 11 de abril de 2008  | 11/4/2008 08:10 | 96:00:00  |
| terça-feira, 15 de abril de 2008  | 15/4/2008 08:10 | 192:00:00 |
| quarta-feira, 23 de abril de 2008 | 23/4/2008 08:10 | 384:00:00 |

| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                  | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 14/4/2008 15:00 |           |
| Temperatura                        | 10°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
| Data                               | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 15 de abril de 2008   | 15/4/2008 13:00 | 22:00     |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008  | 16/4/2008 11:00 | 44:00:00  |
| sexta-feira, 18 de abril de 2008   | 18/4/2008 07:00 | 88:00:00  |
| segunda-feira, 21 de abril de 2008 | 21/4/2008 23:00 | 176:00:00 |
| terça-feira, 29 de abril de 2008   | 29/4/2008 07:00 | 352:00:00 |
| terça-feira, 13 de maio de 2008    | 13/5/2008 23:00 | 704:00:00 |

| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                  | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 14/4/2008 15:10 |           |
| Temperatura                        | 10°C            |           |
| a/c                                | 0,25            |           |
| Data                               | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 15 de abril de 2008   | 15/4/2008 13:10 | 22:00     |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008  | 16/4/2008 11:10 | 44:00:00  |
| sexta-feira, 18 de abril de 2008   | 18/4/2008 07:10 | 88:00:00  |
| segunda-feira, 21 de abril de 2008 | 21/4/2008 23:10 | 176:00:00 |
| terça-feira, 29 de abril de 2008   | 29/4/2008 07:10 | 352:00:00 |
| terça-feira, 13 de maio de 2008    | 13/5/2008 23:10 | 704:00:00 |

| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                 | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 14/4/2008 07:00 |           |
| Temperatura                       | 10°C            |           |
| a/c                               | 0,35            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 15 de abril de 2008  | 15/4/2008 09:00 | 26:00     |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008 | 16/4/2008 11:00 | 52:00:00  |
| sexta-feira, 18 de abril de 2008  | 18/4/2008 15:00 | 104:00:00 |
| terça-feira, 22 de abril de 2008  | 22/4/2008 23:00 | 208:00:00 |
| quinta-feira-1 de maio de 2008    | 1/5/2008 15:00  | 416:00:00 |
| domingo, 18 de maio de 2008       | 18/5/2008 23:00 | 832:00:00 |

| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                 | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 14/4/2008 07:10 |           |
| Temperatura                       | 10°C            |           |
| a/c                               | 0,35            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 15 de abril de 2008  | 15/4/2008 09:10 | 26:00     |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008 | 16/4/2008 11:10 | 52:00:00  |
| sexta-feira, 18 de abril de 2008  | 18/4/2008 15:10 | 104:00:00 |
| terça-feira, 22 de abril de 2008  | 22/4/2008 23:10 | 208:00:00 |
| quinta-feira-1 de maio de 2008    | 1/5/2008 15:10  | 416:00:00 |
| domingo, 18 de maio de 2008       | 18/5/2008 23:10 | 832:00:00 |

| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                 | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 14/4/2008 07:20 |           |
| Temperatura                       | 10°C            |           |
| a/c                               | 0,45            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 15 de abril de 2008  | 15/4/2008 14:20 | 31:00     |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008 | 16/4/2008 21:20 | 62:00:00  |
| sábado, 19 de abril de 2008       | 19/4/2008 11:20 | 124:00:00 |
| quinta-feira, 24 de abril de 2008 | 24/4/2006 15:20 | 248:00:00 |
| domingo, 4 de maio de 2008        | 4/5/2008 23:20  | 496:00:00 |
| domingo, 25 de maio de 2008       | 25/5/2008 15:20 | 992:00:00 |

| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                 | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 14/4/2008 07:30 |           |
| Temperatura                       | 10°C            |           |
| a/c                               | 0,45            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| terça-feira, 15 de abril de 2008  | 15/4/2008 14:30 | 31:00     |
| quarta-feira, 16 de abril de 2008 | 16/4/2008 21:30 | 62:00:00  |
| sábado, 19 de abril de 2008       | 19/4/2008 11:30 | 124:00:00 |
| quinta-feira, 24 de abril de 2008 | 24/4/2006 15:30 | 248:00:00 |
| domingo, 4 de maio de 2008        | 4/5/2008 23:30  | 496:00:00 |
| domingo, 25 de maio de 2008       | 25/5/2008 15:30 | 992:00:00 |

| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Nº da concretagem                 | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 23/4/2008 07:30 |           |
| Temperatura                       | 30°C            |           |
| a/c                               | 0,35            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 23 de abril de 2008 | 23/4/2008 21:30 | 14:00     |
| quinta-feira, 24 de abril de 2008 | 24/4/2008 11:30 | 28:00:00  |
| sexta-feira, 25 de abril de 2008  | 25/4/2008 15:30 | 56:00:00  |
| domingo, 27 de abril de 2008      | 27/4/2008 23:30 | 112:00:00 |
| sexta-feira, 2 de maio de 2008    | 2/5/2008 15:30  | 224:00:00 |
| domingo, 11 de maio de 2008       | 11/5/2008 23:30 | 448:00:00 |

|                                   |                 |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
| Nº da concretagem                 | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 23/4/2008 07:40 |           |
| Temperatura                       | 30°C            |           |
| a/c                               | 0,35            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 23 de abril de 2008 | 23/4/2008 21:40 | 14:00     |
| quinta-feira, 24 de abril de 2008 | 24/4/2008 11:40 | 28:00:00  |
| sexta-feira, 25 de abril de 2008  | 25/4/2008 15:40 | 56:00:00  |
| domingo, 27 de abril de 2008      | 27/4/2008 23:40 | 112:00:00 |
| sexta-feira, 2 de maio de 2008    | 2/5/2008 15:40  | 224:00:00 |
| domingo, 11 de maio de 2008       | 11/5/2008 23:40 | 448:00:00 |

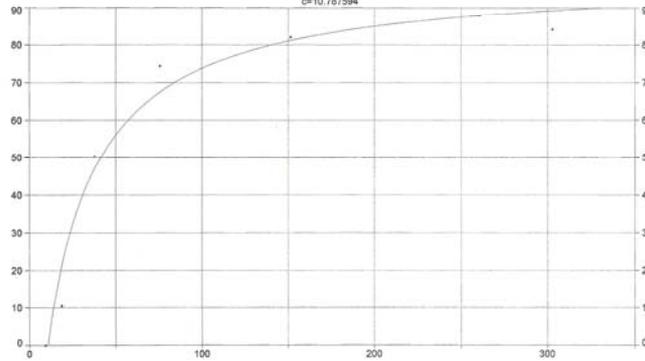
|                                   |                 |           |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                     | Pasta           |           |
| Nº da concretagem                 | 1ª              |           |
| Dia e hora da mistura             | 23/4/2008 07:50 |           |
| Temperatura                       | 30°C            |           |
| a/c                               | 0,45            |           |
| Data                              | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 23 de abril de 2008 | 23/4/2008 21:50 | 14:00     |
| quinta-feira, 24 de abril de 2008 | 24/4/2008 11:50 | 28:00:00  |
| sexta-feira, 25 de abril de 2008  | 25/4/2008 15:50 | 56:00:00  |
| domingo, 27 de abril de 2008      | 27/4/2008 23:50 | 112:00:00 |
| sexta-feira, 2 de maio de 2008    | 2/5/2008 15:50  | 224:00:00 |
| domingo, 11 de maio de 2008       | 11/5/2008 23:50 | 448:00:00 |

|                                    |                 |           |
|------------------------------------|-----------------|-----------|
| Tamanho do CP                      | Pasta           |           |
| Nº da concretagem                  | 2ª              |           |
| Dia e hora da mistura              | 23/4/2008 08:00 |           |
| Temperatura                        | 30°C            |           |
| a/c                                | 0,45            |           |
| Data                               | Hora da ruptura | Idade     |
| quarta-feira, 23 de abril de 2008  | 23/4/2008 22:00 | 14:00     |
| quinta-feira, 24 de abril de 2008  | 24/4/2008 12:00 | 28:00:00  |
| sexta-feira, 25 de abril de 2008   | 25/4/2008 16:00 | 56:00:00  |
| segunda-feira, 28 de abril de 2008 | 28/4/2008 00:00 | 112:00:00 |
| sexta-feira, 2 de maio de 2008     | 2/5/2008 16:00  | 224:00:00 |
| segunda-feira, 12 de maio de 2008  | 12/5/2008 00:00 | 448:00:00 |

ANEXO B - Gráficos gerados pelo software para obtenção de  $f_{c_{\infty}}$ ,  $k_t$ ,  $t_0$  e  $R^2$

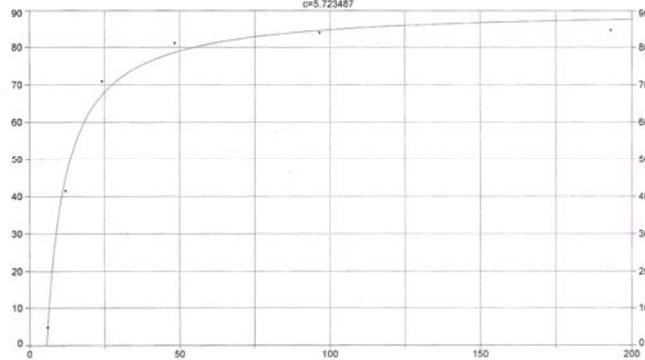
0,25 – 10 °C – 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99754732$  DF Adj  $r^2=0.91886829$  FitStdErr=8.6164129 Fstat=44.721138  
 $a=98.327687$   $b=0.033733703$   
 $c=10.787594$



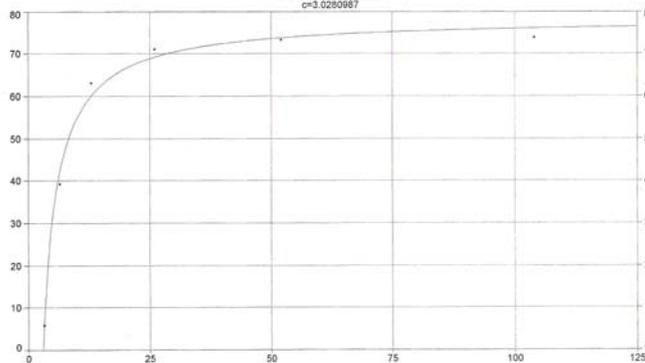
0,25 – 30 °C – 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99173141$  DF Adj  $r^2=0.97932852$  FitStdErr=3.7572957 Fstat=179.50933  
 $a=90.395478$   $b=0.15764885$   
 $c=5.723487$



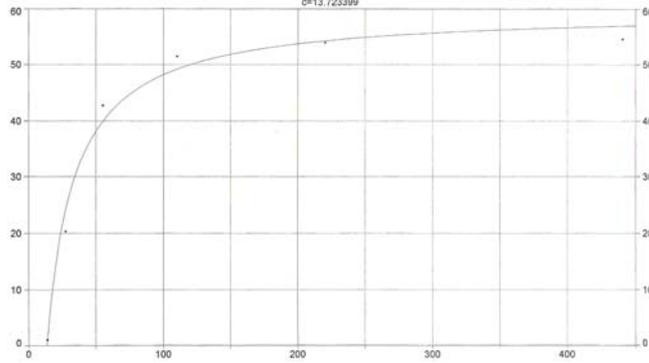
0,25 – 50 °C – 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99311277$  DF Adj  $r^2=0.98278192$  FitStdErr=2.9046224 Fstat=216.29437  
 $a=78.246244$   $b=0.33208255$   
 $c=3.0280987$



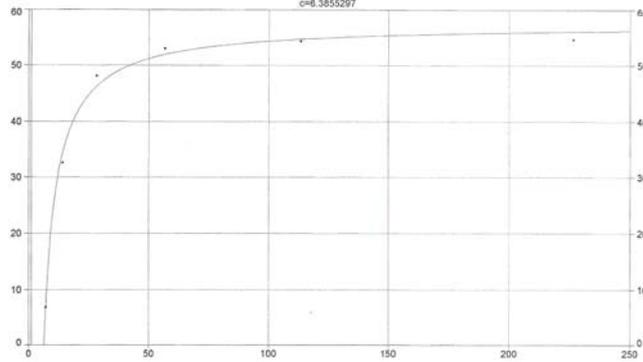
0,35 – 10 °C – 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.98609194$  DF Adj  $r^2=0.98522984$  FfitStdErr=3.3430709 Fstat=106.35111  
 $a=59.636563$   $b=0.048699766$   
 $c=13.723399$



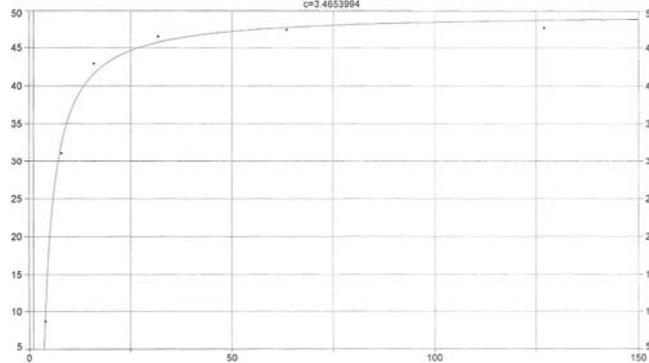
0,35 – 30 °C – 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9948783$  DF Adj  $r^2=0.98719574$  FfitStdErr=1.7503125 Fstat=291.37137  
 $a=57.407232$   $b=0.18895726$   
 $c=6.3855297$



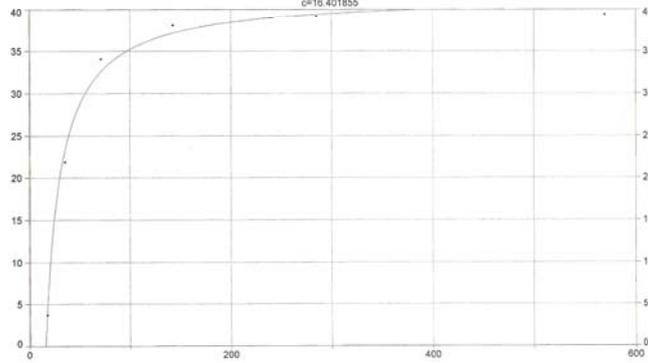
0,35 – 50 °C – 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99602395$  DF Adj  $r^2=0.99005986$  FfitStdErr=1.251824 Fstat=375.75843  
 $a=49.630773$   $b=0.414037$   
 $c=3.4653994$



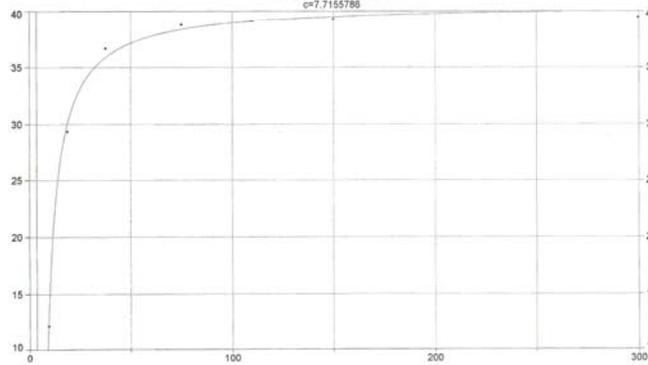
0,45 - 10 °C - 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0,99379646$  DF Adj  $r^2=0,98449116$  F1StDErr=1,4461041 F1stat=240,29759  
 $a=41,866212$   $b=0,095300597$   
 $c=16,407855$



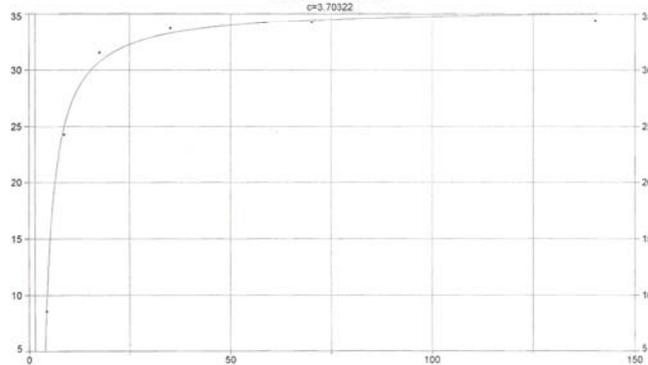
0,45 - 30 °C - 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0,99730535$  DF Adj  $r^2=0,98263338$  F1StDErr=0,72148324 F1stat=555,15866  
 $a=40,61832$   $b=0,254511559$   
 $c=7,7155786$



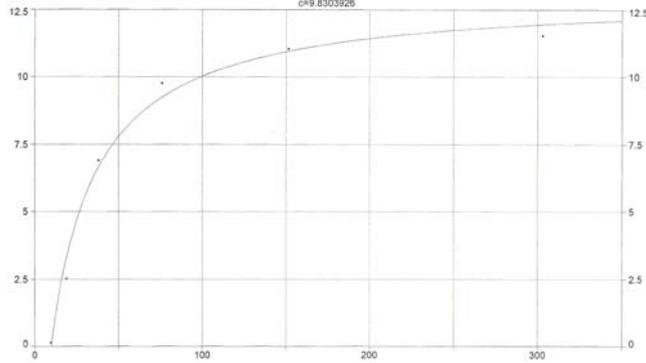
0,45 - 50 °C - 50x50x50 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0,9968403$  DF Adj  $r^2=0,99210074$  F1StDErr=0,73927366 F1stat=473,22802  
 $a=35,558253$   $b=0,48026709$   
 $c=3,70322$



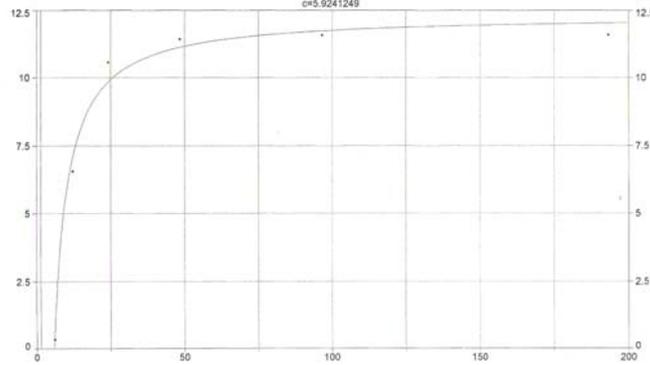
0,25 - 10 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.98922759$  DF Adj  $r^2=0.97308897$  FstndErr=0.83263742 Fstat=137.74459  
 $a=13.02332$   $b=0.037120609$   
 $c=9.8303828$



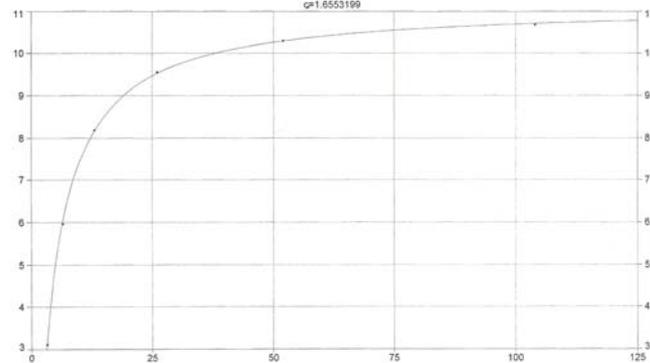
0,25 - 30 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.98932202$  DF Adj  $r^2=0.97330505$  FstndErr=0.80193391 Fstat=138.976  
 $a=12.302425$   $b=0.22010269$   
 $c=5.9241249$



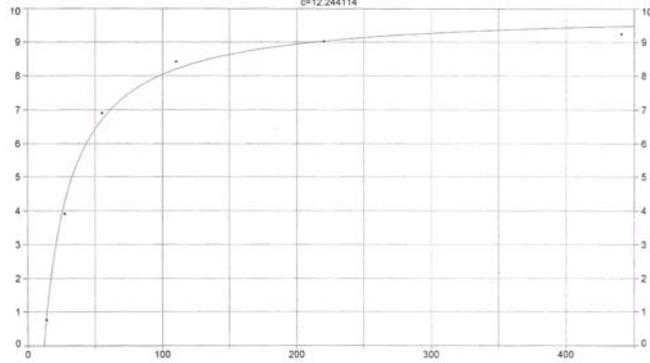
0,25 - 50 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99989658$  DF Adj  $r^2=0.99974146$  FstndErr=0.038449533 Fstat=14503.155  
 $a=11.13788$   $b=0.24192898$   
 $c=1.6553199$



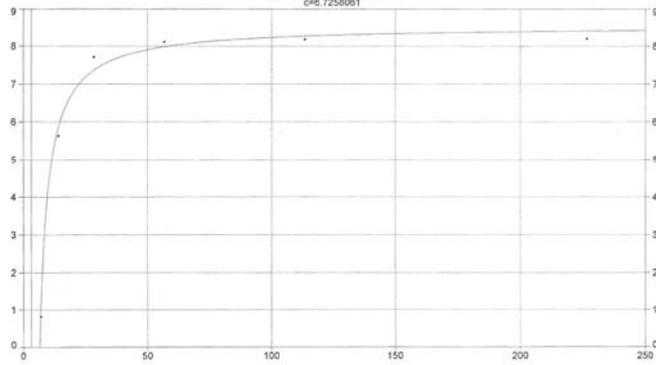
0,35 - 10 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99565347$  DF Adj  $r^2=0.98913367$  F(9)StErr=0.28819615 Fstat=343.60258  
 $a=9.9265073$   $b=0.045499032$   
 $c=12.244114$



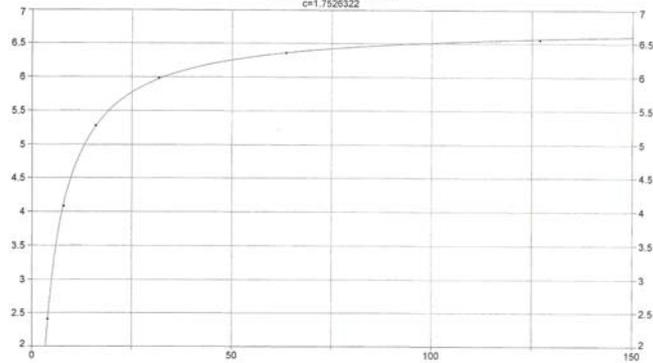
0,35 - 30 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99461227$  DF Adj  $r^2=0.98652068$  F(9)StErr=0.27729632 Fstat=276.91048  
 $a=8.5319654$   $b=0.29209656$   
 $c=6.7258061$



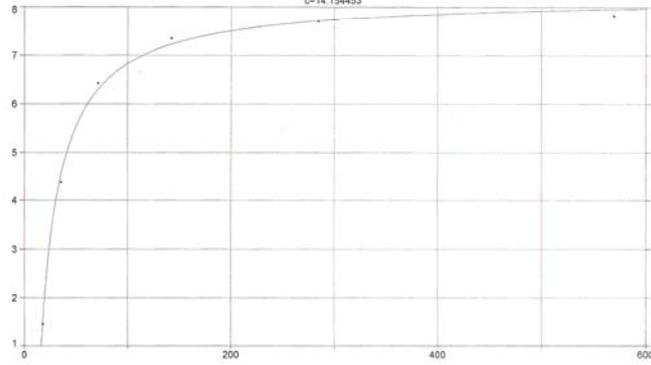
0,35 - 50 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99994067$  DF Adj  $r^2=0.99685168$  F(9)StErr=0.015907882 Fstat=25282.372  
 $a=6.7767641$   $b=0.24795043$   
 $c=1.7526322$



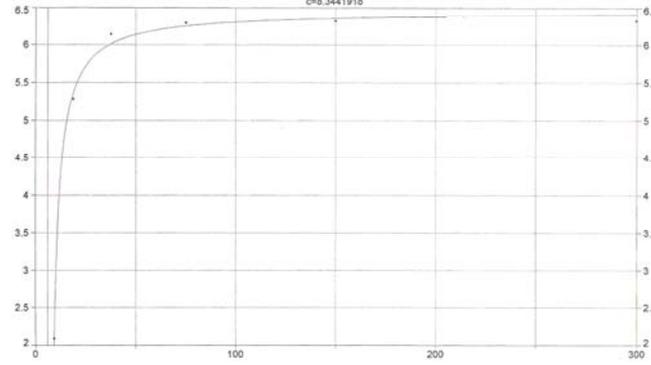
0,45 - 10 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99757114$  DF Adj  $r^2=0.99392785$  FStatErr=0.1599 Fstat=616.07342  
 $a=8.2112957$   $b=0.037421188$   
 $c=14.154453$



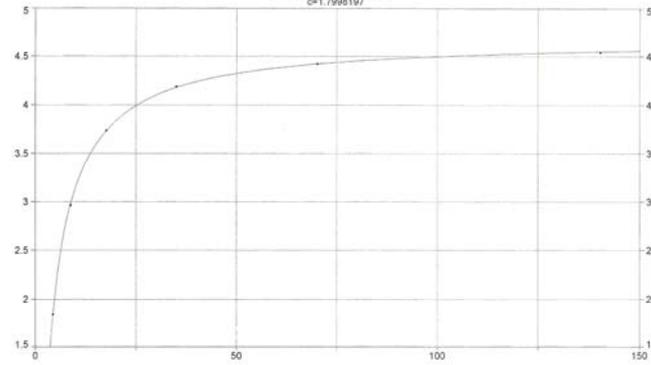
0,45 - 30 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9977338$  DF Adj  $r^2=0.99433449$  FStatErr=0.1029331 Fstat=660.39988  
 $a=6.4537968$   $b=0.46662748$   
 $c=8.3441918$



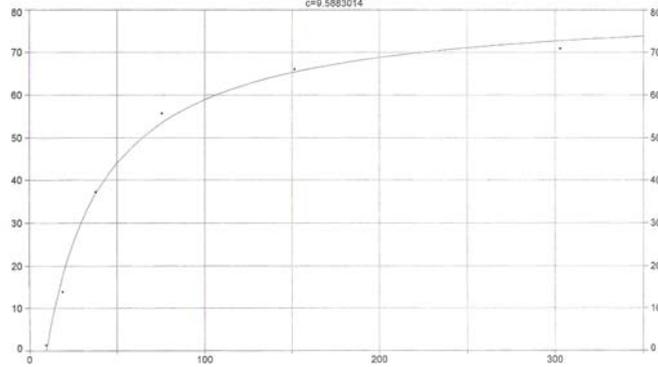
0,45 - 50 °C - 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9999538$  DF Adj  $r^2=0.9998845$  FStatErr=0.0091386769 Fstat=32464.783  
 $a=4.879768$   $b=0.25049937$   
 $c=1.7998197$



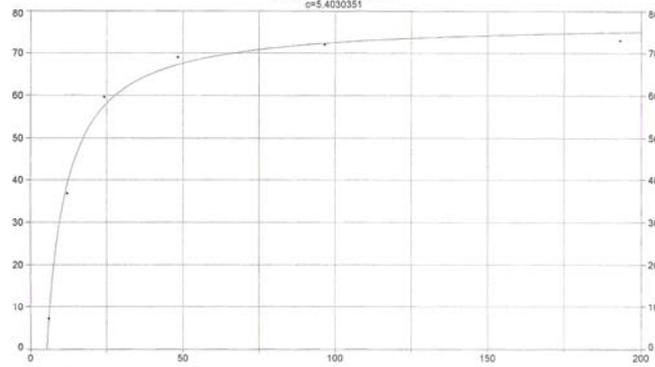
0,25 – 10 °C – metade dos 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99433626$  DF Adj  $r^2=0.98584096$  FitStoErr=2.7683567 Fstat=283.34287  
 a=81.178445 b=0.029259918  
 c=9.5883014



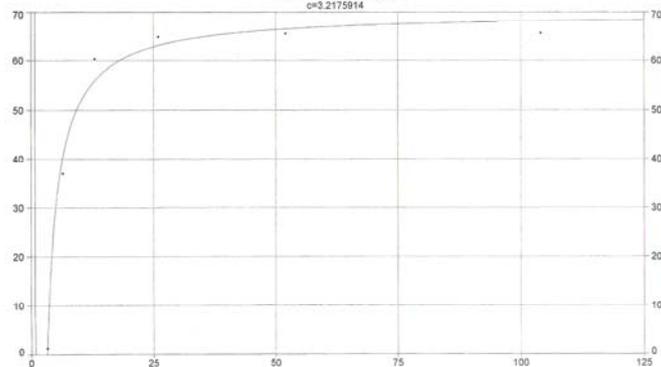
0,25 – 30 °C – metade dos 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99489197$  DF Adj  $r^2=0.98722992$  FitStoErr=2.4126106 Fstat=292.15511  
 a=77.483481 b=0.15325147  
 c=5.4030351



0,25 – 50 °C – metade dos 40x40x160 mm

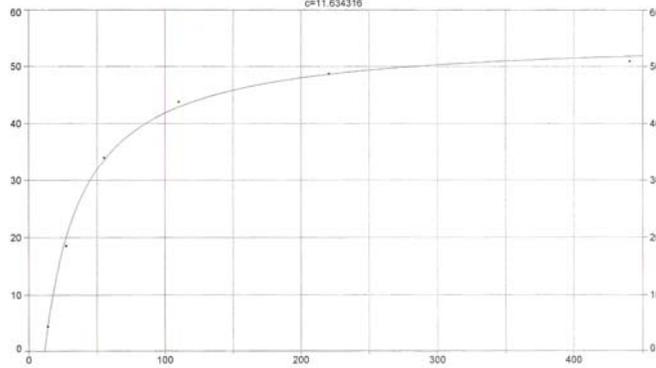
D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.98802459$  DF Adj  $r^2=0.97006147$  FitStoErr=3.0564828 Fstat=123.75663  
 a=69.797454 b=0.41166175  
 c=3.2175914



0,35 – 10 °C – metade dos 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

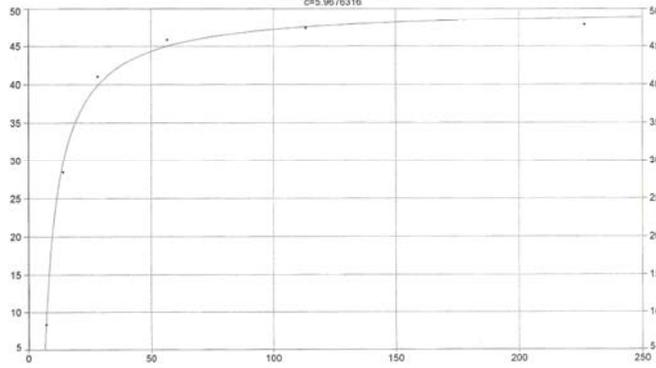
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99769899$  DF Adj  $r^2=0.99424747$  FitStdErr=1.1485035 Fstat=650.38693  
 $a=55.226279$   $b=0.03542798$   
 $c=11.634316$



0,35 – 30 °C – metade dos 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

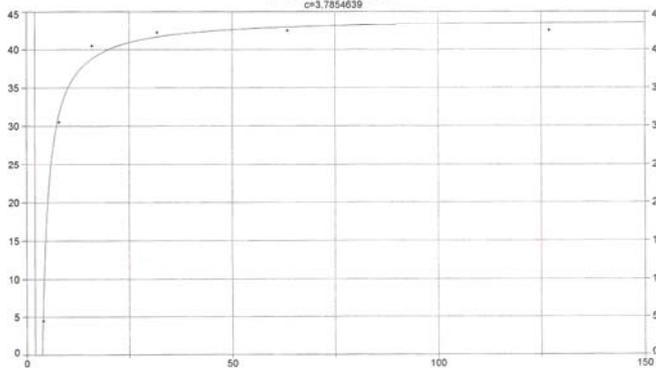
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99652916$  DF Adj  $r^2=0.99132289$  FitStdErr=1.1838245 Fstat=430.87147  
 $a=50.061679$   $b=0.17578609$   
 $c=5.9678316$



0,35 – 50 °C – metade dos 40x40x160 mm

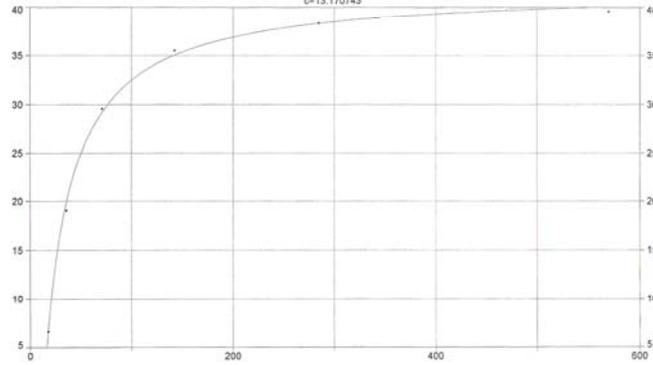
D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99520408$  DF Adj  $r^2=0.98801019$  FitStdErr=1.3488328 Fstat=311.26558  
 $a=44.111791$   $b=0.60350481$   
 $c=3.7854639$



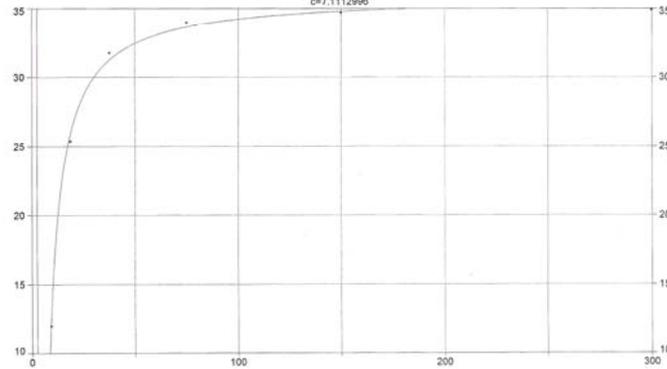
0,45 – 10 °C – metade dos 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0,99874943$  DF Adj  $r^2=0,99687357$  F1StdErr=0,59015409 Fstat=1197,9523  
 $a=41,884879$   $b=0,039821499$   
 $c=13,170743$



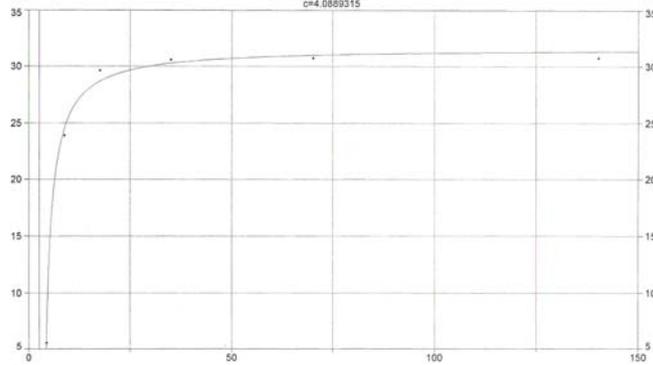
0,45 – 30 °C – metade dos 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0,99791948$  DF Adj  $r^2=0,9947987$  F1StdErr=0,52903289 Fstat=719,47292  
 $a=35,913332$   $b=0,21977532$   
 $c=7,1112996$



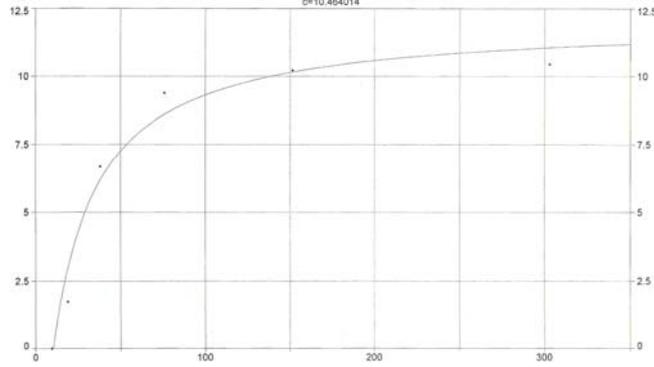
0,45 – 50 °C – metade dos 40x40x160 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0,99672353$  DF Adj  $r^2=0,99180852$  F1StdErr=0,73770852 Fstat=456,30975  
 $a=31,828664$   $b=0,72623442$   
 $c=4,0889315$



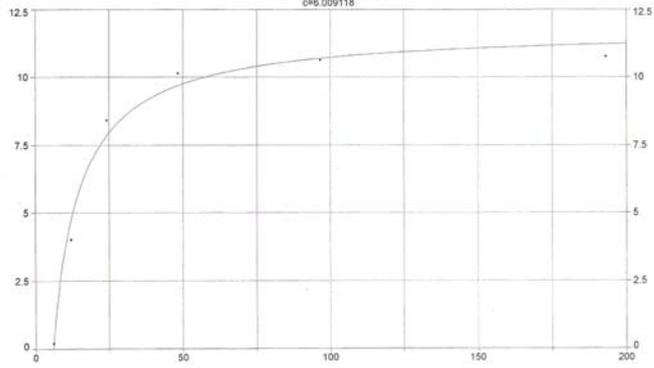
0,25 - 10 °C - 100x100x350 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9705555$  DF Adj  $r^2=0.92638876$  F<sub>its</sub>SErr=1.0047966 Fstat=49.443304  
 $a=12.031101$   $b=0.038496749$   
 $c=10.484014$



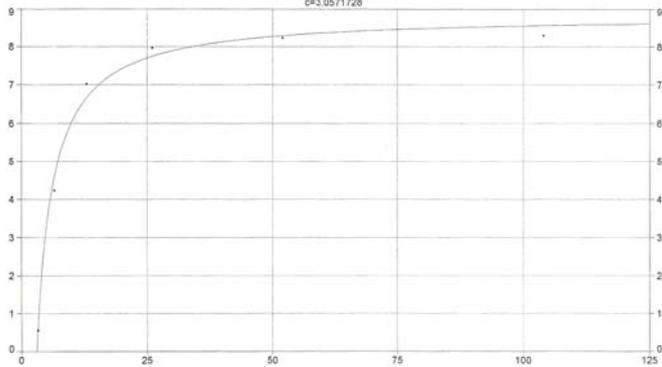
0,25 - 30 °C - 100x100x350 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.98611859$  DF Adj  $r^2=0.96329648$  F<sub>its</sub>SErr=0.85797920 Fstat=106.55819  
 $a=11.750624$   $b=0.11124488$   
 $c=8.009118$



0,25 - 50 °C - 100x100x350 mm

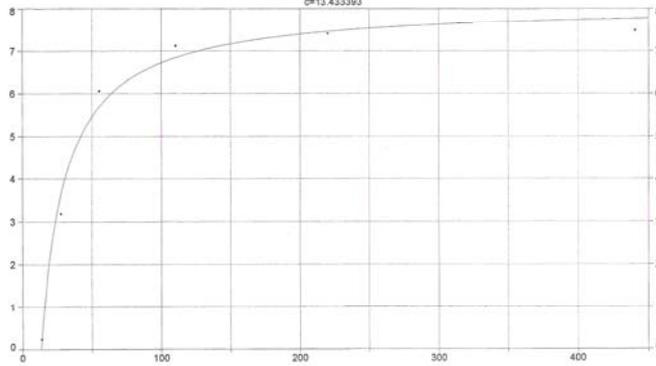
D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99243675$  DF Adj  $r^2=0.98109187$  F<sub>its</sub>SErr=0.34758542 Fstat=196.82735  
 $a=8.8306544$   $b=0.31116599$   
 $c=3.0571728$



0,35 – 10 °C – 100x100x350 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

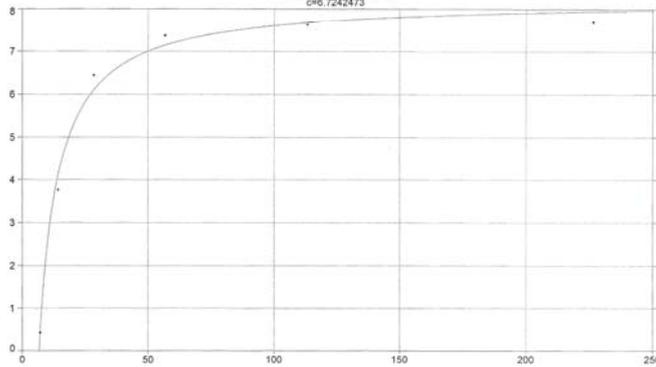
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9889277$  DF Adj  $r^2=0.97231925$  FfitStDErr=0.39924968 Fstat=133.97322  
 $a=8.0941813$   $b=0.050791796$   
 $c=13.433393$



0,35 – 30 °C – 100x100x350 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

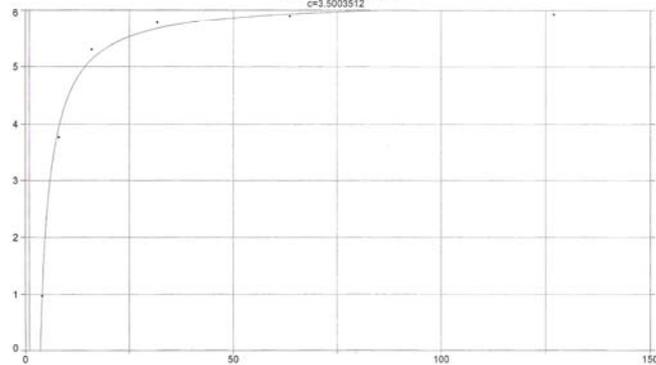
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99167684$  DF Adj  $r^2=0.97919211$  FfitStDErr=0.34291577 Fstat=178.72008  
 $a=8.2166362$   $b=0.13368639$   
 $c=6.7242473$



0,35 – 50 °C – 100x100x350 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

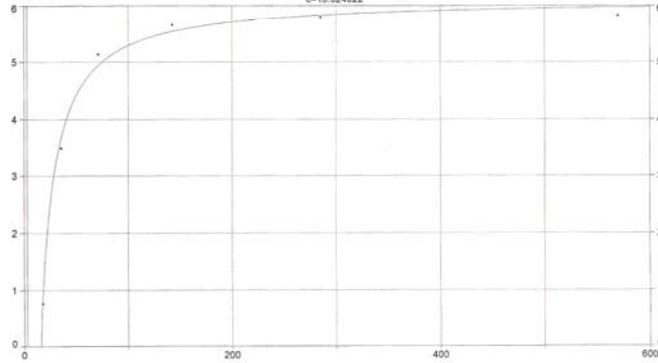
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99571085$  DF Adj  $r^2=0.98927713$  FfitStDErr=0.16560841 Fstat=348.21978  
 $a=6.1898578$   $b=0.38965056$   
 $c=3.5003512$



0,45 – 10 °C – 100x100x350 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

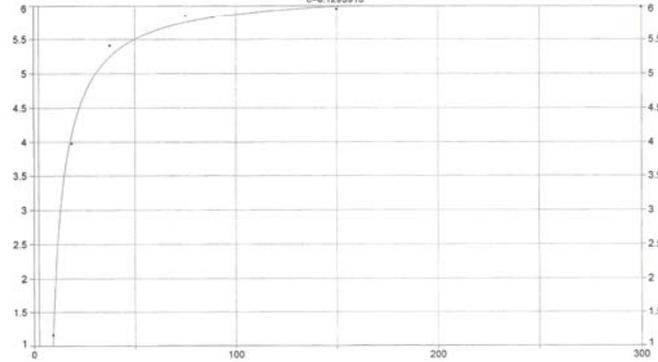
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9949483$  DF Adj  $r^2=0.95737075$  F1StdErr=0.18470366 Fstat=295.42965  
 $a=0.1193948$   $b=0.07602232$   
 $c=16.024022$



0,45 – 30 °C – 100x100x350 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

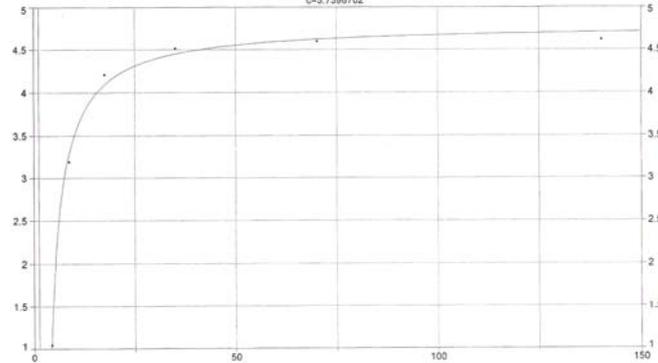
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99620573$  DF Adj  $r^2=0.99051432$  F1StdErr=0.15132598 Fstat=393.83289  
 $a=6.2262599$   $b=0.1824188$   
 $c=8.1293916$



0,45 – 50 °C – 100x100x350 mm

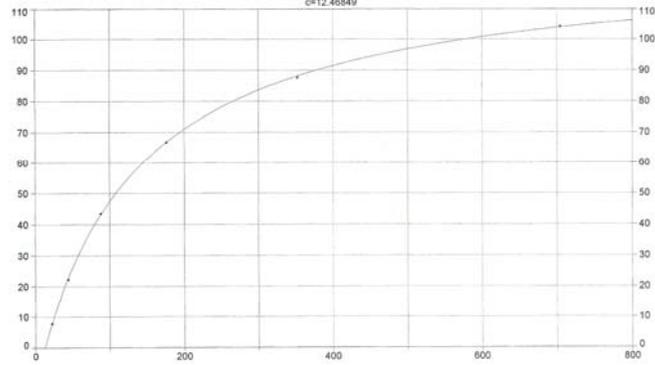
D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99662567$  DF Adj  $r^2=0.99156417$  F1StdErr=0.1053923 Fstat=443.03259  
 $a=4.7801256$   $b=0.432403$   
 $c=3.7398702$



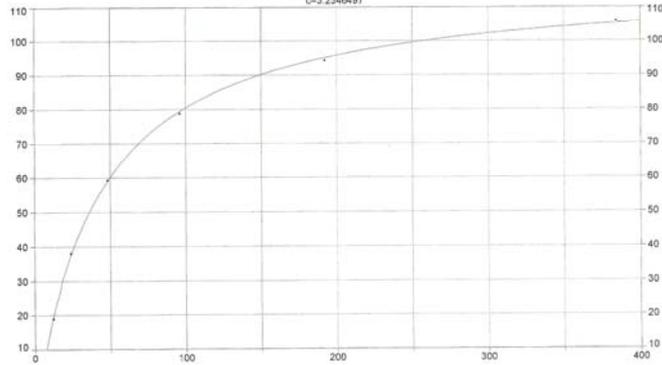
0,25 - 10 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9999188$  DF Adj  $r^2=0.999797$  FitStdErr=0.43675513 Fstat=16470.982  
 $a=125.54104$   $b=0.0399355773$   
 $c=12.46849$



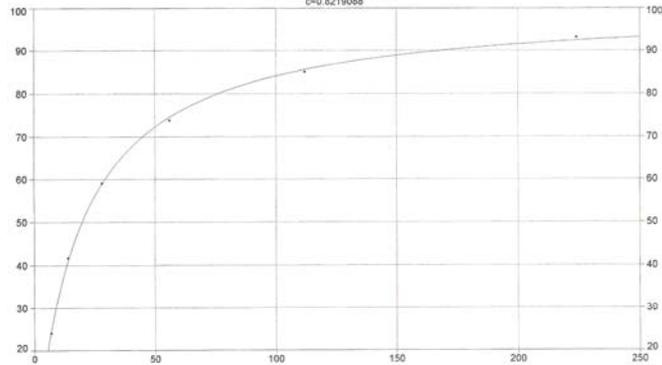
0,25 - 30 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99962275$  DF Adj  $r^2=0.99935686$  FitStdErr=0.84029505 Fstat=3974.5921  
 $a=117.53941$   $b=0.02246594$   
 $c=3.2346497$



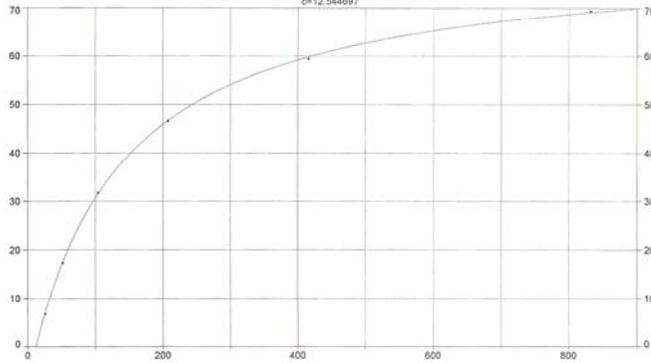
0,25 - 50 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPEI\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99942442$  DF Adj  $r^2=0.99858104$  FitStdErr=0.81869085 Fstat=2604.553  
 $a=100.30666$   $b=0.052353786$   
 $c=0.8219088$



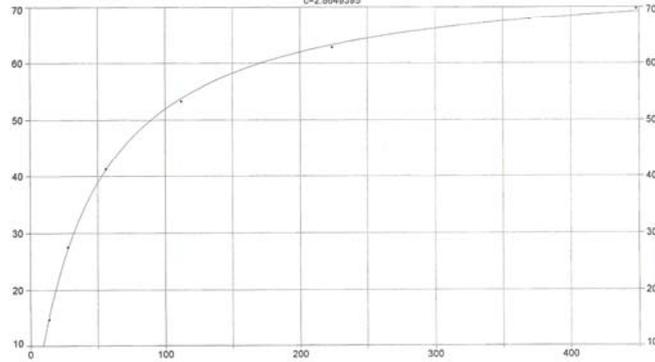
0,35 - 10 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99987087$  DF Adj  $r^2=0.99987718$  F1StDErr=0.35659396 Fstat=11614.887  
 $a=81.372085$   $b=0.006822934$   
 $c=12.544697$



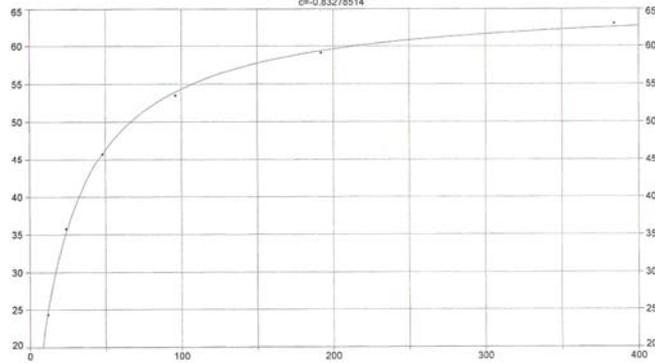
0,35 - 30 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9995354$  DF Adj  $r^2=0.9995335$  F1StDErr=0.58674965 Fstat=3227.0927  
 $a=76.345558$   $b=0.021909296$   
 $c=2.8649395$



0,35 - 50 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

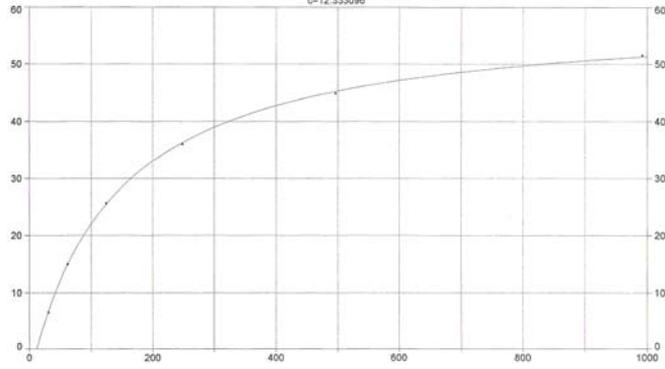
D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1  
 Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99924264$  DF Adj  $r^2=0.9991066$  F1StDErr=0.52403721 Fstat=1979.0678  
 $a=66.0723$   $b=0.046087106$   
 $c=0.85278514$



0,45 - 10 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

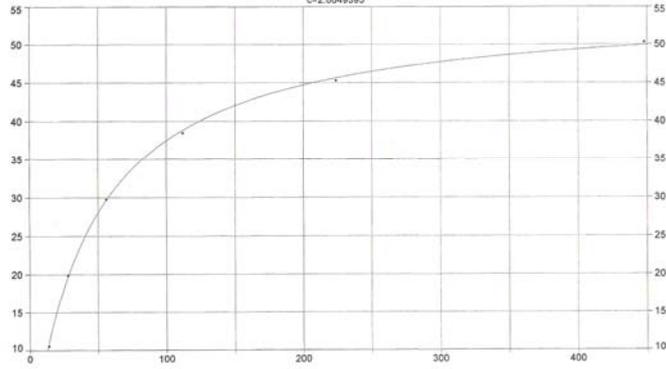
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99978688$  DF Adj  $r^2=0.99946714$  F<sub>Stat</sub>Err=0.32868455 F<sub>Stat</sub>=7036.0384  
 $a=59.002519$   $b=0.0067826766$   
 $c=12.333096$



0,45 - 30 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

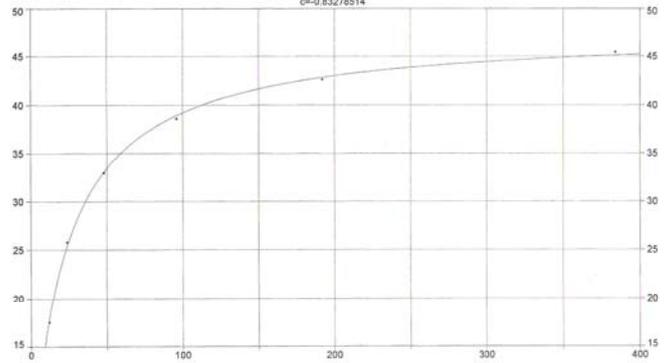
Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.9995354$  DF Adj  $r^2=0.9988385$  F<sub>Stat</sub>Err=0.4240593 F<sub>Stat</sub>=3227.0927  
 $a=55.067605$   $b=0.021909296$   
 $c=2.8849395$



0,45 - 50 °C - 12,5x12,5x12,5 mm

D:\Meus documentos\Doutorado\Programa Experimental UCPE\TCWIN4\CLIPBRD.WK1

Rank 1 Eqn 8001 [UDF 1] y=mat-hyper(a,b,c)  
 $r^2=0.99924264$  DF Adj  $r^2=0.9961066$  F<sub>Stat</sub>Err=0.37768478 F<sub>Stat</sub>=1979.0678  
 $a=47.65754$   $b=0.048087106$   
 $c=-0.83278514$



ANEXO C - Modelos de regressão não-linear e análises de variância para os modelos  
de regressão utilizados na tese

Nas Tabelas 1 e 2 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, do concreto curado em câmara úmida e ensaiado à compressão (CPs 100x200mm).

Tabela 1: análise de regressão não-linear do concreto ensaiado à compressão curado em câmara úmida

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a1         | 23,2737    | 4,1021      | 14,2450                | 32,3023  |
| n1         | 0,9642     | 0,1289      | 0,6804                 | 1,2479   |
| b2         | 0,3572     | 0,2324      | -0,1543                | 0,8687   |
| n2         | 0,8943     | 0,5898      | -0,4039                | 2,1924   |

Tabela 2: análise de variância da regressão do concreto ensaiado à compressão curado em câmara úmida

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ       |
|----------|----------|-----|----------|
| Modelo   | 53187,20 | 4   | 13296,80 |
| Residual | 528,94   | 11  | 48,09    |
| Total    | 53716,20 | 15  |          |

Nas Tabelas 3 e 4 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, do concreto curado em câmara úmida e ensaiado à tração na flexão (CPs 100x100x350mm).

Tabela 3: análise de regressão não-linear do concreto ensaiado à tração na flexão curado em câmara úmida

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a1         | 3,3443     | 0,4687      | 2,3127                 | 4,3758   |
| n1         | 0,8145     | 0,1080      | 0,5769                 | 1,0522   |
| b2         | 0,4332     | 0,1899      | 0,0152                 | 0,8512   |
| n2         | 1,1329     | 0,5740      | -0,1305                | 2,3963   |

Tabela 4: análise de variância da regressão do concreto ensaiado à tração curado em câmara úmida

| Fonte    | SQ     | GDL | MQ     |
|----------|--------|-----|--------|
| Modelo   | 810,92 | 4   | 202,73 |
| Residual | 5,86   | 11  | 0,53   |
| Total    | 816,78 | 15  |        |

Nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 10°C e ensaiada à compressão (CPs 50x50x50mm).

Tabela 5: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à compressão curada a 10°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 20,9093    | 2,8128      | 14,8765                | 26,9422  |
| n1         | 0,9978     | 0,1119      | 0,7578                 | 1,2377   |
| b1         | 27,3215    | 2,0697      | 22,8825                | 31,7606  |
| n2         | 1,5313     | 0,2670      | 0,9586                 | 2,1041   |

Tabela 6: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à compressão curada a 10°C

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ      |
|----------|----------|-----|---------|
| Modelo   | 39242,10 | 4   | 9810,53 |
| Residual | 384,00   | 14  | 27,43   |
| Total    | 39626,10 | 18  |         |

Nas Tabelas 7 e 8 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 30°C e ensaiada à compressão (CPs 50x50x50mm).

Tabela 7: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à compressão curada a 30°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 11,7574    | 1,5699      | 8,3902                 | 15,1245  |
| n1         | 1,4400     | 0,1058      | 1,2131                 | 1,6669   |
| b1         | 10,1617    | 0,6290      | 8,8126                 | 11,5107  |
| n2         | 2,0828     | 0,3576      | 1,3159                 | 2,8497   |

Tabela 8: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à compressão curada a 30°C

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ       |
|----------|----------|-----|----------|
| Modelo   | 46862,70 | 4   | 11715,70 |
| Residual | 362,59   | 14  | 25,90    |
| Total    | 47225,30 | 18  |          |

Nas Tabelas 9 e 10 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 50°C e ensaiada à compressão (CPs 50x50x50mm).

Tabela 9: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à compressão curada a 50°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 10,1334    | 1,2504      | 7,4516                 | 12,8151  |
| n1         | 1,4575     | 0,0987      | 1,2457                 | 1,6692   |
| b1         | 5,1895     | 0,3373      | 4,4660                 | 5,9130   |
| n2         | 1,9888     | 0,3223      | 1,2975                 | 2,6802   |

Tabela 10: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à compressão curada a 50°C

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ      |
|----------|----------|-----|---------|
| Modelo   | 38676,10 | 4   | 9669,03 |
| Residual | 248,39   | 14  | 17,74   |
| Total    | 38924,50 | 18  |         |

Nas Tabelas 11 e 12 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 10°C e ensaiada à tração na flexão (CPs 40x40x160mm).

Tabela 11: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à tração curada a 10°C

| Parâmetros | Coefficientes | Erro padrão | Teste t | Valor de p |
|------------|---------------|-------------|---------|------------|
| a0         | 4,5866        | 0,4809      | 3,5477  | 5,6256     |
| n1         | 0,6852        | 0,0889      | 0,4930  | 0,8774     |
| b1         | 25,1714       | 1,5477      | 21,8278 | 28,5151    |
| n2         | 1,5240        | 0,2120      | 1,0660  | 1,9819     |

Tabela 12: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à tração curada a 10°C

| Fonte    | SQ     | GDL | MQ     |
|----------|--------|-----|--------|
| Modelo   | 954,71 | 4   | 238,68 |
| Residual | 5,77   | 13  | 0,44   |
| Total    | 960,48 | 17  |        |

Nas Tabelas 13 e 14 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 30°C e ensaiada à tração na flexão (CPs 40x40x160mm).

Tabela 13: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à tração curada a 30°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 2,7813     | 0,3722      | 1,97722                | 3,5854   |
| n1         | 1,0314     | 0,1081      | 0,7978                 | 1,2649   |
| b1         | 9,7420     | 0,5828      | 8,4830                 | 11,0010  |
| n2         | 2,6222     | 0,5110      | 1,5183                 | 3,7260   |

Tabela 14: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à tração curada a 30°C

| Fonte    | SQ      | GDL | MQ     |
|----------|---------|-----|--------|
| Modelo   | 998,95  | 4   | 249,74 |
| Residual | 7,79    | 13  | 0,60   |
| Total    | 1006,73 | 17  |        |

Nas Tabelas 15 e 16 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 50°C e ensaiada à tração na flexão (CPs 40x40x160mm).

Tabela 15: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à tração curada a 50°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 1,4440     | 0,3505      | 0,6803                 | 2,2076   |
| n1         | 1,4780     | 0,1880      | 1,0684                 | 1,8877   |
| b1         | 4,0786     | 1,4315      | 0,9596                 | 7,1976   |
| n2         | 1,0417     | 0,6428      | -0,3589                | 2,4422   |

Tabela 16: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à tração curada a 50°C

| Fonte    | SQ     | GDL | MQ     |
|----------|--------|-----|--------|
| Modelo   | 759,79 | 4   | 189,95 |
| Residual | 13,04  | 12  | 1,09   |
| Total    | 772,83 | 16  |        |

Nas Tabelas 17 e 18 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 10°C e ensaiada à compressão (metades dos CPs 40x40x160mm).

Tabela 17: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à compressão curada a 10°C – metades dos CPs prismáticos

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 17,6593    | 2,1023      | 13,1502                | 22,1683  |
| n1         | 1,0389     | 0,0980      | 0,8287                 | 1,2492   |
| b1         | 28,4347    | 2,1937      | 23,7297                | 33,1397  |
| n2         | 1,2641     | 0,1946      | 0,8467                 | 1,6815   |

Tabela 18: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à compressão curada a 10°C – metades dos CPs prismáticos

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ      |
|----------|----------|-----|---------|
| Modelo   | 28087,80 | 4   | 7021,96 |
| Residual | 208,70   | 14  | 14,91   |
| Total    | 28296,50 | 18  |         |

Nas Tabelas 19 e 20 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 30°C e ensaiada à compressão (metades dos CPs 40x40x160mm).

Tabela 19: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à compressão curada a 30°C – metades dos CPs prismáticos

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 12,8081    | 2,1886      | 8,1139                 | 17,5022  |
| n1         | 1,2604     | 0,1371      | 0,9664                 | 1,5545   |
| b1         | 9,7591     | 0,8696      | 7,8939                 | 11,6242  |
| n2         | 1,7426     | 0,3740      | 0,9406                 | 2,5447   |

Tabela 20: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à compressão curada a 30°C – metades dos CPs prismáticos

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ      |
|----------|----------|-----|---------|
| Modelo   | 34936,10 | 4   | 8734,03 |
| Residual | 478,12   | 14  | 34,15   |
| Total    | 35414,20 | 18  |         |

Nas Tabelas 21 e 22 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da argamassa curada em tanque a 50°C e ensaiada à compressão (metades dos CPs 40x40x160mm).

Tabela 21: análise de regressão não-linear da argamassa ensaiada à compressão curada a 50°C – metades dos CPs prismáticos

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 10,9763    | 1,7054      | 7,3187                 | 14,6340  |
| n1         | 1,2990     | 0,1260      | 1,0288                 | 1,5691   |
| b1         | 5,3122     | 0,4432      | 4,3617                 | 6,2628   |
| n2         | 2,7729     | 0,7645      | 1,1332                 | 4,4126   |

Tabela 22: análise de variância da regressão da argamassa ensaiada à compressão curada a 50°C – metades dos CPs prismáticos

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ      |
|----------|----------|-----|---------|
| Modelo   | 32608,60 | 4   | 8152,15 |
| Residual | 353,83   | 14  | 25,27   |
| Total    | 32962,40 | 18  |         |

Nas Tabelas 23 e 24 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, do concreto curado em tanque a 10°C e ensaiado à tração na flexão (CPs 100x100x350mm).

Tabela 23: análise de regressão não-linear – concreto – curado a 10°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a1         | 2,8115     | 0,2788      | 2,2135                 | 3,4095   |
| n1         | 0,9451     | 0,0796      | 0,7744                 | 1,1159   |
| b2         | 25,5285    | 1,2552      | 22,8364                | 28,2206  |
| n2         | 1,9875     | 0,2566      | 1,4370                 | 2,5379   |

Tabela 24: análise de variância da regressão – concreto – curado a 10°C

| Fonte    | SQ     | GDL | MQ     |
|----------|--------|-----|--------|
| Modelo   | 807,90 | 4   | 201,98 |
| Residual | 3,97   | 14  | 0,28   |
| Total    | 811,87 | 18  |        |

Nas Tabelas 25 e 26 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, do concreto curado em tanque a 30°C e ensaiado à tração na flexão (CPs 100x100x350mm).

Tabela 25: análise de regressão não-linear – concreto – curado a 30°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a1         | 4,0245     | 0,3575      | 3,2577                 | 4,7914   |
| n1         | 0,6773     | 0,0779      | 0,5102                 | 0,8443   |
| b2         | 11,4254    | 0,7936      | 9,7232                 | 13,1276  |
| n2         | 1,4922     | 0,2198      | 1,0208                 | 1,9636   |

Tabela 26: análise de variância da regressão – concreto à tração – 30°C

| Fonte    | SQ     | GDL | MQ     |
|----------|--------|-----|--------|
| Modelo   | 898,58 | 4   | 224,65 |
| Residual | 4,31   | 14  | 0,31   |
| Total    | 902,89 | 18  |        |

Nas Tabelas 27 e 28 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, do concreto curado em tanque a 50°C e ensaiado à tração na flexão (CPs 100x100x350mm).

Tabela 27: análise de regressão não-linear – concreto – curado a 50°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a1         | 1,4163     | 0,1412      | 1,1134                 | 1,7192   |
| n1         | 1,3210     | 0,0808      | 1,1478                 | 1,4942   |
| b2         | 5,4746     | 0,2887      | 4,8554                 | 6,0938   |
| n2         | 2,2511     | 0,3392      | 1,5235                 | 2,9787   |

Tabela 28: análise de variância da regressão – concreto – curado a 50°C

| Fonte    | SQ     | GDL | MQ     |
|----------|--------|-----|--------|
| Modelo   | 547,09 | 4   | 136,77 |
| Residual | 2,42   | 14  | 0,17   |
| Total    | 549,52 | 18  |        |

Nas Tabelas 29 e 30 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da pasta curada em tanque a 10°C e ensaiada à compressão (CPs 12,5x12,5x12,5mm).

Tabela 29: análise de regressão não-linear – pasta – curada a 10°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 21,3435    | 10,2737     | -0,8515                | 43,5386  |
| n1         | 1,6457     | 0,1770      | 1,2633                 | 2,0280   |
| b2         | 232,6670   | 256,3970    | -321,2480              | 786,5810 |
| n2         | 0,4511     | 0,1971      | 0,0253                 | 0,8768   |

Tabela 30: análise de variância da regressão – pasta – curada a 10°C

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ       |
|----------|----------|-----|----------|
| Modelo   | 44490,00 | 4   | 11122,50 |
| Residual | 825,43   | 13  | 63,49    |
| Total    | 45315,40 | 17  |          |

Nas Tabelas 31 e 32 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da pasta curada em tanque a 30°C e ensaiada à compressão (CPs 12,5x12,5x12,5mm).

Tabela 31: análise de regressão não-linear – pasta – curada a 30°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 12,5254    | 4,0679      | 3,6622                 | 21,3887  |
| n1         | 1,7138     | 0,2114      | 1,2533                 | 2,1743   |
| b2         | 31,4675    | 11,1445     | 7,1858                 | 55,7493  |
| n2         | 0,6711     | 0,2481      | 0,1304                 | 1,2117   |

Tabela 32: análise de variância da regressão – pasta – curada a 30°C

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ       |
|----------|----------|-----|----------|
| Modelo   | 51530,80 | 4   | 12882,70 |
| Residual | 1033,39  | 12  | 86,12    |
| Total    | 52564,20 | 16  |          |

Nas Tabelas 33 e 34 apresentam-se o modelo de regressão não-linear e a análise de variância para o modelo de regressão, respectivamente, da pasta curada em tanque a 50°C e ensaiada à compressão (CPs 12,5x12,5x12,5mm).

Tabela 33: análise de regressão não-linear – pasta – curada a 50°C

| Parâmetros | Estimativa | Assintótico | Intervalo de confiança |          |
|------------|------------|-------------|------------------------|----------|
|            |            | Erro padrão | Inferior               | Superior |
| a0         | 22,4341    | 4,6887      | 12,3779                | 32,4903  |
| n1         | 1,0888     | 0,1496      | 0,7679                 | 1,4097   |
| b2         | 12,3519    | 2,9451      | 6,0353                 | 18,6684  |
| n2         | 0,6980     | 0,2450      | 0,1725                 | 1,2234   |

Tabela 34: análise de variância da regressão – pasta – curada a 50°C

| Fonte    | SQ       | GDL | MQ       |
|----------|----------|-----|----------|
| Modelo   | 49263,30 | 4   | 12315,80 |
| Residual | 816,18   | 14  | 58,30    |
| Total    | 50079,50 | 18  |          |