



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS
DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS SUBMETIDAS À
CURA TÉRMICA PELO MÉTODO DA
MATURIDADE: ESTUDO DE CASO**

LUCIANO DONIZETI PANTANO PERES

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS SUBMETIDAS À CURA TÉRMICA PELO MÉTODO DA MATURIDADE: ESTUDO DE CASO

LUCIANO DONIZETI PANTANO PERES

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof. Dra. Mônica Pinto Barbosa

Co-Orientador: Prof. Dr. Roberto Caldas de Andrade Pinto

Ilha Solteira – SP
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

P437a	Peres, Luciano Donizeti Pantano Avaliação de propriedades mecânicas de peças pré-moldadas submetidas à cura térmica pelo método da maturidade : estudo de caso / Luciano Donizeti Pantano Peres. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006 · 163 p. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006 Orientador: Mônica Pinto Barbosa Co-orientador: Roberto Caldas de Andrade Pinto Bibliografia: p. 155-163 1. Método da maturidade. 2. Concreto pré-moldado. 3. Cura térmica. 4. Energia aparente de ativação.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS PRÉ-MOLDADAS
SUBMETIDAS À CURA TÉRMICA PELO MÉTODO DA MATURIDADE: ESTUDO DE
CASO

AUTOR: LUCIANO DONIZETI PANTANO PERES

ORIENTADORA: Profa. Dra. MONICA PINTO BARBOSA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA
MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. MONICA PINTO BARBOSA

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. CASSIO ROBERTO MACEDO MAIA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCELO DE ARAÚJO FERREIRA

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia/Universidade Federal de São Carlos - São Carlos/SP

Data da realização: 26 de abril de 2006.

Presidente da Comissão Examinadora
Profa. Dra. MONICA PINTO BARBOSA

*Aos meus pais, Sebastião e Alzira,
ímpares de dedicação e incentivo
em todos os momentos de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir que meus olhos se abrissem a cada manhã, iluminando meus pensamentos e conduzindo firmemente os meus passos. Infinitamente obrigado!

À Prof. Mônica Pinto Barbosa, pela orientação, amizade e experiência adquirida ao longo do trabalho.

Ao Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis – SC, pela dedicação e disposição diante das sugestões para o enriquecimento do trabalho.

Aos professores Marcelo de Araújo Ferreira, Gladis Camarini, Cássio Roberto Macedo Maia, José Luiz Pinheiro Melges, pelas críticas e sugestões sobre o trabalho.

Ao Prof. Gilberto Pechoto de Melo, pelo acolhimento junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM).

Aos engenheiros Rodolfo Moreira e Rodrigo Moreira, por permitirem o acesso aos meios de produção de elementos em concreto pré-moldado nas instalações da Protendit, indispensável à conclusão do trabalho. Não poderia ausentar-me também dos meus sinceros agradecimentos aos amigos Renato, Fábio, Sigmar e Carlos Rogério pelo auxílio durante a realização dos ensaios na Protendit.

Ao engenheiro e amigo Flávio Moreira Salles, por dispor das instalações do Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC). Aos técnicos do LCEC e aos amigos Felipe e Wilson por não pouparem esforços durante o trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento e concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus pais, pelo constante apoio e incentivo durante todo o trabalho.

Aos meus amigos, que me fortaleceram nos momentos difíceis, estendendo as mãos sempre que eu precisava. Dividimos momentos tristes e felizes, brincamos e “crescemos” juntos, pois algo maior nos mantinham unidos: a amizade. Vocês são especiais! Muito obrigado!

*“ Há duas possibilidades para um resultado:
se ele confirmar a hipótese, então fez-se uma medida;
se ele for contrário à hipótese, então fez-se uma descoberta”*

ENRICO FERMI (1901 – 1954), físico italiano

PERES, L. D. P. **Avaliação de propriedades mecânicas de peças pré-moldadas submetidas à cura térmica pelo Método da Maturidade:** estudo de caso. Ilha Solteira, 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

RESUMO

O Método da Maturidade é um ensaio não-destrutivo utilizado para avaliação das propriedades do concreto que estejam relacionadas ao desenvolvimento do grau de hidratação do material, a partir do seu histórico de temperaturas. O presente trabalho apresenta a aplicação dos conceitos do Método da Maturidade para analisar o desenvolvimento da resistência à compressão de elementos pré-moldados de concreto submetidos à cura térmica, a partir do monitoramento dos dados de tempo e temperatura junto à empresa Protendit, em São José do Rio Preto – SP, assim como a realização de ciclos térmicos no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), em Ilha Solteira – SP, para elaboração da curva de calibração para utilização do método. A determinação da energia aparente de ativação, parâmetro necessário à aplicação do Método da Maturidade relacionado à velocidade da reação, foi realizada segundo o procedimento ASTM C 1074-98, permitindo verificar a influência das temperaturas de cura sobre os valores de energia de ativação determinados experimentalmente. Em consequência dos ciclos térmicos realizados na empresa, foi possível avaliar a distribuição de temperaturas nos elementos estruturais, com evidências do aparecimento de gradientes térmicos durante a realização da cura térmica, assim como a validação da aplicação do Método da Maturidade para estimar valores de resistência à compressão ao final do ciclo térmico.

Palavras-chaves: Método da Maturidade; Energia Aparente de Ativação; Cura Térmica; Pré-Moldados; Gradientes Térmicos; Temperatura; Concreto.

PERES, L. D. P. **Evaluation of mechanical properties for precast concrete elements submitted to steam curing by Maturity Method:** study of case. Ilha Solteira, 2006. 163 f. Thesis (Master in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

ABSTRACT

The Maturity Method is a non-destructive test used for evaluation of the concrete properties related with the development of concrete hydration degree, calculated from the time and temperature histories. This work presents the application of the Maturity Method concepts to analyze the development of the compression strength for precast concrete elements submitted to steam curing, starting from data of time and temperature acquired in a precast concrete factory, in São José do Rio Preto city - Brazil, as well as the execution of thermal cycles in the CESP Civil Engineering Laboratory (LCEC), in Ilha Solteira city - Brazil, for elaboration of the calibration curves used by Maturity Method. The determination of the apparent activation energy, necessary parameter for use of Maturity Method related to the reaction speed, it was executed according to the ASTM C 1074-98 procedure, allowing to verify the influence of curing temperatures on activation energy values. In consequence of the thermal cycles executed in precast concrete factory, it was possible to evaluate the temperature distribution in the structural elements, with evidences of thermal gradients appearance during steam curing, as well as the validation of Maturity Method application to esteem compression strength values at the end of thermal cycle.

keywords: Maturity Method; Apparent Activation Energy; Steam Curing; Precast Concrete; Thermal Gradients; Temperature; Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Remanescente de um barco de Lambot	23
Figura 2.2 - Cassino de Biarritz (França)	25
Figura 2.3 - Índices de consumo de concreto pré-moldado.....	27
Figura 2.4 - Denominações dos elementos pré-moldados de uso mais comum.....	29
Figura 2.5 - Exemplo de execução de painéis com fôrma móvel.....	31
Figura 2.6 - Seções transversais possíveis de serem obtidas com fôrma para seção T T.....	32
Figura 2.7 - Representação da relação entre tensão e deformação do concreto	35
Figura 2.8 - Exemplos de relação entre tensão e deformação de corpos de prova cilíndricos de concretos com resistência de até 85 MPa	35
Figura 2.9 - Comportamento tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto ..	36
Figura 2.10 - Ciclo típico de cura a vapor	38
Figura 2.11 - Cura térmica com ciclo longo.....	41
Figura 2.12 - Cura normal	41
Figura 3.1 - Aparelhagem para o ensaio RADAR.....	46
Figura 3.2 - Aparelho de Ultra-som	46
Figura 3.3 - Ensaio por esclerometria.....	47
Figura 3.4 - Método <i>Pull Off</i>	49
Figura 3.5 - Influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão para uma mistura de concreto com fator a/c = 0,30	50
Figura 3.6 - Desenvolvimento da resistência relativa à compressão com a maturidade	51
Figura 3.7 - Desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo	52
Figura 3.8 - Esquema de energia aparente de ativação para reações exotérmicas	55
Figura 3.9 - Gráfico $1 / S_T \times 1 / t$	59
Figura 3.10 - Gráfico $S_T / (S_{uT} - S_T)$	59
Figura 3.11 - Gráfico $\ln(k_T) \times 1 / T$	60
Figura 3.12 - Esquema para determinação da energia aparente de ativação (E_a)	61

Figura 3.13 - Monitoramento de tempo e temperatura dos corpos de prova.....	61
Figura 3.14 - Gráfico Resistência x Idade, obtido em laboratório	61
Figura 3.15 - Gráfico Resistência x Idade Equivalente a uma temperatura de referência Tr...	62
Figura 3.16 - Gráfico Resistência x Idade Equivalente a uma temperatura de referência (Tr) acrescido de linha de tendência obtido em laboratório.....	62
Figura 3.17 - Monitoramento da estrutura.....	63
Figura 3.18 - Obtenção das resistências através de curvas de idade equivalente.....	63
Figura 4.1 - Betoneira e cabine de controle.....	64
Figura 4.2 - Preparação de uma fôrma	65
Figura 4.3 - Deposição do concreto na fôrma	65
Figura 4.4 - Etapa de adensamento e regularização da superfície.....	66
Figura 4.5 - Caldeira para produção de vapor	66
Figura 4.6 - Peça sob cura térmica	66
Figura 4.7 - Aspecto de uma viga desmoldada.....	67
Figura 4.8 - Içamento de uma viga em concreto pré-moldado.....	67
Figura 4.9 - Curva granulométrica da areia fina.....	70
Figura 4.10 - Curva granulométrica da areia média	71
Figura 4.11 - Curva granulométrica da Brita 16 mm	72
Figura 4.12 - Prensa manual da Protendit.....	73
Figura 4.13 - Molde dos corpos de prova.....	73
Figura 4.14 - Corpos de prova cúbicos.....	73
Figura 4.15 - Configuração da câmara fria.....	74
Figura 4.16 - Configuração da câmara úmida	74
Figura 4.17 - Configuração do banho térmico.....	74
Figura 4.18 - Material na betoneira	75
Figura 4.19 - Ensaio de abatimento.....	75
Figura 4.20 - Adensamento do concreto.....	76
Figura 4.21 - Proteção com filme plástico.....	76
Figura 4.22 - Fixação do tubo de cobre no corpo de prova	76
Figura 4.23 - Câmara térmica	77
Figura 4.24 - Disposição dos multímetros na câmara térmica	77
Figura 4.25 - Prensa do LCEC	78
Figura 4.26 - Configuração do ensaio de módulo de elasticidade.....	79

Figura 5.1 - Tubo de cobre no concreto	81
Figura 5.2 - Sondas termopares	81
Figura 5.3 - Multímetro na caixa de isopor	81
Figura 5.4 - Disposição final dos multímetros	81
Figura 5.5 - Preparação dos corpos de prova.....	82
Figura 5.6 - Multímetro e sonda termopar.....	82
Figura 5.7 - Dimensões da seção transversal da viga I 50 (em cm)	83
Figura 5.8 - Esquema de distribuição dos multímetros ao longo da viga.....	83
Figura 5.9 - Gráfico Temperatura x Tempo para a viga em seção transversal I de 50 cm de altura	84
Figura 5.10 - Gráfico Temperatura x Tempo do corpo de prova para a viga I 50.....	84
Figura 5.11 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a viga I 50.....	85
Figura 5.12 - Dimensões da seção transversal da viga I 70 (em cm)	86
Figura 5.13 - Localização dos pontos de monitoramento da temperatura para a viga I 70.....	86
Figura 5.14 - Gráfico Temperatura x Tempo para a viga em seção transversal I de 70 cm de altura	87
Figura 5.15 - Gráfico Temperatura x Tempo do corpo de prova para a viga I 70.....	88
Figura 5.16 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a viga I 70.....	89
Figura 5.17 - Posicionamento dos pontos de aquisição de temperatura ao longo da pista de concretagem da viga I 50 (dia)	89
Figura 5.18 - Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 50 (dia).....	90
Figura 5.19 - Gráfico Temperatura x Tempo para os corpos de prova (pista VI 50, dia)	91
Figura 5.20 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para viga I 50 (dia).....	93
Figura 5.21 - Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 50 (madrugada).....	94
Figura 5.22 - Gráfico Temperatura x Tempo para os corpos de prova (VI 50, madrugada)....	95
Figura 5.23 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a pista das vigas I 50 (madrugada).....	97
Figura 5.24 - Posicionamento dos pontos de aquisição de temperatura ao longo da pista de concretagem da viga I 70.....	98
Figura 5.25 - Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 70	98
Figura 5.26 - Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova da pista das vigas I 70.....	99
Figura 5.27 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para pistas das vigas I 70	100
Figura 5.28 - Dimensões da seção transversal da viga armada VR 20 x 45 (em cm)	101

Figura 5.29 - Posicionamento dos pontos de aquisição de temperatura para a viga armada retangular – VR 20 x 45	101
Figura 5.30 - Gráfico Temperatura x Tempo para a viga armada VR 20 x 45.....	102
Figura 5.31 - Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova (VR 20 x 45)	103
Figura 5.32 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a viga VR 20 x 45	104
Figura 5.33 - Dimensões da seção transversal do pilar armado P 30 x 50	104
Figura 5.34 - Posicionamento dos pontos de monitoramento para o pilar armado P 30 x 50	105
Figura 5.35 - Gráfico Temperatura x Tempo para o pilar P 30 x 50	105
Figura 5.36 - Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova (P 30 x 50)	106
Figura 5.37 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para o pilar P 30 x 50	107
Figura 6.1 - Gráfico $\ln(k_T)$ x Inv. Temperatura – 10°C, 30°C e 55°C	109
Figura 6.2 - Gráfico $\ln(k_T)$ x Inv. Temperatura – 30°C, 55°C e 80°C	110
Figura 6.3 - Gráfico $\ln(k_T)$ x Inv. Temperatura – 10°C, 30°C, 55°C e 80°C.....	111
Figura 6.4 - Posicionamento dos multímetros na câmara térmica.....	113
Figura 6.5 - Gráfico Temperatura x Tempo dos corpos de prova	113
Figura 6.6 - Gráfico Id. Equivalente x Id. Real	114
Figura 6.7 - Gráfico Resistência à compressão x Idade	115
Figura 6.8 - Gráfico Resistência à compressão x Idade equivalente a 20°C	116
Figura 6.9 - Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova	117
Figura 6.10 - Gráfico Id. Equivalente x Id. Real (ciclo térmico após o tempo de início de pega)	117
Figura 6.11 - Gráfico Resistência x Idade (ciclo térmico após tempo de início de pega).....	118
Figura 6.12 - Gráfico Resistência à compressão x Id. Equivalente a 20°C	119
Figura 6.13 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para viga com seção transversal em I de 50 cm de altura	120
Figura 6.14 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para viga com seção transversal em I de 70 cm de altura	122
Figura 6.15 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para a viga I 50 (dia).....	124
Figura 6.16 - Gráfico Idade equivalente x Idade real para a pista das VI 50 (madrugada)....	127
Figura 6.17 - Gráfico Idade equivalente x Idade real para a pista das vigas I 70.....	129
Figura 6.18 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para a viga VR 20 x 45	131
Figura 6.19 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para o pilar P 30 x 50.....	133
Figura 7.1 - Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 5 e 7 (pista das vigas I 50, dia)	140

Figura 7.2 - Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 4 e 8 (pista das vigas I 50, dia)	141
Figura 7.3 - Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 3, 6 e 9 (pista das vigas I 50, dia) ...	141
Figura 7.4 - Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 5 e 7 (pista das VI 50, madrugada).	143
Figura 7.5 - Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 4 e 8 (pista VI 50, madrugada)	143
Figura 7.6 - Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 3, 6, 9 (pista VI 50, madrugada).....	144
Figura 7.7 - Gráfico comparativo de Resistência à compressão x Idade para as peças protendidas.....	148
Figura 7.8 - Gráfico comparativo de Resistência à compressão x Idade equivalente a 20°C para as peças protendidas	149
Figura 7.9 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para as peças armadas.....	149
Figura 7.10 - Gráfico Resistência à compressão x Idade equivalente a 20°C para as peças armadas.....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores de E_a para cimentos brasileiros.....	56
Tabela 4.1 - Caracterização do cimento CPV-ARI-Plus	69
Tabela 4.2 - Valores da porcentagem retida acumulada da areia fina.....	70
Tabela 4.3 - Caracterização da areia fina	70
Tabela 4.4 - Valores da porcentagem retida acumulada da areia média	71
Tabela 4.5 - Caracterização da areia média.....	71
Tabela 4.6 - Valores da porcentagem retida acumulada da brita 16 mm	72
Tabela 4.7 - Caracterização da brita 16 mm.....	72
Tabela 5.1 - Resistência à compressão para os corpos de prova da viga I 50	85
Tabela 5.2 - Resistência à compressão para os corpos de prova da viga I 70	88
Tabela 5.3 - Valores de Resistência à compressão x Idade (pista das vigas I 50, dia).....	92
Tabela 5.4 - Valores de Resistência à compressão x Idade (pista das vigas I 50, madrugada)	96
Tabela 5.5 - Valores de Resistência à compressão x Idade para a pista das vigas I 70.....	100
Tabela 5.6 - Valores de Resistência à compressão x Idade para viga VR 20 x 45.....	103
Tabela 5.7 - Valores de Resistência à compressão x Idade para o pilar P 30 x 50.....	106
Tabela 6.1 - Resistência à compressão da argamassa para cada temperatura de cura.....	108
Tabela 6.2 - Valores de Su_T e k_T	109
Tabela 6.3 - Valores de k_T x Inv. Temperatura (10°C, 30°C e 55°C).....	109
Tabela 6.4 - Valores de k_T x Inv. Temperatura (30°C, 55°C e 80°C)	110
Tabela 6.5 - Valores de k_T x Inv. Temperatura (10°C, 30°C, 55°C e 80°C)	111
Tabela 6.6 - Valores de energia aparente de ativação (E_a)	112
Tabela 6.7 - Valores de resistência (ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova)	114
Tabela 6.8 - Valores de Resistência x Id. Equivalentes.....	115
Tabela 6.9 - Módulo de elasticidade (ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova) ..	116

Tabela 6.10 - Valores de resistência à compressão (ciclo térmico após tempo de início de pega)	118
Tabela 6.11 - Resistência x Id. Equivalentes (ciclo térmico após tempo de início de pega)..	119
Tabela 6.12 - Módulos de elasticidade do concreto (ciclo térmico após tempo de início de pega)	119
Tabela 6.13 - Valores de Resistência x Id. Equivalentes nos corpos de prova (Viga I 50)....	121
Tabela 6.14 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (Viga I 50).....	121
Tabela 6.15 - Valores teóricos de resistência da viga I 50	122
Tabela 6.16 - Valores de Resistência x Id. Equivalentes nos corpos de prova (viga I 70)....	123
Tabela 6.17 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (Viga I 70).....	123
Tabela 6.18 - Valores teóricos de resistência da viga I 70	124
Tabela 6.19 - Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova (VI 50, dia)	125
Tabela 6.20 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (pista VI 50, dia)	125
Tabela 6.21 - Valores teóricos de resistência da pista das vigas I 50 (dia)	126
Tabela 6.22 - Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova (pista das vigas I 50, madrugada)	127
Tabela 6.23 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (pista das vigas I 50, madrugada)	128
Tabela 6.24 - Valores teóricos de resistência da pista das vigas I 50 (madrugada)	129
Tabela 6.25 - Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova (pista VI 70)...	130
Tabela 6.26 -Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (pista das VI 70).	130
Tabela 6.27 - Valores teóricos de resistência da pista das vigas I 70.....	131
Tabela 6.28 - Valores de Resistência x Id.Equivalente nos corpos de prova (VR 20x45).....	132
Tabela 6.29 - Valores reais e teóricos de resistências dos corpos de prova (VR 20 x 45)....	132
Tabela 6.30 - Valores teóricos de resistência da viga VR 20 x 45.....	133
Tabela 6.31 - Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova (P 30 x 50)	134
Tabela 6.32 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (P 30 x 50).....	134
Tabela 6.33 - Valores teóricos de resistência do pilar P 30 x 50.....	135

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2 CONCRETO PRÉ-MOLDADO	22
2.1 CONCRETO.....	22
2.2 CONCRETO PRÉ-MOLDADO	24
2.2.1 Definições	24
2.2.2 Aceno histórico e tendências futuras	25
2.2.3 Tipos de concreto pré-moldado.....	28
2.2.4 Vantagens e desvantagens.....	29
2.2.5 Produção do concreto pré-moldado	30
2.2.6 Fôrmas.....	32
2.2.7 Adensamento.....	33
2.2.8 Desenvolvimento da resistência à compressão	33
2.2.9 Módulo de elasticidade	34
2.3 CURA TÉRMICA	37
2.3.1 Efeitos da cura térmica.....	40
3 MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DO CONCRETO	43
3.1 MÉTODOS MAGNÉTICOS.....	43
3.2 MÉTODOS ELÉTRICOS	43
3.3 MÉTODOS RADIOATIVOS	44
3.4 MÉTODOS DE EMISSÃO ACÚSTICA	44
3.5 MÉTODO ECO-IMPACTO.....	44
3.6 MÉTODO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA	44
3.7 TERMOGRAFIA INFRA-VERMELHO	45

3.8	MÉTODOS NUCLEARES	45
3.9	<i>RADIO DETECTION AND RANGING (RADAR)</i>	45
3.10	MÉTODO DO ULTRA-SOM	46
3.11	MÉTODO DO ESCLERÔMETRO	47
3.12	MÉTODO DA PENETRAÇÃO DE PINOS	48
3.13	MÉTODO <i>PULL OFF</i>	48
3.14	MÉTODO DA MATURIDADE	49
3.14.1	Funções de Maturidade	51
3.14.2	Energia aparente de ativação.....	54
3.14.2.1	<i>Determinação da energia aparente de ativação</i>	56
3.14.3	Aplicação do Método da Maturidade na Construção Civil.....	60
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	64
4.1	FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS NA PROTENDIT	64
4.1.1	Caracterização dos Materiais	68
4.1.2	Ensaio de resistência à compressão	73
4.2	DETERMINAÇÃO DA ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO (E_A).....	73
4.3	REALIZAÇÃO DE ENSAIOS TÉRMICOS NO LCEC	75
4.3.1	Elaboração do concreto	75
4.3.2	Ensaio de cura térmica	76
4.3.3	Ensaio de resistência à compressão	78
4.3.4	Determinação do módulo de elasticidade	78
5	MONITORAMENTO DE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS.....	80
5.1	METODOLOGIA	80
5.2	VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA	82
5.3	VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 70 CM DE ALTURA	85
5.4	PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS PROTENDIDAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA (DIA)	89
5.5	PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS PROTENDIDAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA (MADRUGADA)	93
5.6	PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS PROTENDIDAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 70 CM DE ALTURA	97

5.7	VIGA ARMADA COM SEÇÃO TRANSVERSAL RETANGULAR DE 20 x 45 CM.....	101
5.8	PILAR ARMADO EM SEÇÃO RETANGULAR 30 x 50 CM.....	104
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE	108
6.1	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO.....	108
6.1.1	Energia aparente de ativação nas temperaturas de 10 °C, 30 °C e 55°C	109
6.1.2	Energia aparente de ativação nas temperaturas de 30°C, 55°C e 80°C	110
6.1.3	Energia aparente de ativação nas temperaturas de 10°C, 30°C, 55°C e 80°C	111
6.2	ELABORAÇÃO DAS CURVAS DE MATURIDADE NO LCEC.....	112
6.2.1	Realização do ciclo térmico após a elaboração dos corpos de prova.....	113
6.2.2	Realização do ciclo térmico após o tempo de início de pega.....	116
6.3	APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA	120
6.4	APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 70 CM DE ALTURA	122
6.5	APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS I 50 NO PERÍODO DIURNO	124
6.6	APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS I 50 NO PERÍODO NOTURNO.....	126
6.7	APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS I 70.....	129
6.8	APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À VIGA ARMADA VR 20 x 45	131
6.9	APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE AO PILAR ARMADO P 30 x 50	133
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	136
7.1	ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO	136
7.2	MONITORAMENTO DOS CICLOS TÉRMICOS NA EMPRESA PROTENDIT.....	137
7.2.1	Viga protendida em seção transversal I de 50 cm de altura.....	137
7.2.2	Viga protendida em seção transversal I de 70 cm de altura.....	138
7.2.3	Pista de concretagem da viga com seção transversal I de 50 cm durante o dia	139
7.2.4	Pista de concretagem da viga em seção transversal I de 50 cm durante a noite	142
7.2.5	Pista de concretagem da viga em seção transversal I de 70 cm de altura	145
7.2.6	Viga armada em seção retangular de 20 x 45 cm	146
7.2.7	Pilar armado em seção retangular de 30 x 50 cm	147

7.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE	147
7.4	TEMPO DE INÍCIO DE PEGA	150
7.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE	151
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	152
8.1	MONITORAMENTO DE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS <i>IN LOCO</i>	152
8.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE	153
8.3	ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO	153
8.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	154
	REFERÊNCIAS	155

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da construção civil permitiu o aprimoramento de técnicas empregadas em edificações, assim como o surgimento de novas tecnologias que, aliadas ao conhecimento técnico e científico, possibilitaram a dinamização dos processos de produção de estruturas de concreto. Os elementos de concreto pré-moldado surgem, então, como uma solução racional e segura à elaboração de projetos estruturais ousados, permitindo que os elementos estruturais sejam moldados fora do local definitivo da obra, utilizando-se da cura térmica para acelerar o endurecimento dos elementos estruturais.

Por serem confeccionadas em fábricas, as peças de concreto pré-moldado permitem o monitoramento do desenvolvimento da resistência à compressão, garantindo que os elementos sejam liberados à obra somente após atingirem as resistências estipuladas em projeto, evitando a ocorrência de colapsos estruturais. Para acelerar o desenvolvimento da resistência à compressão, é utilizada a cura térmica a vapor, com a obtenção de valores elevados de resistência às idades iniciais, facilitando as etapas de desfôrma e manuseio dos elementos estruturais.

O Método da Maturidade surgiu diante da necessidade de avaliar o desenvolvimento das propriedades do concreto quando submetido à cura térmica, considerando apenas a evolução das temperaturas do material ao longo do tempo.

Saul (1949) propôs um modelo de maturidade no qual o produto entre tempo e temperatura fosse capaz de relacionar o conceito de maturidade com as propriedades do concreto, destacando-se dentre elas a resistência à compressão do material.

Freiesleben-Hansen e Pedersen (1977), baseados no modelo de Arrhenius para a cinética das reações químicas, propuseram um novo modelo para o método, no qual as propriedades do concreto são expressas em termos de idades equivalentes a uma temperatura de referência (T_r), considerando um parâmetro relacionado à sensibilidade térmica da mistura, denominado energia aparente de ativação. Esse parâmetro representa o valor da energia

necessária para que os reagentes possam dar início a uma reação química, ou seja, é a diferença entre os níveis de energia dos reagentes e o estado de ativação da reação.

Para utilização do Método da Maturidade é necessário o conhecimento da evolução das temperaturas do concreto ao longo do ciclo térmico, assim como o valor da energia aparente de ativação determinada experimentalmente. A partir da elaboração de curvas de calibração em corpos de prova com a mesma composição do concreto utilizado na obra, é possível estimar os valores de resistência do elemento estrutural a partir do seu histórico de temperaturas, permitindo avaliar o tempo necessário para desfôrma dos elementos estruturais *in loco*. Assim, o método se apresenta como uma alternativa de ensaio não destrutivo para avaliação das propriedades do concreto que estejam relacionadas com o desenvolvimento do grau de hidratação.

Diante deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação da resistência à compressão de peças de concreto pré-moldado através da aplicação do Método da Maturidade durante a realização de ensaios de cura térmica junto à empresa Protendit, fabricante de elementos em concreto pré-moldado na cidade de São José do Rio Preto – SP, com a aquisição dos dados de tempo e temperatura dos elementos estruturais.

A partir dos dados de tempo e temperatura obtidos durante o monitoramento dos ciclos térmicos realizados pela Protendit, pôde-se aplicar o Método da Maturidade para estimar os valores teóricos de resistência à compressão, os quais foram obtidos através das curvas de maturidade elaboradas no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC).

A utilização de sondas termopares no interior do concreto durante a aplicação da cura térmica permitiu uma análise da distribuição de temperaturas nos elementos estruturais, evidenciando o aparecimento de gradientes térmicos e desenvolvimento diferenciado das propriedades mecânicas do concreto ao longo de um mesmo elemento pré-moldado.

Decorrentes do trabalho, foram também realizados os ensaios para determinação dos valores da energia aparente de ativação do concreto utilizado pela Protendit, segundo a metodologia proposta pela ASTM C 1074-98, adotando-se quatro condições isotérmicas de cura, a saber : 10°C, 30°C, 55°C e 80°C. Os valores de energia aparente de ativação obtidos experimentalmente permitiram verificar a influência do campo de temperaturas adotado para a realização dos ensaios. Os valores obtidos utilizando-se temperaturas menores foram maiores se comparados aos obtidos às temperaturas mais elevadas.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, contém, neste trabalho, outros sete capítulos distribuídos da seguinte maneira:

Capítulo 2 – Concreto Pré-Moldado: apresenta-se uma revisão literária sobre a história do concreto pré-moldado, abordando aspectos referentes às suas definições, etapas de produção, aplicação, vantagens e desvantagens, propriedades mecânicas e aplicação da cura térmica.

Capítulo 3 – Métodos de Ensaio Não Destrutivos do Concreto: neste capítulo são apresentados alguns métodos de ensaios não destrutivos, utilizados para estimar algumas propriedades do concreto, e as teorias sobre o Método da Maturidade e Energia Aparente de Ativação.

Capítulo 4 – Programa Experimental: Aborda a metodologia dos ensaios necessários à realização do trabalho.

Capítulo 5 – Monitoramento de Elementos Pré-Moldados: são apresentados os resultados obtidos durante o monitoramento dos elementos pré-moldados submetidos à cura térmica na Protendit, com aquisição dos dados referentes à distribuição de temperaturas e ensaios de resistência à compressão durante os ciclos térmicos.

Capítulo 6 – Aplicação do Método da Maturidade: este capítulo contém os resultados da aplicação do Método da Maturidade para estimar os valores da resistência à compressão do concreto *in loco*, a partir das curvas de calibração elaboradas no LCEC, assim como os resultados da energia aparente de ativação determinados experimentalmente segundo o procedimento ASTM C 1074-98.

Capítulo 7 – Análise dos Resultados e Discussões: é exposta a análise dos resultados obtidos durante a realização do trabalho, bem como as discussões necessárias ao entendimento dos mesmos.

Capítulo 8 – Considerações finais: discorre-se sobre os resultados obtidos no trabalho e apresentam-se propostas para realização de trabalhos futuros.

2 CONCRETO PRÉ-MOLDADO

2.1 CONCRETO

“O concreto surgiu com o desejo de se criar uma pedra artificial, resistente, econômica e durável como a pedra natural, e que apresentasse como vantagem a possibilidade de ser moldada nas dimensões e nas formas desejadas” (PINHEIRO *et al.*, 1986). Consiste numa combinação de aglomerante (cimento), agregados (areia, brita e cascalho) e água, apresentando a capacidade de suportar cargas depois de endurecido.

Kaefer (1998) relata a utilização de cimento e concreto ao longo da história:

12.000.000 a.C. – Israel: reações entre calcário e argila xistosa durante combustão espontânea formaram um depósito natural de compósitos de cimento. Este é o cimento natural, o primeiro a ser utilizado pelo homem;

4.000 a.C. – Iraque: escavações arqueológicas revelaram vestígios de uma construção executada parcialmente em concreto;

3.000 a.C. a 2.500 a.C. – Egito: uso de barro misturado com palha para fabricação de tijolos (secos ao ar livre) e de argamassas de gipsita e de cal na construção das pirâmides;

500 a.C. – Atenas: apesar de o cimento e a argamassa não terem sido usados na Grécia para a construção de paredes ou fundações, o cimento hidráulico já era conhecido desde o começo do século V a.C. e foi utilizado para revestir fontes atenienses desse período;

300 a.C. a 476 d.C – Império Romano: o concreto foi usado na construção dos muros de uma cidade romana no século IV a.C. situada a 64 km de Roma. No século II a.C. este material começou a ser usado em edificações de Roma. A pozolana de Pozzuoli (Itália), localidade próxima ao Monte Vesúvio, foi utilizada em argamassas para construir a Via Ápia, os banhos romanos, o Coliseu e o Pantheon.

Idade Média: os arquitetos medievais utilizaram pedras na maioria de suas construções. Somente nos edifícios mais importantes eram utilizadas fundações com um concreto resistente constituído por pedregulhos e argamassa de cal. Este período não trouxe

inovações para o emprego de argamassas e concretos, pelo contrário, a qualidade dos materiais cimentícios decaiu, extinguindo-se o uso da cal pozolânica. Inovações expressivas só começaram a ocorrer no século XVIII no que se refere ao uso de cimentos e argamassas.

Segundo Olin *et al.* (1995), um fabricante de tijolos, Joseph Aspdin, residente na cidade de Leeds (Inglaterra) formulou um novo tipo de cimento a partir da queima de calcário e argila, moídos e misturados a altas temperaturas até que o gás carbônico (CO_2) fosse retirado. O material obtido era moído, adquirindo a aparência de pó. Aspdin denominou este cimento como cimento Portland em homenagem às jazidas de excelente pedra para construção existentes na cidade de Portland (Inglaterra), obtendo sua patente em 21 de outubro de 1824.

A definição moderna de cimento Portland não poderia ser aplicável ao produto que Aspdin patenteou. O cimento Portland atual é produzido a partir da queima de uma mistura definida de rocha calcária e argila, finamente moídas, resultando no clínquer. É duvidoso que o cimento produzido por Aspdin tenha sido queimado a uma temperatura suficiente para produzir clínquer e, além disso, sua patente não define as proporções dos ingredientes empregados na mistura, dificultando afirmar se o cimento produzido em 1824 possui as mesmas características do que é produzido atualmente.

O surgimento oficial do concreto é datado de 1849, com a construção do barco de concreto armado pelo francês Joseph Louis Lambot (VASCONCELOS, 1992). Numa tentativa de evitar os problemas com a manutenção de canoas de madeira, optou-se pela durabilidade e pouca manutenção do concreto em meios aquáticos. O barco era produzido com uma malha de barras metálicas finas com a função de dar forma à peça e servir de suporte à fixação do concreto, evitando fissuração. Na Figura 2.1 é ilustrado um dos barcos de Lambot, com aproximadamente 4 m de comprimento por 1,3 m de largura e 4 cm de espessura.

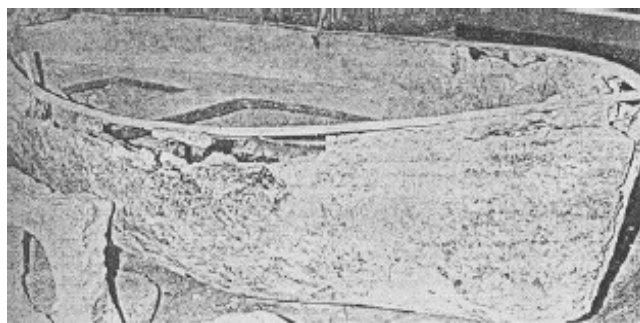


Figura 2.1 - Remanescente de um barco de Lambot
Fonte: Kaefer (1998)

Ao longo da história, a viabilidade da utilização do concreto é devida a vários fatores, dentre os quais a facilidade de se encontrar os materiais que o compõem a um custo baixo, além de facilidades em sua execução, adaptação a vários tipos de fôrma e resistência à água. Além disso, o concreto permite a adição de novos materiais em sua composição tais como fibras de aço, fibras de polipropileno, fibras de borracha, sílica ativa, cinzas volantes, atuando sobre características específicas do material.

Vargas (*apud* VASCONCELOS, 1992) afirma que o primeiro edifício em concreto armado no Brasil (na época denominado cimento armado) foi construído na cidade de São Paulo à Rua Direita nº 7, projetado pelo arquiteto Francesco Notaroberto entre 1907 e 1908.

Com o desenvolvimento tecnológico surgiram diferentes tipos de concreto, como concreto armado, concreto protendido, concreto compactado com rolo, concreto projetado, concreto massa, concreto leve, concreto pesado, concreto com fibras e concreto pré-moldado, entre outros, com características que visam atender às condições de projeto da estrutura.

Segundo Mehta (1994), “o concreto é o material estrutural dominante hoje em dia. No futuro, para selecionar os materiais de construção os engenheiros considerarão não somente os atrativos técnicos e econômicos dos materiais, mas também as implicações ecológicas e de conservação de energia do uso destes materiais. A julgar pelos parâmetros possíveis de estimar, o futuro do concreto deverá ser ainda melhor, porque o material parece possuir as mais fortes qualificações gerais para uso estrutural. Comparado a outros materiais de construção, o concreto não é apenas energeticamente mais eficiente, mas também ecologicamente harmônico. A aplicação em larga escala dos princípios da Ciência dos Materiais à tecnologia de produção do concreto oferece a expectativa de que no futuro o produto será consideravelmente superior em resistência, elasticidade e tenacidade do que o disponível atualmente”.

2.2 CONCRETO PRÉ-MOLDADO

2.2.1 Definições

A pré-moldagem é caracterizada como um processo de construção em que a obra ou parte dela é moldada fora do local definitivo de utilização, estando relacionada a dois termos: a pré-fabricação e a industrialização da construção.

Segundo Ordóñez (1974): “...a industrialização da construção é o emprego, de forma racional e mecanizada, de materiais, meios de transporte e técnicas construtivas, para se conseguir uma maior produtividade”. Koncz (1975) define a pré-fabricação como “...um método industrial de construção em que os elementos fabricados, em grandes séries, por métodos de produção em massa, são montados na obra, mediante equipamentos e dispositivos de elevação”.

A pré-fabricação e a pré-moldagem são conceitos distintos, ainda que relacionados entre si. Pode-se dizer que a pré-moldagem aplicada à produção em grande escala resulta na pré-fabricação, que, por sua vez, é uma maneira de se atingir a industrialização da construção. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1985) por meio da NBR-9062/85, define concreto pré-fabricado como aquele “...executado industrialmente, mesmo em instalações temporárias em canteiro de obra, sob condições rigorosas de controle de qualidade”. Para concreto pré-moldado, a mesma norma define como sendo aquele “...executado fora do local de utilização definitiva na estrutura”, com controle de qualidade menos rigoroso que o do elemento pré-fabricado.

2.2.2 Aceno histórico e tendências futuras

A primeira obra a ser empregada a pré-moldagem foi o cassino de Biarritz (França) em 1891, com a utilização de vigas pré-moldadas de concreto, conforme ilustrado pela Figura 2.2.



Figura 2.2 - Cassino de Biarritz (França)

Entre o final do Século XIX e início do Século XX, houve um aumento na utilização de concreto armado na Construção Civil, desencadeando também o aparecimento das

aplicações de elementos pré-moldados de concreto (KONCZ, 1966). Algumas obras importantes na história dos pré-moldados estão relacionadas a seguir:

- **1895:** a construção de *Weavne's Mill* é considerada a primeira construção de estrutura aporticada com concreto pré-moldado na Inglaterra (ELLIOTT, 1996);
- **1900:** surgem os elementos de grandes dimensões para coberturas nos Estados Unidos (estes elementos tinham 1,20 m de altura, 5,10 m de largura e 0,05 m de espessura e foram colocadas sobre estrutura metálica) (EL DEBS, 2000);
- **1905:** são executados elementos de piso para um edifício de quatro andares nos Estados Unidos (EL DEBS, 2000);
- **1906:** começam a ser executados na Europa os primeiros elementos pré-fabricados: as vigas treliça Visintini e estacas de concreto armado (EL DEBS, 2000);
- todas as peças para as construções de um edifício industrial foram pré-moldadas no canteiro, nos Estados Unidos, pela Edson Portland Co., pertencente ao inventor Thomas Alva Edson (EL DEBS, 2000);
- surgem as primeiras aplicações do processo *Tilt-up* nos Estados Unidos, no qual as paredes são moldadas sobre o solo e depois levantadas para a posição vertical (EL DEBS, 2000);

Após o final da Segunda Guerra Mundial, em 1945, houve um impulso na utilização de elementos pré-moldados na Europa, principalmente em construções como galpões, habitações e pontes. As causas desse impulso foram a necessidade de construção em grande escala, escassez de mão-de-obra e o desenvolvimento da tecnologia do concreto protendido. Esse desenvolvimento concentrou-se inicialmente na Europa Ocidental e, posteriormente, estendeu-se para a Europa Oriental.

No Brasil, o emprego da pré-moldagem teve início em 1925, com a fabricação das estacas para a fundação do Jockey Clube do Rio de Janeiro (VASCONCELOS, 1988). Embora haja aplicação da pré-moldagem em qualquer campo de construção no Brasil, ela ainda é limitada.

O emprego da pré-moldagem está diretamente relacionado ao grau de desenvolvimento de um país, assim como a fatores regionais. A Figura 2.3 fornece o consumo de concreto pré-moldado por habitante em alguns países desenvolvidos e uma comparação com o Brasil.

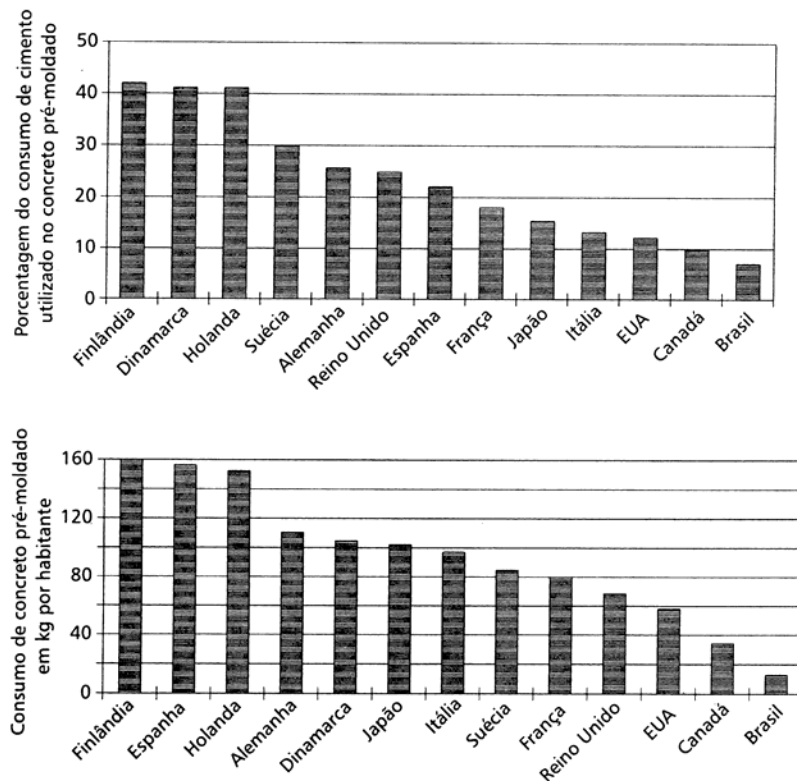


Figura 2.3 - Índices de consumo de concreto pré-moldado

Fonte: Tupamaki *apud* El Debs (2000)

Sua aplicação tem sido mais intensa em construção de galpões e em certos componentes como elementos de laje, estacas, postes e tubos circulares de concreto para drenagem e esgotos.

Nas edificações, a pré-moldagem é empregada em estruturas de edifícios industriais, comerciais e habitacionais, assim como em equipamentos urbanos de uso múltiplo, como hospitais, terminais rodoviários e ferroviários. Na construção pesada é utilizada em pontes de grande porte e túneis, além de ser empregada em obras portuárias e usinas hidrelétricas.

Quanto às tendências de aplicação do concreto pré-moldado, merecem destaque os seguintes itens:

- automatização do projeto,
- aumento do uso do concreto arquitetônico,
- automatização do uso de elementos de uso intensivo, e
- utilização do concreto de alto desempenho (CAD).

2.2.3 Tipos de concreto pré-moldado

Segundo El Debs (2000), os elementos pré-moldados podem ser classificados quanto à seção transversal, processo de execução e função estrutural. Dentre os tipos de concreto pré-moldado, é possível destacar: pré-moldado de fábrica, pré-moldado de canteiro, pré-moldado de seção completa, pré-moldado de seção parcial, pré-moldado pesado, pré-moldado leve, pré-moldado normal e pré-moldado arquitetônico.

O **pré-moldado de fábrica** é executado em instalações permanentes distantes da obra. Esse tipo de pré-moldado pode ou não atingir o nível de pré-fabricado, segundo o critério da NBR-9062/85. A capacidade de produção da fábrica e a produtividade do processo, que dependem dos investimentos em fôrmas e equipamentos, podem ser pequenas ou grandes. A questão do transporte das peças até a obra deve ser observada quanto aos gabaritos de transporte e custos.

O **pré-moldado de canteiro** é executado em instalações temporárias nas proximidades da obra, com baixa capacidade de produção. Por estarem próximas à obra, não há restrições quanto ao transporte, além de que os elementos estruturais são isentos de impostos referentes à produção industrial e à circulação de mercadorias.

Quanto ao gênero da seção utilizada, tem-se o **pré-moldado de seção completa**, executado de forma que sua seção resistente é formada fora do local de utilização definitivo. Eventualmente, na aplicação deste tipo de pré-moldado, pode ocorrer o emprego do concreto moldado no local, em ligações ou como regularização, mas não visando ampliar a seção resistente.

O **pré-moldado de seção parcial** é inicialmente moldado apenas com parte da seção resistente final, sendo posteriormente completada na posição de utilização definitiva com concreto moldado no local, originando um elemento composto.

Os critérios para classificação quanto ao peso é subjetivo e circunstancial. Entretanto, ela é importante no desenvolvimento de projetos em que se emprega a pré-moldagem, uma vez que está relacionada aos equipamentos de transporte e montagem. O **pré-moldado pesado** apresenta pesos acima de 5 kN (500 kgf) e o **pré-moldado leve** é caracterizado por peças de até 0,3 kN (30 kgf), de modo que os elementos compreendidos entre 0,3 kN e 5 kN são classificados como elementos de peso médio (HASS, *apud* EL DEBS, 2000). O pré-moldado leve é aquele que não necessita de equipamentos especiais para transporte e montagem, podendo-se improvisar os equipamentos ou até mesmo atingir a situação em que a montagem possa ser manual.

Quanto à aparência, os elementos pré-moldados podem ser divididos em normal e arquitetônico. O **pré-moldado normal** é aquele em que não há preocupação em relação à aparência do elemento. Por outro lado, o **pré-moldado arquitetônico** possui uma forma especial ou padronizada que contribui na forma arquitetônica ou em efeito de acabamento da construção, podendo ou não ter finalidade estrutural.

As dimensões e formas dos elementos estruturais de concreto pré-moldado podem ser adequadas de acordo com as necessidades de projeto, assim como ilustrado pela Figura 2.4, com algumas denominações dos elementos pré-moldados de uso mais comum.

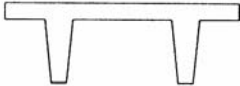
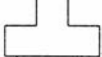
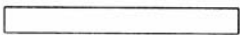
Lajes e paredes	Vigas e pilares
 Painel alveolar	 Seção retangular
 Painel TT ou π	 Seção I
 Painel U	 Seção T invertido
 Painel maciço	 Seção quadrada vazada

Figura 2.4 - Denominações dos elementos pré-moldados de uso mais comum
Fonte: El Debs (2000)

2.2.4 Vantagens e desvantagens

As vantagens da pré-moldagem estão relacionadas à execução de parte da estrutura fora do local definitivo de utilização, como consequência das facilidades da produção dos elementos e da eliminação ou da redução do cimbramento.

Para produção em grandes séries, em fábricas, as vantagens decorrentes das facilidades de execução são bem mais significativas. Entre outras, essas vantagens são: reutilização das fôrmas, emprego de protensão com armadura pré-tracionada, emprego de seções com melhor aproveitamento de materiais, maior produtividade da mão-de-obra e maior controle de qualidade. Além disso, a pré-moldagem assume relevância em países de clima

muito frio, nos quais há dificuldade de execução de concreto moldado no local da obra (EL DEBS, 2000).

As desvantagens estão relacionadas à disposição final dos elementos na obra, assim como a providência das ligações entre os mesmos. O transporte das peças sofre algumas limitações, surgindo a necessidade de adaptação aos gabaritos de transportes existentes.

A utilização do concreto pré-moldado pode atuar no sentido de reduzir o custo dos materiais das estruturas de concreto. Entretanto, na fração relativa às fôrmas, o custo é mais representativo, conferindo maior custo do que o concreto convencional.

2.2.5 Produção do concreto pré-moldado

A produção dos elementos estruturais de concreto pré-moldado envolve desde a etapa de execução dos elementos até a sua disposição final na obra, com suas respectivas ligações. A execução dos elementos pré-moldados pode ser dividida em três fases: atividades preliminares, execução propriamente dita e atividades posteriores, englobando as seguintes etapas:

Atividades preliminares:

a) Preparação dos materiais: nesta fase ocorre a dosagem do concreto e a preparação das armaduras, como corte e dobramento das barras de aço;

b) Transporte dos materiais ao local de trabalho: ocorre o transporte do concreto e das armaduras até as fôrmas.

Execução propriamente dita:

a) Preparação da fôrma e da armadura: envolve a limpeza da fôrma e aplicação de óleo desmoldante, colocação da armadura e aplicação de cargas de protensão, quando for o caso de concreto protendido;

b) Moldagem: lançamento do concreto nas fôrmas e realização de adensamento mecânico;

c) Cura do concreto: período em que o concreto permanece na fôrma para adquirir a resistência de desfôrma;

d) Desmoldagem: é a etapa que envolve a retirada dos elementos de suas fôrmas.

Atividades posteriores:

a) Transporte interno: é o transporte do elemento do local de moldagem até o local de armazenamento;

b) Acabamentos finais: envolve atividades de investigação e reparo de alguns detalhes, como por exemplo, bolhas que ficam expostas após a concretagem;

c) Armazenamento: período no qual os elementos permanecem na fábrica até serem enviados à obra.

Durante o processo de produção, a execução das peças de concreto podem ser feitas em fôrmas estacionárias ou móveis. A execução em fôrmas estacionárias corresponde àquela em que as atividades se desenvolvem em torno das fôrmas, que permanecem na mesma posição desde a concretagem até a desmoldagem.

A execução em fôrmas móveis é caracterizada pela movimentação das fôrmas, onde as diversas etapas do processo são realizadas em estações por equipes estacionárias (produção seriada). Na Figura 2.5 é ilustrado um esquema para execução de painéis com fôrma móvel.

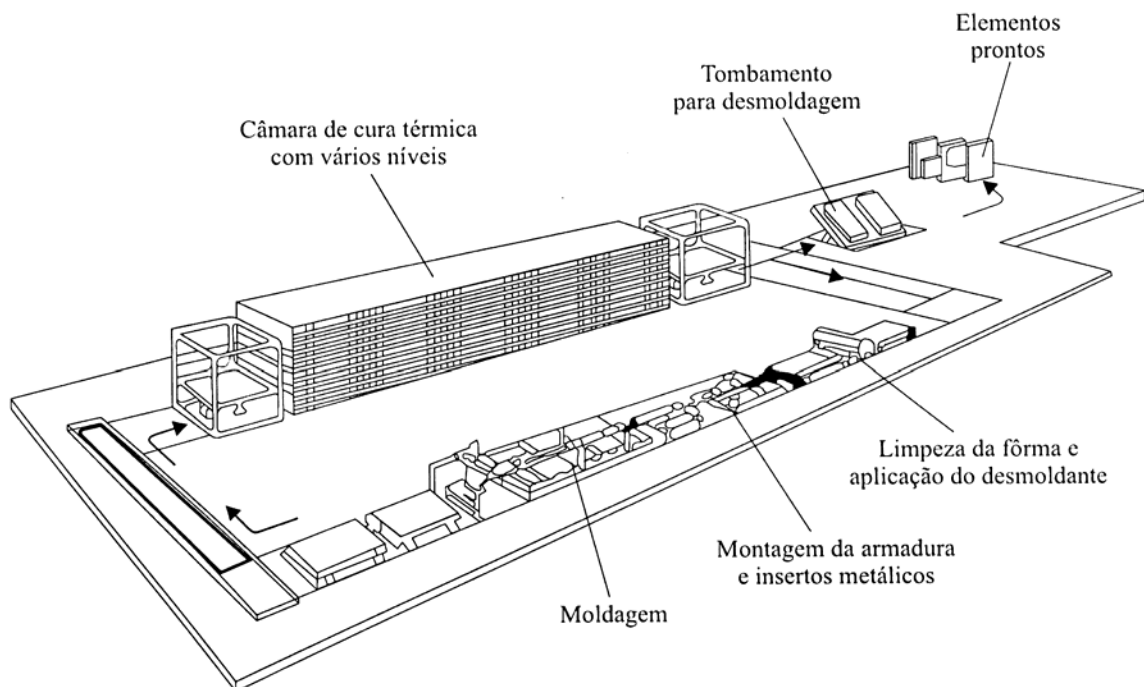


Figura 2.5 - Exemplo de execução de painéis com fôrma móvel
Fonte: Komar *apud* El Debs (2000)

2.2.6 Fôrmas

Durante a produção, as fôrmas determinam a forma, a qualidade e a produtividade do processo. Segundo El Debs (2000), espera-se que as fôrmas apresentem as seguintes qualidades:

- a) estabilidade volumétrica, com pouca variação das dimensões de projeto,
- b) possibilidade de reutilização, reduzindo custos,
- c) fáceis de serem manuseadas,
- d) apresentar pouca aderência com o concreto e fácil limpeza,
- e) facilidade de desmoldagem,
- f) estanqueidade, evitando perda da nata de cimento,
- g) versatilidade, possibilitando seu uso em várias seções transversais.

As fôrmas de concreto pré-moldado necessitam apresentar boa versatilidade, reduzindo custos e dinamizando a produção. A Figura 2.6 mostra como uma seção TT (duplo T) pode ser transformada em outros tipos de seção.

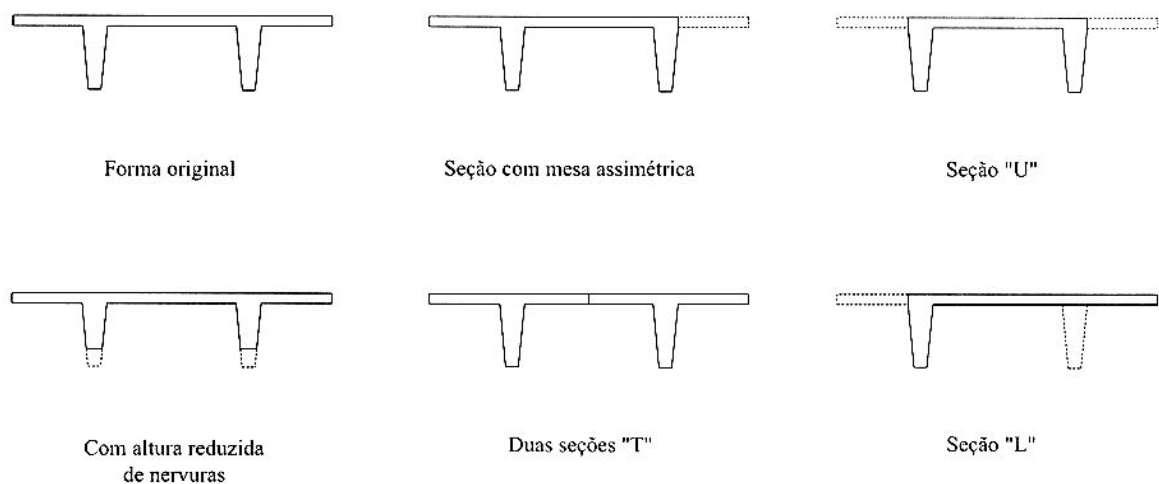


Figura 2.6 - Seções transversais possíveis de serem obtidas com fôrma para seção T T

Fonte: El Debs (2000)

Quanto ao material, as fôrmas podem ser feitas de:

- a) madeira,
- b) aço,
- c) plástico reforçado com fibra de vidro.

As fôrmas de madeira apresentam menores custos, menor reutilização e necessitam de maior manutenção. As de aço apresentam maior custo, grande número de reutilizações e não necessitam de muita manutenção.

2.2.7 Adensamento

O adensamento é responsável pela redução do número de vazios no interior da massa de concreto, resultando em uma matriz menos porosa, contribuindo para obtenção de resistências à compressão segundo os valores de projeto. Em estruturas de pré-moldados, essa etapa é responsável pela qualidade e produtividade do processo.

A dosagem dos elementos estruturais de concreto pré-moldado é realizada com cimentos especiais, destacando os cimentos Portland de alta resistência inicial (cimentos ARI). Para atingir valores satisfatórios de resistências, é necessário que a relação água/cimento (a/c) seja baixa, o que diminui os índices de consistência da mistura, tornando importante um controle adequado sobre as técnicas de adensamento, de forma a garantir a qualidade do concreto. Quanto aos processos de adensamento, pode-se destacar os seguintes:

- a) vibração,
- b) centrifugação,
- c) prensagem, e
- d) vácuo.

O mais utilizado é o adensamento por vibração, podendo ser interna, com a utilização de vibradores de agulha, ou externa, com o auxílio de mesas vibratórias.

2.2.8 Desenvolvimento da resistência à compressão

O conhecimento do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto faz-se necessário durante qualquer processo construtivo, inclusive na elaboração do cronograma de obras. A retirada das fôrmas e do escoramento, a aplicação de cargas construtivas ou de serviço e a aplicação de cargas de protensão são alguns exemplos de atividades construtivas que devem ser planejadas após o concreto ter adquirido alguma resistência (PINTO *et al.*, 2002).

O comitê 347 do ACI (1994) recomenda uma resistência à compressão em torno de 70% da resistência de projeto para a desfôrma e retirada do escoramento de elementos

horizontais. Assim, espera-se que o elemento estrutural contenha rigidez e resistência suficientes para que não ocorram deformações ou fissurações excessivas na peça. Além disso, o conhecimento do desenvolvimento da resistência do concreto torna-se importante para evitar acidentes tais como o colapso da torre de resfriamento de Willow Island (EUA), que provocou a morte de 51 pessoas (HALVORSEN *et al.*, 1985; LEW, 1980), causado pela insuficiência da resistência do concreto, atingindo valores inferiores aos de projeto, devido à ocorrência de temperaturas baixas logo após a concretagem.

Para os elementos de concreto pré-moldado, as formas possíveis de acelerar o desenvolvimento da resistência à compressão são:

- a) utilização de cimento de alta resistência inicial (cimento ARI);
- b) aumento da temperatura de cura;
- c) incorporação de aditivos.

2.2.9 Módulo de elasticidade

Qualquer tensão é acompanhada de uma deformação e vice-versa (NEVILLE, 1997). Como muitos outros materiais, o concreto é elástico dentro de certos limites. Um material é considerado perfeitamente elástico se as deformações surgem e desaparecem imediatamente após a aplicação ou retirada de tensões. Essa definição não implica linearidade entre tensões e deformações, pois alguns materiais como o vidro e algumas rochas apresentam comportamento elástico não linear com relação à tensão-deformação. A Figura 2.7 representa esquematicamente a relação tensão-deformação de uma peça de concreto carregada e descarregada por compressão ou tração até uma tensão bem menor da resistência final. Nos ensaios de compressão, às vezes se encontra uma pequena concavidade para cima no início do carregamento. Pela Figura 2.7 pode ser visto que a expressão módulo de elasticidade pode, a rigor, ser aplicada somente à parte retilínea da curva tensão-deformação, ou, quando não existir uma parte retilínea, à tangente da curva na origem. Esse é o módulo de elasticidade inicial, mas de importância prática limitada.

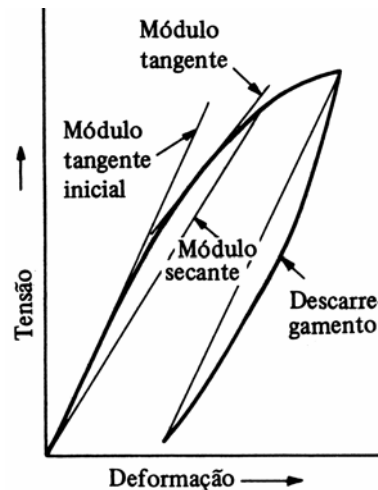


Figura 2.7 - Representação da relação entre tensão e deformação do concreto
Fonte: Neville (1997)

O aumento da deformação enquanto a carga estiver atuando é devido à fluência do concreto, mas a dependência entre a deformação instantânea e a velocidade de carregamento tornam difícil o estabelecimento do limite entre deformações elásticas e deformações por fluência. O módulo de elasticidade que satisfaz a este requisito é o módulo secante. O comportamento dos concretos de alta resistência apresenta interesse também com relação aos diversos níveis de tensão. A uma mesma relação tensão/resistência, quanto mais resistente for o concreto, menor será a sua deformação (NEVILLE, 1997), assim como ilustrado pela Figura 2.8.

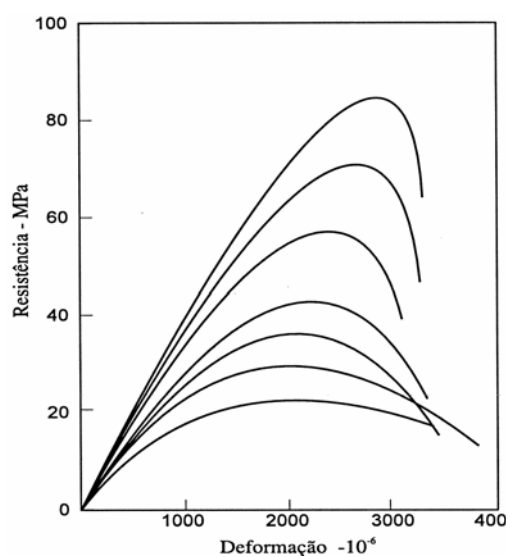


Figura 2.8 - Exemplos de relação entre tensão e deformação de corpos de prova cilíndricos de concretos com resistência de até 85 MPa
Fonte: Neville (1997)

O módulo de elasticidade aumenta com a resistência do concreto, embora não exista uma forma exata que relacione essa dependência, pois o módulo de elasticidade do concreto depende do módulo de elasticidade do agregado e da proporção em volume do agregado na mistura (NEVILLE *et al.*, 1983), assim como ilustrado pela Figura 2.9.

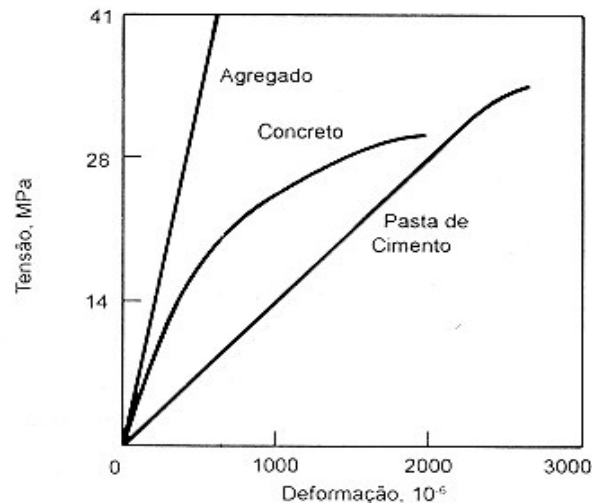


Figura 2.9 - Comportamento tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto
Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

A qualidade da aderência entre as duas fases é importante e pode influenciar o valor do módulo de elasticidade do concreto quando essa aderência é forte, como nos concretos de alto desempenho, principalmente com adição de sílica ativa.

O emprego do módulo de elasticidade do concreto é muito importante em obras de construção civil, pois representa um fator de proporção que possibilita estimar as deformações a partir do conjunto de tensões aplicadas, assim como determinar as tensões atuantes a partir dos dados de deslocamentos permissíveis da estrutura.

A NBR-6118 (2003) recomenda que o módulo de elasticidade do concreto seja calculado a partir da Equação 2.1:

$$E_{ci} = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (2.1)$$

na qual:

E_{ci} = módulo de elasticidade inicial do concreto (MPa);

f_{ck} = resistência característica do concreto aos 28 dias (MPa).

O módulo de elasticidade secante, utilizado nas análises elásticas de projeto, deve ser calculado, pela mesma norma, pela Equação 2.2:

$$E_{cs} = 0,85E_{ci} \quad (2.2)$$

na qual:

E_{ci} = módulo de elasticidade inicial do concreto (MPa);

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto (MPa).

2.3 CURA TÉRMICA

A cura é a denominação dada aos procedimentos que ocorrem para promover a hidratação do cimento, consistindo em controlar a temperatura e umidade do concreto. Seu objetivo é manter o concreto saturado até que os espaços da pasta de cimento, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento. A cura com água é necessária para garantir o melhor grau de hidratação possível e para obter a maior resistência e a menor permeabilidade possível (NEVILLE, 1997).

A cura térmica difere do modo convencional de cura por utilizar uma temperatura superior à temperatura ambiente. Seu objetivo principal é o desenvolvimento da resistência suficientemente alto para que o concreto possa ser manuseado às primeiras idades.

Camarini (1995) sugere a divisão da cura térmica em quatro etapas:

a) Espera (período preliminar): período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento. Deve ser igual ao tempo de pega do cimento.

b) Elevação da temperatura: deve ser controlada até atingir o valor desejado. A taxa recomendada é de 20°C/h.

c) Regime isotérmico (período de temperatura constante): período em que a temperatura desejada deve ser mantida por algumas horas. Esse regime é variável em função do tipo de aglomerante empregado.

d) Esfriamento: é a redução da temperatura até que se atinja a temperatura ambiente. A taxa recomendada é de 20°C/h.

El Debs (2000) sugere um ciclo térmico com as mesmas etapas do ciclo proposto por Camarini (1995), diferenciando apenas com relação ao gradiente de esfriamento, da ordem de $10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, assim como ilustrado pela Figura 2.10.

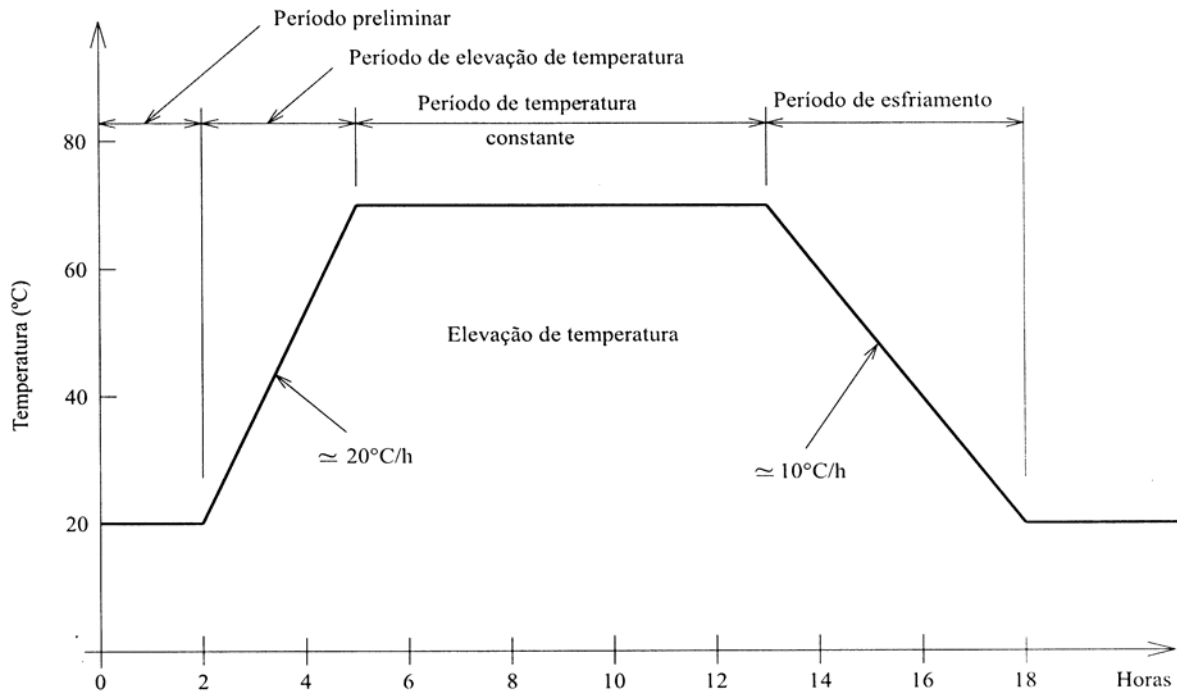


Figura 2.10 - Ciclo típico de cura a vapor
Fonte: El Debs (2000)

Os ciclos térmicos são adotados de forma que o concreto adquira as resistências definidas em projeto, respeitando o tempo disponível para a realização dos mesmos. O ciclo envolve a etapa de pré-aquecimento, num intervalo de 2 a 5 h, seguida de aquecimento à taxa de 22°C/h a 44°C/h até atingir a temperatura máxima do ciclo, compreendida entre 50°C e 82°C , seguido de esfriamento do material, de modo que o tempo total do ciclo não ultrapasse 18 h (ACI, 1992). Entretanto, quando for necessário a obtenção de valores elevados de resistências iniciais para critérios de desfôrma, pode-se empregar uma temperatura máxima de cura da ordem de 85°C (TÜRKEL e ALABAS, 2005).

Segundo Mindess e Young (1981), as temperaturas constantes de cura térmica podem estar compreendidas entre 40°C e 100°C . No entanto, os melhores resultados foram obtidos para temperaturas compreendidas entre 65°C e 85°C .

A aplicação do ciclo térmico logo após a moldagem de peças de concreto é capaz de prejudicar algumas propriedades do concreto, tais como resistência e durabilidade. Shideler e

Chamberlin (1949) mostraram que um período de espera de 2 a 6 h antes do início da cura térmica, dependendo da temperatura, foi responsável por um aumento de resistência da ordem de 15 a 40 %, se comparadas com os valores obtidos para concretos curados termicamente logo após a moldagem.

Hanson (1963) observou que para os períodos de espera variando de 1 a 5 h, as resistências à compressão obtidas foram maiores, entretanto foi observado o aparecimento de fissuras horizontais no concreto submetido à cura térmica com período de espera de 1 h.

Mironov (1964) sugeriu que o período de espera fosse adotado de maneira que o concreto não apresentasse dilatações durante a aplicação do ciclo térmico, estabelecendo um período no qual o concreto apresentasse uma resistência à compressão da ordem de 0,7 a 0,8 MPa.

Alexanderson (1972) afirma que as dilatações podem ser desprezadas para períodos de espera entre 4 e 7 horas, dependendo da relação água / cimento (a/c), e que nenhuma perda de resistência foi observada às idades avançadas. A baixa qualidade do concreto devido aos curtos períodos de espera é o resultado do aumento da porosidade e fissuração causadas pelas tensões de tração devidas à pressão interna nos poros.

Soroka *et al.* (1978) concluíram que a aplicação da cura térmica após 30 a 60 min da fase de moldagem apresenta redução da resistência à compressão do concreto.

A adoção de um tempo de espera igual ao tempo de início de pega justifica-se pelo fato de que durante o aquecimento, a temperatura do concreto é menor do que a temperatura da câmara térmica, necessitando de tempo para que a temperatura no interior do concreto se equilibre à temperatura da câmara. Se a aplicação da cura térmica se iniciar antes do tempo de início de pega, as porções externas (faces) do concreto enrijecerão rapidamente enquanto o interior do concreto ainda permanece em estado plástico. Com o aumento da temperatura interna, o concreto, ainda fresco, tentará expandir-se, exercendo pressões sobre as faces rijas do material, ocasionando o aparecimento de microfissuras e porosidade.

Quando o ciclo térmico é empregado após tempo de início de pega, o concreto possui resistência suficiente para evitar possíveis expansões e aparecimento de microfissuras (ERDEM *et al.*, 2003). Um acréscimo da temperatura de cura dentro do intervalo de 10°C a 50°C é responsável pela diminuição dos tempos de início e fim de pega (MOUNANGA, 2006).

Com relação aos elementos pré-moldados, a utilização de cura térmica é satisfatória por resultar na possibilidade de rápida desfôrma e manuseio, redução do tempo de cura e, conseqüentemente, redução da área de estoque, além do aumento da rotatividade das fôrmas.

2.3.1 Efeitos da cura térmica

“A cura térmica funciona como aceleradora das reações de hidratação do cimento. Uma temperatura mais alta durante e depois do contato inicial entre o cimento e a água reduz a extensão do período de latência de modo que a estrutura total da pasta de cimento hidratada se define mais cedo” (NEVILLE, 1997).

Durante o estágio inicial das reações de hidratação, a temperatura afeta não somente a taxa de hidratação, mas também as características e posicionamento dos produtos destas reações. Se a velocidade inicial de hidratação for alta não há tempo suficiente para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento e para uma precipitação uniforme nos espaços intersticiais, como o que ocorre a temperaturas inferiores (VERBECK e HELMUTH, 1968). Com a elevação da temperatura de cura, a taxa de hidratação diminui ao longo do tempo. A justificativa de uma forma simples é devido ao encapsulamento dos grãos anidros de clínquer durante os ciclos térmicos que dificulta o processo de hidratação posterior (ASAGA *et al.*, 1992).

Hasni *et al.* (1991) afirmam que temperaturas altas podem afetar a microestrutura do concreto, causando microfissuras em sua superfície. Quando a superfície do material perde calor para a atmosfera, há surgimento de gradientes de temperatura entre a superfície do concreto e o seu interior, resultando em uma dilatação térmica. Se a força de tração na superfície do elemento exceder a resistência à tração do concreto, há o aparecimento de fissuras (WALLER *et al.*, 2004).

De Melo *et al.* (2000) desenvolveram um estudo experimental, com o objetivo principal de analisar a redução na resistência final e os compostos hidratados, formados ao longo do tempo após a cura térmica. Considerou-se a influência das adições – escória de alto forno e sílica ativa – e da duração de ciclos térmicos que variam entre 3 horas e 12 horas. A análise da microestrutura foi baseada em observações feitas através da microscopia eletrônica de varredura - MEV. As imagens em MEV mostram que a queda na resistência mecânica para a amostra sob cura térmica está relacionada a uma ruptura na interface pasta-agregado, levando em conta que a ruptura ocorre no próprio agregado para a amostra sob cura normal, conforme ilustrado pelas Figuras 2.11 e 2.12. Destaca-se a presença dos vazios ao redor dos grãos anidros (não hidratados) de cimento à idade de 28 dias, facilitando a propagação de microfissuras.

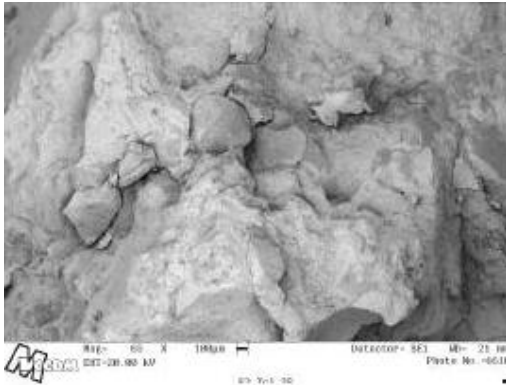


Figura 2.11 - Cura térmica com ciclo longo
Fonte: De Mello (2000)

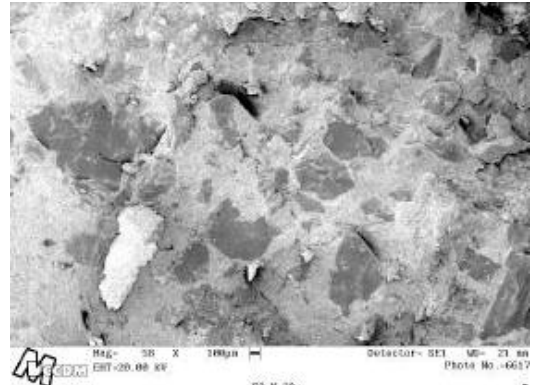


Figura 2.12 - Cura normal
Fonte: De Mello (2000)

Com relação ao desenvolvimento da resistência, Kanda *et al.* (1992) concluíram que aos 7 dias a resistência obtida é tanto maior quanto maior for a temperatura. No entanto, aos 28 dias, há uma inversão dos valores. A menor temperatura na cura conduz a uma resistência final maior do que o concreto curado a temperaturas elevadas, afirmando que a temperatura afeta a resistência última do material.

Segundo Aitcin (2000), o aumento da temperatura do concreto é função da quantidade de cimento que está realmente se hidratando, e não da quantidade total de cimento. Além do tipo de cimento, da quantidade de água da mistura e do efeito dos aditivos, o aumento de temperatura também depende de fatores geométricos e termodinâmicos, tais como forma e tamanho do elemento estrutural, temperatura ambiente e velocidade da troca de calor através das fôrmas e da superfície da peça.

Quando exposto às altas temperaturas, o concreto sofre mudanças na sua composição físico-química, assim como na quantidade de água presente no material. Tais mudanças ocorrem tanto na pasta de cimento endurecida como nos agregados. Altas temperaturas, de uma maneira geral, provocam perda gradual da água evaporável do concreto, proporcionando o aparecimento de reações de desidratação da pasta de cimento, assim como a conversão do hidróxido de cálcio em óxido de cálcio. Além disso, os agregados perdem sua água evaporável e, dependendo da sua composição, sofrem transformação cristalina. O agregado silicoso contendo quartzo, por exemplo, sofre uma expansão de volume e os agregados de calcário sofrem descarbonatação, expelindo grandes quantidades de gás dióxido de carbono. As altas pressões de poro produzidas por expansões de volume de vários tipos (térmicas e conversão cristalina) conduzem à microfissuração e fragmentação do concreto (VELASCO, 2002).

Com a prolongação do aquecimento, os componentes básicos do concreto (silicato de cálcio hidratado – CSH, géis de aluminato de cálcio – $\text{Ca}(\text{AlO}_2)_2$ e hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$) podem ser desintegrados, resultando na deterioração das propriedades físico-químicas do concreto (VODÁK *et al.*, 2004).

Assim, diante das influências da elevação da temperatura sobre as propriedades físico-químicas do concreto, é necessário a realização de estudos antes de submeter o concreto à cura térmica, para que as características desejadas durante a fase de projeto do elemento estrutural não sejam comprometidas.

3 MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DO CONCRETO

Existem alguns métodos para a realização de ensaios não destrutivos para determinar a resistência do concreto, que podem ser empregados oferecendo uma boa margem de confiança desde que sejam observadas as curvas de calibração do ensaio, relacionando os parâmetros dos ensaios não destrutivos com as propriedades do material.

3.1 MÉTODOS MAGNÉTICOS

São utilizados para detectar a posição do aço dentro do concreto. Os aparelhos baseiam-se no princípio de que a presença do aço afeta um campo eletromagnético. Eles dão informações sobre o cobrimento, o diâmetro e a localização das armaduras (ACI-364,1993; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Esses equipamentos são portáteis e apresentam bons resultados quando o concreto é pouco armado. No caso de elementos muito armados, o efeito da armadura secundária não pode ser eliminado, dificultando uma determinação satisfatória do cobrimento.

3.2 MÉTODOS ELÉTRICOS

Os métodos elétricos têm sido utilizados em estruturas de concreto para investigar corrosão das armaduras, espessura de lajes e o teor de umidade (MALHOTRA,1984; ACI-364,1993).

A avaliação do estado das armaduras com relação à corrosão é feita por meio da estimativa do potencial elétrico da armadura em relação ao eletrodo de referência. O método de determinação da espessura das lajes baseia-se no princípio de que o material sujeito ao ensaio oferece resistência à passagem da corrente elétrica que passa através dele. O

fundamento adotado para estimar o teor de umidade do concreto é que a condutividade do material varia com a mudança do teor de umidade.

3.3 MÉTODOS RADIOATIVOS

Por meio da radiografia é obtida a imagem do interior do concreto empregando-se uma fonte radioativa para revelar a posição e as condições das armaduras, dos vazios, das segregações, do grauteamento nas bainhas dos elementos protendidos, e das fissuras.

As medições são obtidas pela radiação que passa pela massa de concreto, ou por meio da radiação que é refratada na mesma superfície pela colisão dos elétrons dentro do material.

3.4 MÉTODOS DE EMISSÃO ACÚSTICA

Nos últimos anos este método tem sido usado nas investigações da iniciação e do crescimento de fissura no material sob tensão. Emissões acústicas são ondas de pequena amplitude geradas por deformações localizadas em pontos que estão além do seu limite elástico. Durante o crescimento das fissuras ou deformação plástica, a liberação rápida da energia de deformação produz ondas acústicas que podem ser detectadas por sensores em contato com a superfície do elemento ensaiado (ACI-364,1993).

3.5 MÉTODO ECO-IMPACTO

Técnicas de reflexão de pulsos são usadas principalmente nas análises de ondas que contornam os vazios e descontinuidades internas do concreto. A reflexão pode ser gerada por golpes de martelo ou por outros meios mecânicos (MALHOTRA,1984; ACI-364,1993).

A vantagem deste ensaio é que pode ser realizado quando apenas uma face da superfície do material está disponível. Porém, a interpretação das ondas obtidas no osciloscópio não é fácil e depende da experiência do operador.

3.6 MÉTODO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

Neste método determina-se a frequência fundamental de ressonância do corpo de prova, podendo-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. A vibração pode

ser aplicada em modo longitudinal, transversal ou torsional, com frequência variável num intervalo de 10 Hz a 10 kHz (NEVILLE, 1997).

3.7 TERMOGRAFIA INFRA-VERMELHO

Por meio deste ensaio são medidas e gravadas emissões de calor da estrutura. Como a taxa de emissão de calor é influenciada pelas fissuras e outras descontinuidades, os *scanners* mostram a diferença entre a emissão de calor dos concretos sem e com descontinuidades (BUNGEY, 1989).

Este método tem sido usado para determinar deteriorações em chaminés e tabuleiros de pontes. Os resultados dos ensaios são influenciados pelas condições do concreto, como, por exemplo, teor de umidade.

3.8 MÉTODOS NUCLEARES

Estes métodos são aplicados para estimar os teores de umidade e de cimento do concreto endurecido. Eles baseiam-se na dispersão de nêutrons para determinação do teor de umidade e na ativação de nêutrons para determinar o teor de cimento. No caso do teor de umidade parte-se do princípio de que os nêutrons perdem velocidade quando se colidem com o núcleo do hidrogênio presente na água (ACI-364,1993).

3.9 RADIO DETECTION AND RANGING (RADAR)

Este método é baseado no princípio da reflexão de ondas eletromagnéticas através do concreto. Pode-se com ele detectar vazios, e também medir a espessura dos pavimentos.

Pode ser usado quando apenas uma superfície está disponível, porém o equipamento é caro, e torna-se necessário um bom planejamento de ensaio e prática para avaliação dos resultados. A Figura 3.1 ilustra os instrumentos utilizados para este tipo de ensaio.

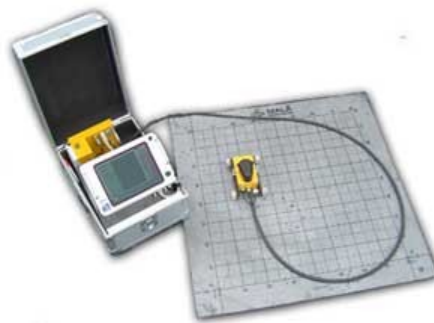


Figura 3.1 - Aparelhagem para o ensaio RADAR

3.10 MÉTODO DO ULTRA-SOM

A velocidade de ondas ultra-sônicas transitando em um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas do material (PUNDIT MANUAL, 1994). O método baseia-se no fato de que a velocidade de propagação das ondas é influenciada pela qualidade do material. O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultra-sônicas através do material, entre o emissor e o receptor. O comprimento percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação, resulta na velocidade média de propagação da onda. O amparato do ensaio é ilustrado pela Figura 3.2.



Figura 3.2 - Aparelho de Ultra-som

A velocidade da onda depende principalmente dos seguintes fatores: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica do concreto e também da presença de armadura (POPOVICS *et al.*, 1995).

O equipamento para este ensaio é de fácil operação e de custo não muito elevado. O ensaio correspondente a este método é completamente não destrutivo, e pode avaliar o

concreto em toda a espessura do elemento estrutural (SWAMY e AL-HAMED, 1984; PHOON, 1999).

Popovics (2001) ressalta que não há uma relação teórica entre resistência e velocidade de propagação nem mesmo para materiais homogêneos e linearmente elásticos.

Dos ensaios *in loco*, o método do ultra-som é um dos que apresentam as menores variações. O coeficiente de variação para o ensaio realizado em laboratório é da ordem de 2% (MALHOTRA, 1984).

3.11 MÉTODO DO ESCLERÔMETRO

Este método é conhecido como *rebound hammer method*. O método consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de forma padronizada, usando-se uma determinada massa com uma dada energia e medindo o valor do ricochete, ou seja, o índice esclerométrico (I.E.). O ricochete depende do valor da energia cinética antes do impacto e quanto desta energia é absorvida durante o impacto, pois parte da energia é absorvida na fricção mecânica do equipamento, e a outra parte na interação entre a barra de percussão e o concreto. A energia absorvida está relacionada à resistência e à rigidez do concreto (ACI 228, 1989). Esse tipo de ensaio é melhor ilustrado pela Figura 3.3.



Figura 3.3 - Ensaio por esclerometria

Tem-se verificado que não há uma correlação única entre o valor do índice esclerométrico e a resistência à compressão, devido à influência de vários fatores nessa relação tais como tipo e quantidade de cimento, natureza do agregado, maturidade e teor de umidade do concreto (FOCAOARU, 1984). O equipamento é leve, simples de se operar e

barato, sendo que uma grande quantidade de dados pode ser obtida rapidamente. Os danos que podem ser causados na superfície são praticamente nulos.

Como limitação tem-se que os resultados estão relacionados a uma determinada zona superficial do concreto (profundidade de cerca de 30 mm), sendo que após 3 meses há influência da carbonatação do concreto (BS1881:Part 202,1986). De acordo com Teodoru (1988), os resultados são representativos para uma camada de 30 mm a 50 mm.

3.12 MÉTODO DA PENETRAÇÃO DE PINOS

O método consiste no disparo de pinos com uma pistola, que penetram no concreto. Segundo o ACI 228 (1989), a essência do método envolve a energia cinética inicial do pino e a absorção de energia. O pino penetra no concreto até que sua energia cinética inicial seja totalmente absorvida. Parte da energia é absorvida pela fricção entre o pino e o concreto, e outra parte na fratura do concreto. A profundidade da penetração dos pinos é usada para estimar a resistência do concreto usando-se curvas de calibração. A estimativa de resistência apresenta precisão em torno de 15 a 20 % (MALHOTRA,1984).

3.13 MÉTODO *PULL OFF*

Neste método, um disco circular metálico é inicialmente colado no concreto. Uma força de tração é posteriormente aplicada a este disco usando-se um sistema mecânico portátil, até o concreto a ele colado romper.

A força de tração que causou a ruptura, em conjunto com as curvas de calibração baseadas num grande número de ensaios laboratoriais, torna possível obter uma estimativa da resistência à compressão do concreto (LONG e MURRAY,1984).

Este tipo de ensaio é simples e não necessita de um operador altamente qualificado. Não têm sido verificados problemas em utilizar este ensaio em superfície vertical ou em vigas e lajes, pois mostra-se também adequado para elementos estruturais de pequena seção. A aparelhagem para este tipo de ensaio é ilustrada pela Figura 3.4. Segundo a BS 1881: Part 201 (1986), é possível estimar a resistência à compressão com acurácia de 15%.



Figura 3.4 - Método *Pull Off*

3.14 MÉTODO DA MATURIDADE

As origens do método da maturidade podem ser traçadas a partir da Inglaterra diante dos processos de cura térmica (McINTOSH, 1949; NURSE, 1949; SAUL, 1951), com a necessidade de um procedimento para avaliar os efeitos do binômio tempo *versus* temperatura sobre o desenvolvimento da resistência para diferentes condições de cura térmica. Foi proposto então que o produto entre o tempo e temperatura poderia ser utilizado para obter uma relação satisfatória dessa dependência.

Na realidade, o conceito de maturidade é bem mais abrangente e pode ser aplicado a concretos de qualquer resistência e ao desenvolvimento de diversas propriedades mecânicas ou físicas do material (PINTO, 2000).

McIntosh (1949) sugeriu que a taxa de ganho de resistência do concreto é diretamente proporcional à diferença entre a temperatura do material e a temperatura abaixo da qual as reações de hidratação não ocorrem, indicando a temperatura de $-1,1^{\circ}\text{C}$ para esta última temperatura.

Nurse (1949) sugeriu que o produto de tempo e temperatura seria capaz de acessar os efeitos da cura térmica sobre a resistência à compressão, acreditando que este procedimento fosse capaz de relevar diversos agregados e misturas.

Saul (1951) relaciona o conceito de maturidade com a resistência à compressão, dando origem à Lei do Ganho de Resistência com Maturidade, que se transcreve a seguir:

“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”.

Mediante isso, a influência da temperatura do concreto no desenvolvimento da sua resistência pode vir a ser substituída pela utilização do conceito de maturidade. Como exemplo ilustrativo, uma mistura de concreto que apresente fator $a/c = 0,30$ fornecerá diversas curvas para o desenvolvimento de sua resistência à compressão em função do tempo para cada temperatura do material conforme ilustrado pela Figura 3.5.

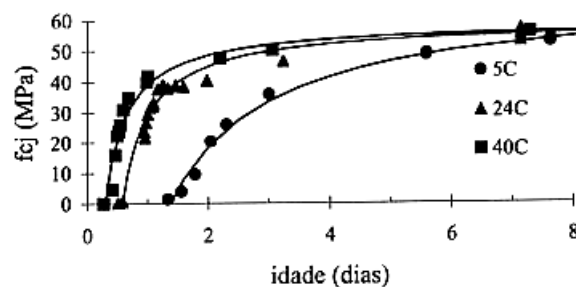


Figura 3.5 - Influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão para uma mistura de concreto com fator $a/c = 0,30$
Fonte: Pinto (2000)

Quando o concreto é submetido a uma temperatura elevada de cura, a sua resistência final pode ser afetada devido ao rápido rearranjo dos produtos das reações de hidratação, com diminuição na eficiência de suporte de cargas. Os produtos não possuem tempo suficiente para se distribuírem uniformemente na matriz em formação, favorecendo uma maior porosidade na estrutura.

Diante disto, Carino (1991) propõe 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 tem aproximadamente a mesma resistência **relativa** qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o grau de maturidade”.

Assim, a curva da Figura 3.6 representa melhor essa situação, onde o efeito da temperatura não é mais relevante no desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo.

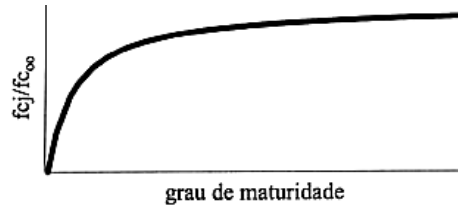


Figura 3.6 - Desenvolvimento da resistência relativa à compressão com a maturidade
Fonte: Pinto (2000)

Na utilização do método da maturidade, é necessário o conhecimento prévio do desenvolvimento da resistência ao longo do tempo em pelo menos uma condição isotérmica de cura. Para as outras condições isotérmicas, o ganho de resistência é estimado a partir de funções de maturidade, relacionando os parâmetros tempo e temperatura. A temperatura é a única variável que afeta o desenvolvimento da resistência ao longo do tempo. A composição dos materiais, proporção da mistura, condições de umidade, ou outros fatores que possam influenciar o ganho de resistência, não são considerados.

3.14.1 Funções de Maturidade

O fator de maturidade pode ser calculado a partir do histórico de tempo e temperatura de cura, utilizando a lei de maturidade conforme mostra a Equação 3.1, conhecida como a função de Nurse-Saul:

$$M(t_n) = \sum_{i=1}^n (T_i - T_o) \cdot \Delta t_i \quad (3.1)$$

na qual:

$M(t_n)$ = fator de maturidade à idade t_n (°C.h);

Δt_i = intervalo de tempo (h);

T_i = média da temperatura em um intervalo de tempo Δt_i (°C);

T_o = temperatura de base (°C).

A função de Nurse-Saul é baseada em observações empíricas, e não representa corretamente o efeito da temperatura de cura sobre o ganho de resistência quando amostras de diferentes concretos são colocadas em temperaturas distintas durante as primeiras idades. Entretanto, é muito difundida devida sua simplicidade (CARINO, 1991).

O índice de maturidade a uma idade t^* , calculado pela Equação 3.1, equivale à área compreendida entre a curva de temperatura e a temperatura de base, como ilustrado pela Figura 3.7.

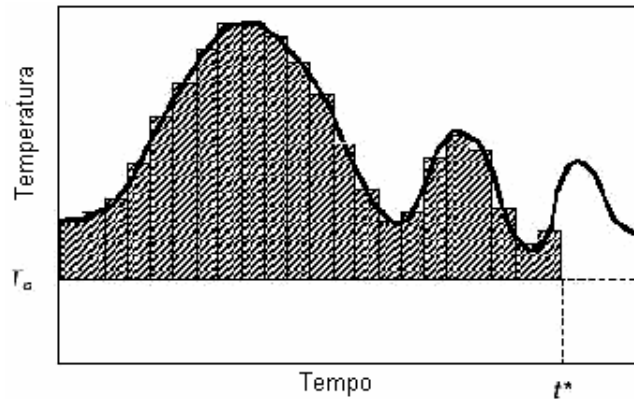


Figura 3.7 - Desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo
Adaptado de: Carino e Lew (2001)

Rastrup (1954) introduziu o termo idade equivalente - t_e , admitindo que o concreto atinge o mesmo grau de maturidade que atingiria caso fosse mantido a uma temperatura de referência até a idade t_e . Usualmente utiliza-se a temperatura de 20°C como temperatura de referência. Neste caso, calcula-se o tempo necessário para atingir-se o mesmo grau de maturidade que seria atingido caso a temperatura durante a cura do concreto permanecesse constante a 20°C.

Arrhenius introduziu o conceito de energia aparente de ativação (E_a) em equações químicas para quantificar a energia necessária para que os reagentes pudessem se transformar em produtos (ATKINS, 1994). Assim, a velocidade de uma reação química é função de uma taxa constante k_T conforme a Equação 3.2:

$$k_T = A \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (3.2)$$

na qual:

k_T = constante de velocidade à temperatura T;

E_a = energia aparente de ativação (J/mol);

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

T = temperatura absoluta (K);

A = constante ou fator de frequência.

Freiesleben-Hansen e Pedersen (*apud* CARINO, 1991), baseados no modelo de Arrhenius (ATKINS, 1994) para cinética das reações, definiram uma função de maturidade a partir da relação entre as velocidades de hidratação do cimento na temperatura desejada e na temperatura de referência (T_r), segundo a Equação 3.3:

$$\frac{k_T}{k_{Tr}} = \frac{A \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)}}{A \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{RT_r}\right)}} = e^{\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right)} \quad (3.3)$$

na qual:

k_T = constante de velocidade à temperatura T ;

k_{Tr} = constante de velocidade à temperatura T_r .

T = temperatura absoluta (K);

T_r = temperatura de referência (K);

E_a = energia aparente de ativação (J/mol);

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

A = constante ou fator de frequência.

Segundo Pinto (2000), o fator de frequência A é utilizado para quantificar a probabilidade de que as colisões ocorram em direções favoráveis ao início da reação, com os átomos posicionados de maneira a possibilitar novas ligações.

Em idade equivalente, a função de maturidade de Freiesleben-Hansen e Pedersen (*apud* CARINO, 1991) assume a forma da Equação 3.4:

$$t_{e(n)} = \sum_{i=1}^n e^{\left[-\frac{E_a}{R} \left(\left(\frac{1}{T_i}\right) - \left(\frac{1}{T_r}\right)\right)\right]} \cdot \Delta t_i \quad (3.4)$$

na qual:

$t_{e(n)}$ = idade equivalente à temperatura de referência T_r (h);

E_a = energia aparente de ativação (J/mol);

T_i = média da temperatura em um intervalo de tempo Δt (K);

T_r = temperatura de referência (K);

Δt_i = intervalo de tempo (h);

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

A função de Freiesleben-Hansen e Pedersen (*apud* CARINO, 1991), embora seja de maior complexidade, é a que representa melhor o efeito real da temperatura na velocidade das reações de hidratação do cimento. Entretanto, para sua utilização, é necessário o conhecimento prévio da energia aparente de ativação das reações de hidratação do cimento.

A ASTM C 1074 (1998) fornece o procedimento para se estimar a resistência do concreto por meio do Método da Maturidade. Este procedimento pode ser usado para estimar *in loco* a resistência do concreto, permitindo executar atividades tais como remoção das fôrmas, aplicação de cargas de protensão, etc. As limitações mais significativas para este procedimento são, segundo esta norma:

- a) O concreto deve ser mantido em condições que permitem a hidratação do cimento;
- b) O método não prevê, a longo prazo, os efeitos da temperatura na qual o concreto foi submetido nas primeiras idades;
- c) O método necessita ser acrescido de outras indicações da resistência potencial da mistura de concreto.

3.14.2 Energia aparente de ativação

Em uma colisão, a quantidade de energia necessária para produzir uma reação química recebe o nome de energia aparente de ativação (E_a). O termo aparente é utilizado para designar um valor médio dessa energia para as reações que apresentem processos distintos ocorrendo simultaneamente. Para algumas reações, essa energia é grande. Tais reações são lentas, pois uma pequena fração das partículas reagentes tem energia cinética suficiente para desencadear o processo. Reações com valores pequenos de energia aparente de ativação são rápidas, indicando uma fração maior de colisões efetivas, com a maioria das partículas possuindo energia cinética suficiente para se transformarem em produtos.

Em reações exotérmicas, como a hidratação do cimento, os reagentes estão num estado de energia superior ao dos produtos, logo, a energia aparente de ativação é a diferença entre o nível de energia necessária para a ocorrência da reação e o nível de energia dos reagentes, ou seja, é a energia que os reagentes devem adquirir para dar início à reação. A Figura 3.8 ilustra, qualitativamente, a definição de energia aparente de ativação para as reações de hidratação do cimento.



Figura 3.8 - Esquema de energia aparente de ativação para reações exotérmicas

Plane e Sienko (1977) elucidam os fatores que influenciam a velocidade das reações:

- a) dependência da natureza dos reagentes químicos;
- b) concentração dos reagentes, visto que o número de colisões aumenta quando se aumenta a concentração;
- c) temperatura, pois um aumento de temperatura faz as moléculas moverem-se mais depressa, aumentando a frequência das colisões;
- d) presença de catalisadores, tornando as colisões mais efetivas.

Freiesleben-Hansen e Pedersen (1977) sugerem valores de energia aparente de ativação relacionando-os com a temperatura do concreto (T_c), num intervalo de -10°C a 80°C :

- $T_c \geq 20^{\circ}\text{C}$ (68°F): $E(T_c) = 33,50 \text{ k J/mol}$
- $T_c < 20^{\circ}\text{C}$ (68°F): $E(T_c) = 33,50 + 1,47 (20 - T_c) \text{ k J/mol}$

Em muitos casos, os valores de energia aparente de ativação de Freiesleben-Hansen e Pedersen (1977) são utilizados, independente do tipo de cimento utilizado ou suas adições minerais.

Jonasson *et al.* (1995) propõem uma formulação, conforme a Equação 3.5, para avaliar os valores de energia aparente de ativação para os padrões dos cimentos suíços. Foi observado que para um concreto a uma temperatura de 20°C , os valores de energia aparente de ativação foram superiores em, aproximadamente, 32% em relação aos valores obtidos pela formulação de Freiesleben-Hansen e Pedersen (1977).

$$E_a(T_c) = 44,066 \cdot \left(\frac{30}{10 + T_c} \right)^{0,45} \quad (3.5)$$

na qual:

E_a = energia aparente de ativação (kJ/mol);

T_c = temperatura do concreto (°C).

Carino (1991) observou que a maioria dos valores estão compreendidos entre 41 kJ/mol e 67 kJ/mol, variando de acordo com os materiais cimentícios utilizados na mistura, enquanto a ASTM (1998) recomenda, para misturas de cimento Tipo I, valores de energia aparente de ativação entre 40 e 45 kJ/mol, sem adições minerais.

Barbosa *et al.* (2005) avaliaram os valores de energia aparente de ativação para os cimentos fabricados no Brasil, assim como a variação desse parâmetro com a adição de sílica ativa, nas proporções de 8 e 16 % sobre a massa de cimento, conforme dispostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores de E_a para cimentos brasileiros

Tipo de cimento	Energia aparente de ativação (kJ/mol)		
	0% de sílica	8% de sílica	16% de sílica
CP-I-S	35,4	-	-
CP-II-F-32	31,4	32,1	34,8
CP-II-Z-32	31,3	32,5	35,7
CP-III-S	20,4	27,1	40,2
CP-IV-RS	50,4	52,9	56,1
CP-V-ARI	43,9	39,6	42,4

Fonte: Barbosa *et al.* (2005)

Os valores de energia aparente de ativação são característicos de cada tipo de concreto, e estão relacionados com as suas composições e respectivas adições químicas e minerais.

3.14.2.1 Determinação da energia aparente de ativação

A determinação experimental dos valores de energia aparente de ativação para argamassas de concreto é realizada a partir dos processos que se encontram na Norma

Americana ASTM C 1074-98 (*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*) em seu anexo *Determination of Datum Temperature or Activation Energy*.

Os ensaios são realizados com argamassas com a mesma composição do concreto, em corpos de prova cúbicos (5x5x5 cm), submetidos à cura em, pelo menos, três condições isotérmicas distintas. Os ensaios de resistência à compressão têm início quando a argamassa atinge 4 MPa, aproximadamente. As rupturas seguintes serão realizadas em valores múltiplos da idade que apresentou resistência de 4MPa. Por exemplo, se a argamassa necessitar 6 horas para atingir 4MPa, as rupturas posteriores serão às idades de 12h, 24h, 48h, 96h e 192h, totalizando seis valores de resistência à compressão em função do tempo.

A ASTM C 1074-98 baseia-se na lei de Arrhenius (ATKINS, 1994), segundo a Equação 3.6:

$$k_T = A_t \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (3.6)$$

na qual:

k_T = constante de velocidade à temperatura T;

A_t = fator de frequência das reações à idade t;

E_a = energia aparente de ativação (J/mol);

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

T = temperatura absoluta (K).

Pode-se linearizar a equação acima, aplicando-se o logaritmo neperiano à igualdade da Equação 3.6, obtendo-se a Equação 3.7:

$$\ln(k_T) = \ln\left(A_t \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}}\right) \rightarrow \ln(k_T) = \ln(A_t) - \frac{E_a}{RT} \quad (3.7)$$

Reordenando a Equação 3.7, observa-se de forma mais clara a relação linear entre $\ln(k_T)$ e $1/T$, segundo a Equação 3.8.

$$\ln(k_T) = \frac{-E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + \ln(A_t) \quad (3.8)$$

onde o gráfico de $\ln(k_T) \times (1/T)$ resultará em uma reta cuja inclinação é $-E_a/R$.

O procedimento ASTM C 1074 assume um comportamento para o desenvolvimento da resistência à compressão das argamassas com o tempo em condições isotérmicas, como o expresso pela Equação 3.9. (CARINO e LEW, 2001).

$$S_T = Su_T \cdot \frac{k_T(t - t_o)}{1 + k_T(t - t_o)} \quad (3.9)$$

na qual:

S_T = resistência à idade t ;

Su_T = resistência limite;

k_T = constante de reação para uma condição isotérmica de cura;

t_o = tempo necessária para início do desenvolvimento da resistência;

t = tempo.

O procedimento ASTM C 1074 permite obter k_T com o uso de programas estatísticos de regressão não linear que forneçam os parâmetros k_T , Su_T e t_o presentes na Equação 3.9, para cada temperatura de cura.

Alternativamente, pode-se calcular estas constantes com o seguinte procedimento aproximado:

A partir da Equação 3.9, o cálculo da resistência limite (Su_T) da argamassa se faz considerando os quatro pontos com idades mais avançadas aproximando a parcela $t - t_o$ por apenas para t . Após essa consideração e alguns rearranjos matemáticos, a Equação 3.9 pode ser expressa pela Equação 3.10, na forma característica da equação da reta ($y = a \cdot x + b$).

$$\frac{1}{S_T} = \frac{1}{Su_T \cdot k_T} \cdot \frac{1}{t} + \frac{1}{Su_T} \quad (3.10)$$

Com a elaboração de um gráfico de $1 / S_T$ x $1 / t$, como ilustrado pela Figura 3.9 segundo a relação da Equação 3.10, é possível a obtenção de $1 / Su_T$ pela determinação do coeficiente linear da reta. O valor de Su_T deve ser determinado para todas as condições isotérmicas do ensaio.

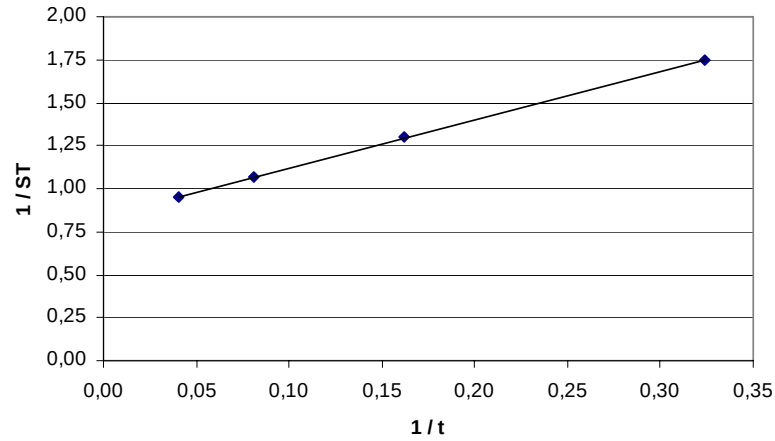


Figura 3.9 - Gráfico $1 / S_T \times 1 / t$

Os valores de k_T são então determinados a partir da Equação 3.9, aplicada aos primeiros quatro pontos do ensaio. Após alguns rearranjos, a Equação 3.9 assume a forma da equação de uma reta de acordo com a Equação 3.11.

$$\frac{S_T}{S_{u_T} - S_T} = k_T \cdot t - k_T \cdot t_o \quad (3.11)$$

A partir da confecção de um gráfico de $S_T / (S_{u_T} - S_T) \times t$, ilustrado na Figura 3.10, o valor de k_T é obtido como sendo o coeficiente angular da reta. Esse procedimento é realizado para todas as condições isotérmicas adotadas para o ensaio.

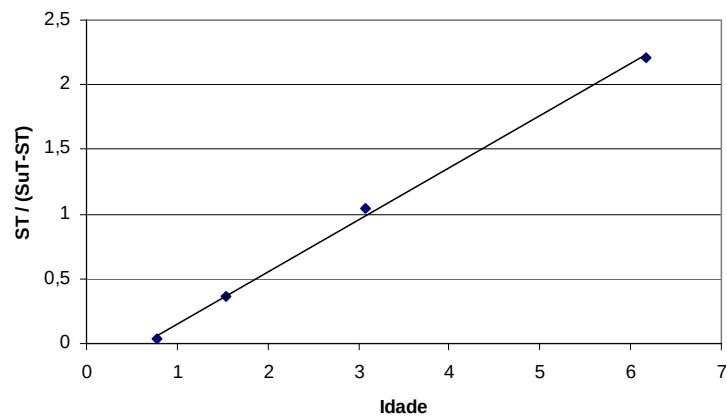


Figura 3.10 - Gráfico $S_T / (S_{u_T} - S_T)$

Com os valores de k_T obtidos para cada temperatura de ensaio, confecciona-se um gráfico de $\ln(k_T) \times 1 / T$, com T expressa em Kelvin, como ilustrado pela Figura 3.11. O coeficiente angular da reta fornece o valor de $-E_a / R$, com a determinação do valor da energia aparente de ativação (E_a) da mistura em J/mol.

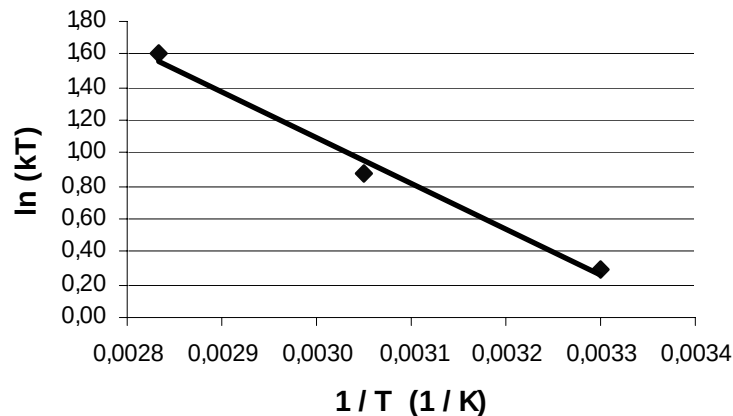


Figura 3.11 - Gráfico $\ln(k_T) \times 1 / T$

3.14.3 Aplicação do Método da Maturidade na Construção Civil

Os procedimentos a seguir apresentam, de forma explicativa e ilustrativa, a aplicação do Método da Maturidade, através do uso da equação de Freiesleben-Hansen e Pedersen (1977), com etapas realizadas em laboratório e *in loco*.

1ª etapa: Ensaios de Laboratório:

1º passo:

Recorre-se à determinação da energia aparente de ativação (E_a) através de ensaios em corpos-de-prova cilíndricos em concretos, ou em cubos em argamassa (1). Esses são acondicionados em ambientes climatizados com temperatura controlada, em pelo menos três condições isotérmicas distintas (2). Realizam-se as rupturas dos corpos-de-prova para cada uma das condições, através do procedimento ASTM C 1074-98, conforme ilustrado pela Figura 3.12.



Figura 3.12 - Esquema para determinação da energia aparente de ativação (E_a)

2º passo:

São moldados corpos-de-prova cilíndricos de concreto com o mesmo traço a ser utilizado na obra. Estes são submetidos a um determinado tipo de cura, onde a temperatura e o tempo são monitorados, fornecendo o histórico de temperaturas, assim como ilustrado anteriormente pela Figura 3.13.

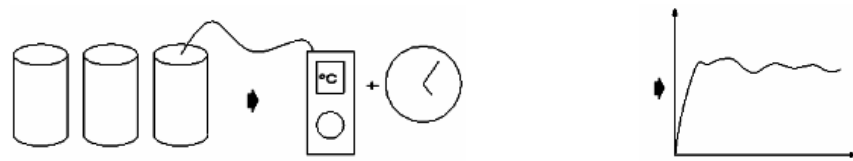


Figura 3.13 - Monitoramento de tempo e temperatura dos corpos de prova

3º passo:

Estabelecem-se as idades de rupturas durante o processo de cura, e confecciona-se o gráfico das idades reais (laboratório) com os respectivos valores das resistências, como ilustrado pelo gráfico da Figura 3.14.

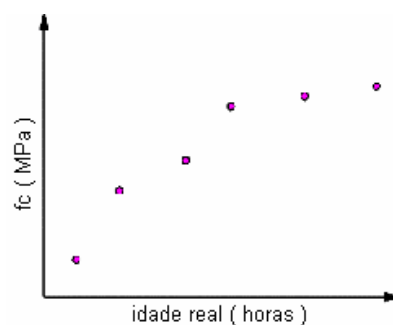


Figura 3.14 - Gráfico Resistência x Idade, obtido em laboratório

4º passo:

Através da equação de Freiesleben-Hansen e Pedersen (Equação 3.4), do histórico de temperaturas, e as respectivas resistências, elabora-se o gráfico de Resistência x Idade Equivalente, como apresentado na Figura 3.15.

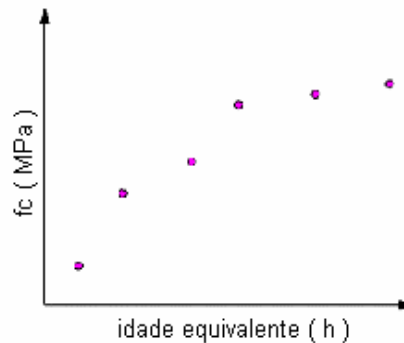


Figura 3.15 - Gráfico Resistência x Idade Equivalente a uma temperatura de referência T_r

5º passo:

É traçada uma linha de tendência que melhor se ajuste aos dados, obtendo assim uma função contínua, como ilustrado pela Figura 3.16.

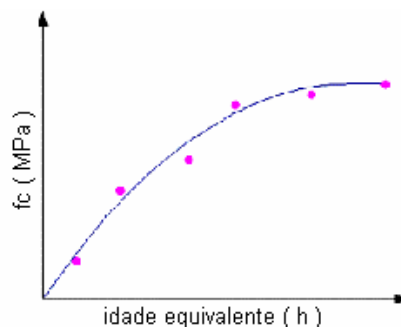


Figura 3.16 - Gráfico Resistência x Idade Equivalente a uma temperatura de referência (T_r) acrescido de linha de tendência obtido em laboratório

2º etapa: Ensaios “*in loco*”

1º passo:

Durante a concretagem das peças são instalados termopares em partes da estrutura para registro da temperatura. Assim, é realizado o monitoramento dos parâmetros tempo e temperatura, gerando o histórico da temperatura *in loco*, como ilustrado pela Figura 3.17.

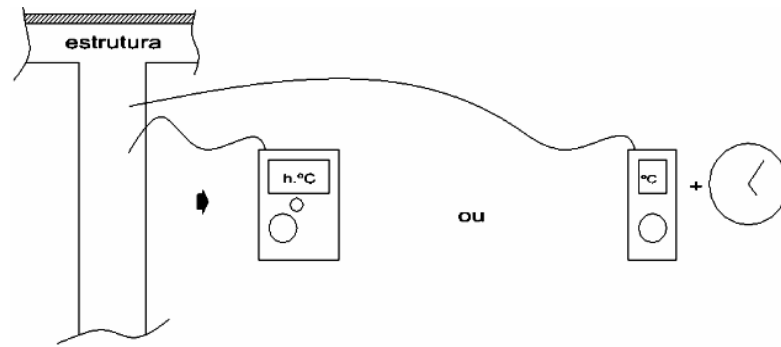


Figura 3.17 - Monitoramento da estrutura

2º passo:

Através do histórico de temperatura *in loco*, pode-se transformar a idade real da estrutura em termos de idade equivalente a uma temperatura de referência (T_r), segundo a Equação 3.4, obtendo a resistência da estrutura segundo os conceitos de Freiesleben-Hansen e Pedersen, como ilustrado pela Figura 3.18.

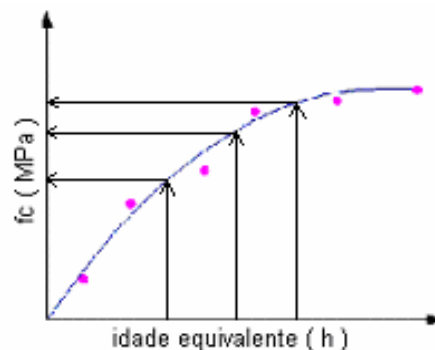


Figura 3.18 - Obtenção das resistências através de curvas de idade equivalente

Assim, o método é capaz de fornecer valores teóricos de resistência à compressão do elemento estrutural a partir dos valores de temperaturas monitorados *in loco*, considerando as oscilações térmicas da estrutura e seus efeitos sobre as reações de hidratação decorrentes dos processos de cura.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O aprendizado e avaliação dos processos de fabricação de elementos pré-moldados foram realizados junto à Pré-Moldados Protendit de São José do Rio Preto – SP, com a obtenção dos dados do concreto utilizado pela empresa tais como a composição do concreto, processo de mistura dos materiais, moldagem, processos de cura, desfôrma, acabamento das peças e disposição final dos elementos estruturais. O mesmo concreto foi reproduzido nos laboratórios da Universidade Estadual Paulista (Unesp) e no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), ambos na cidade de Ilha Solteira – SP, para aquisições de dados necessários à aplicação do Método da Maturidade para avaliar o desenvolvimento da resistência à compressão dos elementos pré-moldados.

4.1 FABRICAÇÃO DE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS NA PROTENDIT

Definidas as proporções dos materiais, os mesmos são levados a uma betoneira computadorizada, permanecendo por cerca de 50 s até que a mistura obtenha homogeneidade, assim como ilustrado pela Figura 4.1.



Figura 4.1 - Betoneira e cabine de controle

Após o período de mistura na betoneira, o concreto é depositado em recipientes, nos quais podem ser levados a outros locais da fábrica, devido à facilidade de serem suspensos através de guindastes metálicos.

Para a confecção de vigas e pilares em concreto pré-moldado, o ensaio de abatimento em tronco de cone deve respeitar ao valor de 5 ± 1 cm.

As fôrmas utilizadas para moldar as peças são metálicas, possuindo a vantagem de poderem ser adaptadas conforme as dimensões do projeto, atendendo assim, a variadas dimensões. A Figura 4.2 representa uma fôrma, antes de sua concretagem. Com o auxílio dos guindastes, os recipientes contendo concreto fresco são dispostos acima das mesmas e abertos em sua porção inferior, permitindo a deposição do concreto na fôrma, como pode ser observado na Figura 4.3.



Figura 4.2 - Preparação de uma fôrma



Figura 4.3 - Deposição do concreto na fôrma

Uma equipe de operários é responsável por espalhar o concreto na fôrma e realizar o adensamento através da utilização de vibradores de agulha, evitando que bolhas de ar fiquem incorporadas ao concreto, o que vem a prejudicar a resistência final da estrutura, além de causar o aparecimento de fissuras durante o processo de cura térmica, em consequência das tensões internas no concreto com a expansão do ar. A Figura 4.4 ilustra uma equipe de operários responsáveis pelo adensamento do elemento estrutural e regularização da superfície.



Figura 4.4 - Etapa de adensamento e regularização da superfície

Durante a concretagem são recolhidos corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) para ensaios de resistência à compressão realizados ao longo do ciclo térmico.

Após a concretagem dos elementos estruturais e os acabamentos finais da peça, prossegue-se para a fase de realização da cura térmica. A energia para o processo é retirada de queima de madeira, em uma caldeira, assim como mostrada pela Figura 4.5, a partir da qual é liberado calor para aquecimento da água e produção do vapor. A caldeira é abrigada em um ambiente protegido, evitando a ocorrência de possíveis acidentes. O vapor é conduzido até as fôrmas através de tubulações e dispostos junto a elas em sua parte inferior. A fôrma é envolvida por uma membrana plástica, como é ilustrado pela Figura 4.6.



Figura 4.5 - Caldeira para produção de vapor



Figura 4.6 - Peça sob cura térmica

A temperatura de cura é aumentada gradativamente até atingir um equilíbrio da ordem de 60°C. Durante o período de realização da cura térmica, os corpos de prova são acondicionados juntos à fôrma, sujeitos aos mesmos gradientes térmicos.

Com a finalização da etapa de cura térmica, os elementos são desmoldados, assumindo sua forma definitiva, como é mostrado pela Figura 4.7. Eventuais reparos são providenciados para corrigir algumas irregularidades na superfície da peça, tais como pequenas fissuras e cavidades decorrentes de bolhas de ar aderidas junto às paredes da fôrma durante a concretagem.



Figura 4.7 - Aspecto de uma viga desmoldada

Para o transporte das peças é realizado um içamento, através de ganchos de aço inseridos durante a concretagem. As peças são sustentadas por guindastes que as conduzem através da fábrica, fazendo o percurso necessário do local da concretagem até o local onde serão armazenadas, aguardando o envio para a obra. Pela Figura 4.8 é possível observar o transporte de uma peça com o auxílio de um guindaste.



Figura 4.8 - Içamento de uma viga em concreto pré-moldado

4.1.1 Caracterização dos Materiais

a) Cimento

O cimento utilizado é do tipo Portland CPV–ARI–Plus, cujos ensaios realizados para a caracterização físico-química são: Determinação da finura através de peneiramento NBR – 9202 (1985); Determinação da finura – Método de Blaine NBR NM – 76 (1998); Determinação do tempo de pega NM – 65 (1996); Massa específica aparente NBR – 7810 (1983); Massa específica absoluta NM – 23 (2000); Resistência à compressão do cimento NBR – 7215 (1996). A Tabela 4.1 fornece os resultados dos ensaios de caracterização, realizados no LCEC, em Ilha Solteira – SP.

b) Areia Fina

A areia fina utilizada pela empresa é proveniente do leito do Rio Tietê, na cidade de Adolfo – SP. Para sua caracterização foram realizados os seguintes ensaios: Análise Granulométrica NBR-7217 (1987); Massa Específica na condição saturada superfície seca (s.s.s.) e Ensaio de Absorção NM-52 (1996); Materiais Pulverulentos NBR-7218 (1987) e Matéria Orgânica NM-49 (1996). As Tabelas 4.2 e 4.3 fornecem os resultados de caracterização da areia fina. A Figura 4.9 ilustra a curva granulométrica obtida para a areia fina em termos da percentagem retida acumulada.

c) Areia Média

A areia média é proveniente do Rio Grande, na cidade de Orindiúva-SP. Para esse tipo de areia foram realizados os mesmos ensaios de caracterização descritos para a areia fina. As Tabelas 4.4 e 4.5 fornecem dados da caracterização da areia média. A Figura 4.10 ilustra a curva granulométrica obtida para a areia média em termos da percentagem retida acumulada

d) Brita 16 mm

A brita 16 mm utilizada é de origem basáltica, proveniente do Rio Grande, nas proximidades da cidade de Icém-SP. Para sua caracterização foram realizados os seguintes ensaios: Análise Granulométrica NBR-7217 (1987); Massa Específica na condição saturada superfície seca (s.s.s.) e Ensaio de Absorção NM – 52 (1996); Materiais Pulverulentos NBR – 7218 (1987). As Tabelas 4.6 e 4.7 fornecem os dados obtidos nos ensaios de caracterização. A Figura 4.11 ilustra a curva granulométrica da brita 16 mm.

e) Água

A água utilizada para amassamento da mistura é água da rede de abastecimento público da cidade de São José do Rio Preto – SP.

Tabela 4.1 - Caracterização do cimento CPV-ARI-Plus

Laboratório CESP de Engenharia Civil LCEC ISO 9002 CESP Companhia Energética de São Paulo					
Referência			22844	Especificações	
Amostra			25	NBR-5733	
Data da coleta /03			13.06.2005	min.	máx.
Finura Peneira 200 (% retida)			0,32	-	6,0
Finura Peneira 325 (% retida)			1,3	-	-
Superf. espec. Blaine (cm²/g)			4072	3000	-
Densidade aparente (g/cm³)			0,94	-	-
Densidade absoluta (g/cm³)			3,12	-	-
Água de consistência		gramas	149	-	-
da pasta		(%)	29,8	-	-
Início de pega (h:min)			02:12	01:00	-
Expansão em auto-clave (%)			0,025	-	-
Resistên- cia a Compres- são Axial	Consistência argamassa	gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		04.07.2005	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	48,7	24,0	-
		07 dias	54,8	34,0	-
		28 dias	63,3	-	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		3,24	-	4,5
	Insolúveis		0,26	-	1,0
	SiO2		18,82	-	-
	Fe2O3		2,86	-	-
	Al2O3		5,43	-	-
	CaO		64,25	-	-
	MgO		0,89	-	6,5
	SO3		2,75	-	3,5
	Na2O		0,11	-	-
	K2O		0,77	-	-
	Equiv alcalino Na2O		0,62	-	-
	Cal livre em CaO		1,46	-	-
Análise físico-química de cimento Ciminas CP V - ARI Plus					
UNESP					

Tabela 4.2 - Valores da porcentagem retida acumulada da areia fina

Peneira mm →	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4
Areia	100,0	96,6	42,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 4.3 - Caracterização da areia fina

Diâm. máx. (mm)	módulo de finura	massa específica		massa unitária		absor- ção (%)	pulve- rulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	solta (g/cm³)	solta 4% umid. (g/cm³)			
0,595	1,39	2,641	2,635	1,466	1,089	0,24	0,49	+clara

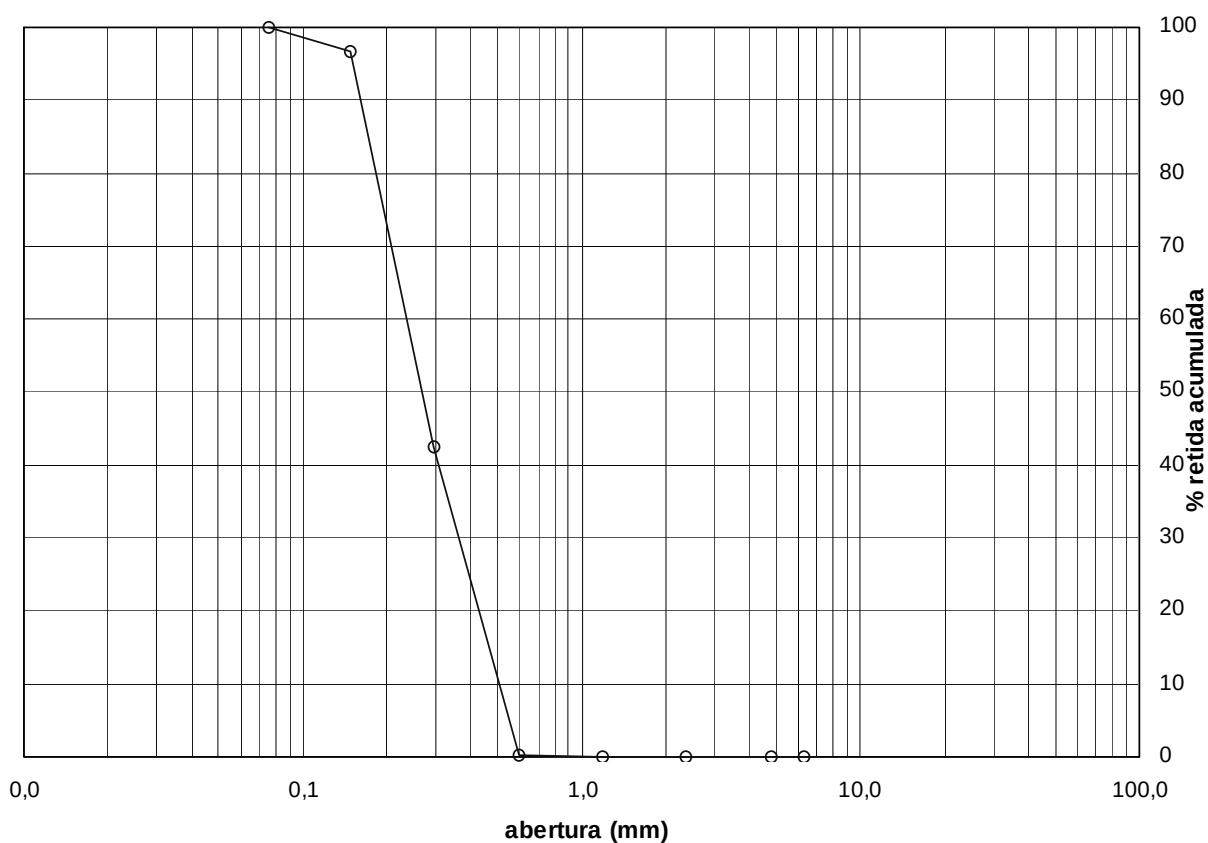


Figura 4.9 - Curva granulométrica da areia fina

Tabela 4.4 - Valores da porcentagem retida acumulada da areia média

Peneira mm →	% Retida Acumulada											
	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4
Areia	100,0	99,6	94,6	58,2	6,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 4.5 - Caracterização da areia média

Diâm. máx. (mm)	módulo de finura	massa específica		massa unitária		absor- ção (%)	pulve- rulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	solta (g/cm³)	solta 4% umid. (g/cm³)			
2,38	2,59	2,622	2,611	1,429	1,163	0,42	0,05	+ clara

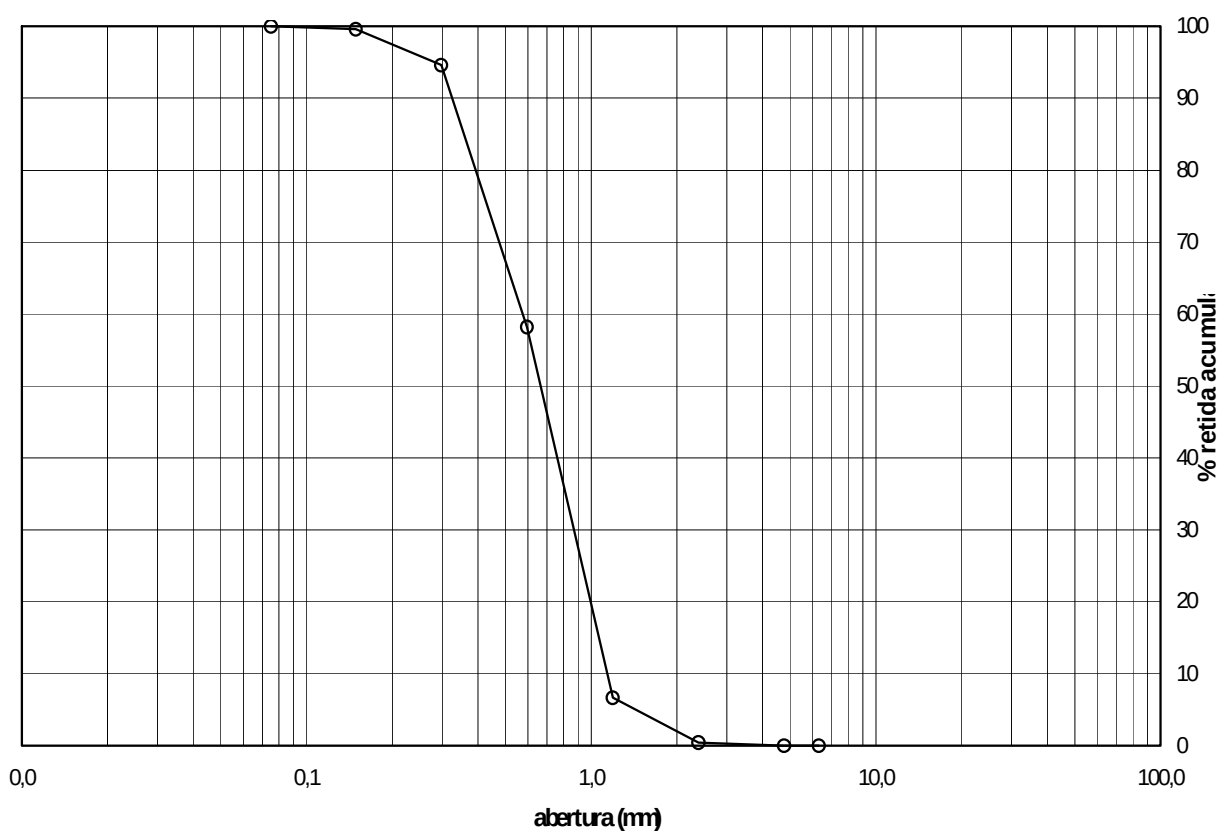


Figura 4.10 - Curva granulométrica da areia média

Tabela 4.6 - Valores da porcentagem retida acumulada da brita 16 mm

Peneira mm →	% Retida Acumulada											
	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,7	19,0	25,4	32,0
B1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,6	88,7	53,7	17,6	0,0	0,0	0,0

Tabela 4.7 - Caracterização da brita 16 mm

Diâm. máx. (mm)	módulo de finura	massa específica				absor- ção (%)	pulve- rulento (%)
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	Aparente solta (g/cm³)		
19,0	6,51	2,917	2,881	2,987	1,569	1,23	0,54

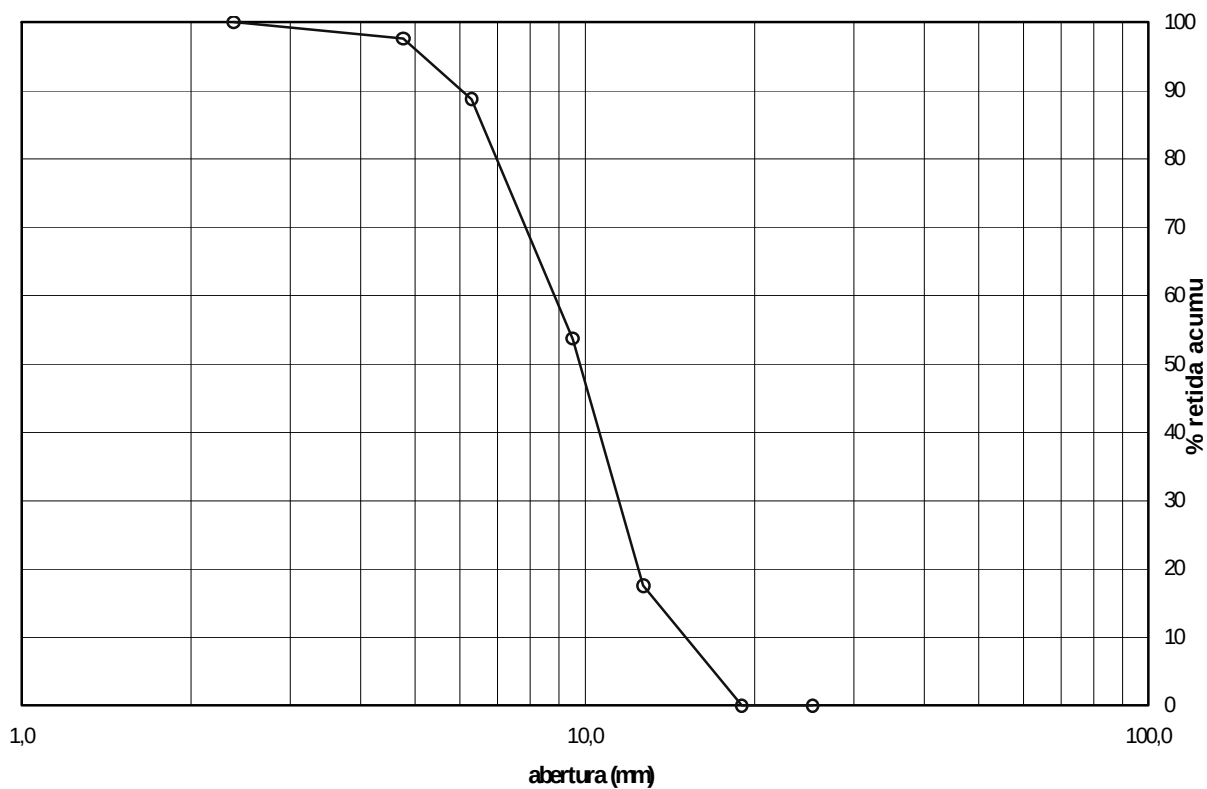


Figura 4.11 - Curva granulométrica da Brita 16 mm

4.1.2 Ensaios de resistência à compressão

Na etapa de concretagem dos elementos estruturais foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, os quais foram dispostos junto às fôrmas durante a aplicação da cura térmica, submetidos a ensaios de resistência à compressão a cada hora do ciclo térmico.

Segundo exigências da empresa, a desforma do concreto é realizada após o concreto atingir uma resistência à compressão da ordem de 21 MPa para os elementos protendidos e 12 MPa para os elementos em concreto armado.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em uma prensa manual, assim como ilustrado pela Figura 4.12, localizada no laboratório da empresa.



Figura 4.12 - Prensa manual da Protendit

4.2 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO (E_a)

O cálculo da energia aparente de ativação (E_a) foi realizado segundo as exigências da norma americana ASTM C 1074-98. Foram moldados corpos de prova cúbicos de argamassa, com arestas de 5 cm, assim como é ilustrado pelas Figuras 4.13 e 4.14, respeitando-se a dosagem utilizada pela Protendit.



Figura 4.13 - Molde dos corpos de prova



Figura 4.14 - Corpos de prova cúbicos

As fôrmas foram lubrificadas com óleo para facilitar a desfôrma e, para evitar perda de água, foi utilizada massa de calafetar e filme plástico, garantindo água necessária para as reações de hidratação do cimento. Após o preparo da argamassa, as fôrmas foram submetidas à vibração para realização do adensamento, diminuindo a presença de bolhas de ar, o que poderia representar influência significativa na redução da resistência dos corpos de prova.

Finalizada a etapa de moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos à cura em quatro configurações distintas de temperatura, uma a mais do que o exigido pela ASTM C 1074-98, a saber: 10°C (câmara fria), 30°C (câmara úmida), 55°C (câmara térmica) e 80°C (câmara térmica), tomando-se o cuidado de manter uma atmosfera saturada para evitar perda de água de hidratação do cimento. A sequência das Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 ilustra os locais de cura na câmara fria, câmara úmida e câmara térmica, respectivamente.



Figura 4.15 - Configuração da câmara fria



Figura 4.16 - Configuração da câmara úmida



Figura 4.17 - Configuração do banho térmico

Para obtenção dos valores de resistência à compressão da argamassa em função da idade, a ASTM C 1074-1998 recomenda que o ponto inicial da curva seja adotado como sendo aquele no qual a sua resistência é de 4 MPa. Para os corpos de prova cúbicos de 5 cm de aresta, a área exposta à compressão é de $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} = 25\text{ cm}^2$, assim, para que o corpo de prova atinja 4 MPa, deve apresentar resistência a uma carga de aproximadamente 1000 kg. Com o tempo decorrido desde a adição de água à mistura até atingir a resistência de 4 MPa,

calcula-se o tempo para as rupturas futuras. Como exemplo ilustrativo, se uma mistura de argamassa necessitar de 6 h para atingir 4 MPa, as rupturas seguintes serão realizadas após 12 h, 24 h, 48 h, 96 h e 192 h a partir da adição de água à mistura, num total de seis rupturas. Para cada idade, foram rompidos três corpos de prova, tomando-se o valor médio como representativo da resistência à compressão.

4.3 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS TÉRMICOS NO LCEC

No Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC) foram realizados ensaios de cura térmica para elaboração de curvas de calibração para aplicação do Método da Maturidade. Dois casos de ciclos térmicos foram empregados: 1) o concreto foi submetido à cura térmica logo após a elaboração dos corpos de prova; 2) respeitou-se o tempo de início de pega do cimento antes da aplicação da cura térmica.

4.3.1 Elaboração do concreto

Os ensaios de cura térmica para elaboração das curvas de calibração a serem utilizadas no Método da Maturidade foram realizados no LCEC, em Ilha Solteira-SP, com a mesma composição do concreto utilizada pela Protendit. A temperatura de cura foi de 60°C, semelhante à condição isotérmica utilizada pela empresa de pré-moldados.

Após a dosagem, os materiais foram misturados em uma betoneira, conforme a Figura 4.18. Inicialmente, foram misturadas a brita 16 mm, as areias fina e média e parte da água de amassamento na betoneira durante 1 minuto, em seguida foi acrescentado o cimento e o restante da água e misturados por mais 3 minutos. O concreto descansou por 3 minutos, sendo a betoneira depois ligada por mais 2 minutos. Em seguida, foi realizado o ensaio de abatimento em tronco de cone (*slump test*), conforme ilustrado pela Figura 4.19.



Figura 4.18 - Material na betoneira



Figura 4.19 - Ensaio de abatimento

Realizado o ensaio de abatimento, seguiu-se à moldagem dos corpos de prova, de dimensões cilíndricas de 10 x 20 cm, com o auxílio de uma mesa vibratória para garantir um adensamento satisfatório do concreto, conforme mostrado pela Figura 4.20. Depois de moldados, os corpos de prova foram protegidos por filme plástico para evitar perda de água, assim como ilustrado pela Figura 4.21.



Figura 4.20 - Adensamento do concreto



Figura 4.21 - Proteção com filme plástico

Durante o processo de cura térmica, houve a necessidade de se monitorar a temperatura de alguns corpos de prova para análise do aparecimento de gradientes térmicos no interior da câmara térmica. Para isso, foram moldados três corpos de prova nos quais foram inseridos tubos de cobre preenchidos com óleo, permitindo a introdução de sondas termopares no interior do concreto, conforme ilustrado pela Figura 4.22.



Figura 4.22 - Fixação do tubo de cobre no corpo de prova

4.3.2 Ensaio de cura térmica

A cura térmica foi realizada em um aparelho projetado para esse fim, com a possibilidade de controle digital da temperatura e garantia de atmosfera saturada em vapor, conforme é ilustrado pela Figura 4.23.



Figura 4.23 - Câmara térmica

A temperatura no interior dos corpos de prova foi monitorada através de multímetros, conforme ilustrado pela Figura 4.24, com leituras de temperaturas médias em intervalos pré-fixados de 5 min.



Figura 4.24 - Disposição dos multímetros na câmara térmica

Foram realizados dois ciclos térmicos. No primeiro, os corpos de prova foram submetidos à cura térmica imediatamente após a sua elaboração; no segundo ciclo, foram submetidos à cura térmica somente após o tempo de início de pega do cimento, com o objetivo de se avaliar a influência do tempo de início de pega sobre a elaboração das curvas de calibração. O valor do tempo de início de pega adotado para o segundo ciclo térmico foi de 2 h.

4.3.3 Ensaios de resistência à compressão

Iniciada a cura térmica, foram realizadas rupturas dos corpos de prova a cada hora, sendo rompidos três corpos de prova a cada série, adotando como valor representativo a média aritmética dos valores das rupturas. A Figura 4.25 ilustra a prensa utilizada para determinação das resistências à compressão, localizada no LCEC. Os corpos de prova tiveram suas faces regularizadas com enxofre antes de serem submetidos à ruptura, garantindo o paralelismo entre as faces.



Figura 4.25 - Prensa do LCEC

4.3.4 Determinação do módulo de elasticidade

Na última hora do ensaio de cura térmica, além do ensaio de resistência à compressão, foi realizado o ensaio para determinação do módulo de elasticidade do concreto.

A norma que estabelece os critérios para a determinação do módulo de elasticidade (E_c) é a NBR 8522 (2003). Após o ensaio de resistência à compressão, utilizado para definir o limite do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade, acopla-se dois extensômetros ao corpo-de-prova, os quais são responsáveis pela indicação das deformações causadas pelos carregamentos. Através de um sistema de aquisição de dados são registrados os valores das deformações em função das cargas aplicadas, com a determinação do valor do módulo secante a partir de um *software* de computador. A prensa utilizada neste ensaio foi uma prensa Emic DL 2000, e o *software* para aquisição e determinação do valor do módulo de elasticidade é o Mtest 3.0.

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade segue a seqüência:

a) Ensaios de compressão são realizados previamente, para estimar o valor de 40% da tensão de compressão, a ser utilizado no ensaio de módulo de elasticidade;

- b) Os extensômetros são acoplados ao corpo de prova, e posteriormente o mesmo é posicionado de maneira centralizada na máquina;
- c) Antes da realização do ensaio, o corpo de prova é carregado e descarregado por duas vezes consecutivas;
- d) Ensaia-se o mesmo até o valor de 40% da tensão de compressão. Esse procedimento é repetido por seis vezes para cada corpo de prova.

A Figura 4.26 mostra a realização do ensaio para determinação do módulo de elasticidade.



Figura 4.26 - Configuração do ensaio de módulo de elasticidade

5 MONITORAMENTO DE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS

Nessa etapa do trabalho foram realizados o monitoramento dos ciclos térmicos realizados nos elementos pré-moldados na Protendit. Os elementos monitorados durante a cura térmica com aquisição dos valores de temperatura e tempo, assim como os dados das resistências dos corpos de prova junto à empresa foram os seguintes:

- Viga protendida com seção transversal I de 50 cm de altura e 9,6 m de comprimento;
- Viga protendida com seção transversal I de 70 cm de altura e 18,8 m de comprimento;
- Pista com 83 m de comprimento, utilizada para fabricação de vigas protendidas de seção transversal I de 50 cm de altura, com cura térmica realizada durante o período diurno;
- Pista com 83 m de comprimento, utilizada para fabricação de vigas protendidas de seção transversal I de 50 cm de altura, com cura térmica realizada durante a madrugada;
- Pista com 83 m de comprimento, utilizada para fabricação de vigas protendidas de seção transversal I de 70 cm de altura;
- Viga armada com seção transversal de 20 x 45 cm com 5,6 m de comprimento;
- Pilar armado com seção transversal de 30 x 50 cm com 9,0 m de comprimento.

Os ensaios com as duas vigas protendidas em seção I de 50 cm de altura em períodos diferentes foram realizados com o objetivo de se analisar a influência da temperatura ambiente sobre os processos de cura térmica, comparando os dados obtidos com a aplicação de uma cura térmica durante o dia e outra durante a noite.

5.1 METODOLOGIA

Durante a concretagem dos elementos estruturais, foram posicionados tubos de cobre no interior do concreto para possibilitar o acesso das sondas termopares às condições térmicas existentes no interior do concreto, como pode ser observado na Figura 5.1. O interior dos

tubos de cobre foi totalmente preenchido com óleo (fluido viscoso) para evitar o aparecimento de efeito de aleta, com dissipação de calor ao longo do tubo.

Nas seções que apresentavam mais de um ponto de monitoramento de temperatura, algumas sondas foram inseridas diretamente no concreto, ainda em estado plástico, como é ilustrado através da Figura 5.2.



Figura 5.1 - Tubo de cobre no concreto



Figura 5.2 - Sondas termopares

As sondas termopares foram acopladas a multímetros digitais programados para aquisição dos valores de temperatura a cada 5 min. Os multímetros, por serem aparelhos eletrônicos, foram dispostos no interior de caixas de isopor para evitar danos decorrentes da umidade do local de cura, como ilustrado na Figura 5.3. A Figura 5.4 fornece a configuração final do ensaio, com os multímetros posicionados ao longo da viga durante o ciclo térmico.



Figura 5.3 - Multímetro na caixa de isopor



Figura 5.4 - Disposição final dos multímetros

Durante a concretagem foram moldados corpos de prova cilíndricos, de 10 x 20 cm, assim como pode ser visto através da Figura 5.5, os quais foram colocados ao lado da viga durante o processo de cura térmica. Em um dos corpos de prova foi inserida uma sonda

termopar acoplada a um multímetro para aquisição dos valores de tempo e temperatura dos corpos de prova, assim como ilustrado pela Figura 5.6.



Figura 5.5 - Preparação dos corpos de prova



Figura 5.6 - Multímetro e sonda termopar

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão a partir da primeira hora de aplicação da cura térmica, em prensa manual localizada na Protendit. Foram rompidos dois corpos de prova a cada hora do ciclo térmico, adotando-se como valor representativo a média aritmética das rupturas obtidas no laboratório da empresa.

5.2 VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA

Na viga protendida em seção transversal I de 50 cm de altura e 9,60 m de comprimento foram monitoradas as temperaturas em cinco pontos diferentes, localizados no meio da seção I, ao longo de toda a sua extensão, com o fornecimento de valores de temperatura a uma profundidade de 25 cm a partir da superfície da viga. O tempo decorrido entre a concretagem e o início de cura térmica foi de 2 h.

As Figuras 5.7 e 5.8 fornecem, respectivamente, as dimensões da seção transversal da viga e o esquema de distribuição dos multímetros ao longo de seu comprimento, com a alimentação do vapor sendo realizada na extremidade direita da viga.

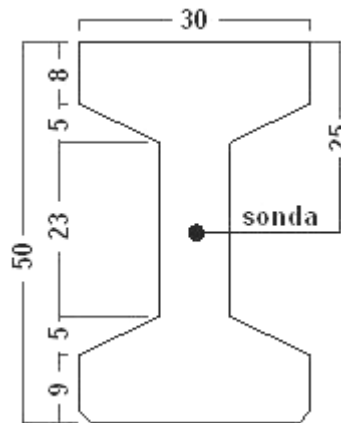


Figura 5.7 - Dimensões da seção transversal da viga I 50 (em cm)

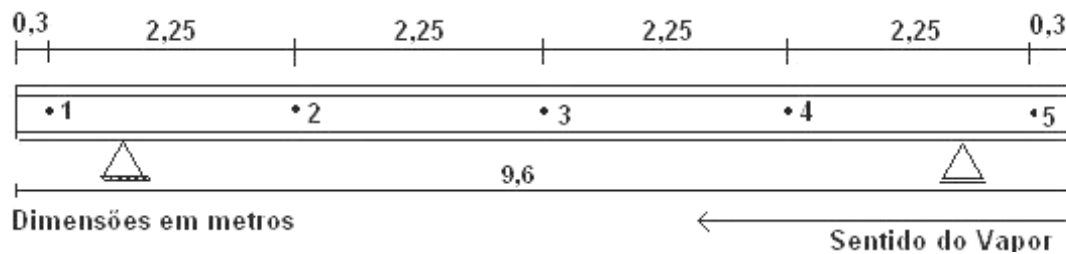


Figura 5.8 - Esquema de distribuição dos multímetros ao longo da viga

A Figura 5.9 fornece o comportamento das temperaturas do material durante a aplicação do ciclo térmico para os pontos dispostos ao longo do comprimento da viga, conforme ilustrado pela Figura 5.8. Pela análise da Figura 5.9 é possível notar o aparecimento de gradientes térmicos ao longo da viga durante o ciclo térmico, podendo ser atribuído a uma distribuição não uniforme do vapor através da sua tubulação proveniente da caldeira, com o aparecimento de diferenças de temperatura da ordem de 5°C. Verifica-se que os pontos com temperaturas mais elevadas foram aqueles mais próximos às saídas de vapor (pontos 4 e 5).

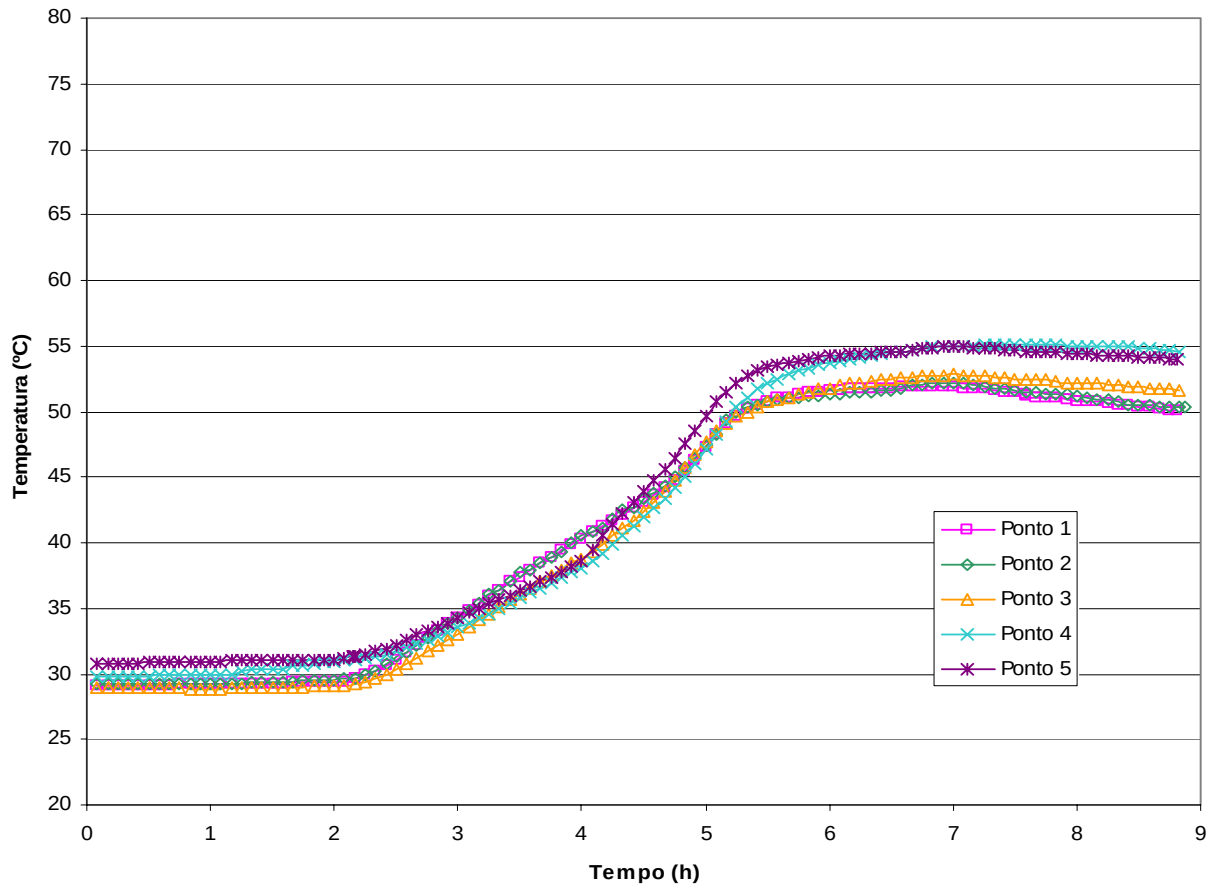


Figura 5.9 - Gráfico Temperatura x Tempo para a viga em seção transversal I de 50 cm de altura

A Figura 5.10 representa o histórico de temperaturas obtido com o monitoramento térmico de um corpo de prova disposto próximo ao ponto 1 durante a realização do ciclo térmico

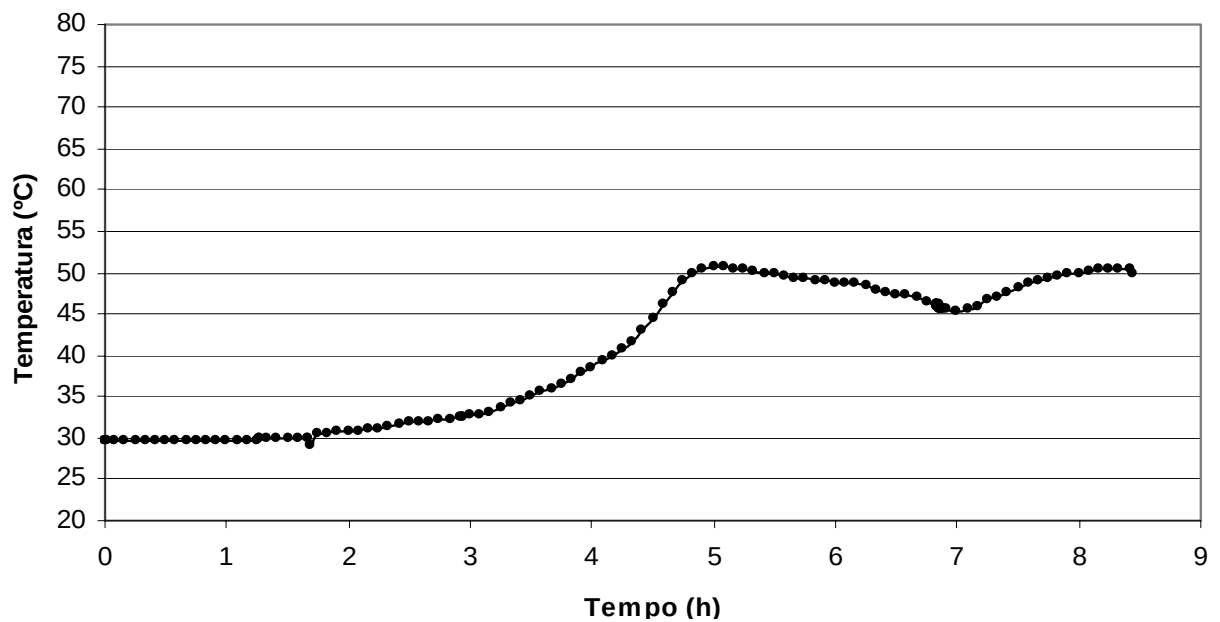


Figura 5.10 - Gráfico Temperatura x Tempo do corpo de prova para a viga I 50

Na Tabela 5.1 estão dispostos os valores das resistências à compressão em função do tempo durante o ciclo térmico.

Tabela 5.1 - Resistência à compressão para os corpos de prova da viga I 50

Idade (h)	Resistência à compressão (MPa)			Desvio Padrão	Coef.de Variação (%)
	1ª Ruptura	2ª Ruptura	Média		
3	0	0	0	-	-
4	0	0	0	-	-
5	1,01	1,03	1,02	0,01	1,37
6	4,35	4,31	4,33	0,03	0,65
7	6,11	6,37	6,24	0,18	2,95
8	7,38	9,17	8,28	1,27	15,29
9	10,35	9,17	9,76	0,83	8,55

A curva de Resistência à compressão x Idade para os corpos de prova de concreto durante o ciclo térmico para a viga I 50 está ilustrada pelo gráfico da Figura 5.11.

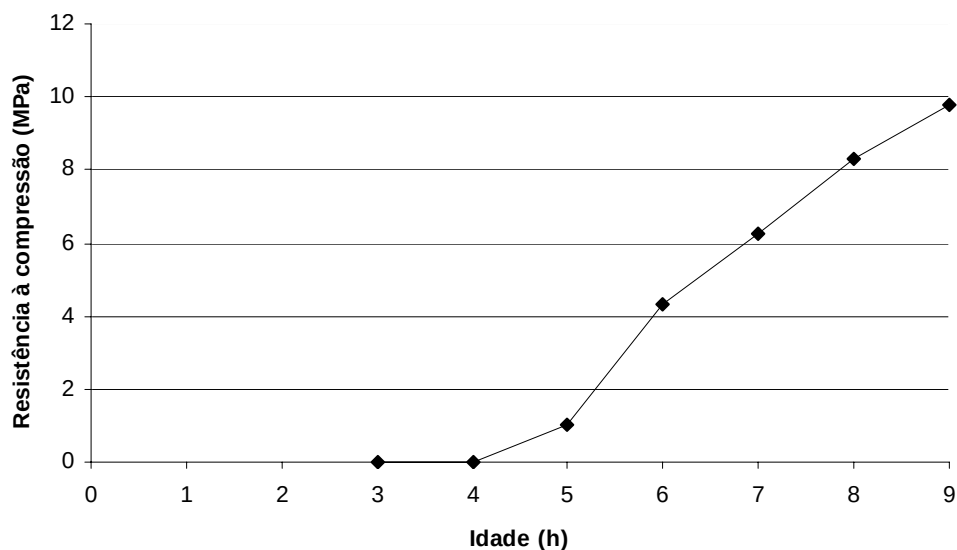


Figura 5.11 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a viga I 50

5.3 VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 70 CM DE ALTURA

A viga protendida com seção transversal em I de 70 cm de altura e 18,8 m de comprimento permitiu o monitoramento da temperatura em três pontos distintos numa mesma seção transversal, localizados na parte inferior, intermediária e superior da seção, denominados respectivamente com as letras A, B, e C, conforme ilustrado pela Figura 5.12.

Foram monitoradas três seções ao longo da viga, assim como ilustra a Figura 5.13, totalizando nove pontos de monitoramento de temperatura ao longo da viga, como o objetivo de analisar o comportamento ao longo da altura da viga, assim como ao longo do elemento estrutural.

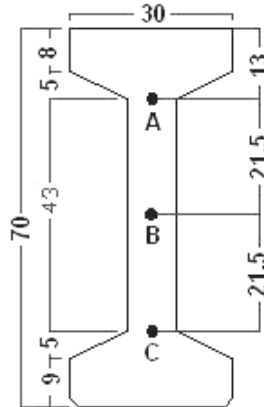


Figura 5.12 – Dimensões da seção transversal da viga I 70 (em cm)

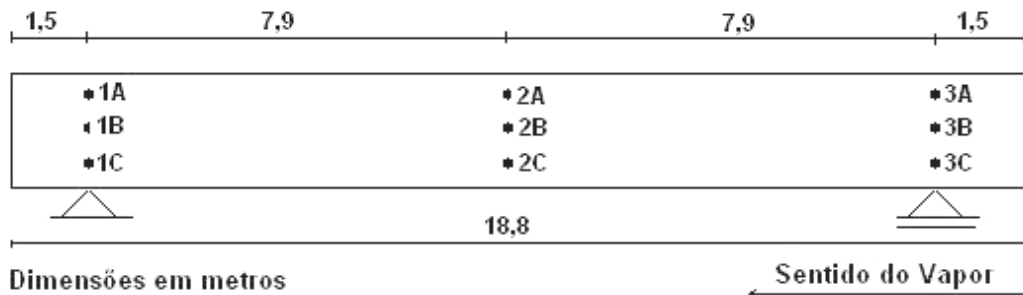


Figura 5.13 - Localização dos pontos de monitoramento da temperatura para a viga I 70

Foram inseridas sondas termopares no interior do concreto, sendo fixadas com auxílio de fios metálicos junto às armaduras da viga para evitar locomoções durante os processos de deposição e vibração do concreto, e depois acopladas aos multímetros para aquisição dos dados de temperatura. O tempo decorrido entre a concretagem e o início da aplicação da cura térmica foi de 2 h.

Na Figura 5.14 está ilustrado o comportamento das temperaturas para os pontos da viga durante a aplicação da cura térmica.

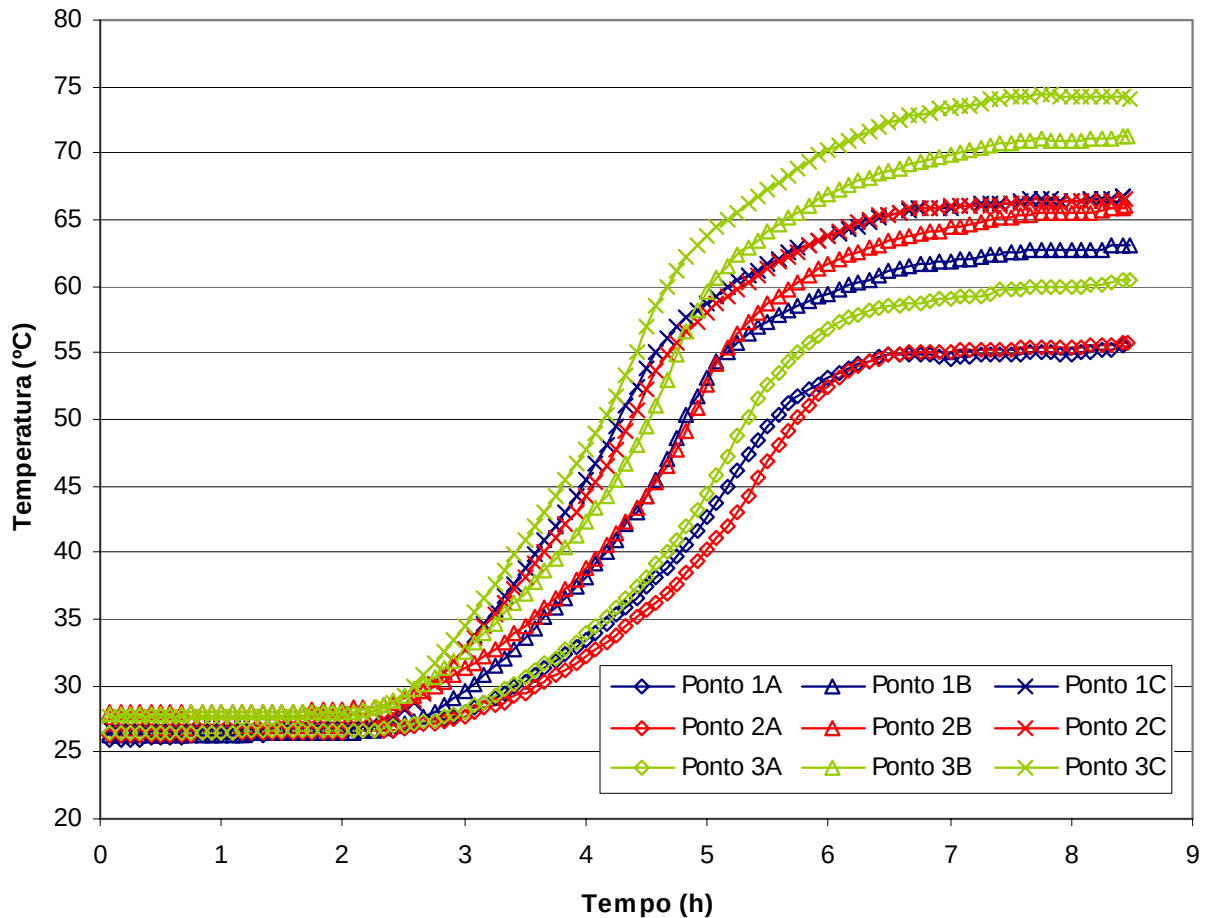


Figura 5.14 - Gráfico Temperatura x Tempo para a viga em seção transversal I de 70 cm de altura

Assim como observado para a viga com seção transversal em I de 50 cm de altura, a viga com seção transversal em I de 70 cm também apresentou gradientes térmicos entre os pontos de monitoramento da ordem de 20°C. Na Figura 5.14 observa-se também o aparecimento de gradientes térmicos para uma mesma seção, de modo que o ponto inferior da seção apresentasse as maiores temperaturas, o que se explica pelo fato de estar localizado mais próximo à tubulação, e conseqüentemente, à saída de vapor.

A Figura 5.15 ilustra desenvolvimento da temperatura nos corpos de prova moldados durante a concretagem da viga com seção transversal em I de 70 cm e dispostos junto à fôrma nas proximidades do ponto 1.

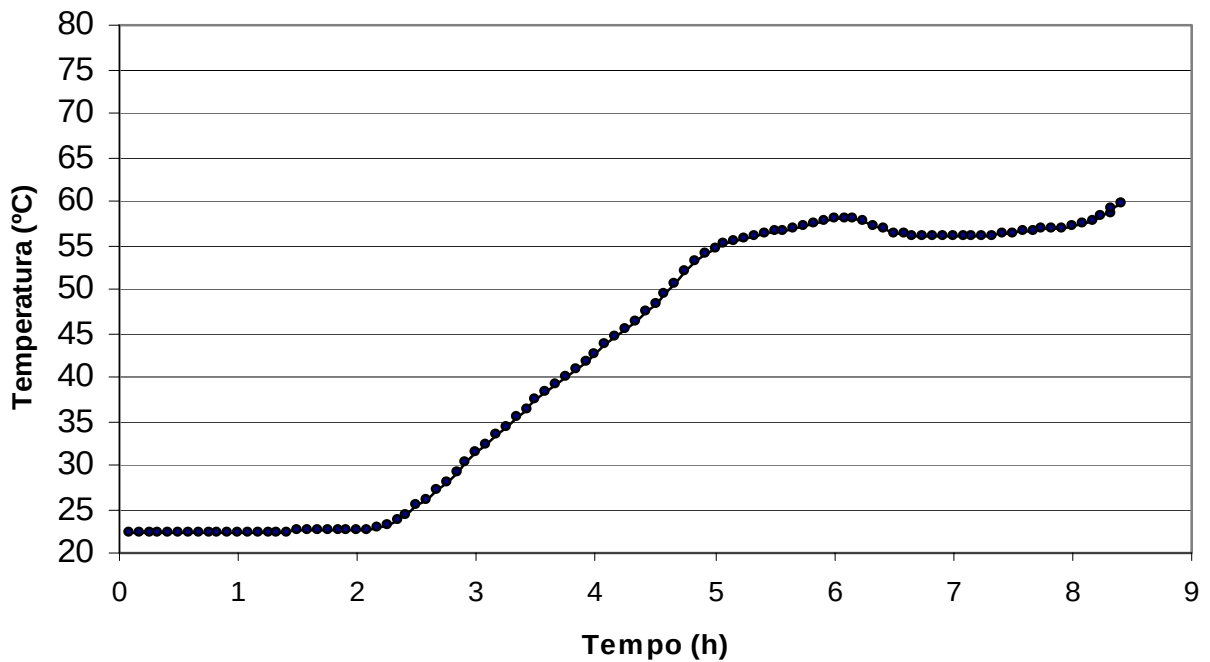


Figura 5.15 - Gráfico Temperatura x Tempo do corpo de prova para a viga I 70

Os valores de resistência à compressão obtidos através de rupturas realizadas a cada hora do ciclo térmico estão dispostos na Tabela 5.2.

A curva de Resistência à compressão x Idade para os corpos de prova de concreto durante a cura térmica para a viga com seção transversal em I de 70 cm é representada pelo gráfico da Figura 5.16.

Tabela 5.2 - Resistência à compressão para os corpos de prova da viga I 70

Idade (h)	Resistência à compressão (MPa)			Desvio Padrão	Coef.de Variação (%)
	1ª Ruptura	2ª Ruptura	Média		
3	0	0	0	-	-
4	0	0	0	-	-
5	2,80	2,80	2,80	0	-
6	7,39	6,88	7,14	0,36	5,06
7	9,42	9,68	9,55	0,18	1,93
8	13,24	13,50	13,37	0,18	1,38
9	14,26	15,28	14,77	0,72	4,88

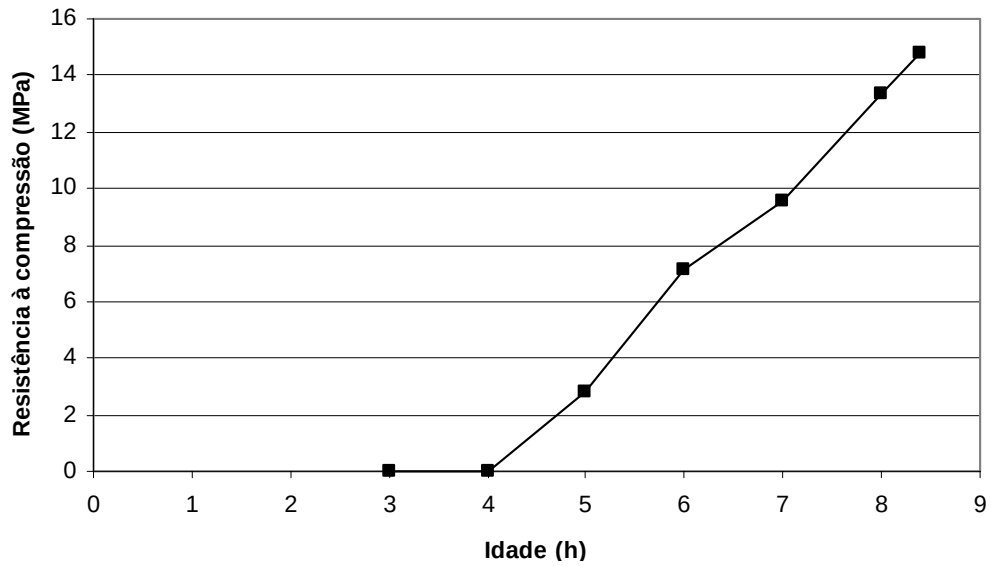


Figura 5.16 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a viga I 70

5.4 PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS PROTENDIDAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA (DIA)

As dimensões da seção transversal da viga, em cm, são as mesmas como ilustrado anteriormente pela Figura 5.7. Os pontos de aquisição dos valores de temperatura foram posicionados a 25 cm de profundidade, com apenas um ponto por seção. Foram monitorados nove pontos distribuídos ao longo da pista de fabricação, com 83 m de comprimento, assim como ilustrado pela Figura 5.17.

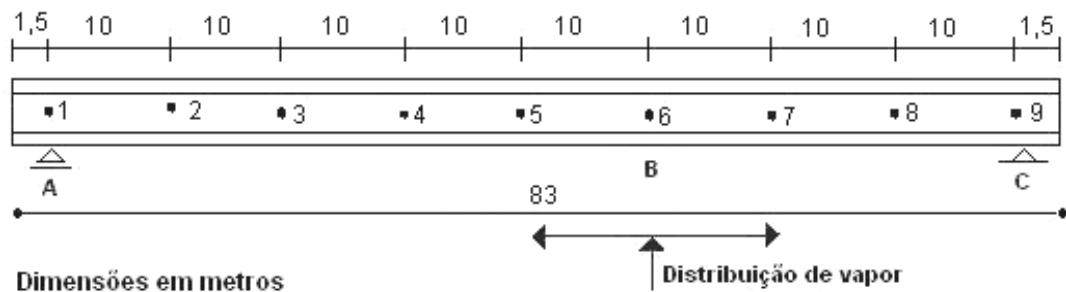


Figura 5.17 - Posicionamento dos pontos de aquisição de temperatura ao longo da pista de concretagem da viga I 50 (dia)

Após a moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, os mesmos foram dispostos nas extremidades da pista de concretagem (pontos A e C), assim como junto à saída principal de vapor (B), como ilustrados pela Figura 5.17. Para os pontos A, B e C, foram também monitorados os dados de tempo e temperatura dos corpos de prova através de sondas termopares inseridas no interior dos corpos de prova.

A concretagem do elemento estrutural se iniciou às 15 h 00 min, com aplicação da cura térmica às 17 h 00 min, com um período preliminar de 2 h. A temperatura ambiente no início da cura térmica foi de 31°C, com diminuição gradativa até 24°C ao final do ciclo térmico. A Figura 5.18 ilustra a evolução das temperaturas do concreto ao longo da pista de fabricação.

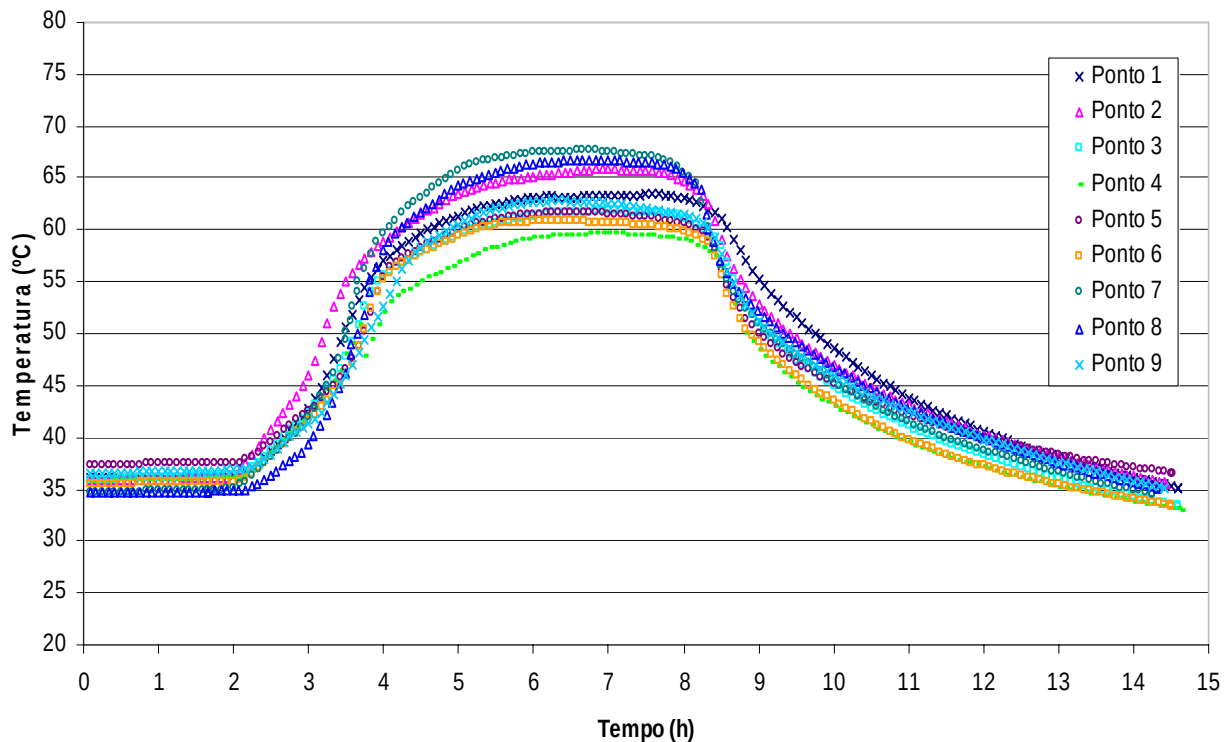


Figura 5.18 - Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 50 (dia)

A Figura 5.19 fornece a evolução das temperaturas nos corpos de prova dispostos ao longo da pista nos pontos A, B e C, conforme indicados anteriormente pela Figura 5.17. O ponto A apresentou as maiores temperaturas durante o ciclo térmico, atingindo uma temperatura máxima de 65°C.

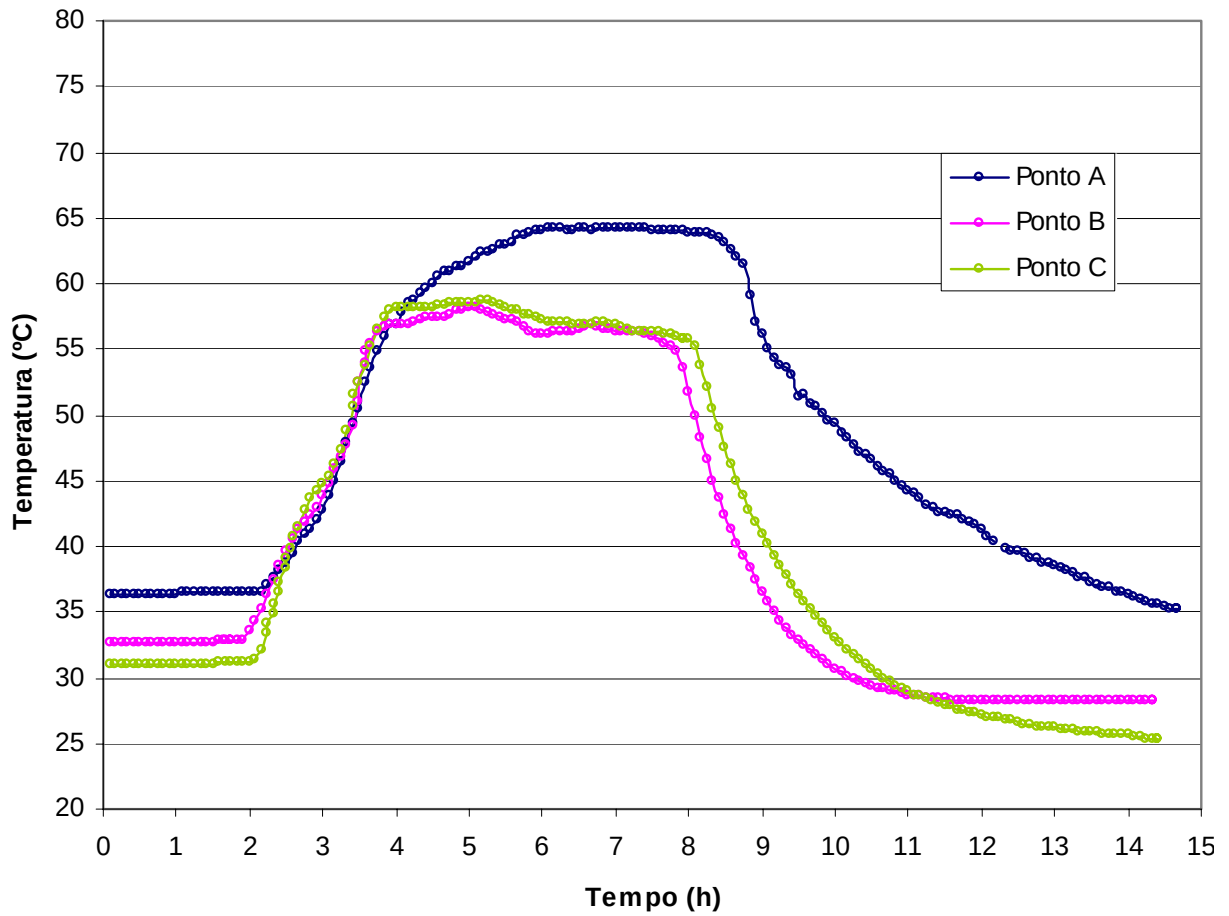


Figura 5.19 - Gráfico Temperatura x Tempo para os corpos de prova (pista das vigas I 50, dia)

Os valores de resistência à compressão durante o ciclo térmico na pista das vigas I 50 estão dispostos na Tabela 5.3, a partir dos ensaios de resistência à compressão realizados na prensa da Protendit.

As curvas de resistência à compressão em função da idade de cura estão ilustradas pelos gráficos da Figura 5.20, respectivamente para os pontos A, B e C, nos quais foram dispostos os corpos de prova durante a cura térmica.

Tabela 5.3 - Valores de Resistência à compressão x Idade (pista das vigas I 50, dia)

Ponto A					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	4,84	-	4,84	-	-
5	8,03	8,41	8,22	0,27	3,27
6	11,97	12,10	12,04	0,09	0,76
7	16,56	16,81	16,69	0,18	1,06
8	18,85	19,36	19,10	0,36	1,89
9	20,38	20,64	20,51	0,18	0,90
10	21,40	21,91	21,66	0,36	1,67

Ponto B					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	2,04	-	2,04	-	-
5	6,88	6,62	6,75	0,18	2,73
6	9,30	12,23	10,76	2,07	19,26
7	14,27	15,29	14,78	0,72	4,88
8	15,80	18,34	17,07	1,80	10,52
9	19,11	19,62	19,36	0,36	1,87
10	20,25	21,02	20,64	0,54	2,64

Ponto C					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	3,82	-	3,82	-	-
5	8,03	8,41	8,22	0,27	3,25
6	12,48	12,61	12,55	0,09	0,73
7	16,81	16,31	16,56	0,35	2,14
8	19,62	19,11	19,36	0,36	1,87
9	19,74	20,38	20,06	0,45	2,26
10	21,02	21,27	21,15	0,18	0,84

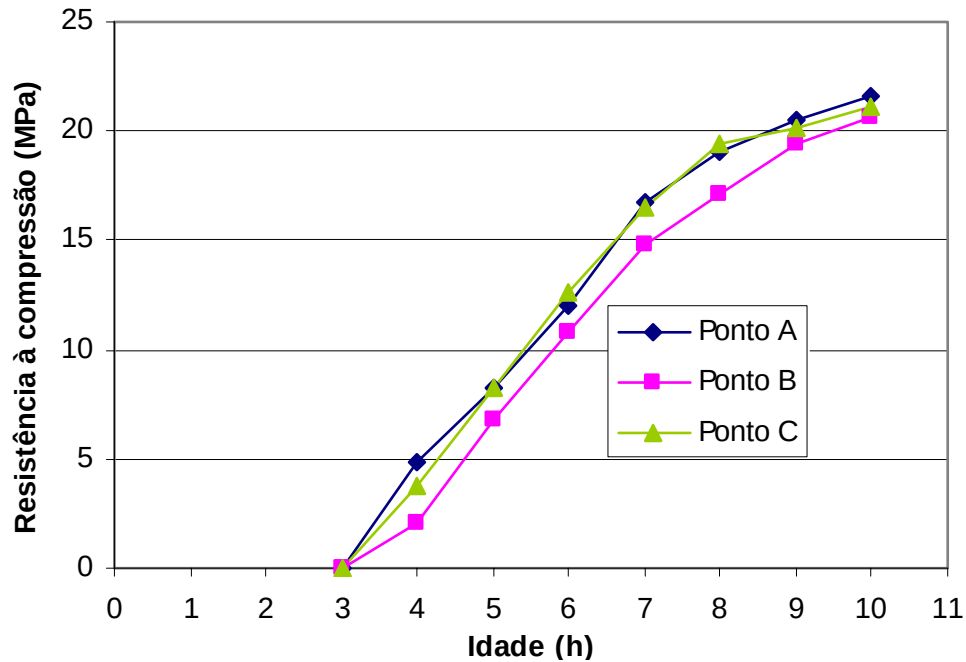


Figura 5.20 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para viga I 50 (dia)

5.5 PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS PROTENDIDAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA (MADRUGADA)

Para o ensaio de cura térmica realizado na pista de fabricação das vigas com seção transversal em I de 50 cm de altura durante a madrugada foram adotados os mesmos procedimentos para o mesmo tipo de viga curada durante o dia. Os pontos para aquisição dos valores de temperatura em função do tempo são os mesmos adotados para a viga curada durante o dia, assim como ilustrado pela Figura 5.7. A pista de concretagem também foi a mesma, com 83 m de comprimento, conforme ilustrada anteriormente pela Figura 5.17. Corpos de prova cilíndricos foram elaborados e dispostos junto à viga durante o ciclo térmico, distribuídos em pontos distintos ao longo da pista (pontos A, B e C). Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em cada hora do ciclo térmico, utilizando-se a prensa disponível na Protendit, até que os valores obtidos fossem da ordem de 21 MPa.

A concretagem do elemento estrutural teve início às 21 h 00 min, com aplicação da cura térmica às 23 h 00 min, com um período preliminar de 2 h. A temperatura ambiente variou de 21,8°C no início da cura até 18,2°C ao final do ciclo térmico.

A Figura 5.21 fornece a evolução da temperatura ao longo da pista das vigas para cura térmica realizada durante a madrugada.

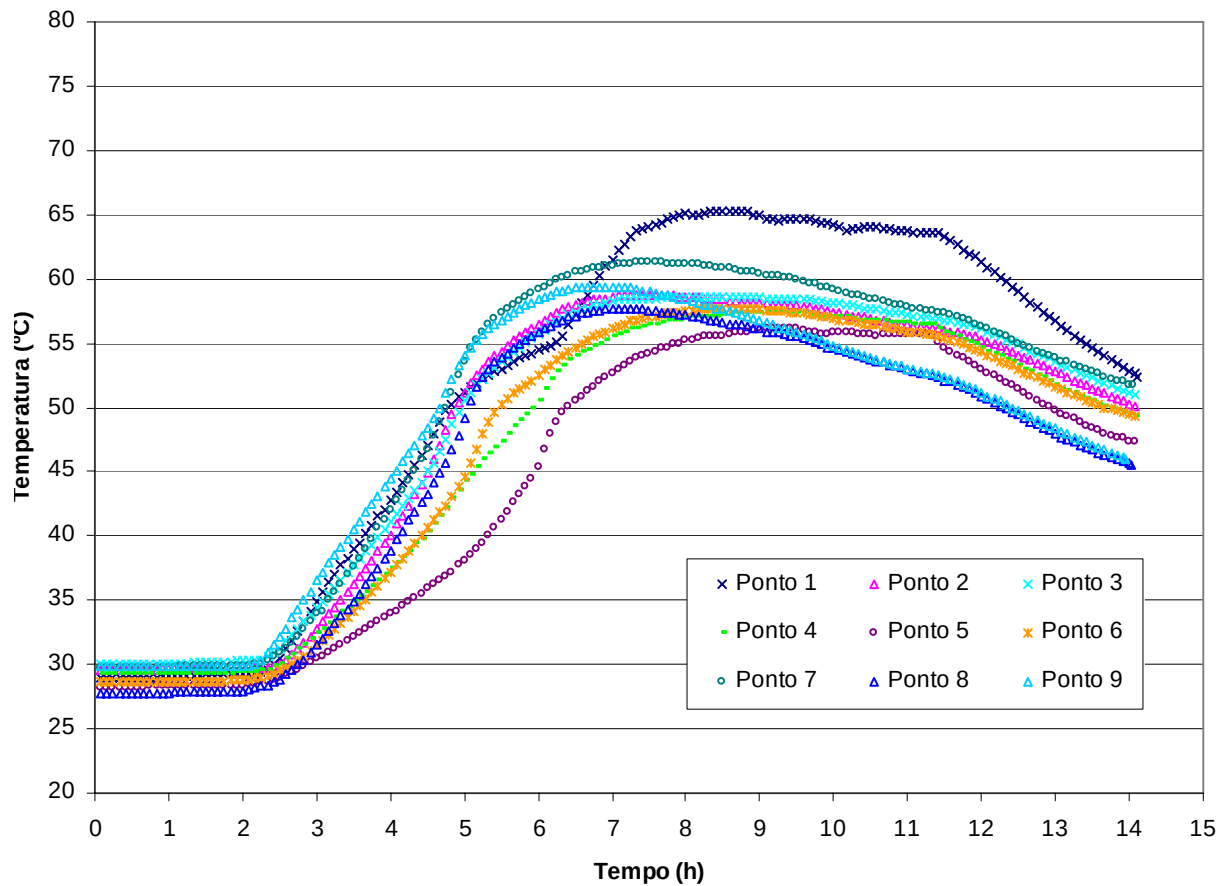


Figura 5.21 - Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 50 (madrugada)

Os gradientes térmicos para a viga I 50 com cura térmica durante a madrugada alcançaram valores de até 10°C, maiores do que os obtidos com aplicação da cura térmica durante o dia, que foram da ordem de 8°C. O comportamento das curvas de temperatura durante o ciclo térmico aplicado durante a madrugada apresentou-se de forma mais irregular, se comparado com as curvas obtidas durante o processo térmico realizado durante o dia.

A Figura 5.22 ilustra o comportamento da temperatura nos corpos de prova, dispostos nos pontos A, B e C.

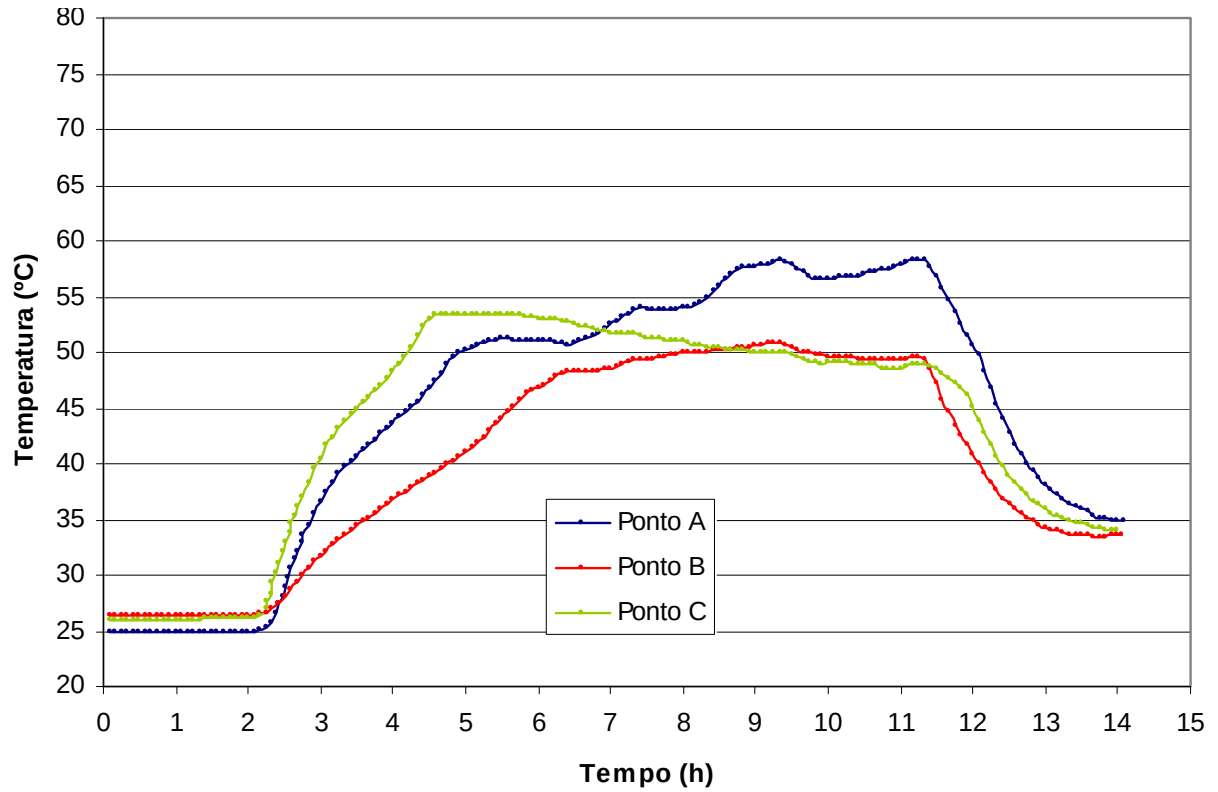


Figura 5.22 - Gráfico Temperatura x Tempo para os corpos de prova (VI 50, madrugada)

Na Tabela 5.4 estão dispostos os valores de resistência à compressão em função do tempo para os corpos de prova localizados nos pontos A, B e C, durante a cura térmica da viga I 50, realizada durante a madrugada.

A relação entre os valores de resistência à compressão e as idades estão ilustrados na Figura 5.23, para os pontos A, B e C, durante os ensaios mecânicos realizados a cada hora do ciclo térmico na Protendit.

Tabela 5.4 - Valores de Resistência à compressão x Idade (pista das vigas I 50, madrugada)

Ponto A					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	0	0	0	-	-
5	2,42	-	2,42	-	-
6	7,13	-	7,13	-	-
7	9,05	-	9,05	-	-
8	11,72	12,48	12,10	0,54	4,44
9	16,05	16,56	16,30	0,36	2,22
10	17,45	18,22	17,83	0,54	3,05
11	19,11	19,36	19,23	0,18	0,92
14	20,89	21,66	21,27	0,28	1,30

Ponto B					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	0	0	0	-	-
5	1,02	-	1,02	-	-
6	3,57	-	3,57	-	-
7	6,86	-	6,86	-	-
8	9,55	10,19	9,87	0,45	4,59
9	12,23	12,74	12,48	0,36	2,89
10	15,54	16,05	15,79	0,36	2,29
11	16,56	18,09	17,32	0,18	1,02
14	20,89	21,14	21,02	1,08	5,15

Ponto C					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	0	0	0	-	-
5	3,53	-	3,53	-	-
6	7,60	-	7,60	-	-
7	11,19	-	11,19	-	-
8	14,39	14,52	14,46	0,09	0,64
9	15,80	16,31	16,06	0,36	2,25
10	17,45	17,70	17,58	0,18	1,01
11	17,83	18,60	18,22	0,54	2,99
14	20,64	21,91	21,28	0,90	4,22

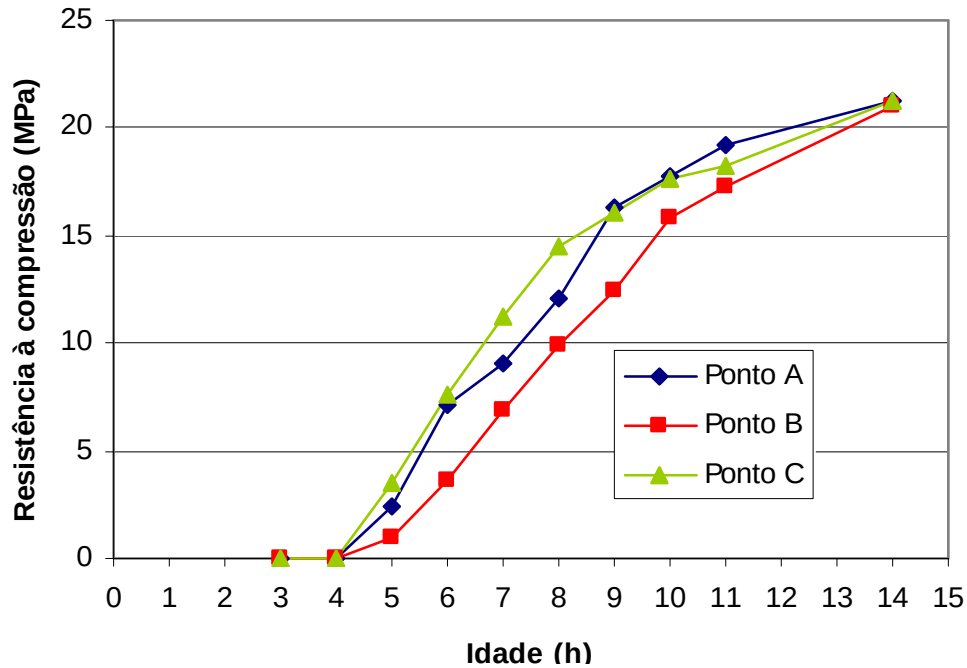


Figura 5.23 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a pista das vigas I 50 (madrugada)

5.6 PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS PROTENDIDAS COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 70 CM DE ALTURA

As dimensões da seção transversal das vigas estão ilustradas através da Figura 5.12. Os pontos para aquisição dos valores de temperatura ao longo da pista das vigas foram distribuídos conforme a Figura 5.24, com o objetivo de avaliar o desenvolvimento da temperatura ao longo do elemento estrutural. Vale ressaltar que foram avaliados três pontos ao longo da seção transversal somente nas extremidades da pista, para avaliar a distribuição de temperaturas ao longo da altura da seção da viga. Nas seções intermediárias, foram monitorados somente um ponto por seção, localizado à metade da altura da viga.

A concretagem da pista das vigas em seção I de 70 cm de altura foi realizada às 15 h 30 min, com início de aplicação de cura térmica a partir das 18 h 30 min, com período preliminar igual a 3 h. A temperatura ambiente média foi de 24°C. Para que os corpos de prova obtivessem 21 MPa foram necessárias 10 h de ciclo térmico

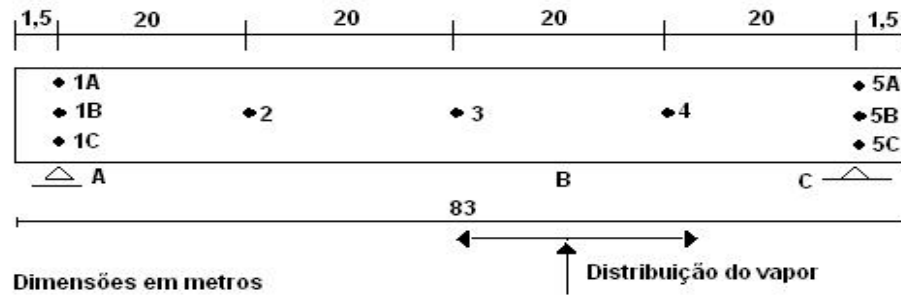


Figura 5.24 - Posicionamento dos pontos de aquisição de temperatura ao longo da pista de concretagem da viga I 70

Na Figura 5.25 estão ilustradas as curvas de temperatura para cada ponto analisado, durante a realização da cura térmica.

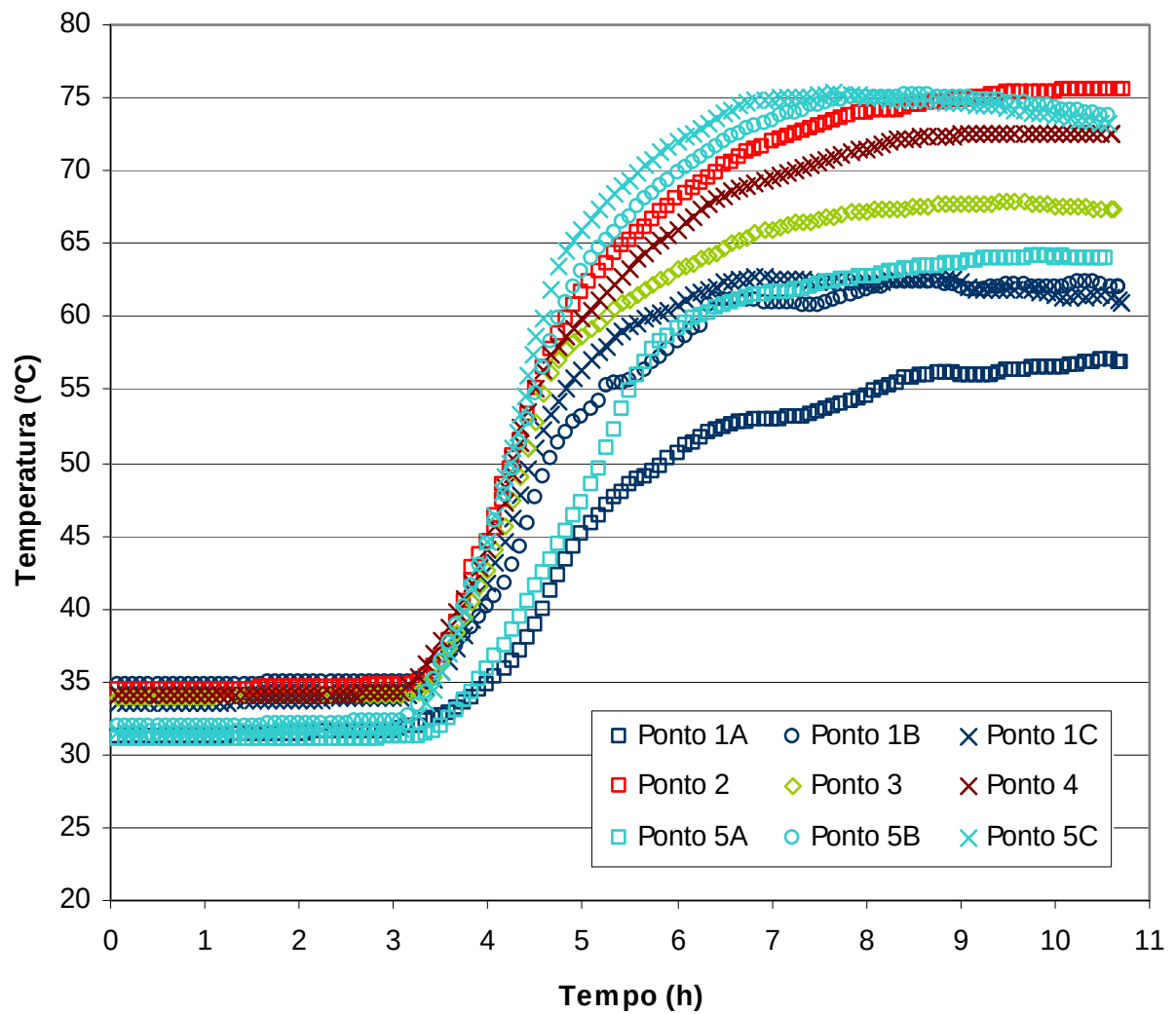


Figura 5.25 - Gráfico Temperatura x Tempo para a pista das vigas I 70

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, dispostos junto aos pontos A, B e C, com a realização de ensaios mecânicos para a determinação da resistência à compressão até que os corpos de prova atingissem 21 MPa. Sondas termopares foram inseridas nos corpos de prova para a aquisição dos valores de tempo e temperatura.

Conforme a Figura 5.25, os pontos inferiores das seções apresentaram as maiores temperaturas devido sua proximidade com a saída de vapor, com gradientes de temperaturas da ordem de 20°C. Observa-se também diferenças térmicas ao longo da viga, sendo que a seção 1 (pontos 1A, 1B e 1C), localizada na extremidade esquerda, apresentou as menores temperaturas se comparadas com a seção 5 (pontos 5A, 5B e 5C), localizada na extremidade direita da pista.

Na Figura 5.26 estão representadas as curvas de evolução das temperaturas dos corpos de prova, localizados nas posições A, B e C, conforme esquema ilustrado pela Figura 5.24.

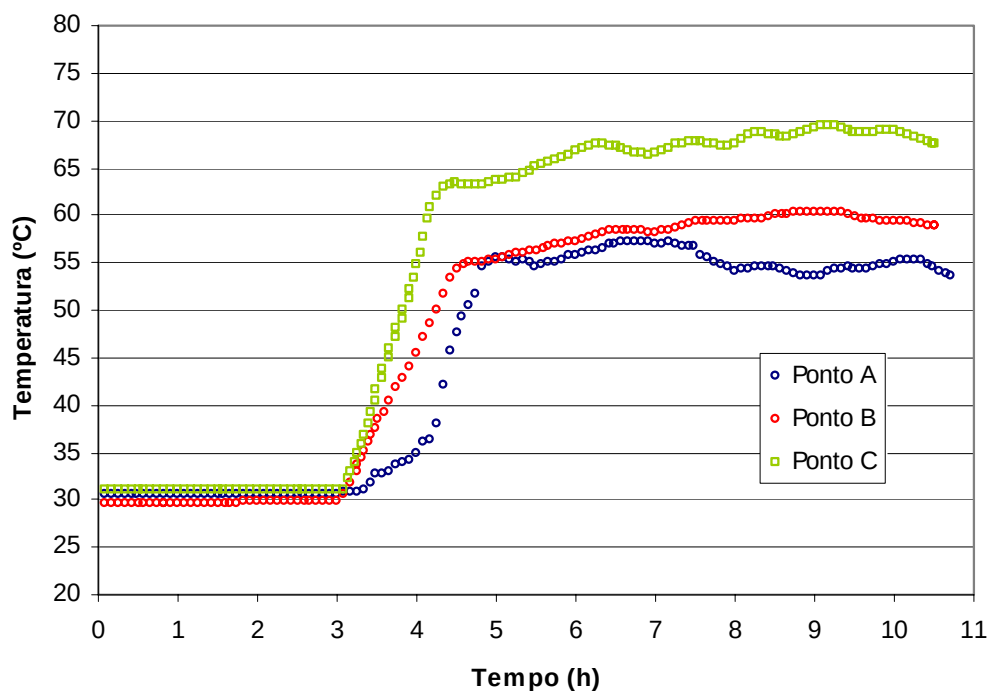


Figura 5.26 - Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova da pista das vigas I 70

A Tabela 5.5 fornece os valores de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados durante o ciclo térmico para os pontos A, B e C. Na Figura 5.27 estão ilustradas as relações entre os valores de resistência à compressão em função das idades de cura.

Tabela 5.5 - Valores de Resistência à compressão x Idade para a pista das vigas I 70

Ponto A					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
4	0	0	0	-	-
5	2,04	2,55	2,29	0,36	15,76
6	7,64	7,39	7,90	0,18	2,24
7	11,21	11,72	11,46	0,36	3,15
8	14,14	14,52	14,33	0,27	1,88
9	17,07	17,07	17,07	0	0
10	20,38	20,51	20,44	0,09	0,45

Ponto B					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
4	0	0	0	-	-
5	4,08	4,59	4,33	0,36	8,33
6	8,92	9,94	9,43	0,72	7,65
7	13,76	13,76	13,76	0	0
8	15,54	16,05	15,80	0,36	2,26
9	19,49	19,75	19,62	0,18	0,94
10	20,13	20,89	20,51	0,54	2,62

Ponto C					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
4	0	0	0	-	-
5	5,09	6,11	5,60	0,72	12,87
6	11,72	12,23	11,97	0,36	3,02
7	16,43	17,19	16,82	0,54	3,19
8	19,24	19,36	19,30	0,08	0,44
9	20,89	20,89	20,89	0	0
10	23,69	24,20	23,95	0,36	1,50

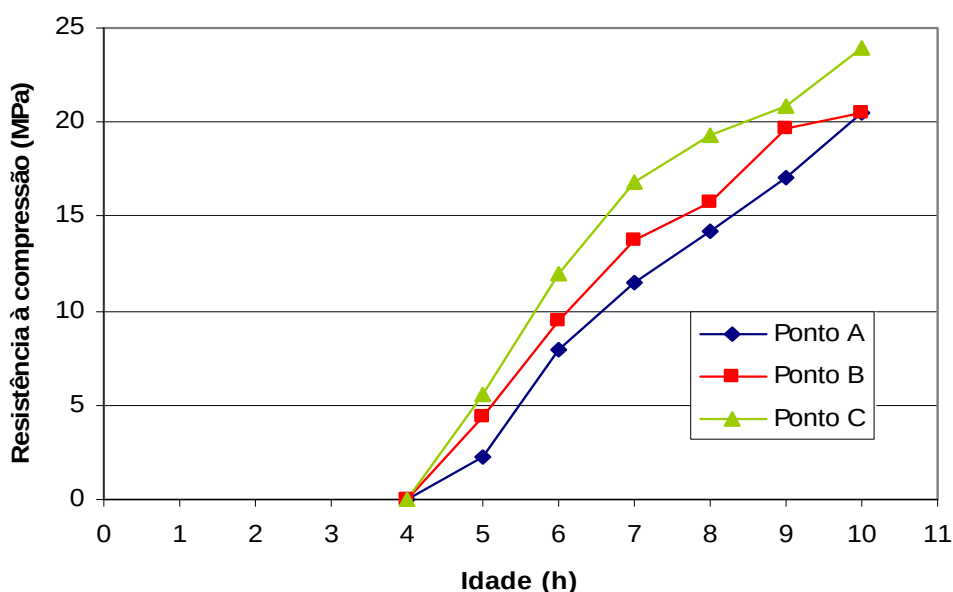


Figura 5.27 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para pistas das vigas I 70

5.7 VIGA ARMADA COM SEÇÃO TRANSVERSAL RETANGULAR DE 20 x 45 CM

As dimensões da seção transversal da viga VR 20 x 45 estão dispostas na Figura 5.28. A disposição dos pontos adotada para esse tipo de viga está ilustrada na Figura 5.29. Foram analisadas três seções, com três pontos ao longo da sua altura. Para cada ponto disposto conforme a Figura 5.29 foi inserida uma sonda termopar para a realização de leituras dos valores de temperatura do material durante a cura térmica. A distribuição do vapor foi aleatório ao longo da viga, com saídas de vapor localizadas nas laterais das fôrmas.

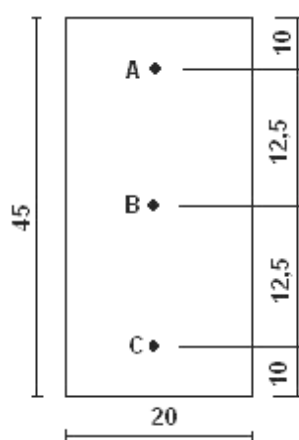


Figura 5.28 - Dimensões da seção transversal da viga armada VR 20 x 45 (em cm)

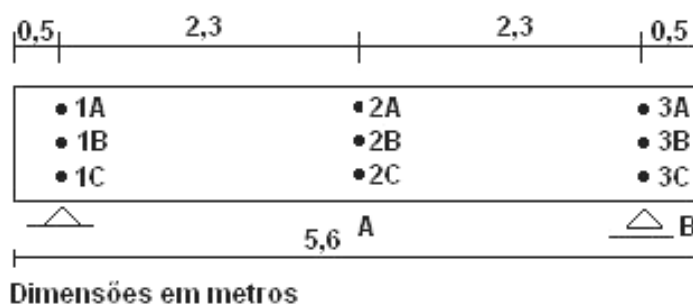


Figura 5.29 - Posicionamento dos pontos de aquisição de temperatura para a viga armada retangular – VR 20 x 45

Foram moldados corpos de prova, os quais foram posicionados nos pontos A e B, com realização de ensaios mecânicos a cada hora do ciclo térmico, com ruptura de dois corpos de prova por ponto, totalizando quatro valores de ruptura por hora, até que o concreto atingisse a

resistência à compressão de 12 MPa. O desenvolvimento das temperaturas durante o ciclo térmico está ilustrado na Figura 5.30.

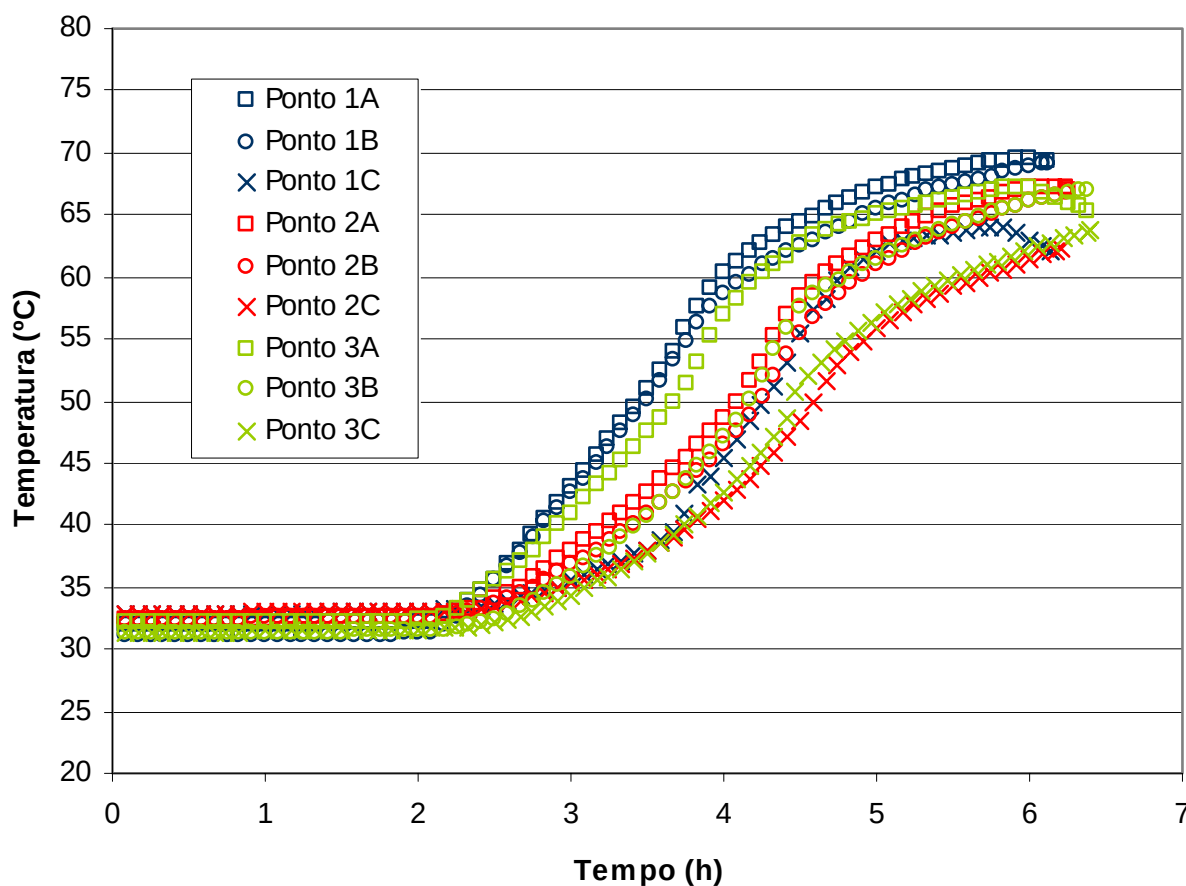


Figura 5.30 - Gráfico Temperatura x Tempo para a viga armada VR 20 x 45

A concretagem do elemento estrutural foi realizada a partir das 15 h 30 min, com início de cura térmica às 17 h 30 min, com período preliminar de 2 h. A temperatura ambiente média durante o ciclo térmico foi de 27°C.

A análise da Figura 5.30 permite observar que os gradientes térmicos foram mais representativos ao longo da altura do elemento estrutural. Os pontos superiores das seções apresentaram as maiores temperaturas devido ao fato de estarem em contato direto com o vapor, uma vez que a distribuição de vapor para os elementos em concreto armado foi realizada de forma aleatória, com as saídas de vapor localizadas junto às laterais da estrutura.

O gráfico da Figura 5.31 fornece o desenvolvimento da temperatura para os corpos de prova colocados junto à fôrma durante o ciclo térmico nos pontos A e B.

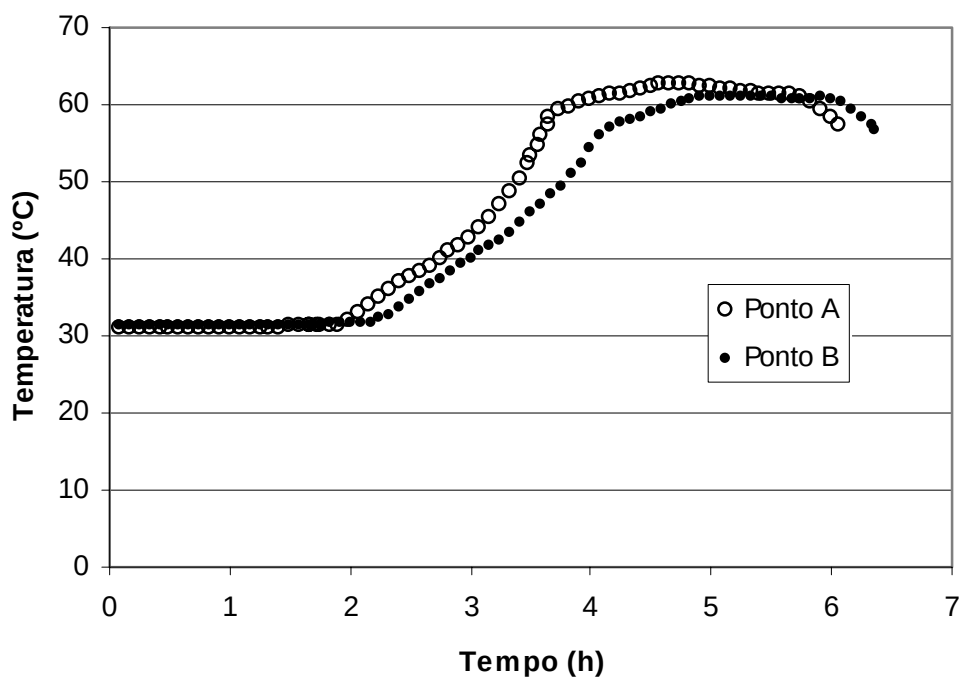


Figura 5.31 - Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova (VR 20 x 45)

A Tabela 5.6 fornece os valores de resistência em função das idades de cura, para os pontos A e B, obtidos durante a realização do ciclo térmico da viga armada VR 20 x 45.

Tabela 5.6 - Valores de Resistência à compressão x Idade para viga VR 20 x 45

Ponto A					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	2,04	2,55	2,29	0,36	15,76
5	8,15	8,15	8,15	0	0
6	13,89	14,65	14,27	0,54	3,76

Ponto B					
<i>Idade (h)</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>			<i>Desvio Padrão</i>	<i>Coef. de Variação (%)</i>
	<i>1ª Ruptura</i>	<i>2ª Ruptura</i>	<i>Média</i>		
3	0	0	0	-	-
4	1,66	2,42	2,04	0,54	26,32
5	6,88	7,90	7,39	0,72	9,76
6	11,85	12,10	11,97	0,18	1,48

A curva de resistência à compressão em função da idade está ilustrada pelo gráfico da Figura 5.32.

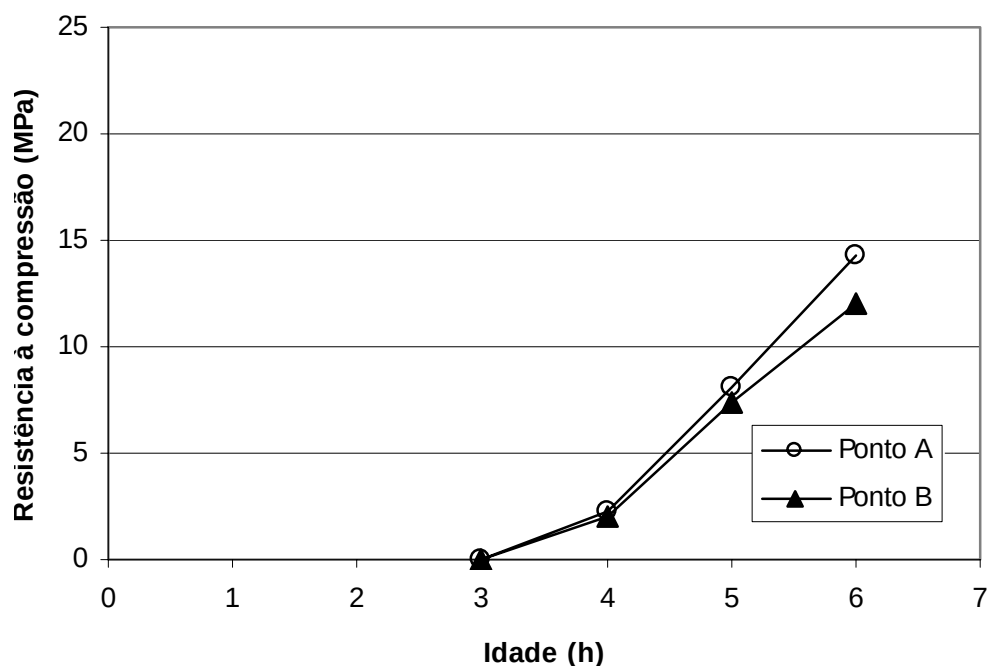


Figura 5.32 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para a viga VR 20 x 45

5.8 PILAR ARMADO EM SEÇÃO RETANGULAR 30 X 50 CM

A Figura 5.33 fornece as dimensões da seção transversal do pilar armado. No interior do pilar há um duto circular destinada à passagem de águas pluviais. Os pontos de monitoramento da temperatura estão dispostos na Figura 5.34.

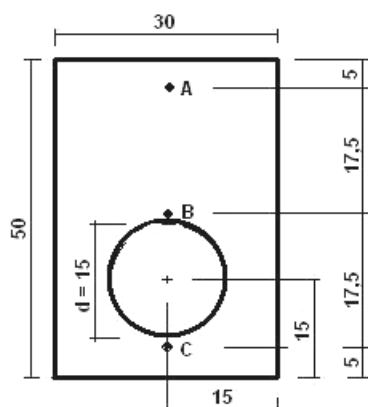


Figura 5.33 – Dimensões da seção transversal do pilar armado P 30 x 50

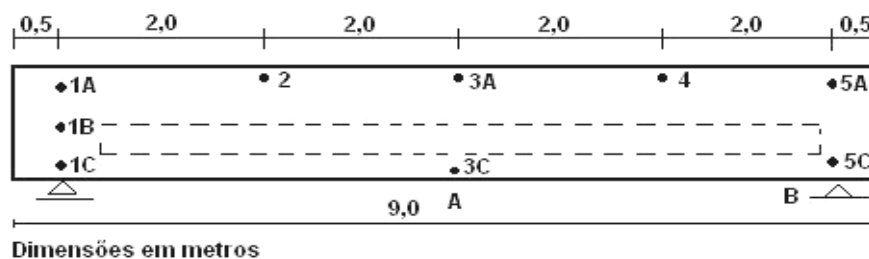


Figura 5.34 - Posicionamento dos pontos de monitoramento para o pilar armado P 30 x 50

Os corpos de prova foram moldados e dispostos nas posições dos pontos A e B, com ensaios mecânicos realizados a cada hora durante o ciclo térmico, até a obtenção da resistência de 12 MPa. A concretagem do pilar teve início às 13 h, com aplicação de cura térmica a partir das 15 h. Para esta configuração de ensaio foram necessárias 5 h até que o concreto atingisse uma resistência à compressão de 12 MPa, com um período preliminar de 2h. A Figura 5.35 ilustra o comportamento da temperatura nos pontos de monitoramento durante o ciclo térmico.

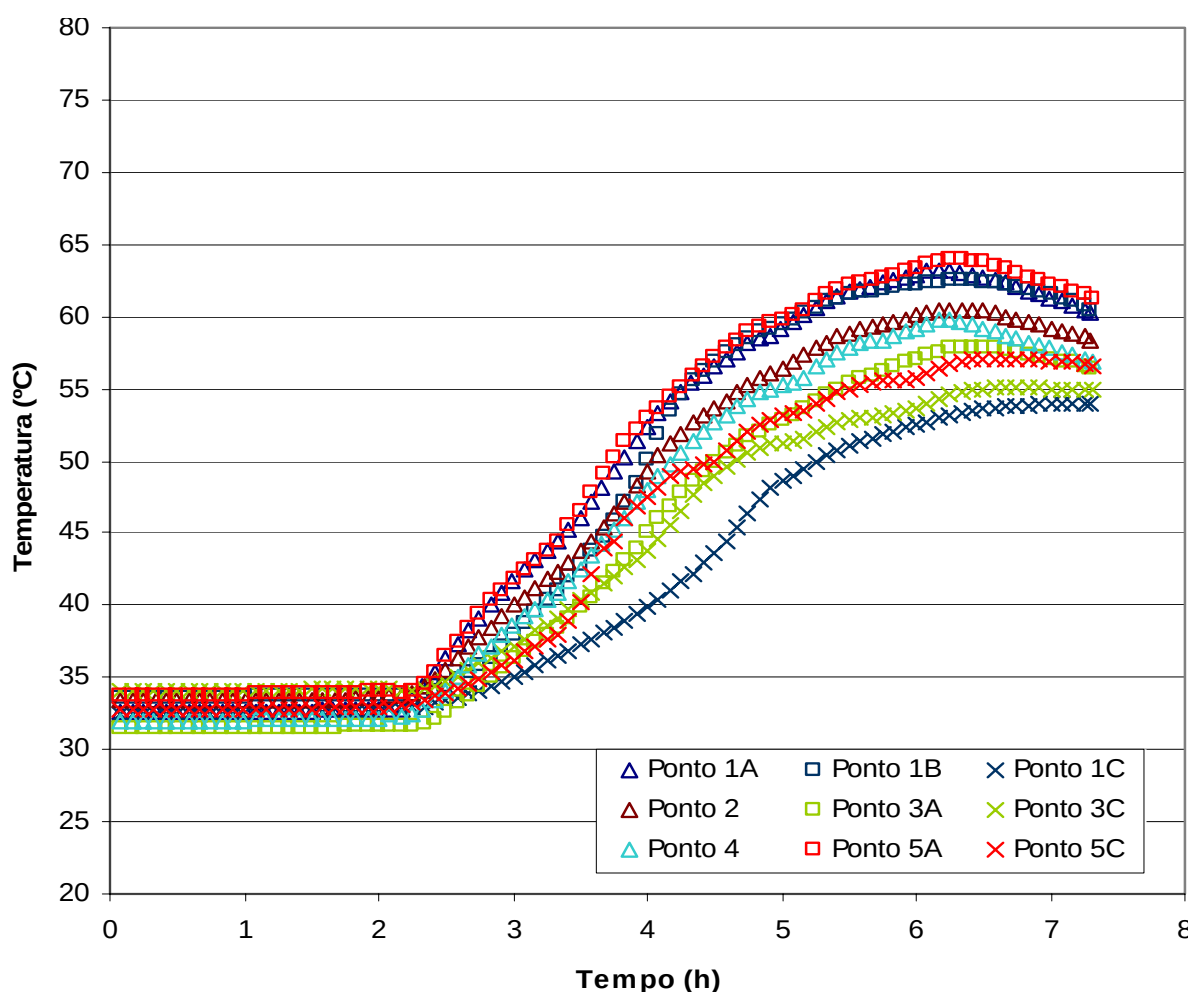


Figura 5.35 - Gráfico Temperatura x Tempo para o pilar P 30 x 50

O histórico de temperaturas está representado na Figura 5.36, para os pontos A e B, conforme indicados anteriormente pela Figura 5.34.

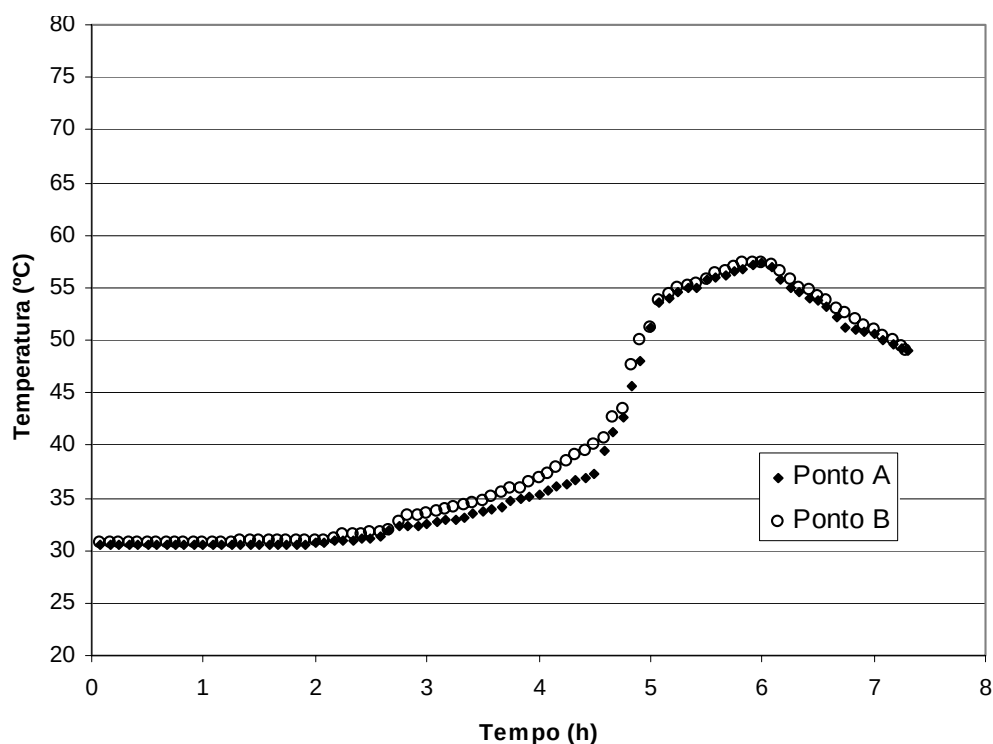


Figura 5.36 - Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova (P 30 x 50)

Os valores de resistência à compressão obtidos a cada hora do ciclo térmico estão dispostos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Valores de Resistência à compressão x Idade para o pilar P 30 x 50

Ponto A					
Idade (h)	Resistência à compressão (MPa)			Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
	1ª Ruptura	2ª Ruptura	Média		
3	0	0	0	-	-
4	0	0	0	-	-
5	1,78	2,29	2,04	0,36	17,70
6	6,75	7,00	6,88	0,18	2,57
7	11,72	12,48	12,10	0,54	4,44

Ponto B					
Idade (h)	Resistência à compressão (MPa)			Desvio Padrão	Coef. de Variação (%)
	1ª Ruptura	2ª Ruptura	Média		
3	0	0	0	-	-
4	0	0	0	-	-
5	3,69	3,95	3,82	0,18	4,82
6	7,64	8,15	7,90	0,36	4,57
7	12,10	12,36	12,23	0,18	1,50

A curva de resistência à compressão em função das idades de cura térmica é ilustrada na Figura 5.37.

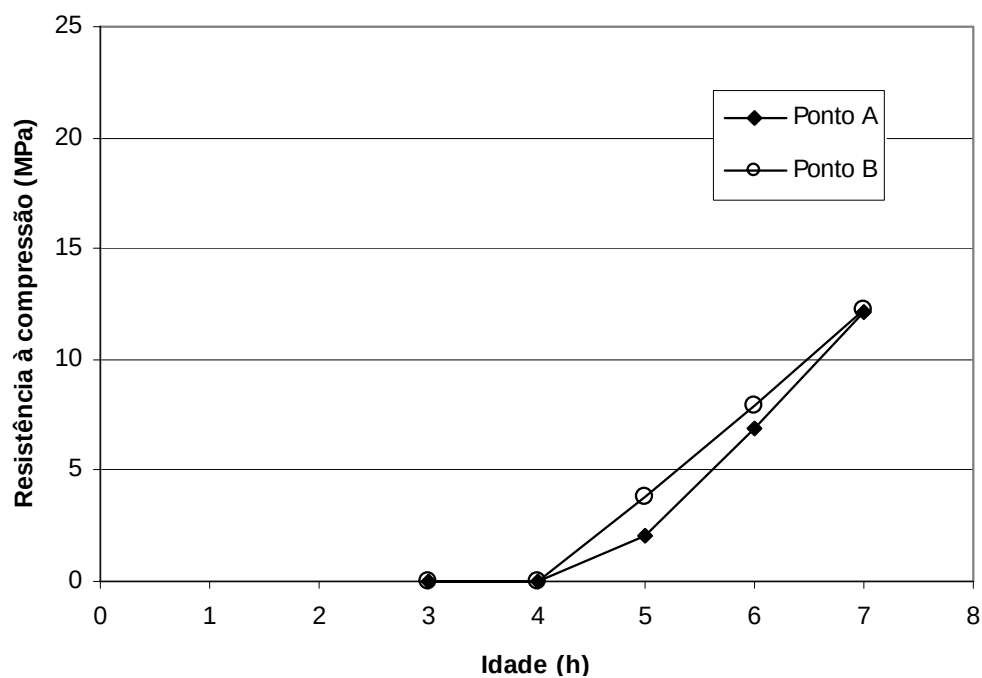


Figura 5.37 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para o pilar P 30 x 50

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes à determinação da energia aparente de ativação, segundo o procedimento ASTM C 1074-98, assim como a aplicação do conceito do Método da Maturidade como método não destrutivo para avaliar a resistência do concreto, utilizando-se das curvas de calibração elaboradas no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC).

6.1 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO

Os valores de resistência à compressão da argamassa estão dispostos na Tabela 6.1, para cada temperatura de cura.

Tabela 6.1 - Resistência à compressão da argamassa para cada temperatura de cura

<i>Cura a 10°C</i>		<i>Cura a 30°C</i>		<i>Cura a 55°C</i>		<i>Cura a 80°C</i>	
<i>Idade (dia)</i>	<i>Res. (MPa)</i>	<i>Idade (dia)</i>	<i>Res. (MPa)</i>	<i>Idade (dia)</i>	<i>Res. (MPa)</i>	<i>Idade (dia)</i>	<i>Res. (MPa)</i>
1,00	4,31	0,39	4,16	0,15	4,53	0,10	4,21
2,00	17,33	0,79	20,13	0,31	16,13	0,20	16,80
4,00	32,13	1,58	33,07	0,62	27,20	0,41	25,87
8,00	43,00	3,16	42,67	1,25	32,93	0,83	30,13
16,00	55,33	6,33	49,07	2,50	36,53	1,66	32,47
32,00	59,40	12,66	54,07	5,00	42,73	3,33	33,20

Os valores das resistências últimas (Su_T) da argamassa, assim como as constantes de velocidade de reação (k_T) estão dispostos na Tabela 6.2, para cada temperatura de cura adotada.

Tabela 6.2 - Valores de Su_T e k_T

Temperatura (°C)	Resistência Última Su_T (MPa)	Constante de velocidade k_T
10	69,06	0,2245
30	59,17	0,8967
55	43,89	2,6251
80	35,03	8,2834

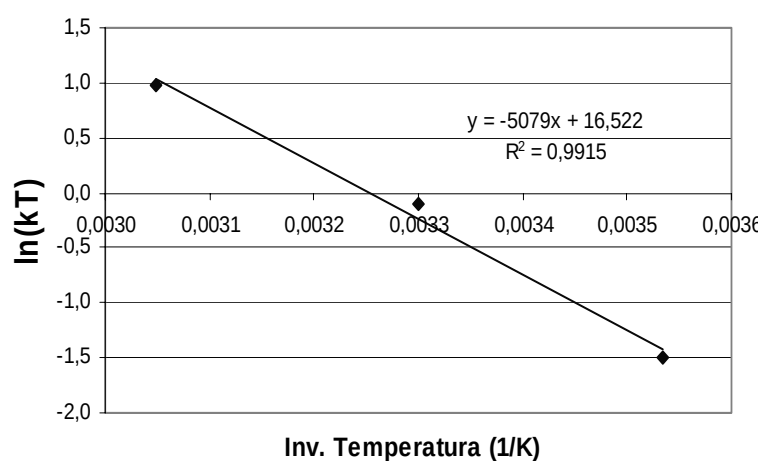
6.1.1 Energia aparente de ativação nas temperaturas de 10 °C, 30 °C e 55°C

Os valores referentes a essa combinação de temperaturas estão dispostos na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Valores de k_T x Inv. Temperatura (10°C, 30°C e 55°C)

Temperatura (°C)	Temperatura (graus Kelvin)	Inv. Temperatura (1/K)	k_T	$\ln(k_T)$
10	283	0,0035	0,2245	-1,494
30	303	0,0033	0,8967	-0,109
55	328	0,0030	2,6468	0,973

Com os valores de k_T e Inv. Temperatura fornecidos pela Tabela 6.3, é possível a elaboração o gráfico da Figura 6.1, obtendo-se o valor da energia aparente de ativação conforme a Equação 3.8.

Figura 6.1 - Gráfico $\ln(k_T)$ x Inv. Temperatura – 10°C, 30°C e 55°C

O valor da energia aparente de ativação é dado através do coeficiente angular da Figura 6.1, sendo:

$$\frac{-E_a}{R} = -5079 \rightarrow E_a = 5079 \cdot 8,314 = 42226,806 \text{ J/mol} \rightarrow E_{a(10,30,55)} = 42,2 \text{ kJ/mol}$$

6.1.2 Energia aparente de ativação nas temperaturas de 30°C, 55°C e 80°C

Os resultados referentes a essa combinação de temperaturas estão dispostos na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Valores de k_T x Inv. Temperatura (30°C, 55°C e 80°C)

Temperatura (°C)	Temperatura (graus Kelvin)	Inv. Temperatura (1/K)	k_T	$\ln(k_T)$
30	303	0,0033	0,8966	-0,109
55	328	0,0030	2,6251	0,965
80	353	0,0028	8,2834	2,114

A partir dos dados da Tabela 6.4, é possível a elaboração do gráfico da Figura 6.2.

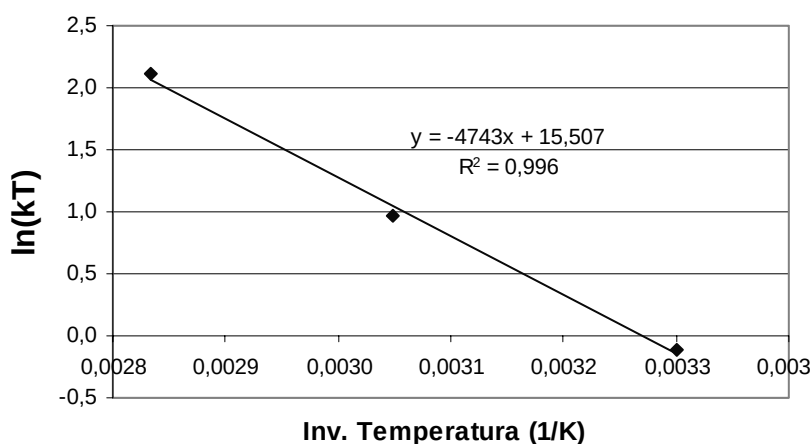


Figura 6.2 - Gráfico $\ln(k_T)$ x Inv. Temperatura – 30°C, 55°C e 80°C

Logo, a energia aparente de ativação é dada por:

$$\frac{-E_a}{R} = -4743 \rightarrow E_a = 4743 \cdot 8,314 = 39433,302 \text{ J/mol} \rightarrow E_{a(30,55,80)} = 39,4 \text{ kJ/mol}$$

6.1.3 Energia aparente de ativação nas temperaturas de 10°C, 30°C, 55°C e 80°C

Neste item são consideradas todas as temperaturas de ensaio para cálculo da energia aparente de ativação. A Tabela 6.5 contém todos os dados necessários ao cálculo de E_a para essa combinação de temperaturas.

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Temperatura (graus Kelvin)</i>	<i>Inv. Temperatura (1/K)</i>	k_T	$\ln(k_T)$
10	283	0,0035	0,2245	-1,494
30	303	0,0033	0,8966	-0,109
55	328	0,0030	2,6251	0,965
80	353	0,0028	8,2834	2,114

Com os valores constantes da Tabela 6.5, confecciona-se o gráfico da Figura 6.3, para obtenção do valor da energia de ativação (E_a).

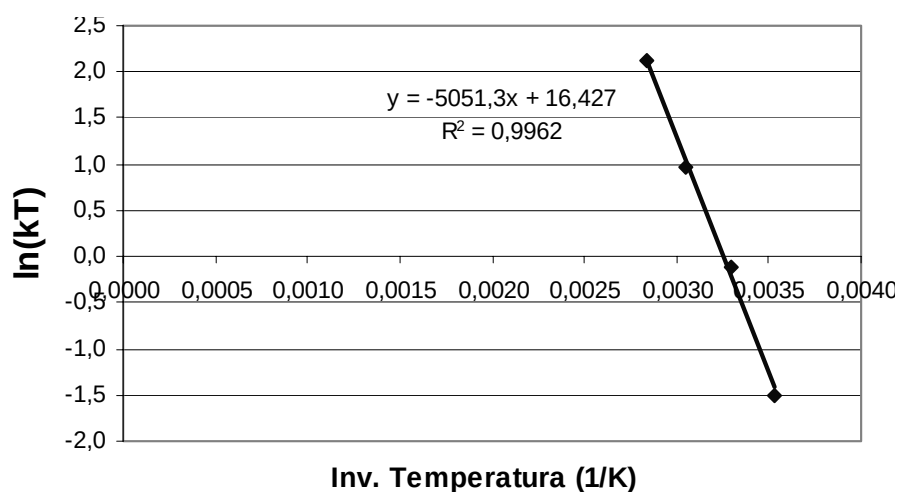


Figura 6.3 - Gráfico $\ln(k_T)$ x Inv. Temperatura – 10°C, 30°C, 55°C e 80°C

Para as quatro temperaturas, a energia de ativação (E_a) é obtida por:

$$\frac{-E_a}{R} = -5051 \rightarrow E_a = 5051 \cdot 8,314 = 41994,014 \quad J/mol \rightarrow E_{a(10,30,55,80)} = 42,0 \quad kJ/mol$$

A Tabela 6.6 dispõe, de forma resumida, os valores obtidos de energia aparente de ativação para as combinações de temperatura adotadas.

Tabela 6.6 - Valores de energia aparente de ativação (E_a)	
<i>Combinações de temperaturas</i>	<i>Valores de E_a (kJ / mol)</i>
10°C, 30°C e 55°C	42,2
30°C, 55°C e 80°C	39,4
10°C, 30°C, 55°C e 80°C	42,0

Pela análise dos valores de energia aparente de ativação a partir da Tabela 6.6 percebe-se a influência dos intervalos de temperatura dos ensaios sobre os valores obtidos experimentalmente para E_a . Para os ensaios realizados tendo uma temperatura de 10°C, os valores de E_a foram da ordem de 42,0 kJ/mol. Para o ensaio realizado com as temperaturas de 30°C, 55°C e 80°C, o valor de E_a obtido foi de 39,4 kJ/mol, evidenciando uma redução no valor dessa energia quando as reações químicas se processam em temperaturas mais elevadas, ou seja, quando há fatores que influenciam o aumento das velocidades de hidratação do cimento.

A ASTM C 1074-98 recomenda que sejam utilizadas no mínimo 3 temperaturas de cura durante os ensaios para determinação experimental da energia aparente de ativação (E_a). Para cálculo dos valores de idades equivalentes foi utilizado o valor de 39,4 kJ/mol, referente aos ensaios realizados às temperaturas de 30°C, 55°C e 80°C, por estarem mais próximas das temperaturas de ciclo térmico, segundo as recomendações da ASTM C 1074-98.

6.2 ELABORAÇÃO DAS CURVAS DE MATURIDADE NO LCEC

Neste item são apresentados os dados experimentais para elaboração das curvas de calibração necessárias à aplicação do Método da Maturidade, através da realização de dois ensaios térmicos em laboratório, sendo o primeiro logo após a concretagem dos corpos de prova, enquanto que o segundo, respeitou-se o tempo de início de pega do cimento antes da aplicação da cura térmica.

Para o monitoramento da temperatura no interior dos corpos de prova foram utilizadas três sondas termopares acopladas a multímetros digitais. Os corpos de prova para acompanhamento da evolução da temperatura foram dispostos nas posições inferior, intermediária e superior da câmara térmica, assim como ilustrado pela Figura 6.4.



Figura 6.4 - Posicionamento dos multímetros na câmara térmica

Nos corpos de prova para o ciclo realizado imediatamente após a moldagem, as temperaturas foram coletadas a partir do momento em que os corpos de prova foram dispostos na câmara térmica. Para o ciclo térmico após o tempo de início de pega, foram também coletadas as temperaturas do material antes da aplicação da cura térmica.

6.2.1 Realização do ciclo térmico após a elaboração dos corpos de prova

A Figura 6.5 fornece os históricos das temperaturas no interior dos corpos de prova.

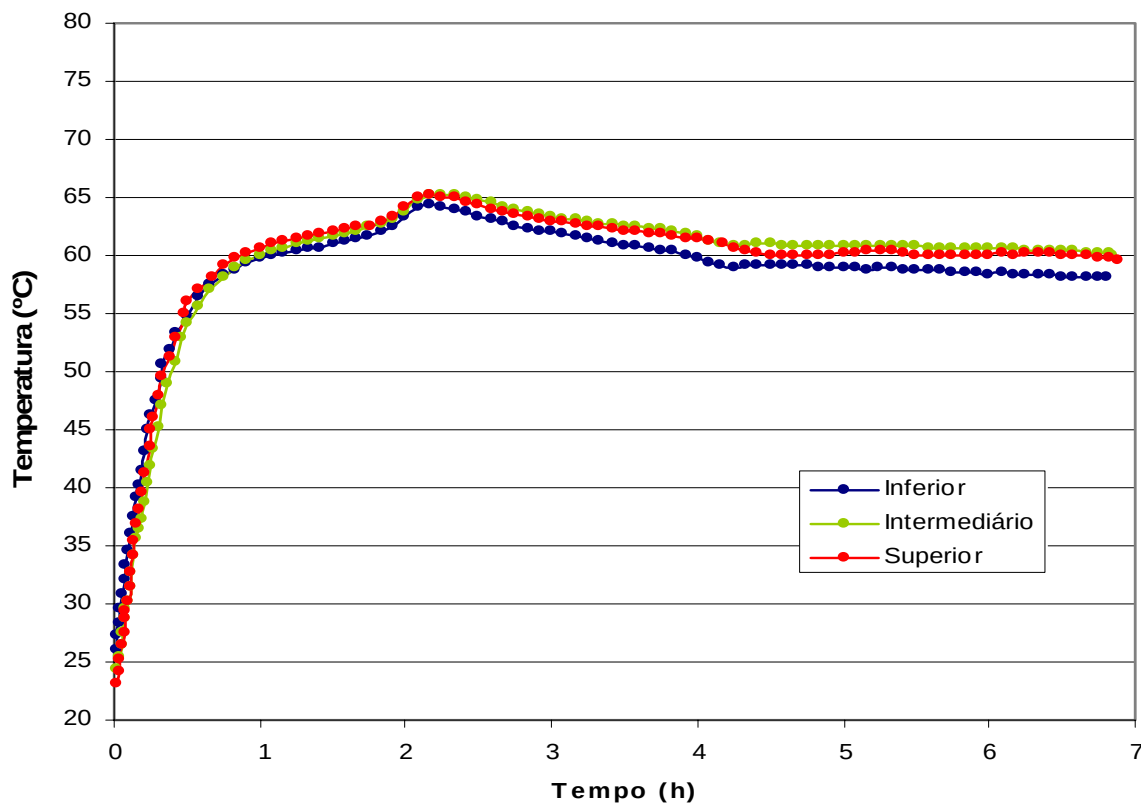


Figura 6.5 – Gráfico Temperatura x Tempo dos corpos de prova (ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova)

A Figura 6.6 ilustra a relação entre as idades reais e as idades equivalentes a 20°C.

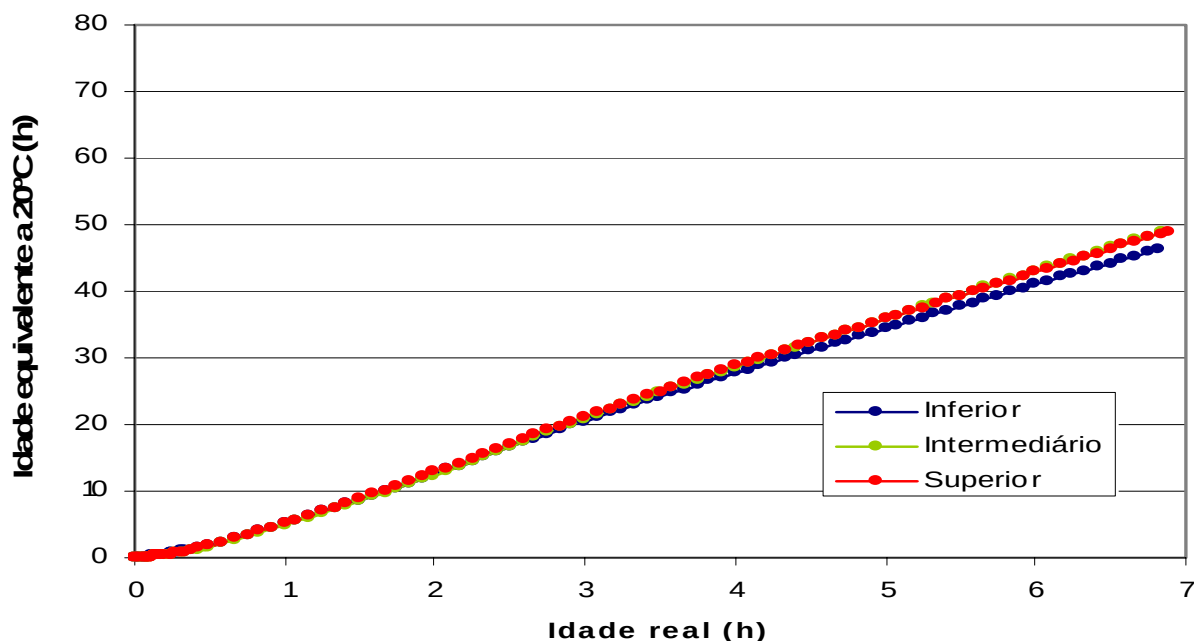


Figura 6.6 - Gráfico Id. Equivalente x Id. Real
(ciclo térmico após a elaboração dos corpos de prova)

A Tabela 6.7 fornece os valores de resistência à compressão dos corpos de prova durante a realização do primeiro ciclo térmico no LCEC.

Tabela 6.7 – Valores de resistência (ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova)

Idade (h)	Resistência à compressão (MPa)				Desvio Padrão	Coef.de Variação (%)
	1ª Ruptura	2ª Ruptura	3ª Ruptura	Média		
1	0,40	0,40	0,30	0,37	0,06	15,68
2	2,20	2,30	2,40	2,30	0,10	4,35
3	6,90	6,80	6,40	6,70	0,27	3,96
4	8,50	9,00	8,80	8,77	0,25	2,87
5	11,70	11,70	11,20	11,53	0,29	2,51
6	13,80	14,40	13,80	14,00	0,35	2,47
7	14,00	13,50	15,00	14,17	0,76	5,39

A Figura 6.7 fornece a relação entre os valores de resistência à compressão e a idade do material durante o ciclo térmico.

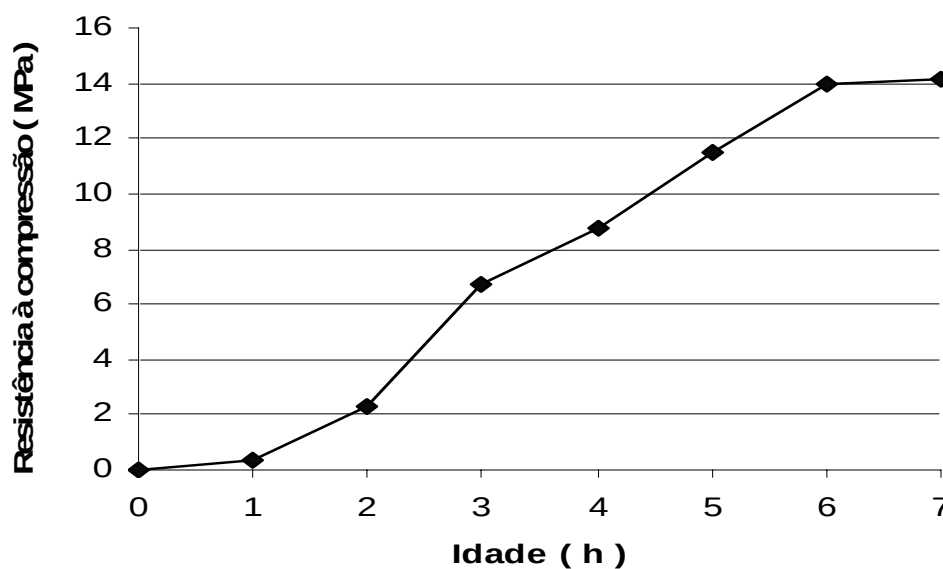


Figura 6.7 - Gráfico Resistência à compressão x Idade
(ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova)

Na Tabela 6.8 estão dispostos os valores de resistência à compressão em função das idades equivalentes a 20°C. A Figura 6.8 expressa os valores de resistência à compressão em termos de idades equivalentes à temperatura de 20°C.

Tabela 6.8 - Valores de Resistência x Id. Equivalentes
(ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova)

<i>Idade real (horas)</i>	<i>Idade Equivalente a 20°C (h)</i>	<i>Resistência (MPa)</i>
1	1,41	0,37
2	3,95	2,30
3	8,31	6,70
4	14,33	8,77
5	20,37	11,53
6	26,35	14,00
7	28,99	14,17

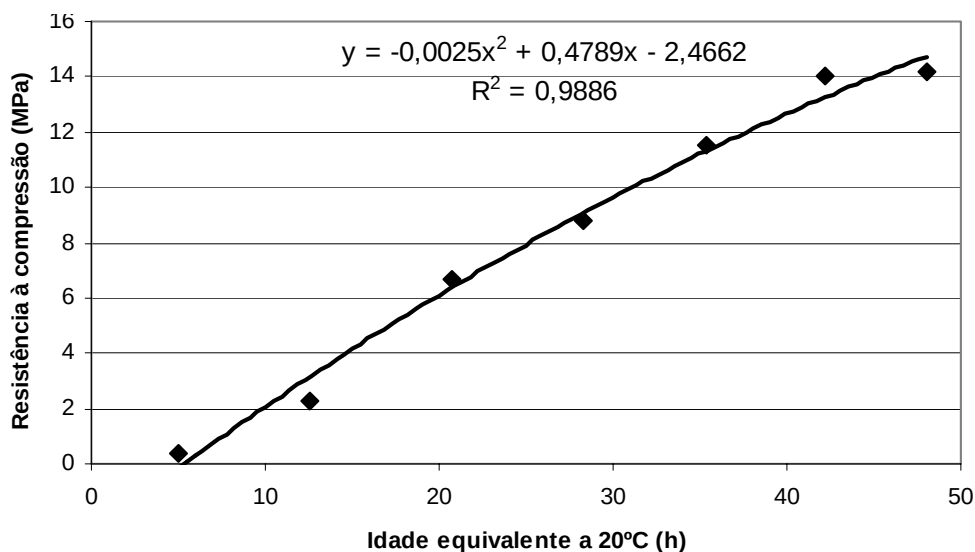


Figura 6.8 - Gráfico Resistência à compressão x Idade equivalente a 20°C (ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova)

A Tabela 6.9 fornece os valores dos módulos de elasticidade determinados ao final do ciclo térmico.

Tabela 6.9 – Módulo de elasticidade (ciclo térmico após elaboração dos corpos de prova)

C_{ps}	Módulo de Elasticidade (GPa)						Média (GPa)	Desvio Padrão	C. Variação (%)
1	26,57	25,02	24,08	24,85	23,98	22,69	24,53	1,30	5,28
2	27,70	28,74	27,01	25,98	26,29	26,43	27,02	1,04	3,84
3	28,56	28,14	27,25	24,70	29,61	26,52	27,46	1,72	6,28

Módulo de Elasticidade Médio = 26,34 GPa

A curva de calibração obtida com a realização do ciclo térmico imediatamente após a concretagem será utilizada para estimar os valores de resistência à compressão para as vigas protendidas com seção transversal em I de 50 cm e 70 cm de altura.

6.2.2 Realização do ciclo térmico após o tempo de início de pega

A Figura 6.9 ilustra o desenvolvimento da temperatura no interior dos corpos de prova, antes e durante a aplicação da cura térmica.

A Figura 6.10 fornece a evolução das idades equivalentes em função das idades reais durante o ciclo térmico.

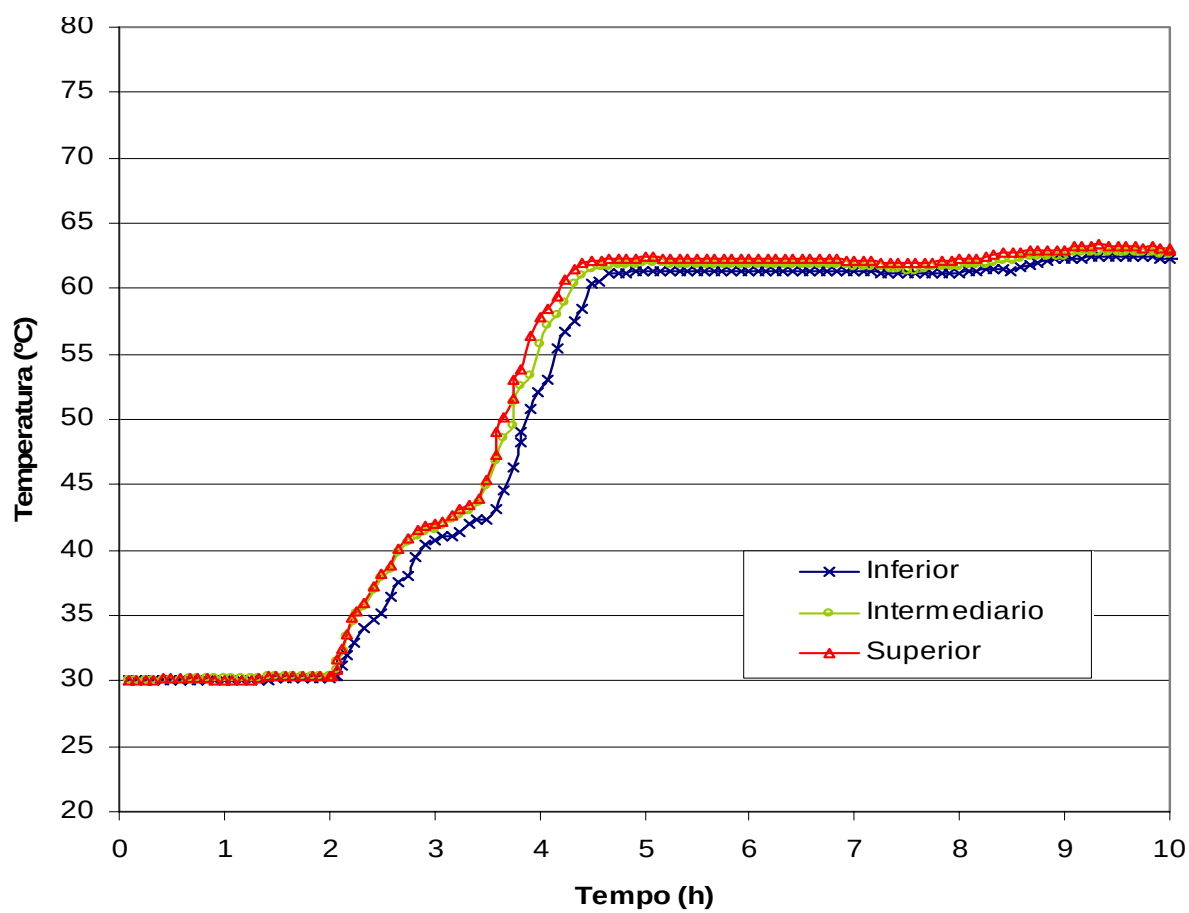


Figura 6.9 – Gráfico Temperatura x Tempo nos corpos de prova (ciclo térmico após o tempo de início de pega)

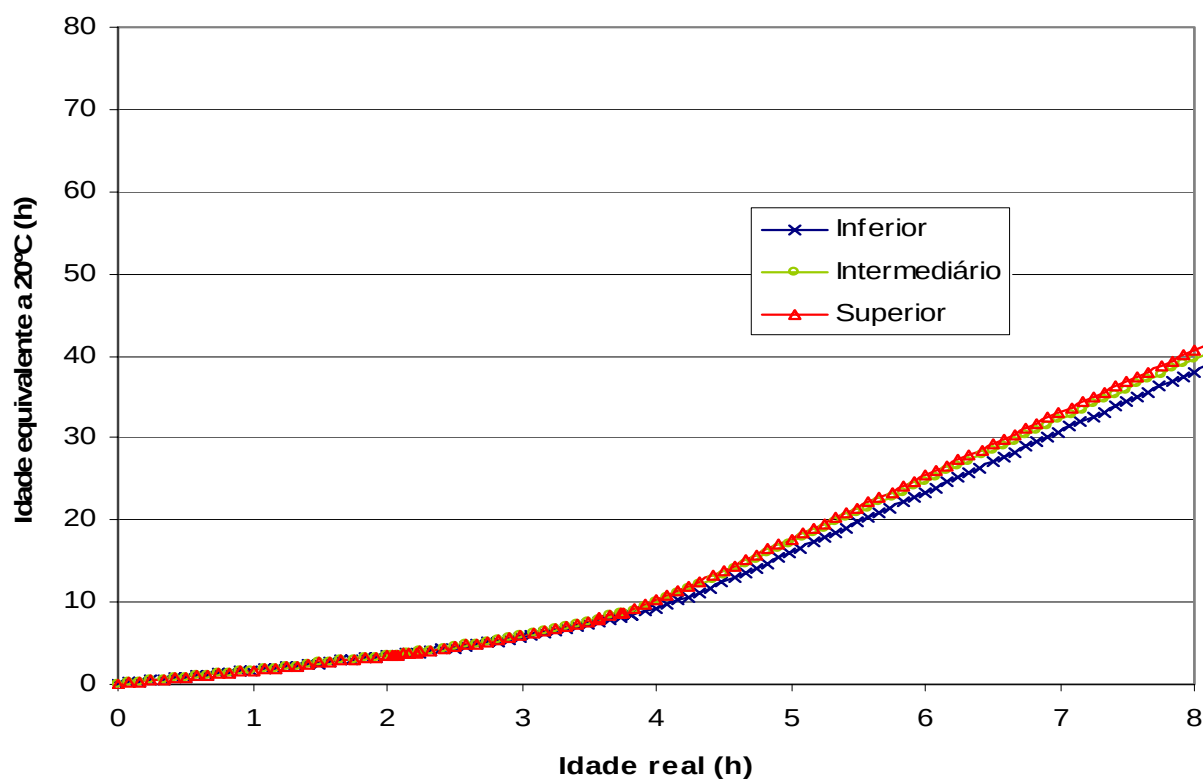


Figura 6.10 - Gráfico Id. Equivalente x Id. Real (ciclo térmico após o tempo de início de pega)

Na Tabela 6.10 estão dispostos os valores de resistência à compressão em função da idade do material.

Tabela 6.10 - Valores de resistência à compressão (ciclo térmico após tempo de início de pega)

Idade (h)	Resistência à compressão (MPa)				Desvio Padrão	Coef.de Variação (%)
	1ª Ruptura	2ª Ruptura	3ª Ruptura	Média		
3	0,38	0,32	0,37	0,36	0,03	8,89
4	3,63	2,60	3,45	3,23	0,55	17,03
5	7,94	7,13	8,92	8,00	0,90	11,20
6	12,10	12,23	11,85	12,06	0,19	1,60
7	15,03	15,67	15,16	15,30	0,34	2,21
8	18,85	16,81	17,58	17,75	1,03	5,80
9	19,87	20,13	19,11	19,70	0,53	2,69
10	21,66	22,42	23,06	22,38	0,70	3,13

A Figura 6.11 fornece a relação entre os valores de resistência à compressão e a idade do material durante o ciclo térmico.

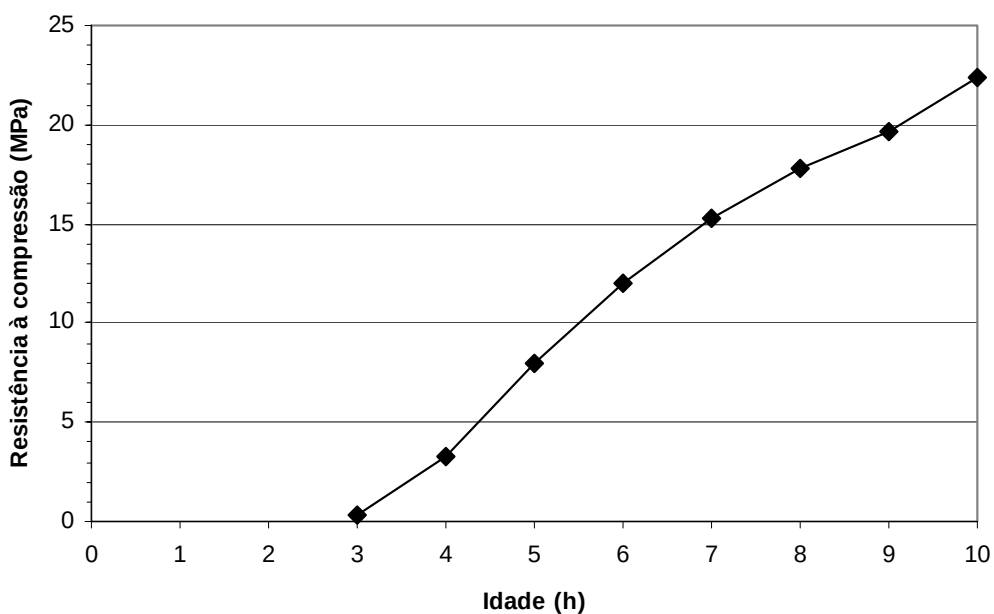


Figura 6.11 - Gráfico Resistência x Idade (ciclo térmico após tempo de início de pega)

Na Tabela 6.11 estão dispostos os valores de resistência à compressão obtidos em laboratório, relacionando-os com as idades equivalentes a 20°C.

A curva de calibração obtida com a realização do ciclo térmico após o tempo de início de pega será utilizada para avaliar a resistência à compressão das pistas de fabricação das vigas protendidas em seção I de 50 e 70 cm de altura, assim como das peças armadas, a saber: viga armada VR 20 x 45 e o pilar armado P 30 x 50.

6.3 APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 50 CM DE ALTURA

A Figura 6.13 fornece o desenvolvimento das idades equivalentes para uma temperatura de referência igual a 20°C, em função das idades reais de cura, para os pontos dispostos ao longo da viga.

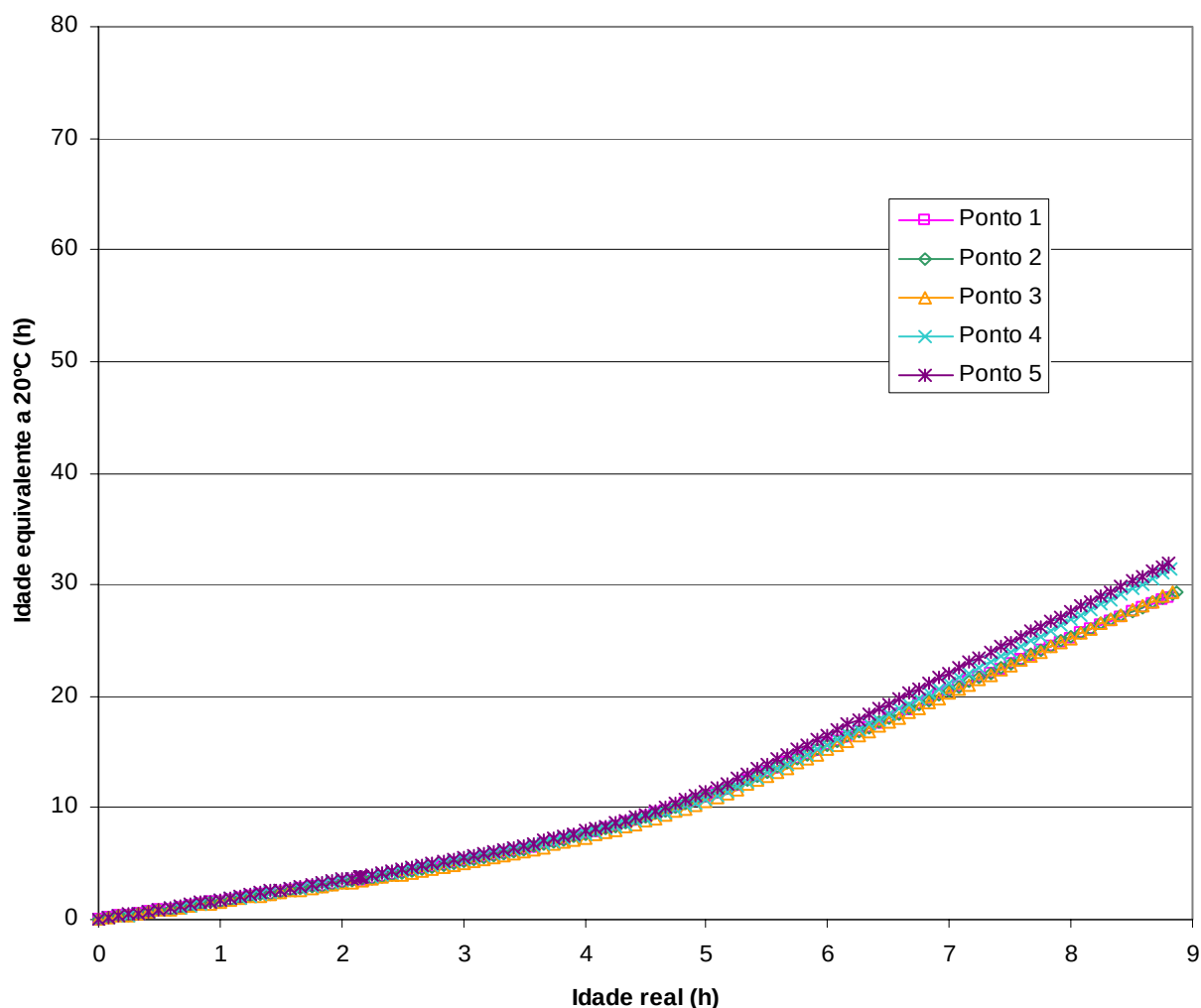


Figura 6.13 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para viga com seção transversal em I de 50 cm de altura

Com os dados colhidos de tempo e temperatura dos corpos de prova, foi possível obter as idades equivalentes para a temperatura de referência de 20°C nas idades de obtenção da resistência à compressão dos corpos de prova apresentados na Tabela 5.1, conforme os valores dispostos na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Valores de Resistência x Id. Equivalentes nos corpos de prova (Viga I 50)

<i>Idade real (horas)</i>	<i>Idade Equivalente a 20°C (h)</i>	<i>Resistência (MPa)</i>
3	5,27	0
4	7,52	0
5	11,17	1,02
6	15,60	4,33
7	19,56	6,24
8	23,67	8,28
9	25,71	9,76

A partir da curva de maturidade elaborada no LCEC, com cura térmica realizada logo após a moldagem dos corpos de prova, é possível comparar os valores estimados de resistência à compressão, com os obtidos nos corpos de prova como pode ser visto na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (Viga I 50)

<i>Id.Real (h)</i>	<i>Id. Equiv. a 20°C (h)</i>	<i>Resist. Real (MPa)</i>	<i>Resist.Teórica (MPa)</i>	<i>Variações Resist.(MPa)</i>	<i>Erro (%)</i>
3	5,27	0	0,13	-0,13	-
4	7,52	0	1,27	-1,27	-
5	11,17	1,02	3,19	-2,17	212,75
6	15,60	4,33	5,61	-1,28	29,56
7	19,56	6,24	7,85	-1,61	25,80
8	23,67	8,28	10,27	-1,99	24,03
9	25,71	9,76	11,50	-1,74	17,83

Para as resistências reais da viga I 50, pode-se proceder da mesma forma, estimando-se a resistência à compressão do concreto da viga I 50 durante o período de cura, a partir do seu histórico de temperaturas apresentado na Figura 5.9, conforme apresentado na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Valores teóricos de resistência da viga I 50

Pontos	Horas após a concretagem													
	3 horas		4 horas		5 horas		6 horas		7 horas		8 horas		9 horas	
	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)
1	5,13	0,06	7,64	1,34	10,99	3,10	15,59	5,61	20,45	8,38	25,22	11,20	28,89	13,45
2	5,15	0,06	7,66	1,35	11,04	3,12	15,63	5,63	20,48	8,39	25,30	11,25	29,31	13,72
3	5,00	0	7,35	1,19	10,62	2,90	15,20	5,39	20,23	8,25	25,25	11,22	29,32	13,72
4	5,33	0,16	7,64	1,34	10,82	3,01	15,70	5,67	21,19	8,80	26,81	12,17	31,39	15,03
5	5,52	0,25	7,90	1,47	11,40	3,32	16,56	6,15	22,07	9,32	27,59	12,65	31,97	15,40

6.4 APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À VIGA PROTENDIDA COM SEÇÃO TRANSVERSAL EM I DE 70 CM DE ALTURA

A Figura 6.14 fornece o desenvolvimento das idades equivalentes a uma temperatura de referência adotada em 20°C em função da idade real de cura térmica, para os pontos de monitoramento adotados ao longo da viga.

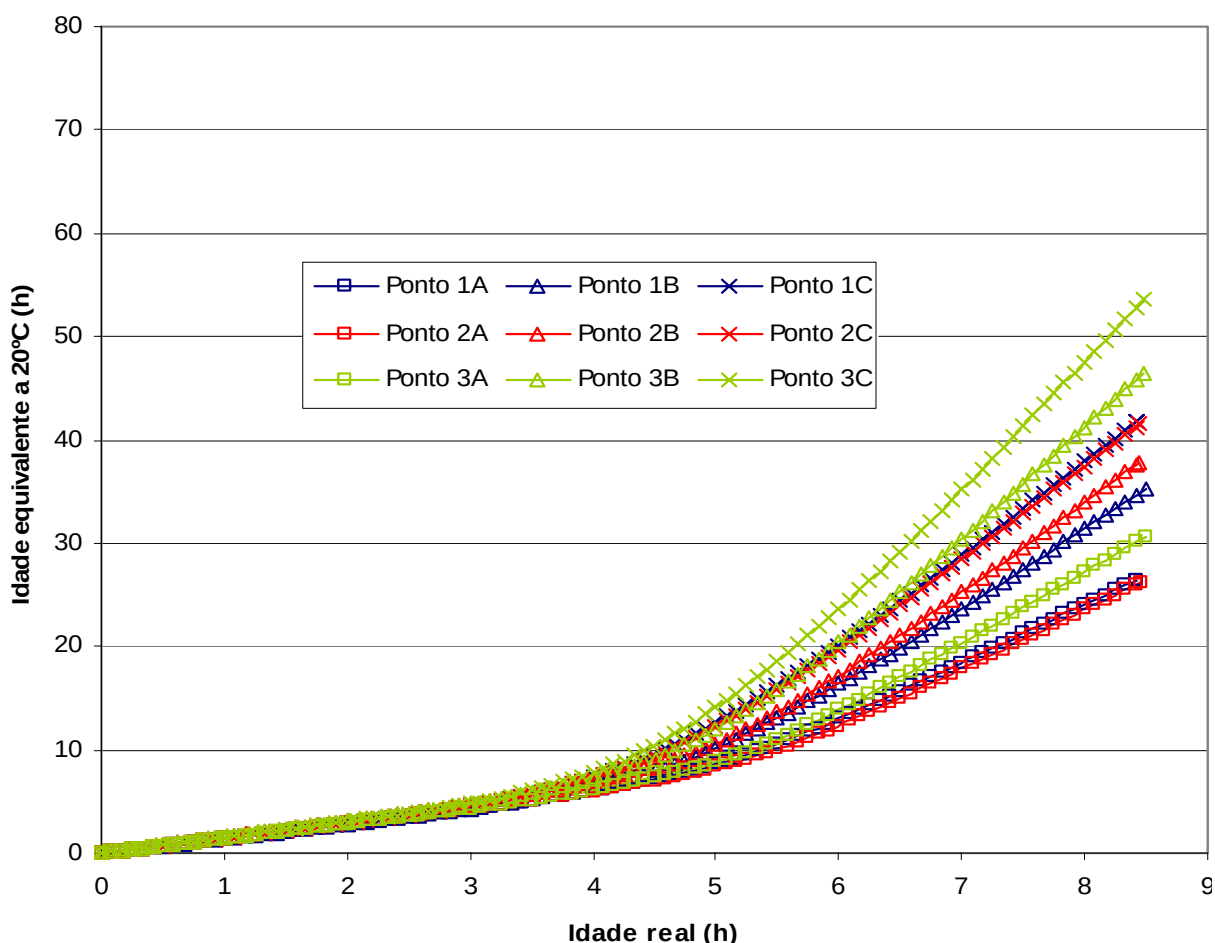


Figura 6.14 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para viga com seção transversal em I de 70 cm de altura

A Tabela 6.16 fornece os valores de resistência à compressão dos corpos de prova, relacionando-os com as idades equivalentes a uma temperatura de referência de 20°C.

Tabela 6.16 - Valores de Resistência x Id. Equivalentes nos corpos de prova (viga I 70)

<i>Idade real (horas)</i>	<i>Idade Equivalente a 20°C (h)</i>	<i>Resistência (MPa)</i>
3	3,69	0
4	6,23	0
5	10,59	2,80
6	16,61	7,14
7	22,65	9,55
8	28,63	13,37
9	31,28	14,77

Na Tabela 6.17 estão dispostos os valores teóricos de resistência à compressão dos corpos de prova obtidos através da curva de maturidade elaborada no LCEC, com cura realizada imediatamente após a moldagem dos corpos de prova de concreto.

Tabela 6.17 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (Viga I 70)

<i>Id.Real (h)</i>	<i>Id. Equiv. a 20°C (h)</i>	<i>Resist. Real (MPa)</i>	<i>Resist.Teórica (MPa)</i>	<i>Variações Resist.(MPa)</i>	<i>Erro (%)</i>
3	3,69	0	-0,67	0,67	-
4	6,23	0	0,61	-0,61	-
5	10,59	2,80	2,88	-0,08	2,86
6	16,61	7,14	6,18	0,96	13,44
7	22,65	9,55	9,66	-0,11	1,15
8	28,63	13,37	13,29	0,08	0,60
9	31,28	14,77	14,96	-0,19	1,29

Na Tabela 6.18 estão dispostos os valores teóricos de resistência à compressão dos pontos de monitoramento da viga I 70, com o histórico das temperaturas dado pela Figura 5.14.

Tabela 6.18 - Valores teóricos de resistência da viga I 70

Pontos	Horas após a concretagem													
	3 horas		4 horas		5 horas		6 horas		7 horas		8 horas		9 horas	
	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)	t _e (h)	f _c (MPa)
1A	4,27	0	6,04	0,52	8,60	1,84	12,98	4,17	18,47	7,23	24,05	10,50	26,49	11,97
1B	4,32	0	6,43	0,72	10,15	2,65	16,37	6,05	23,65	10,26	31,39	15,03	35,26	17,53
1C	4,52	0	7,29	1,16	12,64	3,99	20,16	8,20	28,85	13,43	37,93	19,29	41,82	21,93
2A	4,32	0	6,01	0,50	8,35	1,71	12,34	3,83	17,85	6,88	23,54	10,19	26,16	11,77
2B	4,74	0	6,94	0,98	10,61	2,90	17,20	6,51	25,24	11,21	33,90	16,64	37,82	19,22
2C	4,55	0	7,22	1,12	12,28	3,79	19,69	7,93	28,41	13,16	37,44	18,97	41,53	21,73
3A	4,32	0	6,12	0,56	8,81	1,95	13,84	4,64	20,35	8,31	27,22	12,42	30,66	14,57
3B	4,77	0	7,28	1,15	12,06	3,67	20,38	8,33	30,40	14,40	41,26	21,55	46,47	25,19
3C	4,76	0	7,83	1,43	14,10	4,78	23,63	10,25	35,17	17,47	47,58	25,98	53,55	30,35

6.5 APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS I 50 NO PERÍODO DIURNO

A Figura 6.15 ilustra o desenvolvimento das temperaturas para a pista de fabricação.

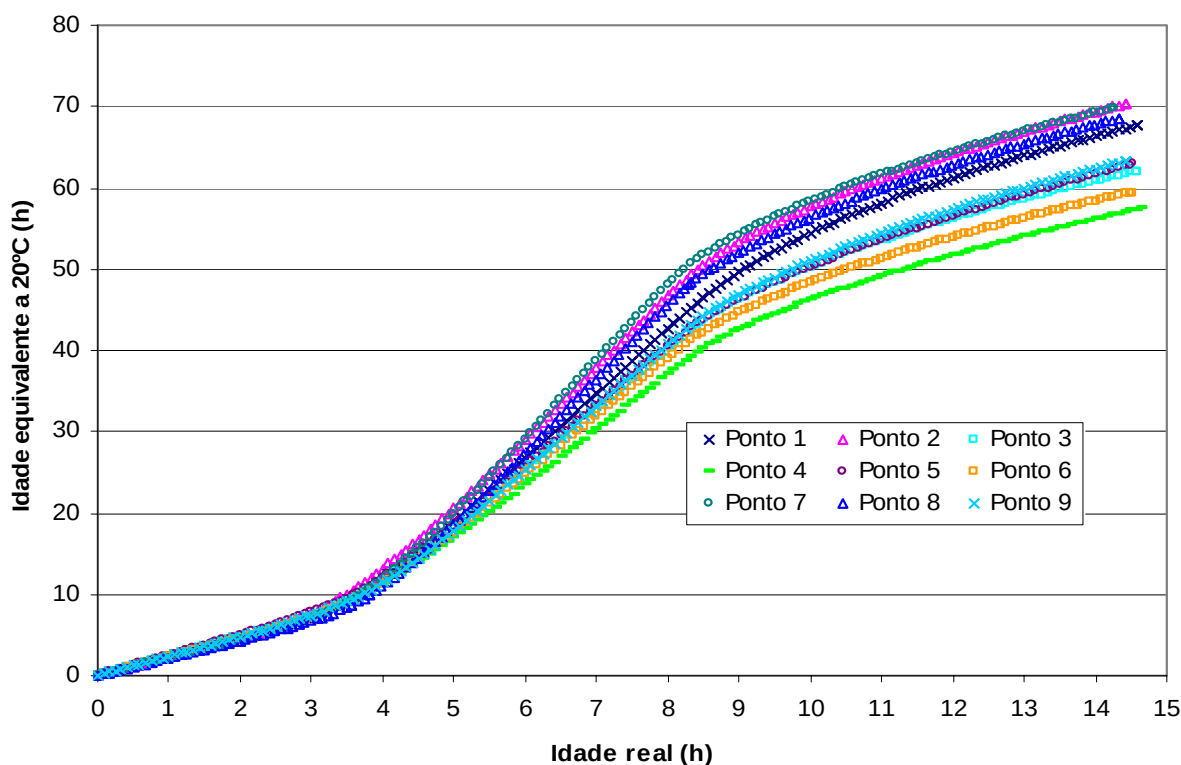


Figura 6.15 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para a viga I 50 (dia)

Na Tabela 6.19 estão os valores de resistência à compressão em função de suas respectivas idades equivalentes para os corpos de prova localizados nos pontos A, B e C.

Tabela 6.19 - Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova (VI 50, dia)

<i>Id.Real</i> (h)	Ponto A		Ponto B		Ponto C	
	<i>Id.Eq.(h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>	<i>Id.Eq. (h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>	<i>Id.Eq.(h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>
3	7,45	0	6,69	0	6,29	0
4	12,25	4,84	11,65	2,04	11,40	3,82
5	19,25	8,22	17,89	6,75	17,87	8,22
6	27,20	12,04	24,06	10,76	24,29	12,55
7	35,50	16,09	30,04	14,78	30,39	16,56
8	43,78	19,09	35,74	17,07	36,30	19,36
9	51,29	20,53	38,94	19,36	40,35	20,13
10	56,20	21,66	40,92	20,64	42,71	21,15

Na Tabela 6.20 estão dispostos os valores teóricos de resistência à compressão dos corpos de prova, calculados pela curva de calibração obtida no LCEC.

Tabela 6.20 - Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (pista VI 50, dia)

Ponto A					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	7,45	0	1,66	-1,66	-
4	12,25	4,84	4,83	0,01	0,21
5	19,25	8,22	8,99	-0,77	9,37
6	27,20	12,04	13,08	-1,04	8,64
7	35,50	16,69	16,60	0,09	0,54
8	43,78	19,10	19,36	-0,26	1,36
9	51,29	20,51	21,21	-0,70	3,41
10	56,20	21,66	22,08	-0,42	1,94
Ponto B					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	6,69	0	1,14	-1,14	-
4	11,65	2,04	4,44	-2,40	117,65
5	17,89	6,75	8,23	-1,48	21,93
6	24,06	10,76	11,55	-0,79	7,34
7	30,04	14,78	14,37	0,41	2,77
8	35,74	17,07	16,69	0,38	2,23
9	38,94	19,36	17,84	1,52	7,85
10	40,92	20,64	18,49	2,15	10,42
Ponto C					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	6,29	0	0,86	-0,86	-
4	11,40	3,82	4,29	-0,47	12,30
5	17,87	8,22	8,22	0	-
6	24,29	12,55	11,67	0,88	7,01
7	30,39	16,56	14,53	2,03	12,26
8	36,30	19,36	16,90	2,46	12,71
9	40,35	20,06	18,31	1,75	8,72
10	42,71	21,15	19,04	2,11	9,98

Os valores teóricos de resistência à compressão para os pontos de monitoramento da temperatura ao longo da pista de fabricação das vigas em seção transversal I de 50 cm de altura estão dispostos na Tabela 6.21, calculados a partir do histórico de temperaturas obtido durante a cura térmica, conforme Figura 5.18.

Tabela 6.21 - Valores teóricos de resistência da pista das vigas I 50 (dia)

Pontos	<i>Horas após a concretagem</i>													
	3 horas		4 horas		5 horas		6 horas		7 horas		8 horas		10 horas	
	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)
1	7,38	1,61	12,11	4,74	18,98	8,85	26,71	12,85	34,68	16,29	42,68	19,04	54,43	21,79
2	7,62	1,78	13,17	5,41	20,61	9,75	29,04	13,93	37,87	17,47	46,67	20,14	57,70	22,29
3	7,37	1,60	11,74	4,51	18,11	8,36	25,27	12,16	32,74	15,52	40,20	18,26	50,26	20,99
4	7,28	1,54	11,31	4,23	16,95	7,69	23,44	11,24	30,26	14,47	37,04	17,17	46,16	20,01
5	7,78	1,88	11,94	4,63	18,43	8,54	25,69	12,36	33,14	15,68	40,44	18,34	50,20	20,98
6	7,17	1,47	11,27	4,21	17,62	8,08	24,71	11,88	31,90	15,17	38,97	17,85	48,30	20,54
7	6,96	1,32	11,80	4,55	19,81	9,31	29,11	13,96	38,67	17,75	47,98	20,47	58,31	22,37
8	6,70	1,14	10,92	3,98	11,45	4,32	27,25	13,11	36,46	16,96	45,55	19,85	56,31	22,10
9	7,45	1,66	11,37	4,27	17,79	8,18	25,35	12,20	33,16	15,69	40,73	18,43	50,96	21,14

6.6 APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS I 50 NO PERÍODO NOTURNO

A evolução da temperatura na pista de fabricação das vigas em seção I de 50 cm durante o ciclo térmico está ilustrada pela Figura 6.16.

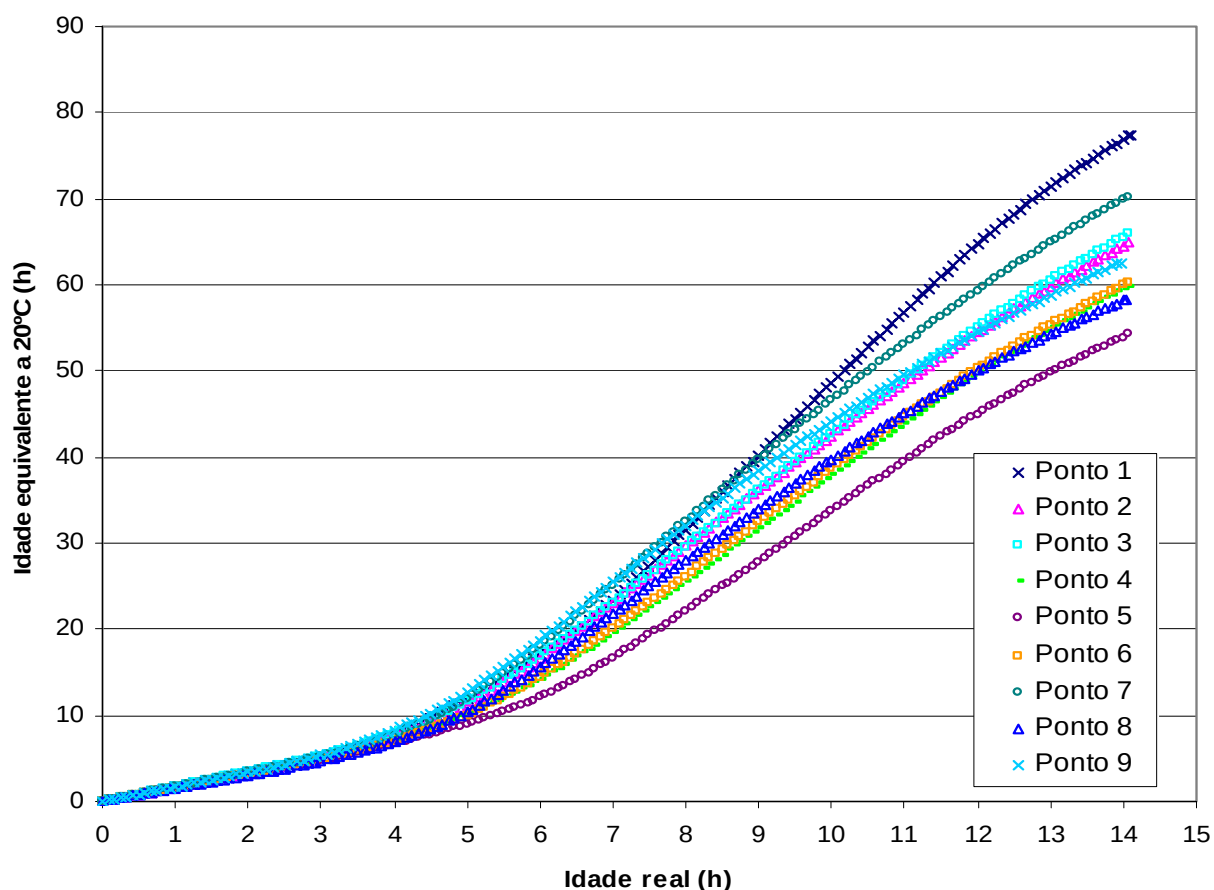


Figura 6.16 – Gráfico Idade equivalente x Idade real para a pista das VI 50 (madrugada)

Na Tabela 6.22 estão dispostos os valores de resistência à compressão dos corpos de prova obtidos durante a realização do ciclo térmico na pista de fabricação das vigas I 50.

Tabela 6.22 - Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova
(pista das vigas I 50, madrugada)

Id.Real (h)	Ponto A		Ponto B		Ponto C	
	Id.Eq.(h)	Resist.(MPa)	Id.Eq. (h)	Resist.(MPa)	Id.Eq.(h)	Resist.(MPa)
3	4,33	0	4,41	0	4,81	0
4	7,26	0	6,56	0	8,40	0
5	11,23	2,42	9,25	1,02	13,37	3,53
6	15,91	7,13	12,71	3,57	18,58	7,60
7	20,67	9,05	16,83	6,86	23,59	11,19
8	25,97	12,10	21,19	9,87	28,35	14,46
9	31,87	16,30	25,73	12,48	32,92	16,06
10	38,10	17,83	30,28	15,79	37,33	17,58
11	44,27	19,23	34,65	17,32	41,59	18,22
14	55,63	21,27	42,86	21,02	50,50	21,28

Os valores teóricos de resistência à compressão calculados através da curva de calibração obtida no LCEC, elaborada respeitando-se o tempo de início de pega do cimento, estão dispostos na Tabela 6.23.

Os valores teóricos de resistência à compressão dos corpos de prova da pista das vigas I 50 estão dispostos na Tabela 6.24, com base no histórico de temperaturas da Figura 5.21 e na curva de calibração obtida no LCEC, respeitando-se o tempo de início de pega do cimento.

Tabela 6.23 – Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (pista das vigas I 50, madrugada)

Ponto A					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist. Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist. (MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	4,33	0	0	-	-
4	7,26	0	1,53	-1,53	-
5	11,23	2,42	4,18	-1,76	72,73
6	15,91	7,13	7,08	0,05	0,70
7	20,67	9,05	9,78	-0,73	8,07
8	25,97	12,10	12,50	-0,40	3,31
9	31,87	16,30	15,15	1,15	7,06
10	38,10	17,83	17,55	0,28	1,57
11	44,27	19,23	19,50	-0,27	1,40
14	55,63	21,27	21,99	-0,72	3,39
Ponto B					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist. Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist. (MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	4,41	0	0	-	-
4	6,56	0	1,05	-1,05	-
5	9,25	1,02	2,88	-1,86	182,35
6	12,71	3,57	5,12	-1,55	43,42
7	16,83	6,86	7,62	-0,76	11,08
8	21,19	9,87	10,06	-0,19	1,93
9	25,73	12,48	12,38	0,10	0,80
10	30,28	15,79	14,48	1,31	8,30
11	34,65	17,32	16,28	1,04	6,00
14	42,86	21,02	19,09	1,93	9,18
Ponto C					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist. Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist. (MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	4,81	0	0	-	-
4	8,40	0	2,31	-2,31	-
5	13,37	3,53	5,53	-2,00	56,66
6	18,58	7,60	8,63	-1,03	13,55
7	23,59	11,19	11,32	-0,13	1,16
8	28,35	14,46	13,62	0,84	5,81
9	32,92	16,06	15,59	0,47	2,93
10	37,33	17,58	17,28	0,30	1,71
11	41,59	18,22	18,70	-0,48	2,63
14	50,50	21,28	21,04	0,24	1,13

Tabela 6.24 - Valores teóricos de resistência da pista das vigas I 50 (madrugada)

Pontos	Horas após a concretagem													
	3 horas		5 horas		7 horas		9 horas		10 horas		11 horas		14 horas	
	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)
1	5,09	0,01	11,83	4,57	23,35	11,19	40,25	18,27	48,68	20,63	56,89	22,18	76,88	22,84
2	5,12	0,03	11,24	4,18	23,09	11,06	36,17	16,85	42,51	18,98	48,59	20,61	64,57	22,95
3	5,31	0,16	11,57	4,39	23,07	11,05	36,17	16,85	42,67	19,03	48,96	20,70	65,51	23,00
4	5,04	0	10,19	3,50	19,58	9,18	31,72	15,09	37,91	17,48	43,97	19,41	59,50	22,52
5	4,76	0	9,00	2,71	16,64	7,51	27,84	13,38	33,69	15,90	39,48	18,02	53,90	21,70
6	4,87	0	9,97	3,36	19,99	9,41	32,39	15,37	38,59	17,72	44,55	19,58	59,88	22,56
7	5,20	0,09	11,85	4,58	25,14	12,09	39,69	18,09	46,60	20,12	53,11	21,56	69,93	23,11
8	4,70	0	10,36	3,61	21,82	10,39	34,08	16,05	39,77	18,12	45,06	19,72	58,16	22,35
9	5,35	0,20	12,64	5,08	25,45	12,24	38,36	17,64	44,15	19,46	49,48	20,82	62,59	22,82

6.7 APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À PISTA DE FABRICAÇÃO DAS VIGAS I 70

A Figura 6.17 ilustra o desenvolvimento das idades equivalentes dos pontos de monitoramento da temperatura ao longo da pista das vigas I 70.

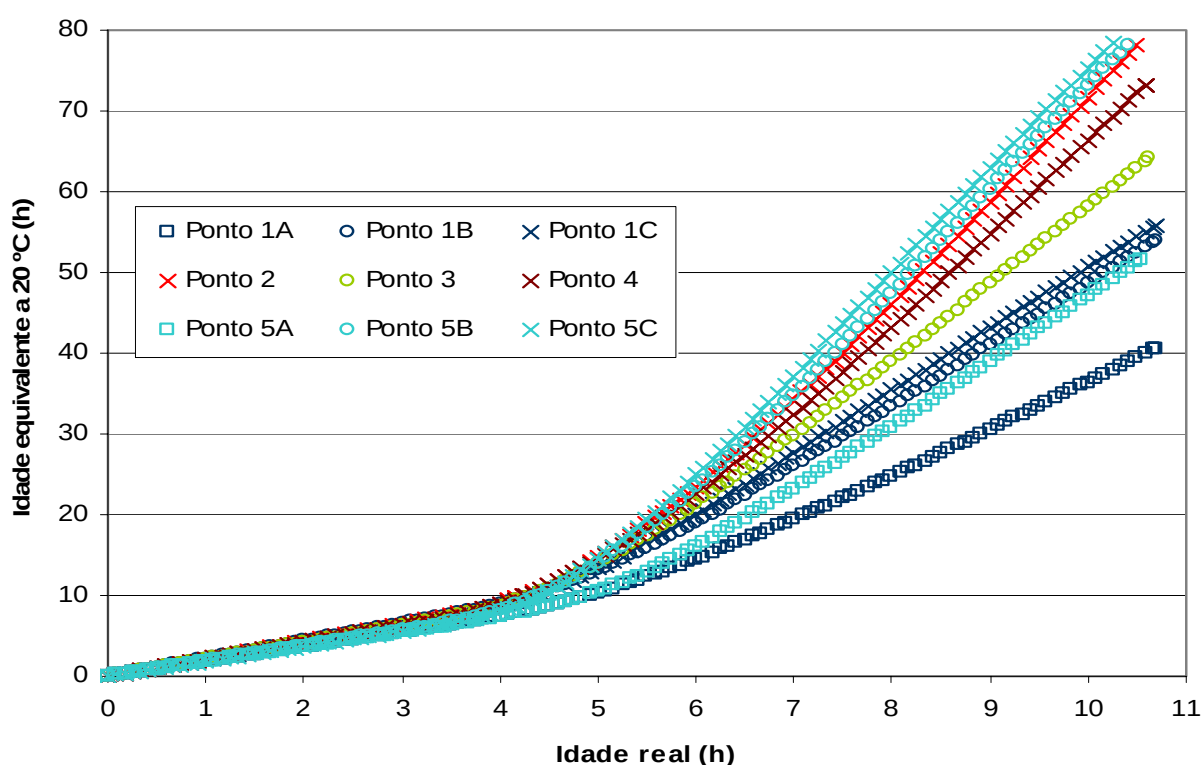


Figura 6.17 - Gráfico Idade equivalente x Idade real para a pista das vigas I 70

Na Tabela 6.25 estão dispostos os valores de resistência à compressão em função das idades equivalentes a 20°C para os corpos de prova.

Tabela 6.25 – Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova (pista das vigas I 70)

<i>Id.Real</i> (h)	<i>Ponto A</i>		<i>Ponto B</i>		<i>Ponto C</i>	
	<i>Id.Eq.(h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>	<i>Id.Eq. (h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>	<i>Id.Eq.(h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>
4	7,20	0	7,68	0	8,62	0
5	11,25	2,29	12,83	4,33	16,33	5,61
6	16,91	7,90	18,80	9,43	24,98	11,97
7	22,97	11,46	25,24	13,76	34,30	16,82
8	28,82	14,33	31,93	15,80	43,80	19,30
9	34,22	17,07	38,89	19,62	53,75	20,89
10	39,69	20,44	45,82	20,51	63,88	23,95

Na Tabela 6.26 estão dispostos os valores teóricos de resistência à compressão dos corpos de prova, calculados a partir da curva de calibração elaborada no LCEC.

Tabela 6.26 -Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (pista das VI 70)

<i>Ponto A</i>					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
4	7,20	0	1,49	-1,49	-
5	11,25	2,29	4,19	-1,90	82,97
6	16,91	7,90	7,67	0,23	2,91
7	22,97	11,46	10,99	0,47	4,10
8	28,82	14,33	13,83	0,50	3,49
9	34,22	17,07	16,11	0,96	5,62
10	39,69	20,44	18,09	2,35	11,50
<i>Ponto B</i>					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
4	7,68	0	1,82	-1,82	-
5	12,83	4,33	5,20	-0,87	20,10
6	18,80	9,43	8,75	0,68	7,21
7	25,24	13,76	12,14	1,62	11,77
8	31,93	15,80	15,18	0,62	3,92
9	38,89	19,62	17,82	1,80	9,17
10	45,82	20,51	19,92	0,59	2,88
<i>Ponto C</i>					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> 20°C (h)	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
4	8,62	0	2,46	-2,46	-
5	16,33	5,61	7,32	-1,71	30,48
6	24,98	11,97	12,01	-0,04	0,33
7	34,30	16,82	16,14	0,68	4,04
8	43,80	19,30	19,36	-0,06	0,31
9	53,75	20,89	21,67	-0,78	3,73
10	63,88	23,95	22,91	1,04	4,34

Os valores teóricos de resistência à compressão dos pontos de monitoramento da viga I 70, estão dispostos na Tabela 6.27.

Tabela 6.27 - Valores teóricos de resistência da pista das vigas I 70

Pontos	Horas após a concretagem													
	4 horas		5 horas		6 horas		7 horas		8 horas		9 horas		10 horas	
	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)
1A	7,48	1,68	10,29	3,57	14,47	6,21	19,45	9,11	24,74	11,89	30,52	14,58	36,44	16,95
1B	8,97	2,69	13,07	5,35	18,93	8,82	26,06	12,54	33,37	15,77	41,04	18,53	48,64	20,62
1C	8,58	2,43	13,30	5,49	20,05	9,44	27,69	13,31	35,40	16,56	43,15	19,18	50,67	21,08
2	9,06	2,75	14,75	6,38	23,51	11,28	34,20	16,10	46,14	20,00	58,72	22,42	71,70	23,09
3	8,76	2,55	13,93	5,88	21,31	10,12	29,83	14,28	39,06	17,88	48,59	20,61	58,24	22,36
4	8,94	2,67	14,46	6,21	22,54	10,78	32,38	15,37	43,21	19,19	54,72	21,84	66,41	23,04
5A	7,37	1,60	10,48	3,69	16,07	7,18	23,27	11,15	30,92	14,75	38,93	17,84	47,17	20,27
5B	8,21	2,18	14,01	5,93	23,40	11,22	34,85	16,35	47,47	20,34	60,38	22,61	73,08	23,05
5C	8,04	2,06	14,52	6,24	24,88	11,96	37,18	17,22	50,10	20,95	62,87	22,84	75,34	22,95

6.8 APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE À VIGA ARMADA VR 20 x 45

Na Figura 6.18 tem-se a evolução das idades equivalentes a partir dos dados de idades reais de cura térmica para a viga armada VR 20 x 45.

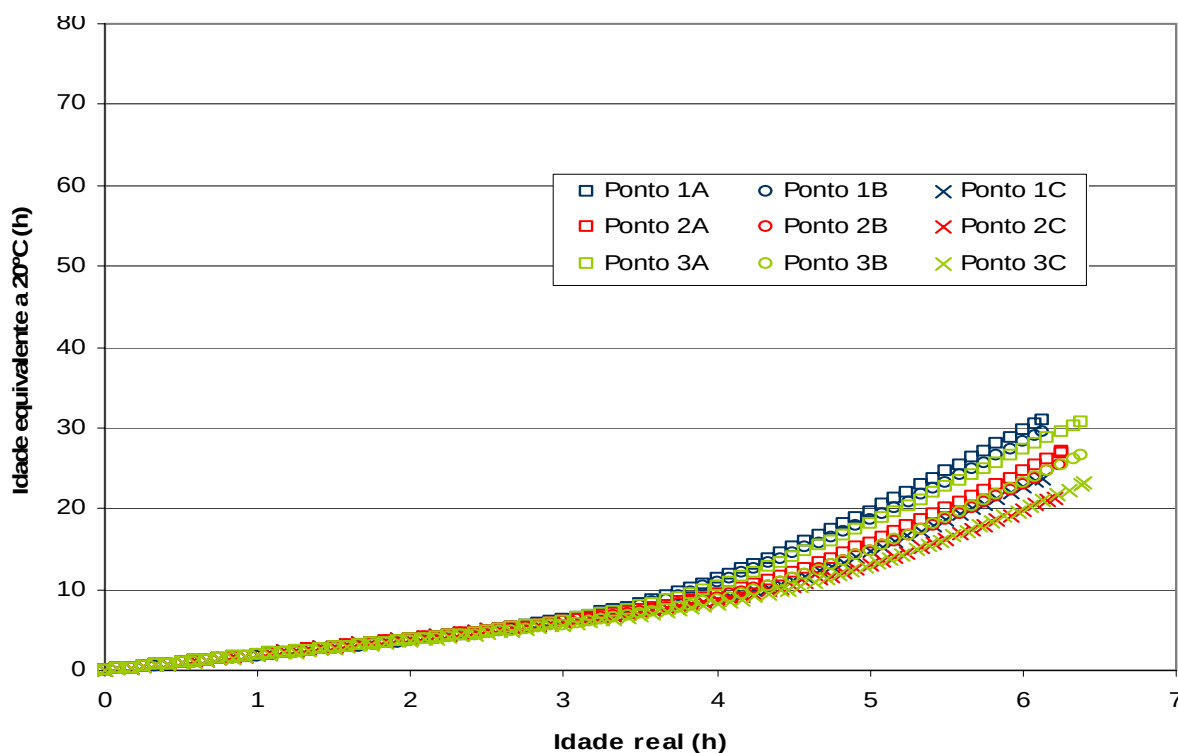


Figura 6.18 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para a viga VR 20 x 45

Os valores de resistência à compressão dos corpos de prova em função das idades equivalentes a 20°C estão dispostos na Tabela 6.28.

Tabela 6.28 - Valores de Resistência x Id.Equivalente nos corpos de prova (VR 20x45)

<i>Id.Real</i> (h)	Ponto A		Ponto B	
	<i>Id.Eq.(h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>	<i>Id.Eq. (h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>
3	6,17	0	5,92	0
4	11,53	2,29	9,86	2,04
5	19,15	8,15	16,56	7,39
6	26,43	14,27	23,79	11,97

Os valores teóricos de resistência à compressão obtidos a partir da curva de maturidade elaborada no LCEC estão dispostos na Tabela 6.29.

Tabela 6.29 – Valores reais e teóricos de resistências dos corpos de prova (VR 20 x 45)

Ponto A					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> <i>20°C (h)</i>	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	6,17	0	0,77	-0,77	-
4	11,53	2,29	4,37	-2,08	90,83
5	19,15	8,15	8,95	-0,80	9,82
6	26,43	14,27	12,72	1,55	10,86
Ponto B					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> <i>20°C (h)</i>	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	5,92	0	0,60	-0,60	-
4	9,86	2,04	3,28	-1,24	60,78
5	16,56	7,39	7,46	-0,07	0,95
6	23,79	11,97	11,42	0,55	4,59

Na Tabela 6.30 estão dispostos os valores das resistências à compressão ao longo da viga armada VR 20 x 45 durante a realização do ensaio térmico, calculados a partir da curva de calibração elaborada no LCEC.

Tabela 6.30 - Valores teóricos de resistência da viga VR 20 x 45

Pontos	Horas após a concretagem							
	3 horas		4 horas		5 horas		6 horas	
	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)	t_e (h)	f_c (MPa)
1A	6,22	0,80	11,25	4,19	19,70	9,25	29,71	14,23
1B	6,00	0,65	10,82	3,92	18,64	8,66	28,15	13,52
1C	6,05	0,68	8,81	2,59	14,64	6,31	22,68	10,85
2	6,04	0,68	9,36	2,96	15,78	7,00	24,58	11,81
3	5,98	0,64	9,03	2,73	14,76	6,39	23,03	11,03
4	6,04	0,68	8,65	2,48	13,07	5,35	19,81	9,31
5A	6,15	0,76	10,45	3,67	18,19	8,40	27,30	13,13
5B	5,67	0,42	8,71	2,52	14,80	6,41	23,14	11,08
5C	5,62	0,39	8,23	2,19	12,76	5,15	19,68	9,24

6.9 APLICAÇÃO DA CURVA DE MATURIDADE AO PILAR ARMADO P 30 x 50

O desenvolvimento das idades equivalentes em função das idades reais de cura para o pilar armado P 30 x 50 é fornecido pelas curvas da Figura 6.19.

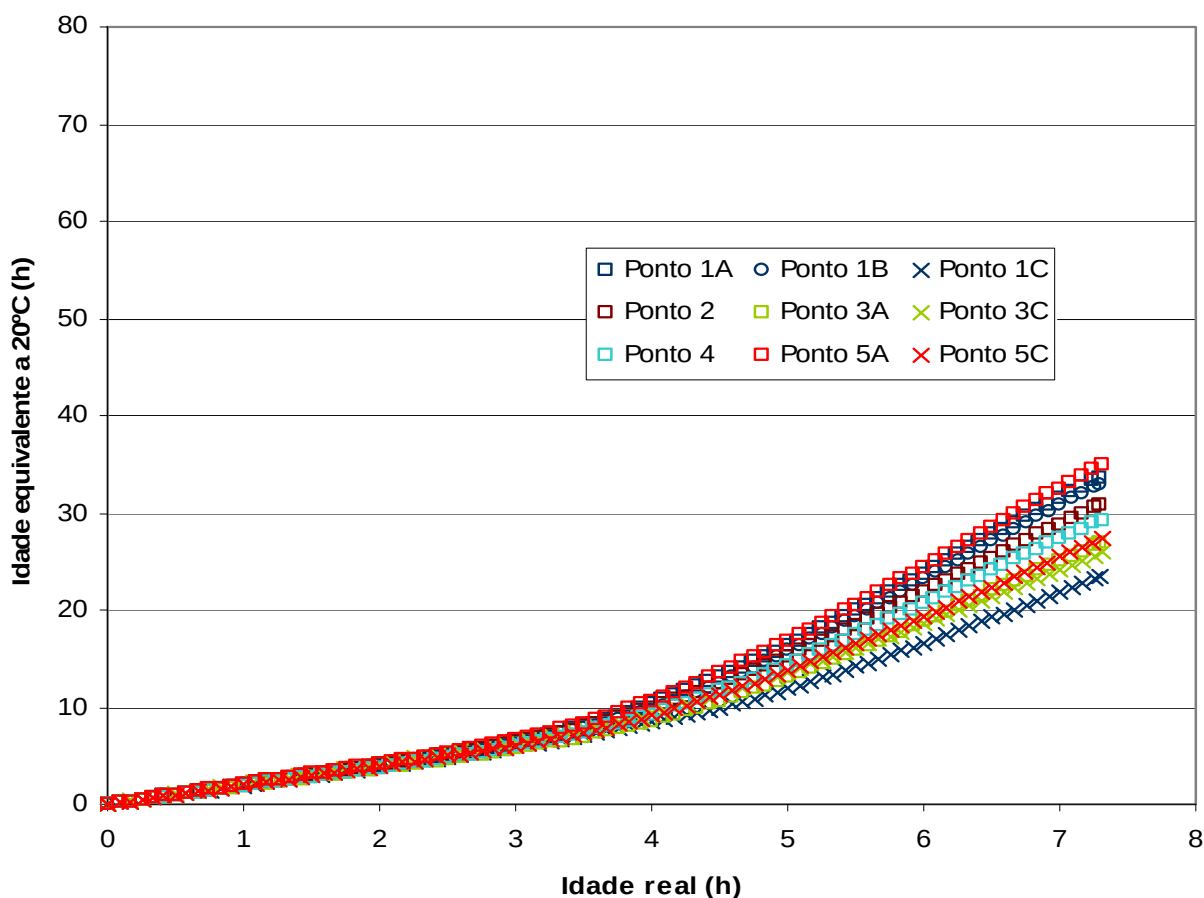


Figura 6.19 - Gráfico Idade equivalente a 20°C x Idade real para o pilar P 30 x 50

A Tabela 6.31 fornece os valores de resistência à compressão dos corpos de prova relacionando-os com suas respectivas idades equivalentes, calculadas a partir do histórico das temperaturas obtido durante o ciclo térmico.

Tabela 6.31 - Valores de Resistência x Id. Equivalente nos corpos de prova (P 30 x 50)

<i>Id.Real</i> (h)	<i>Ponto A</i>		<i>Ponto B</i>	
	<i>Id.Eq.(h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>	<i>Id.Eq. (h)</i>	<i>Resist.(MPa)</i>
3	5,36	0	5,46	0
4	7,44	0	7,67	0
5	10,41	2,04	10,88	3,82
6	16,17	6,88	16,72	7,90
7	21,38	12,10	22,08	12,23

Os valores teóricos de resistência à compressão obtidos a partir da curva de maturidade elaborada no LCEC estão dispostos na Tabela 6.32.

Tabela 6.32 – Valores reais e teóricos de resistência dos corpos de prova (P 30 x 50)

<i>Ponto A</i>					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> <i>20°C (h)</i>	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	5,36	0	0,20	-0,20	-
4	7,44	0	1,65	-1,65	-
5	10,40	2,04	3,64	-1,60	78,43
6	16,17	6,88	7,23	-0,35	5,09
7	21,38	12,10	10,16	1,94	16,03
<i>Ponto B</i>					
<i>Id.Real</i> (h)	<i>Id. Equiv. a</i> <i>20°C (h)</i>	<i>Resist. Real</i> (MPa)	<i>Resist.Teórica</i> (MPa)	<i>Variações</i> <i>Resist.(MPa)</i>	<i>Erro</i> (%)
3	5,46	0	0,27	-0,27	-
4	7,67	0	1,81	-1,81	-
5	10,88	3,82	3,95	-0,13	3,40
6	16,72	7,90	7,56	0,34	4,30
7	22,08	12,23	10,53	1,70	13,90

A partir do histórico das temperaturas fornecido pela Figura 5.35, é possível obter os valores teóricos de resistência à compressão do pilar armado P 30 x 50, calculados a partir da curva de maturidade elaborada no LCEC, como fornecidos pela Tabela 6.33.

Tabela 6.33 - Valores teóricos de resistência do pilar P 30 x 50

<i>Pontos</i>	<i>Horas após a concretagem</i>									
	<i>3 horas</i>		<i>4 horas</i>		<i>5 horas</i>		<i>6 horas</i>		<i>7 horas</i>	
	<i>t_e</i> (h)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>t_e</i> (h)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>t_e</i> (h)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>t_e</i> (h)	<i>f_c</i> (MPa)	<i>t_e</i> (h)	<i>f_c</i> (MPa)
1A	6,33	0,88	10,27	3,55	16,30	7,31	23,76	11,40	31,49	15,00
1B	6,32	0,88	9,71	3,19	15,78	7,00	23,16	11,09	30,80	14,70
1C	5,94	0,61	8,44	2,33	11,91	4,62	16,62	7,50	21,87	10,42
2	6,42	0,95	9,92	3,32	15,25	6,68	21,85	10,41	28,84	13,84
3A	5,71	0,45	8,61	2,45	13,10	5,37	18,80	8,75	25,08	12,06
3C	6,42	0,94	9,32	2,93	13,58	5,66	18,65	8,66	24,21	11,63
4	5,98	0,64	9,28	2,90	14,35	6,14	20,65	9,77	27,32	13,14
5A	6,62	1,09	10,67	3,81	16,87	7,64	24,46	11,75	32,50	15,42
5C	6,05	0,69	9,14	2,80	13,77	5,78	19,33	9,05	25,42	12,23

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de determinação da energia aparente de ativação, assim como os dados dos monitoramentos térmicos dos elementos em concreto pré-moldado junto à empresa Protendit, referentes à distribuição das temperaturas nos elementos estruturais, assim como à aplicação do Método da Maturidade para estimar a resistência à compressão do concreto *in loco* a partir de curvas de calibração elaboradas no LCEC.

7.1 ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO

A escolha das condições isotérmicas utilizadas nos ensaios de determinação da energia aparente de ativação obedeceu ao seguinte critério: considerar um intervalo de temperaturas próximo à temperatura ambiente (10°C, 30°C e 55°C), às condições de cura térmica nos elementos pré-moldados (30°C, 55°C e 80°C) e uma análise do resultado obtido de energia aparente de ativação utilizando-se quatro condições isotérmicas de cura (10°C, 30°C, 55°C e 80°C), uma a mais do que é proposto pelo procedimento ASTM C 1074-98.

O campo térmico adotado para os ensaios de determinação da energia aparente de ativação do cimento foi capaz de influenciar os valores obtidos empiricamente, conforme disposto na Tabela 6.6. Para os ensaios realizados à condição isotérmica de 10°C, os valores de energia aparente de ativação foram da ordem de 42,0 kJ/mol, enquanto que às temperaturas de 30°C, 55°C e 80°C, o valor de E_a obtido foi de 39,4 kJ/mol, evidenciando uma redução da ordem de 6% no valor dessa energia quando as reações se processam em temperaturas mais elevadas, com a presença de fatores que influenciam o aumento das velocidades de hidratação do cimento. Uma possível explicação para a diferença dos valores de energia aparente de ativação obtidos para diferentes temperaturas de ensaio poderia consistir na diferença de energia térmica existente na mistura. Assim, considerando-se que as reações de hidratação do

cimento ocorram satisfatoriamente a uma determinada temperatura, por exemplo, à temperatura ambiente (T_{amb}), para amostras de argamassas que apresentem temperaturas inferiores à temperatura ambiente, o valor da energia aparente de ativação será maior, pois além da energia envolvida nos processos de reação, será necessário o fornecimento de energia térmica para que a mistura atinja a temperatura ambiente (T_{amb}) na qual as reações ocorrem naturalmente. O processo contrário ocorre quando a mistura se encontra em temperaturas elevadas. Neste caso, a energia térmica transforma-se em energia extra, de modo que as reações necessitem de menor quantidade de energia do ambiente, reduzindo o valor da energia aparente de ativação.

Os valores de energia aparente de ativação obtidos experimentalmente neste trabalho respeitam a faixa de 40 a 45 kJ/mol, proposta pela ASTM (1998) e estão próximos dos valores obtidos por Barbosa *et al.* (2005) para o cimento nacional CP-V-ARI, conforme disposto na Tabela 3.1.

7.2 MONITORAMENTO DOS CICLOS TÉRMICOS NA EMPRESA PROTENDIT

Os resultados discutidos nesse item estão relacionados ao comportamento das temperaturas ao longo dos elementos pré-moldados durante os ensaios de cura térmica realizados na Protendit.

7.2.1 Viga protendida em seção transversal I de 50 cm de altura

A disposição de cinco sondas termopares ao longo da viga protendida com seção transversal em I de 50 cm de altura e 9,6 m de comprimento, foi adotada com o objetivo de verificar a distribuição do vapor em função do comprimento da viga. A Figura 5.9 ilustra esta situação, com o aparecimento de gradientes térmicos ao longo do comprimento, mesmo que as diferenças térmicas sejam da ordem de 2°C ou 3°C. Os pontos que apresentaram as maiores temperaturas foram aqueles localizados próximos às saídas de vapor (pontos 4 e 5). O desenvolvimento das idades também foi afetado pelos gradientes térmicos ao longo da viga, com diferenças da ordem de 2 h em idade equivalente a 20°C ao final do ciclo térmico.

A temperatura máxima no interior dos corpos de prova foi de 50°C, enquanto a temperatura máxima ao longo da viga foi de 55°C, devido à localização dos mesmos na parte inferior da viga.

A aplicação do Método da Maturidade sobre os valores de resistência à compressão dos corpos de prova foi capaz de estimar o valor da resistência ao final do ciclo térmico com uma margem de erro de 17,83%. Para as idades iniciais, as estimativas de resistência à compressão apresentaram margens de erros elevadas, da ordem de 212,75%, o que é explicado pela ordem de grandeza das variações de resistência diante dos valores reais obtidos *in loco*.

Pela observação da Tabela 6.15, os valores estimados de resistência à compressão para os pontos de monitoramento na viga foram maiores do que os obtidos nos corpos de prova, devido ao aparecimento de temperaturas mais elevadas durante a realização do ciclo térmico.

A duração do ciclo térmico foi de nove horas, sendo que ao final do ciclo, os corpos de prova apresentaram resistências da ordem de 9,76 MPa. Entretanto, na viga, a mesma resistência foi obtida na sétima hora do ciclo. Neste caso, a utilização de corpos de prova não foi satisfatória para avaliar os valores de resistência do elemento estrutural, pois houve diferenças térmicas relevantes entre os corpos de prova e a viga.

7.2.2 Viga protendida em seção transversal I de 70 cm de altura

Nesta viga foram monitoradas três seções, com três pontos de monitoramento de temperatura por seção, assim como ilustrado pela Figura 5.13, totalizando nove pontos de monitoramento ao longo da viga, com o objetivo de analisar o comportamento térmico ao longo da sua altura e do seu comprimento.

Através do histórico de temperaturas durante o ciclo térmico (Figura 5.14), notou-se o aparecimento de gradientes térmicos tanto para os pontos localizados à mesma altura, quanto para os pontos localizados em uma mesma seção. As diferenças de temperaturas foram da ordem de 20°C entre os pontos 1A e 3C, ao final do ciclo térmico. Analisando os pontos localizados numa mesma seção, os maiores gradientes ocorreram na seção 3 (pontos 3A, 3B e 3C), com diferenças de 14°C.

Os pontos inferiores das seções (pontos 1C, 2C e 3C) apresentaram maiores temperaturas devido sua proximidade com a tubulação de vapor, localizada na parte inferior da viga.

As temperaturas dos corpos de prova ficaram compreendidas entre 55°C e 60°C, próximas da faixa de temperaturas da seção 1, região na qual os corpos de prova foram dispostos durante a aplicação da cura térmica.

Em virtude das diferenças de temperatura ao longo da viga, o desenvolvimento das idades equivalentes a 20°C também apresentou diferenças de até 30 h, conforme ilustrado pela Figura 6.14. Para os pontos localizados numa mesma seção (por exemplo, seção 3), o desenvolvimento das idades equivalentes também foi desigual, de modo que os pontos mais aquecidos apresentaram idades equivalentes mais elevadas do que os pontos menos aquecidos.

A aplicação do Método da Maturidade foi capaz de estimar os valores de resistência para os corpos de prova com margens de erro compreendidas entre 0,60% e 13,44%. A resistência final obtida nos corpos de prova foi de 14,77 MPa, enquanto que o método forneceu um valor de 14,96 MPa.

Pela observação da Tabela 6.18, o elemento estrutural apresentou resistências da ordem de 14 MPa a partir da sétima hora do ciclo térmico (pontos 3B e 3C). É interessante ressaltar também a diferença das resistências obtidas no elemento estrutural em função do seu histórico de temperaturas, conforme pode ser observado para o conjunto de resistências calculadas para a nona hora do ciclo (Tabela 6.18). Os pontos inferiores das seções forneceram resistências mais elevadas do que os pontos superiores, apresentando desenvolvimento desigual das resistências em consequência do aparecimento de gradientes térmicos.

Considerando-se a resistência de 21 MPa, adotada pela Protendit para realização da desfôrma dos elementos estruturais, somente os pontos inferiores da viga apresentavam essa resistência, sendo que os demais forneceram valores inferiores compreendidos entre 11,77 MPa e 19,22 MPa.

7.2.3 Pista de concretagem da viga com seção transversal I de 50 cm durante o dia

Pela observação da Figura 5.18, nota-se o aspecto do ciclo térmico proposto por Camarini (1995) e El Debs (2000), com distinção dos períodos de espera (preliminar), aquecimento, temperatura constante e esfriamento. O monitoramento das temperaturas no período de esfriamento foi realizado somente para esse elemento estrutural.

Os gradientes térmicos presentes na viga foram da ordem de 8°C , com valores de temperaturas compreendidos entre 60°C e 68°C . O desenvolvimento das idades equivalentes a 20°C também foi afetado pelos gradientes térmicos, com variações de até 13 h (Figura 6.15).

A Figura 5.19 fornece a evolução das temperaturas para os corpos de prova dispostos junto à viga. A temperatura máxima atingida pelos corpos de prova foi em torno de 65°C (ponto A) e a menor foi de 58°C (ponto B). O intervalo de temperaturas dos corpos de prova (58°C a 65°C) foi semelhante ao intervalo da viga (60°C a 68°C).

Os corpos de prova apresentaram resistência à compressão de 21 MPa na décima hora do ciclo térmico. As resistências dos pontos de monitoramento da viga atingiram 21 MPa na décima hora do ciclo térmico, assim como também observado para os corpos de prova.

Os valores teóricos de resistência à compressão calculados a partir do Método da Maturidade para os corpos de prova ao final da cura apresentaram margens de erro compreendidas entre 1,94% e 10,42%.

Como ilustrado através da Figura 5.17, a tubulação de vapor alcançava a pista no ponto 6, assim, as Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 fornecem o comportamento das temperaturas, considerando pontos simétricos de monitoramento de temperatura.

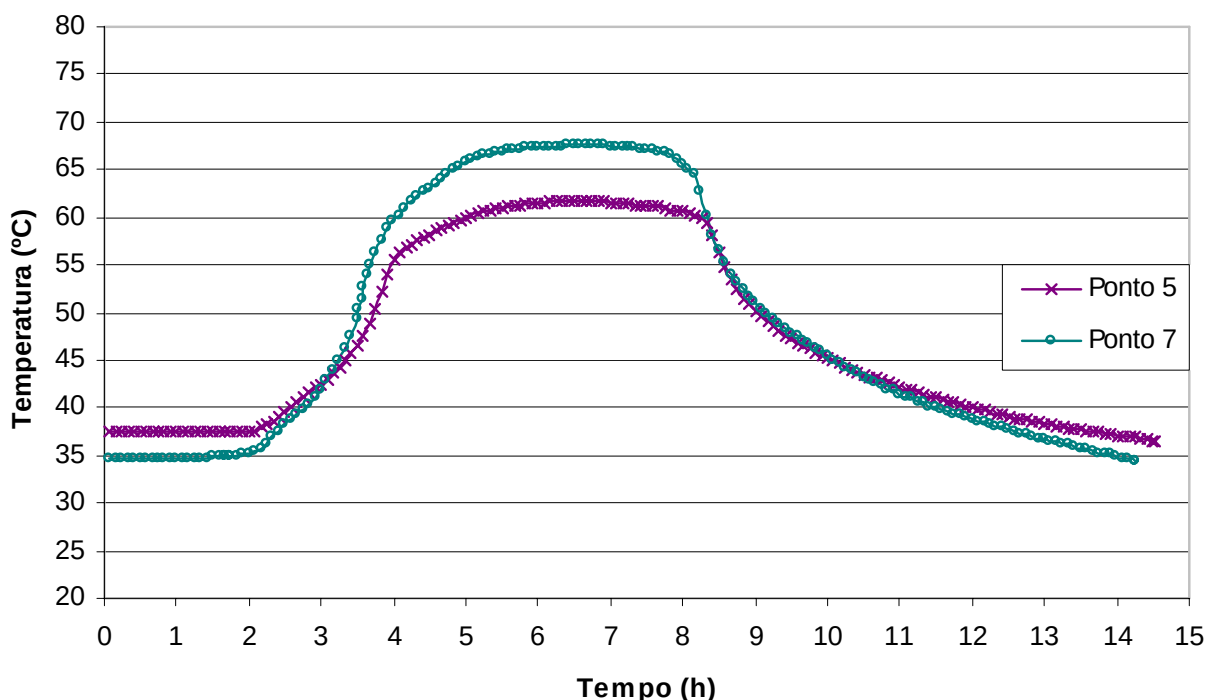


Figura 7.1 – Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 5 e 7 (pista das vigas I 50, dia)

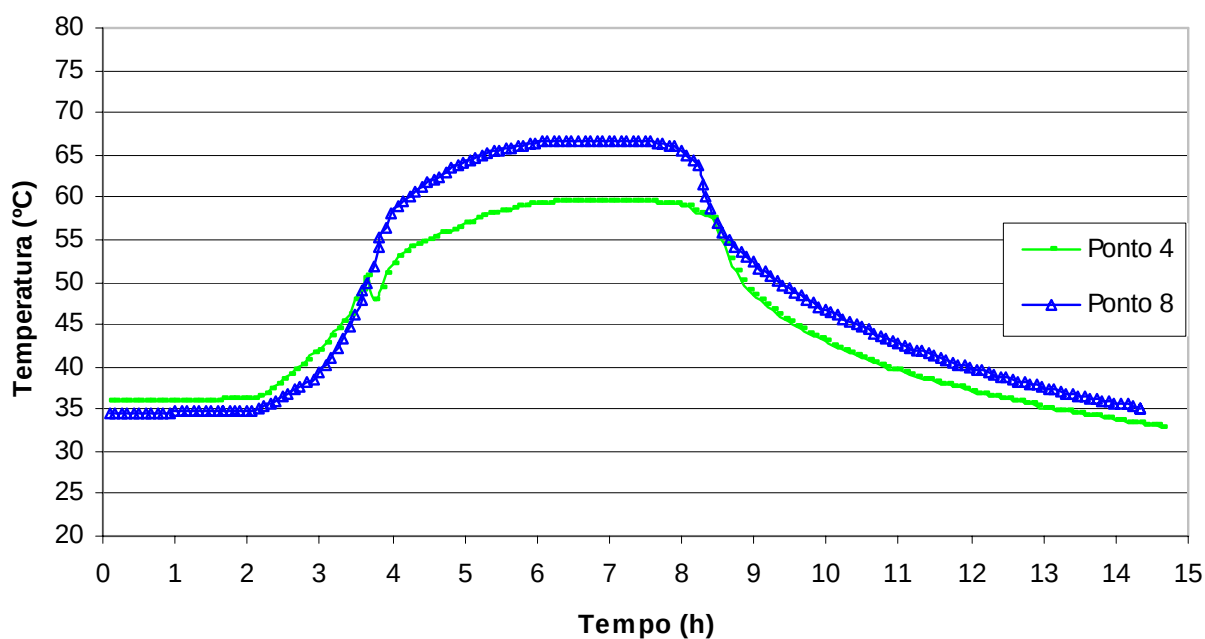


Figura 7.2 – Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 4 e 8 (pista das vigas I 50, dia)

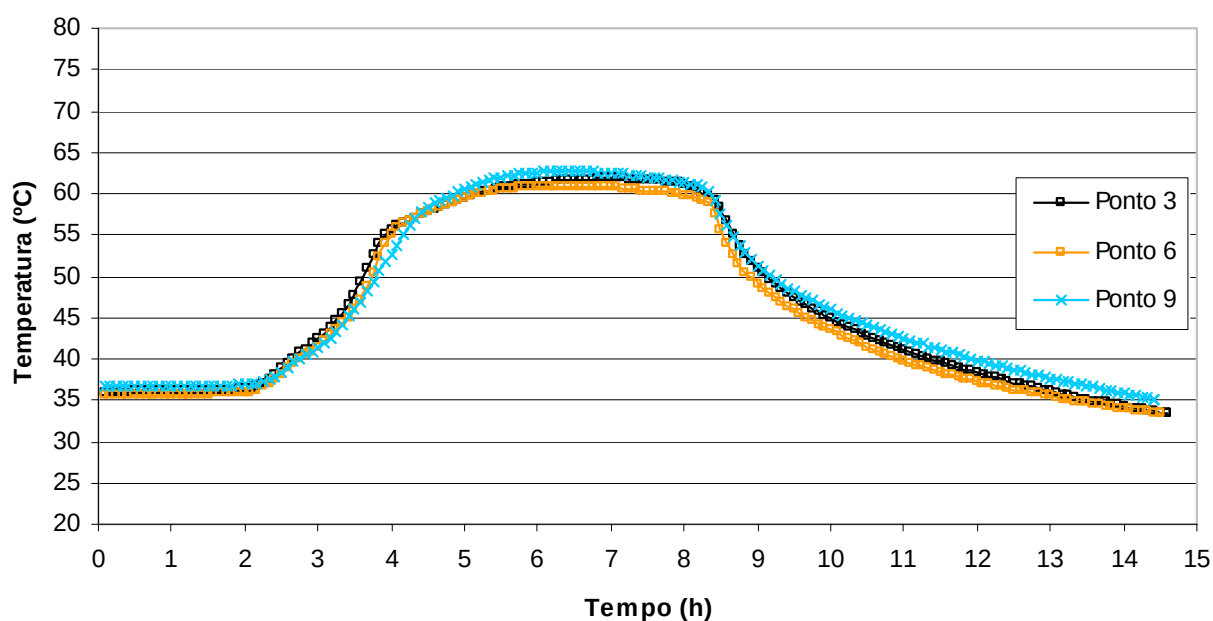


Figura 7.3 – Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 3, 6 e 9 (pista das vigas I 50, dia)

Pela observação dos gráficos das Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 percebe-se a não-simetria com relação à distribuição das temperaturas. Os pontos localizados à direita do ponto 6 apresentaram maiores temperaturas (pontos 7, 8 e 9) se comparados com seus pontos simétricos (pontos 3, 4 e 5), localizados à esquerda do ponto de distribuição de vapor.

Durante o ensaio de cura térmica na pista das vigas I 50, durante o dia, a temperatura ambiente variou de 31°C no início da cura térmica até 24°C ao final do ciclo.

7.2.4 Pista de concretagem da viga em seção transversal I de 50 cm durante a noite

Os pontos de monitoramento de temperatura para a pista das vigas I 50 com cura térmica durante a madrugada foram os mesmos adotados para o ensaio realizado durante o dia, assim como ilustrado pela Figura 5.17. A realização desse ensaio variando apenas o horário de cura teve como objetivo a avaliação da influência da temperatura ambiente sobre os processos envolvidos no ciclo térmico.

A temperatura ambiente variou de 21,8°C no início da cura térmica até 18,2°C ao término do ciclo, com valores menores aos obtidos para o ciclo realizado durante o dia.

Os gradientes térmicos presentes na pista durante a cura térmica, ilustrados pela Figura 5.21, foram da ordem de 10°C, com temperaturas compreendidas entre 55°C e 65°C. A evolução das idades equivalentes a 20°C também foi afetada pelos gradientes de temperatura, como pode ser visto na Figura 6.16, com variações de até 25 horas.

As curvas de temperatura apresentaram um comportamento irregular se comparadas com as curvas do ciclo realizado durante o dia, com dificuldades na definição das fases de aquecimento, temperatura constante e início do esfriamento.

O ponto 1 (extremidade esquerda da pista) apresentou os maiores valores de temperaturas, enquanto os pontos 8 e 9 (extremidade direita da pista) apresentaram as menores temperaturas durante o ciclo térmico.

Nos corpos de prova, os valores das temperaturas estiveram compreendidos na faixa de 50°C a 58°C (Figura 5.22), ligeiramente inferiores às temperaturas do concreto na pista (55°C a 65°C). Os maiores valores de temperatura foram observados junto aos corpos de prova localizados nas extremidades da pista (pontos A e C).

A resistência à compressão de 21 MPa nos corpos de prova foi atingida somente após a décima quarta hora do ciclo térmico, conforme os valores da Tabela 5.4. Utilizando-se o Método da Maturidade, as mesmas resistências foram estimadas, com margens de erro compreendidas entre 1,13% e 9,18% ao final do ciclo térmico (Tabela 6.23).

Nas vigas, a resistência à compressão de 21 MPa foi atingida em todos os pontos de monitoramento somente na décima quarta hora do ciclo térmico, embora alguns pontos já apresentasse essa resistência à idade de 11 h.

As Figuras 7.4, 7.5 e 7.6 ilustram a temperatura para os pontos simétricos.

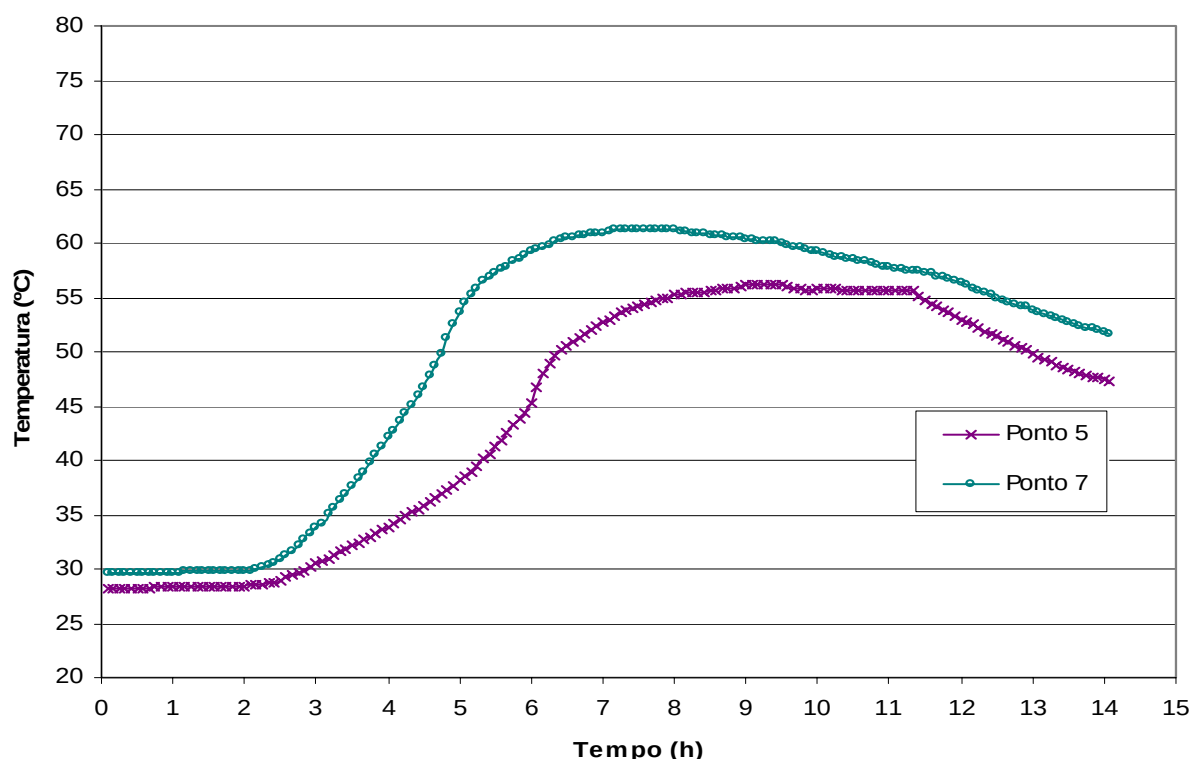


Figura 7.4 – Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 5 e 7 (pista das VI 50, madrugada)

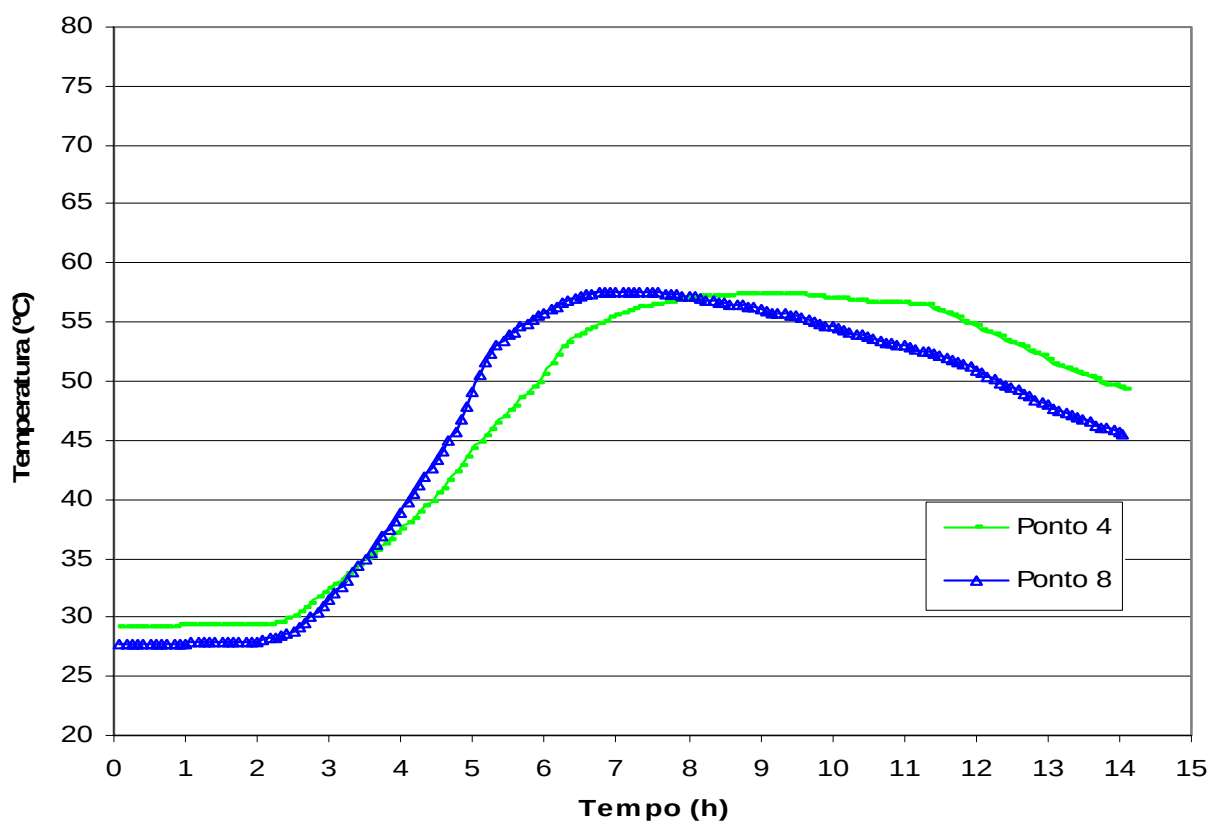


Figura 7.5 – Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 4 e 8 (pista das vigas I 50, madrugada)

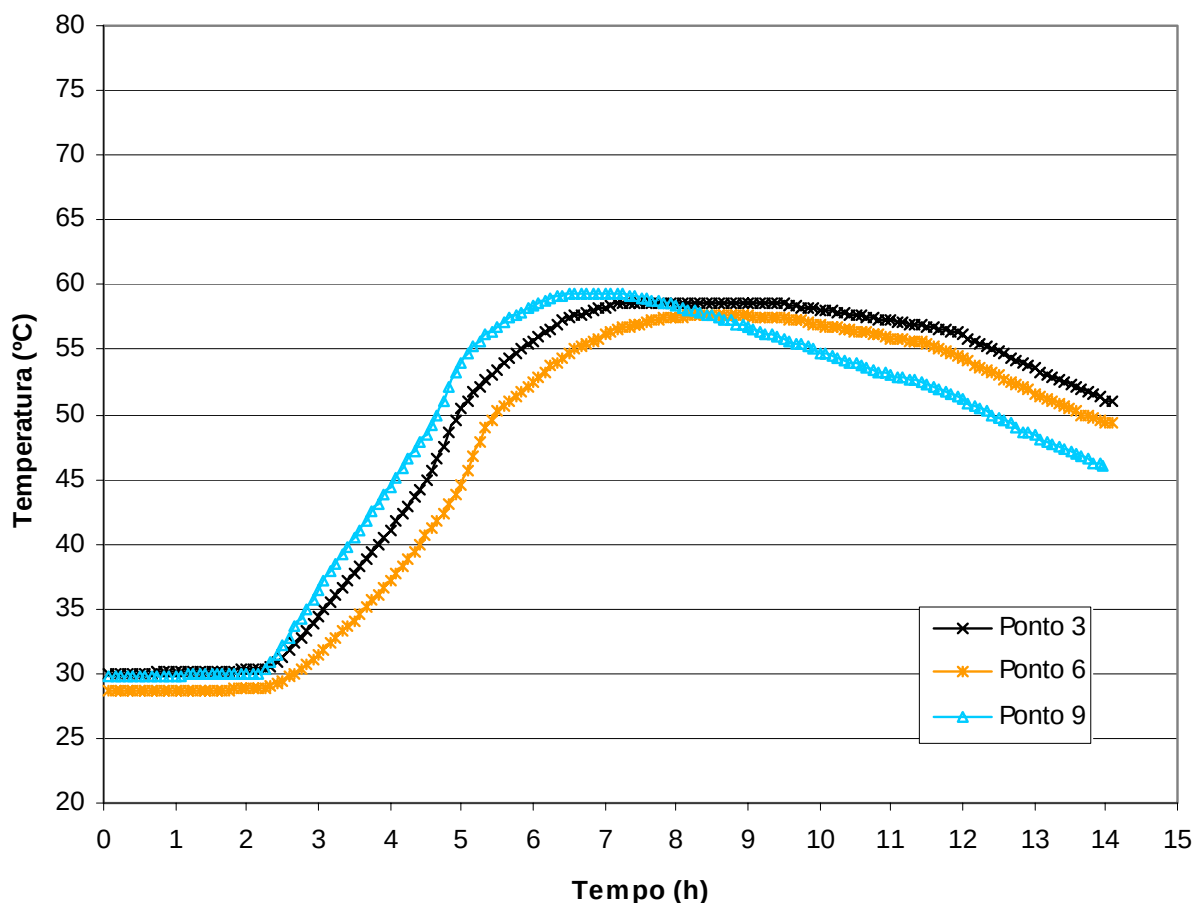


Figura 7.6 – Gráfico Temperatura x Tempo nos pontos 3, 6, 9 (pista das VI 50, madrugada)

Assim como no ciclo diurno, o ponto 7 apresentou as maiores temperaturas se comparados com o ponto 5. Para os demais pontos simétricos, o comportamento também foi semelhante até a oitava hora, ocorrendo uma inversão dos valores, com temperaturas maiores nos pontos 3 e 4.

A comparação das pistas das vigas I 50 nos períodos diurno e noturno permite algumas conclusões a respeito de:

- a) Gradientes térmicos: as diferenças de temperatura entre os pontos de monitoramento localizados nas vigas apresentaram valores aproximados de gradientes térmicos, sendo de 8°C para o ciclo diurno e 10°C para o ciclo noturno;
- b) Temperaturas na pista de fabricação: As maiores temperaturas na pista de fabricação das vigas foram obtidas durante o ciclo no período diurno;
- c) Temperaturas nos corpos de prova: as maiores temperaturas nos corpos de prova foram obtidas durante o ciclo diurno, variando de 58°C a 65°C, enquanto que no período noturno, os valores estiveram compreendidos entre 50°C e 58°C.

d) Idades equivalentes a 20°C: as maiores diferenças de idades equivalentes foram obtidas durante a realização do ciclo térmico no período noturno, praticamente o dobro das diferenças obtidas durante o dia;

e) Tempo do ciclo térmico: o ciclo térmico realizado durante o dia necessitou de menos tempo (10 h) para que o concreto atingisse uma resistência à compressão de 21 MPa se comparado com o tempo necessário para atingir a mesma resistência durante a noite (14 h);

f) Temperatura ambiente: a ocorrência de valores de temperatura ambiente menores durante o ciclo térmico no período noturno foi capaz de reduzir as temperaturas da pista de fabricação das vigas, explicando a necessidade de submeter o elemento estrutural a um período mais longo de cura térmica para que fosse obtida a resistência de 21 MPa.

7.2.5 Pista de concretagem da viga em seção transversal I de 70 cm de altura

A aplicação da cura térmica na pista de concretagem das vigas protendidas com seção transversal em I de 70 cm de altura permitiu avaliar o comportamento da temperatura ao longo de sua extensão, com a observação de três pontos ao longo da seção transversal da viga. Os pontos inferiores das seções apresentaram as maiores temperaturas se comparados com os pontos da superfície. Observa-se o surgimento de diferenças térmicas ao longo da viga, sendo que a seção 1 (pontos 1A, 1B e 1C) localizada na extremidade esquerda da pista apresentou as menores temperaturas se comparadas com a seção 5 (pontos 5A, 5B e 5C), localizada na extremidade direita da pista, refletindo em valores maiores de resistência à compressão.

A evolução das temperaturas segundo a Figura 5.25 foi capaz de revelar a ocorrência de gradientes térmicos da ordem de 20°C, assim como também observado na ocasião do ensaio durante ciclo térmico da uma viga I 70. Os valores de temperatura da pista estiveram compreendidos entre 57°C e 76°C, repetindo o mesmo comportamento do ensaio realizado com apenas uma viga I 70.

O tempo de aplicação de cura térmica para atingir 21 MPa foi o mesmo tanto para a viga I 70 quanto para a pista de fabricação das vigas I 70.

A evolução das idades equivalentes a 20°C em função das idades reais apresentou variações decorrentes da existência de gradientes térmicos, como pode ser observado através da Figura 6.17.

A estimativa dos valores de resistência à compressão para os corpos de prova, utilizando o Método da Maturidade, forneceu resultados de resistência à compressão para as idades finais do ciclo com margens de erro compreendidas entre 2,88% e 11,50%.

Pela observação dos dados dispostos na Tabela 6.27, percebe-se que a resistência das vigas ao longo da pista de fabricação atingiu 21 MPa somente na décima hora do ciclo térmico, mesmo tempo decorrido para que os corpos de prova também adquirissem a mesma resistência. Neste caso, a temperatura dos corpos de prova foi semelhante à temperatura do concreto na pista de fabricação das vigas.

7.2.6 Viga armada em seção retangular de 20 x 45 cm

A distribuição do vapor nas peças armadas (viga VR 20 x 45 e pilar P 30 x 50) foi realizada de maneira aleatória, não sendo mais distribuído através de uma tubulação na parte inferior dos elementos, mas sim através de tubos flexíveis localizados nas partes superiores das fôrmas, sendo a peça envolvida em membrana plástica durante a aplicação da cura térmica.

Como ilustrado pela Figura 5.30, os pontos localizados à superfície da viga apresentaram os maiores valores de temperatura, diferentemente dos elementos pré-moldados, pois ficavam em contato direto com o vapor armazenada pela membrana plástica durante o ciclo térmico.

Na Figura 5.31 estão ilustradas as curvas de evolução das temperaturas dos corpos de prova, acondicionados junto à viga durante a cura, com variações térmicas da ordem de 10°C, sendo que na fase de temperatura constante, os corpos de prova apresentaram praticamente a mesma temperatura (60°C).

Por ser peça em concreto armado, é necessário que a viga atinja uma resistência à compressão de 12 MPa para que se processe a etapa de desmoldagem. Os corpos de prova atingiram essa resistência na sexta hora do ciclo térmico (Tabela 5.6). Os valores de resistência à compressão obtidos para o ponto A e B (Figura 5.29) apresentaram poucas variações em seus valores. A aplicação do Método da Maturidade para estimar os valores das resistências dos corpos de prova forneceu resultados com margens de erro compreendidas entre 4,59% e 10,86% ao final do ciclo térmico.

As diferenças na evolução das idades equivalentes a 20°C foram de 10 h ao final do ciclo térmico, assim como pode ser visto na Figura 6.18.

Com a aplicação dos conceitos de idades equivalentes aos pontos de monitoramento ao longo da viga, pôde-se calcular os valores teóricos das resistências (Tabela 6.30), com o material atingindo resistências da ordem de 12 MPa a partir da sexta hora de realização do ciclo térmico, repetindo o mesmo tempo para que os corpos de prova também atingissem a mesma resistência.

7.2.7 Pilar armado em seção retangular de 30 x 50 cm

O desenvolvimento das temperaturas para o pilar P 30 x 50, como representado na Figura 5.35, revelou a existência de gradientes térmicos da ordem de 12°C, com valores de temperaturas compreendidos entre 53°C e 64°C, aproximadamente. Diante disso, o desenvolvimento das idades equivalentes também foi afetado, conforme pode ser observado pela Figura 6.19, com diferenças de até 12 h.

Os pontos 1A e 5A apresentaram os maiores valores de temperaturas durante o ciclo térmico, o que é explicado pela sua proximidade junto às saídas de vapor, localizadas nas extremidades da fôrma, em sua parte superior. Ao contrário dos elementos protendidos, o pilar P 30 x 50 apresentou menores temperaturas nos pontos inferiores (pontos 1C, 3C e 5C).

O comportamento das temperaturas nos corpos de prova está ilustrado pela Figura 5.36, apresentando poucas variações térmicas entre os pontos A e B. Foram necessárias 7 horas de ciclo térmico para que os corpos de prova atingissem resistência à compressão em torno de 12 MPa (Tabela 5.7). O Método da Maturidade forneceu valores teóricos de resistência para os corpos de prova ao final do ciclo com margens de erro compreendidas entre 13,90% e 16,03%.

Na Tabela 6.33 estão dispostos os valores teóricos de resistência à compressão calculados a partir do histórico de temperaturas do pilar, indicando que a resistência de 12 MPa foi atingida a partir da sétima hora do ciclo térmico, respeitando o mesmo tempo que os corpos de prova necessitaram para atingir a mesma resistência.

7.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE

A aplicação do Método da Maturidade para estimar a resistência à compressão do concreto *in loco* a partir das curvas de calibração elaboradas no LCEC, relacionando dados de resistência e idade equivalente, foi capaz de fornecer valores teóricos de resistências para os

corpos de prova ao final do ciclo térmico, com margens de erro compreendidas entre 1,13% e 17,83%. Para as idades iniciais, o método ofereceu maiores margens de erros, visto as ordens de grandezas das variações de resistências diante dos valores reais de resistências à compressão obtidos nos ensaios mecânicos.

O método também permite a condensação de várias curvas de resistência à compressão em função da idade de cura para apenas uma curva de resistência à compressão em função das idades equivalentes a 20°C, desde que sejam mantidas as mesmas proporções entre os materiais constituintes do concreto, assim como as suas características físicas e químicas.

Nas Figuras 7.7 e 7.8 está ilustrado o efeito da aplicação do Método da Maturidade para estimar os valores de resistência à compressão do concreto para os elementos em concreto protendidos monitorados na Protendit, com a transformação das idades reais em termos de idades equivalentes a uma temperatura de referência adotada como 20°C.

As Figuras 7.9 e 7.10 ilustram o mesmo efeito da aplicação do Método da Maturidade para os elementos em concreto armado monitorados na empresa.

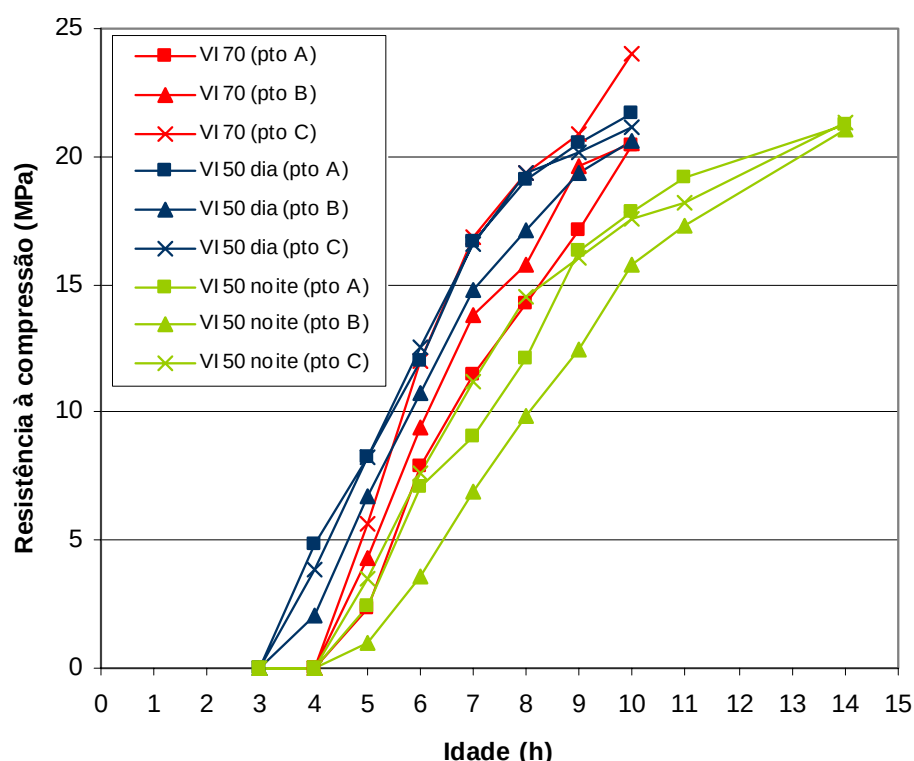


Figura 7.7 - Gráfico comparativo de Resistência à compressão x Idade para as peças protendidas

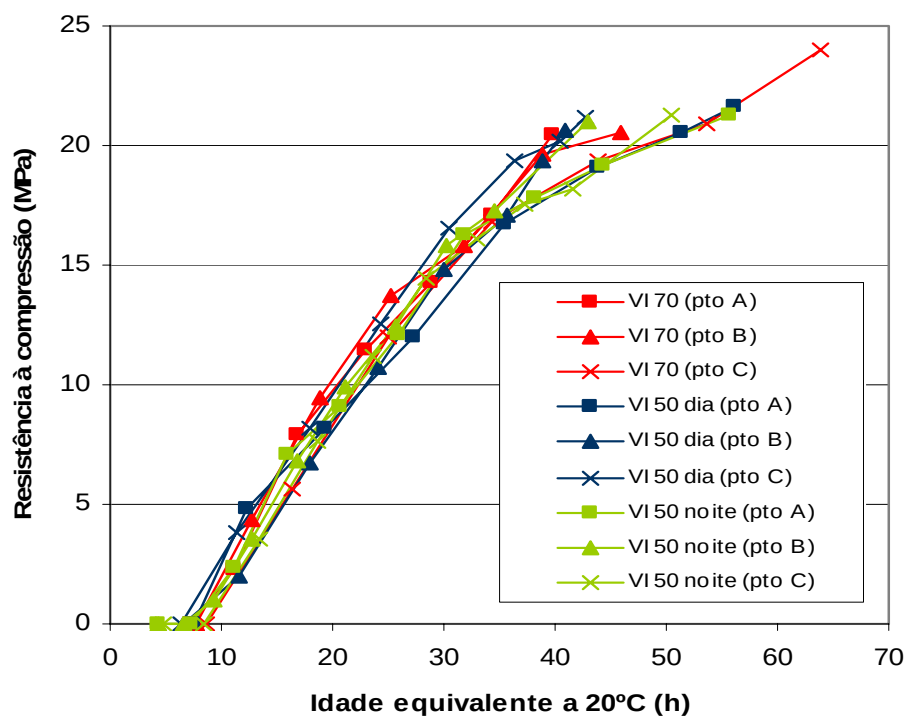


Figura 7.8 - Gráfico comparativo de Resistência à compressão x Idade equivalente a 20°C para as peças protendidas

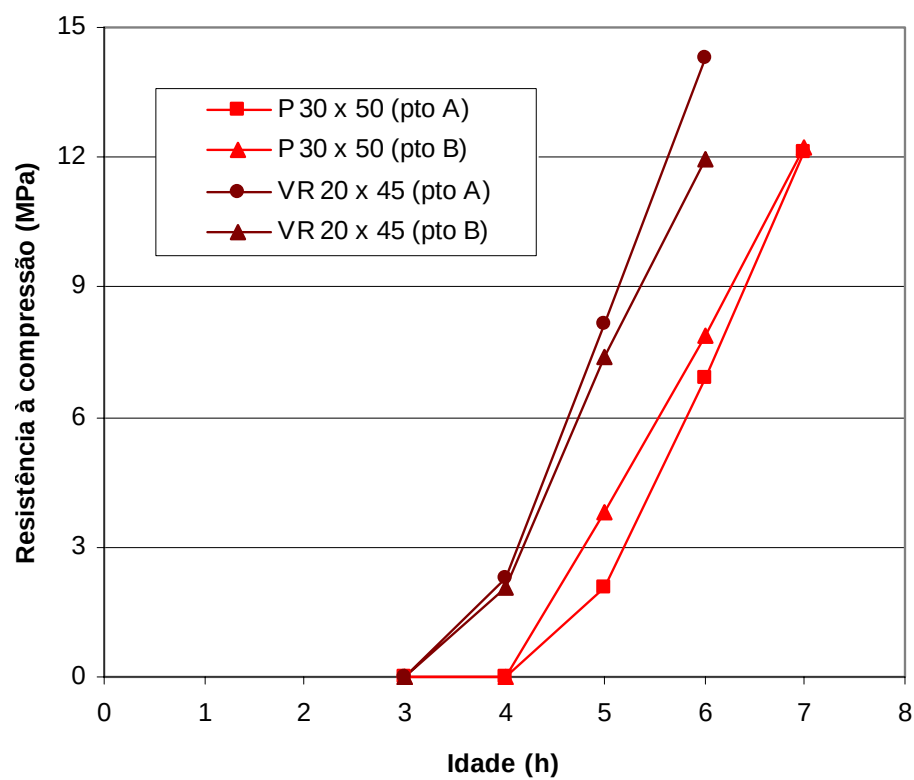


Figura 7.9 - Gráfico Resistência à compressão x Idade para as peças armadas

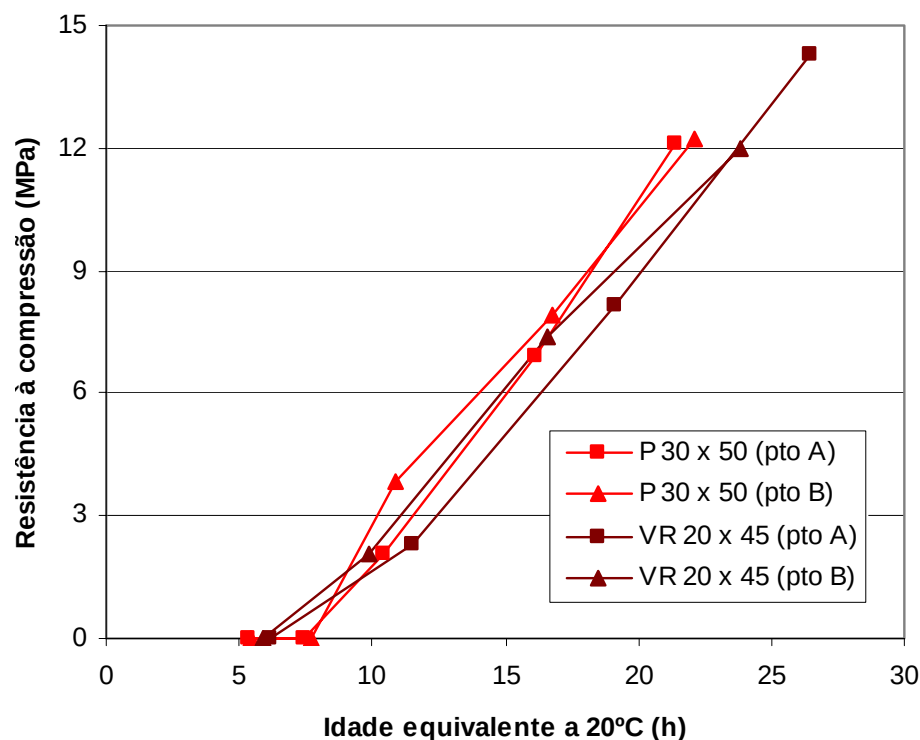


Figura 7.10 - Gráfico Resistência à compressão x Idade equivalente a 20°C para as peças armadas

7.4 TEMPO DE INÍCIO DE PEGA

A adoção do tempo de início de pega para elaboração de umas das curvas de calibração para aplicação do Método da Maturidade foi consequência das observações dos ciclos térmicos realizados na Protendit, visto que um certo tempo era decorrido entre a concretagem do elemento estrutural e a aplicação da cura térmica, assim também como recomendado por Camarini (1995) e El Debs (2000). A primeira curva de calibração foi elaborada com aplicação da cura térmica logo após a moldagem dos corpos de prova de concreto no LCEC, aplicada para o cálculo dos valores teóricos de resistência à compressão das vigas com seções transversais em I de 50 e 70 cm de altura, com a obtenção de resultados apresentando margens de erros compreendidas entre 1,29% e 17,83 % para os valores de resistência ao final do ciclo térmico segundo as Tabelas 6.14 e 6.17.

Os valores teóricos de resistência à compressão calculados a partir da segunda curva de calibração, respeitando-se o tempo de início de pega do cimento, apresentaram margens de erros compreendidas entre 1,13% e 16,03% para os valores de resistência ao final do ciclo térmico (Tabelas 6.20, 6.23, 6.26, 6.29, 6.32).

Assim, a adoção ou não do tempo de início de pega na etapa de elaboração das curvas de calibração apresentou pouca influência quanto à estimativa dos valores teóricos de resistência à compressão. No entanto, o cumprimento desse período de espera é capaz de fornecer curvas de calibração mais precisas, pois representam as condições reais de elaboração e cura do elemento estrutural.

7.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Pela avaliação dos resultados decorrentes dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade, pode-se afirmar que os valores obtidos estão compreendidos na faixa dos módulos dos concretos convencionais, uma vez que o concreto em análise não se comporta como Concreto de Alto Desempenho (CAD), pelo fato de não possuir adições químicas e / ou minerais, com valores médios compreendidos entre 24,53 GPa e 34,78 GPa (Tabelas 6.9 e 6.12).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os dados obtidos durante a realização do trabalho, quer seja na empresa Protendit, quer seja no LCEC, foi possível concluir alguns aspectos sobre o comportamento dos elementos pré-moldados de concreto quando submetidos à cura térmica, assim como os aspectos da aplicação do Método da Maturidade como alternativa de método de ensaio não destrutivo para estimar os valores de resistência à compressão do concreto a partir do seu histórico de temperaturas.

8.1 MONITORAMENTO DE ELEMENTOS PRÉ-MOLDADOS *IN LOCO*

O monitoramento térmico das peças pré-moldadas, na cidade de São José do Rio Preto-SP, permitiu analisar a distribuição de temperaturas em elementos estruturais quando submetidos à cura térmica, observando-se o aparecimento de gradientes de temperatura ao longo da pista de concretagem, assim como também ao longo da seção transversal do elemento estrutural.

As variações térmicas medidas nas estruturas são responsáveis pelo desenvolvimento desigual das propriedades mecânicas do concreto, destacando-se, dentre elas, a resistência à compressão. Regiões com temperaturas mais elevadas apresentaram valores maiores de resistência à compressão se comparadas com as regiões menos aquecidas, considerando-se a mesma idade do material durante a cura térmica.

A temperatura ambiente é um fator importante e deve ser considerado durante o processo de cura térmica adotado pela empresa onde foi realizado. Temperaturas ambientes elevadas são responsáveis pela ocorrência de ciclos térmicos mais curtos, pois há uma perda menor de calor do sistema para o ambiente. Em dias frios, os ciclos térmicos são mais longos, pois a perda de calor do sistema para o ambiente é maior, ocasionando o aparecimento de temperaturas menores nos elementos estruturais, diminuindo a velocidade das reações do

cimento. Assim, durante a execução de elementos pré-moldados, deve-se relevar o efeito da temperatura ambiente sobre a estrutura através do monitoramento da temperatura em pontos estratégicos, sujeitos às principais deformações e solicitações de projeto.

8.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE

A aplicação do Método da Maturidade é capaz de fornecer estimativas dos valores de resistência à compressão a partir dos dados de tempo e temperatura do concreto, juntamente com a energia aparente de ativação do material, permitindo expressar a resistência adquirida em termos de idade equivalente a uma temperatura de referência T_r .

Os resultados obtidos durante essa pesquisa justificam a utilização do Método da Maturidade como um tipo de ensaio não destrutivo para avaliar o ganho de resistência do concreto, principalmente às idades finais do ciclo térmico, quando da necessidade em se realizar desfôrmas e / ou carregamentos decorrentes dos processos de construção. Para aplicação do método é necessário a elaboração de curvas de calibração, obedecendo à mesma composição do concreto moldado *in loco*. Quando houver alterações nas proporções do material, uma nova curva de calibração deve ser elaborada, assim como a determinação do novo valor de energia de ativação da mistura para aplicação no cálculo das idades equivalentes.

O método considera a influência da temperatura sobre as reações de hidratação do cimento, considerando todas as variações térmicas ocorridas na estrutura, relacionando-as com o desenvolvimento da resistência à compressão, possibilitando maior rapidez e segurança na execução dos elementos estruturais.

8.3 ENERGIA APARENTE DE ATIVAÇÃO

Os valores de energia aparente de ativação determinados no trabalho, compreendidos entre 39,4 kJ/mol e 42,2 kJ/mol, estão próximos do valor de 43,9 kJ/mol obtido por Barbosa *et al.* (2005) para o cimento nacional CP-V-ARI e dentro dos limites de 40 e 45 kJ/mol recomendado pela ASTM (1998) para concretos sem adições minerais. Verificou-se também a influência do campo de temperaturas adotado para a realização dos ensaios mecânicos, assim como proposto pelo procedimento ASTM C 1074-98, de modo que temperaturas elevadas

foram responsáveis pela obtenção de valores menores de energia aparente de ativação, enquanto que valores maiores foram obtidos utilizando-se temperaturas inferiores.

8.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como possibilidade de continuidade do trabalho, apresentam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliação da influência das temperaturas de cura sobre os valores de energia aparente de ativação (E_a), segundo o procedimento ASTM C 1074-98;
- Comparação dos valores de E_a obtidos a partir de diferentes procedimentos de ensaios, tais como ASTM C 1074-98, calorimetria, processos físicos, entre outros;
- Modelagem de um novo procedimento para cálculo de E_a , priorizando os processos físico-químicos das reações de hidratação do cimento;
- Pesquisa sobre a influência da adoção do tempo de início de pega do cimento sobre as propriedades mecânicas do concreto submetido à cura térmica;
- Aplicação do Método da Maturidade para estimar os valores de resistência do concreto curado à temperatura ambiente, sem aplicação da cura térmica;
- Monitoramento dos ciclos térmicos empregados por outras empresas de concreto pré-moldado, com o intuito de obter peculiaridades sobre os processos de cura térmica.

REFERÊNCIAS

AITCIN, P. C. *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: PINI, 2000. 667 p.

ALEXANDERSON, J. Strength losses in heat cured concrete. *Sweden Cement Concrete Research Institute Proceedings*, nº 43. Estocolmo, 1972.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI-228-1R-89: *In place methods for determination of strength of concrete*. Detroit, 1989. 26p.

_____. *ACI Committee 347: Guide to formwork for concrete*. Filadélfia, 1994. 421p.

_____. *ACI 364.1R: Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation*, ACI Material Journal, Set/Out. 1993, p.479-498.

_____. *ACI 517.2 R-87: Accelerated curing of concrete at atmospheric pressure-state of the art*. ACI Manual of Concrete, 1992.

AMERICAN STANDARD TESTING METHODS. *ASTM C 1074: Practice for estimating concrete strength by the Maturity Method*. Filadélfia, 1998.

ASAGA, K.; ISHIZAKI, M.; TAKAHAGH, S.; KONISHI, K; TSURUMI, T.; DAIMON, M. Effect of curing temperature on the hydration of portland cement compounds. In: 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION, 1992. Deli. *Anais...* Deli: ICC, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR-6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2003. 170 p.

_____. *NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 7218: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis*. Rio de Janeiro, 1987.

_____. *NBR 7810: Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro, 1983.

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

_____. *NBR 9202: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325)*. Rio de Janeiro, 1985.

_____. *NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado - Procedimento*. Rio de Janeiro, 1985.

_____. *NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NM 49: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)*. Rio de Janeiro, 1998.

ATKINS, P.W. *Physical chemistry*. 5ª edição. Melbourne: Oxford University Press, 1994. 877 p.

BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. A.; PERES, L. D. P. The influence of silica fume on the apparent activation energy of HPC mixtures with various types of Brazilian cement. *American Concrete Institute Special Publication*, Farmington Hills - EUA, v. 229, p. 423-434, 2005.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. *BS 1881: PART 201. Guide to the use of non-destructive methods of test for hardened concrete*. Londres, 1986.

_____. *BS 1881: PART 202. Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer*. Londres, 1986.

BROWN, T.L.; LeMAY, H.E.; BURSTEN, B.E. *Chemistry : the central science*. 5ª edição. Londres: Prentice Hall, 1991. 145 p.

BUNGEY, J. H. *The testing of concrete in structures*. 2 ed. Londres: Surrey University Press, 1989. 207 p.

CAMARINI, G. *Desempenho de misturas cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica*. 1995. 252 p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARINO, N.J. *The Maturity Method - CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. [S.l]: CRC Press, 1991. p. 101-146.

CARINO, N. J.; LEW, H.S. *The Maturity Method: from theory to application*. Washington: American Society of Civil Engineers, 2001. 19 p.

DE MELO, A. B.; LIBÓRIO, J. B. L.; SILVA, I. J. Evidências da perda de resistência mecânica final devido à cura térmica observadas através de imagens de microscopia eletrônica de varredura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: IBRACON, 2000.

DE MELO, A. B. *Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland*. 2000. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos.

EL DEBS, M. K. *Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações*. São Carlos: EESC – USP, 2000. 456p.

ELLIOTT, K. S. *Multi-storey precast concrete framed structures*. Oxford: Blackwell Science, 1996. 688 p.

ERDEM, T.K.; TURANLI, L.; ERDOGAN, T.Y. Setting time: an important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, p. 741– 745, 2003.

FREIESLEBEN-HANSEN, P.; PEDERSEN, E.J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. *Nordisk Betong*, vol.1, p. 21-25, 1977.

FOCAOARU, I. *Romanian achievements in nondestructive strength of concrete*. situ/nondestructive testing of concrete special publication SP-82. Detroit: American Concrete Institute, 1984. p. 35-56.

HAAS, A. M. *Precast concrete: design and applications*. Londres: Applied Science, 1983. 189 p.

HALVORSEN, G. T.; FARAHMANDNIA, A. *The Willow Island collapse: a maturity case study*. [S.l.]:American Society for Testing Materials, 1985. 132 p.

HANSON, J.A. *Optimum steam curing procedure in precasting plants*. American Concrete Institute Journal Proceedings, nº 60, p. 75-100, 1963.

HASNI, L.; GALLIAS J. L.; SALOMON, M. Influence of the curing method on the durability of high performance concretes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE 89 DURABILITY OF CONCRETE, 3, 1991, Montreal, *Proceedings...* Montreal: American Concrete Institute, 1991.

JONASSON, J.E.; GROTH, P.; HEDLUND, H.. Modeling of temperature and moisture field in concrete to study early age movements as a basis for stress analysis. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON THERMAL CRACKING IN CONCRETE AT EARLY AGES, 1995, Londres. *Proceedings...*Londres: R. Springenschmid, E & EF Spon, 1995. p. 45-52.

KAEFER, L. F. *A evolução do concreto armado*. São Paulo: EPUSP, 1998. 43 p.

KANDA, T.; SAKURAMOTO, F.; SUZUKI, K. Compressive strength of silica fume concrete at higher temperatures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS, 4, 1992, Istambul. *Proceedings...* Istambul: American Concrete Institute, 1992.

KHATIB, J.M.; MANGAT, P.S. Porosity of cement paste cured at 45 °C as a function of location relative to casting position. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, p. 97-108, 2003.

KONCZ, T. *Handbuch der fertigteilbauweise*. Berlim: Bauverlag, 1966.

_____. *Manual de la construcción prefabricada*. Madri: Hermann Blume, 1975.

LEW, H. S. West Virginia cooling tower collapse caused by premature form removal. *American Society of Civil Engineers*, vol. 50, 1980.

MALHOTRA, V. M. In situ / nondestructive testing of concrete - a global review. *American Concrete Institute Special Publication (SP-82)*. Detroit: American Concrete Institute, p. 1-16, 1984.

McINTOSH, J. D. Electrical curing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, vol.1, p. 21-28, 1949.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MELO NETO, A.A.; HELENE, P.R.L. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

MINDESS, S.; YOUNG, J.F. *Concrete*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1981.

MIRONOV, S.A. Some generalizations in theory and technology of acceleration of concrete hardening. In: RILEM INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROBLEMS OF ACCELERATED HARDENING OF CONCRETE IN MANUFACTURING PRECAST REINFORCED CONCRETE UNITS, 1964, Moscou. *Proceedings...* Moscou: RILEM, 1964.

MOUNANGA, P.; BAROGHEL-BOUNY, V.; LOUKILI, A.; KHELIDJ, A. Autogenous deformations of cement pastes: Part I. Temperature effects at early age and micro-macro correlations. *Cement and Concrete Research*, vol. 36, p. 110 - 122, 2006.

NEVILLE, A.M.; DILGER, W. H.; BROOKS, J.J. *Creep of plain and structural concrete*. Londres: Construction Press, 1983. 361 p.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

NURSE, R. W. Steam curing of concrete. *Magazine of Concrete Research*, vol.1, nº 2, p.79-88, 1949.

OLIN, H.B.; SCHMIDT, J.L.; LEWIS, W.H. *Construction principles, material and methods*. 6. ed. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1995. p. 101–114.

ORDÓÑEZ, J. A. F. *Prefabricación: teoria y práctica*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1974. 2 vol.

PERES, L. D. P.; BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. A. Determinação da energia de ativação para cimentos nacionais aplicando o procedimento ASTM C 1074-98. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45, 2003, Vitória. *Anais...*São Paulo: IBRACON, 2003, CD-ROM.

PHOON, K.K. Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method, *Amercian Concrete Institute Material Journal* , Setembro-Outubro/99, p.568-573, 1999.

PINHEIRO, L. M.; GIONGO, J. S. *Concreto armado: propriedades dos materiais*. São Carlos: EESC-USP, 1986.

PINTO, R. C. A.; HOVER, K.C. Further studies on the utilization of maturity functions to a high strength concrete mixture. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH-STRENGTH/HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 4, 1996, Paris. *Proceedings...* Paris: 1996, p. 711-718.

PINTO, R. C. A. O método da maturidade e sua utilização em construção civil. In: JORNADAS SUL AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 29, 2000, Punta del Este. *Anais...* Punta del Este: 2000.

PLANE, R.A; SIENKO, M. J. *Química*. 5ª ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1977. 650 p.

POPOVICS, S.; KOMLOS, K; POPOVICS, P. Comparison of DIN/ISO8047 (Entwurf) to several standards on determination of ultrasonic pulse velocity in concrete. In:

INTERNATIONAL SYMPOSIUM NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING, 1995, Berlim. *Proceedings...* Berlim, 1995, pp. 521-529.

POPOVICS, S. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship, *Materials Evaluation*, vol. 59, nº 2, p. 123-130, 2001.

PUNDIT MANUAL. Londres: CNS Eletronics Ltd., 1994. 76 p.

RASTRUP, E. Heat hydration in concrete. *Magazine of Concrete Research*, vol.6, nº 17, p. 79-92, 1954.

SAUL, A. G. A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. *Magazine of Concrete Research*, vol. 2, nº 6, p. 127-140, 1951.

SHIDELER, J.J.; CHAMBERLIN, W.H. Early strength of concrete as affected by steam curing temperatures. *Journal American Concrete Institute* 46, p. 273-283, 1949.

SOROKA, I.; JAEGERMANN, C.H.; BENTUR, A. short-term steam curing and concrete later-age strength. *Materials Construction* 11, p. 93-96, 1978.

SWAMY, R. N.; AL-HAMED, A. H. The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-cured cube and hence in situ strength of concrete. *American Concrete Institute Special Publication (SP-82)*. Detroit: American Concrete Institute, p. 247-276, 1984.

TEODORU, G.V. The use of simultaneous nondestructive tests to predict the compressive strength of concrete. *American Concrete Institute Special Publication (SP-112)*. Detroit: American Concrete Institute, p137-152, 1988.

TÜRKEL, S.; ALABAS, V. The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete. *Cement and Concrete Research*, vol.35, p. 405-411, 2005.

VASCONCELOS, A. C. O desenvolvimento da pré-fabricação no Brasil. *Revista Politécnica*, n.200, p.44-60, 1988.

_____. *O concreto no Brasil: recordes, realizações, história*. São Paulo: PINI, 1992. Vol.1.

VELASCO, R.V. *Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas*. 2002. 161 p. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VERBECK, G. J.; HELMUTH, R. H. Structure and physical properties of cement paste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5, 1968, Tokyo. *Proceedings...* Tokyo, 1968. p. 1-32.

VODÁK, F.; TRTIK, K.; KAPICHOVA, O.; HOSHOVA, S.; DEMO, P. The effect of temperature on strength – porosity relationship for concrete. *Construction and Building Materials*, vol.18, p. 529-534, 2004.

WALLER , I.; D'ALOIA, L.; CUSSIGH, F.; LECRUX, S. Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, p. 589-599, 2004.

WHITTINGTON, H.W.; WILSON, J.G. Low-frequency electrical characteristics of fresh concrete. *International Engineering Education Proceedings A* 133 (5), p. 265-271, 1986.

WILSON, J.G.; GUPTA, N.K. Equipment for the investigation of the accelerated curing of concrete using direct electrical conduction. *Sciencedirect Measurement*, vol. 35, p.243-250, 2004.