AVALIAÇÃO DA MATURIDADE EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO CURADOS EM DIFERENTES TEMPERATURAS

J. L. BAUM¹, L. R. LERNER^{1*}, F. PACHECO¹, B. F. TUTIKIAN¹

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, Brasil

RESUMO

A pesquisa apresenta a aplicação do método da maturidade para estimativa da resistência à compressão do concreto através do controle de sua temperatura. Para tal, foram feitas correlações entre as resistências à compressão determinadas em laboratório e sua energia de reação. A sequência de análise, períodos de ensaio e parâmetros foram balizados na ASTM C 1074-11 para a estimativa da resistência à compressão do concreto através do método da maturidade. Após, foi avaliado o método em sistema construtivo de paredes portantes de concreto armado, a fim de acompanhar o crescimento da temperatura nas idades iniciais e avaliar sua aplicabilidade. Através da aplicação do método, foi possível gerar uma curva de correlação entre temperatura versus resistência estimada, criando uma ferramenta eficaz de controle.

Palavras chave: Método da Maturidade; Ensaios Não Destrutivos; Paredes de Concreto.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas evidenciou-se um grande avanço no desenvolvimento de novos materiais cimentícios, expandindo as alternativas construtivas para fins específicos, reduzindo custos e mitigando a degradação de recursos não-renováveis (HELENE; ANDRADE, 2010).

Os recentes avanços na tecnologia do concreto comprovam que ainda há muito a desenvolver a partir deste material, essencial para a construção civil, prevalecendo-se de seu alto desempenho estrutural e versatilidade de projeto e execução (HELENE; ANDRADE, 2010). Simultaneamente, faz-se necessário o desenvolvimento de novas medidas de controle, em micro ou macro escala.

O aquecimento do mercado habitacional brasileiro demandou construções rápidas e com qualidade adequada, satisfazendo ao programa do Governo Federal, o Minha Casa Minha Vida (ABCP, 2016). Decorrente de tal fato, novas alternativas construtivas foram desenvolvidas e adaptadas para que se tenha agilidade na elaboração de projetos e no ciclo construtivo, viabilizando economicamente a modalidade de financiamento à baixo custo e desempenho aceitável. Deve-se atentar para que o custo baixo e a agilidade não acarretem em uma perda de qualidade. Nesse cenário, deve ser destacada a segurança do imóvel, que pode ser colocada em risco na remoção antecipada de formas e escoramentos (BAGHERIZADEH et al., 2007).

Assim, novos processos são criados e procedimentos são adaptados do setor industrial para a construção civil, proporcionando uma aproximação da produção controlada e sequencializada de atividades até então tidas como uma utopia no setor (PIGOZZO; SERRA; FERREIRA, 2005).

Cabe destacar que deve ser considerada na definição dos ciclos construtivos a segurança estrutural nos estágios iniciais, sendo que o momento crítico é quando a edificação está sendo construída e os colapsos estruturais são mais frequentes (CARINO; LEW, 2001). Com base na necessidade de garantir segurança ao método construtivo, verificou-se a existência de uma lacuna na verificação da resistência à compressão inicial do concreto em ciclos construtivos rápidos (CASTRO-GARRIDO et al., 2016).

Um método confiável é o da maturidade. Tal procedimento consiste no cálculo da energia de ativação e na idade equivalente da amostra estudada, conforme proposto na ASTM C1074, 2011, e através do monitoramento da temperatura de reação diretamente na estrutura a ser avaliada (MALHOTRA; CARINO, 2004). Nas idades iniciais do endurecimento do concreto, caracterizar a taxa de progressão das reações de hidratação representa o método da maturidade do concreto (BENAICHA; BURTSCHHELL; ALAOUI, 2016). Para análise do método, foram acompanhadas concretagens, com instrumentação e utilização de software. Assim, esse estudo buscou aplicar o método da maturidade como controle, nas horas iniciais pós concretagem e desforma, de paredes de concreto armado em estruturas multifamiliares, construídas através de formas metálicas e concreto de elevado abatimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi balizado em três fases. A etapa inicial, acompanhada no canteiro de obras, envolveu a análise das resistências iniciais, obtidas através do rompimento dos corpos de prova, conforme a ABNT NBR 5739:2018, 14 horas após a moldagem, e a tomada da temperatura ambiente durante a concretagem e sua variação até o momento da ruptura dos cilindros de concreto. Na segunda fase, a pesquisa foi estruturada em dois fluxos de atuação, sendo que um buscou alimentar a análise com dados de entrada, e o segundo colocou em prática as informações coletadas. As etapas sintetizam o método utilizado:

Primeira Etapa: Definido o concreto e caracterizados seus componentes;

Segunda Etapa: Moldagem de amostras conforme a ABNT NBR 5738:2015 e concretagem da estrutura em campo;

Terceira Etapa: Controle de temperatura de reação das moldagens em laboratório, através da análise em três diferentes condições de cura. As condições adotadas para cada série foram as temperaturas de 0° C, 23° C e 46° C.

Em paralelo, foi controlada a temperatura da reação na estrutura concretada em obra, e sua resistência, através do ensaio de compressão axial proposto na ABNT NBR 5739:2018;

Durante esta análise prévia, foram moldados 7 corpos de prova para cada caminhão, de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 67:1998 e ABNT NBR 5738:2015. Dois corpos de prova de cada caminhão foram rompidos após 14 horas de sua moldagem. Para liberação da desforma das paredes e lajes são exigidos pelo projetista, no mínimo, uma resistência à compressão de 3 MPa. Este processo se repetiu de segunda à sábado e a cada dois dias um pavimento foi concretado, finalizando a torre em 10 dias após seu início.

2.1 Materiais

2.1.1 Cimento

O concreto em estudo utilizou cimento CP V-ARI. Pela busca de altas resistências iniciais para desforma, a empresa optou pela utilização do cimento com alta resistência inicial.

2.1.1 Agregado miúdo

Utilizou-se como agregado miúdo duas areias distintas, uma de origem quartzosa, extraída de rios e a outra de origem industrializada, proveniente do processo de britagem. Os percentuais são de 45,1% de areia natural e 54,9% de areia de britagem. A curva granulométrica da areia quartzosa (a) e da industrializada (b) estão dispostas na Figura 1, e foram obtidas conforme a ABNT NBR NM 248:2003.

Figura 1 – Curva granulométrica das areias

2.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo é composto por uma fração única de rocha basáltica. Sua distribuição granulométrica foi verificada seguindo a ABNT NBR NM 248:2003, vide Figura 2.

Figura 2 – Curva granulométrica da brita

2.1.4 Fibras

Utilizou-se microfibras de polipropileno NeoFibra CR, da Neomatex, em uma dosagem de 0,3 kg/m³ de concreto. O material possui comprimento de 5mm, diâmetro de 100µm, índice de forma de 500 e área superficial de 44m²/kg.

2.2 Métodos

2.2.1 Método da maturidade

O método foi aplicado baseando-se na ASTM C1074:2011, através da moldagem de corpos de prova submetidos a diferentes condições de cura. No acompanhamento da execução da estrutura, foram moldados trinta espécimes, de acordo com os parâmetros da ABNT NBR 5738:2015, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Número de amostras por idade de controle e temperatura de cura

CONDIÇÃO DE CURA	AMOSTRAGEM POR IDADE				
	14 horas	24 horas	48 horas	120 horas	168 horas
0° C	2	2	2	2	2
23° C	2	2	2	2	2
46° C	2	2	2	2	2
Σ	6	6	6	6	6

2.2.2 Monitoramento das temperaturas

Foram realizadas duas frentes de monitoramento das temperaturas reativas na reação do cimento. A primeira analisou as amostras de controle moldadas em obra e conservadas em laboratório, em diferentes condições de temperatura. A segunda linha atuou sobre a estrutura efetiva, comparando diretamente os resultados de resistência à compressão e sua estimativa de resistência através do método da maturidade, elaborado a partir da primeira linha de monitoramento.

2.2.2.1 Monitoramento em cura controlada

Para esta etapa foram designados três corpos de prova de sacrifício, nos quais foram inseridos sensores térmicos no estado fresco para cada lote de cura, analisando a variação na temperatura de reação em cada condição exposta. Foram utilizados sensores do modelo Con-Cure Nex. Ao total foram empregadas cinco unidades do equipamento; três em laboratório (amostras) e duas in situ (estrutura concretada).

Todas as amostras repousaram na obra após a moldagem, estando na mesma condição de temperatura e umidade durante as primeiras 14 horas de cura, a fim de evitar o transporte e a movimentação dos corpos de prova em seu estado fresco. Após este período inicial, as primeiras três amostras foram encaminhadas para rompimento por compressão axial, e as demais separadas em lotes e designadas às condições diferentes de cura, conforme descrito nos itens a seguir:

1) O primeiro lote foi disposto para cura em um refrigerador industrial. Três sensores, inseridos ainda na condição de concreto em estado fresco, mediram a evolução da temperatura de uma das amostras. Foi utilizado um termômetro para verificar a temperatura interna do refrigerador, a qual se manteve em 0°C durante o período de cura controlada. O lote foi identificado com a sigla 0C;

2) O segundo lote foi mantido na sala de cura úmida, com temperatura estabilizada em 23°C. A sala é fechada hermeticamente e possui sistema de controle de umidade e temperatura automatizado, oferecendo as condições ideais para a cura. No corpo de prova de sacrifício, três sensores foram inseridos no momento de sua moldagem e registraram a evolução da temperatura de hidratação do cimento durante todo o período de cura. O lote foi identificado com a sigla 20C;

3) O terceiro lote de amostragem foi curado em forno estufa a 40°C, com controle de temperatura interna. No forno foram dispostos nove corpos de prova e, em um deles, foram dispostos quatro sensores para registrar a evolução da temperatura de reação. O lote foi identificado com a sigla 40C.

Seguindo a estrutura do projeto experimental, as amostras em cura controlada foram submetidas a ensaio de compressão axial, segundo a ABNT NBR 5739:2018. Para realizar o ensaio de compressão, em idades iniciais, foi adotado o uso de nivelador de superfície em neoprene.

Os ensaios de compressão, assim como o monitoramento contínuo da evolução de temperatura de hidratação das amostras de controle, se estendeu durante sete dias nas mesmas condições apresentadas anteriormente.

2.2.2.2 Monitoramento em situ

A estrutura em aplicação consistiu em um modelo monolítico de diafragma rígido, composto por sistema estrutural contínuo de paredes e lajes de concreto. As paredes e a laje possuem a espessura de 10 centímetros e são concretadas em um único ciclo, com a utilização de fôrmas de alumínio. A edificação tem cinco pavimentos tipo, com quatro apartamentos por andar. O ciclo de concretagem empregado pela construtora é diário, com a execução de dois apartamentos, hall e escada nos dias ímpares e de dois apartamentos nos dias pares, finalizando a torre em 10 dias de atividades. A concretagem foi iniciada às 18:45hs, do dia XXXXX, sem a incidência de sol, devido à sombra das torres existentes. O ciclo de leitura e monitoramento de temperatura para os sensores na parede P11A foi de 15 horas, não sendo possível estender a utilização devido ao avanço da obra e concretagens posteriores. O ciclo de leitura e monitoramento adotado para os sensores inseridos na laje L15 foi de 7 dias, possibilitando uma amostragem mais ampla que a anterior e sendo compilada nas mesmas idades do monitoramento em laboratório.

O fator de maturidade foi definido através da equação 1, proposta por NurseSaul, e a Ea foi avaliada através da compilação de resultados propostos por Peres et al. (2005), o qual buscou quantificar a energia de ativação nos cimentos nacionais.

$$M(t) = \sum_0^t T - T_0 \cdot \Delta t$$

Eq.1

Onde:

M(t) = fator de Maturidade em relativo tempo t, expresso em °C·h

Δt = intervalo de tempo, expresso em horas

T = média de temperatura em determinado intervalo de tempo Δt, em °C

T0 = temperatura base, expressa em °C

O aparelho realizou as conversões e retornou com os valores correspondentes à maturidade e idade equivalente da amostra instrumentada. Foram moldadas 7 amostras para cada caminhão betoneira, sendo mantidas em tanque com água para cura, sendo ensaiadas a sua resistência à compressão axial nas idades de 14 horas, 7 e 28 dias. Para complementar o estudo realizado em campo, os corpos de prova do concreto utilizado na porção monitorada pelos sensores de temperatura foram ensaiados a sua resistência à compressão axial, conforme preconiza a ABNT NBR 5739:2018, em obra a fim de comparar os resultados obtidos em laboratório. O nivelamento de superfície das amostras foi através da utilização de discos de neoprene.

3. RESULTADOS

As análises foram divididas em duas seções, sendo a primeira através da aplicação direta da ASTM C1074:2011 através da definição do índice de maturidade, e a segunda análise realizada em base nas

leituras de aparelhagens específicas para o método da maturidade, relacionando a E_a com a temperatura da reação e a idade equivalente do concreto.

3.1 Amostras de controle

As amostras de controle, moldadas em canteiro de obra e controladas em laboratório, foram analisadas quanto a seu histórico de evolução de temperatura na reação de hidratação do cimento e sua resistência à compressão axial no estado endurecido.

3.1.1 Evolução das temperaturas de reação das amostras 20C, 0C e 40C

A série 20C contempla as amostras curadas em câmara úmida de temperatura controlada a 23°C. O histórico de evolução de temperatura é apresentado na Figura 3, com leituras constantes a cada 15 minutos ao longo das 168 horas de monitoramento e a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos rompimentos nas idades de controle, separado pelos lotes de moldagem.

Tabela 2 – Rompimentos nas diferentes horas da amostra 20C

AMOSTRA	IDADE (h)	RESISTÊNCIA POTENCIAL (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO
20 C	14	6,9	6,9	0,0
	24	13,7	13,5	0,1
	48	21,9	20,2	1,2
	120	26,0	24,6	1,0
	168	27,7	26,5	0,9

O lote de amostragem 0C contempla os corpos de prova curados à temperatura de 0°C, em condição seca. Foram analisadas as evoluções de resistência à compressão conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Rompimentos nas diferentes horas da amostra 0C

AMOSTRA	IDADE (h)	RESISTÊNCIA POTENCIAL (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO
0C	14	6,9	6,8	0,1
	24	9,5	8,8	0,7
	48	11,1	10,9	0,3
	120	10,7	10,4	0,4
	168	15,1	15,0	0,1

Esta série de amostras foi condicionada em estufa térmica, com temperatura controlada em 43°C e em condição seca, durante um tempo de amostragem de sete dias corridos. As amostras foram analisadas quanto a resistência mecânica de compressão axial em estado endurecido do concreto (Tabela 4).

Tabela 4 – Rompimentos nas diferentes horas da amostra 40C

AMOSTRA	IDADE (h)	RESISTÊNCIA POTENCIAL (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO
40C	14	7,3	7,3	0,0
	24	17,1	16,2	1,0
	48	21,0	20,9	0,1
	120	24,6	24,4	0,2
	168	26,7	26,3	0,4

3.2 Curva de correlação térmica

A partir das análises de resistência à compressão e respectivas leituras térmicas das amostras, traçou-se um plano comum entre todos os resultados a fim de gerar uma curva padrão correlacionando as métricas avaliadas e replicar os resultados posteriormente, através de uma simples conferência da temperatura na estrutura, buscando estimar a resistência relativa do concreto. Para tal correlação, o Gráfico 1 foi gerado após a compilação dos dados, apresentando os resultados obtidos nos ensaios de compressão das três séries amostradas – Série 0C, Série 20C e Série 40C – em função de sua idade, em horas.

Gráfico 1 – Compilação do dados das amostras

Através desta sobreposição é possível constatar que as resistências das séries 20C e 40C são similares, em vista que a 0C exibe os valores mais discrepantes da curva. Um dos fatores que possa ter contribuído para esta aproximação dos resultados das séries 20C e 40C se dá pela cura úmida atribuída aos corpos de prova condicionados a 23°C, diferente da condição totalmente seca a qual a série 40C foi submetida. De fato, a maior energia térmica oferecida aos corpos de prova da série 40C acelerou a reação de hidratação do cimento, porém a condição 100% úmida da câmara de cura na série 20C proporcionou um ambiente mais favorável para a hidratação completa, e este efeito pode ser visto na pequena diferença potencial entre as duas séries. Verifica-se que ao somarem-se as curvas, o coeficiente de correlação se reduz, apontando para a significância da temperatura no resultado obtido.

3.2.1 Índice de Maturidade da composição de concreto

Para ser definida uma correlação entre a resistência a compressão e a temperatura de reação do concreto, é necessária a avaliação do índice de maturidade para cada ensaio de rompimento realizado. Seguindo os procedimentos recomendados pela ASTM C 1074 (ASTM, 2011), relacionando o índice de maturidade, foi traçado um gráfico com os valores recíprocos das resistências à compressão obtidos em cada uma das séries em função da recíproca idade de cada ensaio, subtraindo o tempo de início de endurecimento da pasta de cimento. Para cada uma das séries foram lançados os valores e traçada a tendência. Os quocientes resultantes da divisão dos pontos de intercepção do eixo, com a inclinação da linha reta resultante, são os valores característicos k para cada uma das amostras. A constante k é utilizada para definir a temperatura base de cada Série, e os resultados são apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Valores característicos

Com os valores característicos k definidos, o Índice de Maturidade (M_t) de cada amostragem foi calculado utilizando a Equação 1, parametrizando a variação da temperatura da amostra no intervalo de tempo correspondente do ensaio. A aplicação de uma relação recíproca entre os resultados tem como objetivo tornar uma curva logarítmica em uma função linear, desta maneira é possível verificar a não-linearidade dos resultados na série 0C, o que corrobora com a possível não-conformidade em virtude do diferencial nas temperaturas de cura a qual o experimento foi exposto. Sob esta ótica de análise, verifica-se que a Série 20C retornou o resultado mais próximo do esperado, pois foi mantida em uma temperatura condizente com sua condição alvo desde o início da análise (MALHOTRA; CARINO, 2004). Com os valores de M_t para cada amostragem, um gráfico comum entre a taxa de crescimento da maturidade, a evolução da temperatura e temperatura média da amostra e a sua respectiva resistência à compressão pôde ser traçado a fim de correlacionar as métricas, formando um padrão para o concreto em estudo em concordância com a metodologia expressa na ASTM C 1074 (ASTM, 2011). Os gráficos elaborados seguem apresentados.

Gráfico 3 - Correlação entre Temperatura *versus* Idade *versus* Índice de Maturidade na Série 20C Gráfico 4 - Correlação entre Temperatura *versus* Idade *versus* Índice de Maturidade na Série 40C.

Gráfico 5 - Correlação entre Temperatura versus Idade versus Índice de Maturidade na Série 0C

(a)

(b)

Gráfico 6 - Curva de correlação Índice de Maturidade versus Resistência para a Série 20C (a) e 40C (b)

Os resultados plotados no Gráfico 3 e Gráfico 4 sustentaram as expectativas durante os ensaios, demonstrando uma curva com comportamento adequado ao método apresentado na normatização ASTM C 1074 (ASTM, 2011), apresentando um crescimento linear no índice de maturidade da amostra, conforme evidenciado na bibliografia de referência (BENAICHA; BURTSHELL; ALAOUI, 2016; TIKALSKY; TEPKE; CAMISA, 2003; TOPÇU; KARAKURT; ALTUN, 2007; YIKICI; CHEN, 2015). Em contrapartida, o Gráfico 5 resultou em uma curva incoerente com o esperado, apresentando uma queda na maturidade da amostra ao longo do período de ensaios. Considerando este avanço no Mt do ensaio, a curva de correlação seria crescente na primeira parcela do gráfico, e após o ponto de virada a correlação seria inversamente proporcional ao ganho de resistência. A provável causa do fenômeno evidenciado recai sobre a cura inicial, de 14 horas, em uma temperatura de 17°C e somente após este período o acondicionamento das amostras em um ambiente de cura controlada. Como o período de maior atividade reativa no processo de hidratação do cimento pôde ser observado nas primeiras 20 horas, o impacto no resultado desta série inviabilizou sua utilização efetiva. O Gráfico 6 traz o resultado da correlação dos resultados, colocando em evidência o Índice de Maturidade do Concreto para a Série 40C (a) e para a Série 20C (b) em relação à sua resistência potencial relativa. Relacionando as duas curvas obtidas, desconsiderando os resultados inconclusivos obtidos na curva da Série 0C, formou-se uma curva padrão única, expressa no Gráfico 7, que possui a representatividade do concreto estudado em toda a gama térmica aplicada nas análises experimentais. Com esta curva padrão, aliada a mecanismos de medição de temperatura, é possível avaliar em tempo real a estimativa de resistência das estruturas sem a necessidade de ensaios destrutivos em canteiro de obra.

Gráfico 7 - Curva de correlação Índice de Maturidade *versus* Resistência Potencial para o concreto de estudo

Destaca-se que esse índice de maturidade obtido, de acordo com a bibliografia, pode ser tido como uma estimativa coerente entre o histórico de maturidade e resistência final. Evidencia-se também a não-dependência do fator externo de temperatura ambiente, uma vez que esta variável é suprimida ao se analisar o mesmo concreto em diferentes condições térmicas de exposição (TOPÇU; KARAKURT; ALTUN, 2007). Comparando os resultados obtidos através de ensaios de compressão, e estimativa alcançada com a aplicação da maturidade, a Tabela 5 apresenta a aproximação dos resultados. Os resultados expostos são referentes à estrutura concretada a qual o controle da temperatura foi empregado, e a análise comparativa entre a Mt e a resistência estimada é exemplificada na Figura 6.

Tabela 5 - Comparativo entre resistência estimada e efetiva

Idade (horas)	Resistência Estimada (MPa)	Resistência Efetiva (MPa)
14	7,1	6,9
24	13,5	13,7
168	24,6	25,1

Figura 6 - Aplicação da correlação

Percebe-se pela Tabela 8 e pela Figura 6 – Aplicação da correlação que há grande aproximação entre o valor estimado e o real, indicando para uma segurança quando do emprego do método nas condições de temperatura consideradas nas análises 20C e 40C.

3.2.2 Relação de Idade Equivalente Con Cure

Utilizando a aparelhagem específica para aplicação do método da maturidade, as leituras anteriormente apresentadas serviram de alimentação para a análise do método em software. Os resultados obtidos, em correlação empírica da Ea, temperatura de reação da peça concretada e análises laboratoriais de resistência e temperatura, são apresentados a seguir, considerando sua idade equivalente de acordo com a ASTM C1074 (ASTM, 2011).

3.2.2.1 Análise com 14h de cura

A Figura 7 apresenta a leitura do histórico térmico do sensor inserido na parede, com leitura em intervalos de 15 minutos durante um período de 14 horas. A reação teve seu pico térmico após aproximadamente 6 horas, atingindo 38,1°C. Para cada uma das séries de análise laboratorial foi correlacionado, utilizando o software Con Cure, para determinar sua conseguinte Idade Equivalente.

Figura 7 - Histórico térmico às 14 horas - Parede

Na Figura 8 é apresentada a função da idade equivalente em relação ao resultado obtido em laboratório para a série 0C, estimando a resistência do concreto in situ através da maturidade.

Figura 8 - Idade equivalente em 14 horas– Correlação Série 0C

Para esta análise o software retornou a equivalência do concreto em 0,8 dias (19,2h), estimando 7,6 MPa. Essa verificação foi realizada 14 horas após concretagem, tendo um pequeno ganho entre o período real e a idade equivalente (14 e 19,2h, respectivamente). Na análise do sensor, utilizando a correlação entre os ensaios da Série 20C, a idade equivalente resultante foi de 0,6 dias (14,4h) com 7,1 MPa, conforme pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Idade Equivalente em 14 horas– Correlação Série 20C

Percebeu-se assim um ganho ainda menor entre o tempo real de cura e a idade equivalente. Para a análise da Série 40C o resultado da idade equivalente obtido foi de 0,9 dias (21,6h) e uma resistência de 14,1 MPa, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Idade Equivalente em 14 horas – Correlação Série 40C

Deve-se destacar que os resultados apresentados são referentes ao período de 14h, e assim, os corpos de prova das três séries estavam na mesma condição de cura, apresentando pequenas variações inerentes ao processo de cura e rompimento dos exemplares.

3.2.2.2 Análise com 24h de cura

Analizando o histórico de evolução térmica da estrutura, em um período de 24 horas com leituras a cada 15 minutos, o pico da temperatura se manteve em 38,1 °C e a temperatura mínima registrada foi de 28,6°C. A Figura 11 mostra a evolução da temperatura durante o período.

Figura 11 - Histórico Térmico às 24 horas – Parede

Aplicando, novamente, as leituras das análises laboratoriais para as séries de controle, apresentam-se os resultados de Idade Equivalente no período de 24 horas. A Figura 12 apresenta a resolução comparativa para a Série 0C.

Figura 12 - Idade Equivalente em 24 horas – Correlação Série 0C

A leitura da idade equivalente foi de 1,7 dias (40,8h) e uma resistência à compressão axial de 10,4 MPa. Percebeu-se que há uma diferença representativa entre o sensor mantido em temperatura isotérmica e a condição de cura oferecida. A Figura 13 apresenta a série 20C.

Figura 13 - Idade Equivalente em 24 horas – Correlação Série 20C

Para a análise do sensor, em correlação à Série 20C, a maturidade do concreto atingiu a idade equivalente de 0,9 dias e uma resistência de 12,5 MPa às 24 horas, conforme a Figura 13.

Figura 14 - Idade Equivalente em 24 horas – Correlação Série 40C

Por fim, estimando a resistência do concreto através da análise do sensor em correlação à Série 40C, a idade equivalente da peça estrutural foi de 1,1 dias e uma resistência de 16,9 MPa às 24 horas, conforme visto na Figura 14. Analisando comparativamente amostras, percebe-se que o maior ganho imediato ocorreu na série 40C, com os picos de resistência em 24 horas superior as demais séries. No entanto, para as idades de 14 horas a diferença foi irrisória entre as séries de análise, novamente em decorrência da cura não-controlada neste período. Para a aplicação do método, utilizando ferramentas de medição de maturidade, é de extrema importância a correta disposição das amostras na etapa de definição dos índices de maturidade.

4. CONCLUSÃO

Com o objetivo de validar o uso do método da maturidade, como uma ferramenta viável em canteiros de obras, para permitir a remoção de fôrmas e escoramentos, o estudo foi conduzido através da metodologia preconizada na normatização americana ASTM C 1074 (ASTM, 2011). Assim, buscou-se, através da aplicação experimental do método, obter dados satisfatórios para sustentar o emprego do método em condições reais de execução. Considerando que a etapa de desforma e retirada de escoramentos representa um elevado grau de risco, se realizada prematuramente, e dada necessidade de agilizar o processo construtivo adotado, a busca por uma maneira efetiva de se estimar a resistência efetiva da estrutura é necessária. Com os resultados obtidos pôde-se avaliar a eficácia do método, em contrapartida do método usual de conferência da resistência através do rompimento de corpos de prova cilíndricos, a fim de estabelecer uma margem segura para a estimativa. Comparando a evolução térmica de reação, a resistência característica de compressão axial e o avanço da maturidade, foi possível traçar uma curva padrão entre todas as amostras estudadas, tal correlação tornando possível estimar a resistência com uma simples verificação de temperatura interna da estrutura concretada. Levando em conta o método apresentando, sob a luz do método comum, a principal vantagem observada se dá ao fato da interdependência da temperatura ambiente a qual a estrutura está sujeita e sua resistência resultante. Pelo método convencional de rompimento de espécimes cilíndricos, a diferença na condição da amostra em relação à estrutura imbuí uma série de variáveis que torna a estimativa pouco confiável. Como o método da maturidade emprega a correlação entre três condições de temperatura diferentes, este fator é eliminado e torna a estimativa independente da presença deste fator externo, tão crítico em concretagens cíclicas de alta velocidade. Apesar de algumas barreiras terem sido encontradas durante a experimentação do método, os resultados foram satisfatórios para a análise. Tais dificuldades são relevantes a serem expostas, uma vez que seu impacto pode ser significativo em um cenário real de aplicação futura, e serão abordadas a seguir.

1) Exposição imediata à condição de cura alvo. Devido a condição encontrada no canteiro de obras o qual este estudo foi aplicado, não foi possível acondicionar as amostras imediatamente nas condições

térmicas de controle (0°C – 23°C – 46°C) e ficaram expostas à temperatura ambiente nas primeiras 14 horas. Este período inicial, de maior representatividade na reação de hidratação, afetou notoriamente os resultados obtidos na série de cura à 0°C . Em um contexto ideal para próximas análises, as amostras seriam moldadas e imediatamente conservadas em temperatura de controle, como já havia sido explicitado por Poole e Harrington (1996).

2) Resultados são específicos ao concreto de estudo. Quaisquer alterações do concreto a ser utilizado, seja na relação água/cimento, proporção dos agregados, utilização de aditivos ou troca do cimento, todos os resultados tornam-se obsoletos. Caso haja a necessidade de mudança do concreto, as análises laboratoriais devem ser refeitas a fim de se manter uma fidedignidade nas correlações de resistência.

3) Anomalias provenientes da execução não são consideradas. Problemas nos elementos estruturais, tais como espaços vazios deixados por falta de vibração, cura inadequada, segregação de agregados e armações fora de posicionamento correto, por exemplo, irão afetar a estrutura independente da correta aplicação do método da maturidade. Estas condições ainda influenciam na capacidade portante da estrutura e podem lesar a remoção de fôrmas e escoras, e o método não respalda tais anormalidades. Ainda considerando os pontos adversos à aplicação, os resultados corroboraram para sua confiabilidade quando comparados com os resultados de rompimento à compressão axial. O desvio entre os resultados efetivos obtidos, e as estimativas traçadas pelo método, ficaram dentro do esperado atendendo a premissa da aplicação. Em suma, a aplicação do método da maturidade é viável para estimar a resistência de estruturas em parede de concreto, criando as estimativas necessárias para tomadas de decisões no ciclo construtivo de maneira segura e confiável, formando uma poderosa ferramenta de controle de qualidade. É importante apontar, ainda, que o método não substitui os ensaios de compressão axial de corpos de prova, 82 e devem ser pareadas ambas as verificações para garantir a segurança e desempenho eficaz da estrutura.

5. REFERENCIAS

- American Society for Testing Materials (2011), *ASTM C-1074 – 11: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*. West Conshohocken. 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 8p
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 6p
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015). *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 9p
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 9p
- Bagheri-Zadeh, Seyed-Hassan; et al. (2007), *Field Study of Concrete Maturity Methodology in Cold Weather*. Journal of Construction Engineering & Management, v. 133, p. 827-835,
- Benaicha, Mouhcine; Burtschell, Yves; Alaoui, Adil Hafidi (2016), *Prediction of compressive strength at early age of concrete – Application of maturity*. Journal of Building Engineering, v. 6, p. 119-125.
- Carino, Nicholas; Lew, Hai S. (2001), *The maturity method: from theory to application*. Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey, p. 125-144. Washington: American Society of Civil Engineers.
- Castro-Garrido, M. C., López-Garzón, M. C., Alvarado, Y. A., Castaño, J. O., Gasch, I. (2010), *Aplicación del método de la madurez para la estimación del plazo de descimbrado de forjados construidos con sistemas industrializados*. Informes de la Construcción, v. 68, p. 1-12.
- Helene, Paulo; Andrade, Tibério. (2010), *Concreto de Cimento Portland*. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais, p. 905- 944,
- Malhotra, V. M.; Carino, N. J. (2004), *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. p. 392.

- Pigozzo, B. N.; Serra, S. M. B.; Ferreira, M. De A. (2005), *A industrialização na construção e o estudo de uma rede de empresas em obra de pré-fabricados em concreto armado*. SIMPEP. v. 12.
- Poole, T.; Harrington, P. J. (1996), *An Evaluation of the Maturity Method (ASTM C 1074) for Use in Mass Concrete*. Technical Report SL-96-16.
- Tikalsky, P. E.; Tepke, D.; Camisa, S. (2003), *Maturity Method Demonstration Final Report*. p. 61.
- Topçu, İ. B.; Karakurt, C.; Altun, F. (2007), *Using the Maturity Method in Concrete Produced*. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 19, n. NO.7, p. 569–575.
- YIKICI, Tahsin Alper; CHEN, Hung-Liang (Roger) (2015), *Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete*. Construction and Building Materials, v. 95, p. 802-812.