

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

JEAN LUCAS BAUM

APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE EM PAREDES DE CONCRETO

SÃO LEOPOLDO

2018

Jean Lucas Baum

APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE EM PAREDES DE CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil, pelo Curso de Exatas da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientadora: Prof^a. Ms. Fernanda Pacheco

São Leopoldo
2018

AGRADECIMENTOS

À equipe do itt Performance e do Laboratório de Materiais de Construção - Unisinos, por toda a ajuda e apoio necessários para a realização dos ensaios, tendo recebido a proposta de bom grado e me atendido em horários importunos. Agradeço à equipe do Laboratório de Química pela total atenção, pelo espaço cedido e pelos incontáveis empréstimos de jalecos.

Também fica meu agradecimento especial à professora Fernanda Pacheco, pela dedicação e parceria durante a orientação, pelas diversas discussões e indicações cruciais para que este trabalho pudesse chegar à sua conclusão. Ao Roberto Curra por sua paciência e dedicação durante os ensaios de campo, contribuindo de maneira imensurável para o estudo mesmo quando o que menos tínhamos em mãos era tempo disponível. Agradeço à Aline Viana pelo ajuda e compreensão, pelas amostras cedidas e e-mails corridos.

Aos meus amigos por todas as boas experiências e por todas as lembranças e por todos os momentos compartilhados.

À toda minha família, pelo alicerce que desde o princípio me deu condições de chegar até aqui. Ao Leandro e à Vivian pela fibra moral, à Raquel e ao Lisandro por ter sempre um pouso seguro nestas idas e vindas, à Luciane e ao Rafael por darem mais do que se pode pedir, aos avós Sadi e Nair que sempre estenderam a mão além do alcance, aos avós Iloiva e Selvino (*in memoriam*) por ter um segundo lar e pela dedicação ímpar, à Ana Paula que foi meu leme e meu farol, ao meu pai Nadir, e à minha mãe Verônica que me ensinou que sempre é possível seguir em frente.

“E quando a tempestade tiver passado, mal te lembrarás de ter conseguido atravessá-la, de ter conseguido sobreviver. Nem sequer terás a certeza de a tormenta ter realmente chegado ao fim. Mas uma coisa é certa: Quando saíres da tempestade já não serás a mesma pessoa”
(Haruki Murakami)

RESUMO

Uma preocupação recorrente que decorre da aceleração dos processos construtivos recai sobre a integridade e a segurança estrutural das edificações, uma vez que os métodos habituais de controle se dão de forma paliativa através de ensaios destrutivos em laboratório. Tais ensaios muitas vezes não replicam as reais condições e de exposição as intempéries encontradas em obra. Em relação à presente necessidade de métodos alternativos de controle de produção na construção civil, a presente pesquisa apresenta a fundamentação da aplicação de um processo já conhecido, porém em pouco uso no país. O método em questão trata-se da estimativa da resistência nas idades iniciais do concreto em cimento Portland através do controle da sua temperatura *in situ*. Para tal, são feitas correlações entre as resistências ensaiadas em laboratório para determinado traço e sua referente energia de reação, monitorada através da leitura da temperatura, nas peças concretadas em canteiro de obras em tempo real. Tal procedimento é conhecido como método da maturidade e proporciona, de modo não destrutivo, o conhecimento da resistência de elementos de concreto, proporcionando informações cruciais para tomadas de decisões críticas quanto à retirada de escoramento, protensão e desforma, por exemplo. A sequência de análise, períodos de ensaio e parâmetros do estudo são balizados pela normatização *American Society for Testing and Materials – ASTM International* – através da norma ASTM C 1074-11 para a Estimativa da Resistência do Concreto através do Método da Maturidade (*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*). Este estudo avaliou a aplicação do método em sistema construtivo de paredes portantes de concreto armado, através do acompanhamento de ciclos de concretagem a fim de registrar o avanço da temperatura nas idades iniciais e avaliar sua aplicabilidade *in situ*. Através da aplicação da ASTM C 1074, paralelamente à medições utilizando instrumentação específica para medição de maturidade, foi possível gerar uma curva de correlação entre temperatura *versus* resistência estimada, criando uma ferramenta eficaz de controle de qualidade e segurança quando aliada aos métodos já utilizados habitualmente em canteiros de obra.

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

ABSTRACT

A recurring concern, arising from the acceleration of the constructive processes, lies in the integrity and structural safety of the buildings, since the usual methods of control occur in a palliative way through destructive laboratory tests. Such tests often do not replicate the actual conditions and exposure to the weather encountered on site. In relation to the present need for alternative methods of production control in civil construction, this research presents the basis of the application of a process already known, but in little use in the country. The method in question is the estimation of the resistance at the early ages of concrete in Portland cement by the control of its temperature *in situ*. For this, correlations are made between the resistances tested in laboratory for a given trace and their relative reaction energy, monitored by reading the temperature in the concrete cast in construction site, in real time. Such a procedure is known as the Maturity Method and, in a non-destructively test, provides an estimation of the strength of concrete elements, providing crucial information for decision making regarding the removal of shoring, forms and concrete protrusion, for example. The analysis sequence, test periods and study parameters are determined by the American Society for Testing and Materials (ASTM International) standard through ASTM C 1074-11 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. This study evaluated the application of the method in the constructive system of reinforced concrete support walls, by monitoring concreting cycles in order to record the temperature advance in the initial ages and to evaluate its applicability *in situ*. Through the application of ASTM C 1074, parallel to the measurements using specific instrumentation for measurement of maturity, it was possible to generate a correlation curve between temperature *versus* estimated resistance, creating a powerful tool of quality control and safety when combined with the methods already used in construction sites.

Key-words: Maturity method;. Non-destructive test; concrete walls.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantificação e qualificação de mão de obra em sistema tradicional	29
Tabela 2 – Quantificação e qualificação de mão de obra em sistema de fôrmas metálicas	29
Tabela 3 – Valores sugeridos para E_a em relação à TC.....	33
Tabela 4 – Energia de Ativação de Cimentos Nacionais.....	34
Tabela 5 - Limites de Ensaio característicos – Cimento CP V - ARI	42
Tabela 6 – Dados de peneiramento - AFN	43
Tabela 7 – Coeficiente de Inchamento - AFN.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 8 – Parâmetros Característicos de AIB	44
Tabela 9 – Dados de peneiramento – AIB	44
Tabela 10 – Dados de peneiramento – B00	45
Tabela 11 – Parâmetros de aditivos	46
Tabela 12 – Características físicas NeoFibra CR.....	47
Tabela 13 – Número de amostras por lotes de moldagens e condições de cura aplicadas	49
Tabela 14 – Resistência mecânica à compressão axial na Série 20C	58
Tabela 15 – Resistência mecânica de compressão axial na Série 0C	61
Tabela 16 – Resistencia mecânica à compressão axial na Série 40C	64
Tabela 17 – Comparativo entre resistência estimada e efetiva	72

LISTA DE SIGLAS

0C	Cura à 0° C
20C	Cura à 23° C
40C	Cura à 46° C
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
AFm	Mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado
AFN	Areia Fina Natural
AFt	Tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado
AIB	Areia Industrial de Britagem
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B00	Brita 00
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
E _a	Energia de Ativação
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NM	Norma Mercosur
SiNAT	Sistema Nacional de Avaliações Técnicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 TEMA	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	11
1.3 PROBLEMA	11
1.4 OBJETIVOS	13
1.4.1 Objetivo Geral	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
1.5 JUSTIFICATIVA	13
1.6 LIMITAÇÕES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	15
1.7 ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA DE PESQUISA	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	17
2.1.1 Mecanismos de controle da qualidade.....	19
2.1.3 Hidratação do Cimento Portland.....	20
2.2 PAREDES DE CONCRETO MOLDADAS IN LOCO	24
2.2.1 Metodologia Construtiva: Estrutura em Paredes de Concreto	27
2.2.1.1 Escoramento, formas e escoras remanescentes	29
2.3 MÉTODO DA MATURIDADE	30
2.3.1 Energia de Ativação	33
2.3.2 Influência da variação térmica na reação de hidratação do concreto	34
2.3.3 Abrangência do método em normas nacionais e internacionais.....	35
2.3.4 Aplicações do Método da Maturidade na construção civil	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.2 ETAPA 1 – ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	41
3.2.1 Caracterização dos materiais componentes.....	41
3.2.1.1 Cimento	41
3.2.1.2 Agregado Miúdo	42
3.2.1.3 Agregado Graúdo	45
3.2.1.4 Aditivos químicos	46
3.2.1.5 Fibras	46

3.3 ETAPA 2 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE.....	47
3.3.1 Monitoramento de Temperaturas.....	49
3.3.1.1 Monitoramento em Cura Controlada	49
3.3.1.2 Monitoramento <i>in situ</i>	53
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1 AMOSTRAS DE CONTROLE	57
4.1.1 Série 20C	57
4.1.1.1 Evolução da temperatura de reação.....	57
4.1.1.2 Evolução da resistência mecânica à compressão	58
4.1.2 Série 0C	60
4.1.2.1 Evolução da temperatura de reação.....	60
4.1.2.2 Evolução da resistência a compressão	61
4.1.3 Série 40C	63
4.1.2.1 Evolução da temperatura de reação.....	63
4.1.2.1 Evolução da resistência a compressão	64
4.2 CURVA DE CORRELAÇÃO TÉRMICA.....	66
4.2.1 Índice de Maturidade da composição de concreto	67
4.2.2 Relação de Idade Equivalente <i>Con Cure</i>	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas evidenciou-se um grande avanço no desenvolvimento de novos materiais aliados ao concreto, expandindo as alternativas construtivas para fins específicos, reduzindo custos e mitigando a degradação de recursos não-renováveis através da utilização de subprodutos de processos provenientes de diversos setores da indústria e da construção civil. (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 ao avanço da ciência do concreto, faz-se necessário o desenvolvimento de novas medidas de controle destes materiais, sendo em micro ou macro escala.

Com o recente crescimento na procura por moradias de baixo custo e rápido desenvolvimento, consagradas pelos recentes ajustes no programa do Governo Federal, o Minha Casa Minha Vida (ABCP, 2016), novas alternativas construtivas foram sendo desenvolvidas e adaptadas para que se mantenha uma crescente agilidade na concepção de projetos e no ciclo construtivo, viabilizando economicamente a modalidade de financiamento à baixo custo e desempenho aceitável.

Novas medidas de controle e gerenciamento fazem-se necessárias para que este ganho em rapidez na execução não acarrete em uma perda de qualidade e desempenho nas edificações, e a remoção antecipada de formas e escoramentos apresenta uma potencial redução de custo e tempo para a construção (BAGHERI-ZADEH *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).

Um método confiável no meio técnico 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 de 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; BURTSHELL; ALAOUI, 2016). Para análise do método, foram acompanhadas concretagens ao longo de quatro semanas, com instrumentação e utilização de software.

1.1 TEMA

Aplicação do método da maturidade como controle, nas horas iniciais pós concretagem e subsequente desforma, de paredes de concreto armado.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A abrangência do estudo limita-se à aplicação do método em estruturas multifamiliares, construídas através de formas metálicas e concreto superfluido. Os resultados obtidos durante a fase experimental do estudo são consequentes das condições locais incluindo, porém, não limitando, à umidade presente no ar durante a concretagem, a incidência de insolação e velocidade do vento da região de aplicação do ensaio.

Devido às características micro estruturais do concreto de cimento Portland, variação das propriedades específicas dos agregados utilizados e das proporções empregadas na composição do concreto, os resultados obtidos após ensaios laboratoriais são intrínsecos ao concreto a ser estudado, fornecidos pela usina de concreto que atende a obra estudada neste caso.

1.3 PROBLEMA

Na busca de competitividade no mercado construtivo a execução cíclica dos processos construtivos vem se tornando mais comum, aumentando a produtividade em busca de prazos mais curtos para as atividades, e em consequência aumentam os riscos da retirada prematura das formas e escoramentos provisórios (ARRIADA, 2007; CASTRO-GARRIDO *et al.*, 2016)

Ao contrário dos demais setores produtivos, a construção civil sempre se apresentou mais resistente às inovações, mantendo grande parte de seus processos dependentes do trabalho manual (FONSECA; LIMA, 2007). A combinação do ímpeto

ao avanço e o apego às metodologias tradicionais cria uma barreira ainda à ser vencida.

Conforme Massuda (2009), para tornar o sistema mais eficiente recomenda-se a utilização de concretos dosados em centrais e descarregado através de caminhões betoneira a fim de se garantir o melhor controle de agregados, desempenho e composição do concreto.

O controle em obra ocorre através da moldagem de corpos de prova de acordo com as normas NBR 5738 (ABNT, 2015), NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 12655 (ABNT, 2015). O objetivo deste ensaio é verificar a resistência das peças concretadas após o período de cura a fim de liberar, ou não, a desforma da estrutura.

Enquanto o ensaio é realizado e até a obtenção de um resultado favorável, sendo este a resistência mínima estabelecida pelo projeto estrutural, a produção é paralisada. Outro problema, apontado por Helene (2013) e Galobardes (2015), observado neste sistema de controle se dá pelas diferentes condições de cura que se encontram o concreto na estrutura e o concreto no molde metálico em laboratório, causando uma discrepância entre o resultado do ensaio laboratorial e o real desempenho do concreto inserido nas fôrmas.

Segundo Kosmatka *et al.*, (2011), quando a umidade relativa do concreto reduz a menos de 80% ou a sua temperatura se aproxima do congelamento, o ganho de resistência e a hidratação do cimento é virtualmente paralisada. Mesmo que estas condições dificilmente serão atingidas nas obras neste país, temperaturas muito baixas ocasionarão um atraso na reação e no ganho de resistência. Esta variação pode acarretar na perda de produção e potencialidade de acidentes, seja em estruturas de concreto convencionais, estruturas protendidas ou em paredes de concreto por não atingir a condição portante necessária.

Durante o procedimento de remoção de fôrmas e escoramentos é que se encontram os maiores riscos ao funcionário. É nesta situação que se apresenta maior susceptibilidade de acidentes quando a estrutura ainda não atinge condições mínimas de sustentar seu peso próprio (SALVADOR, 2013). Em virtude do ensaio padrão de resistência, adotado corriqueiramente como solução, não representar o concreto efetivo na estrutura, desvios entre o resultado esperado, obtido e real permeiam a incerteza do processo.

1.4 OBJETIVOS

Para este trabalho, foram delineados o objetivo geral e os objetivos específicos que seguem apresentados.

1.4.1 Objetivo Geral

Verificar a aplicabilidade do método da maturidade para o controle de pós-concretagem, em obras de paredes de concreto.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) estabelecer uma curva de correlação entre a temperatura de reação do concreto a ser estudado e sua respectiva resistência à compressão;
- b) registrar e monitorar a variação de temperatura do concreto em canteiro de obras e em amostras de controle em laboratório;
- c) verificar a viabilidade desta correlação e sua aplicabilidade em obras deste caráter.

1.5 JUSTIFICATIVA

O avanço atual na construção civil brasileira tende a seguir a linha de infraestrutura habitacional e desenvolvimento urbano através da ampliação de financiamentos, se tratando da nítida necessidade de avanço por intermédio do programa “Minha Casa, Minha Vida”, do Governo Federal (ABCP, 2016). Nas últimas pautas, se mostrou a necessidade da construção de 1,5 milhão de moradias por ano até 2022. Nesta modalidade, se faz necessária a edificação rápida e de retorno em ciclo curto para que haja interesse da participação privada, garantindo a saúde financeira das construtoras (CASTRO-GARRIDO *et al.*, 2016)

Em consequência à necessidade de avanço ágil, diversas preocupações quanto à integridade estrutural das edificações são levantadas devido ao foco na velocidade do processo construtivo. O principal fator a ser considerado na definição dos ciclos construtivos é a segurança estrutural nos estágios iniciais, onde o momento crítico é precisamente quando a edificação está sendo construída e onde os colapsos

estruturais são mais frequentes (AZKUNE, 2007; CARINO; LEW, 2001; KAMINETZKY *et al.*, 1994, ELDUKAIR *et al.*, 1991)

Com base na necessidade de garantir segurança ao método construtivo, verificou-se a existência de uma lacuna na verificação da resistência inicial do concreto em ciclos construtivos rápidos (CASTRO-GARRIDO *et al.*, 2016).

Conforme Benaicha *et al.*, (2016) a análise da resistência nas primeiras horas após a concretagem é de importância essencial na construção civil a fim de potencializar a produtividade, permitindo a remoção de fôrmas e escoramentos em tempo recorde e ainda respeitando as condições mínimas especificadas.

Esta informação permite determinar quando avançar em etapas construtivas, quando liberar o uso à estrutura, verificar se o concreto está hidratando de uma forma aceitável e se as obrigações contratuais e de projeto estão sendo atendidas (TIKALSKY; TEPKE; CAMISA, 2003).

Atualmente o método empregado corriqueiramente nas construções é através do ensaio de compressão axial simples em corpo de prova moldados no canteiro porém, conforme apresentado por Silva Filho e Heleno (2011), este método não representa com exatidão as condições do concreto lançados na estrutura devido à diversos fatores, tais como a variabilidade estatística do ensaio, condições de cura, moldagem e execução dos ensaios até a calibração dos equipamentos.

Outro ponto notório é a necessidade de colocar em espera todo o processo construtivo enquanto esta análise em laboratório é realizada, criando tempo ocioso e não produtivo em um meio onde cada vez mais se busca a eficiência das atividades. Segundo análise por Sota *et al.*, (2016) a utilização deste método de controle não-destrutivo permite avaliar todo o volume de concreto recebido em obra, diminuindo significativamente a quantidade de corpos de prova moldados para posterior análise.

Assim se busca, através do estudo do método da maturidade e da correlação entre resistência e temperatura de reação do concreto, analisar uma maneira de estimar a resistência do elemento construído com significativa margem de segurança e confiabilidade e que seja, além disso, de monitoramento em tempo real e com resultados instantâneos (WAWRZEŃCZYK; LECH, 2015).

1.6 LIMITAÇÕES DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fase experimental foi conduzida segundo a diretrizes propostas no capítulo 3, limitando-se às seguintes situações que podem levar à indução de erros na estimativa da resistência do concreto:

- 1) variação na produção do concreto, diminuindo sua resistência potencial;
- 2) temperaturas excessivas nas idades iniciais, reduzindo a limitação da resistência do concreto;
- 3) a cura inadequada, limitando a quantidade de água disponível para a reação;
- 4) os resultados específicos obtidos na pesquisa contemplam somente o concreto utilizado.

Devido às limitações implicadas, foi imprescindível que, além dos ensaios em laboratório, o acompanhamento da evolução da reação e as resistências obtidas em campo fossem realizadas para que pudesse ser feita uma análise das correlações entre os ensaios, a fim de avaliar sua efetividade.

Quanto às condições de cura empregadas para o desenvolvimento do estudo, apresentadas no capítulo 3 e expressas quanto à sua temperatura de exposição, somente a série analisada em condição Normal, em câmara úmida de cura em acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006), foi exposta em uma condição de umidade ótima. As demais séries de análise contaram apenas com o controle de temperatura.

1.7 ESTRUTURAÇÃO DO PROGRAMA DE PESQUISA

O Capítulo 1 apresenta os parâmetros iniciais do trabalho de pesquisa, seus condicionantes, objetivos e limitações de forma a introduzir a leitura. No Capítulo 2 serão apresentados os conceitos relacionados ao método estudado. Este capítulo abordará o concreto de cimento Portland e o uso de aditivos superplastificantes, a aplicação do método construtivo em paredes de concreto moldadas *in situ* e o método da maturidade segundo seus conceitos teóricos e aplicações recentes na engenharia civil. No Capítulo 3 será apresentada a estrutura do programa de pesquisa, os métodos aplicados e as condições dos ensaios. No Capítulo 4 serão apresentados os resultados alcançados no estudo aplicado do método da maturidade, através da caracterização dos ensaios e da curva de maturidade do concreto analisado. Também

serão apresentadas as leituras coletadas na estrutura *in situ* para aplicar o método da maturidade de modo a estimar as resistências do concreto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado o embasamento teórico para o desenvolvimento do tema, abrangendo pesquisas relacionadas ao programa experimental do estudo e bibliografia pertinente aos assuntos tangidos nas análises e validações dos resultados.

2.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Escopo deste estudo, o concreto de cimento Portland já é vastamente estudado por se tratar de um insumo de fácil obtenção, seja dosado em canteiro de obra ou obtido em centrais dosadoras de concreto. Segundo Helene (2010), o concreto em si é composto pela pasta de cimento, obtida pela mistura do Cimento Portland e água, conferindo uma fluidez relativa à quantidade de água na mistura que, quando adicionada aos agregados aglomerantes, forma o concreto em seu estado fresco e passível de ser moldado em formas até sua cristalização e endurecimento completo. Já o concreto moderno, é obtido com a mistura dos já citados aglomerantes junto à pasta de cimento. Esta pasta possui sua viscosidade relativa à sua relação entre quantidade de cimento utilizada e a água na mistura, a relação água/cimento. Além de sua fluidez, essa relação impacta diretamente na resistência final do concreto em uma correlação inversamente proporcional ao aumento da trabalhabilidade da pasta de cimento.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), alguns dos parâmetros essenciais para a que se atinja um desempenho elevado a partir de uma mistura se encontram na qualidade da interface na zona de transição, influenciada pela relação água/aglomerante, a distribuição granulométrica ideal, o grau de compactação da mistura, tempo de cura, e a porosidade da matriz de concreto, definida pelo grau de hidratação, ar aprisionado e incorporado e também pela relação água/cimento.

Por ser um material difundido no mundo inteiro, diversas variações em sua composição como elemento são encontradas no mercado, podendo ser produzido a fim de atender as mais diversas necessidades construtivas, desde concretos auto adensáveis, concretos de alta resistência inicial, concretos de alto desempenho, concretos celulares, concreto rolado, concreto pesado de blindagem a radiação,

concretos regenerativos, concretos permeáveis, concretos resistentes à sulfatos para ambientes agressivos, entre inúmeros outros.

Em publicações ao longo dos anos fica clara a relação entre a proporção água/cimento e a resistência à compressão efetiva do concreto. De acordo com Adams (1918), sua associação à durabilidade do concreto foi concebida experimentalmente por René Féret no século XIX e estabelecida por Duff Andrew Abrams, no ano de 1918, através da denominada Lei de Abrams, em utilização até os dias atuais para estimar a resistência e durabilidade dos concretos (*apud* HELENE; ANDRADE, 2010).

Powers (1966) apresentou a parametrização entre a resistência do concreto e sua relação com a hidratação do cimento e excesso de água na mistura, através do modelo físico apresentado na Equação 1.

$$f_c = k \left[\frac{0,68\alpha}{0,32\alpha + a/c} \right]^n \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- f_c : resistência à compressão numa certa idade, em Mpa
- k : constante que depende dos materiais utilizados
- n : constante que depende dos materiais utilizados
- a/c : relação água/cimento ou água/aglomerantes, em massa
- α : grau de hidratação do cimento em porcentagem

Através deste modelo entende-se que a proporção de dosagem baliza a matriz do concreto através da hidratação da pasta de cimento. Sendo assim, toda a água excedente ao processo de hidratação fica aprisionada na mistura em forma de poros. Estes poros, por serem vazios em uma estrutura sólida, permitem a penetração de ativos agressivos ao concreto, reduzem a resistência à compressão, o enfraquecimento na zona de transição e o aparecimento de fissuras força de tração interna devido à retração autógena, entre outras adversidades (AÏTCIN, 2016; HELENE; ANDRADE, 2010; NEVILLE, 1997; WALLER *et al.*, 2004).

Esta imposição, criada pela restrição entre a quantidade de água utilizada na mistura e a resistência obtida no concreto, dificultou o avanço na utilização do material devido à adversidade de aplicação em estruturas um concreto com baixa trabalhabilidade, limitando o uso nas construções aos concretos de baixo desempenho e durabilidade.

O uso de aditivos químicos superplastificantes impele ao concreto uma forma de melhorar sua trabalhabilidade e aumentar sua resistência com a diminuição da água de mistura em até 40% (BÜYÜKYAĞCI; *et al.*, 2009). A atuação do aditivo superplastificante recorre através da absorção de minerais e hidratos na superfície do cimento, a dispersão dos grãos do cimento através de repulsão eletrostática e o efeito de resistência estérica e a redução da tensão superficial da água (GOŁASZEWSKI, 2012).

2.1.1 Mecanismos de controle da qualidade

Todas as estruturas de concreto, apesar do estudo empregado no desenvolvimento do concreto, no projeto estrutural e nos cuidados direcionados à execução, possuem variações em suas características próprias em relação ao que foi especificada em sua concepção. Estas diferenças recaem pela variação nas resistências características dos materiais utilizados (concreto e aço), nas dimensões das fôrmas que não são exatamente as especificadas, nos “ninhos de concretagem” ocasionados pela disparidade no tamanho de agregados, mistura insuficiente ou vibração incompleta do concreto, deslocamentos da armação durante a execução, histórico de carregamento da estrutura discordante do considerado em projeto e cura insuficiente, entre infindas outras situações que lesam diretamente o desempenho do concreto (PACHECO; HELENE, 2013).

Para que haja uma comprovação que a estrutura concebida em obra tenha atendido as premissas projetadas, medidas de controle são necessárias em prol da segurança e estabilidade estrutural. O controle mais usual se dá através da análise estatística da resistência à compressão do concreto (PACHECO; HELENE, 2013).

Os controles usuais são balizado pelas normas NBR 12655 (ABNT, 2015) que estrutura os padrões de controle, recebimento e aceitação do concreto para fins estruturais, a NBR 67 (ABNT, 1998) que define o padrão de ensaio para determinação da fluidez do concreto fresco através da análise de abatimento, tanto em laboratório como em obra, pela NBR 5738 (ABNT, 2015) a qual conduz o procedimento para moldagem e cura de amostras para ensaio de concreto e pela NBR 5739 (ABNT, 2018) que conota o método de ensaio à compressão axial para determinação de resistência do concreto em seu estado endurecido, método destrutivo de ensaio.

Outros modelos de ensaios para determinação da resistência do concreto, com aplicações não-destrutivas, que podem ser adotadas posteriormente à execução, tais como a análise da resistência superficial com esclerometria, através da NBR 7584 (ABNT, 2012), ensaios de arrancamento e resistência à penetração, método de frequência e ressonância e o ensaio de propagação de onda ultrassônica, preconizado na NBR 8802 (ABNT, 2013). Por fim, de maneira empírica e aplicado simultaneamente ao processo executivo da estrutura analisada, existe o método da maturidade, ainda sem normatização em âmbito nacional. Para este estudo será empregado o modelo proposto pela norma americana ASTM C 1074 (ASTM, 2011).

2.1.3 Hidratação do Cimento Portland

A hidratação do cimento é um dos tópicos mais estudados na ciência do concreto devido à sua massiva influência nos parâmetros dos sistemas cimentícios, desde o ganho de resistência até a sua variação volumétrica nas idades iniciais, afetando diretamente a indústria da construção (ZAKOUTSKY; TYDLITAT; CERNY, 2012).

O processo de hidratação progressiva do cimento é necessário para que ocorra o endurecimento do concreto, e tal reação depende de certos fatores para que seja definida. Helene e Andrade (2010) expressam que o grau de hidratação varia conforme a composição e finura do cimento, a relação água/aglomerante da pasta, a presença de aditivos químicos na mistura e condições de cura e sazonalidade do concreto. Por tanto, entende-se que existe uma medida mínima necessária para que o concreto reaja em seu potencial desempenho mecânico.

Por outro lado, o excesso de água na mistura além do necessário para a hidratação reduz o desempenho do concreto. Sua influência é observada, segundo Helene e Andrade (2010), através do seu comportamento durante a reação exotérmica. Dos elementos presentes na matriz cimentícia – a pasta de cimento e os agregados -, a pasta apresenta certa instabilidade durante o processo de hidratação devido à sua expansão, na fase umedecida, e retração, após sua secagem.

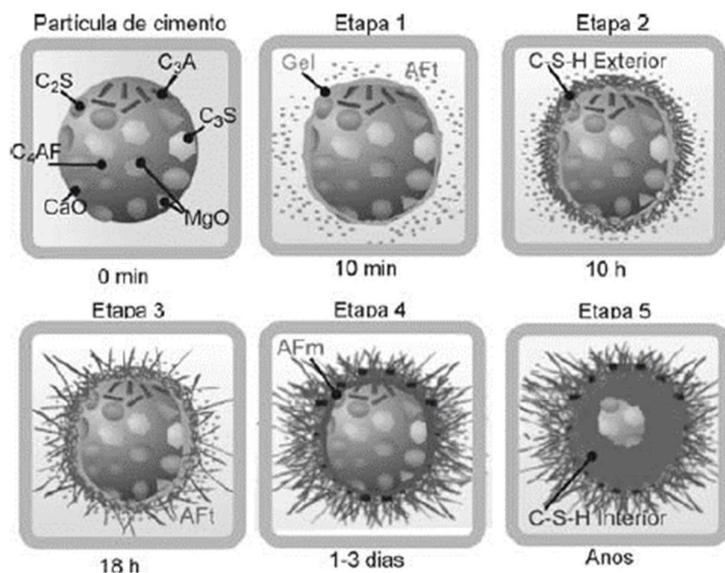
Isso se deve pelo fato de que, em termos gerais, quase todas as reações químicas geram calor. A reação físico-química da hidratação do cimento, que ocorre na pasta de qualquer material cimentício, libera calor no processo e pode ser quantificada de tal maneira (PANE; HANSEN, 2005; WU; FALL; CAI, 2013).

O processo de hidratação do cimento Portland se dá através de uma sequência de etapas, expostas abaixo:

- 1) inicia-se com a reação do aluminato tricálcico (C_3A) e o gesso ($C\ S$), formando cristais curtos de tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt) e o silicato tricálcico (C_3S). Forma-se um gel de estrutura amorfa de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que se deposita na superfície da partícula e hidróxido de cálcio (CH), o qual precipita-se nos espaços entre as partículas de cimento;
- 2) a reação da água com os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) é mantida, formando a camada adicional de C-S-H em torno da partícula a uma distância aproximada de $1\ \mu m$, conhecida por C-S-H exterior (Hadley *et al.*, 2000);
- 3) inicia-se a reação de hidratação secundária dos aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF), formando-se compostos lamelares longos de tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt). O C-S-H, que começa a se formar nesta etapa, designa-se por *interior* uma vez que, devido à mobilidade progressivamente mais lenta da reação, se deposita ao interior da camada hidratada, formada nas etapas anteriores;
- 4) a hidratação prossegue em ritmo descendente, correspondendo a proximidade do estado sólido. Continua a formação do *C-S-H interior*, com a redução progressiva do espaço livre entre a camada de hidratação e a partícula não hidratada, com a aparição do mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm);
- 5) ao longo dos anos a reação de hidratação continua progredindo, de forma lenta, onde essencialmente forma-se o *C-S-H interior* adicional.

Estas etapas são apresentadas de acordo com a Figura 1, onde se acompanha a progressão da hidratação do particulado de cimento ao longo do tempo de cura.

Figura 1 – Etapas de hidratação da partícula de cimento Portland

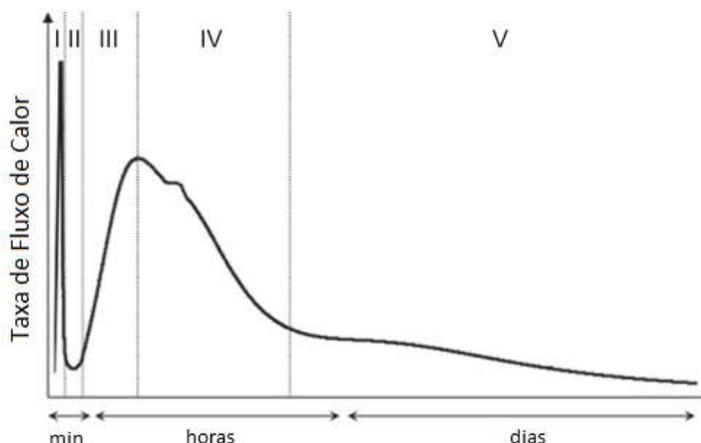


Fonte: Costa *et al.* (2009)

Conforme percebe-se na Figura 2, o processo inicia-se em períodos curtos, porém sua conclusão pode levar anos. Em cimentos de baixo calor de hidratação, tal como o CP III – F, a reação exotérmica é observada em menor magnitude, em vista que os cimentos de alta resistência inicial, como o CP V – ARI, a geração de calor é muito maior. Para tanto, o calor gerado no processo de hidratação de um cimento aproxima-se de uma função aditiva dos valores gerados na hidratação dos compostos individuais do cimento (CARVALHO, 2002).

A liberação de calor no processo de hidratação do cimento Portland, e suas quatro principais fases (C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF), não são simultâneas e ocorrem em cadeia. A Figura 2 apresenta sua evolução de reação *versus* o calor produzido no processo.

Figura 2 – Evolução da temperatura na hidratação do cimento Portland

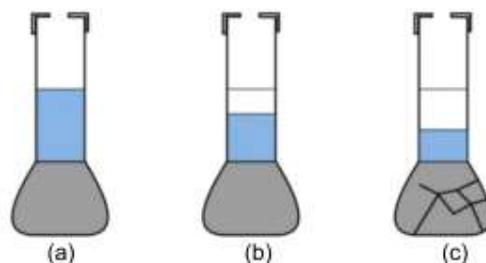


Fonte: Marchon, Flatt (2016); traduzido e adaptado pelo autor

Na Etapa I verifica-se um pico de liberação de calor devido à dissolução iônica e hidratação inicial de C_3S e C_3A , seguido por um período “dormente” na etapa II, onde a atividade química é reduzida. Nas etapas III e IV a hidratação de C_3S e C_3A é retomada com crescente reação térmica. Na etapa IV ocorre o esgotamento dos sulfatos, encadeando uma massiva hidratação de C_3A e decréscimo na taxa de fluxo de calor. Na fase V ocorre essencialmente a hidratação de C_2S e C_4AF , e o pequeno arco compreende a conversão de AFt à AFm (AÏTCIN, 2016).

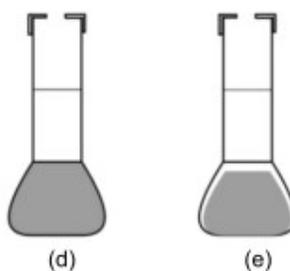
Em função desta variação de temperaturas no processo reativo do cimento, Le Chatelier realizou um ensaio simples, em 1904, onde preencheu dois frascos com a mesma pasta de cimento. Em um dos frascos, apresentado na Figura 3, foi preenchido de água até uma demarcação (a) e fechado com uma rolha para evitar que houvesse a evaporação do fluido. Foi observado, ao passar dos dias, que a água presente no frasco foi sendo gradativamente consumida (b), e o recipiente de vidro apresentava fissuras em sua base (c). O segundo frasco, mostrado na Figura 4, foi deixado aberto e curado a seco (d). Observou-se que a pasta endurecida não ocupava totalmente o volume do frasco (e) (AÏTCIN, 2016).

Figura 3 – Experimento de Le Chatelier – cura submersa



Fonte: Aïtcin, 2016

Figura 4 – Experimento de Le Chatelier – cura ao ar



Fonte: Aïtcin, 2016

Através deste ensaio concluiu-se que o cimento hidratado, na forma de pasta ou do concreto, não é um material estável do ponto de vista volumétrico. Em condição de cura úmida o material se expande, e em cura seca ele se retrai. No entanto, durante o processo de hidratação do cimento – indiferente de sua condição de cura – o *volume absoluto* da pasta cimentícia apresenta uma redução de 8%. Esta contração no volume absoluto do concreto é conhecida como contração química, ou *Contração de Le Chatelier* na França (AÏTCIN, 2016).

2.2 PAREDES DE CONCRETO MOLDADAS IN LOCO

São estruturas moldadas em concreto, através do uso de formas removíveis, onde seu ciclo construtivo contempla a concretagem do pavimento em uma única etapa. O método considera a execução da laje simultaneamente à concretagem das paredes, tornando o sistema monolítico conforme considerações apresentadas na NBR 16055 (ABNT, 2012).

Com a utilização de concreto leve, a estrutura contempla edificações unifamiliares térreas, sobrados unifamiliares ou edifícios com térreo e mais um pavimento. Quando da utilização de concreto reforçado com fibra de vidro (CRFV) o limite estrutural passa a de cinco pavimentos, conforme preconiza a NBR 16055 (ABNT, 2012) e a Diretriz SiNAT nº 001 (Ministério das Cidades, 2017). O procedimento se aplica às condições normais do concreto apresentadas na NBR 6118 (ABNT, 2014).

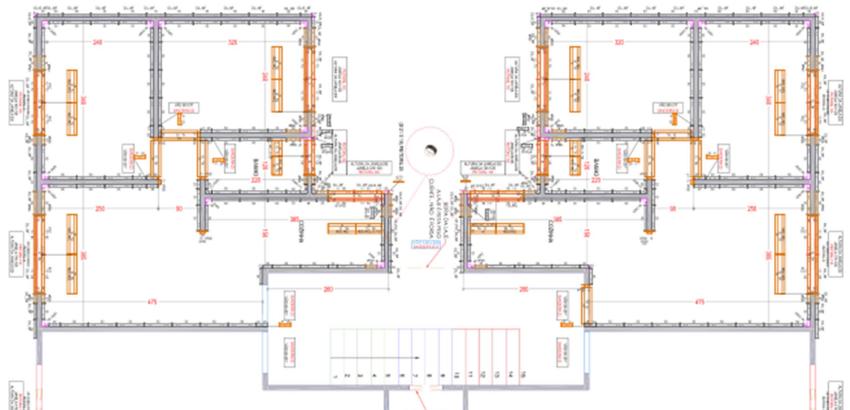
Segundo a Coletânea de Ativos de Parede de Concreto (ABCP, 2008), as categorias de fôrmas mais utilizadas são:

- a) Fôrmas Metálicas: painéis ou chapas inteiramente metálicas, tanto em seus suportes e reforços, superfícies de contato e acessórios;
- b) Fôrmas Mistas de Madeira e Metal: Chapas de madeira, ou outro material sintético, para as superfícies de contato com painéis reforçados em metal;
- c) Fôrmas Plásticas: Painéis e chapas de plástico reciclável para a superfície de contato e acabamento, com reforços e contravento em estruturas metálicas.
- d) Fôrmas Trepantes: geralmente em estrutura metálica, esta categoria de fôrmas apresenta uma alta produtividade devido ao grande tamanho dos painéis empregados. Esta modulação não é desmontada, e seu posicionamento é realizado com guias e o ganho efetivo no rendimento se dá através da eliminação do processo de montagem.

Sua utilização vem se tornando amplamente difundida devido às diversas alternativas de aplicação, podendo ser constituída através de fôrmas metálicas, de PVC, madeira ou formas compostas, empregando dois ou mais materiais em sua composição. Exemplo de projeto e montagem das formas pode ser conferido na Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

Segundo Baruki e Freitas (2017), a principal vantagem deste sistema refere-se à agilidade a qual se habilita a execução dos serviços de acabamento, através da concretagem da estrutura como uma única peça, evitando custos indiretos devido à exposição ao tempo e permitindo a antecipação do cronograma da obra consideravelmente.

Figura 5 – Projeto de locação de formas



Fonte: FORSA (2017)

Figura 6 – Montagem de formas metálicas



Fonte: FORSA (2017)

Apesar do alto custo associado à implantação deste sistema, o ciclo de repetição e a rapidez na entrega dos empreendimentos viabilizam economicamente o método, aliado à um desempenho amplamente satisfatório no desempenho da estrutura (NEMER, 2016).

O procedimento do cálculo estrutural pode ser aproximado ao utilizado em alvenaria estrutural, sendo o que difere nos dois sistemas é o próprio material constituinte – concreto *versus* blocos estruturais – onde ambos os modelos estruturais consideram as paredes não só como vedações, e sim como elemento portante e com função fundamental para a edificação (BARUKI; FREITAS, 2017)

2.2.1 Metodologia Construtiva: Estrutura em Paredes de Concreto

Uma estrutura de concreto armado constitui-se, corriqueiramente, pelo sistema de vigas, pilares e lajes. O sistema estrutural é concebido por partes, com a finalidade de transmitir as cargas solicitantes gradualmente durante o processo de construção e é conhecido como o método convencional de edificação (BARUKI; FREITAS, 2017). Em contrapartida, o sistema de estruturas em paredes de concreto consiste em um elemento formado unicamente por paredes e lajes em concreto armado. Com sua moldagem em fôrmas, este método visa acelerar o processo de construção de maneira econômica e prática (CASTRO-GARRIDO *et al.*, 2016).

Este modelo estrutural conduz o concreto como seu principal componente. Diferentemente dos sistemas tradicionais, onde existe uma combinação quase igualitária entre o aço e o concreto, a seção de concreto na estrutura possui uma representatividade superior ao aço, de tal maneira que usualmente a armação se dá através do uso de telas eletrosoldadas ao invés de barras e vergalhões, mesmo que a armação em uma estrutura de concreto seja sempre necessária – tanto para resistir efeitos de tração ou garantir ductilidade à estrutura (BARUKI; FREITAS, 2017).

Por se tratar de um método racionalizado, este sistema é uma alternativa frente ao déficit habitacional o qual oferece um ganho em produtividade, qualidade e economia em grande escala (MASSUDA; MISURELLI, 2009). Devido ao sistema estrutural empregado, as paredes moldadas *in loco* agem como o principal elemento portante da estrutura em cargas verticais (CHING; ONOUYE; ZUBERBUHLER, 2015).

Segundo Massuda (2009), a moldagem *in situ* dos elementos estruturais permite que todas as peças – paredes e lajes – sejam concretadas em uma única etapa, contemplando todos os sistemas elétricos e hidráulicos embutidos, vão de portas e janelas e demais elementos de fixação, em acordo com a Diretriz SiNAT nº 001 (Ministério das Cidades, 2017) conferindo ainda mais agilidade ao processo construtivo em frente aos sistemas usuais de instalações prediais.

Inversamente ao sistema tradicional de construção, que exige uma gama de profissionais de diferentes qualificações, o sistema de paredes de concreto com fôrmas metálicas permite uma operacionalização com mão-de-obra de baixa especialização. Em virtude da natureza construtiva baseada em repetição, industrialização dos materiais e acessórios utilizados e a baixa incidência de retrabalhos necessários, a quantidade de profissionais capacitados se reduz quando

comparado ao sistema convencional (ORIBE ALVA, 2015). A Tabela 1 – Quantificação e qualificação de mão de obra em sistema tradicional deduz esta relação de pessoal necessário, comparando com a Tabela 2 – Quantificação e qualificação de mão de obra em sistema de fôrmas metálicas.

Tabela 1 – Quantificação e qualificação de mão de obra em sistema tradicional

SISTEMA TRADICIONAL			
MÃO DE OBRA	CAPACITAÇÃO		
	ALTA	MÉDIA	BAIXA
Mão de Obra Qualificada	X		
Necessidade de Treinamento	X		
Número de Pessoas Necessárias		X	

Fonte: ORIBE ALVA (2015), traduzido e adaptado pelo autor

Tabela 2 – Quantificação e qualificação de mão de obra em sistema de fôrmas metálicas

FÔRMAS METÁLICAS			
MÃO DE OBRA	CAPACITAÇÃO		
	ALTA	MÉDIA	BAIXA
Mão de Obra Qualificada			X
Necessidade de Treinamento			X
Número de Pessoas Necessárias		X	

Fonte: ORIBE ALVA (2015), traduzido e adaptado pelo autor

2.2.1.1 Escoramento, formas e escoras remanescentes

De acordo com o exposto na NBR 14931 (ABNT, 2004), as fôrmas e escoramentos constituem no sistema portante do concreto ainda fresco, conferindo sua geometria desejada e não podem afetar o desempenho e a aparência de estruturas permanentes.

Segundo Salvador (2013), um hábito comum na construção de pavimentos subsequentes é a remoção sequencial de escoramentos para sua reutilização em concretagens mais recentes, acelerando o processo.

Durante o processo de cura, as formas devem ser mantidas o tempo necessário até que o concreto tenha a força suficiente para que consiga se sustentar e sustentar quaisquer outras cargas possíveis durante o processo construtivo (KOSMATKA; WILSON, 2011). Segundo Barros (2006), as fôrmas provisórias são estruturas por conceito, e devem ser tratadas de tal maneira.

A remoção sequencial do escoramento causa o aparecimento de novas solicitações na estrutura referentes ao peso próprio do pavimento e o peso próprio dos demais pavimentos escorados sobre esta estrutura, o que implica em maiores deformações e maior susceptibilidade ao aparecimento de fissuras quando o ciclo

construtivo é acelerado (SALVADOR, 2013). Em contrapartida ao sistema de construção convencional, cuja desforma e retirada de escoramento ocorre usualmente aos 12 e 28 dias, respectivamente, as edificações em paredes de concreto moldadas em campo antecipam esta atividade para apenas 12 horas após a concretagem (CASTRO-GARRIDO *et al.*, 2016).

2.3 MÉTODO DA MATURIDADE

Segundo os estudos de cura térmica desenvolvidos por Nurse (1949), McIntosh (1949) e Saul (1951), o conceito de Maturidade do concreto foi estabelecido para se avaliar os efeitos de tempo *versus* temperatura sobre a resistência de concreto em condições específicas de cura.

Saul (1951), através da lei do ganho de resistência com maturidade, afirma que uma mesma mistura de concreto com a mesma maturidade tem a mesma resistência em qualquer condição de cura. De acordo com Galobardes *et al.*, (2015), a equação de Nurse-Saul, representada conforme a Equação 2, é frequentemente utilizada para a avaliação do índice de maturidade de uma amostra.

$$M_{(t)} = \sum_0^t T - T_0 \cdot \Delta t \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$M_{(t)}$ = fator de Maturidade em relativo tempo t , expresso em $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$

Δt = intervalo de tempo, expresso em horas

T = média de temperatura em determinado intervalo de tempo Δt , em $^{\circ}\text{C}$

T_0 = temperatura base, expressa em $^{\circ}\text{C}$

Plowman (1956) propôs uma equação relacionando maturidade e resistência baseado em cura à temperatura constante. Na Equação 3 o fator de Maturidade pode ser relacionado à resistência à compressão S atingida aos 28 dias de cura através da equação logarítmica de Plowman (GALOBARDES *et al.*, 2015).

$$S = a + b \cdot \log(M) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

S = Resistência à compressão à idade t_e ;

t_e = idade equivalente;

a = resistência para o índice de maturidade $M = 1$;

b = inclinação da linha;
M = índice de maturidade.

A equação é apresentada e utilizada em diversos estudos (CARINO, 2001; GALOBARDES *et al.*, 2015; SOFI *et al.*, 2012; SOUTSOS *et al.*, 2016) de forma a estimar a resistência de concretos convencionais em uma projeção aos 28 dias de cura.

Freiesleben Hansen e Pedersen (1977) propuseram a Equação 4 baseando-se na teoria da Energia de Ativação (E_a) e idade equivalente através da Equação de Arrhenius.

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left[\frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_r} \right]} \Delta t \quad \text{Equação 4}$$

onde:

t_e = idade equivalente na temperatura de cura referência;
T = temperatura média do concreto no intervalo de tempo Δt , expresso em °C;
 T_r = temperatura referência, expressa em °C;
E = energia de ativação; expressa em J/mol;
R = constante universal dos gases, 8,3145 J/(mol·K).

Carino (1983) propôs uma nova equação apresentando um modelo de três parâmetros para o ganho relativo de resistência *versus* maturidade do concreto, conforme a equação que segue:

$$\frac{S}{S_u} = \frac{(M - M_0)}{\frac{1}{A} + (M - M_0)} \quad \text{Equação 5}$$

onde:

S_u = limitação da resistência quando a maturidade se aproxima ao infinito
 M_0 = valor da maturidade quando ganho rápido de resistência inicia
A = inclinação inicial da curva de resistência *versus* maturidade

Weaver e Sadgrove (1984) propuseram ainda outra equação (Equação 6), usando o conceito da idade equivalente, para a criação de um manual de remoção de fôrmas em variadas condições de temperatura.

$$t_e = \frac{\sum (T + 16)^2}{1296} \Delta t \quad \text{Equação 6}$$

onde:

t_e = idade equivalente na temperatura de cura referência;

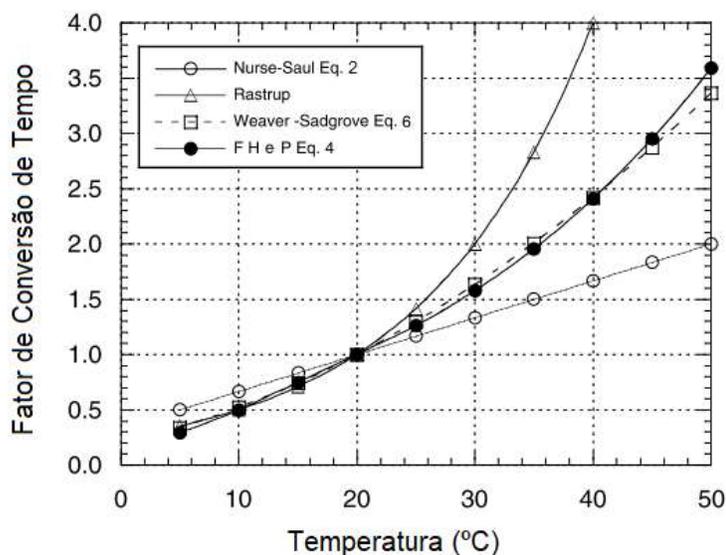
T = temperatura média do concreto no intervalo de tempo Δt , expresso em $^{\circ}\text{C}$;

O método então estipulado, refere-se à uma técnica que visa correlacionar os efeitos combinados de tempo e temperatura no desenvolvimento da resistência do concreto, provendo uma simples e confiável estimativa da resistência de modo não-destrutivo diretamente na estrutura (CARINO; LEW, 2001).

Em aplicações práticas, deve-se levar em conta que as condições de temperatura podem diferir. Conforme a massa de concreto aumenta, devido a diferença de temperatura verificada nas superfícies e no centro da estrutura, a variação térmica da peça em si tende a aumentar (YIKICI; CHEN, 2015).

Comparando os diversos métodos de aplicação da maturidade e em múltiplos casos de aplicação diferentes, conforme Gráfico 1 observa-se que a equação de Arrhenius-FHP obteve melhores resultados para se estimar os efeitos de ganho de resistência em fator à temperatura da reação (BENAICHA *et al.*, 2016; CARINO *et al.*, 2001; JIN *et al.*, 2017; PERES *et al.*, 2005; TIKALSKY *et al.*, 2003; WALLER *et al.*, 2004; YIKICI *et al.*, 2015).

Gráfico 1 – Comparação de resultados entre Nurse-Saul, Weaver e FH e P



Fonte: Carino (2004), adaptado e traduzido pelo autor

2.3.1 Energia de Ativação

O termo energia de ativação trata-se do conceito formulado por Arrhenius o qual necessita de um determinado índice de temperatura que, adicionado ao sistema, inicie a reação potencial. Segundo Peres et al. (2005), no processo de hidratação do cimento os reagentes dispostos encontram-se em um nível superior de energia, e a Energia de Ativação (E_a) trata-se da diferença entre estes níveis disponíveis e níveis necessários.

Segundo Carino (2004), a equação proposta por Freiesleben, Hansen e Pedersen sugere que, na temperatura do concreto (TC), os níveis aparentes de energia para a ativação da reação estão em um intervalo de -10°C e 80°C , conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores sugeridos para E_a em relação à TC

Temperatura TC ($^{\circ}\text{C}$)	$E(\text{TC})$ (kJ/mol)
≥ 20	33,
< 20	$33,5 + 1,47 (20 - T_c)$

Fonte: L. Peres; M. Barbosa; R. Pinto (2005)

A curva resultante do fator tempo *versus* temperatura absoluta é condicional direta do valor de energia E_a proposto por Freiesleben, Hansen e Pedersen (MALHOTRA; CARINO, 2004)

Apesar de existir um longo debate quanto à efetividade do parâmetro da E_a de representar adequadamente a maturidade e hidratação do cimento, a equação para determinar a idade relativa continua sendo amplamente utilizada em modelagens de propriedades físico-mecânicas e na construção civil (WAWRZEŃCZYK; LECH, 2015).

Comparando os múltiplos métodos de aplicação da maturidade e em diversos casos de aplicação diferentes observa-se que a equação de Arrhenius-FHP obteve melhores resultados para se estimar os efeitos de ganho de resistência em fator à temperatura da reação (BENAICHA; BURTSHELL; ALAOU, 2016; MALHOTRA; CARINO, N. J., 2004).

O procedimento para se determinar a E_a do cimento em um determinado concreto é descrito na ASTM C 1074-11. Em um âmbito de pesquisa mais amplo, foi realizado um estudo por Peres *et al.*, (2003) o qual buscou quantificar a energia de

ativação nos cimentos nacionais. Os resultados obtidos em sua análise são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Energia de Ativação de Cimentos Nacionais

Cimento	E _a (kJ/mol)
CP-I-S	35,4
CP-II-F-32	31,4
CP-II-Z-32	31,3
CP-III	57,0
CP-IV	50,4
CP-V	43,9

Fonte: Peres *et al.* (2003)

2.3.2 Influência da variação térmica na reação de hidratação do concreto

Grande parte dos estudos em concreto são realizados em temperaturas controladas, em laboratório, em condições totalmente diferentes às encontradas quando de sua execução em obra (BURG, 1996). Tal qual exposto por Kosmatka e Wilson (2011), a temperatura do ambiente afeta diretamente na reação de hidratação do cimento, retardando seu ganho de resistência quando em baixas temperaturas. Além disso, Kim *et al.* (2002) afirma que a variação na temperatura, causada pelo aquecimento na reação em relação ao ambiente externo, possui grande influência nas propriedades mecânicas do concreto em idades iniciais.

Segundo Furnas (1997), a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura em um grau é chamada de capacidade térmica e, em concretos comuns, esta grandeza varia de 840 à 1260 J/(kg·K). Tal grandeza correlaciona-se com variação de volume e tamanho de acordo com seu gradiente térmico, e também é diretamente influenciado pelo tipo de agregado na mistura.

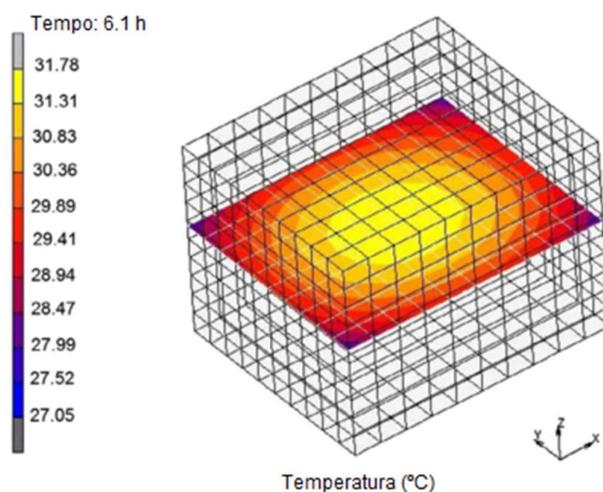
O calor gerado pela hidratação da pasta de cimento pode, em condições de baixa temperatura, ser benéfico ao concreto em longo prazo, porém em altas temperaturas este calor agregado oferece danos ao concreto, principalmente quando em grandes volumes (BOFANG, 2013).

Como é de se esperar, a temperatura da reação é relativa ao volume da pasta de cimento disponível a se hidratar, conseqüentemente a distribuição da temperatura difere consideravelmente quanto maior for a peça concretada. Este conceito é

conhecido como condutividade térmica ou fluxo térmico, o que pode ser definido como a quantidade de calor que flui através de um material (SCHACKOW *et al.*, 2016).

Tal efeito impacta nas condições de cura em cada uma das seções de grandes massas de concreto, conforme a Figura 7, o que representa uma reação não-contínua de hidratação do cimento e um ganho de resistência relativo ao volume e profundidade da camada da massa de concreto. Ainda pode-se observar que altas temperaturas (>40°C) nas idades iniciais afetam a resistência à compressão em longo prazo em uma relação inversamente proporcional (YIKICI; CHEN, 2015).

Figura 7 – Gradiente térmico da reação de hidratação em seção horizontal



Fonte: Schackow *et al.* (2016), adaptado e traduzido pelo autor

A variação da temperatura durante a fase inicial de cura do concreto afeta também os corpos de prova, dificultando a estimativa precisa de resistência em tais condições (BAGHERI-ZADEH *et al.*, 2007).

2.3.3 Abrangência do método em normas nacionais e internacionais

Em abrangência nacional pouco se encontra regularização quanto ao método da maturidade. Nas normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015) o mais próximo a ser tangido quanto ao método recai nas temperaturas indicadas para realizar a concretagem em condições ideais. A NBR 6118 (ABNT, 2014) ainda apresenta uma aproximação quanto à idade fictícia do concreto, expressa na Equação 7.

$$t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \Delta t_{ef,i} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

- t : idade fictícia, expressa em dias;
- $\Delta t_{ef,i}$: é o período, expresso em dias, durante o qual a temperatura média diária do ambiente, T_i , pode ser admitida constante;
- T_i : é a temperatura média diária do ambiente, expressa em graus Celsius (°C);
- α : é o coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento.

No cenário das normas internacionais se destaca a ASTM C1074 (ASTM, 2011) que caracteriza e conduz os ensaios necessários para a obtenção da relação entre maturidade e resistência do concreto em laboratório, o controle do histórico de temperatura do concreto em campo e o cálculo do índice de maturidade resultante, permitindo então estimar a resistência à compressão de modo não-destrutivo. A norma também orienta na análise e definição da temperatura base de cálculo e E_a do cimento a ser utilizado.

Na ASTM C918 (ASTM, 2007), que elenca os métodos de mensuração da resistência nas idades iniciais do concreto, o método da maturidade é citado e utilizado para prever a resistência potencial de um corpo de prova após seu rompimento.

2.3.4 Aplicações do Método da Maturidade na construção civil

A aplicação do método da maturidade é amplamente utilizada a fim de determinar uma série de parâmetros essenciais para a segurança estrutural e ocupacional (HERRERO; LAGE; TEMBLEQUE, 2012), incluindo:

- Idade mínima do concreto para remoção de fôrmas;
- Idade mínima do concreto para remoção de escoramento;
- Idade mínima do concreto para transferência de protensão;
- Temperatura e tempo necessários para cura acelerada *in situ* ou em pré-moldados;
- Confirmar que a estrutura não tenha atingido temperaturas extremas (entre 5° C e 70° C) nas idades iniciais, ou variação acima de 20° C entre

o núcleo e a superfície da estrutura, sendo que tais situações podem afetar adversamente as condições estruturais do concreto.

O método da maturidade já vem sendo amplamente utilizado na indústria de artefatos e estruturas pré-moldadas de concreto (GALOBARDES *et al.*, 2015) e na pavimentação em concreto a fim de aumentar a produtividade através da redução do tempo de cura (BEUSHAUSEN; ALEXANDER; BALLIM, 2012).

As aplicações do método da maturidade em situações notáveis, que serviram de estudo de caso, incluem a construção do *AT&T Dallas Stadium* (a), estádio de futebol americano com capacidade de 108.873 pessoas construído em 2009, e na ponte *Creve Couer* (b), no Missouri em 2003. Ambas as obras obtiveram um ganho em produtividade e redução de custos com a aplicação do método, e são mostradas respectivamente na Figura 8.

Figura 8 – Aplicações do método em grandes construções



Fonte: Hayward Baker Co., 2009 (a); American Segmental Bridge Institute – ASBI, 2003 (b)

O estudo da maturidade do concreto vem sendo avaliado para sua aplicação em sistemas construtivos em paredes de concreto na Colômbia, onde a construção neste sistema já é difundida à alguns anos, com resultados positivos à sua viabilidade no canteiro de obras (CASTRO-GARRIDO *et al.*, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

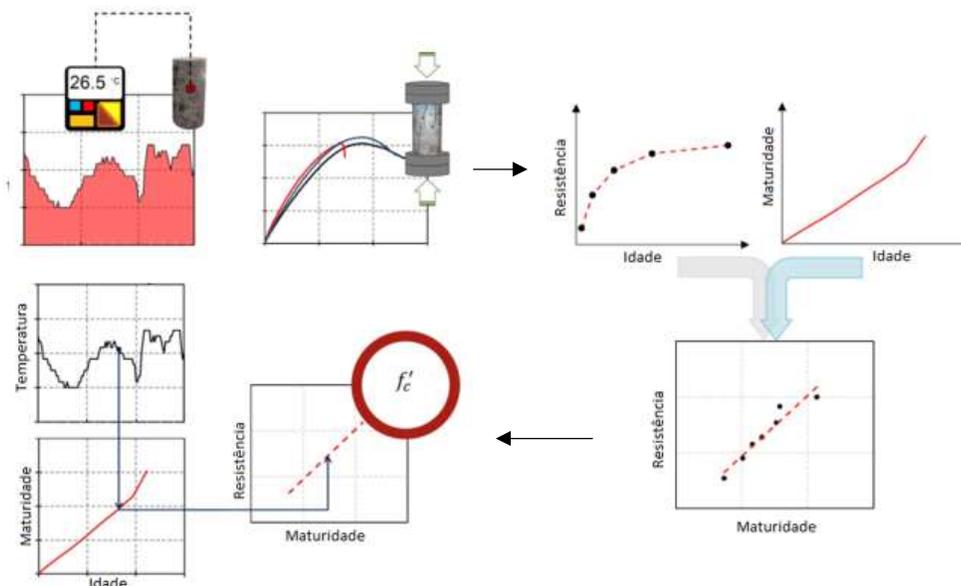
Com o intento de verificar a efetividade do método em circunstância real de aplicação, o programa foi estruturado em duas fases de aplicação. A primeira etapa ocorreu com o controle laboratorial do concreto e a caracterização dos insumos constituintes da composição de concreto em estudo, e a segunda etapa envolveu o acompanhamento *in situ* das atividades de concretagem e controle térmico *versus* tempo da evolução da resistência da estrutura. O programa se deu de acordo com o cronograma estipulado pela obra em estudo e a estruturação sistemática deste trabalho.

3.1 ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi balizado em três fases de ação. A fase inicial, acompanhada diretamente no canteiro de obras, sucedeu pela supervisão diária dos resultados das resistências iniciais, obtidas através do rompimento dos corpos de prova, conforme procedimento prescrito na NBR 5739 (ABNT, 2018), às 14 horas pós-moldagem, e a tomada da temperatura ambiente durante a concretagem e sua variação até o momento da ruptura dos cilindros de concreto.

A segunda fase a pesquisa foi estruturada em dois fluxos de atuação, onde um buscou alimentar a análise com dados de entrada, e o segundo fluxo colocou em prática as informações coletadas. Ambos os processos se deram em quatro etapas com processos similares em duas distintas situações, partindo de um único ponto de origem conforme apresentado no Fluxograma 1.

Fluxograma 1- Estrutura da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor

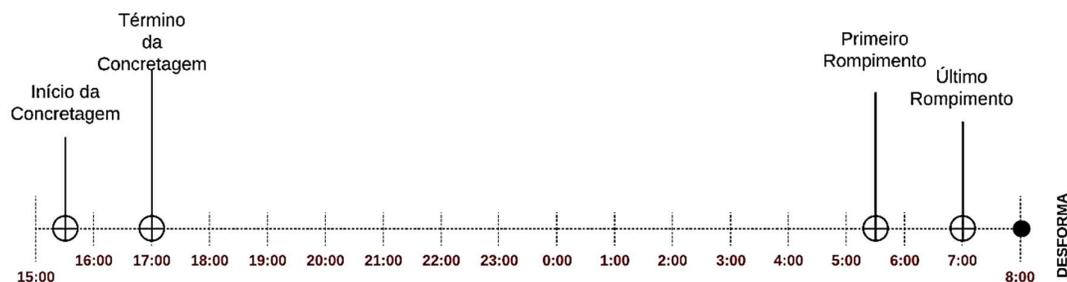
De acordo com o esquema denotado no diagrama, as etapas podem ser descritas da seguinte forma:

- 1) **Primeira Etapa:** Definido o concreto o qual este estudo se sustentará, assim como a definição e caracterização dos materiais componentes do concreto.
- 2) **Segunda Etapa:** A partir desta definição foram moldados espécimes de controle, seguindo o procedimento descrito na ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015), e a concretagem da estrutura em campo;
- 3) **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 são em temperaturas de 0° C, 23° C e 46° C. Em paralelo é controlada a temperatura da reação na estrutura concretada em obra, e sua consequente resistência, através do ensaio de compressão axial proposto na ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018);
- 4) **Quarta Etapa:** Desenvolvimento da curva de correlação entre os resultados obtidos no ensaio de compressão e no controle da reação

exotérmica do concreto, com base na ASTM C 1074 (ASTM, 2011), e análise dos resultados obtidos através de aparelhagem específica para leitura de maturidade.

Com o intuito que o acompanhamento em obra fosse realizado de maneira tão próxima ao real quanto exequível, o acompanhamento sucedeu-se conforme a demanda construtiva e correspondendo aos tempos prescritos de concretagens e desformas. No processo acompanhado, a sucessão das atividades segue a linha conforme apresentado no Fluxograma 2.

Fluxograma 2 – Linha do tempo de concretagens



Fonte: elaborado pelo autor

O processo adotado pela construtora segue um modelo de repetição diária. No período da manhã a montagem da armação, sistemas hidráulicos e elétricos é realizada. Em sequência, as formas são fechadas, travadas e escoradas, finalizando com a montagem da laje do pavimento superior à tarde. Com a finalização da montagem, a estrutura é concretada.

Previamente ao início do programa experimental, foram acompanhadas diariamente 60 ciclos de operação, os quais incluem a montagem da fôrma e a concretagem, seguido do controle de rompimentos e liberação de desforma da estrutura. Nesta etapa foram avaliadas as métricas de temperatura ambiente durante a concretagem, horários das atividades e resistências à compressão axial resultantes.

Durante esta análise prévia, foram moldados 7 corpos de prova para cada caminhão, de acordo com os procedimentos denotados na NBR 67 (ABNT, 1998) e NBR 5738 (ABNT, 2015), estes foram identificados e armazenados em local isolado próximo ao laboratório de campo. 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 para que a estrutura tenha as condições mínimas portantes necessárias para que o processo continue.

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.

3.2 ETAPA 1 – ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Devido à natureza da aplicação do estudo, o concreto a ser caracterizado foi o mesmo que a obra utiliza, fornecido através de central dosadora de concretos da região. Para validação do método a ser aplicado, a caracterização da composição fornecido se faz necessário para que a aplicação deste estudo seja intrínseca e exclusivamente válida quando replicada para esta mesma composição de concreto.

3.2.1 Caracterização dos materiais componentes

Este capítulo apresenta, detalhadamente, os parâmetros avaliados e as metodologias aplicadas para cada componente da composição de concreto utilizado neste estudo. Os itens a seguir apresentam as análises realizadas e a descrição dos materiais empregados.

3.2.1.1 Cimento

O concreto em estudo utiliza o cimento da classe CP V-ARI. O aglomerante foi caracterizado conforme fornecido pelo fabricante através de suas tabelas química, física e mecânicas. Os parâmetros avaliados foram comparados com os limites especificados na ABNT NBR 5733 (ABNT, 1991). A Tabela 5 expressa os valores de referência perante a norma e a média obtida na análise do cimento.

Tabela 5 - Limites de Ensaios característicos – Cimento CP V - ARI

Ensaios		Limites Específicos	Valor Médio da Amostragem		
Mecânico	Resistência à Compressão	1 dia de idade	≥ 14 MPa	22,6 MPa	
		3 dias de idade	≥ 24 MPa	34,3 MPa	
		7 dias de idade	≥ 34 MPa	39,2 MPa	
Físicos	Finura	Peneira 75mm	≤ 6,0%	0%	
		Área Específica	≥ 300 m ² /kg	-	
		Tempo de Início de Pega	≥ 1 h	220 min	
		Expansibilidade a quente	≤ 5 mm	0,6 mm	
Químicos		Resíduo Insolúvel	≤ 1,0%	-	
		Perda ao Fogo	≤ 4,5%	-	
		Óxido de Magnésio (MgO)	≤ 6,5%	5,9%	
		Trióxido de Enxofre (SO ₃)	C3A Clínquer ≤ 8%	≤ 3,5%	3,0%
			C3A Clínquer > 8%	≤ 4,5%	4,0%
		Anidrido Carbônico (CO ₂)	≤ 3,0%	-	

Fonte: Votorantim (2018)

3.2.1.2 Agregado Miúdo

A composição dos agregados miúdos da matriz cimentícia se dá através de um arranjo de duas areias distintas. A primeira parcela é de origem quartzosa, de areial de cava natural extraída da região do Vale dos Sinos, denominada como Areia Fina Natural (AFN). A segunda parcela de areia é de origem industrializada, proveniente do processo de britagem, denominada como Areia Industrial de Britagem (AIB). Esta composição reflete a fração granular estabelecida pela central dosadora de concreto local, que fornece o concreto usinado utilizado na obra deste estudo e corresponde à proporção de 45,1% de AFN e 54,9% de AIB.

A caracterização do agregado foi obtida junto ao fornecedor, confirmado com o laboratório da central dosadora de concreto através de *double-check* das informações e resultados obtidos nos ensaios. Os parâmetros levantados da amostra de AFN foram a massa específica seca e massa específica saturada superfície seca através da NBR NM 52 (ABNT, 2009), determinação de inchamento do agregado e umidade crítica através da NBR 6467 (ABNT, 2006) e curva granulométrica através da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a determinação da curva granulométrica da parcela de AFN foi utilizado uma massa de amostra de 500 gramas seca, vibrada e peneirada em Série Normal. As leituras das massas passantes são apresentadas na Tabela 6, e a curva de granulometria foi plotada conforme o

Fonte: elaborado pelo autor

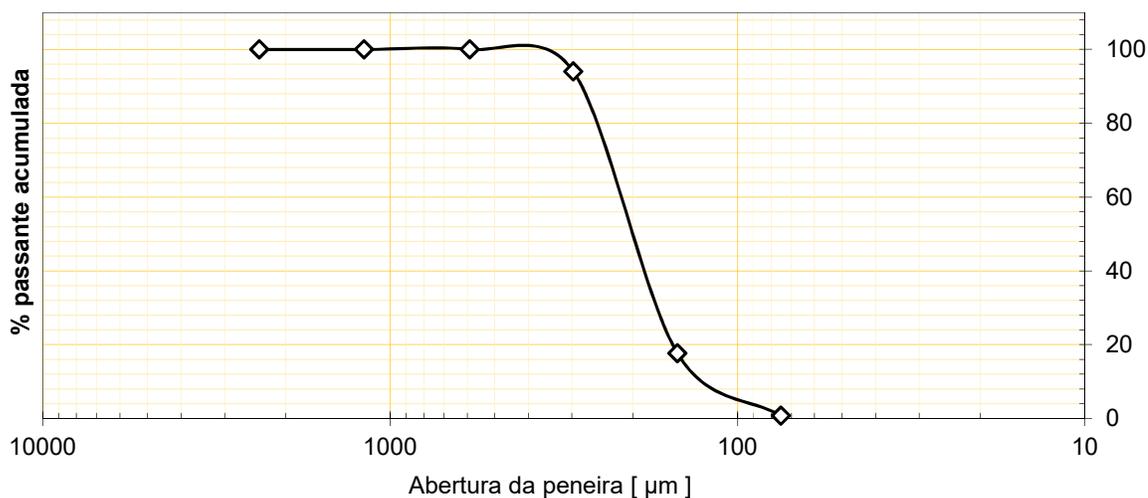
Gráfico 2.

Tabela 6 – Dados de peneiramento - AFN

PENEIRA #	AREIA FINA NATURAL - AFN	
	PARCELA RETIDA (g)	PARCELA PASSANTE (g)
9.5	-	-
4.75	-	-
2.36	-	-
1.18	0,00%	100,00%
0.59	0,06%	99,94%
0.297	5,98%	93,96%
0.149	76,27%	17,69%
0.075	16,95%	0,74%
<i>f</i>	0,74%	0,00%
	Diâmetro Máximo (mm)	1,19
	Módulo de Finura	0,993

Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 2 - Curva granulométrica - AFN



Fonte: elaborado pelo autor

Para a AIB, os parâmetros analisados foram a massa específica seca, o índice de volume de vazios e a curva granulométrica. A Tabela 7 apresenta os parâmetros característicos do agregado artificial AIB, fornecidos pela central dosadora de concreto.

Tabela 7 – Parâmetros Característicos de AIB

Parâmetro Característico	Resultado Obtido
Massa Específica Aparente	2,96 g/cm ³
Índice Volume de Vazios	4,1 %

Fonte: Unidade Dosadora de Concreto em estudo

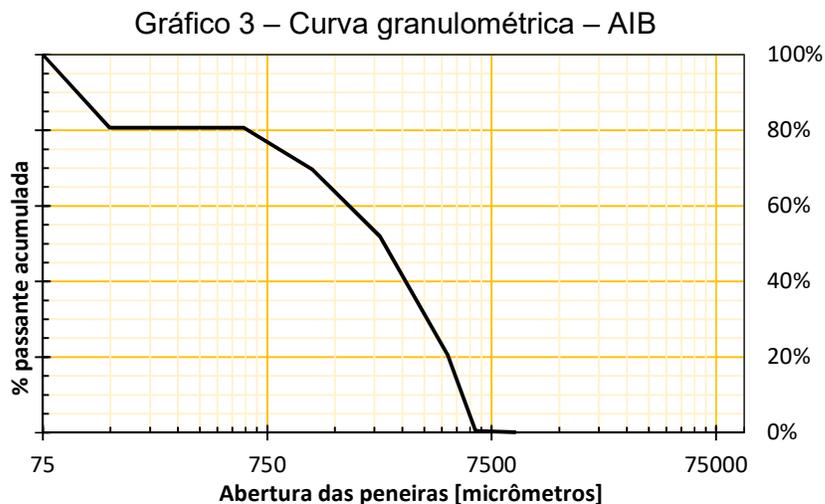
Foram realizados os ensaios prescritos na NBR NM 248 (ABNT, 2003) para caracterização e definição da curva granulométrica do AIB, com uma amostra seca de 1000 gramas de material, utilizando a série Normal e Intermediária de peneiras. Os resultados são apresentados na Tabela 8 e no Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 3.

Tabela 8 – Dados de peneiramento – AIB

PENEIRA #	AREIA DE BRITAGEM - AIB	
	PARCELA RETIDA (g)	PARCELA PASSANTE (g)
6.35	0,13%	99,87%
4.76	0,40%	99,48%
2.38	20,25%	79,23%
1.19	31,18%	48,05%
0.59	17,71%	30,34%
0.297	11,01%	19,33%
0.149	-	-
0.075	-	-
<i>f</i>	19,33%	0,00%
		Diâmetro Máximo (mm) 6,35
		Módulo de Finura 0,805

Fonte: elaborado pelo autor



Fonte: elaborado pelo autor

3.2.1.3 Agregado Graúdo

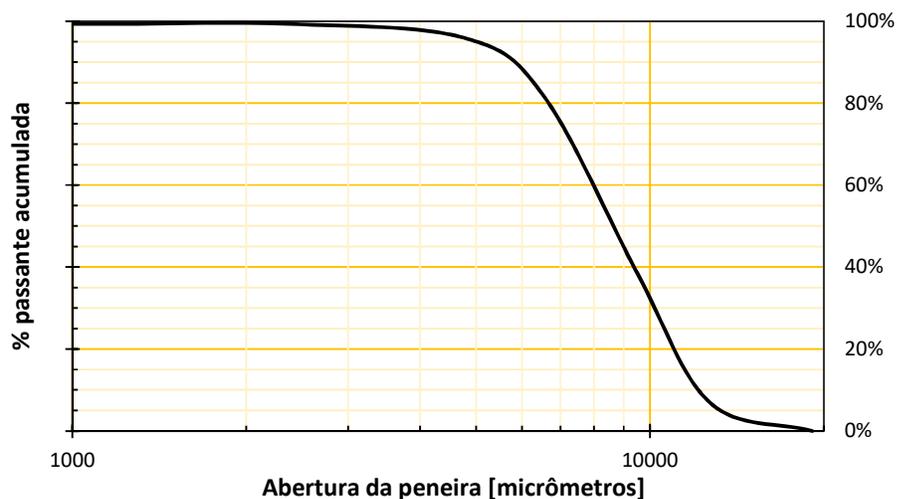
O agregado graúdo é composto por uma fração única de rocha basáltica, reduzida por britagem ao diâmetro proposto para as demandas do concreto, denominado de B00. Sua distribuição granulométrica foi realizada seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e as parcelas retidas e passantes são representadas na Tabela 9, e a curva granulométrica resultante está expressa no Gráfico 4.

Tabela 9 – Dados de peneiramento – B00

PENEIRA #	B 00		
	PARCELA RETIDA (g)	PARCELA PASSANTE (g)	
19,1	-	99,87%	
12,7	6,91%	99,48%	
9,52	31,40%	79,23%	
6,56	43,26%	48,05%	
4,76	14,38%	30,34%	
2,38	3,38%	19,33%	
1.19	-	-	
0.59	-	-	
<i>f</i>	0,66%	-	
		Diâmetro Máximo (mm)	12,7
		Módulo de Finura	2,09

Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 4 – Curva Granulométrica – B 00



Fonte: elaborado pelo autor

3.2.1.4 Aditivos químicos

Na composição em estudo é empregado o uso do Maxifluid PX 1120, um aditivo Tipo II à base de policarboxilatos produzido pela Matchem. Em combinação com o superplastificante, é utilizado o aditivo plastificante polifuncional MX110, à base de polímeros orgânicos. Os parâmetros específicos para cada aditivo são apresentados na tabela abaixo, fornecido pelo fabricante, e não possuem cloretos em sua composição.

Tabela 10 – Parâmetros de aditivos

Aditivo	Aspecto	Cor	pH	Massa Específica (25°C)	Viscosidade (25°C)
PX 1120	Líquido	Marrom Claro	5,65	1,068 kg/L	< 20 cP
MX 110	Líquido	Marrom Escuro	5,1	1,135 kg/L	< 20 cP

Fonte: fabricante

3.2.1.5 Fibras

Como adição à composição do concreto, a fim de mitigar a fissuração pela retração do concreto, é realizada a dosagem de microfibras de polipropileno NeoFibra CR, da Neomatex. O material é misturado na forma de monofilamentos corrugados,

em uma dosagem de $0,3 \text{ kg/m}^3$ de concreto. Conforme ficha técnica de produto, obtida junto ao fornecedor, seguem as características físicas do material, Tabela 11.

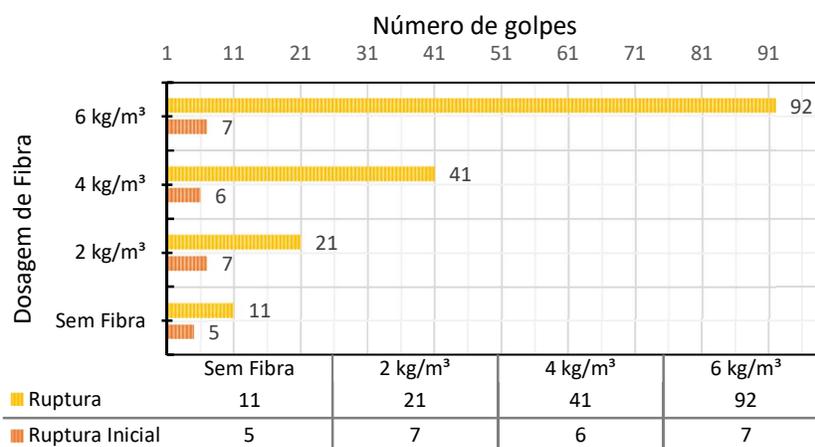
Tabela 11 – Características físicas NeoFibra CR

PARÂMETRO GEOMÉTRICO	VALOR CARACTERÍSTICO
Comprimento	5 mm
Diâmetro	100 μm
Índice de forma	500
Frequência de fibras	2,1 milhões/kg
Área superficial específica	44 m^2/kg

Fonte: Neomatex (2012), adaptado pelo autor

Em ensaios, realizados pelo fornecedor, estima-se o ganho na resistência ao impacto com a utilização da fibra em quatro diferentes gamas de dosagem, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Relação entre dosagem de fibra e número de golpes até ruptura



Fonte: Neomatex (2012), adaptado pelo autor

3.3 ETAPA 2 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATURIDADE

O método foi aplicado baseando-se na ASTM C1074 (ASTM, 2011) através da moldagem de corpos de prova submetidos à diferentes condições de cura, respeitando as premissas das normas brasileiras e as condições oferecidas pela obra

durante a etapa inicial da aplicação. Tais premissas, condições e aplicações serão abordadas no decorrer deste capítulo.

Acompanhando a execução da estrutura na obra em estudo, foram moldados trinta espécimes de acordo com os parâmetros da NBR 5738 (ABNT, 2015). As amostras foram recolhidas diretamente do caminhão betoneira, homogeneizadas, moldadas e posteriormente, identificadas e dispostas conforme apresentado na Tabela 12, garantido a amostragem necessária para cada condição de cura esperada pelo método.

Tabela 12 – Número de amostras por lotes de moldagens e condições de cura aplicadas

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

Fonte: elaborado pelo autor

3.3.1 Monitoramento de Temperaturas

Para que o método pudesse ser aplicado diretamente no modelo proposto, foram realizadas duas frentes de monitoramento das temperaturas reativas na reação do cimento. A primeira linha de monitoramento compreendeu a análise de corpo de prova de controle moldados em obra e conservados em laboratório, em diferentes condições de temperatura para a cura a fim de eliminar a variável e viabilizar a análise direta.

A segunda linha de monitoramento atuou sobre a estrutura efetiva, concretada paralelamente à coleta da amostra de concreto com a finalidade de comparar diretamente os resultados efetivos de resistência à compressão e sua estimativa de resistência através do método da maturidade, elaborado a partir da primeira linha de monitoramento.

3.3.1.1 Monitoramento em Cura Controlada

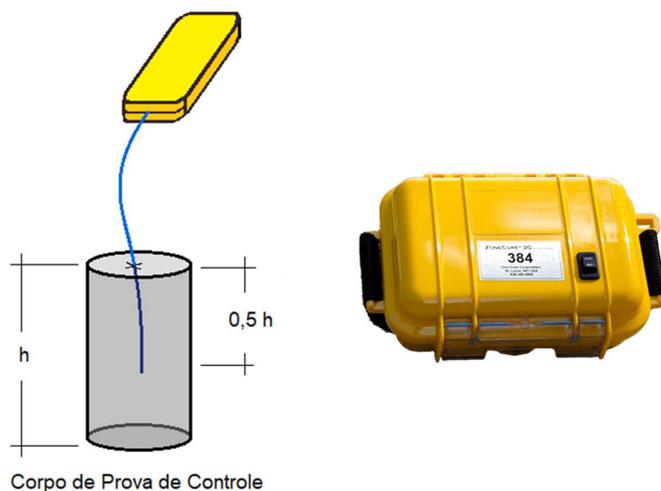
Para esta etapa foram designados três corpos de prova de sacrifício, nos quais durante o processo de moldagem foram inseridos sensores térmicos nos espécimes em estado fresco para cada um dos lotes de cura, a fim de compilar a variação na temperatura de reação em cada condição exposta. Estas amostras também foram moldadas diretamente na obra, utilizando o concreto destinado à estrutura.

Os sensores foram dispostos ao centro de cada espécime, havendo o cuidado em garantir que a superfície de contato e a distância ao meio externo de todas as amostras fosse aproximadamente o mesmo. Para garantir esta disposição, o sensor foi inserido em um tubo de plástico preenchido com vaselina industrial, com a função

de garantir a condução térmica entre o concreto e o sensor. Além disso, o tubo tem como função atuar de maneira semelhante à um gabarito, mantendo o sensor à 10 centímetros de distância das superfícies verticais e 5 centímetros de distância das superfícies horizontais. A disposição destes sensores segue o modelo proposto na Figura 10.

Foram utilizados sensores do modelo *Con-Cure Nex*, um sistema *wireless* de controle de temperatura, específico para o método da maturidade. A aparelhagem inclui o módulo de medição e monitoramento das leituras, envolto em um casco plástico de proteção, ligado ao sensor por cabos terminais. O aparelho realiza leituras intermitentes da temperatura através do sensor termopar inserido na amostra de concreto, e os registra para posterior compilação. Ao total foram empregadas cinco unidades do equipamento; três em laboratório inseridas nos corpos de prova e duas *in situ* inseridas na estrutura concretada.

Figura 10 – Modelo genérico de inserção de sensor em corpo de prova e modelo *Con-Cure*



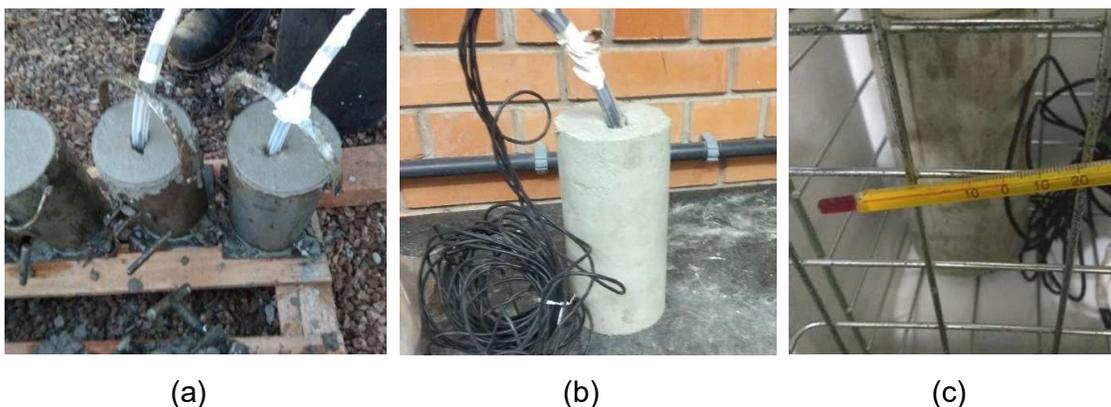
Fonte: elaborado pelo autor

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 espécimes 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. Estas etapas são sumarizadas conforme Figura 11 e de acordo com o que segue descrito:

- 1) O primeiro lote foi disposto para cura em um refrigerador industrial, no laboratório de química- Unisinos. 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 do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, 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 à 46°C, no laboratório do *itt Performance* da Unisinos, com controle de temperatura interna. No forno foram dispostos nove espécimes e, em um dos corpos de provas, foram dispostos quatro sensores para registrar a evolução da temperatura de reação. O lote foi identificado com a sigla 40C.

Figura 11 – Inserção dos sensores em obra (a) e controle de temperatura de reação em laboratório (b,c)

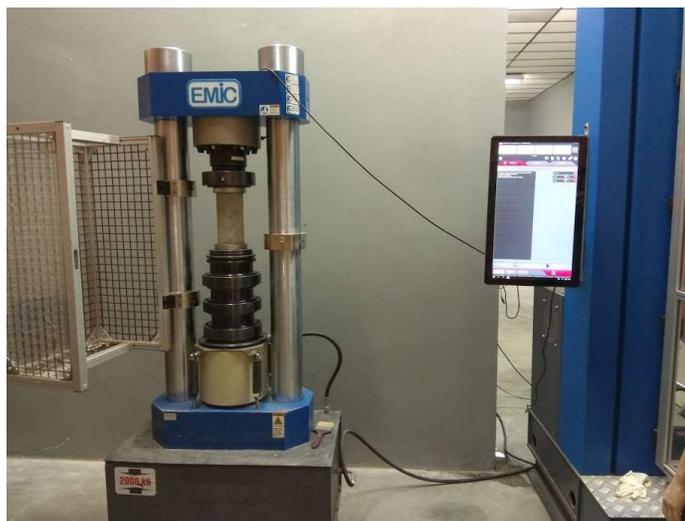


Fonte: elaborado pelo autor

Seguindo a estrutura do projeto experimental, as amostras em cura controlada foram submetidas a ensaio de compressão axial tangido pela NBR 5739 (ABNT, 2018) de acordo com os volumes de amostragem já apresentados na Tabela 12. Para realizar o ensaio de compressão, em idades iniciais, foi adotado o uso de nivelador de superfície em *Neoprene* para evitar o uso de retífica e possíveis danos ao corpo de prova. Para os demais ensaios foi continuada a utilização do disco de *Neoprene* para que se mantivesse as mesmas condições de testes durante as análises.

Para o rompimento foi utilizada prensa hidráulica de acionamento elétrico e módulo eletrônico de leitura, da EMIC (Figura 12), onde o avanço da resistência *versus* tempo de aplicação de carga é mostrado em tempo real. Os ensaios foram realizados com supervisão de laboratorista no *itt Performance* - Unisinos.

Figura 12 – Realização do ensaio de compressão axial



Fonte: elaborado pelo autor

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

3.3.1.2 Monitoramento *in situ*

Em paralelo ao acompanhamento em laboratório, foi realizado o monitoramento da temperatura da estrutura *in situ*, através do mesmo sistema de sensores térmicos inseridos na forma metálica conforme preconiza a norma ASTM C1074 (ASTM, 2011).

A estrutura em aplicação consiste em um modelo monolítico de diafragma rígido, composto por sistema estrutural contínuo de paredes e lajes totalmente de concreto. A armação é composta por telas de aço eletrosoldadas e vergalhões de reforço. As paredes e a laje possuem a espessura contínua de 10 centímetros e são concretadas continuamente em um único ciclo, com a utilização de fôrmas de alumínio produzidas pela Forsa S.A. O sistema arquitetônico é composto por torres geminadas de 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. Tal ritmo de produção e demanda de continuidade ininterrupta acaba tornando o controle de resistência do concreto vital, garantindo que as condições ideais para desforma e escoramentos sejam atingidos e monitorados, evitando danos patológicos e anomalias durante o carregamento contínuo da estrutura. Este controle, mais direto e conciso em relação as condições presentes na estrutura avaliada, pode ser obtido com medições não-destrutivas através do método da maturidade e do controle da temperatura de reação diretamente em obra.

Para tanto, a leitura da temperatura de reação na estrutura para o presente estudo foi realizada por três sensores do modelo *Con-Cure*, dispostos na Laje L15 e três sensores dispostos na Parede P11A, de acordo com a Figura 13 do projeto de produção. Estes pontos foram arbitrados por possuírem incidência solar praticamente nula devido ao ângulo de inclinação do sol, sendo classificados como pontos críticos em relação ao restante da estrutura em função da menor temperatura externa disponível para acelerar o ganho de resistência do concreto. Os sensores foram posicionados concomitantemente à concretagem da estrutura, sendo possível realizar as leituras de temperatura do concreto ainda em estado fresco e denotado o marco de tempo t_0 logo após seu adensamento. O módulo eletrônico do *Con-Cure*, responsável pelo registro das leituras de temperatura, foi protegido com filme plástico e fixado na estrutura metálica com abraçadeiras de *nylon*.

Figura 13 - Indicação dos sensores térmicos em planta e corte da estrutura



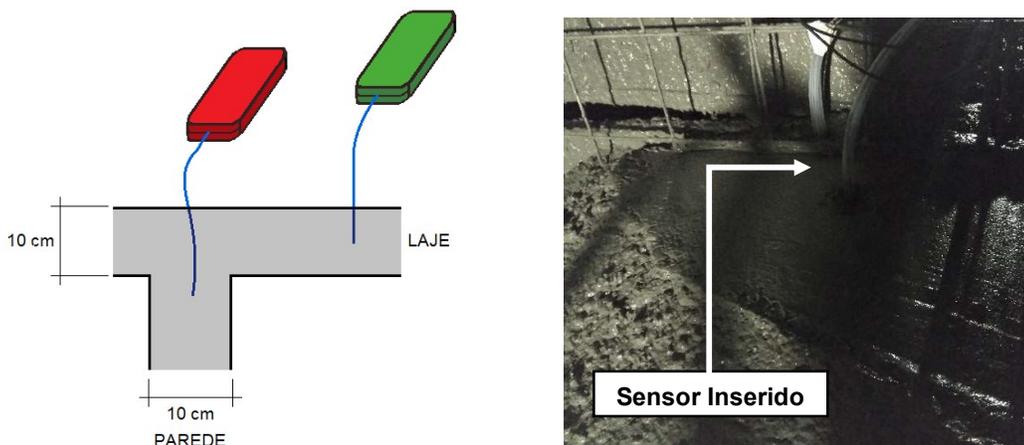
Fonte: elaborado pelo autor

Seguindo a mesma premissa de posicionamento geométrico da proposta anterior, os sensores foram inseridos utilizando o tubo plástico preenchido com vaselina industrial, garantindo a condução térmica e o espaçamento das faces externas de acordo ao desejável. Como a geometria estrutural das paredes em aplicação são semelhantes aos corpos de prova de estudo, esta aproximação foi possível e está representada de conforme a Figura 14. A concretagem foi iniciada às 18:45, sem a incidência de sol em nenhum momento devido à sombra projetada das torres anteriores.

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 igualmente compilada nas mesmas idades do monitoramento em laboratório.

Figura 14 – Esquema de inserção na estrutura e inserção efetiva na laje



Fonte: elaborado pelo autor

O fator de maturidade foi definido através da Equação 2, proposta por Nurse-Saul, e a E_a foi avaliada através da compilação de resultados propostos por Peres et al. (2005). A aparelhagem *Con-Cure*, por se tratar de um equipamento específico para leitura do índice de maturidade de concreto, realizou as conversões e retornou com os valores correspondentes à maturidade e idade equivalente da amostra instrumentada.

Seguindo a rotina já adotada pela obra, foram moldados 7 amostras para cada caminhão betoneira utilizado para a concretagem do pavimento em estudo. Estas amostras são mantidas em tanque com água para cura, em laboratório montado no canteiro de obras, e ensaiados à sua resistência à compressão axial nas idades de 14 horas, 7 e 28 dias. A moldagem, rastreabilidade e ensaios de compressão são realizados por laboratório terceirizado validado para o controle tecnológico. Para complementar o estudo realizado em campo, os corpos de prova do concreto utilizado na porção monitorada pelos sensores de temperatura foram ensaiados à sua resistência à compressão axial, conforme preconiza a NBR 5739 (ABNT, 2018), em obra a fim de comparar os resultados obtidos em laboratório. O nivelamento de superfície das amostras adotado foi através da utilização de discos de *Neoprene*, evitando o uso de retífica mecânica nas amostras com idade de 14 horas. A condição

de nivelamento da superfície das amostras, com *Neoprene*, foi mantido para todos os ensaios posteriores até os 28 dias.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante o programa experimental deste estudo, assim como as análises pertinentes com base na revisão bibliográfica abordada. As análises foram divididas em duas seções, sendo a primeira através da aplicação direta da ASTM C1074 (ASTM, 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.

4.1 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. Esta análise serviu de base para a aplicação do método da maturidade no controle em canteiro de obras. Os ensaios foram realizados em lotes e seus respectivos resultados são apresentados a seguir.

4.1.1 Série 20C

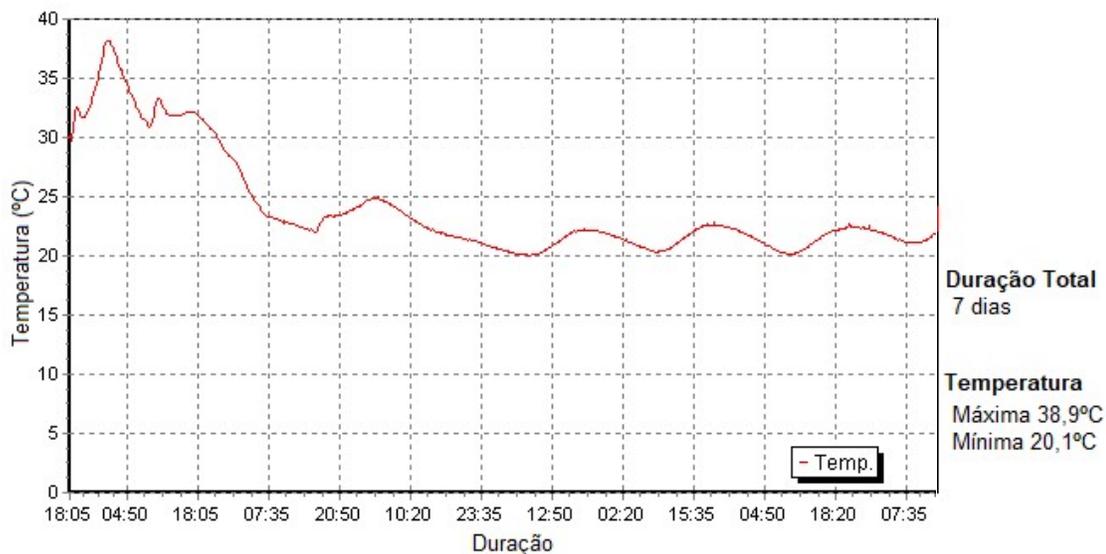
A série 20C contempla as amostras curadas em câmara úmida de temperatura controlada a 23°C. Nesta série foi analisado o ganho de resistência mecânica à compressão axial e a evolução térmica da reação de hidratação.

4.1.1.1 Evolução da temperatura de reação

O histórico de evolução de temperatura é apresentado na Figura 15, registrado pelo equipamento *Con-Cure* inserido na amostra de sacrifício do lote, com leituras constantes a cada 15 minutos ao longo das 168 horas de monitoramento

Na primeira parcela de leituras, correspondente às 14 horas as quais a amostra foi mantida em obra e fora da condição controlada de cura, percebe-se uma alta taxa térmica ao longo da fase inicial de hidratação, decaindo ao decorrer da reação e diminuição na liberação de calor do corpo de prova a partir do segundo dia.

Figura 15 – Monitoramento térmico Série 20C



Fonte: elaborado pelo autor

Conforme a Figura 15, percebe-se que a temperatura da amostra se manteve em um ciclo constante de temperaturas no período de 7 dias de ensaios, com os picos máximos em 38,9°C, sendo possível verificar seu período de maior reatividade térmica, seguido de um período de menor liberação de calor.

4.1.1.2 Evolução da resistência mecânica à compressão

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos nos rompimentos nas idades de controle, separado pelos lotes de moldagem. O resultado de resistência média foi obtido com base no resultado amostras condicionadas em cura úmida.

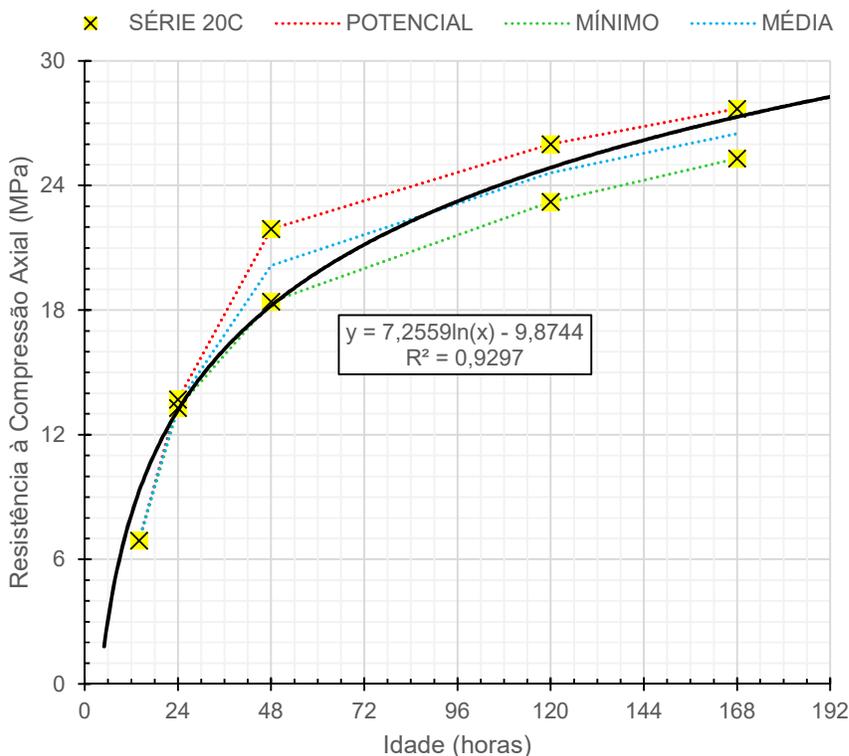
Tabela 13 – Resistência mecânica à compressão axial na Série 20C

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

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados foram plotados em relação à sua idade e uma curva de tendência de crescimento logarítmico foi traçada, como pode ser visto no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Curva de tendência de resistência a compressão axial na Série 20C



Fonte: elaborado pelo autor

A amostra apresentou crescimento contínuo em seus valores médios e potenciais, com um desvio padrão aceitável, porém não desprezível, em cada um dos resultados de rompimentos. O concreto apresentou um ganho de 98,6% na resistência potencial entre as amostragens de 14 e 24 horas, e um acréscimo de 89,8% no intervalo de 24 horas a 120 horas, estando em acordo com o esperado para a amostra em condição normal de cura. A equação obtida com os diferentes períodos apresentou um coeficiente de correlação de aproximadamente 0,93, representando que boa parte dos valores são aderentes à curva obtida.

4.1.2 Série 0C

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 axial e o ganho de temperatura na reação de hidratação.

4.1.2.1 Evolução da temperatura de reação

Durante o período de monitoramento, as leituras foram registradas pelo *Con-Cure* no decorrer das 168 horas de ensaios, em um intervalo de 15 minutos entre as leituras. O histórico térmico da amostra é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Monitoramento térmico Série 0C



Fonte: elaborado pelo autor

Percebe-se, através do resultado apresentado, que ao longo das primeiras 14 horas de leitura a temperatura é relativamente alta quando confrontada com o restante da análise, o que se deve à natureza reativa da amostra em seu período de maior liberação de calor, durante a hidratação inicial do cimento, e ao fato da amostra ter sido colocada no congelador somente após este período inicial. Após o segundo dia, a amostra preservou a temperatura quase constante de -12°C, impactando diretamente na velocidade da reação posterior.

4.1.2.2 Evolução da resistência a compressão

As amostras, curadas em condição térmica ambiente de 0°C, foram ensaiadas nas mesmas idades do lote anterior. A Tabela 14 apresenta os valores potenciais, mínimos e médios obtidos, assim como a taxa de desvio padrão entre os ensaios.

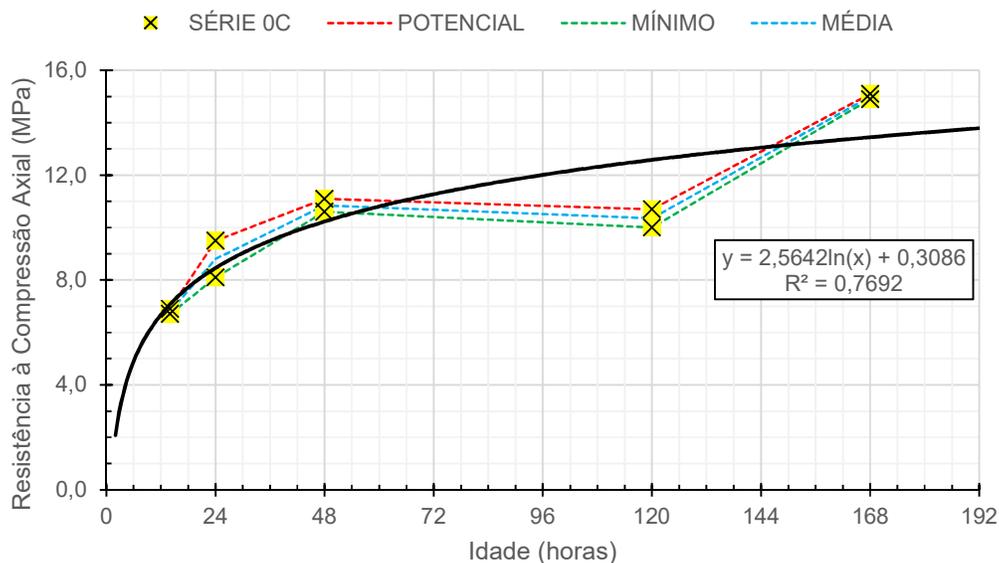
Tabela 14 – Resistência mecânica de compressão axial na Série 0C

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

Fonte: elaborado pelo autor

A partir dos resultados, foi traçada uma linha de tendência entre os valores obtidos. O Gráfico 6 representa a curva resultante, assim como os valores mínimos, médios e máximos do ensaio de compressão axial.

Gráfico 6 - Curva de tendência de resistência a compressão axial na Série 0C



Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com as parcelas resultantes vistas no Gráfico 6 que, por conta da cura nas primeiras 14 horas de reação das amostras, estando armazenado em condições idênticas ao lote anterior, a resistência inicial se manteve muito próxima ao lote de amostras da série 20C. Nas leituras seguintes percebe-se uma estagnação no ganho de resistência, havendo um acréscimo nos resultados potenciais de apenas 37,7% no primeiro ciclo (de 14 à 24 horas) e uma evolução de apenas 12,6% nos resultados de 24 à 120 horas. Fica evidente a influência da temperatura ambiente na reação de hidratação do cimento quando equiparado a condições normais de cura e umidade.

Esta condição inicial de cura, em temperatura distinta ao restante do ensaio, representa um fator limitante de confiabilidade do resultado à 0°C. Analisando a taxa de crescimento da curva resultante de resistência percebe-se que a uma variação considerável na primeira parcela do ensaio. Esta análise leva a concluir que as resistências obtidas seriam aproximadamente 20% menores se, em situação ideal de ensaio, a amostra tivesse sido armazenada imediatamente em temperatura controlada após sua moldagem.

Foram analisados pontos discrepantes nos resultados de 48 horas e 120 horas, havendo um decréscimo de 4,6% na média de resistência das amostras neste período. Este resultado pode ser atrelado ou à alguma anomalia causada no processo de moldagem do corpo de prova, por conta do nivelamento de superfície da amostra previamente ao ensaio de compressão ou ainda por alguma falha na realização do ensaio. Em função de um desvio padrão muito baixo entre as amostras, para fins de análise macro de resultados, considerou-se que a resistência se manteve inalterada no espaço entre a tomada de resultados. Tal conclusão pode ser incumbida à temperatura a qual o corpo de prova esteve exposto, resultando na paralisação da reação exotérmica.

A bibliografia cita que, mesmo com alcance mais lento da resistência, ao considerar idades avançadas de cura, provavelmente seriam atingidos os mesmos valores de resistência mecânica à compressão (BURG, 1996). O coeficiente de correlação foi inferior ao verificado no lote curado na série 20C.

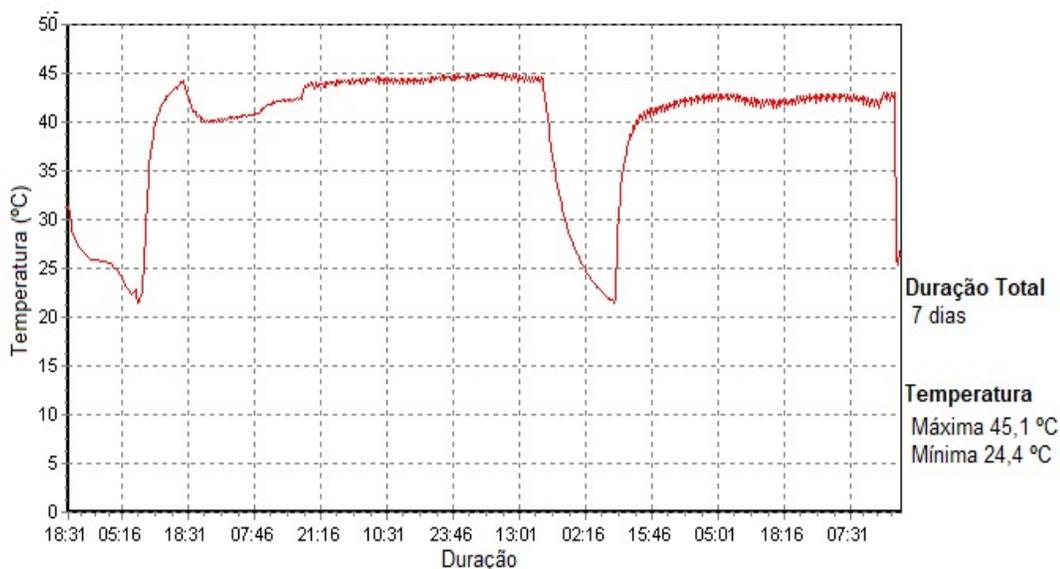
4.1.3 Série 40C

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 sua evolução de temperatura interna dos corpos de prova e a resistência mecânica de compressão axial em estado endurecido do concreto.

4.1.2.1 Evolução da temperatura de reação

Através dos sensores pré-dispostos na amostra de sacrifício, as leituras de temperatura foram tomadas pelo *Con-Cure* em intervalos constantes de 15 minutos, até o total de ensaio representando 168 horas de monitoramento, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Leituras de temperatura Série 40C



Fonte: elaborado pelo autor

Nas primeiras 14 horas de monitoramento pode-se observar a temperatura interna do concreto em condição não controlada. Após este período a amostra foi acondicionada na estufa e as leituras correspondentes obtiveram um acréscimo considerável ainda em sua fase reativa.

No intervalo de leitura do quinto dia pode-se notar uma queda brusca na temperatura de cura, ocasionada pelo desligamento do forno em virtude de uma queda no fornecimento de energia, seguida de sua retomada e estabilização da temperatura novamente. A fora esta anomalia na leitura, as amostras mantiveram-se em uma temperatura regular.

4.1.2.1 Evolução da resistência a compressão

As amostras desta série foram rompidas nas idades de 14, 24, 48, 120 e 168 horas e os resultados de resistência potencial, resistência mínima e resistência média obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 15.

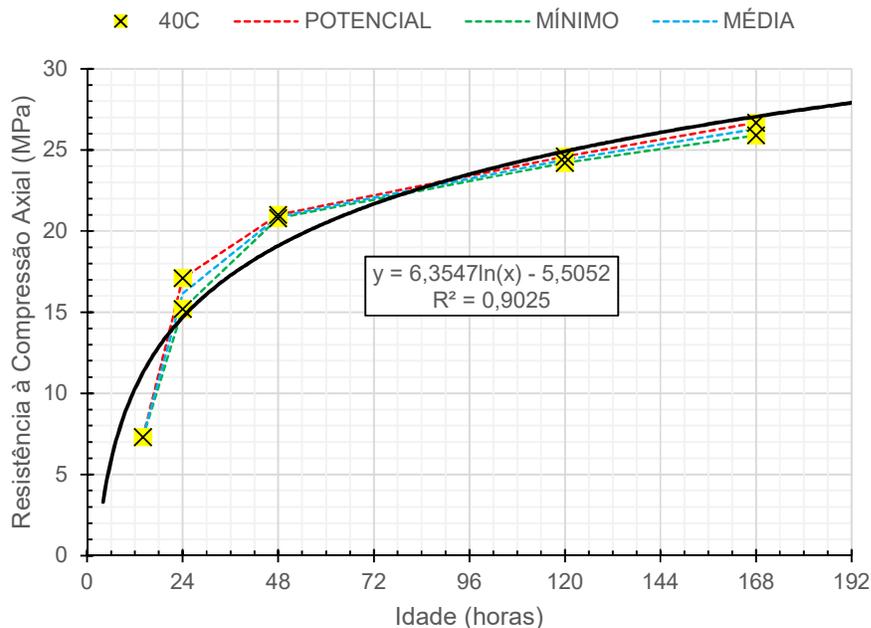
Tabela 15 – Resistencia mecânica à compressão axial na Série 40C

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

Fonte: elaborado pelo autor

O Gráfico 7 representa os resultados obtidos nos ensaios, sendo traçada uma curva de tendência logarítmica destes, assim como os valores mínimos, médios e máximos atingidos pelas amostras da série.

Gráfico 7 – Curva de tendência de resistência a compressão axial na Série 40C



Fonte: elaborado pelo autor

Pode-se verificar a resistência resultante nos ensaios em 14 horas manteve-se dentro do esperado, de acordo com os demais testes em condições fora de controle padrão. A partir dos resultados de 24 horas, onde as amostras já estavam sob condição controlada em 46°C, registrou-se a evolução da resistência à compressão potencial de 134,25% no intervalo do primeiro ciclo, e um ganho de 56,14% no período compreendido entre 24 e 120 horas de cura. Conclui-se que, para os primeiros ciclos de ensaio, a cura em ambiente aquecido é significativa quando se busca uma alta resistência inicial, porém, ao longo dos demais dias de ensaio, esta diferença tende a zerar e as curvas resultantes se cruzam.

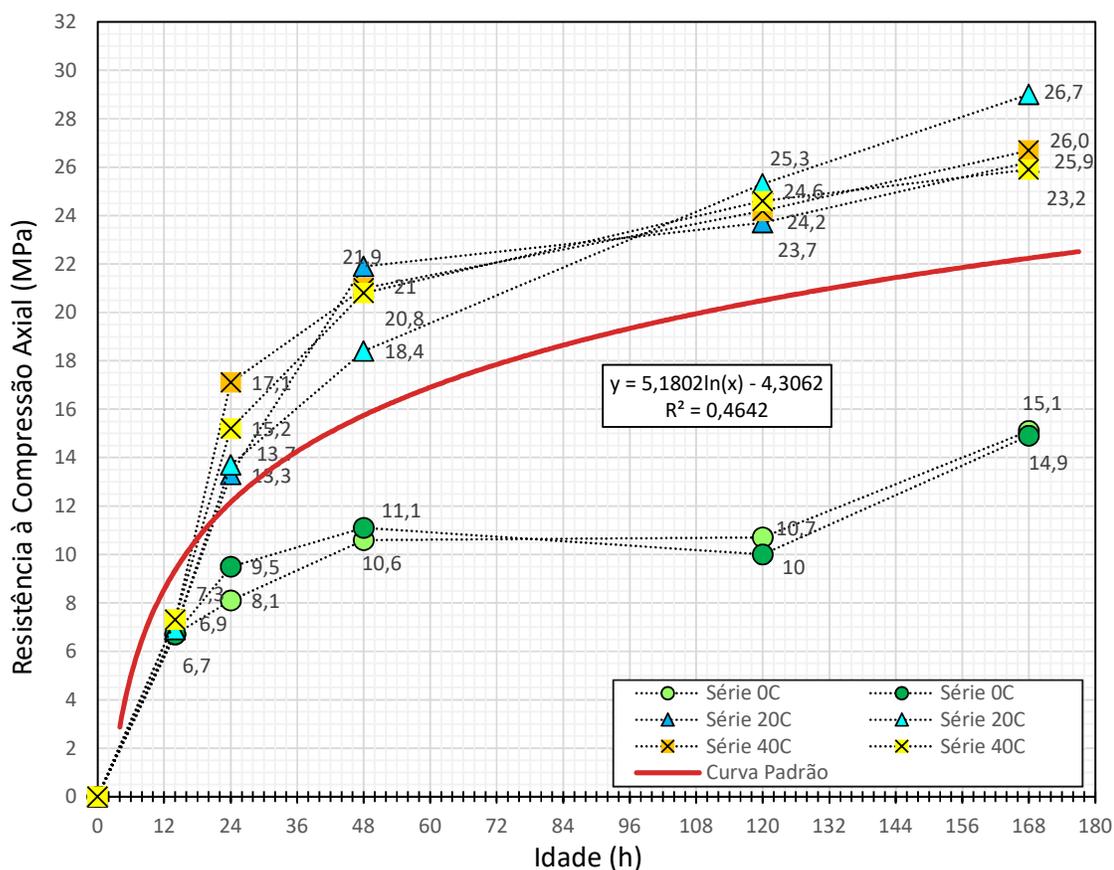
A bibliografia aponta que, ainda que a cura possa ser beneficiada em elevadas temperaturas, a longo prazo pode haver dano na resistência final do material devido à formação de poros de grandes diâmetros causados pela hidratação acelerada (BENAICHA; BURTSHELL; ALAOUI, 2016). Amostras mantidas em baixas temperaturas (10°C) possuem um potencial ainda maior em idades avançadas (BURG, 1996). Apesar destas considerações, como a formação dos cristais se dá nas primeiras horas da reação e ambas as amostras estavam expostas em uma mesma temperatura, a provável causa da inversão de resistência se dá pela cura úmida na

série 20C e na cura seca da série 40C, nesta segunda condição a reação limitou-se à quantidade de água disponível para reagir até atingir o estado 100% seco.

4.2 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 8 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 8 – Compilação dos dados das amostras



Fonte: elaborado pelo autor

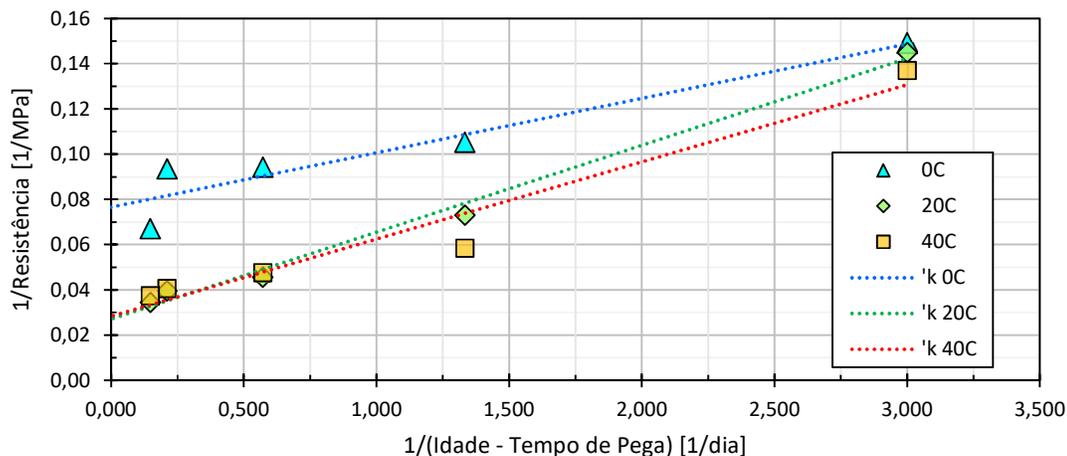
Através desta sobreposição é possível constatar que as resistências das séries 20C e 40C são notoriamente similares, em vista que a 0C exibe os valores mais discrepantes da curva. Um dos fatores que possa ter contribuído para esta aproximação dos resultados das séries 20C e 40C se dá pela cura úmida atribuída aos corpos de prova condicionados à 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.

4.2.1 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 linear. 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 9.

Gráfico 9 – Resistência recíproca *versus* Idade recíproca pós- pega

Fonte: elaborado pelo autor

Com os valores característicos k definidos, o Índice de Maturidade (M_t) de cada amostragem foi calculado utilizando a Equação 2, 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.

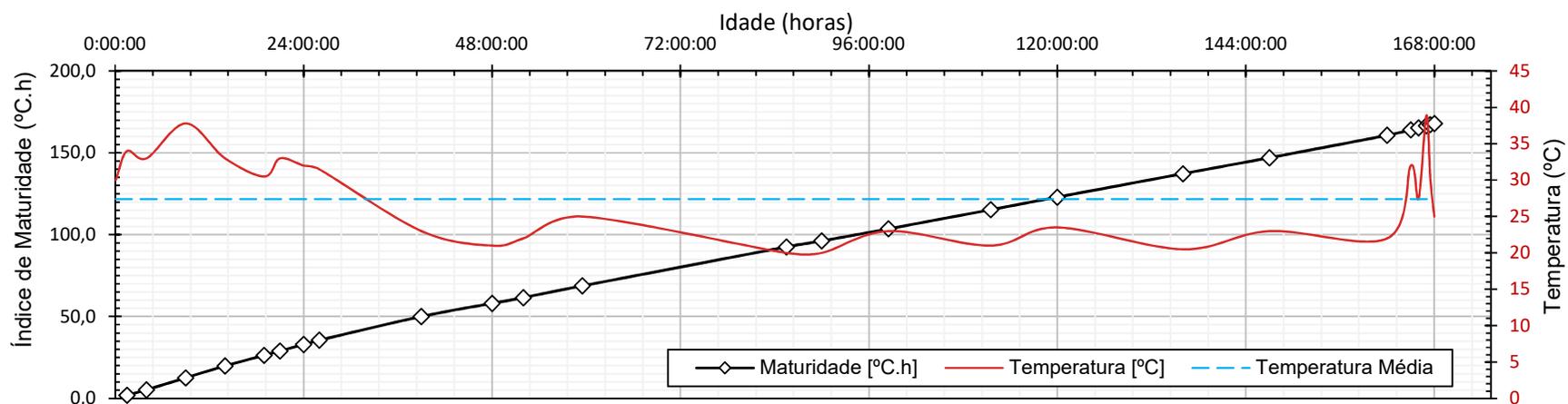
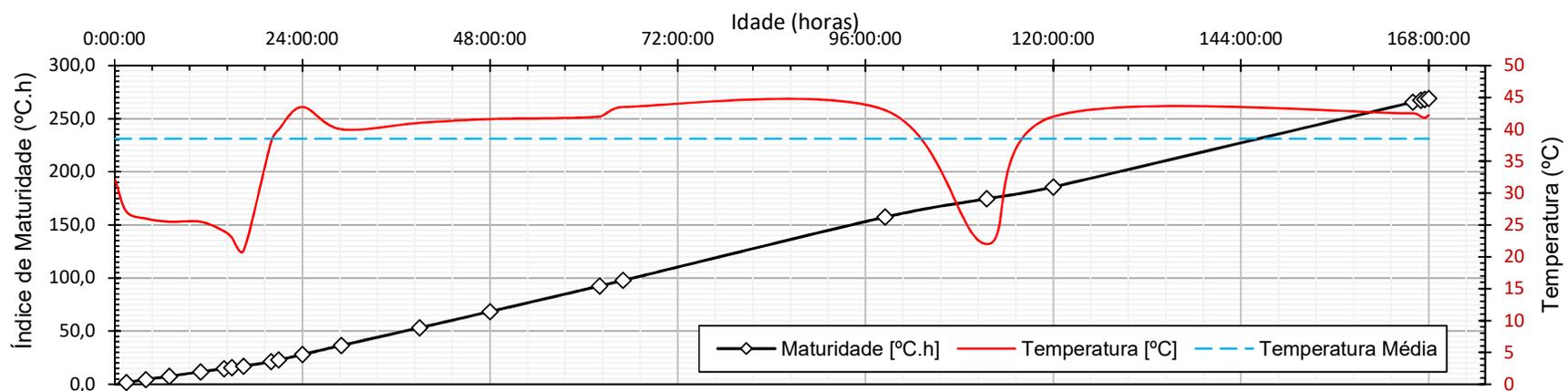
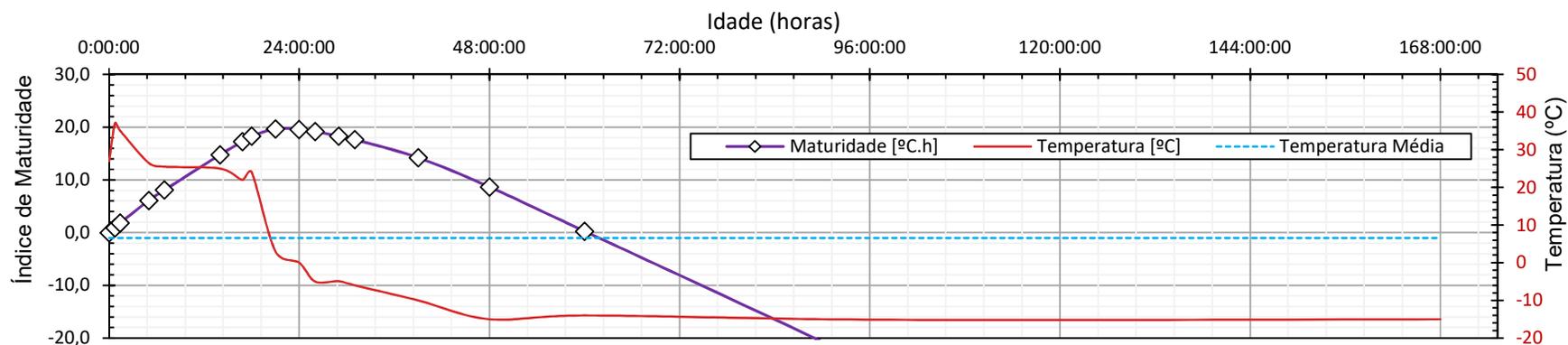
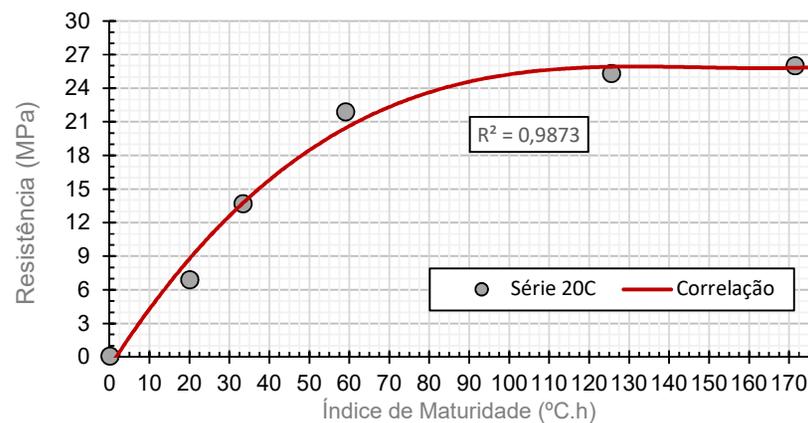
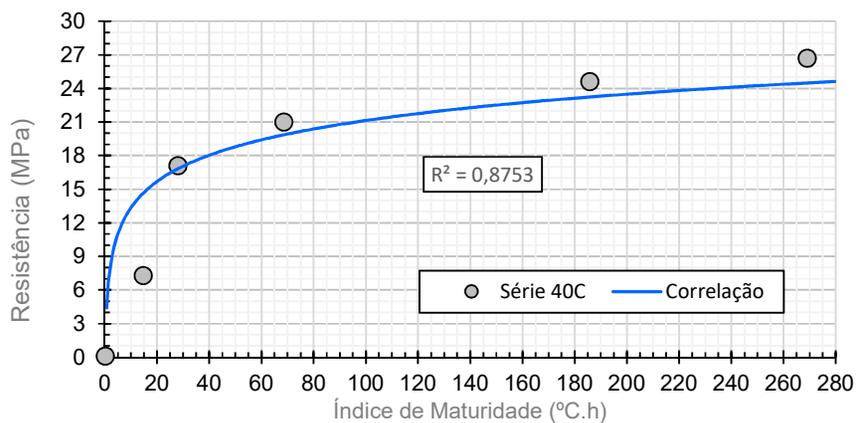
Gráfico 10 – Correlação entre Temperatura *versus* Idade *versus* Índice de Maturidade na Série 20CGráfico 11 – Correlação entre Temperatura *versus* Idade *versus* Índice de Maturidade na Série 40C

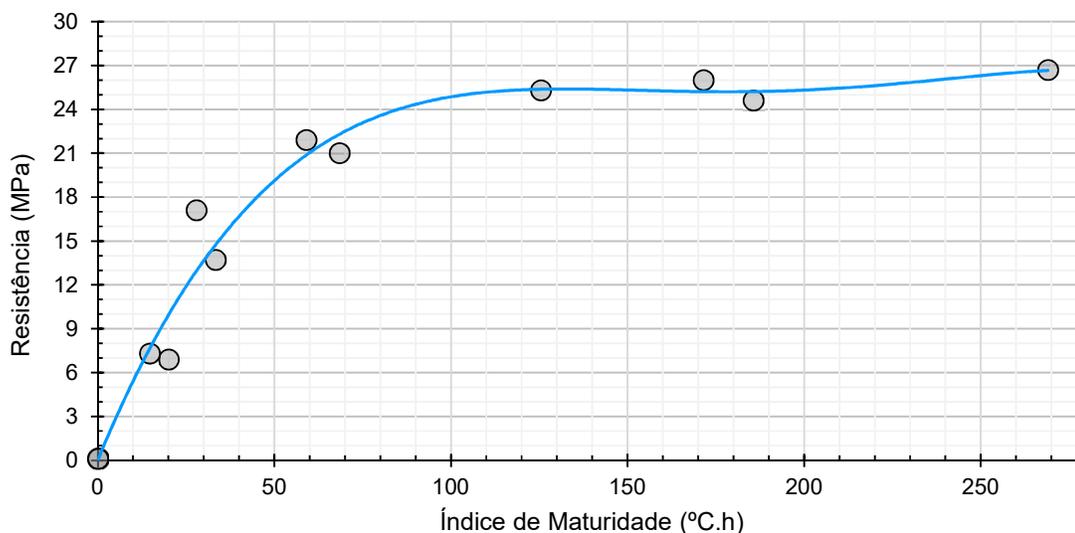
Gráfico 12 – Correlação entre Temperatura *versus* Idade *versus* Índice de Maturidade na Série 0CGráfico 13 – Curva de correlação Índice de Maturidade *versus* Resistência para a Série 20C (a) e 40C (b)

Os resultados plotados no Gráfico 10 e Gráfico 11 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 12 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 M_t 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 13 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 14, 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 14 – Curva de correlação Índice de Maturidade *versus* Resistência Potencial para o concreto de estudo



Fonte: elaborado pelo autor

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).

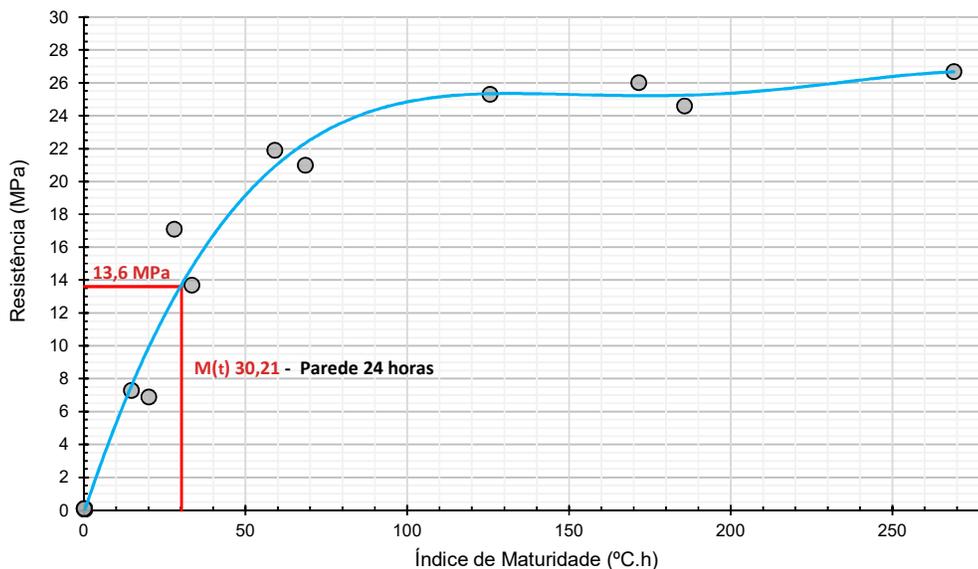
Comparando os resultados obtidos através de ensaios de compressão, e estimativa alcançada com a aplicação da maturidade, a Tabela 16 apresenta a aproximação dos resultados. Os resultados expostos são referentes à estrutura concretada a qual o controle da temperatura foi empregado, e a análise comparativa entre a Mt e a resistência estimada é exemplificada na Figura 18.

Tabela 16 – 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

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 18 – Aplicação da correlação



Fonte: elaborado pelo autor

Percebe-se pela Tabela 16 e pela Figura 18 – 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.

4.2.2 Relação de Idade Equivalente *Con Cure*

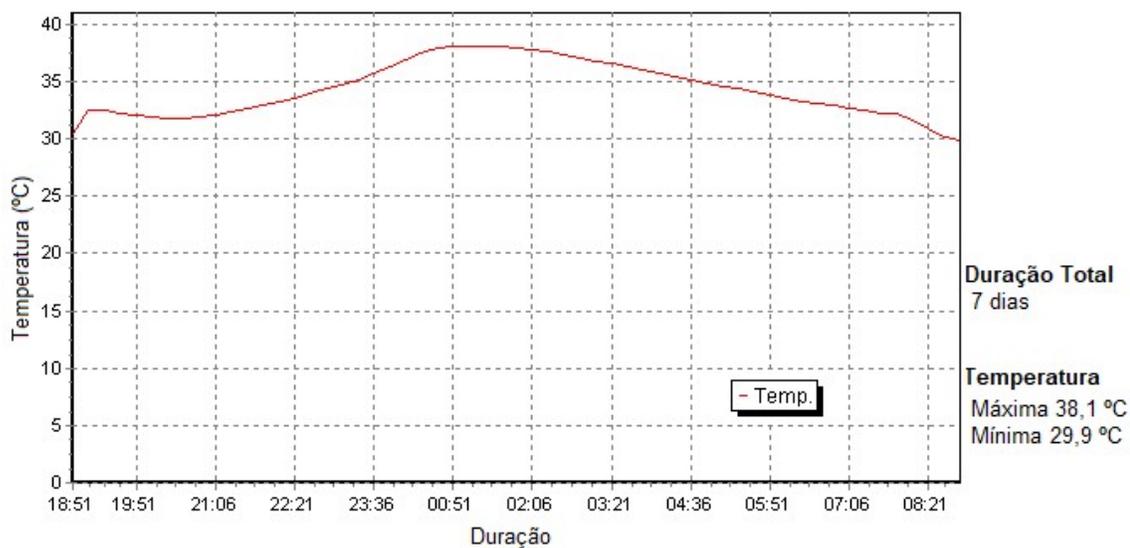
Utilizando a aparelhagem específica para aplicação do método da maturidade, as leituras anteriormente apresentadas serviram de alimentação para a análise do método em software. Os resultados obtidos, em correlação empírica da E_a , temperatura de reação da peça concretada e análises laboratoriais de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

4.2.2.1 Análise com 14h de cura

A Figura 19 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.

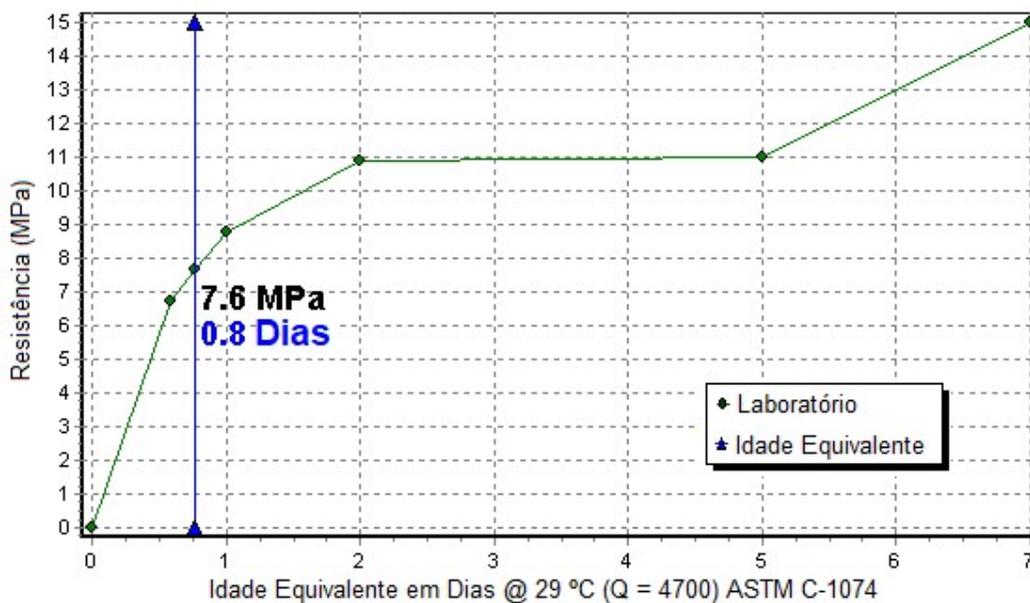
Figura 19 – Histórico térmico às 14 horas - Parede



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 20 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 20 – Idade equivalente em 14 horas– Correlação Série 0C

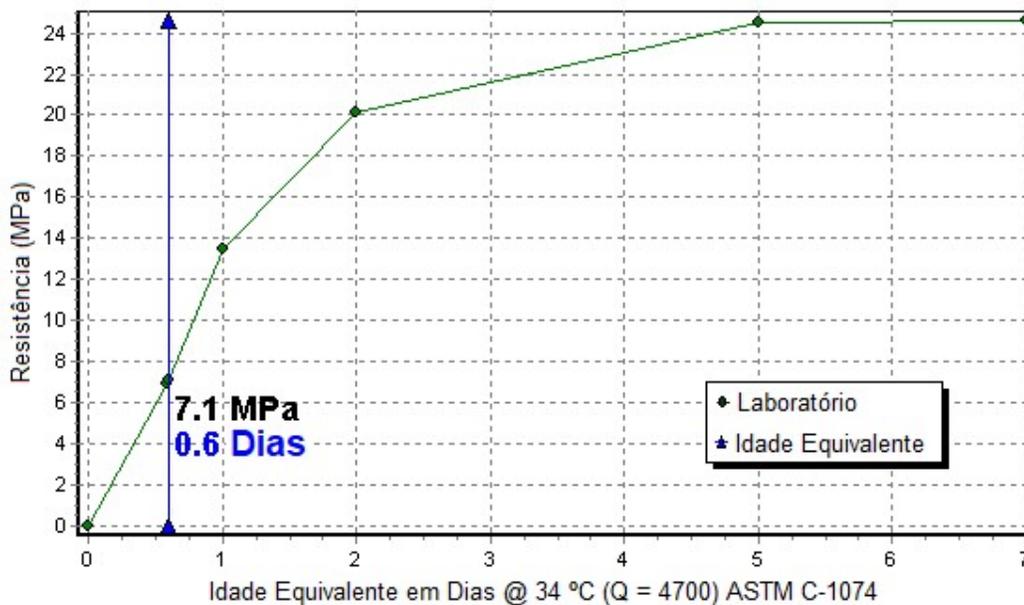


Fonte: elaborado pelo autor

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 21.

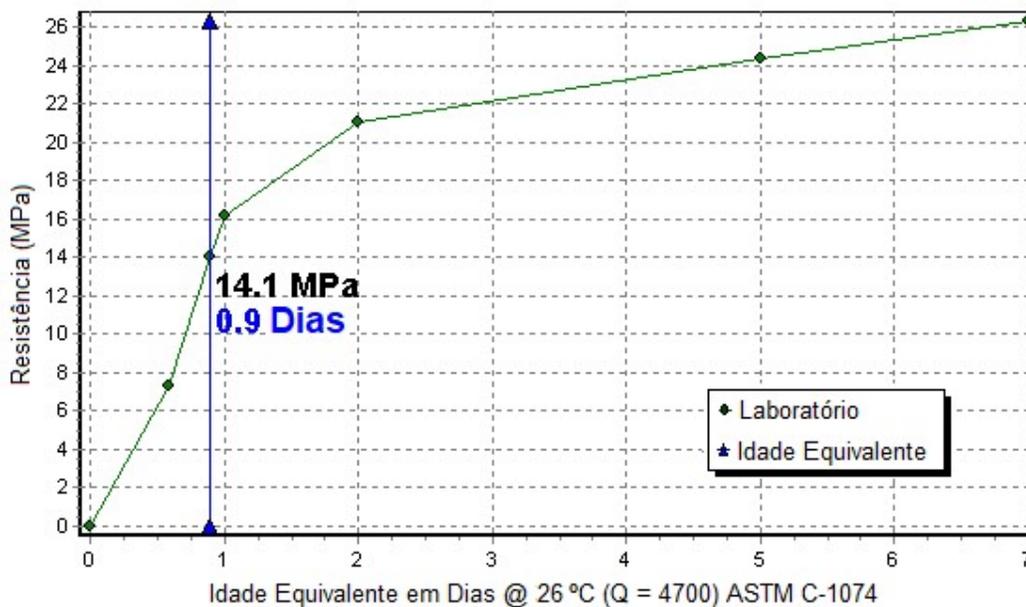
Figura 21 – Idade Equivalente em 14 horas – Correlação Série 20C



Fonte: elaborado pelo autor

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 22.

Figura 22 – Idade Equivalente em 14 horas – Correlação Série 40C



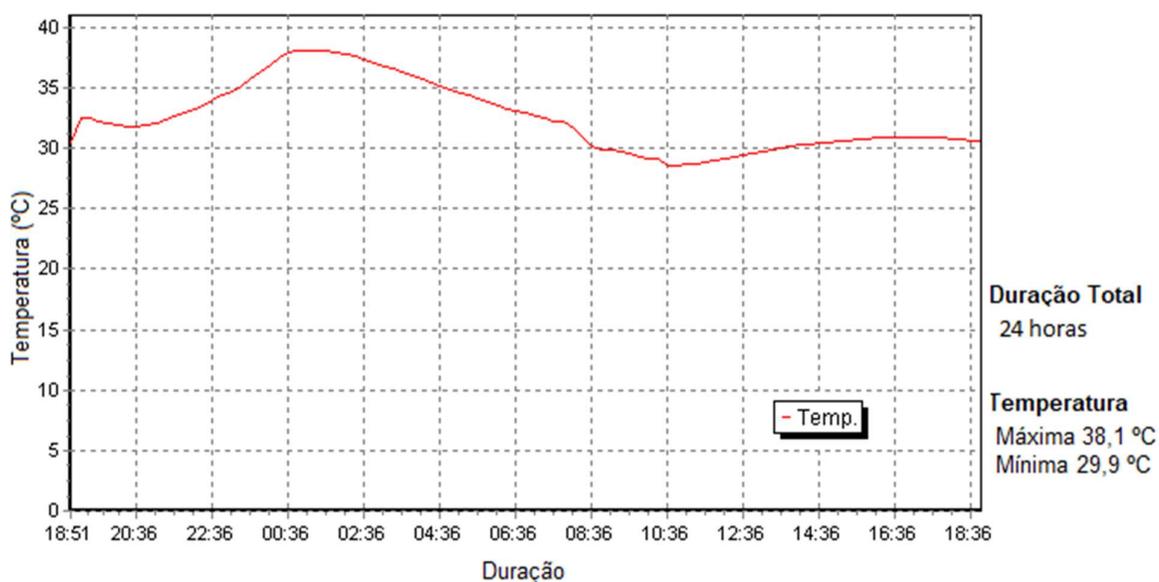
Fonte: elaborado pelo autor

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.

4.2.2.2 Análise com 24h de cura

Analisando 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 23 mostra a evolução da temperatura durante o período analisado.

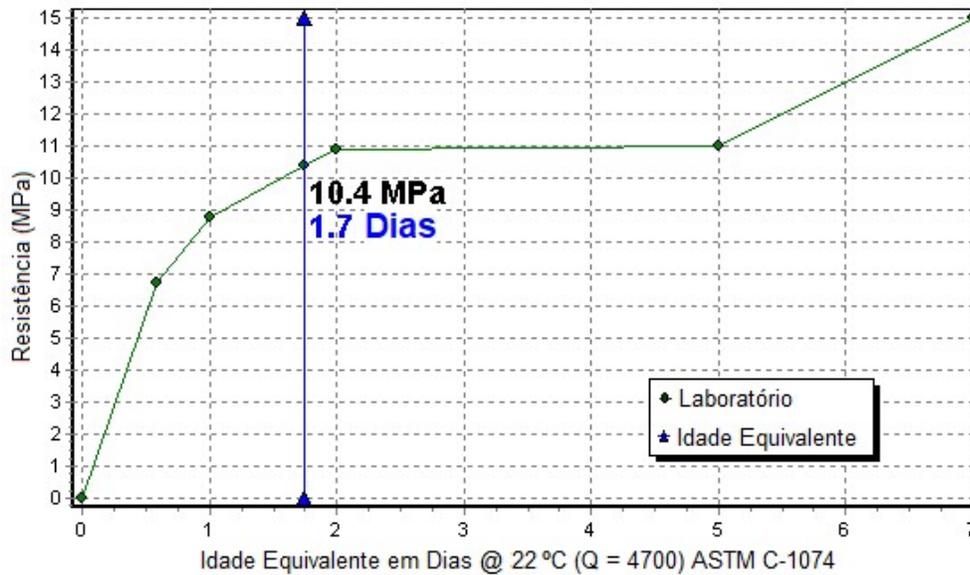
Figura 23 – Histórico Térmico às 24 horas – Parede



Fonte: elaborado pelo autor

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 24 apresenta a resolução comparativa para a Série 0C.

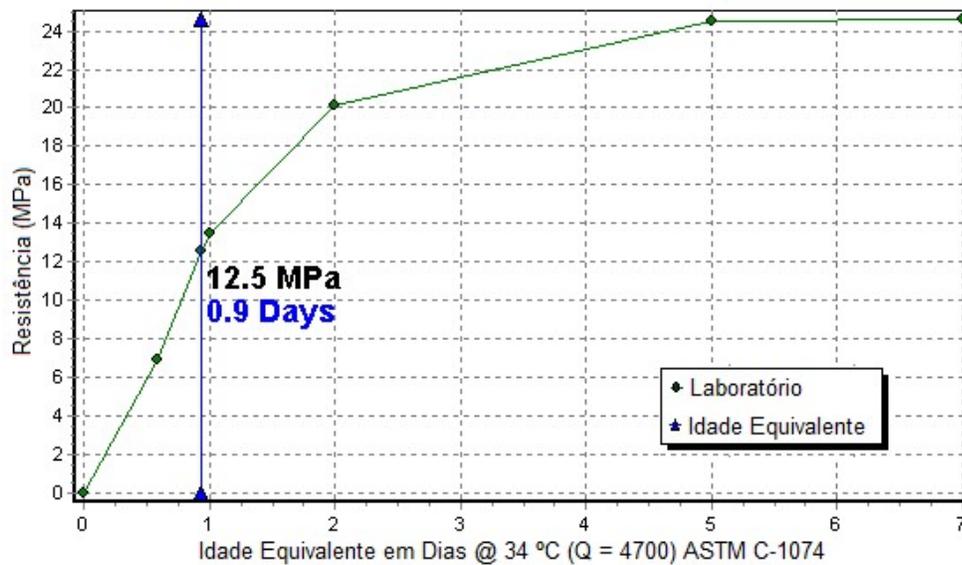
Figura 24 – Idade Equivalente em 24 horas – Correlação Série 0C



Fonte: elaborado pelo autor

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. Dando continuidade, a Figura 25 apresenta a série 20C.

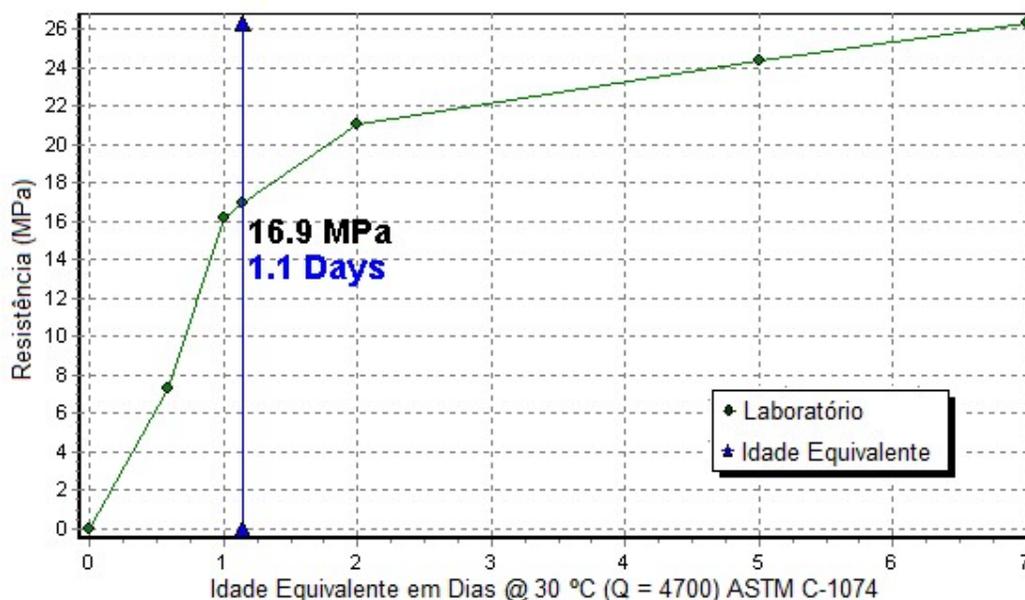
Figura 25 – Idade Equivalente em 24 horas – Correlação Série 20C



Fonte: elaborado pelo autor

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 o gráfico na Figura 25.

Figura 26 – Idade Equivalente em 24 horas – Correlação Série 40C



Fonte: elaborado pelo autor

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 26.

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.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 imbui 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,

e devem ser pareadas ambas as verificações para garantir a segurança e desempenho eficaz da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-ELATY, Metwally. Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model. **HBRC Journal**, 10th ed., p. 145-155, 2014.

AÏTCIN, Pierre-Claude; FLATT, Robert J. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. **Science and Technology of Concrete Admixtures**, Cambridge: Woodhead, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C-1074 – 11**: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken, 2011. 8p.

ARRIADA, Mikel Azkune. **Transmisión de cargas en la ejecución de edificios de hormigón: mediciones en obra y análisis teórico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra. San Sebastián. 2007

AMERICAN SEGMENTAL BRIDGE INSTITUTE – ASBI. Creve Couer Lake Memorial Park Bridge. **ASBI: Projects** [S.l.] 2000. Disponível em <<http://www.asbi-assoc.org/projects/project.cfm?articleID=65C7D4C2-F1F6-B13E-8D521AE1F4D73F48&categoryIDs=44A57F74-F1F6-B13E-81940961706FF0A9&searchString=&mainPageNumber=12&resultsPerPage=20>>. Acesso em 23 maio 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. 23p

_____. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 53p

_____. **NBR 16055**: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações — Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012. 35p

_____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991. 5p

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. 9p

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. 9p

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. 238p

_____. **NBR 6447**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006. 5p

_____. **NBR 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998. 8p

_____. **NBR 7584**: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012. 10p

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. 8p

_____. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006. 2p

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003. 6p

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006. 8p

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. 6p

BAGHERI-ZADEH, Seyed-Hassan; *et al.* Field Study of Concrete Maturity Methodology in Cold Weather. **Journal of Construction Engineering & Management**, v. 133, p. 827-835, 2007

BARROS, Mercia Maria S. Bottura; MELHADO, Silvio Burrattino. Recomendações para a produção de estruturas de concreto armado em edifícios. **Tecnologia da Construção Civil I**, 2006.

BARUKI, M.; FREITAS, A. G. P. De. Estudo Comparativo Entre Paredes de Concreto e Alvenaria Estrutural – Uma Visão Completa da Viabilidade dos Sistemas Comparative Study Between Concrete Shear Wall System and Structural Masonry - A Complete Vision of the Viability of the Systems A nova rea. **Congresso Brasileiro de Concreto**, 2017. v. 59, n. 1, p. 1–16.

BENAICHA, Mouhcine; BURTSHELL, Yves; ALAOUI, Adil Hafidi. Prediction of compressive strength at early age of concrete – Application of maturity. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 119-125, 2016.

BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M.; BALLIM, Y. Early-age properties, strength development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at different replacement ratios. **Construction and Building Materials**, 1 abr. 2012. v. 29, p. 533–540. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811002698>>. Acesso em: 27 out. 2017.

BOFANG, Z. **Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete.** [S.l.]: [s.n.], 2013.

BURG, Ronald. The Influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete. **Research and Development Bulletin RD113**, Portland Cement Association, 1996.

BÜYÜKYAĞCI, Arzu; TUZCU, Gözde; ARAS, Leyla. Synthesis of copolymers of methoxy polyethylene glycol acrylate and 2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid: Its characterization and application as superplasticizer in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 629-635, 2009.

CALDERÓN, Pedro A.; ALVARADO, Yezid A., ADAM, Jose M. A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings. **Engineering Structures**, v. 33, p. 1565-1575, 2011.

CARINO, Nicholas; LEW, Hai S. The maturity method: from theory to application. **Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey**, p. 125-144. Washington: American Society of Civil Engineers, 2001.

CARINO, Nicolas J. The Maturity Method. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed., p. 101-147. West Conshohocken: CRC Press, 2004

CARVALHO, A. G. **Energia de Ativação dos Concretos: Modelagem e Experimentação**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

CASTRO-GARRIDO, M. C., LÓPEZ-GARZÓN, M. C., ALVARADO, Y. A., CASTAÑO, J. O., GASCH, I. 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, 2016.

CHING, Francis D. K.; ONOUYE, Barry S.; ZUBERBUHLER, Douglas. **Sistemas Estruturais Ilustrados: Padrões, Sistemas e Projeto**, 2ª ed, Bookman Editora, 2015

COSTA, C. et al. Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**., Lisboa, v. 21, n. 3-4, p. 31-35, jul. 2009. Disponível em <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 07 de dezembro de 2017.

FONSECA, Eduardo Diniz; LIMA, Francisco de Paula Antunes. Novas tecnologias construtivas e acidentes na construção civil: o caso da introdução de um novo sistema de escoramento de formas de laje. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 32, n. 115, p. 53-67, 2007.

FORSA S.A. Enconfrados en aluminio Forsa PLUS. **Forsa: Soluções e Serviços Construção de Habitações**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.forsa.com.co/pt-br/construcao-de-habitacoes/formas-forsa-plus/>. Acesso em 11 out. 2017.

GALOBARDES, Isaac; CAVALARO, Sergio H.; GOODIER, Chris I.; AUSTIN, Simon; RUEDA, Ángel. Maturity method to predict the evolution of the properties of sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 357-369, 2015.

GOŁASZEWSKI, Jacek. Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance. **Construction and Building Materials journal**, v. 35, p. 586-596, 2012.

HAYWARD BAKER, Company. Dallas Cowboys Stadium. **Hayward Baker: a Keller Company**. [S.l.], 2009. Disponível em <<https://www.haywardbaker.com/projects/dallas-cowboys-stadium>>. Acesso em 23 maio 2018.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, p. 905-944, 2010

HERRERO, Cristina Vázquez; LAGE, Isabel Martínez; TEMBLEQUE, Félix Sánchez. A new procedure to ensure structural safety based on the maturity method and limit state theory. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 393-398, 2012.

JIN, Nan Ji; YEON, Kyu-Seok; MIN, Seung-Ho; YEON, Jaeheum. Using the Maturity Method in Predicting the Compressive Strength of Vinyl Ester Polymer Concrete at an Early Age. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2017.

KIM, Jin-Keun; HAN, Sang Hun; SONG, Young Chul. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1087-1094, 2002.

KIM, T.; RENS, K. L.; ASCE, A. M. Curing for Normal-Strength Concrete Mixes . II : Theoretical Study. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n., p. 735–741, 2008.

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. **Design and Control of Concrete Mixtures**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. p. 392, 2004.

MASSUDA, C.; MISURELLI, H. Como construir Paredes de concreto. **Revista Técnica**, 2009. v. Edição 147, p. 1–3. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/147/artigo285766-1.aspx>>.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. New York: McGraw-Hill, 2005.

McINTOSH, J. D. Electrical Curing of Concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol.1, p. 21-28, 1949

NEMER, P. C. Da C. **Avaliação do Sistema Construtivo Paredes de Concreto Moldado no Local à Luz das Normas Técnicas Vigentes**. [S.l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2016.

NURSE, R. W. Steam Curing of Concrete. **Magazine of Concrete Research**, Vol.1, nº 2, p. 79-88, 1949

ORIBE ALVA, Y. **Análisis De Costos Y Eficiencia Del Empleo De Encofrados Metálicos Y Convencionales En La Construcción De Edificios En La Ciudad De Lima**. [S.l.]: Universidade Privada Antenor Orrego, 2015

PACHECO, J.; HELENE, P. Controle da Resistência do Concreto. **Boletín Técnico 09 Alconpat**, 2013. p. 18.

PANE, I.; HANSEN, W. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. **Cement and Concrete Research**, 2005. v. 35, n. 6, p. 1155–1164.

PERES, L. D. P.; BARBOSA, M. P.; PINTO, R. C. De A. Aplicação do Método da Maturidade na avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas. **Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado**, 2005. v. 1, n. 1, p. 36.

PIGOZZO, B. N.; SERRA, S. M. B.; FERREIRA, M. De A. A industrialização na construção e o estudo de uma rede de empresas em obra de pré-fabricados em concreto armado. **SIMPEP**, 2005. v. 12.

POOLE, T.; HARRINGTON, P. J. An Evaluation of the Maturity Method (ASTM C 1074) for Use in Mass Concrete. **Technical Report SL-96-16**, 1996.

SALVADOR, Paulo Fernando. **Investigação Teórica e Experimental da Transferência de Cargas Entre Pavimentos de Concreto Escorados**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

SAUL, A. G. A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. **Magazine of Concrete Research**, Vol. 2, n. 6, p. 127-140, 1951

SCHACKOW, A. *et al.* Temperature variation in concrete samples due to cement hydration. **Applied Thermal Engineering**, 2016. v. 103, p. 1362–1369. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.048>>.

SILVA FILHO, L. C. P. Da; HELENE, P. Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, 2011.

SOFI, M.; MENDIS, P. A.; BAWEJA, D. Estimating early-age in situ strength development of concrete slabs. **Construction and Building Materials**, 2012. v. 29, p. 659–666. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.019>>.

SOUTSOS, M. *et al.* Effect of in situ temperature on the early age strength development of concretes with supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, 2016. v. 103, p. 105–116. Disponible em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.034>>.

TIKALSKY, P. E.; TEPKE, D.; CAMISA, S. **Maturity Method Demonstration** Final Report. 2003. p. 61.

TOPÇU, İ. B.; KARAKURT, C.; ALTUN, F. Using the Maturity Method in Concrete Produced. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2007. v. 19, n. NO.7, p. 569–575.

VARGAS, Yezid Alexander Alvarado. **Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados de hormigón in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2014.

WALLER, V. *et al.* Using the maturity method in concrete cracking control at early ages. **Cement and Concrete Composites**, 2004. v. 26, n. 5, p. 589–599.

WAWRZEŃCZYK, J.; LECH, M. Estimation, based on the maturity function, of the strength of early age concrete cured at elevated temperature. **Structure and Environment**, 2015. p. 123–131.

WU, D.; FALL, M.; CAI, S. J. Coupling temperature, cement hydration and rheological behaviour of fresh cemented paste backfill. **Minerals Engineering**, 2013. v. 42, p. 76–87.

YIKICI, Tahsin Alper; CHEN, Hung-Liang (Roger). Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 802-812, 2015.

ZAKOUTSKY, J.; TYDLITAT, V.; CERNY, R. Effect of temperature on the early-stage hydration characteristics of Portland cement: a large-volume calorimetric study. **Construction and Building Materials**, 2012. v. 36, p. 969–987.