

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Jorge Alle Sadalla Ismael

**Utilização de Ensaios Não-Destrutivos no Controle Tecnológico de Execução de  
Elementos Pré-Fabricados**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina para a  
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.  
Orientador: Prof. Roberto Caldas de  
Andrade Pinto, PhD

Florianópolis

2016

Jorge Alle Sadalla Ismael

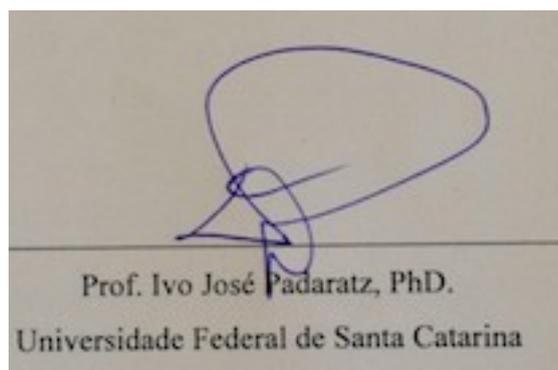
**Utilização de Ensaios Não-Destrutivos no Controle Tecnológico de Execução de Elementos  
Pré-Fabricados**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil.

Florianópolis, 23 de Novembro de 2016.

Prof. Luiz Alberto Gómez, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Prof<sup>a</sup>. Ângela do Valle, Dr<sup>a</sup>.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Carlos Cavalheiro

Dedico este trabalho aos meus pais.

A minha mãe, Vânia Julia Sadalla Ismael e ao meu pai, Pedro Cândido Ismael.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as graças em minha vida.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e me proporcionaram tudo, principalmente, amor e compreensão.

A minha vó Germana, por sempre me acalmar com a sua experiência de vida.

Vale lembrar de todo o apoio e carinho de minhas irmãs. Priscila e Thomaz, me inspirando com simpatia e alegria. Mariana me ajudando com a sua determinação e experiência, em diversas fases importantes da minha vida.

Ao meu orientador, Professor Roberto, por ter aceitado me orientar neste trabalho e por acreditado em mim, ainda na iniciação científica. Muito obrigado!

Não posso deixar de agradecer a Professora Ângela, por sua prontidão em aceitar ser membro da banca examinadora e de despertar em mim, o interesse em estruturas de madeira.

Incontestável gratidão ao Professor Ivo, por ter me ajudado na minha formação, por ter aceitado fazer parte da banca examinadora e de certa forma a me orientar nesta reta final.

Ao Engenheiro Carlos, por sua disponibilidade e ajuda durante as diversas etapas deste trabalho.

Ao Gustavo Menina, irmão de sangue que eu não tive, mas que a vida me deu. Sem ele, não conseguiria realizar este trabalho.

Aos meus grandes amigos, Wicent Cordeiro, Pedro Bellei e Marcel Meira, pelos momentos de alegria, descontração e do apoio durante esses anos.

Aos meus amigos de Ribeirão, que mesmo longe sempre me apoiaram nos momentos em que precisei. Valeu Caião, Mardureza, Floripa, Dr, Fredão, Lê e Renato Barbieri.

À UFSC e aos professores que se dedicam a propiciar um ensino de qualidade.

A todos os demais que fizeram parte na realização deste sonho.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

## RESUMO

Os elementos pré-moldados de concreto têm sido utilizados cada vez mais no Brasil e no mundo. O seu uso em estruturas de médio e grande porte como vigas de pontes, de viadutos, de passarelas, entre outros, cresceu devido ao fato de proporcionar maior economia financeira, agilidade, racionalização e industrialização quando comparado a técnicas convencionais de concreto armado. Nestes elementos, necessita-se de um constante monitoramento de suas propriedades mecânicas, principalmente da resistência à compressão axial, a fim do mesmo apresentar segurança no momento da liberação do elemento ao içamento ou a protensão de sua armadura. Usualmente este monitoramento é realizado por ensaios destrutivos. Este trabalho analisa a implementação de ensaios não-destrutivos no monitoramento da resistência destes elementos pré-fabricados. Dentre os métodos de ensaio não-destrutivo utilizou-se do ultrassom e do Método da Maturidade. Uma mistura de concreto utilizado por uma empresa de pré-fabricados da região foi analisada a fim de correlacionar as suas características mecânicas a ensaios não-destrutivos. Este mesmo concreto foi submetido a ensaios ultrassônicos contínuos por 24 horas. Para esta mesma mistura e seguindo os procedimentos da ASTM C 1074 (2011), foi possível determinar a Energia de Ativação do concreto a partir da resistência à compressão e por método alternativo de velocidade de pulso ultrassônico. Com isso foi possível traçar as curvas de maturidade, para a mistura em questão. Com o resultado do trabalho é possível estimar a resistência do concreto via ultrassom, assim como determinar o crescimento da velocidade de pulso ultrassônico nas primeiras idades da mistura e verificar as altas resistências iniciais requeridas nos elementos pré-fabricados. As Energias Aparentes de Ativação obtidas, para a mistura em estudo, foram semelhantes para ambos os métodos e as suas respectivas curvas de maturidade forneceram boa estimativa da resistência à compressão.

**PALAVRAS CHAVE:** Pré-moldado; Ensaios não-destrutivos; Ultrassom.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Elemento Pré-Fabricado.</i>	32
<i>Figura 2- Elemento pré-moldado de seção parcial.</i>	33
<i>Figura 3 – Viga pré-fabricada de uma ponte esperando a protensão de seus cabos, no detalhe bainha por onde a nata de cimento percorre.</i>	34
<i>Figura 4 – Cone de Abrams utilizado no ensaio de Slump Flow.</i>	42
<i>Figura 5 - Concretagem realizada por meio de caçamba.</i>	43
<i>Figura 6 – Caçamba própria para uso com CAA. A- vista completa. B- Detalhe da abertura.</i>	43
<i>Figura 7 - A lei de maturidade de Saul.</i>	50
<i>Figura 8 - O conceito de Energia de Ativação segundo Arrhenius.</i>	52
<i>Figura 9 – Esquema de funcionamento do método de Ultrassom.</i>	59
<i>Figura 10 - Equipamento de ultrassom e os transdutores de 54 kHz e 200 kHz.</i>	60
<i>Figura 11 - Tipos de transmissão. (a)-Transmissão Direta; (b)- Transmissão Indireta; (c)- Transmissão semi-direta.</i>	60
<i>Figura 12 - Dispositivo utilizado para acompanhar a velocidade do pulso ultrassônico em concretos com idades iniciais.</i>	63
<i>Figura 13 - Fluxograma de metodologia.</i>	66
<i>Figura 14 – Moldes metálicos utilizados para moldar a argamassa.</i>	75
<i>Figura 15 – Câmara climática programada para 40°C. No canto inferior direito o termostato utilizado para realizar o controle da temperatura.</i>	76
<i>Figura 16 – Data-logger da marca Novus que realizou todo o controle da temperatura.</i>	77
<i>Figura 17 – Corpo de prova de argamassa sendo ensaiado à compressão e outros dois testemunhos já ensaiados.</i>	78
<i>Figura 18 – Ensaio ultrassônicos no corpo de prova cúbico de argamassa.</i>	79
<i>Figura 19 – Corpos de prova moldados</i>	80
<i>Figura 20 – Ensaio de compressão axial em um corpo de prova de concreto.</i>	81
<i>Figura 21 - Ensaio ultrassônico em corpo de prova cilíndrico.</i>	81
<i>Figura 22 - Transdutores acoplados ao dispositivo utilizado no ensaio com concreto em estado fresco.</i>	82
<i>Figura 23 – Evolução da resistência à compressão em argamassa curada à temperatura ambiente.</i>	84
<i>Figura 24 - Evolução da VPU em argamassa curada à temperatura ambiente.</i>	84
<i>Figura 25 – Evolução da temperatura na caixa com temperatura ambiente.</i>	85
<i>Figura 26 - Evolução da resistência à compressão em argamassa curada à temperatura ambiente.</i>	86

<i>Figura 27 - Evolução da VPU em argamassa curada à temperatura de 40°C.</i>	87
<i>Figura 28 - Evolução da temperatura no ambiente a 40°C.</i>	87
<i>Figura 29 – Ganho da resistência à compressão para as duas temperaturas de cura.</i>	89
<i>Figura 30 - Evolução da VPU para as argamassas curadas à temperatura de 40°C e temperatura ambiente.</i>	89
<i>Figura 31 – Evolução com a idade da resistência à compressão do CAA.</i>	90
<i>Figura 32 - Evolução com a idade da VPU do CAA.</i>	91
<i>Figura 33 – Velocidade de pulso ultrassônica e resistência à compressão.</i>	91
<i>Figura 34 – Gráfico de Arrhenius para compressão.</i>	92
<i>Figura 35 – Gráfico de Arrhenius para a VPU.</i>	92
<i>Figura 36 – Evolução da temperatura em função do tempo.</i>	93
<i>Figura 37 – Relação ente idade equivalente e idade real para compressão.</i>	94
<i>Figura 38 - Curva de maturidade para resistência à compressão.</i>	94
<i>Figura 39 - Curva de maturidade para VPU em corpo de prova cilíndrico e cúbico.</i>	95
<i>Figura 40 – Evolução da velocidade com o tempo nas primeiras 24 horas.</i>	96
<i>Figura 41 – Evolução da velocidade em função do tempo.</i>	97
<i>Figura 42 – Medidas do corpo de prova de argamassa.</i>	109
<i>Figura 43 – Correlação entre a resistência necessária para desforma, içamento e pós-tensão, e idade equivalente.</i>	114

## LISTA DE QUADROS

*Quadro 1 - Vantagens e desvantagens dos Pré-moldados.* \_\_\_\_\_ 31

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Resistência mínima necessária para execução de diferentes serviços no elemento pré-fabricado de estudo.</i>	48
<i>Tabela 2 - Valores de Energia Aparente de Ativação por diversos autores para cimentos brasileiros.</i>	55
<i>Tabela 3 - Traço do CAA utilizado.</i>	68
<i>Tabela 4 - Traço da Argamassa.</i>	68
<i>Tabela 5 - Propriedades físicas do cimento.</i>	69
<i>Tabela 6 - Propriedades químicas do cimento.</i>	69
<i>Tabela 7 - Caracterização da Brita 0.</i>	70
<i>Tabela 8 - Caracterização da Brita 1.</i>	71
<i>Tabela 9 – Caracterização da Areia Natural.</i>	72
<i>Tabela 10 - Caracterização da Areia de Britagem.</i>	73
<i>Tabela 11 – Resultados obtidos para argamassa curada na temperatura ambiente.</i>	83
<i>Tabela 12 – Temperatura média ambiente.</i>	85
<i>Tabela 13 - Resultados obtidos para argamassa curada na temperatura de 40°C.</i>	86
<i>Tabela 14 – Temperatura média 40°C.</i>	88
<i>Tabela 15 – Valores de resistência à compressão e de VPU para as argamassas curadas à temperatura ambiente e de 40°C.</i>	88
<i>Tabela 16 – Evolução da resistência à compressão axial e velocidade de pulso ultrassônico com a idade do CAA.</i>	90
<i>Tabela 17 – Valores da Energia Aparente de Ativação para o CAA, pelos métodos da compressão e da VPU.</i>	93
<i>Tabela 18 – Resistência à compressão e VPU com suas respectivas Idades Reais e Equivalentes, com a temperatura de referência de 25°C.</i>	95
<i>Tabela 19 – Valores mínimos de VPU para diferentes serviços.</i>	97
<i>Tabela 20 – Idades Equivalentes para liberação de diferentes serviços na temperatura de 25°C.</i>	98
<i>Tabela 21 – Resultados dos ensaios à compressão na argamassa curada à temperatura ambiente.</i>	110
<i>Tabela 22 – Resultados dos ensaios ultrassônicos nas argamassas curadas à temperatura ambiente.</i>	111
<i>Tabela 23 – Resultados dos ensaios à compressão na argamassa curada à temperatura de 40°C.</i>	112
<i>Tabela 24 – Resultados dos ensaios ultrassônicos nas argamassas curadas à temperatura de 40°C.</i>	113



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**a/c:** Relação água/cimento

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ACI:** *American Concrete Institute*

**ARI:** Alta Resistência Inicial

**ASTM:** *American Society for Testing and Materials*

**CAA:** Concreto Auto-Adensável

**E<sub>a</sub>:** Energia Aparente de Ativação

**EFNARC:** *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*

**EPG:** *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*

**f<sub>c</sub>:** Resistência à compressão axial do concreto

**GPEND:** Grupo de Pesquisa em Ensaios Não-Destrutivos

**LEE:** Laboratório de Experimentação em Estruturas

**LMCC:** Laboratório de Materiais de Construção Civil

**PCI:** *Precast/ Prestressed Concrete Institute*

**SCC:** *Self-Compacting Concrete*

**t<sub>e</sub>:** Idade Equivalente na temperatura de referência

**VPU:** Velocidade de Pulso Ultrassônico

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	<b>26</b>
1.1.1 Objetivo Geral.....	26
1.1.2 Objetivos Específicos .....	26
<b>1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>26</b>
<b>2. INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1 DEFINIÇÃO</b> .....	<b>29</b>
<b>2.2 PRÉ-FABRICADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3 HISTÓRICO</b> .....	<b>29</b>
<b>2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA PREMOLDAGEM</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5 TIPOS DE PRÉ-MOLDADOS</b> .....	<b>31</b>
2.5.1 Pré-Fabricado .....	31
2.5.2 Pré-Moldado de canteiro.....	32
2.5.3 Pré-Moldado de Seção Completa .....	32
2.5.4 Pré-Moldado de Seção Parcial.....	32
<b>2.6 TIPOS DE ARMADURA</b> .....	<b>33</b>
2.6.1 Armadura Não Protendida .....	33
2.6.2 Armadura Protendida .....	33
2.6.2.1 Armadura Pré-Tracionada .....	34
2.6.2.2 Armadura Pós-Tracionada com Aderência Posterior.....	34
2.6.2.3 Armadura Pós-Tracionada sem Aderência Posterior .....	35
<b>2.7 MATERIAIS</b> .....	<b>35</b>
2.7.1 Concreto para indústria de pré-fabricados .....	35
2.7.1.1 Definição de Concreto auto-adensável .....	36
2.7.1.2 Histórico .....	36
2.7.1.3 Desenvolvimento do Concreto auto-adensável .....	36
2.7.1.4 Produção do CAA .....	37
2.7.2 Constituintes do CAA .....	37
2.7.2.1 Cimento .....	37
2.7.2.2 Aditivos .....	38
2.7.2.3 Agregados.....	38
2.7.3 Dosagem do CAA .....	39
2.7.4 Cuidados na produção e aplicação do CAA .....	40
2.7.5 Controle de Qualidade no CAA .....	41
2.7.5.1 <i>Slump Flow</i> .....	41
<b>2.8 SEQUÊNCIA EXECUTIVA DA CONCRETAGEM</b> .....	<b>42</b>
<b>2.9 FÔRMAS</b> .....	<b>43</b>
<b>2.10 ADENSAMENTO</b> .....	<b>44</b>
<b>2.11 CURA</b> .....	<b>45</b>
<b>2.12 ACABAMENTO</b> .....	<b>45</b>
<b>2.13 TRANSPORTE</b> .....	<b>46</b>
<b>2.14 ARMADURAS</b> .....	<b>46</b>
2.14.1 Armaduras Passivas .....	46
2.14.2 Armaduras Ativas .....	46
<b>2.15 CRITÉRIOS PARA LIBERAÇÃO DO ELEMENTO PRÉ-FABRICADO</b> .....	<b>47</b>
<b>3. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>49</b>

<b>3.2 MÉTODO DA MATURIDADE .....</b>	<b>49</b>
3.2.1 Descrição do Método .....	49
3.2.2 Funções Maturidade .....	50
3.2.3 Função FHP .....	51
3.2.3.1 Energia de Ativação ( $E_a$ ) .....	52
3.2.3.2 Obtenção da Energia de Ativação.....	53
<b>3.3 CORRELAÇÃO ENTRE MATURIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</b>	<b>56</b>
<b>3.4 APLICAÇÕES DO MÉTODO .....</b>	<b>57</b>
<b>3.5 ULTRASSOM .....</b>	<b>57</b>
3.5.1 O método .....	58
3.5.2 Aplicações do Ultrassom.....	61
3.5.3 Comprimento de propagação de onda e frequência do transdutor-emissor .....	61
3.5.4 Ultrassom no Estado Fresco .....	62
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1. FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE TRABALHO .....</b>	<b>65</b>
<b>4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....</b>	<b>66</b>
4.2.1 Ultrassom .....	66
4.2.2 Data-Logger e Termopares.....	67
4.2.3 Prensa .....	67
<b>4.3 TRAÇO DE ESTUDO .....</b>	<b>67</b>
4.3.1 Caracterização dos Materiais Utilizados .....	68
<b>4.4 PROGRAMA DE ENSAIOS .....</b>	<b>73</b>
4.4.1 Obtenção da Energia Aparente de Ativação .....	74
4.4.1.1 Argamassas .....	74
4.4.1.2 Fôrmas de Argamassa.....	74
4.4.1.3 Câmaras Climáticas .....	75
4.4.1.4 Controle da Temperatura .....	76
4.4.1.5 Ensaio à compressão .....	77
4.4.1.6 Ensaio ultrassônicos .....	78
4.4.2 Curvas de Maturidade .....	79
4.4.2.1 Produção do CAA.....	79
4.4.2.2 Ensaio à Compressão .....	80
4.4.2.3 Ensaio Ultrassônicos .....	81
4.4.3 Obtenção da velocidade de onda ultrassônica no concreto ainda em estado fresco	82
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1 ENSAIOS EM ARGAMASSA.....</b>	<b>83</b>
5.1.1 Argamassa em temperatura ambiente .....	83
5.1.1.1 Temperatura .....	84
5.1.2 Argamassa em temperatura de 40° C .....	85
5.1.2.1 Temperatura .....	87
5.1.3 Análise em conjunto.....	88
<b>5.2 ENSAIOS NO CAA .....</b>	<b>89</b>
<b>5.3 ENERGIA DE ATIVAÇÃO E CURVAS DE MATURIDADE .....</b>	<b>91</b>
<b>5.4 VELOCIDADE DO ULTRASSOM – MÉTODO CONTÍNUO.....</b>	<b>96</b>
<b>5.5 CORRELAÇÃO ENTRE ETAPAS EXECUTIVAS- ULTRASSOM.....</b>	<b>97</b>
<b>5.6 CORRELAÇÃO ENTRE ETAPAS EXECUTIVAS- IDADE EQUIVALENTE... 98</b>	
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>99</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>
<b>8. APÊNDICE A.....</b>	<b>109</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais as empresas buscam alcançar uma maior produtividade e menores custos não abrindo mão da qualidade de seus produtos, esta realidade também esta presente nas empresas de construção civil.

A utilização de elementos pré-moldados em diversas obras de engenharia vem se tornando cada vez mais comum ao passo que se analisam as qualidades construtivas e de desempenho deste tipo de estrutura. Mesmo semelhante às técnicas empregadas ao concreto convencional, apresenta diversas particularidades, principalmente em relação às condições de trabalho, rapidez e racionalização.

Para se obter um produto com elevada qualidade o seu processo de fabricação deve ser controlado minuciosamente. Um ponto importante para o desenvolvimento desta qualidade está relacionado com a resistência à compressão do concreto, que de tal maneira determina os períodos das distintas etapas construtivas que o elemento passa. A negligencia do valor mínimo desta resistência para cada diferente etapa, acarretará ao fim do processo, danos irreparáveis ou podendo até ocasionar a ruína da peça.

Um processo de controle possível e comum de se executar é a utilização de corpos de prova cilíndricos de concreto destinados a ensaios de resistência à compressão axial. Porém este método não representa a resistência real da estrutura, além de fornecer resultados com idades pré-estabelecidas, gerando desperdício de material e resíduos da construção civil.

Os ensaios não-destrutivos surgem como uma maneira de contornar esta situação, fornecendo resultados confiáveis e eficientes na avaliação das propriedades mecânicas e estruturais utilizadas no controle tecnológico, uma vez que não há necessidade de extrair testemunhos ou realizar ações destrutivas nas estruturas afim de estimar as suas condições. O método do ultrassom é um dos ensaios mais difundidos e utilizados. Nos últimos anos diversas pesquisas comprovaram a sua eficiência em determinar as condições do concreto utilizado em estruturas, desde as idades iniciais até o seu estado endurecido. O Método da Maturidade também surge como uma maneira de grande potencial em modelar o comportamento de propriedades do concreto influenciadas pela sua temperatura de cura.

Nas indústrias de pré-fabricados pouco se utiliza de ensaios não-destrutivos para analisar o comportamento do concreto, a obtenção de correspondências entre propriedades dos elementos (resistência e influência da temperatura de cura) e ensaios ultrassônicos. Método que pode garantir futuros melhoramentos no controle da execução de elementos pré-fabricados, objetivo principal deste trabalho.

Sendo assim, este trabalho irá utilizar de ensaios não-destrutivos para monitorar o comportamento de um traço de concreto utilizado em diversos elementos pré-fabricados e assim poder avaliar as suas propriedades mecânicas correlacionadas a ensaios ultrassônicos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o emprego de ensaios não-destrutivos no monitoramento de propriedades do concreto, aplicado em elementos pré-fabricados, por meio do ultrassom e do Método da Maturidade.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Em razão a atender o objetivo geral, os objetivos específicos são:

- A. Avaliar um traço de concreto utilizado por uma empresa de pré-fabricados da região;
- B. Através de procedimentos normalizados (ASTM C 1074) e de técnica alternativa, ultrassom, estimar valores da Energia Aparente de Ativação para a mistura;
- C. Estudar o comportamento deste concreto em idades iniciais através de ensaios ultrassônicos;
- D. Estudar a correlação entre ultrassom e resistência à compressão do concreto para várias idades;
- E. Alcançar uma correlação entre o ultrassom e as etapas executivas dos elementos pré-fabricados.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos, distribuídos da seguinte forma:

No Capítulo 1, **Introdução**, faz-se uma contextualização geral do assunto tratado, além de apresentar os objetivos e a estruturação deste trabalho.

No Capítulo 2, serão apresentados os **conceitos fundamentais** de pré-moldados com um breve histórico dos mesmos. Apresentam-se os materiais constituintes nestes elementos suas

principais características e controle de qualidade. Ainda são apresentados os processos que envolvem a produção de um elemento pré-fabricado.

No Capítulo 3 demonstram-se os **ensaios não-destrutivos** com enfoque na velocidade de pulso ultrassônico e no Método da Maturidade aplicados à indústria de elementos pré-fabricados.

No Capítulo 4, **Materiais e Métodos**, detalham-se o programa de ensaios destinado à coleta e análise de dados, a metodologia empregada para atingir os objetivos do trabalho e os materiais e equipamentos utilizados.

No Capítulo 5, **Resultados**, são apresentados os resultados obtidos de cada ensaio para o concreto em questão, além da análise destes resultados a fim de se avaliar o desempenho dos métodos empregados.

No Capítulo 6, **Considerações finais**, apresentam-se as considerações finais sobre a pesquisa.

No Capítulo 7, **Referências Bibliográficas**, será apresentada toda a lista de referências bibliográficas utilizadas como base neste trabalho.



## 2. INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS

### 2.1 DEFINIÇÃO

De acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2006) – Pré-Moldado é um elemento executado fora do local de utilização definitiva na estrutura, com controle de qualidade. Já o termo Pré-Fabricado, é um elemento Pré-Moldado, porém executado de forma industrial em instalações permanentes de empresa destinada para este fim.

Já a definição de pré-fabricados para Koncz: “... *pré-fabricação é um método industrial de construção em que os elementos fabricados, em grandes séries, por métodos de produção em massa, são montados na obra, mediante equipamentos e dispositivos de elevação*”, esta definição foi apresentada por Ordóñez em seu livro *Prefabricación: teoría y práctica* em 1974.

### 2.2 PRÉ-FABRICADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Considerada uma indústria atrasada quando comparada com outras atividades industriais, a construção civil paga este preço por apresentar, de uma maneira geral, baixo controle de qualidade, baixa produtividade, elevado desperdício de material e uma certa falta de planejamento (EL DEBS, 2000).

Com o intuito de reduzir e amenizar os agentes causadores deste atraso, um procedimento essencial é a racionalização da construção civil atrelada à sua industrialização, ainda que estes conceitos são distintos, mas podem ser relacionados entre si. A racionalização e a industrialização fizeram com que os elementos pré-moldados ganhassem muito espaço nos últimos anos. Do ponto da racionalização, os elementos pré-moldados promovem um canteiro de obras mais limpo e organizado, geram um menor desperdício e apresentam um maior nível de planejamento. No quesito de industrialização, promovem uma maior velocidade construtiva, principalmente em obras de médio e grande porte (KATO; SERRA, 2012) além de propiciarem um maior controle de qualidade e uma mão-de-obra mais valorizada (EL DEBS, 2000).

### 2.3 HISTÓRICO

É difícil precisar quando a construção civil passou a utilizar a pré-fabricação. Segundo Vasconcelos (2002), o próprio surgimento do concreto armado ocorreu com a pré-moldagem, fora do local definitivo. Curiosamente, as primeiras peças de concreto armado que se tem notícia foram elementos pré-moldados, em 1848. Peças pré-moldadas foram juntadas de forma a construir um

barco, o barco de Lambot. No ano seguinte, em 1849, o concreto armado passa a ser utilizado na fabricação de vasos pré-moldados, modelo patenteado por Monier.

Acredita-se que a primeira construção com elementos pré-moldados tenha ocorrido na França durante a construção do Cassino de Biarritz em 1891, onde foram utilizadas vigas do tipo pré-moldadas (EL DEBS, 2000).

O período entre o final do século XIX e o início do século XX ficou marcado pelo crescente emprego do concreto armado e conseqüentemente de elementos pré-moldados (KNOCZ, 1966). A exemplo disto, em 1895, na Inglaterra foi construída a primeira estrutura apertada com concreto pré-moldado. Nesta época, nos Estados Unidos começam a aparecer os elementos de grandes dimensões utilizados para coberturas, em 1900. Também nos Estados Unidos, em 1905, foram utilizados elementos pré-moldados nos pisos de um edifício de quatro andares. No ano seguinte, na Europa, surgem os primeiros elementos que podem ser considerados pré-fabricados, vigas “Visintini”, que são vigas treliça.

No ano de 1907, aproximadamente 12 anos após o primeiro emprego de elementos pré-moldados em estruturas, a empresa de Thomas Alva Edson, a Edson Portland Co, executa no canteiro de obras todas as peças para a execução de um edifício industrial nos Estados Unidos. Neste mesmo ano aparecem as primeiras construções do tipo “*Tilt-up*”, com paredes montadas ainda em solo antes de serem levantadas verticalmente.

No Brasil, o emprego de elementos pré-moldados se deu por volta de 1925, quando as estacas utilizadas na fundação do Jockey Club do Rio de Janeiro foram do tipo pré-moldado.

A industrialização e expansão dos pré-moldados sucederam somente após a Segunda Guerra Mundial, durante a reconstrução da Europa (ORDONÉZ, 1974). A construção com pré-fabricados foi utilizada pela sua maior velocidade comparada aos métodos convencionais, uma vez que os elementos podem ser produzidos enquanto a obra ainda está na etapa de execução das fundações. Esta vantagem foi fundamental para sua aplicação na Europa, principalmente, na construção de residências, pontes e galpões. O uso da pré-moldagem se deu devido à falta de mão-de-obra, à necessidade da construção em grande volume e rapidez além do maior conhecimento do concreto protendido (EL DEBS, 2000).

O cenário atual na Europa e nos Estados Unidos não é o mesmo encontrado no pós-guerra. A construção com pré-moldados ainda é expressiva, mas não chega a ser igual aos anos posteriores à Segunda Guerra Mundial. Já no Brasil o emprego desta técnica vem aumentando, porém ainda é subutilizada. El Debs (2000) destaca que algumas das razões para esta subutilização são o sistema tributário brasileiro que penaliza as indústrias de pré-fabricados, a vulnerabilidade econômica que acaba por dificultar o planejamento a longo prazo e um certo conservadorismo na área da construção civil.

## 2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA PREMOLDAGEM

Tanto as vantagens como as desvantagens na utilização dos pré-moldados aparecem nos campos técnicos, econômicos e sociais. A seguir é apresentado o Quadro 1 que reúne vantagens e desvantagens na utilização dos pré-moldados. Este quadro foi elaborado a partir de aspectos reunidos de uma pesquisa literária.

**Quadro 1** - Vantagens e desvantagens dos Pré-moldados.

Supostas Vantagens	Supostas Desvantagens
<b>Características Técnicas</b>	
Facilidade na elaboração de projeto, em especial na resolução de detalhes	Falta de monolitismo da construção, especialmente nas regiões sísmicas
Melhoria da qualidade dos trabalhos realizados mecanicamente, em comparação com os manuais	Necessidade de superdimensionar certos elementos, considerando situações desfavoráveis durante o transporte ou na montagem
Necessidade de menos juntas de dilatação que na construção tradicional	Devem ser respeitados os gabaritos de transporte
Facilidade para realizar o controle de qualidade	Grandes dificuldades para modificações nas distribuições dos espaços primitivos
Melhor aproveitamento das seções resistentes	Inadaptação à topografia e aos tipos de terrenos
Possibilidade de evitar as interrupções da concretagem	
Possibilidade de recuperação de elementos ou partes da construção em certas desmontagens	
Desaparecimento quase total do cimbramento e da fôrmas	
<b>Características Econômicas</b>	
Evita a improvisação	É, em geral, mais cara que a tradicional
Ocasiona economia de tempo	O transporte dos produtos é mais caro que o das matérias-primas dos componentes
Produz economia reduzindo consideravelmente os custos	Necessita de investimentos, em geral, consideráveis, para iniciar a pré-fabricação
É mais apta para o cumprimento dos controles de recepção	Necessidade uma demanda de volume adequada
É uma valiosa ferramenta de planificação	
<b>Características Sociais</b>	
Diminuem o número de acidentes de trabalho	Produz desemprego
É o meio mais real e efetivo que se tem ao alcance para tentar reduzir o déficit mundial de construção	Aparecem para os trabalhadores os inconvenientes próprios das linhas de produção
Trabalho protegido das intempéries climáticas	Especializa em excesso, incapacitando os trabalhadores para outros tipos de trabalho
Eleva a remuneração dos trabalhadores	

Fonte: Adaptado de El Debs (2000).

## 2.5 TIPOS DE PRÉ-MOLDADOS

### 2.5.1 Pré-Fabricado

Os elementos pré-fabricados, conforme a NBR-9062 (ABNT, 2006), são elementos pré-moldados executados em uma empresa permanente e especializada neste método. As suas características, como tamanho, diâmetro, tipo dependem fundamentalmente da estrutura da empresa,

assim como a produtividade da mesma. Muitas empresas não investem em maquinário, fôrmas, entre outros meios de produção uma vez que são altos investimentos e seu sucesso ou fracasso está ligado diretamente à situação econômica do país. Na Figura 1, apresenta-se um exemplo de elemento pré-fabricado:

**Figura 1** - Elemento Pré-Fabricado.



Fonte: Autorial Própria.

### 2.5.2 Pré-Moldado de canteiro

O pré-moldado de canteiro é um elemento produzido em obra ou em local próximo, sendo necessárias estruturas provisórias para sua execução. Quando fabricado em canteiro a produtividade é menor se comparada às empresas especializadas nos pré-fabricados. Outro destaque, este tipo de elemento tem maior facilidade de ser transportado, não tendo custos com impostos de produção e circulação (EL DEBS, 2000). Pode-se encontrar este tipo de elemento em obras de grande porte, como portos, pontes etc.

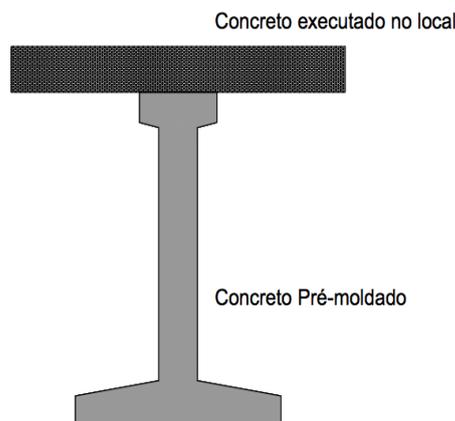
### 2.5.3 Pré-Moldado de Seção Completa

O pré-moldado de seção completa é o elemento que é concluído totalmente fora do local de utilização. Sua seção resistente é concluída ainda no local de execução do elemento.

### 2.5.4 Pré-Moldado de Seção Parcial

Este tipo de pré-moldado forma o elemento composto, ou seja, nem toda a seção resistente é executada fora do seu local definitivo. Um concreto moldado no local completa a sua seção resistente. É interessante notar que este tipo de técnica facilita as ligações e ainda promove à estrutura um certo monolitismo (EL DEBS, 2000). A Figura 2 ilustra um elemento pré-moldado de seção parcial:

**Figura 2-** Elemento pré-moldado de seção parcial.



**Fonte:** Autoria Própria.

## 2.6 TIPOS DE ARMADURA

### 2.6.1 Armadura Não Protendida

As armaduras presentes nos elementos pré-moldados são praticamente as mesmas presentes nos elementos de concreto armado convencional. A diferença está na racionalização dos trabalhos envolvendo as armaduras. Por geralmente apresentarem uma produção em série e em locais apropriados, os elementos pré-moldados proporcionam uma maior racionalização. Muitos dos elementos presentes nas armaduras são confeccionados por máquinas que realizam o corte e dobra das barras de aço, fios e telas. Outra etapa, que é mais viável quando há uma produção em série, é a solda dos elementos que constituem a armação das peças (EL DEBS, 2000).

Os elementos pré-moldados de menor tamanho são em grande parte produzidos em série, acarretando em uma maior industrialização. Fato visto por muitos como uma desvantagem dos pré-moldados, uma vez que propicia inconvenientes da linha de produção aos trabalhadores, que ficam responsáveis somente por uma etapa da produção.

Em elementos de grande porte, as armaduras são posicionadas dentro das fôrmas em local destinado a esta etapa de armação e em seguida as fôrmas e sua respectiva armadura são deslocadas e reposicionadas para a posterior concretagem do elemento.

### 2.6.2 Armadura Protendida

Os elementos pré-moldados podem apresentar a sua armadura protendida de duas maneiras: pré-tracionadas ou pós-tracionadas.

### 2.6.2.1 Armadura Pré-Tracionada

Presente nas peças pré-fabricadas, esta técnica consiste em tensionar a armadura antes da concretagem dos elementos. Com isso se tem um elemento de concreto protendido com aderência inicial.

### 2.6.2.2 Armadura Pós-Tracionada com Aderência Posterior

Geralmente está ligada a elementos pré-moldados de grandes dimensões (EL DEBS, 2000), como vigas de pontes. Consiste em aplicar tensão à armadura nos elementos já concretados, por isso é um elemento de concreto protendido com aderência posterior. Esta aderência posterior é em razão da injeção de nata de cimento dentro da bainha por onde os cabos percorrem a peça (LORIGGIO, 2016).

A Figura 3 apresenta peças pós-tracionadas já concretadas, porém ainda não protendidas. Nota-se também a presença da bainha por onde correm os cabos que serão tensionados. A bainha está exposta, pois receberá a injeção de nata de cimento, promovendo uma aderência posterior.

Para que esta etapa de protensão seja realizada com sucesso, o elemento protendido deve apresentar uma determinada resistência mecânica, uma vez que a própria protensão exerce um carregamento na peça. Esta resistência mecânica, geralmente, está associada à sua resistência à compressão axial.

**Figura 3** – Viga pré-fabricada de uma ponte esperando a protensão de seus cabos, no detalhe bainha por onde a nata de cimento percorre.



**Fonte:** Autoria Própria.

### 2.6.2.3 Armadura Pós-Tracionada sem Aderência Posterior

Ainda dentro das peças pós-tracionadas existem os elementos em que não ocorrem a injeção de nata de cimento nas bainhas, sendo estas chamadas de peças pós-tracionadas sem aderência. Os elementos de concreto pré-fabricado com armadura pós-tracionada sem aderência posterior são utilizados em casos aonde as perdas por atrito são significativas, geralmente em elementos de comprimento expressivo como em lajes protendidas de um edifício. Outra aplicação deste sistema é no reforço de estruturas, com protensão externa dos cabos. Para proteção da armadura e para reduzir o atrito dos cabos com a peça é utilizado um lubrificante.

Os elementos com armadura pós-tracionada sem aderência posterior, ao serem comparados com os elementos pós-tracionados com aderência posterior, apresentam uma resistência última menor, sendo considerado um sistema de menor eficiência (LORIGGIO, 2016).

## 2.7 MATERIAIS

Os materiais empregados na pré-moldagem são os mesmos utilizados nas construções convencionais, salvo algumas peculiaridades que devem ser notadas e comentadas. Os elementos pré-fabricados por serem, geralmente, de tamanho considerável necessitam de um maior espaço nos pátios das empresas para sua execução, cura e acabamento. Em conjunto das suas grandes dimensões deve-se lembrar que estes elementos necessitam de uma alta produtividade para que sejam rentáveis economicamente à empresa produtora. Devido a este fato, fica impraticável que uma peça pré-fabricada demore o mesmo tempo, para ser executada, curada e acabada, que uma peça realizada pelas técnicas convencionais.

Para contornar esta situação, geralmente são utilizados materiais com diferentes características ou mesmo cura térmica.

### 2.7.1 Concreto para indústria de pré-fabricados

O concreto é um material de fundamental importância para as indústrias de pré-fabricados. A escolha correta do concreto pode não somente afetar a segurança do elemento fabricado, como também afetar a produtividade da empresa (ALENCAR, 2008).

Nas empresas de pré-fabricado não existe restrição ao tipo de concreto utilizado. As empresas utilizam tanto do concreto convencional, quanto ao uso de um concreto seco e de um concreto auto-adensável. O que determina o tipo de concreto empregado é o elemento que vai ser executado.

O uso do concreto auto-adensável, nas indústrias de pré-fabricados tem se tornado muito popular, deixando de ser um elemento de estudo teórico (BRÜCK, 2007). Segundo a PCI (2003),

“... não existe tópico na indústria de pré-fabricados de concreto que tenha ganhado tanta atenção como o concreto auto-adensável, já utilizado em 100% da produção em algumas fábricas”.

#### 2.7.1.1 Definição de Concreto auto-adensável

O concreto auto-adensável (CAA), (*Self-Compacting Concrete- SCC*), é um concreto que no estado fresco tem por característica preencher todos os espaços vazios, envolver a armadura e outros obstáculos usando somente a ação da gravidade, mantendo sua homogeneidade (BOSILJKO, 2003).

A EFNARC (2001) desenvolveu três critérios para que o concreto possa ser classificado como concreto auto-adensável:

- *Filling Ability*: Capacidade do concreto preencher fôrma por completo, não deixando vazios.
- *Passing Ability*: Capacidade do concreto de passar entre até as menores aberturas entre as barra que compõem a armadura.
- *Segregation Ability*: Capacidade de se manter homogêneo e coeso do transporte até o seu despejo na fôrma.

#### 2.7.1.2 Histórico

O concreto auto-adensável, surgiu no Japão nos anos 80, desenvolvido pela Universidade de Tóquio (OKAMURA, 1997). A sua necessidade surgiu na busca de um concreto que eliminasse os processos mecânicos de adensamento. Esta etapa é de difícil execução perante as estruturas resistentes a sismos, as quais são densamente armadas e, difícil de encontrar mão-de-obra qualificada para a execução de um concreto livre de vazios, que segundo Nunes (2001) causou uma redução na qualidade das estruturas de concreto. Dessa forma, foi criado o CAA que passou a garantir qualidade ao processo de construção das estruturas de concreto armado, além de garantir estruturas mais duráveis (MELO, 2005).

#### 2.7.1.3 Desenvolvimento do Concreto auto-adensável

O CAA teve um forte impacto sobre os profissionais que lidam com concreto, tanto nos engenheiros quanto nos especialistas em tecnologia do concreto (SHINDOH & MATSUOKA, 2003). Alguns definiram este novo produto como um marco nas pesquisas que envolvem concretos (PROSKE e GRAUBNER, 2002). Desde então inúmeros estudos foram realizados em diferentes países a fim de se conhecer melhor as propriedades do CAA e assim difundir o seu uso (MELO, 2005). Nos países desenvolvidos, em poucos anos o CAA passou a ser mais a regra do que a exceção (WALRAVEN, 2007).

O emprego do CAA trouxe diversas melhorias no processo de emprego do concreto. Por ter como uma de suas características o seu auto-nivelamento, reduziu consideravelmente a necessidade de desempenho da superfície (NUNES, 2001). A sua fluidez lhe permite eliminar os macros defeitos, como as bolhas de ar e eventuais falhas de concretagem (COPPOLA, 2000). Além disso, um estudo realizado por Bartos & Söderlind (2000), determinou que o emprego do CAA perante o emprego do concreto convencional, promove uma redução de aproximadamente 90% dos decibéis captados pelos trabalhadores.

#### 2.7.1.4 Produção do CAA

Os materiais presentes no CAA não diferem muito dos materiais presentes em um concreto convencional. Porém, precisam ser escolhidos rigorosamente a fim de passarem por um controle que lhe façam atender as suas características de fluidez (SAAK et al., 2001). Os agregados tem um papel fundamental na composição do CAA, o seu tamanho e sua forma apresentam uma grande sensibilidade ao CAA (SAAK et al., 2001; BUI et al., 2002). A distribuição granulométrica dos agregados deve ser contínua, de modo que as partículas menores preencham os vazios entre as maiores, garantindo assim um concreto fluído que não sofra obstruções mesmo em passagens estreitas (MELO, 2005).

O CAA necessita uma maior quantidade de finos, partículas sólidas com dimensões menores que 0,125 mm (EFNARC, 2002), e podendo ser constituídos pela combinação de cimento e adições (NUNES, 2001). Um alto teor de finos garante uma viscosidade adequada, já que sua grande superfície específica promove uma elevada adsorção de água (MELO, 2005).

Se por um lado a demanda por finos é maior no CAA, a demanda de agregados é menor, em especial o agregado graúdo. Sendo assim, as propriedades da argamassa são predominantes neste concreto, garantindo a lubrificação das partículas do agregado graúdo e conferindo estabilidade para a mistura (DOMONE; JIN, 1999).

Um constituinte fundamental para a obtenção do CAA é o aditivo. Este garante as propriedades reológicas requeridas. Os aditivos empregados devem conferir uma maior fluidez a mistura, reduzindo a tensão de escoamento da mistura (MELO, 2005).

### 2.7.2 Constituintes do CAA

#### 2.7.2.1 Cimento

Nas indústrias de pré-fabricação o cimento mais empregado é o CP-V – Alta resistência inicial (ARI) devido principalmente à possibilidade de obter maiores valores de resistência em intervalos de tempo menores. O CP-V é um cimento mais fino, o que acelera a velocidade das

reações químicas, além de apresentar um teor elevado de silicato tricálcico ( $C_3S$ ), constituinte responsável pela resistência mecânica nas idades iniciais (PINTO, 2002).

A utilização de cimento CP-V – ARI possibilita que os elementos pré-fabricados sejam remanejados a uma próxima etapa da linha de produção em um menor período de tempo. Como exemplo, a etapa de protensão do elemento pode ser realizada mais cedo quando comparada a um elemento produzido com um cimento que não fornece altas resistências iniciais.

Por outro lado, peças produzidas com CP-V demandam um maior cuidado já que há uma maior geração de calor de hidratação, podendo ocasionar fissurações excessivas. Além disso, por possuir uma elevada quantidade de finos e de silicato tricálcico, a sua necessidade de água é maior (RHEINHEIMER, 2007).

#### 2.7.2.2 Aditivos

Os aditivos podem ser separados de acordo com o seu tipo de ação: ação física, ação química e ação físico-química. As substâncias ativas presentes nos aditivos podem ser orgânicas ou inorgânicas, e podem estar dispersas em um meio sólido, líquido ou pastoso. Essas substâncias podem ser sais minerais, sais ácidos orgânicos, resinas, tensoativos, dispersores, umectantes, emulsionantes orgânicos, naturais ou sintéticos (BRAZ DE MELO, 2000).

A NBR 11678 (ABNT, 2011), classifica os aditivos da seguinte maneira:

- aditivo redutor de água/plastificante (PR, PA, PN);
- aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo I (SP-I R, SP-I A, SP-I-N);
- aditivo de alta redução de água/superplastificante tipo II (SP-II R, SP-II A, SP-II-N);
- aditivo incorporador de ar (IA);
- aditivo acelerador de pega (AP);
- aditivo acelerador de resistência (AR);
- aditivo retardador de pega (RP).

Para estes tipos de elementos pré-fabricados, que utilizam CAA, os aditivos recomendados são os superplastificantes, uma vez que reduzem a quantidade de água adicionada, garantindo a trabalhabilidade do concreto sem afetar a sua resistência inicial e final.

#### 2.7.2.3 Agregados

Os agregados têm um papel fundamental nas características reológicas do concreto, principalmente no concreto auto-adensável. A sua quantidade e granulometria são os fatores que mais influenciam as propriedades reológicas do concreto fresco (ALENCAR, 2008). A adição de agregados à pasta de cimento provoca um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade

plástica da mistura, este aumento é uma função direta do teor de agregados adicionados (STRUBLE et al. 1998 apud CASTRO, 2007).

Outros fatores também influenciam significativamente nas constantes reológicas do concreto, alguns destes fatores são: origem mineralógica, quantidade de material pulverulento, forma e rugosidade das partículas (ALENCAR, 2008).

Para Fava e Fornasier (2004), uma distribuição contínua no tamanho das partículas dos agregados, cimento e adições podem contribuir para uma redução do atrito entre os agregados.

No concreto utilizado neste trabalho houve o emprego da areia natural, areia de britagem e brita. Duas granulometrias de brita foram utilizadas para manter esta distribuição contínua, proposta por Fava e Fornasier (2004), as britas utilizadas foram brita 0, quem tem a sua granulometria entre 9 e 14 mm e brita 1, que por sua vez tem como 19 mm a sua menor granulometria e 25 mm a sua máxima. Vale comentar sobre o emprego das areias de britagem, que tem crescido de forma significativa em razão da escassez da areia natural.

### **2.7.3 Dosagem do CAA**

A preocupação que se tem na dosagem de um CAA é, geralmente, relacionada com a suas propriedades apresentadas no estado fresco, que comprovam as suas características de auto-compactabilidade, apresentadas na definição do CAA (item 2.7.1.1) deste trabalho, que são: capacidade de preenchimento, capacidade de passar até entre pequenas aberturas e a capacidade de não segregar. Os materiais que constituem o CAA definem muito destas capacidades, fazendo assim, com que estes parâmetros sejam altamente sensíveis a qualquer alteração nos materiais constituintes ou no seu processo de execução (MELO, 2005). Esta alta sensibilidade que o CAA tem, principalmente, em seu estado fresco justifica todos os cuidados que são tomados na sua dosagem.

Todos os cuidados na dosagem do CAA para que ele atenda às suas características desejadas no estado fresco, não valeriam de nada se em seu estado endurecido ele não apresentasse propriedades adequadas a proporcionar qualidade e durabilidade à estrutura final. Neste quesito é importante analisar não somente as suas propriedades no estado fresco, como também analisar as suas propriedades no seu estado endurecido, a exemplo disto tem-se a sua resistência à compressão. Ao analisar trabalhos que levam este fator em consideração, observa-se que o CAA, geralmente, apresenta elevados valores de resistência à compressão. Nunes (2001), explica este fato pela baixa relação água/aglomerantes. Conferindo que o bom desempenho do CAA no estado endurecido também é em função do alto consumo de seus constituintes, em especial cimento e aditivo (MELO, 2005).

Porém, este alto consumo de materiais vai à contramão da racionalização da produção do concreto e da possibilidade de encontrar misturas mais econômicas. Com isto se vê a importância de estudos nos processos de dosagem do CAA. Os mesmos devem garantir tanto qualidades em seu estado fresco, como em seu estado endurecido, aliando também economia, racionalização e viabilidade do processo como um todo.

#### **2.7.4 Cuidados na produção e aplicação do CAA**

Conforme descrito anteriormente, o CAA apresenta uma alta sensibilidade aos os seus materiais constituintes e ao o seu processo de produção, sendo assim alguns cuidados devem ser tomados a fim de alcançar as características desejadas em ambos os estados, fresco e endurecido.

Por se tratar de um material relativamente novo, algumas medidas devem ser implementadas na empresa, em relação à equipe envolvida e à central dosadora. Conforme apresentado, os materiais constituintes do CAA devem ser rigorosamente controlados, especialmente a sua granulometria e umidade (MELO, 2005). Para uma adequada correção do volume de água na mistura, uma precisão de 0,5% é requerida no controle da umidade (TVIKSTA, 2000).

O tipo de misturador e o tempo também devem ser observados. O CAA demanda um maior tempo do que o concreto convencional, visto que a grande quantidade de pasta é mais difícil de homogeneizar (EPG, 2005). Por experiência prática, Belohuby e Alencar (2007), determinaram que este tempo é cerca de 30% maior do que o tempo necessário a uma mistura de concreto convencional. Já para Emborg (2000) o tempo empregado na produção do CAA é de 1,5 a 3 vezes maior do que quando comparado a um concreto convencional.

A ordem da qual os materiais adentram no misturador também é responsável por alterar as propriedades finais do CAA em seu estado fresco e estado endurecido. Para Melo (2005), a sequência deve ser determinada individualmente para cada misturador, a fim de otimização.

Os ensaios de controle de qualidade empregados ao concreto convencional não são adequados ao CAA. Diferentes ensaios são utilizados para o controle de qualidade deste concreto auto-compactante.

A etapa de transporte dentro da indústria também exige cuidados, a fim de evitar a segregação e a exsudação, a agitação deve ser evitada. Os atrasos nas aplicações também devem ser remediados garantindo que o concreto apresente a sua devida fluidez.

Antes de ser lançado às fôrmas, o CAA deve ser verificado quanto à sua capacidade de auto-compactação. As fôrmas por sua vez também devem ser checadas, a pressão nas mesmas é aumentada pela alta fluidez do CAA e pela velocidade de lançamento. A pressão hidrostática do CAA deve ser resistida por estas (MELO, 2005). As fôrmas precisam também estarem limpas e com o desmoldante já aplicado.

Por fim, a velocidade e altura de lançamento devem controladas a fim de evitar a incorporação de ar na mistura.

### 2.7.5 Controle de Qualidade no CAA

Os ensaios utilizados para caracterizar concretos convencionais não são apropriados para os CAA. Com isso, outros métodos de ensaio são propostos para caracterizar este material.

A caracterização do CAA em estado fresco é direcionada a caracterizá-lo em função da sua capacidade de preenchimento, resistência ao bloqueio, resistência à segregação e propriedade reológicas (MELO, 2005). Na literatura é possível encontrar uma série de ensaios:

- Ensaio de Espalhamento (*Slump Flow*)
- T<sub>500</sub>
- Funil – V (*V-funnel*)
- Caixa– L (*L-box*)
- Caixa – U
- Orimet
- Anel japonês (*J-ring*)
- Ensaio proposto por Khayat
- Modelo Reológico de Bingham
- etc

Embora algumas situações, o ideal seria realizar um conjunto de ensaios, para se obter uma análise mais completa do CAA. Para os ensaios realizados em campo o EPG (2005) recomenda o emprego apenas do ensaio de espalhamento, *Slump Flow*, para a caracterização do CAA.

Entretanto, de acordo com Gibbs (2004), existem problemas tais como a reprodutibilidade dos resultados na sua aplicação, a falta de normalização e a própria diferença dos resultados em função do operador que conduz o ensaio, diminuindo a confiabilidade do mesmo. A forma de mistura e temperatura dos ensaios também influenciam diretamente nos resultados obtidos (BRAMESHUBER, 2004; GIBBS, 2004).

#### 2.7.5.1 *Slump Flow*

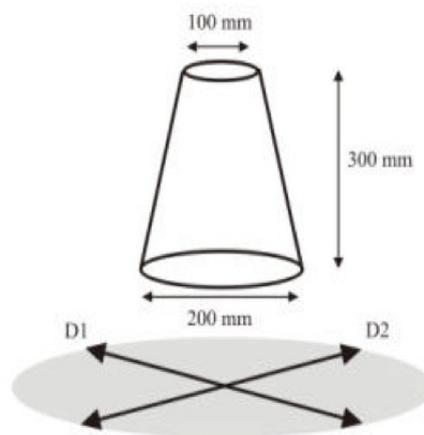
A sua fácil execução o torna um dos ensaios mais executados para categorizar o CAA. Neste ensaio de espalhamento o cone de Abrams, mesmo cone utilizado no ensaio de abatimento nos concretos convencionais, é utilizado. O resultado é dado pela média dos diâmetros formados pelo

escoamento do concreto, sendo que a medida dos diâmetros deve ser feita em orientações perpendiculares entre si, conforme ilustrado na Figura 4.

Somente o peso próprio da mistura é responsável pelo seu espalhamento. O EPG (2005) recomenda que o *Slump Flow* seja realizado em todos os lotes produzidos de CAA.

Este ensaio além de proporcionar uma análise visual de acontecimento de segregação ou exsudação, também é um indicativo da distância entre as partículas, executado sobre a forma não-restringida, que cresce na razão direta do aumento do teor de água e de aditivo superplastificante (SUGAMATA et al, 2003). O resultado do ensaio de *Slump Flow* está relacionado com as propriedades reológicas de tensão de escoamento do CAA (ESPING, 2003; SHEINN et al., 2003; SHOYA et al., 1999).

**Figura 4** – Cone de Abrams utilizado no ensaio de *Slump Flow*.



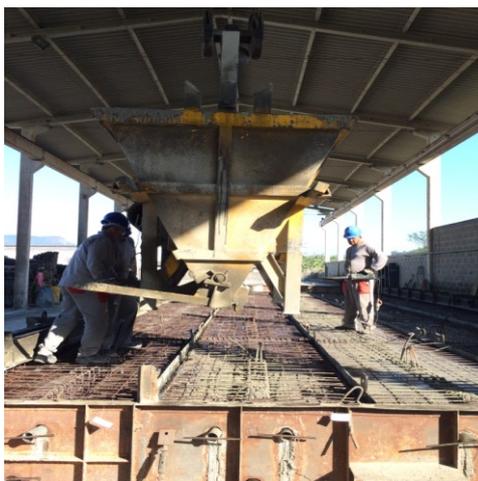
**Fonte:** Nunes(2001).

## 2.8 SEQUÊNCIA EXECUTIVA DA CONCRETAGEM

A concretagem dos elementos pré-fabricados pode ser realizada de duas maneiras distintas: concretagem de cima para baixo, quando o concreto é derramado sobre uma fôrma ou quando o concreto é bombeado para dentro da fôrma a partir da base. A primeira maneira é a mais comum nas empresas de pré-moldados. Com o uso de caçambas, a concretagem é realizada com o lançamento do concreto sobre as fôrmas.

Ao concretar, o ideal é realizar movimento de vai-e-vem com a caçamba, a fim de criar finas camadas de concreto a cada ciclo de movimento, inclusive com o emprego do CAA, pois desta maneira é mais fácil o escape do ar aprisionado (ALENCAR, 2008). Na Figura 5 é apresentada uma concretagem com CAA que utiliza a caçamba como meio de transporte do concreto. A caçamba é sustentada por uma ponte rolante, o que facilita o manuseio da mesma, inclusive nos movimento de vai-e-vem.

**Figura 5** - Concretagem realizada por meio de caçamba.



**Fonte:** Autoria Própria.

Existe também uma caçamba própria para o uso com CAA, se trata de uma caçamba sustentada sobre uma ponte rolante. Na parte inferior da caçamba, que despeja o concreto, acontece um afunilamento, responsável por causar uma redução na velocidade de despejo do CAA. Com este dispositivo, um operador é capaz de controlar a ponte rolante e a abertura da caçamba (ALENCAR, 2008). A Figura 6 representa este dispositivo:

**Figura 6** – Caçamba própria para uso com CAA. A- vista completa. B- Detalhe da abertura.



**Fonte:** Alencar (2008).

## 2.9 FÔRMAS

As fôrmas utilizadas durante a concretagem de elementos pré-fabricados devem ser bem executadas e calculadas. O uso inadequado ou a improvisação no uso das fôrmas pode causar

deformações à peça durante a concretagem, se as mesmas não apresentarem suporte de amarração suficiente (EPG, 2005).

O concreto exerce uma pressão nas fôrmas, esta pressão depende principalmente das dimensões da fôrma, tipo de mistura, velocidade de concretagem e da temperatura ambiente (FAVA & FORNASIER, 2004). Essa pressão pode ser calculada, admitindo que o CAA é um fluido Newtoniano, com densidade aproximada de  $2,4 \text{ kg/dm}^3$  (FAVA & FORNASIER, 2004) e aplicando os conceitos básicos da pressão hidráulica.

Geralmente, as indústrias de pré-fabricados utilizam fôrmas metálicas. As mesmas merecem um cuidado quanto a sua estanqueidade, especialmente quando recebem CAA, e também devem ser conferidas quanto aos desgastes que aparecem após o uso excessivo das mesmas. As fôrmas muito desgastadas tendem a formar riscos, que servem de caminho preferencial para a saída da água de exsudação, em concretos que não têm a sua umidade controlada desde a sua dosagem na central (ALENCAR, 2008).

Todos estes inconvenientes anteriormente citados não inviabilizam o uso de fôrmas metálicas com CAA, somente necessitam de maior atenção e de reparos quando necessário. E, apesar das fôrmas metálicas necessitarem de uma série de cuidados especiais, vale lembrar que as mesmas podem ser reutilizadas diversas vezes, diferentes das fôrmas de madeira que apresentam uma vida útil reduzida mas, no entanto promovem uma maior vedação das aberturas durante a concretagem, em especial com CAA (ALENCAR, 2008).

## 2.10 ADENSAMENTO

O adensamento tem como função remover os vazios que possivelmente se formam durante a concretagem. O uso de CAA, como o próprio nome já diz, é dosado para ter grande fluidez e coesão, sem provocar segregação dos seus constituintes (EPG, 2005). Uma possível vibração provocaria um abalo na estrutura deste CAA e, conseqüentemente, acarretaria em uma possível segregação (ALENCAR, 2008).

Caso durante a concretagem do CAA ocorresse à necessidade de um adensamento seria necessária uma verificação na dosagem deste concreto e, se isto se tornar um fato recorrente, uma possível solução seria revisar o traço deste concreto.

Ainda há momentos que o traço do CAA é adequado, e que este concreto esteja em conformidade com este traço e mesmo assim o uso ligeiro de vibradores é necessário. Segundo Alencar (2008), algumas dessas situações são encontradas em fôrmas, que devido ao seu formato, aprisionam o ar; em pausas durante o processo de concretagem, onde a superfície já está de certa forma enrijecida e ainda; em lajes e painéis concretados com um CAA de baixa fluidez, que requerem agitações ou ligeiras vibrações, para total acomodamento do concreto.

## 2.11 CURA

A cura do concreto é uma etapa que requer atenção e cuidados. Ao perder água por evaporação, podem aparecer fissuras na superfície do elemento concretado. Para evitar que se perca muita água e conseqüentemente a aparição de fissuras, determinadas medidas devem ser tomadas. A não exposição direta ao sol e a correntes de vento, são algumas delas. Outra maneira pode ser a aplicação de agentes de cura (BELOHUBY & ALENCAR, 2007).

Em alguns casos a aplicação destes agentes de cura não é possível de ser feita, pois a adição de mineral ao CAA pode ocasionar uma maior necessidade de finos para manter a coesão no CAA. Com o aumento de finos, cimento, na mistura ocorre um aumento no calor de hidratação do concreto, e por conseqüência uma maior retração térmica acarretando no aparecimento de fissuras (ALENCAR, 2008).

## 2.12 ACABAMENTO

Os elementos pré-fabricados necessitam de um acabamento final, mesmo quando executados com CAA. A fim de proporcionar um elemento com elevada qualidade de acabamento, esta etapa é de fundamental importância às empresas de pré-fabricados que prezam por esta qualidade.

As técnicas utilizadas para o acabamento final nos CAA são as mesmas utilizadas em concretos convencionais. A superfície do elemento deve ser alisada, geralmente um pouco mais tarde do que as peças moldadas em concreto convencional, mas também dependem de fatores como as condições do ambiente e composição da mistura (EPG, 2005).

Esse retardo para o início dos trabalhos de acabamento no CAA estão atrelados ao emprego, em elevadas proporções, dos aditivos superplastificantes, que acabam por retardar o início de pega do concreto (ALENCAR, 2008).

O acabamento superficial do elemento pré-fabricado consiste em alisar a superfície com o uso de uma colher de pedreiro, retirando as marcas deixadas pelo compactador, em seguida é realizado um desempeno da superfície, com o auxílio de uma desempenadeira de madeira. Quando o concreto já se apresenta em uma forma mais enrijecida, após o seu início de pega, um novo desempeno é realizado na superfície do concreto, mas desta vez com o uso de desempenadeira metálica, este processo é chamado por muitos como “queimar” o concreto.

## 2.13 TRANSPORTE

Os elementos pré-fabricados já executados e acabados são transportados para outros lugares dentro da empresa, para darem espaço à produção de novos elementos, permitindo a continuidade da produção. Este transporte interno que acontece na empresa, geralmente é realizado por pontes rolantes que içam o elemento até um local de interesse. Quando um elemento é transportado de uma linha de produção para outra, geralmente este transporte é feito por caminhão, uma vez que, nem todas as pontes rolantes se comunicam dentro da empresa.

Para que o elemento seja transportado com segurança, o mesmo deve atingir um certo grau de resistência, caso contrário, a peça se deformaria, podendo alcançar níveis elevados de deformação na qual a peça perderia o seu papel estrutural. O controle da resistência do elemento, geralmente, é realizado em função do tempo ou por ensaios de compressão axial em corpos de prova. Segundo o EPG (2005), no entorno de 14 +/- 2 horas, o concreto atinge resistência em baixas idades, suficiente para manter o ciclo de produção. Situação explicada pelo emprego de cimentos de alta resistência inicial (ARI).

## 2.14 ARMADURAS

As armaduras utilizadas nos elementos de concreto pré-fabricado variam de acordo com o tipo de peça e as suas respectivas solicitações em serviço. Como visto anteriormente, a armadura pode ser de dois tipos, armadura passiva e armadura ativa.

### 2.14.1 Armaduras Passivas

De maneira geral, as armaduras passivas dos elementos são formadas pela união das barras de aço. As barras presentes em um elemento pré-fabricado podem ser de diversos diâmetros. Estas são previamente cortadas e dobradas em um local determinado a realizar esta função e em seguida são montadas nas fôrmas, seguindo o projeto que é referente a cada elemento. As armaduras são de aço CA-50 e CA-60.

### 2.14.2 Armaduras Ativas

Para as armaduras ativas, o aço utilizado são aços de alta resistência fornecidos em forma de fios, cordoalhas ou barras. No mercado brasileiro os fios são vendidos em diâmetros que variam de 4 a 8 mm. As cordoalhas, que são um conjunto de fios enrolados helicoidalmente, são encontradas

com 3 e 7 fios enrolados. Já para as barras de liga de aço de alta resistência, o seu diâmetro é sempre maior do que 12 mm e o seu comprimento é limitado.

Os aços presentes na execução de concreto protendidos têm uma classificação própria. Suas iniciais, CP, representam o uso específico para concreto protendido, em seguida das iniciais, são representados os números que representam a resistência característica de ruptura à tração ( $f_{ptk}$ ), em  $\text{kgf/mm}^2$ . Para as duas últimas iniciais, RN ou RB, representam a relaxação do aço, que pode ser normal (RN) ou baixa (RB).

Loriggio (2016) apresenta a seguinte classificação para os aços de concreto protendido:

Fios:

- CP 150 RN OU RB
- CP 160 RN OU RB
- CP 170 RN OU RB

Cordoalhas:

- CP 190 RB
- CP 210 RB

## 2.15 CRITÉRIOS PARA LIBERAÇÃO DO ELEMENTO PRÉ-FABRICADO

Para a liberação de serviços como a desforma de peças estruturais, retirada do escoramento, aplicação de cargas de protensão, transporte de peças pré-moldadas, entre outros, Chengju (1989), identifica que se tenha conhecimento avançado sobre a estimativa da resistência desta peça estrutural. Assim, a execução destes serviços pode ser feita de forma ágil, segura e econômica. O método habitual de controle da resistência do concreto é realizado através de ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndricos. A Tabela 1 demonstra os valores de resistência à compressão utilizados para determinar a liberação dos elementos, analisados neste trabalho, para as diferentes etapas de produção.

**Tabela 1** – Resistência mínima necessária para execução de diferentes serviços no elemento pré-fabricado de estudo.

<b>Resistência à compressão</b>	
<b>Serviço</b>	<b>Necessária (MPa)</b>
Desforma	18
Içamento	18
Pós-Tensão	25

Pelo método tradicional, o monitoramento do ganho de resistência do concreto, pode ser trabalhoso e relativamente caro, principalmente nos casos onde é necessária uma grande quantidade de corpos de prova. Além disso, há a impossibilidade de submetê-los a condições de cura similares às condições de campo, diminuindo assim a precisão dos resultados.

Os ensaios não-destrutivos surgem como alternativa na determinação da resistência do concreto *in-loco*.

### 3. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

As reações de hidratação da pasta de cimento promovem o endurecimento do concreto, e em consequência um ganho de resistência. A resistência adquirida pelo concreto, geralmente, é conhecida através de ensaios destrutivos, com testemunhos extraídos desta mesma mistura e ensaiados mecanicamente. Estes ensaios não condizem com a mesma condição de que a estrutura está submetida, uma vez que os corpos-de-prova ensaiados em laboratório sofrem processo de cura diferente do concreto utilizado em obra, pois ambos estão em ambientes com temperatura e umidade diferentes (SUBRAMANIAM et al., 2002).

Como forma de contornar esta situação, os ensaios não-destrutivos aparecem como uma maneira eficiente, econômica e precisa (RHEINHEIMER, 2007). Dentre os diversos métodos não-destrutivos, que correlacionam as propriedades do concreto, estão entre eles o Método da Maturidade e o ultrassom.

#### 3.2 MÉTODO DA MATURIDADE

Com a maior industrialização da construção civil ao final da Segunda Guerra Mundial, houve a necessidade de acelerar algumas etapas construtivas. Sendo assim, novas tecnologias e métodos foram empregados, entre eles a cura a vapor (RHEINHEIMER, 2007).

Junto desta nova técnica surgiu a necessidade de avaliar o ganho da resistência do concreto a elevadas temperaturas. Para isso, precisava-se de um modelo teórico que demonstrasse a influência da temperatura no ganho da resistência do concreto. A partir disso, diversas pesquisas foram realizadas a fim de relacionar, o ganho de resistência do concreto com o tempo e a temperatura. O que acabou resultando no Método da Maturidade, que correlaciona a resistência do concreto com o tempo e com o aumento da velocidade das reações químicas, em consequência do aumento de temperatura.

##### 3.2.1 Descrição do Método

A velocidade das reações químicas é alterada perante a temperatura. Para as reações de hidratação do cimento, esta situação não é diferente. Em maiores temperaturas, estas reações ocorrerão mais rapidamente e com isso a matriz cimentícia alcançará maiores valores de resistência em um menor espaço de tempo.

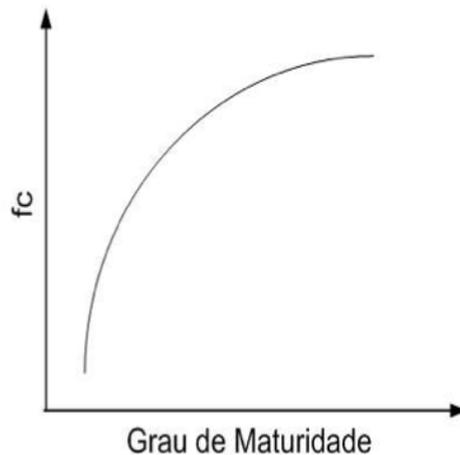
O método da maturidade permite estimar a resistência de uma mistura. Por meio do histórico de temperatura do material e de funções matemáticas, as chamadas funções de maturidade correlacionam tempo com temperatura e fornecem o grau de maturidade a uma determinada idade. Referenciado a uma temperatura fixa este grau de maturidade passa a ser chamado de Idade Equivalente, que passa a fornecer uma indicação da resistência da mistura.

Um determinado grau de maturidade ou Idade Equivalente equivale à mistura apresentar um determinado nível de resistência que independe da combinação tempo-temperatura, necessária para atingir esta Idade Equivalente (PINTO, 2004a). Isto quer dizer que, uma mesma mistura pode alcançar o mesmo nível de resistência em idade reais diferentes, influenciada pelo seu histórico de temperatura.

### 3.2.2 Funções Maturidade

Para analisar o ganho da resistência em função do tempo e da temperatura, Nurse (1949) definiu maturidade como o produto entre a idade do concreto e o seu histórico de temperatura. Em 1951, Saul instituiu que para certo fator de maturidade, a mesma mistura teria aproximadamente uma mesma resistência disjuncto da combinação de tempo e temperatura, que veio posteriormente a ser chamada a lei de maturidade de Saul, conforme Figura 7:

**Figura 7** - A lei de maturidade de Saul.



**Fonte:** Rheinheimer, 2007.

Para estimar o fator de maturidade de uma certa mistura, Nurse-Saul, propuseram a seguinte equação empírica (Equação 1):

$$M_s = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

Onde:

- $M_s$ : Maturidade do concreto na idade  $t$ ;
- $\Delta t$ : Intervalo de tempo do processo de endurecimento em horas ou dias;
- $T$ : Média de temperaturas em um intervalo de tempo  $\Delta t$  em °C ou F;
- $T_0$ : Temperatura de base.

Na equação 1, o intervalo de temperatura representa a faixa de temperatura aonde as reações de hidratação do cimento ocorrem. Saul adotou  $T_0$  igual a 0°C. Segundo Rheinheimer, em 1989 Chengju, definiu esta faixa variando entre 5 e 30°C. Já para Carino (2004), o valor de  $T_0$  deveria ser igual a -10°C. Com isso, passou-se a nova representação da equação de Nurse-Saul (Equação 2):

$$M_s = \sum_0^t (T + 10) \Delta t \quad (2)$$

Por ser uma equação simples, é uma equação muito utilizada na América do Norte (RHEINHEIMER, 2007), porém não resume bem o ganho de resistência do concreto (SALVADOR FILHO, 2001), já que se trata de uma equação linear, enquanto a verdadeira equação de ganho de resistência do concreto não é linear (CARINO, 2004).

Para Carino (2004), com o intuito de representar o ganho de resistência do concreto, Rastrup (1954) introduziu o termo “Idade Equivalente”, a uma temperatura de referência, o tempo que uma mistura de concreto levaria para atingir a certa resistência é representado pela equação a seguir (Equação 3):

$$t_e = \frac{\sum_0^t (T - T_0) \Delta t}{T_r - T_0} \quad (3)$$

Onde:

- $T_r$ : Temperatura de referência medida em °C ou F;
- $t_e$ : Idade Equivalente na temperatura de referência  $T_r$  em horas ou dias.

### 3.2.3 Função FHP

O uso da equação de Arrhenius, para a função da maturidade, passou a ser utilizada por diversos autores, uma vez que a equação de Arrhenius está associada à cinética das reações

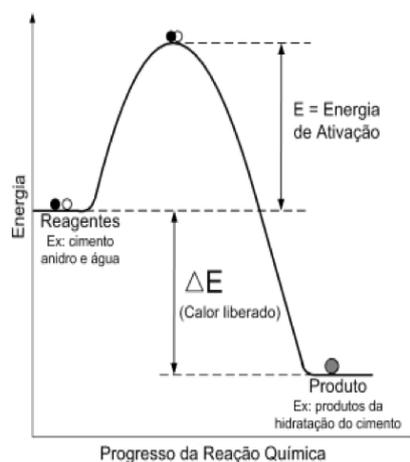
químicas e, portanto pode ser empregada às reações de hidratação da pasta cimentícia (CHENJU, 1989; RHEINHEIMER, 2007).

Diversas reações químicas são responsáveis para que ocorra a hidratação do cimento. Para que estas reações possam acontecer, as moléculas necessitam de energia cinética suficiente para transformar reagentes em produtos. Na hidratação do cimento, o estado de energia dos reagentes é maior do que os do produto, indicando uma reação exotérmica. A diferença de energia entre a energia dos reagentes e a energia necessária para o início das reações de hidratação, foi nomeada por Arrhenius de Energia de Ativação.

### 3.2.3.1 Energia de Ativação ( $E_a$ )

Pode-se entender energia de ativação como a energia necessária aos reagentes para que as reações químicas iniciem, conforme a Figura 8 ilustra. Para as reações químicas de hidratação do cimento, esta situação não é diferente, ou seja, as moléculas do reagente necessitam de energia cinética suficiente para se transformarem em moléculas do produto (MACHADO, 2007). Cada reação química possui um valor de Energia de Ativação, que depende da temperatura ou da concentração dos reagentes. Para Arrhenius, a velocidade com que ocorrem as reações é chamada de taxa constante. A Equação 4, fornece a taxa constante -  $k$ , que segundo Arrhenius, é a dependência da velocidade das reações químicas com a temperatura (MACHADO, 2007).

**Figura 8** - O conceito de Energia de Ativação segundo Arrhenius.



**Fonte:** Adaptado de Mancio et al., 2004.

$$k = Ae^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (4)$$

Onde:

- k: Taxa Constante;
- E: Energia de Ativação, kJ/mol;
- R: Constante universal dos gases, 8,3144 J/mol K;
- T: Temperatura em Kelvin, temperatura absoluta;
- A: Constante ou fator de frequência.

Uma grande quantidade de diferentes reações é responsável no processo de hidratação do cimento, sendo assim, diversos valores de Energias de Ativação constituem uma mistura. Portanto, cabe utilizar o termo Energia Aparente de Ativação, que corresponde ao valor médio das diversas Energias de Ativação das reações de hidratação do cimento, as quais ocorrem concomitantemente (CARINO, 2004).

Empregando a equação de Arrhenius, Freiesleen-Hansen e Pedersan (1977) apud Pinto (2000), chegaram a seguinte expressão para idade equivalente (Equação 5) também conhecida como FHP:

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left[ \frac{1}{273+T} - \frac{1}{273+T_r} \right]} \Delta t \quad (5)$$

Onde:

- $t_e$ : idade equivalente à temperatura de referência  $T_r$  em horas;
- $E_a$ : energia aparente de ativação em J/mol;
- T: média de temperaturas em um intervalo de tempo  $\Delta t$  em °C;
- $T_r$ : temperatura de referência em °C;
- $\Delta t$ : intervalo de tempo em horas.

### 3.2.3.2 Obtenção da Energia de Ativação

Durante as reações de hidratação do cimento, a Energia de Ativação não é constante. O tempo que os reagentes levam, no processo de se transformarem em produtos do início de pega e durante a pega do cimento define a taxa de evolução da hidratação (MACHADO, 2007). Após este período parte da matriz cimentícia já esta formada, e a água necessária para a hidratação dos grãos desloca-se pelo fenômeno da difusão. A difusão por sua vez é um processo menos suscetível à temperatura. Sendo assim, com o aumento da hidratação ocorre uma diminuição da Energia Aparente de Ativação. Segundo Pinto (2004b), a maioria dos pesquisadores não adota valores decrescentes para  $E_a$ . Para diversos autores, o valor da Energia Aparente de Ativação nos primeiros estágios da hidratação é cerca do dobro do valor encontrado para o posterior período de difusão controlada (CARVALHO, 2002).

Para a obtenção da Energia Aparente de Ativação das reações de hidratação do cimento pode-se realizar experimentos mecânicos ou através de outras características que estejam relacionadas com o grau de hidratação da mistura a partir da evolução do tempo e da temperatura (CÂMARA, 2006).

Um dos procedimentos para a obtenção da  $E_a$  é encontrado na ASTM C 1074 (2011). A mesma sugere o desenvolvimento da resistência à compressão de argamassas, apropriadas, curadas a diferentes temperaturas, em condições isotérmicas. Admitindo que uma relação hiperbólica linear descreve o desenvolvimento da resistência com o tempo, obtém-se através da Equação 6 a taxa constante  $k$ . A Energia Aparente de Ativação pode ser obtida linearizando a Equação 5, relacionando o inverso da temperatura com o logaritmo natural de  $K_t$ , no gráfico de Arrhenius, com o coeficiente angular da reta sendo o valor da Energia Aparente de Ativação dividido pela constante dos gases,  $R$ .

$$f_c = f_{c\infty} \frac{k_t(t-t_0)}{1+k_t(t-t_0)} \quad (6)$$

Onde:

- $f_c$  : Resistência à compressão na idade  $t$ ;
- $f_{c\infty}$  : Resistência à compressão última;
- $t$  : Idade da Argamassa;
- $t_0$  : Idade em que se inicia o desenvolvimento de  $f_c$ .

Em casos aonde não é possível de executar os ensaios recomendados pela ASTM C 1074, ou ainda quando uma boa precisão não é muito importante na estimativa da resistência da mistura, o valor da Energia de Ativação pode ser obtido de maneira aproximada.

Uma maneira de se obter o valor da Energia de Ativação é sugerido por Freiesleen-Hansen e Pedersan (1977) apud Câmara (2006) da seguinte forma:

- Para  $T \geq 20^\circ\text{C}$ :

$$E = 33500 \text{ J/mol} \quad (7)$$

- Para  $T \leq 20^\circ\text{C}$ :

$$E = 33500 + 1470(20 - T) \text{ J/mol} \quad (8)$$

Na literatura, também é possível encontrar valores para  $E_a$ . Diversos autores obtiveram de maneira experimental valores de  $E_a$  para diferentes cimentos. A seguir é apresentada a Tabela 2 na qual Pinto (2004a) apresenta valores de Energia de Ativação do cimento encontrados em diferentes autores:

**Tabela 2** - Valores de Energia Aparente de Ativação por diversos autores para cimentos brasileiros.

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

**Fonte:** Pinto (2004a).

O grau de maturidade é obtido para cada concreto através da sua idade real e das expressões citadas anteriormente. Para qualquer temperatura de cura, a resistência do concreto passa a ser a mesma a um determinado grau de maturidade. Basta conhecer o crescimento de sua resistência com o tempo em pelo menos uma condição isotérmica. A resistência para outras temperaturas de cura passa a ser prevista através do grau de maturidade, por uma combinação entre tempo e temperatura.

Pela aplicação deste método qualquer característica do concreto como resistência, módulo de elasticidade, etc., pode ser modelada, necessitando apenas que esta característica esteja correlacionada com a hidratação do cimento (PINTO, 2000).

Para uma mesma mistura, diversos valores de Energia de Ativação são apresentados por Pinto et al. (2001). Estes valores foram obtidos de forma experimental através da evolução de certas propriedades como resistência à compressão axial, velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e grau de hidratação, indicando que a sensibilidade térmica da propriedade em estudo esta relacionada com  $E_a$ .

A escolha dos valores da Energia Aparente de Ativação deve ser precisa, pois segundo Mancio et al. (2004), pequenas variações podem gerar elevadas diferenças na estimativa da resistência. Ainda, segundo Mancio et al. (2004), as misturas usuais na época na qual o método foi idealizado são diferentes das usuais misturas atuais. Estas empregam comumente adições químicas

e minerais que melhoram diversas características do concreto, como durabilidade, trabalhabilidade e resistência. Ressaltam também que a zona de temperatura que correlaciona resistência e maturidade é única e limitada.

### 3.3 CORRELAÇÃO ENTRE MATURIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Diversas expressões matemáticas foram deduzidas a fim de correlacionar o grau de maturidade de uma mistura e a sua resistência à compressão (PINTO, 1997). Em 1956, Nykanen, propôs a Equação 9:

$$f_c = f_{c\infty}(1 - e^{-\gamma M}) \quad (9)$$

Onde:

- $\gamma$ : Constante.

Outra equação foi apresentada por Plowman (1956), Equação 10:

$$f_c = a + b \log(M) \quad (10)$$

Onde:

- $a$  e  $b$ : Constantes ligadas a relação a/c da mistura e ao tipo de cimento.

Mais tarde, Freiesleen-Hansen e Pedersan (1977), propuseram a partir de dados empíricos que a relação entre a resistência e grau de maturidade pode ser similar à relação entre grau de hidratação e maturidade e com isso chegaram a Equação 11:

$$f_c = f_{c\infty} e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^a} \quad (11)$$

Onde:

- $\tau$ : tempo constante;
- $a$ : parâmetro de forma.

A Equação 12 foi proposta por Carino e Lew (1983), nesta equação a maturidade é considerada no momento de início de ganho de resistência.

$$f_c = f_{c\infty} \frac{(M-M_0)}{1+a(M-M_0)} \quad (12)$$

Onde:

- a: Constante;
- $M_0$ : Maturidade no tempo  $t_0$ .

Em 2004, Carino apresentou uma expressão parabólica-hiperbólica, descrita pela Equação 13:

$$f_c = f_{c\infty} \frac{\sqrt{a(M-M_0)}}{1+\sqrt{a(M-M_0)}} \quad (13)$$

Onde:

- a: Constante;
- $M_0$ : Maturidade no tempo  $t_0$ .

### 3.4 APLICAÇÕES DO MÉTODO

Ao estimar a relação entre a resistência à compressão, ou qualquer outra propriedade da mistura, e a sua maturidade em laboratório, pode-se estender este método para ensaios em campo. Basta monitorar o comportamento da temperatura do concreto e por meio das relações obtidas, em laboratório para esta mesma mistura, pode-se estimar a resistência a partir do grau de maturidade obtido.

O monitoramento da temperatura na peça pode ser feito com o uso de termopares, instalados logo após o lançamento do concreto, em locais onde os carregamentos são mais críticos ou ainda em regiões aonde a temperatura de cura é mais desfavorável (SALVADOR FILHO, 2001).

Pode-se empregar o método da maturidade para estimar a resistência do concreto em idades iniciais, de forma a liberar outros processos que compõem a sequência executiva. Dentre estes processos pode-se citar a desforma, a pós-tensão da armadura ou ainda a liberação do tráfego em pistas de concreto, sem que ocorram danos à estrutura. Este método é muito válido para locais de baixa temperatura, uma vez que o ganho de resistência é retardado (PINTO et al., 2002).

### 3.5 ULTRASSOM

O ensaio de ultrassom é um método não-destrutivo para avaliar a qualidade do concreto. Este ensaio para obtenção da velocidade de propagação da onda ultrassônica começou a ser estudado quase que simultaneamente na Inglaterra e no Canadá, com nomes diferentes. No continente

européu este ensaio recebia o nome de *ultrasonic tester* e no país norte-americano era conhecido como *soniscope*. É um ensaio que avalia a qualidade do concreto, avaliando suas condições internas como falhas e outros defeitos, como mudanças nas características do meio, degradação por eventual ataque químico e ação do efeito gelo-degelo (CARINO, 2004). Além disso, se trata de um ensaio com baixo custo e de fácil execução (RHEINHEIMER, 2007).

### 3.5.1 O método

Os pulsos ultrassônicos que atravessam o meio têm a sua velocidade dependendo de sua densidade e das suas propriedades elásticas, e independem da geometria da peça. O valor da velocidade de propagação típica, para concreto é da ordem de 3000 a 5000 m/s (CARINO, 2004). Este valor pode variar dependendo da presença de armadura, da massa específica do concreto, do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade (BUNGEY, 1989).

Para um meio infinito, homogêneo, elástico e isotrópico, a velocidade de propagação da onda ultrassônica é definida pela seguinte equação (Equação 14) (BUNGEY, 1989):

$$V = \sqrt{\frac{KE_d}{\rho}} \quad (14)$$

Sendo:

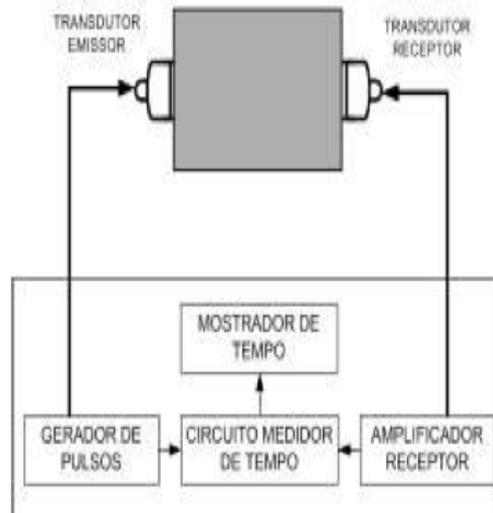
$$K = \frac{(1+\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (15)$$

Onde:

- V= Velocidade do pulso em m/s;
- E<sub>d</sub>= Módulo de elasticidade dinâmico; em N/mm<sup>2</sup>;
- ρ= massa específica em kg/m<sup>3</sup>;
- ν=coeficiente de Poisson.

O método consiste na introdução de um feixe sonoro de alta frequência no material ou componente de interesse com o objetivo de determinar a velocidade de propagação da onda ultrassônica. Este método envolve a medição do tempo de propagação das ondas de compressão através de uma trajetória previamente conhecida. A Figura 9 demonstra o esquema de funcionamento deste ensaio.

**Figura 9** – Esquema de funcionamento do método de Ultrassom.



**Fonte:** Adaptado de Rheinheimer, 2007.

Dividindo-se a distância percorrida pelo tempo decorrido tem-se o valor da velocidade de pulsos ultrassônicos (Equação 16) (CARINO, 1997):

$$V = \frac{L}{t} \quad (16)$$

Onde:

- V= Velocidade de propagação do pulso ultrassônico;
- L= Distância entre o transdutor emissor e o transdutor receptor;
- t= tempo de percurso das ondas.

No ensaio de ultrassom, três tipos de ondas de tensão podem ser geradas através da aplicação de pulsos a uma massa sólida: ondas longitudinais, ondas transversais e ondas de superfície. As ondas longitudinais, algumas vezes chamadas de ondas de compressão, durante a propagação no material produzem regiões de compressão e expansão. As partículas oscilam na mesma direção de propagação da onda e, por serem as mais rápidas, são as primeiras a serem detectadas, sendo assim, as mais importantes e as que fornecem informações mais úteis (BUNGEY, 2006). A Figura 10 demonstra o equipamento de ultrassom e os transdutores utilizados.

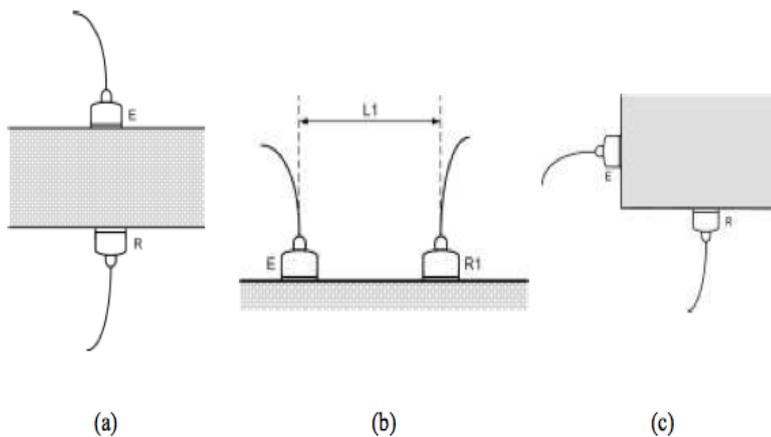
**Figura 10** - Equipamento de ultrassom e os transdutores de 54 kHz e 200 kHz.



**Fonte:** Autoria Própria.

A NBR 8802 (2013) demonstra três maneiras de posicionar o transdutor para realização do ensaio. A Figura 11 demonstra essas maneiras.

**Figura 11** - Tipos de transmissão. (a)-Transmissão Direta; (b)- Transmissão Indireta; (c)- Transmissão semi-direta.



**Fonte:** NBR 8802 (ABNT, 2013).

A maneira mais recomendada para a realização do ensaio é a transmissão direta, uma vez que há maior intensidade na recepção da onda ultrassônica. A transmissão indireta é recomendada em locais aonde o acesso ao outro lado da peça é limitado. Já a transmissão semi-direta, situação menos recomendada, deve se adotada somente quando não existe a possibilidade de acessar as faces opostas e o local de interesse não tenha o comprimento mínimo para a realização do ensaio indireto (NBR 8802, 2013).

### 3.5.2 Aplicações do Ultrassom

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) é capaz de identificar mudanças nas características do concreto com o aumento da idade, a exemplo disto tem-se que a resistência mecânica pode ser percebida pela variação na VPU. Com o aumento da resistência, a VPU também aumenta, pois conforme a Equação 14, com o aumento do módulo de elasticidade E, aumenta-se a velocidade, uma vez que a densidade e o coeficiente de Poisson não se alteram sensivelmente (MACHADO, 2007).

Apesar da velocidade de propagação da onda ultrassônica e resistência à compressão não apresentarem nenhuma relação física direta, a análise da velocidade média de propagação da onda ultrassônica pode estimar a resistência do concreto, uma vez que com a maturidade da mistura velocidade e resistência aumentam (ACI COMMITTEE 228, 2003).

Além de poder estimar a resistência do concreto, o método do ultrassom pode também ser usado para avaliar a qualidade do mesmo. De forma a detectar a presença de fissuras, vazios, indicar a ocorrência de ataques químicos e possíveis deteriorações devido ao efeito gelo-degelo ou ainda danos provocados ao fogo.

O ensaio de ultrassom é um ensaio de fácil execução, inclusive no campo. O aparelho, geralmente, é portátil, tem memória interna e pode ser alimentado com o uso de baterias, portanto garante que o ensaio pode ser realizado mesmo em locais sem energia elétrica, como o pátio de uma empresa de pré-fabricados. Outra vantagem é que nos elementos pré-fabricados a análise do ganho de resistência pode ser realizada utilizando-se da transmissão direta, quase sempre, exceto em uma minoria dos casos.

### 3.5.3 Comprimento de propagação de onda e frequência do transdutor-emissor

Segundo Bungey (1989), o comprimento mínimo para propagação das ondas deveria ser:

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

Em concretos, o transdutor mais utilizado é o de 54 kHz, mas os de frequência entre 20 e 200 kHz também são empregados. A escolha do transdutor é em função do tamanho da peça, uma vez que a distância a ser percorrida não pode ser inferior ao comprimento da onda ( $\lambda$ ):

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (17)$$

Onde:

- V: Velocidade da onda;
- f: frequência de vibração.

Ainda segundo Bungey (1989), para evitar a redução da energia da onda e uma possível perda de sinal, a dimensão máxima dos agregados graúdos deve ser inferior ao comprimento de onda.

#### **3.5.4 Ultrassom no Estado Fresco**

Durante o processo de endurecimento de um concreto, existe uma técnica para a caracterização dos materiais cimentícios, via ensaio ultrassônico. Esta técnica foi introduzida através dos trabalhos de Grosse e Reinhardt (1994) junto a Universidade de Stuttgart, na Alemanha.

Este tipo de ensaio proporciona um monitoramento constante da velocidade de propagação da onda ultrassônica, com isso se tem uma representação da evolução das reações de hidratação do cimento desde suas idades iniciais (GROSSE E REINHARDT, 2003).

O dispositivo de Grosse e Reinhardt é constituído de um recipiente com duas paredes de polimetilmetacrilato (PMMA) e de uma borracha em formato de U. Os transdutores ficam posicionados nas duas paredes de PMMA.

Irrigaray (2012) recriou um dispositivo similar que fosse capaz de monitorar o comportamento da VPU para misturas ainda em estado fresco. O dispositivo se trata de um cubo com aresta de 20 cm, sua estrutura é de madeira compensada de 20 mm, três faces são revestidas com borracha de 30 mm de espessuras, duas faces são revestidas com vidro de 3 mm e a face superior fica exposta, sem revestimento. Nas faces que recebem o revestimento de vidro existem furos de 50 mm a fim de acoplarem os transdutores, transmissor e receptor. Os furos foram feitos a 10 cm da base e neles foram introduzidos flanges de 60 mm, colados e parafusados, servindo de gabarito para os transdutores ultrassônicos. Para garantir uma boa aderência na interface vidro/transdutor colocou-se os transdutores em niple duplo de PVC de 60 mm. Os niples foram retificados e cortados a fim de se tornarem um niple simples e assim facilitarem o processo de rosqueá-los junto às flanges. Além disso, o aparato recriado possui um sistema de abertura que permite moldar e desformar facilmente os concretos. A Figura 12 demonstra este aparato:

**Figura 12** - Dispositivo utilizado para acompanhar a velocidade do pulso ultrassônico em concretos com idades iniciais.



**Fonte:** Autoria Própria.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é destinado a apresentar o método utilizado para o desenvolvimento deste trabalho com o intuito de se alcançar os objetivos propostos previamente.

Primeiramente foi feita uma parceria com uma das principais indústrias de pré-fabricados do país, para que assim fosse possível desenvolver uma análise de execução e das propriedades do concreto utilizado em uma considerável gama de produtos. Os dados do traço deste mesmo concreto foram fornecidos pela empresa, assim como os seus materiais constituintes.

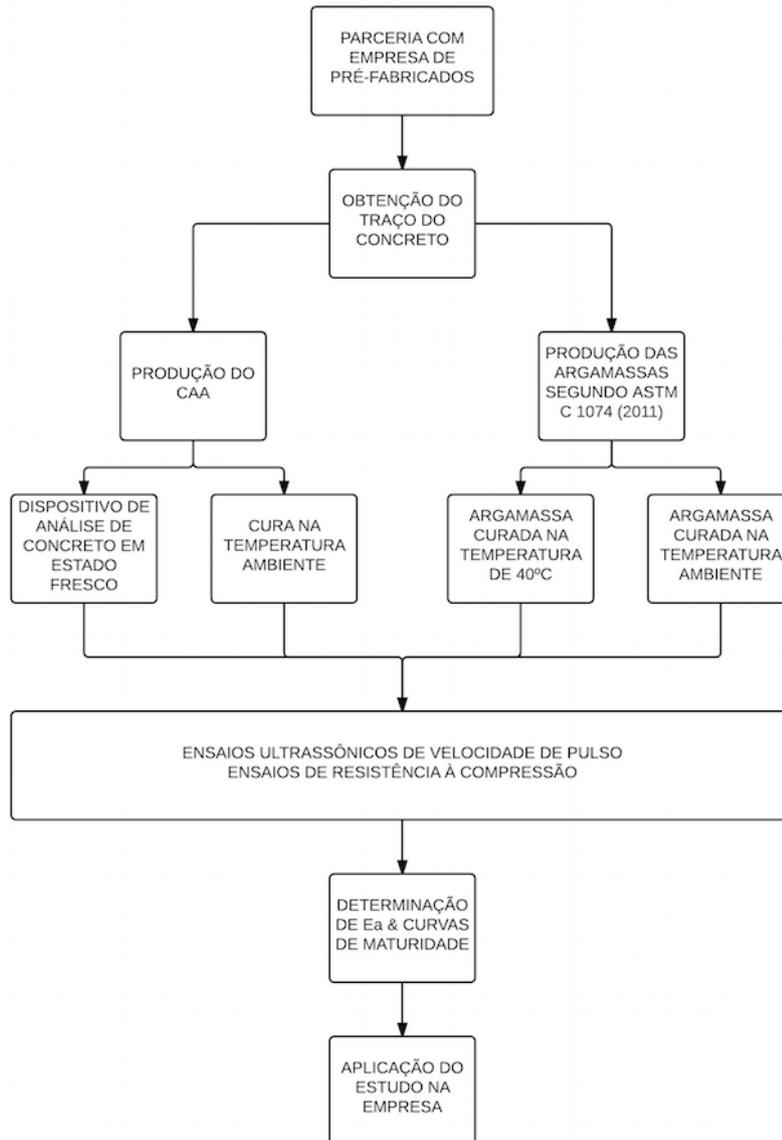
Numa primeira etapa, este mesmo concreto foi reproduzido em laboratório e a sua resistência à compressão axial foi acompanhada junto com o ganho da velocidade de pulso ultrassônico.

A segunda etapa foi caracterizar a Energia Aparente de Ativação para esta mesma mistura por meio de ensaios de ultrassom e resistência à compressão. Com estes resultados foi possível construir a curva de maturidade para esta mistura, a fim de se conhecer melhor o seu comportamento.

### 4.1 FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE TRABALHO

A metodologia utilizada para desenvolver este trabalho é ilustrada através do fluxograma da Figura 13.

**Figura 13** - Fluxograma de metodologia.



Fonte: Autoria própria.

## 4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Todos os equipamentos utilizados na realização dos ensaios foram de propriedade da UFSC. Todas as medidas realizadas neste trabalho foram feitas através de um paquímetro com precisão de 0,1 mm.

A seguir, uma breve descrição dos equipamentos utilizados.

### 4.2.1 Ultrassom

O ultrassom é responsável por medir o tempo de propagação da onda ultrassônica no meio. Neste trabalho este equipamento foi utilizado para medir a VPU em concreto, argamassa e vidro. O equipamento é um PUNDIT LAB PLUS, da marca *Proceq*. Os transdutores utilizados foram os de

54 kHz e de 200 kHz. O *software* de comunicação entre aparelho e computador foi o disponibilizado pelo próprio fabricante, o Punditlink. A precisão de leitura do equipamento de ultrassom é de 0,1  $\mu$ s.

#### 4.2.2 Data-Logger e Termopares

O controle da temperatura foi realizado por termopares ligados a um *data-logger*. O aparelho utilizado é da marca Novus, possui 8 (oito) canais e a sua comunicação com computador é realizada através do *software Field Chart*. A sua precisão é de 0,1 °C.

#### 4.2.3 Prensa

A prensa utilizada nos ensaios de compressão dos corpos de prova de concreto e de argamassa foi a prensa do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC). Se trata de uma prensa de capacidade de carga controlada, da marca *Shimadzu* e sua capacidade é de 1000KN. Os ensaios que utilizaram da prensa foram realizados pelos técnicos do laboratório.

Para o capeamento dos corpos de prova, utilizou-se de moldes metálicos, os mesmos também foram emprestados do LMCC.

### 4.3 TRAÇO DE ESTUDO

Como mencionado, obteve-se junto a uma empresa parceira o traço de um concreto auto-adensável que é utilizado em diferentes produtos oferecidos pela mesma. Destes produtos podem ser citados como exemplos vigas protendidas de ponte, vigas de passarela entre outros.

Deste traço em questão, foi desenvolvido o traço utilizado na argamassa para  $E_a$ , processo que será descrito posteriormente.

Para a produção do concreto em estudo foi utilizado cimento, areia, brita, aditivo e água. As características de cada um dos materiais constituintes serão apresentadas na seção 4.3.1. Já a água utilizada tanto na confecção do concreto quanto na confecção das argamassas, é proveniente da rede pública de abastecimento do município de Florianópolis.

A seguir na Tabela 3 é representado o traço do concreto auto-adensável utilizado.

**Tabela 3** - Traço do CAA utilizado.

<b>Concreto Auto-Adensável</b>	<b>Consumo / m<sup>3</sup></b>	
	Massa (kg)	Volume (l)
Cimento CPV	464	148,72
Areia Natural	183	70,66
Areia de Britagem	736	279,85
Brita 0	451	171,48
Brita 1	301	114,45
Aditivo SP - II - N	3,4	3,21
Água	208	208
a/c	0,45	-

Para a execução da argamassa utilizada no processo de obtenção do índice  $E_a$ , foi realizada uma modificação no traço do concreto, conforme será apresentado no item 4.4.1.1. O traço da argamassa está descrito na Tabela 4.

**Tabela 4** - Traço da Argamassa.

<b>Argamassa (<math>E_a</math>)</b>	<b>Traço</b>
Cimento CPV	1
Areia Natural	0,324
Areia de Britagem	1,297
Aditivo SP - II - N	0,0073
Água	0,45
a/c	0,45

#### 4.3.1 Caracterização dos Materiais Utilizados

Na confecção do CAA, obteve-se junto à empresa parceira todos os materiais empregados. Nesta mistura foi utilizado cimento, agregado graúdo (Brita 0 e Brita 1), agregados miúdos (areia natural e areia de britagem), água e aditivo superplastificante. Nesta seção será apresentada a caracterização de todos os materiais.

O cimento empregado foi o CP-V, a sua massa específica é de 3,12 g/cm<sup>3</sup>. A seguir na Tabela 5 e 6, os resultados dos ensaios físicos e químicos fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 5** - Propriedades físicas do cimento.

Propriedades Físicas					
Item de Controle	Unidade	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Material retido #200	%	0,03	0,01	0,01	0,06
Material retido #325	%	0,34	0,10	0,20	0,50
Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4,327	39,52	4,270	4,390
Água de consistência	%	30	0,1	29,8	30,2
Início de Pega	h: min	3:41	0:12	3:20	4:00
Fim de Pega	h: min	4:18	0:13	4:00	4:30
Expansibilidade a quente	mm	0,23	0,26	0,00	0,50
Resistência R1	MPa	22,3	0,6	21,4	23,3
Resistência R3	MPa	39,7	0,9	38,1	40,8
Resistência R7	MPa	45,0	0,6	43,8	46,3
Resistência R28	MPa	52,9	1,2	50,6	54,5

**Tabela 6** - Propriedades químicas do cimento.

Propriedades Químicas					
Item de Controle	Unidade	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Perda ao Fogo	%	3,35	0,16	3,20	3,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,24	0,06	4,13	4,35
SiO <sub>2</sub>	%	18,87	0,09	18,69	19,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,72	0,04	2,67	2,80
CaO	%	60,73	0,25	60,19	61,02
MgO	%	4,16	0,24	3,70	4,41
SO <sub>3</sub>	%	3,00	0,02	2,97	3,05
CaO Livre	%	0,65	0,09	0,42	0,76
Resíduo Insolúvel	%	0,84	0,08	0,72	0,96
Equivalência Alcalina	%	0,71	0,02	0,68	0,75

As Tabelas 7 e 8 trazem a caracterização dos agregados graúdos, brita 0 e brita 1.

**Tabela 7 - Caracterização da Brita 0.**

Composição Granulométrica (NM 248)			
Peneira (mm)	Peso (g)	Perc. Retido (%)	Perc. Acumul.(%)
19	-	-	-
12,5	-	-	-
9,5	80	5,57	2,52
6,3	865	60,28	65,85
4,8	360	25,09	90,94
2,4	125	8,71	99,65
1,2	-	-	99,65
0,6	-	-	99,65
0,3	-	-	99,65
0,15	-	-	99,65
Fundo	5	0,35	100
Total	1435	100	

Módulo de Finura	5,95
Dimensão Máxima Característica	9,5 mm
Massa Específica	2,61 kg/dm <sup>3</sup>
Massa Unitária	1,41 kg/dm <sup>3</sup>

**Tabela 8** - Caracterização da Brita 1.

Composição Granulométrica (NM 248)			
Peneira (mm)	Peso (g)	Perc. Retido (%)	Perc. Acumul.(%)
19	30	1,7	1,7
12,5	1055	58,3	59,9
9,5	540	29,8	89,8
6,3	180	9,9	99,7
4,8	-	-	99,7
2,4	-	-	99,7
1,2	-	-	99,7
0,6	-	-	99,7
0,3	-	-	99,7
0,15	-	-	99,7
Fundo	5	0,3	100
Total	1810	100	

Módulo de Finura	6,88
Dimensão Máxima Característica	25 mm
Massa Específica	2,53 kg/dm <sup>3</sup>
Massa Unitária	1,44 kg/dm <sup>3</sup>

Duas areias foram utilizadas na produção do concreto e da argamassa. Uma areia de origem natural e uma areia de britagem. As Tabelas 9 e 10 trazem a caracterização de ambas areias utilizadas.

**Tabela 9** – Caracterização da Areia Natural.

Composição Granulométrica (NM 248)			
Peneira (mm)	Peso (g)	Perc, Retido (%)	Perc, Acumul,(%)
9,5	-	-	-
6,3	-	-	-
4,8	-	-	-
2,4	60	5,4	5,4
1,2	260	23,2	28,6
0,6	290	25,9	54,5
0,3	215	19,2	73,7
0,15	230	20,5	94,2
0,075	55	4,9	99,1
Fundo	10	0,9	100
Total	1120	0	

Módulo de Finura	2,56
Dimensão Máxima Característica	4,8 mm
Massa Específica	2,6 kg/dm <sup>3</sup>
Massa Unitária	1,48 kg/dm <sup>3</sup>
Torrões de Argila	0,4 %
Material Pulverulento	3 %

**Tabela 10** - Caracterização da Areia de Britagem.

Composição Granulométrica (NM 248)			
Peneira (mm)	Peso (g)	Perc, Retido (%)	Perc, Acumul,(%)
9,5	-	-	-
6,3	-	-	-
4,8	-	-	-
2,4	185	14,7	14,7
1,2	290	23	37,7
0,6	220	17,5	55,2
0,3	165	13,1	68,3
0,15	150	11,9	80,2
0,075	130	10,3	90,5
Fundo	120	9,5	100
Total	1260	23	

Módulo de Finura	2,56
Dimensão Máxima Característica	4,8 mm
Massa Específica	2,6 kg/dm <sup>3</sup>
Massa Unitária	1,5 kg/dm <sup>3</sup>
Torrões de Argila	0 %
Material Pulverulento	13 %

Neste trabalho foi usado um aditivo superplastificante com massa específica de 1,060 g/cm<sup>3</sup>. Sua consistência é líquida, é à base de policarboxilato, polímero à base de éter, conhecido como um dispersor de última geração. Este aditivo é do tipo II, e segundo a NBR 11678 (ABNT, 2011), é um aditivo que não modifica a consistência do concreto no estado fresco, proporciona uma grande redução da água adicionada ao concreto, aumenta significativamente o abatimento e a sua fluidez e não apresenta função secundária sobre a pega da mistura.

#### 4.4 PROGRAMA DE ENSAIOS

Os ensaios de resistência à compressão mecânica e ensaios ultrassônicos foram realizados para a obtenção da Energia Aparente de Ativação da mistura apresentada na seção 4.3. Além disso, obteve-se um conhecimento do ganho da VPU em idades iniciais para este mesmo concreto.

Todos os ensaios foram executados nas dependências do Grupo de Pesquisa em Ensaio Não-Destrutivos (GPEND), Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) ou no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC).

#### **4.4.1 Obtenção da Energia Aparente de Ativação**

A ASTM C 1074 (2011), indica que a presença do agregado graúdo não interfere na obtenção dos valores da Energia Aparente de Ativação. Sendo assim, utiliza-se argamassa ao invés do concreto na obtenção deste parâmetro.

##### **4.4.1.1 Argamassas**

A própria ASTM C 1074 (2011) apresenta uma conversão do traço de concreto para um traço de argamassa equivalente. Utiliza-se da proporção de agregado graúdo/cimento do concreto e proporciona-se uma argamassa com a mesma relação em massa, porém com agregado miúdo. A argamassa tem a mesma relação agregado miúdo/cimento que o concreto tem com agregado graúdo/cimento. A relação de água/materiais cimentícios se mantém constante assim como a proporção de aditivo.

Na execução da argamassa, se utilizou uma argamassadeira, tipo misturador planetário de eixo vertical. A execução da mistura foi feita misturando primeiramente os agregados miúdos por trinta segundos, em seguida 80 % da água era adicionado juntamente com o aditivo e os 20 % restante da água, logo após o cimento era adicionado. Misturava-se tudo por mais trinta segundos, esperava-se um minuto e meio enquanto retirava-se o material aderido ao fundo e as laterais da cuba, para que novamente voltasse a misturar os materiais por mais um minuto. Após a confecção da argamassa, os corpos de prova eram moldados nas fôrmas que já estavam com o desmoldante.

Os corpos de prova já confeccionados eram colocados em câmaras climatizadas à temperatura constante de 22°C e 40°C (+/- 2°C). Nas primeiras 24 horas os corpos de prova ficaram cobertos por um filme plástico e dentro das fôrmas. Após este período foram desmoldados e depositados as suas respectivas câmaras climáticas.

##### **4.4.1.2 Fôrmas de Argamassa**

As fôrmas utilizadas nos ensaios que empregaram argamassa eram fôrmas já existentes e já utilizados em outras pesquisas de Rheinheimer (2007) e Câmara (2006). Eram fôrmas metálicas com dimensões de 50x50x50 mm, representadas na Figura 14.

**Figura 14** – Moldes metálicos utilizados para moldar a argamassa.



**Fonte:** Autoria Própria.

#### 4.4.1.3 Câmaras Climáticas

A fim de manter a temperatura constante no interior de cada uma das câmaras necessárias à obtenção de  $E_a$ , foi preciso desenvolver um sistema que aquecesse o interior de uma delas e de um sistema que mantivesse a outra a uma temperatura constante.

##### **a) Ambiente a 40°C**

Utilizou-se de uma caixa térmica de poliestireno, aonde foi inserido água. Na água foram colocadas resistências que estavam ligadas a um termostato, no qual também estava ligada uma bomba aquática de circulação. O termostato foi ajustado para manter uma temperatura constante de 40°C, quando a temperatura no interior da caixa abaixasse o termostato ligaria as resistências e a bomba de circulação até que a temperatura desejada fosse alcançada. As resistências tinham por finalidade esquentar a água até a temperatura desejada enquanto a bomba garantia uma convecção forçada no interior da mesma. Este dispositivo é semelhante ao usado por Machado (2007) e Rheinheimer (2007), representado na Figura 15.

**Figura 15** – Câmara climática programada para 40°C. No canto inferior direito o termostato utilizado para realizar o controle da temperatura.



**Fonte:** Aatoria Própria.

### **b) Temperatura Ambiente**

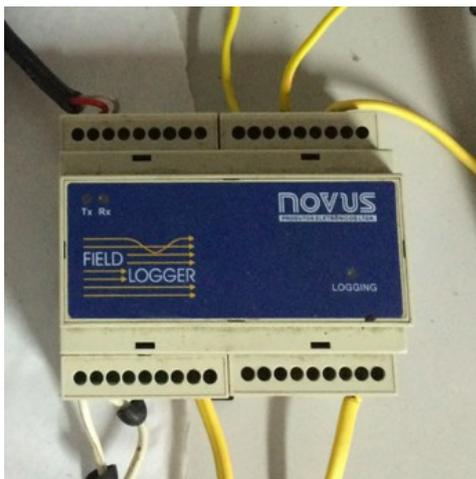
O outro ambiente também se tratava de uma caixa térmica de poliestireno. No entanto, o intuito desta caixa era simular a temperatura ambiente, porém constante. Sendo assim, foi inserido na mesma água para que a inércia térmica no interior da mesma fosse maior, garantindo assim uma temperatura mais constante no decorrer dos ensaios.

#### 4.4.1.4 Controle da Temperatura

Através de termopares e de um *data-logger* (Figura 16) foi possível medir e salvar as temperaturas dos ambientes e dos corpos de prova. A seguir está um resumo dos locais que o aparelhou realizou medições:

- Ambiente da caixa mantida à temperatura ambiente;
- Corpo de prova cúbico de argamassa mantido à temperatura ambiente;
- Corpo de prova cilíndrico de concreto mantido à temperatura ambiente;
- Ambiente da caixa mantida à temperatura de 40°C;
- Corpo de prova cúbico de argamassa mantido à temperatura de 40°C.

**Figura 16** – Data-logger da marca Novus que realizou todo o controle da temperatura.



**Fonte:** Autoria Própria.

A ASTM C 1074 (2011) recomenda que nas primeiras 48 horas de ensaio, o registro da temperatura seja feito a cada no máximo 30 minutos. Para este ensaio, o equipamento foi programado para realizar leituras a cada 10 minutos.

#### 4.4.1.5 Ensaio à compressão

Segundo a ASTM C 1074 (2011), seis ensaios à compressão devem ser realizados nas argamassas em idades diferentes na determinação da curva de crescimento da resistência com o tempo. A primeira idade dos ensaios deve ser realizada quando a argamassa apresentar uma resistência próxima a 4 MPa, este tempo é o tempo inicial. Os próximos ensaios devem ser realizados em idades dobradas em relação à primeira idade. Por exemplo, se resistência de 4 MPa foi obtida com 12 horas os próximos ensaios serão com 24, 48, 96, 192 e 384 horas após a mistura da água aos materiais cimentícios. Para o cálculo da resistência média, três ensaios devem ser realizados para cada idade.

Utilizaram-se todos os moldes disponíveis, num total de 18 corpos de prova para cada temperatura. Os ensaios à compressão foram realizados para as argamassas curadas em ambas temperaturas. A Figura 17 representa os ensaios à compressão:

**Figura 17** – Corpo de prova de argamassa sendo ensaiado à compressão e outros dois testemunhos já ensaiados.



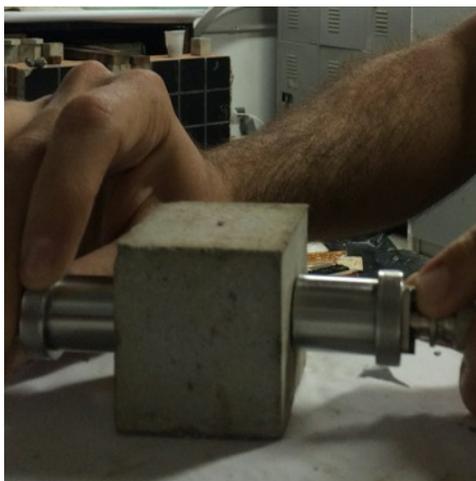
**Fonte:** Autoria Própria.

Para a obtenção da tensão de ruptura, utilizou-se o paquímetro para realizar a medida das faces ensaiadas. Isto se deve ao fato de nem sempre os moldes apresentarem os 50 mm determinados. Com as medidas das faces ensaiadas, utilizou-se da média aritmética das áreas no cálculo da tensão.

#### 4.4.1.6 Ensaio ultrassônicos

Para a obtenção da velocidade de pulso ultrassônico, os mesmos corpos de prova de argamassa ensaiados à compressão foram utilizados. Os ensaios foram realizados imediatamente antes de serem rompidos. Cada corpo de prova foi submetido aos ensaios ultrassônicos. Estes ensaios foram realizados utilizando o equipamento PUNDIT. Seguindo as recomendações apresentadas na seção 3.5.3, utilizou-se dos transdutores de 200 kHz e 25 mm de diâmetro e, portanto não houve problemas quanto ao comprimento de onda. As leituras foram realizadas de forma direta e as medidas entre as faces foram verificadas através de paquímetro, para posterior cálculo da VPU. Em cada corpo de prova foram realizados três eventos de dez leituras cada. A Figura 18 ilustra a realização deste ensaio.

**Figura 18** – Ensaio ultrassônico no corpo de prova cúbico de argamassa.



**Fonte:** Autoria Própria.

#### 4.4.2 Curvas de Maturidade

Na obtenção das curvas de maturidade, necessita-se conhecer o comportamento do concreto ao longo do tempo. Para isso precisa-se saber do ganho de resistência deste concreto com o tempo, em condições de temperatura controlada. Com isso, a partir das funções de maturidade (PINTO, 2004a) a resistência do concreto pode ser estimada a qualquer temperatura. Para isso, foi necessário moldar corpos de prova e testá-los quanto a sua resistência à compressão axial para diferentes tempos.

##### 4.4.2.1 Produção do CAA

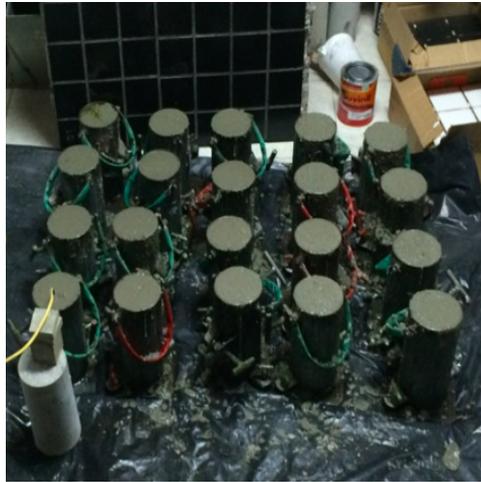
O CAA foi executado nas dependências do LEE, por meio de uma betoneira intermitente de queda livre e eixo inclinado, com pás solidárias a cuba e capacidade de 350 litros.

Todos os materiais foram pesados com precisão de 0,1 g, utilizando-se da balança do LMCC e do GPEND. Tentou-se recriar as mesmas condições de preparo do concreto quando o mesmo é executado na empresa parceira. Com isso, a umidade dos agregados não foi corrigida e a sequência da mistura também tentou recriar estas condições. A ordem em que os materiais foram adicionados foi a seguinte: agregado graúdo, uma parte da água, o agregado miúdo, o cimento e o restante da água com aditivo. O controle de qualidade deste CAA foi feito via *Slump Flow*, conforme descrito no item 2.7.5.1.

Em seguida foram moldados os corpos de prova cilíndricos 10x20cm que foram colocados no GPEND. Isto se fez para que o calor perdido nas primeiras 24 horas não ficasse retido dentro da caixa térmica com temperatura ambiente. A temperatura foi medida durante este intervalo. Os moldes foram do tipo metálicos e o desmoldante utilizado foi à base de ácidos graxos. Foram moldados dois corpos de prova a mais do que o necessário para realização dos ensaios de

compressão axial: um para realização do ensaio ultrassônico e um para o acompanhamento da temperatura. Na Figura 19, pode-se ver os corpos de prova moldados.

**Figura 19** – Corpos de prova moldados



**Fonte:** Autoria Própria.

Após as primeiras 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e realocados para a câmara climática de temperatura ambiente. Os mesmos só foram retirados da câmara climática para a realização dos ensaios ultrassônicos e de compressão.

#### 4.4.2.2 Ensaio à Compressão

O ensaio de compressão axial tem como finalidade medir a resistência à compressão do concreto. É aplicada uma carga vertical centrada na face do corpo de prova, este fica entre os pratos de compressão da prensa de ensaio (NBR 5739, 2007). Os corpos de prova foram ensaiados à compressão nas seguintes idades: 1, 2, 4, 7, 14, e 28 dias. A Figura 20 demonstra a realização de um ensaio.

Nas idades de 1 e 2 dias, os corpos de prova foram ensaiados sem o capeamento das superfícies de contato. No ensaio de 1 dia os corpos de prova foram rompidos utilizando *Neoprene* em ambas as superfícies já que, por uma questão de tempo, não foi possível realizar o capeamento de suas faces. Na idade de dois dias, somente nas superfícies mais irregulares foi possível realizar o capeamento, sendo utilizado *Neoprene*, na outra face. No restante dos corpos de prova, foi possível realizar o capeamento. O capeamento foi executado utilizando-se nata de cimento.

Nas quatro primeiras idades, 1, 2, 4 e 7 dias, três corpos de prova foram ensaiados para cada idade. Nas idades restante, dois corpos de prova serviram para verificar a resistência à compressão do concreto, conforme o procedimento descrito na ASTM C 1074 (2011).

**Figura 20** – Ensaio de compressão axial em um corpo de prova de concreto.



**Fonte:** Autoria Própria.

#### 4.4.2.3 Ensaio Ultrassônicos

Nas mesmas idades que os corpos de prova foram ensaiados à compressão, ensaios ultrassônicos foram feitos a fim de verificar a VPU. Imediatamente antes da ruptura dos corpos de prova de concreto, o ensaio ultrassônico era realizado no corpo de prova que foi moldado exclusivamente para acompanhar a VPU. O equipamento utilizado neste ensaio também foi o PUNDIT, porém com transdutores de 54 kHz e 50 mm de diâmetro. As leituras foram feitas da forma direta no corpo de prova e a medida entre as suas faces também foram verificadas por um paquímetro. Quatro eventos de dez leituras forneceram o tempo de propagação para posterior cálculo da VPU, conforme item 3.5.1. Na Figura 21, é demonstrado um ensaio ultrassônico no corpo de prova de concreto.

**Figura 21** - Ensaio ultrassônico em corpo de prova cilíndrico.



**Fonte:** Autoria Própria.

#### 4.4.3 Obtenção da velocidade de onda ultrassônica no concreto ainda em estado fresco

Com o mesmo concreto do item 4.4.2.1, utilizou-se do molde cúbico do item 3.5.4 a fim de conhecer o ganho da VPU nas primeiras idades desta mistura. A velocidade de propagação da onda ultrassônica foi monitorada de forma contínua durante as primeiras 24 horas, por meio do PUNDIT e dos seus transdutores de 54 kHz. A Figura 22 demonstra o monitoramento da VPU.

Conforme a descrição do molde cúbico, a onda ultrassônica parte do transdutor emissor percorre uma placa de vidro, o concreto, outra placa de vidro e por fim é recebida pelo transdutor receptor. Portanto, para se ter um conhecimento da velocidade real no concreto, o tempo de propagação pelo vidro deve ser desconsiderado. Testes posteriores realizados somente no vidro indicaram um tempo de passagem da onda de 0,4  $\mu$ s. Ao descontar este valor do tempo total de propagação tem-se o tempo de propagação da onda ultrassônica pelo concreto. Para determinação da VPU, a medida entre as faces de leitura foi feita com o paquímetro e aplicou-se o procedimento descrito no item 3.5.1.

**Figura 22** - Transdutores acoplados ao dispositivo utilizado no ensaio com concreto em estado fresco.



**Fonte:** Autoria Própria.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos da parte experimental deste trabalho.

### 5.1 ENSAIOS EM ARGAMASSA

Conforme descrito anteriormente, a partir do traço do CAA e seguindo a recomendação da ASTM C 1074 (2011) obteve-se argamassa, as mesmas foram ensaiadas à compressão e a ensaios ultrassônicos de velocidade de pulso. Todos os ensaios anteriores foram realizados para as duas condições de temperatura.

#### 5.1.1 Argamassa em temperatura ambiente

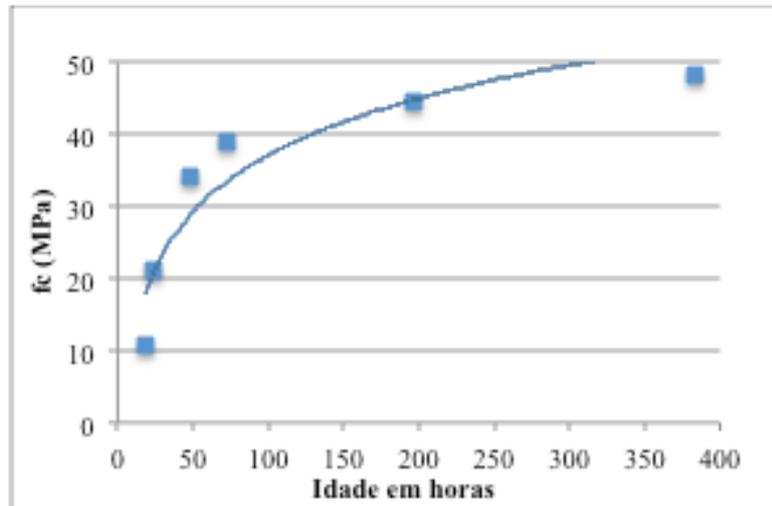
Três corpos de prova cúbicos de 50 mm de aresta foram ensaiados à compressão e para velocidade de pulso ultrassônico a cada idade. As médias obtidas de ambos os ensaios estão representados na Tabela 11.

**Tabela 11** – Resultados obtidos para argamassa curada na temperatura ambiente.

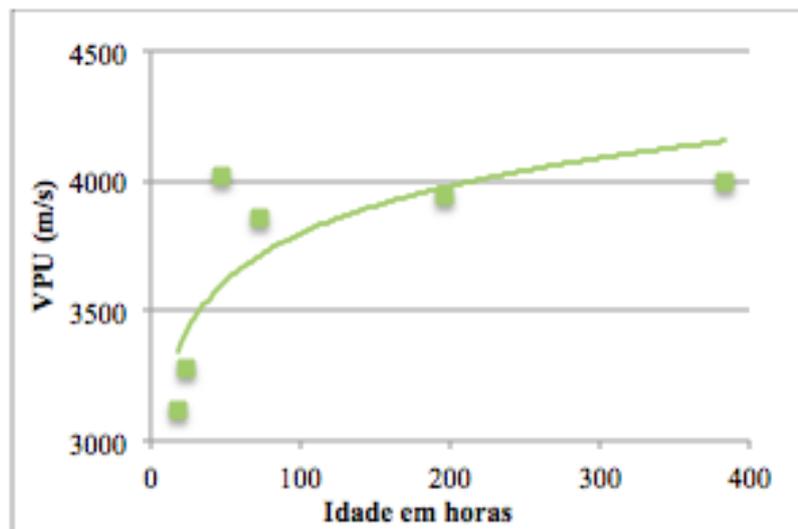
<b>Temperatura Ambiente</b>			
	<b>Idade (hs)</b>	<b>fc (MPa)</b>	<b>VPU (m/s)</b>
i	18	10,69	3115
2i	24	21,18	3281
4i	48	34,33	4018
8i	72	39,00	3856
16i	196	44,51	3946
32i	384	48,40	3993

O ganho da resistência à compressão e o comportamento da velocidade de pulso ultrassônico em função do tempo estão representados nas Figuras 23 e 24, respectivamente.

**Figura 23** – Evolução da resistência à compressão em argamassa curada à temperatura ambiente.



**Figura 24** - Evolução da VPU em argamassa curada à temperatura ambiente.

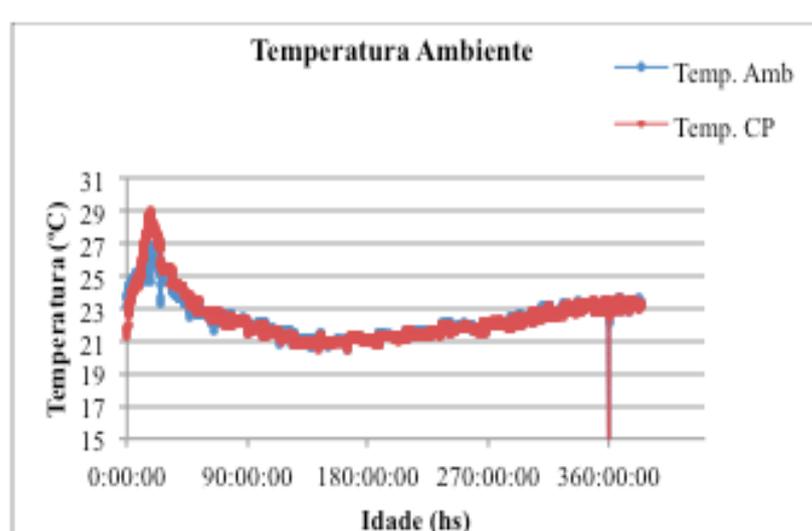


Na idade de 48 horas observa-se uma velocidade de pulso ultrassônico maior do que em outras idades, apesar de apresentar uma resistência à compressão menor.

#### 5.1.1.1 Temperatura

A temperatura do ambiente e do corpo de prova de argamassa foram monitoradas durante todo o ensaio. A Figura 25 mostra a evolução da temperatura no ambiente e no corpo de prova, e a Tabela 12 apresenta os valores médios da temperatura durante o ensaio.

**Figura 25** – Evolução da temperatura na caixa com temperatura ambiente.



**Tabela 12** – Temperatura média ambiente.

Valores Médios (°C)	
Amb	CP
22,37	23,38

Nota-se que a média da temperatura do corpo de prova ficou ligeiramente acima dos valores encontrados para o ambiente, isto pode ser explicado pelas reações químicas exotérmicas que ocorreram no próprio.

Próximo às 360 horas de ensaio houve uma interrupção no fornecimento da energia elétrica, o que ocasionou uma queda brusca na medição da temperatura, situação explicada pelo fato do aparelho não realizar medidas neste período sem eletricidade.

### 5.1.2 Argamassa em temperatura de 40° C

As argamassas curadas à temperatura de 40° C também seguiram o mesmo modelo proposto para as argamassas curadas à temperatura ambiente. Para cada idade foram ensaiados três corpos de prova à compressão e para VPU. As médias obtidas nos ensaios estão apresentadas na Tabela 13.

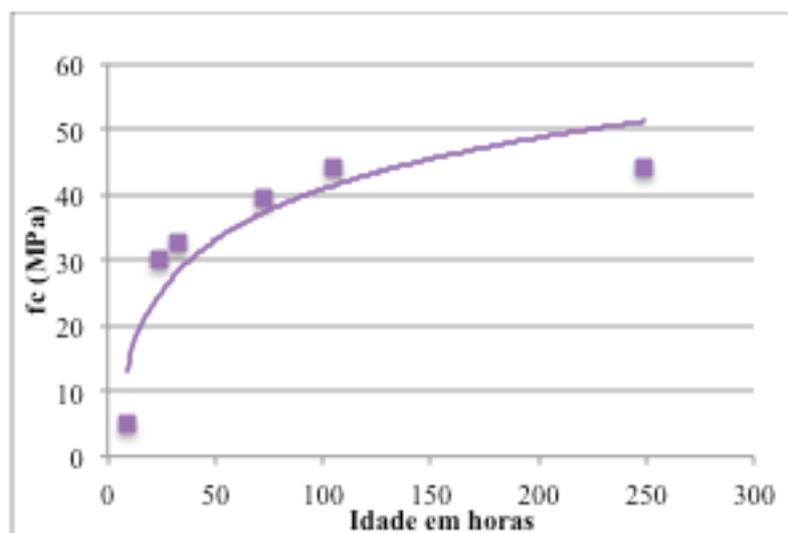
**Tabela 13** - Resultados obtidos para argamassa curada na temperatura de 40°C.

Temperatura de 40° C			
	Idade (hs)	fc (MPa)	VPU (m/s)
i	8,5	5,17	2648
2i	24	30,07	3861
4i	33	32,74	3848
8i	72	39,28	4009
16i	105	44,30	4281
32i	249	44,30	4200

Devido à limitação nos horários de utilização do laboratório, alguns ensaios foram realizados fora do tempo ideal. Os mesmos, no entanto foram realizados o mais próximo possível das idades ideais.

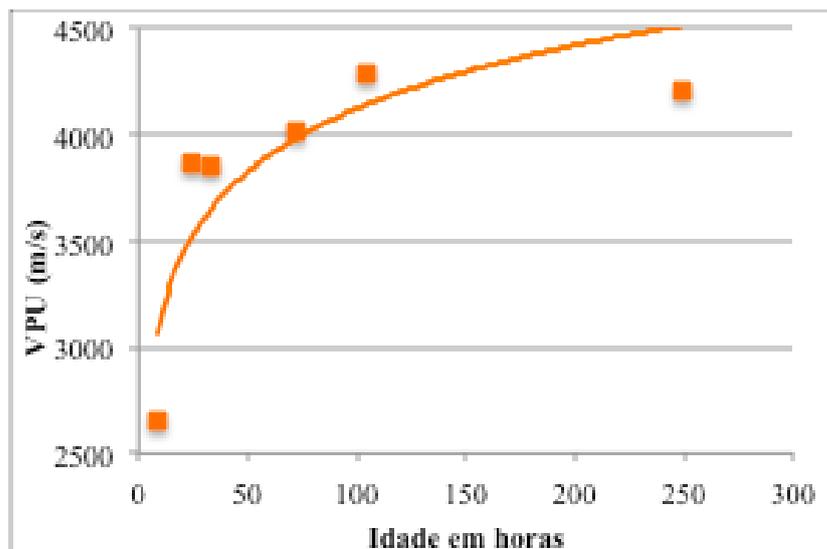
O ganho da resistência à compressão em relação ao tempo está ilustrado na Figura 26.

**Figura 26** - Evolução da resistência à compressão em argamassa curada à temperatura ambiente.



A Figura 27 ilustra o comportamento da velocidade de pulso ultrassônico com o tempo para a argamassa curada na caixa térmica de 40°C.

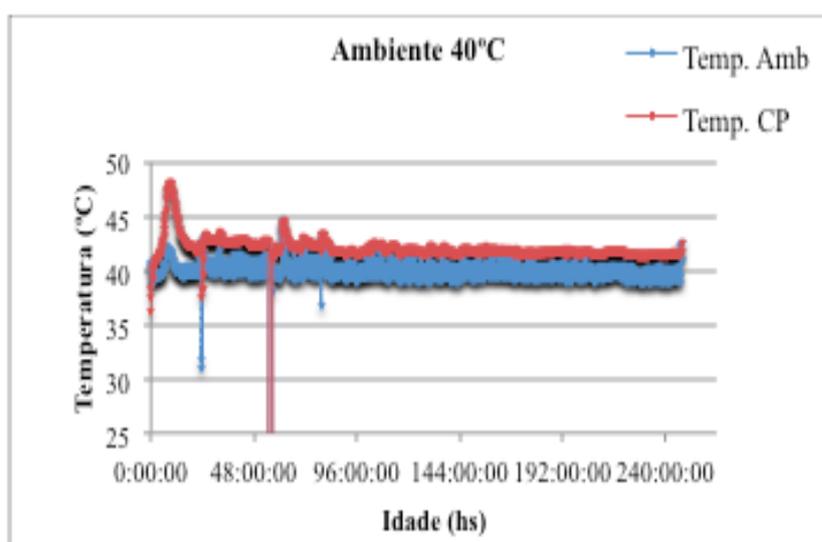
**Figura 27** - Evolução da VPU em argamassa curada à temperatura de 40°C.



#### 5.1.2.1 Temperatura

Assim como a temperatura foi monitorada para as argamassas curadas à temperatura ambiente, o mesmo monitoramento foi realizado nas argamassas curadas a 40°C. A Figura 28 ilustra a evolução da temperatura no tempo e na Tabela 14 estão os valores médios da temperatura.

**Figura 28** - Evolução da temperatura no ambiente a 40°C.



**Tabela 14** – Temperatura média 40°C.

Valores Médios (°C)	
Amb	CP
39,92	42,03

Constata-se o mesmo problema de fornecimento de energia elétrica indicado anteriormente, porém desta vez próximo a 48 horas. Pela análise da Figura 28 nota-se que a temperatura ambiente manteve-se bem próxima da programada no termostato, o que pode também ser comprovado pelo valor da média que é bem próxima dos 40°C preestabelecidos. Há algumas quedas na temperatura do ambiente correspondentes a momentos de abertura da caixa.

A temperatura nos corpos de prova passaram dos 45°C, devido as reações químicas que se estabelecem nos mesmos. Com o passar do tempo a temperatura se estabilizou e ficou constante, conforme pode ser identificado na Figura 28.

### 5.1.3 Análise em conjunto

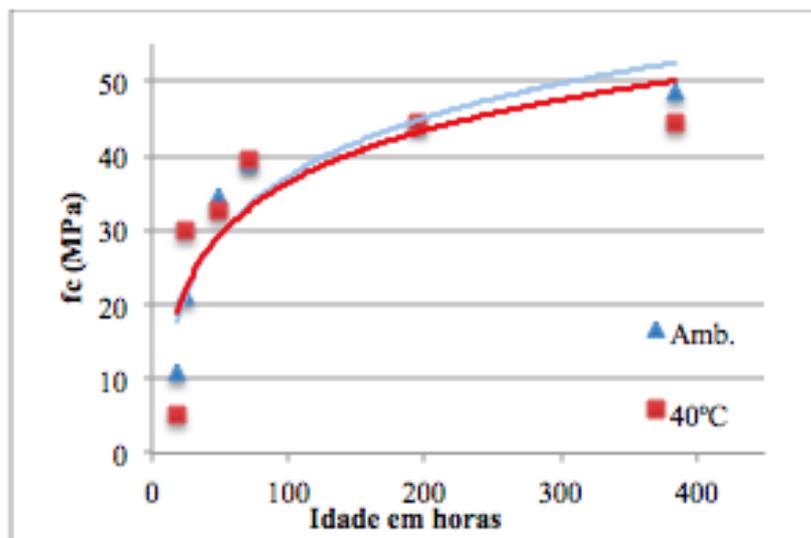
A Tabela 15 apresenta uma comparação entre as duas argamassas e suas respectivas propriedades.

**Tabela 15** – Valores de resistência à compressão e de VPU para as argamassas curadas à temperatura ambiente e de 40°C.

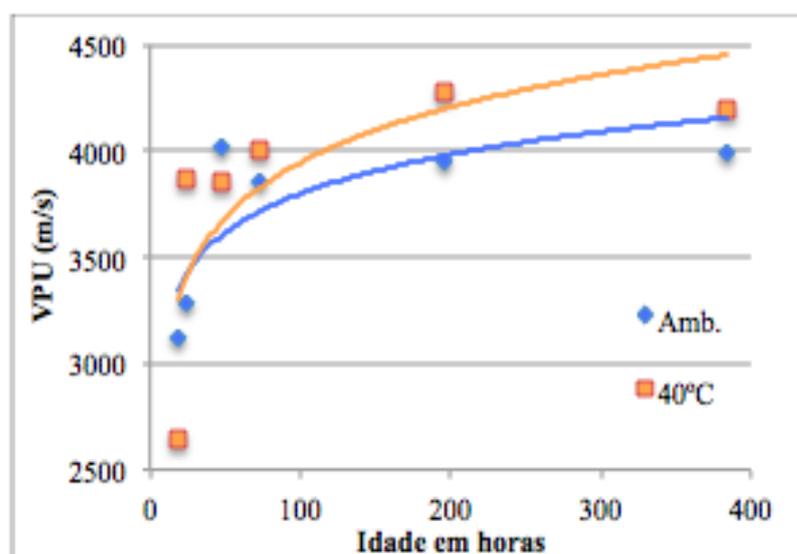
Temperatura de 40° C			Temperatura Ambiente		
Idade (hs)	fc (MPa)	VPU (m/s)	Idade (hs)	fc (MPa)	VPU (m/s)
8.5	5,17	2648	18	10,79	3115
24	30,07	3861	24	21,18	3281
33	32,74	3848	48	34,33	4018
72	39,28	4009	72	39,00	3856
105	44,30	4281	196	44,51	3946
249	44,30	4200	384	48,40	3993

Assim como apresentado individualmente, o ganho da resistência à compressão e o comportamento da VPU estão apresentados de maneira conjunta nas Figuras 29 e 30, respectivamente.

**Figura 29** – Ganho da resistência à compressão para as duas temperaturas de cura.



**Figura 30** - Evolução da VPU para as argamassas curadas à temperatura de 40°C e temperatura ambiente.



## 5.2 ENSAIOS NO CAA

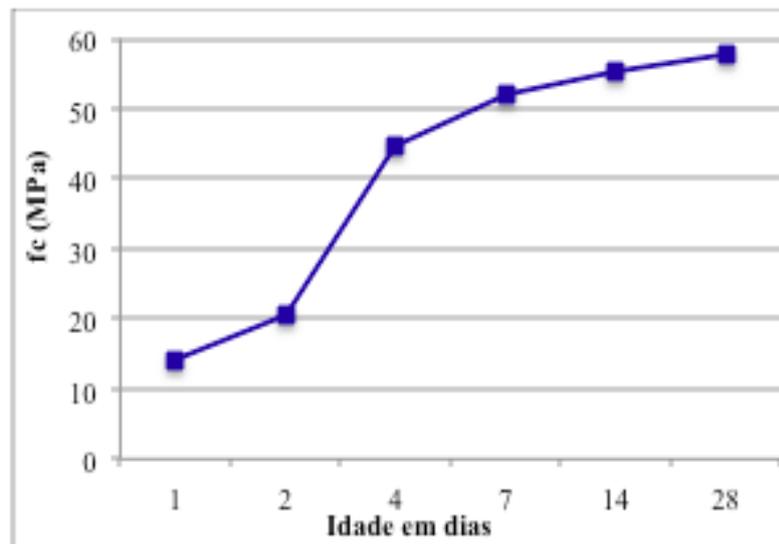
Nos corpos de prova de concreto os ensaios realizados foram de compressão axial e velocidade de propagação da onda ultrassônica. A velocidade de propagação foi realizada nos moldes cilíndricos e no molde cúbico do item 3.5.4, o mesmo que acompanhou o crescimento da VPU quando o concreto ainda estava em estado fresco. Na Tabela 16, os resultados obtidos.

**Tabela 16** – Evolução da resistência à compressão axial e velocidade de pulso ultrassônico com a idade do CAA.

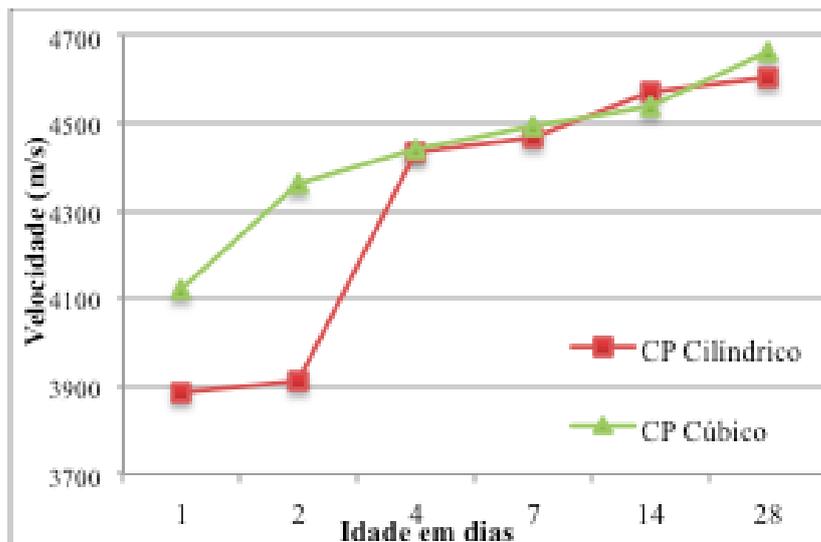
Idade (dias)	fc (MPa)	Velocidade (m/s)	
		Cilindro	Cubo de Concreto
1	14,14	3885	4120
2	20,43	3910	4359
4	44,88	4435	4439
7	51,94	4464	4495
14	55,16	4572	4542
28	57,62	4601	4661

As Figuras 31 e 32 ilustram o comportamento da resistência à compressão axial e a evolução da VPU da mistura para as referidas idades.

**Figura 31** – Evolução com a idade da resistência à compressão do CAA.

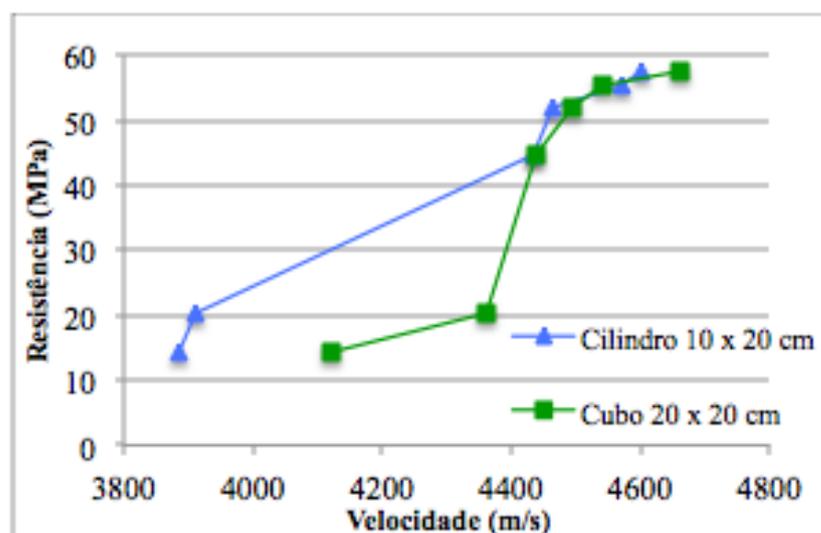


**Figura 32** - Evolução com a idade da VPU do CAA.



Pode-se ainda analisar os valores da VPU com os valores da resistência à compressão axial. Os valores são apresentados na Tabela 16 e são ilustrados na Figura 33:

**Figura 33** – Velocidade de pulso ultrassônica e resistência à compressão.



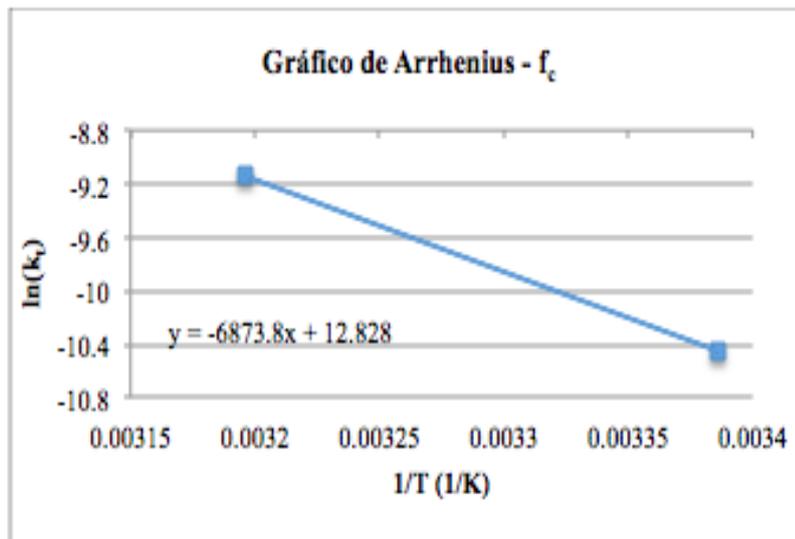
### 5.3 ENERGIA DE ATIVAÇÃO E CURVAS DE MATURIDADE

Segundo a Equação 5, é necessário conhecer a Energia Aparente de Ativação ( $E_a$ ) da mistura para assim poder modelar as curvas de maturidade desejadas.

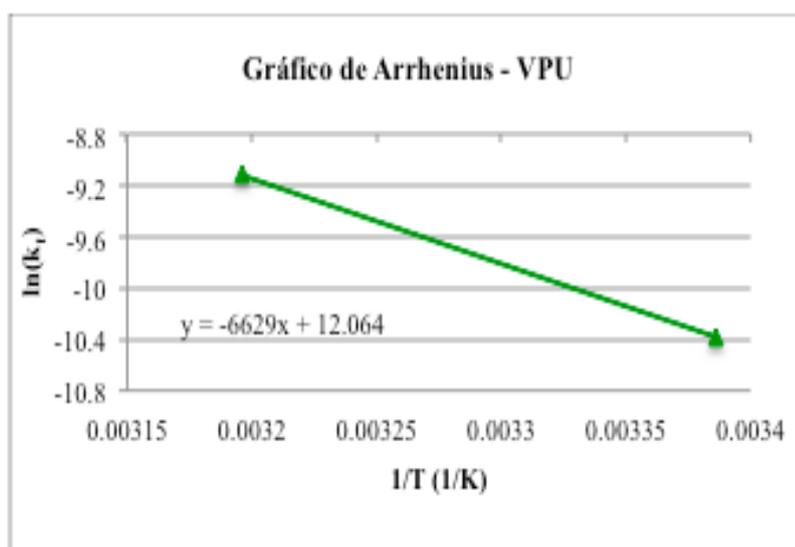
A obtenção de  $E_a$  se faz relacionando o inverso da temperatura absoluta de cada temperatura de cura com o seu respectivo logaritmo natural de  $K_t$ , obtido através de processo iterativo segundo a

Equação 6. O valor negativo do coeficiente angular da reta formada entre estes dois pontos é a Energia de Ativação ( $E_a$ ) dividida pela constante dos gases, R. Seguindo este procedimento é possível confeccionar os gráficos de Arrhenius para os resultados adquiridos através dos ensaios de compressão e VPU. Nas Figuras 34 e 35 é possível de visualizar o gráfico de Arrhenius para a compressão e VPU, respectivamente.

**Figura 34** – Gráfico de Arrhenius para compressão.



**Figura 35** – Gráfico de Arrhenius para a VPU.



A Tabela 17 apresenta os valores de  $E_a$  obtidos por ambos os métodos:

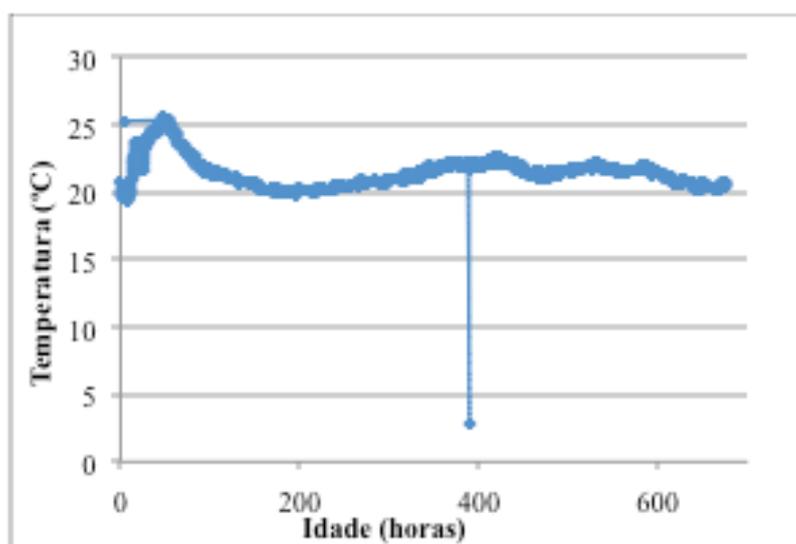
**Tabela 17** – Valores da Energia Aparente de Ativação para o CAA, pelos métodos da compressão e da VPU.

	Compressão	VPU
Ea (KJ/mol)	57,1	55,1

Os valores da Energia Aparente de Ativação foram similares entre os métodos. Uma diferença de 3,5% foi constatada entre eles. Ambos os valores, se comparados com os valores sugeridos na literatura (Tabela 2), são maiores.

Para a obtenção das curvas de maturidade, o corpo de prova de concreto teve a sua temperatura monitorada. Nas primeiras 24 horas o mesmo foi mantido fora da caixa térmica, após este período o mesmo foi transferido para a caixa térmica aonde se teve uma maior estabilidade da temperatura. A Figura 36 ilustra o comportamento da temperatura em função do tempo.

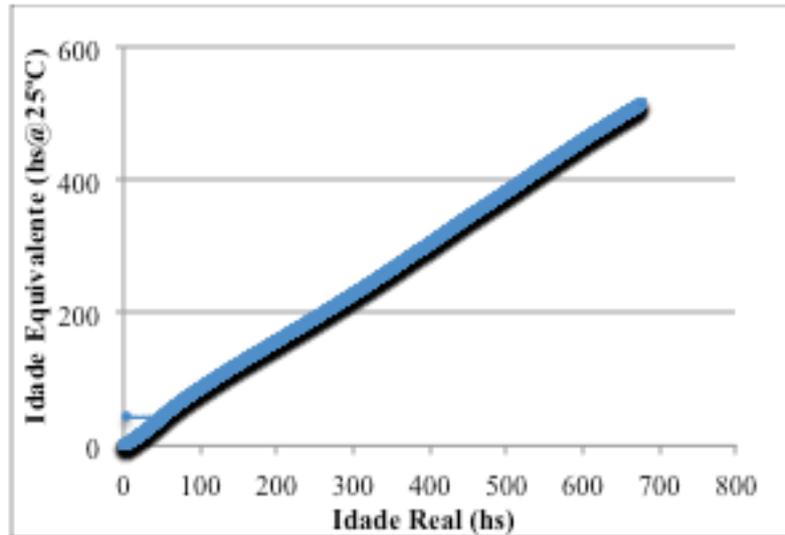
**Figura 36** – Evolução da temperatura em função do tempo.



Nota-se que a sua temperatura aumentou no início, devido às reações exotérmicas de endurecimento e após se manteve constante em função do tempo. Perto da idade de 400 horas houve uma queda brusca da temperatura, situação explicada pela queda da energia elétrica naquele período.

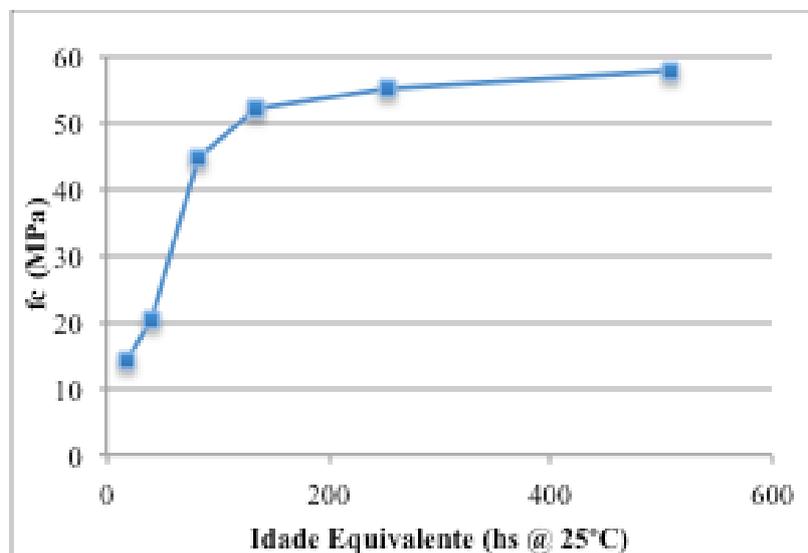
A Figura 37 ilustra a relação entre a Idade Real da mistura e a sua Idade Equivalente, a partir da Energia Aparente de Ativação para a compressão.

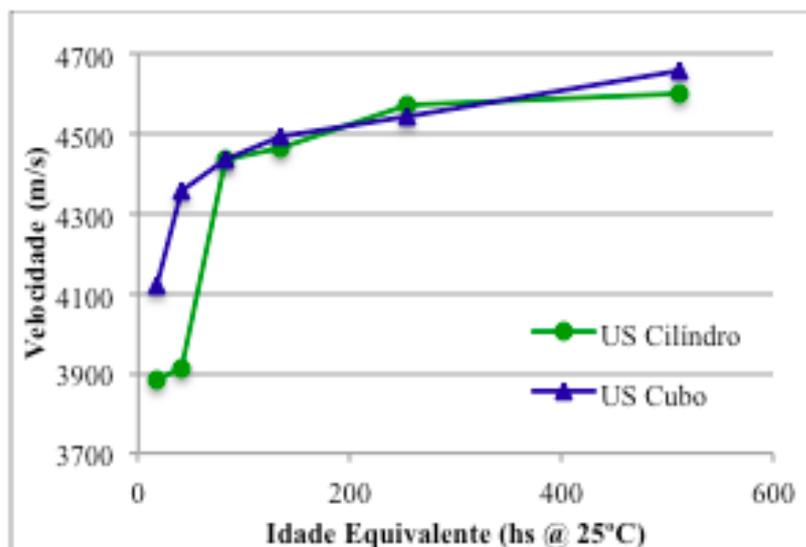
**Figura 37** – Relação ente idade equivalente e idade real para compressão.



Para as curvas de maturidade se utilizou da equação FHP, Equação 5, com temperatura de referência de 25°C e dos respectivos valores da Energia de Ativação obtidos tanto através dos ensaios de compressão e de VPU. As curvas de maturidade estão apresentadas nas Figuras 38 e 39.

**Figura 38** - Curva de maturidade para resistência à compressão.



**Figura 39** - Curva de maturidade para VPU em corpo de prova cilíndrico e cúbico.

As Figuras 38 e 39 ilustram que, para uma cura de 25°C, o ganho da resistência à compressão e da VPU é maior. Em outras palavras, o tempo necessário para atingir determinada resistência é menor, em função da velocidade das reações químicas serem maiores. A Tabela 18, demonstra as Idades Reais e as Idades Equivalentes, encontradas a partir das Energias Aparentes de Ativação ( $E_a$ ) obtidas através de ensaios de compressão ( $f_c$ ) e de VPU.

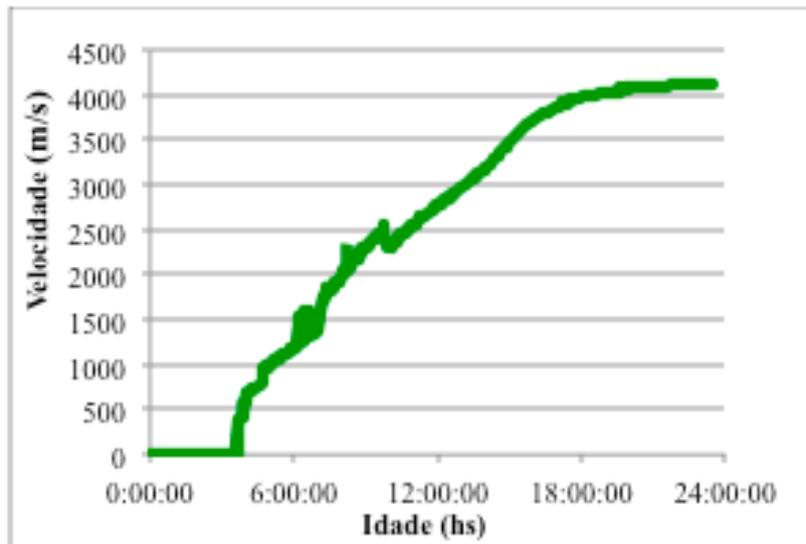
**Tabela 18** – Resistência à compressão e VPU com suas respectivas Idades Reais e Equivalentes, com a temperatura de referência de 25°C.

$f_c$ (MPa)	VPU Cilíndrico (m/s)	VPU Cúbico (m/s)	Idade Real (hs)	Idade Equivalente (hs) $E_a$ (fc) @ 25°C	Idade Equivalente (hs) $E_a$ (VPU)
14,14	3885	4120	24	18,02	18,20
20,43	3910	4359	48	40,58	40,81
44,88	4435	4439	96	82,70	83,12
51,94	4464	4495	168	134,63	135,65
55,16	4572	4542	336	252,52	255,03
57,62	4601	4661	672	507,03	512,03

#### 5.4 VELOCIDADE DO ULTRASSOM – MÉTODO CONTÍNUO

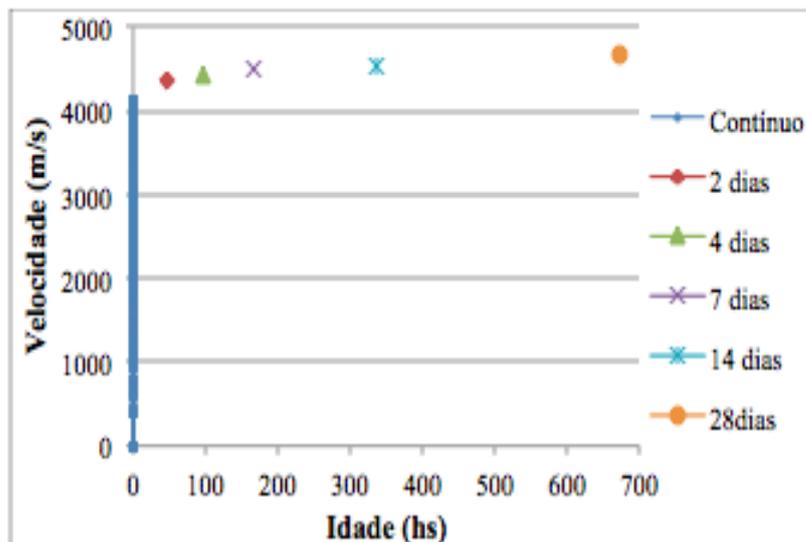
A velocidade de propagação da onda ultrassônica foi adquirida de forma contínua nas primeiras 24 horas para a mistura em análise. A evolução da velocidade com o tempo está apresentada na Figura 40:

**Figura 40** – Evolução da velocidade com o tempo nas primeiras 24 horas.



Nas primeiras horas de ensaio, a velocidade de propagação da onda ultrassônica é zero, fato provavelmente explicado pela baixa consistência apresentada pela mistura. Com o passar do tempo, ocorre um aumento na consistência seguido por um aumento na resistência do concreto e por consequência um aumento na VPU. Nota-se que próximo às 24 horas de ensaio o crescimento da VPU não é acentuado, igual ao apresentado no período entre 4 e 18 horas de ensaio.

Na Figura 41, é apresentado a evolução da VPU com o tempo nas primeiras 24 horas de modo contínuo e aos 2, 4, 7, 14 e 28 dias.

**Figura 41** – Evolução da velocidade em função do tempo.

Conforme mencionado anteriormente, a VPU evolui a uma elevada taxa de crescimento nas primeiras idades e depois passa a apresentar um crescimento mais moderado.

### 5.5 CORRELAÇÃO ENTRE ETAPAS EXECUTIVAS- ULTRASSOM

Na Tabela 19, encontra-se a velocidade de pulso ultrassônico mínima referente à liberação da peça para diferentes serviços. Os resultados indicados a seguir, foram obtidos em laboratório e através da interpolação das figuras anteriores. Observa-se uma diferença muito pequena nos valores da VPU para 18 e 25 MPa, ficando dentro da variabilidade do ensaio. Neste caso, conclui-se que o método do ultrassom não se mostrou adequado neste estudo para esta correlação.

**Tabela 19** – Valores mínimos de VPU para diferentes serviços.

Serviço	Resistência à compressão	
	Necessária (MPa)	VPU mínima (m/s)
Desforma	18	4300
Içamento	18	4300
Pós-Tensão	25	4400

## 5.6 CORRELAÇÃO ENTRE ETAPAS EXECUTIVAS- IDADE EQUIVALENTE

Na Tabela 20, são demonstradas as Idades Equivalentes nas quais pode haver a liberação para os diferentes serviços. Esta Idade Equivalente foi obtida com temperatura de referência em 25°C e por ensaios à compressão.

**Tabela 20** – Idades Equivalentes para liberação de diferentes serviços na temperatura de 25°C.

Serviço	Resistência à compressão Idade Equivalente	
	Necessária (MPa)	(hs≈) @ 25°C
Desforma	18	30
Içamento	18	30
Pós-Tensão	25	48

No Apêndice A, é possível de visualizar esta correlação através da Figura 43.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar um concreto auto-adensável utilizado por uma empresa de pré-fabricados, construindo a Curva de Maturidade. Para isso, foi necessário quantificar a sua Energia Aparente de Ativação ( $E_a$ ), por meio de ensaios de compressão e de ultrassom.

Em condições isotérmicas, a resistência à compressão para a mistura em estudo também foi analisada por ensaios destrutivos e não-destrutivos de velocidade de pulso ultrassônico. Ainda para esta mesma mistura, o ganho da velocidade de onda ultrassônica foi monitorado continuamente por 24 horas.

Os valores da Energia Aparente de Ativação encontrados por meio de ensaios de compressão e de ultrassom foram bem próximos. No entanto, foram superiores aos sugeridos na literatura para misturas que empregam o mesmo tipo de cimento. O emprego do aditivo superplastificante pode ser uma das razões para este aumento encontrado nos valores da Energia Aparente de Ativação.

O Método da Maturidade demonstrou ser uma importante ferramenta no conhecimento da curva de resistência do concreto. Através da implementação deste método, a empresa poderá estimar com certa precisão a resistência dos concretos curados a diferentes temperaturas. Determinando assim, o menor espaço de tempo em que os elementos podem ser desformados, içados ou receber as cargas de protensão, com segurança.

Um acréscimo na temperatura de cura é responsável por garantir maiores valores de resistência à compressão e VPU em menores intervalos de tempo. O aumento da velocidade das reações químicas de endurecimento, em consequência do aumento de temperatura, fornece uma maior produtividade. Isso ocorre, pois a resistência necessária para a desforma da peça, assim como seu içamento e protensão, é adquirida em um menor tempo. Desse modo, um maior número de elementos pode ser produzido em um mesmo espaço de tempo.

Por meio dos resultados apresentados durante os ensaios ultrassônicos, foi possível constatar que se trata de uma boa ferramenta para determinar a Energia Aparente de Ativação, uma vez que, os resultados apresentados por meio deste parâmetro foram similares aos resultados encontrados por ensaios à compressão, diferindo das observações de Rheinheimer (2007). Porém não se pode afirmar o mesmo para estimar a resistência à compressão da peça *in-loco*.

O ensaio contínuo de ultrassom possibilitou conhecer o ganho da VPU para misturas ainda em estado fresco. Com isso foi possível detectar um maior crescimento da velocidade de propagação da onda ultrassônica nas primeiras idades do concreto, confirmando a alta resistência inicial fornecida pelo CP-V – ARI e requerida nos elementos pré-moldados. No concreto endurecido, a velocidade de propagação da onda ultrassônica evoluiu a uma menor taxa crescimento, quando comparado com o estado fresco. Os valores de VPU, obtidos através do corpo de prova cilíndrico e cúbico foram bem próximos, comprovando a acurácia do método ultrassônico.

O concreto empregado nos elementos pré-fabricados se demonstrou adequado no quesito de resistência à compressão. Uma vez que, a mesma atingiu valores satisfatórios de resistência inicial e final, ambas comprovados por ensaios destrutivos e não-destrutivos.

Deve-se considerar que as conclusões apresentadas anteriormente foram fundamentadas em estudos executados em laboratório, podendo haver diferenças relevantes para um possível concreto executado em um canteiro de obras. Recomenda-se antes da aplicação destes métodos um estudo do seu comportamento *in loco*, ou outros trabalhos que completem os estudos apresentados neste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI - 228 - 1R - 03: In Place Methods for Determination of Strength of Concrete*. Detroit, 44 p., 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Approach*. Annual Book of ASTM Standards, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 109/C 109M-02. Standard Test Method for compressive Strength of Hydraulic cement Mortars*. Annual Book of ASTM Standards, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 494: Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. Annual Book of ASTM Standards, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C 597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Annual Book of ASTM Standards, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpo-de-prova cilíndricos.. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do concreto auto-adensável: produção de pré-fabricados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BARTOS, P. J. M.; SÖDERLIND, L. *Environment and ergonomics. Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.5*, p. 1-31, 2000.

BELOHUBY, M.; ALENCAR, R.S.A. Tecnologia do concreto pré-fabricado: Inovações e aplicação. **Manual Munte de projetos em pré-fabricados de concreto**. 2. ed., p. 511-531, 2007.

BOSILJKOV, V. B. *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. Cement and Concrete research*. Islândia, p. 1279-1286, 2003.

BRAMESHUBER, W. *Three years of approvals for SCC – a report form the field. Concrete Precasting Plant and Technology*, v. 70, n.2, p. 78-79, 2004.

BRÜCK, M. *New perspectives of precast concrete for an innovative low cost housing system. Cape town international concrete conferations & Exhibition*, p. 74-77, 2007.

BUI, V. K.; AKKA Y A, Y.; SHAH, S. *Rheological model for self-consolidating concrete. ACI Materials Journal*, v. 99, n. 6, p. 549-559, Nov./Dec. 2002.

BUNGEY, J. H. *The Testing of Concrete in Structures*. 4. ed. Londres: Taylor & Francis, 2006.

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

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

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

CARINO, N. J., *Nondestructive Test Method. NAWY, E.G. (Coord.) Concrete construction engineering handbook*. 1. ed. Flórida: Taylor & Francis, 1997.

CARINO, N. J. *The Maturity Method. CRC Handbook on nondestructive testing of concrete*. V. M. Malhotra and N. J. Carino. Eds. CRC Press: p. 101-146, 2004.

CARVALHO, A. G., **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 134 p., 2002.

CASTRO, A.L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. Departamento de Ciência e Engenharia dos Materiais, São Carlos, 303p., 2007.

CHENGJU, G., *Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength*. **ACI Materials Journal**, V. 86, N. 4, p. 341-353. July-August 1989.

COPPOLA, L. *Self-compacting concrete*. **Concrete Technology**. p. 42-47, 2000.

DOMONE, P. L. J.; JIN, J. *Properties of mortar for self-compacting concrete*. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. **International Rilem Symposium on Self – Compacting Concrete**. 1st., 1999, Estocolmo. *Proceedings... France: RILEM Publications*, p. 109-120, 1999.

EDAMATSU, Y.; SUGAMATA, T.; OUCHI, M. *A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests*. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. **International Rilem Symposium on Self – Compacting Concrete**. 3rd., 2003, Reykjavik. *Proceedings... France: RILEM Publications*, p. 345-355, 2003.

EFNARC – *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete System*. *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. **EFNARC**. Londres, fevereiro, 32p., 2002.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, 441 p. , c2000.

EMBORG, M. *Mixing and transport*. **SCC Final Report** - Task 8.1. Brite EuRam: 64p., 2000.

EPG - *European Project Group* (BIBM; CEMBUREAU; ERMCO; EFCA; EFNARC). **“The European guidelines for self compacting concrete”** . 63 p., 2005.

ESPING, O. *Methods for characterization of fillers and fines for self-compacting concrete*. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. . **International Rilem Symposium on Self – Compacting Concrete**. 3rd., 2003, Reykjavik. *Proceedings... France*: RILEM Publications, p. 208-219, 2003.

FAVA, C.; FORNASIER, G. *Homigones autocompactantes. Homigones especiales*. Ed. *Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*, Santa Fé, p.57-96, 2004.

FERNÁNDEZ ORDÓNEZ, J. A. ***Prefabricación: teoría y práctica***. Barcelona, Editores Técnicos Asociados. 2v. (ed.), 1974.

FREIELEBEN-HANSEN, P. e PEDERSEN, E. J. ***Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete***. *Nordisk Betong*. Vol. 1, pp. 21-25, 1977.

GIBBS, J. ***Self-compacting concrete – getting it right***. Londres, v. 38, n.6, p. 10- 13, Junho 2004.

GROSSE C.U., REINHARDT H. W., KRÜGER M., BEUTEL R. *Working Documents – Advanced testing of fresh cementitious materials – “Ultrasound through-techniques for quality control of concrete during setting and hardening”*. 93 p., 2006.

IRRIGARAY, M. A. P. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de propagação dos pulsos ultrassônicos na pasta do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 235 p., 2012.

KATO, Ricardo M.; SERRA, SMB. **Execução de Pré-Moldados de Concreto Considerando Aspectos da Segurança e Saúde do Trabalho (SST) Segundo a Engenharia de Resiliência (ER)**. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 14, São Carlos, 2012.

KONCZ, T. ***Handbuch de fertigteilbauweise***. 2.ed. Berlin, Bauverlag GmbH. 3v, 1966.

LORIGGIO, D. – Apostila direcionada à disciplina de Concreto Protendido do curso de graduação de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2016.

MACHADO, T. **Análise do processo construtivo de pavimentos de concreto com a utilização de ensaios não-destrutivos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 108 p., 2007.

MANCIO, M., HARVEY, J. T., ALI, A., ZHANG, J., *Evaluation of the Maturity Method for Flexural Strength Estimation in Concrete Pavement. Partnered Pavement Research Center, California Department of Transportation*, 2004.

MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 296 p., 2000.

MELO, K. A . **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 183 p., 2005.

NUNES, S. C. B. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades.** Pós- graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 198 p., 2001.

NURSE, R. W., *Steam Curing of Concrete. Magazine of Concrete Research.* Londres, v. 1, n. 2, p. 79-88., 1949.

OKAMURA, H. *Self-compacting high performance concrete. Concrete International*, v.19, n.7, p. 50-54, Julho, 1997.

PCI – *Precast/Prestressed Concrete Institute. Interim guidelines for the use of self-consolidating concrete in precast/prestressed concrete institute member plants.* 88 p., 2003.

PINTO, K. N. C. **Reciclagem de Resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: Poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo São Paulo, 81 p., 2002.

PINTO, R. C. A. *The Effects of Curing Temperatures on the Development of Mechanical Properties of Fresh and Hardened High Strength Silica Fume Mixtures – a Maturity Approach.* Tese de Doutorado, Universidade de Cornell, EUA, 1997.

PINTO, R. C. A., Determinação da Energia Aparente de Ativação da Hidratação do Cimento, E-mat - **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, Vol. 1, No. 2, 2004b.

PINTO, R. C. A., HOBBS, S. V., HOVER, K. C.. *The Maturity Approach in Concrete Technology – Going Beyond Compressive Strength*, **5th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology**, ACI SP-200, Cingapura, 2001.

PINTO, R. C. A.. Aplicação do Método da maturidade em pavimentos de concreto. **Congresso Brasileiro do Concreto**, 46o, Florianópolis, 2004. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004a (CD-ROM).

PINTO, R. C. A.. O Método da Maturidade e sua Utilização em Construção civil. **Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**, 29o, Punta Del Este, 2000. Anais... Punta Del Este, 2000.

PINTO, R. C. de A., PADARATZ, I. J., ANDRADE, L. de B., FEY E. O método da maturidade para tempo de desforma e descimbramento de elementos estruturais: Estudo de caso. **44o Congresso Brasileiro do Concreto**, Belo Horizonte, 2002.

PLOWMAN, J. M., *Maturity and the Strength of Concrete*. **Magazine of Concrete Research**, Londres, v. 8, n. 22, p. 13-22., 1956.

PROSKE, T.; GRAUBNER, C.A. – *Self-compacting concrete-pressure on formwork and ability to deaerate*. **Darnstadt concrete**. n.17, 2002.

RHEINHEIMER, V. **Utilização de ensaios não destrutivos no controle tecnológico de execução de pavimentos de concreto tipo Fast Track**. Florianópolis, 2007. 266 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SHINDOH , T . ; MATSUOKA , Y . *Development of Combination- Type Self - Compacting Concrete and Evaluation Test Methods*. **Journal of Advanced Concrete Technology**. v. 1, n. 1, p. 26-36, Apr. 2003.

SHOYA , M . et. al . *Self- Compactability of fresh concrete with non-ferrous metal slag fine aggregates*. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson **International Rilem Symposium on Self – Compacting Concrete**. 1st., 1999, Stockholm. Proceedings... France: RILEM Publications, p. 579-590., 1999.

SAAK, A. W .; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. *New methodology for designing self - compacting concrete. ACI Materials Journal*, v. 98, n. 6, p. 429-439, Nov./Dec. 2001.

SALVADOR FILHO, J. A. A., **Cura Térmica dos Concretos de Alto Desempenho: Análise das Propriedades Reo-mecânicas Utilizando o Método da Maturidade.** Dissertação (Mestrado), FEIS/Unesp, Ilha Solteira, 91 p., 2001.

SAUL, A. G. A., *Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. Magazine of Concrete Research*, Londres, v. 2, n. 6, p. 127-140.,1951.

SHEINN, D.; HO, D. W. S.; TAM, C. T. *Effect of particle shape on paste rheology of SCC.* Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. *International Rilem Symposium on Self – Compacting Concrete.* 3rd., 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, p. 232-239., 2003.

STRUBLE, L et al. *Rheology of cement paste and concrete. Cement, Concrete and Aggregates*, v.20, n.2, p. 269-277, Dezembro, 1998.

SUBRAMANIAM, K. V., MOHSEN, J. P., SHAW, C. K., SHAH, S. P. , *Ultrasonic Technique for Monitoring Concrete Strength Gain at Early Age, ACI Materials Journal*, p. 458-462., 2002.

TVIKSTA, L.-G. *Quality control. SCC Final Report - Task 8.4. Brite EuRam*: 28p., 2000.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil: pré-fabricação, monumentos, fundações.** São Paulo: Studio Nobel, v. 3, 2002.

WALRAVEN, J. *SCC applied in the precast concrete industry. Cape town international concrete conference & Exhibition*, p. 24-27, 2007.

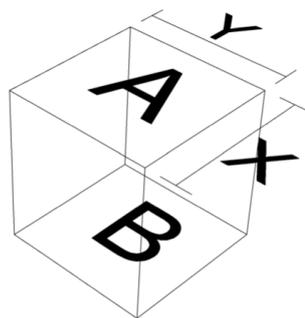


## 8. APÊNDICE A

Os resultados obtidos de forma experimental serão apresentados nesta seção.

O corpo de prova de argamassa está representado na Figura 42. As medidas X e Y representam as duas medidas das faces, A e B, do corpo de prova onde foi aplicado o carregamento. A distância entre as face A e B representa a distância percorrida pela onda ultrassônica.

**Figura 42** – Medidas do corpo de prova de argamassa.



**Fonte:** Autoria Própria.

**Tabela 21** – Resultados dos ensaios à compressão na argamassa curada à temperatura ambiente.

Temperatura Ambiente								
Idade	(horas)	Face A (mm)		Face B (mm)		Força (N)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)
		x	y	x	y			
18		51,4	50,0	50,6	50,8	28170	10,96	10,79
		49,9	52,6	49,9	51,2	25360	9,79	
		51,6	50,6	52,2	50,3	29030	11,61	
24		50,4	52,0	50,7	51,2	50870	19,50	21,18
		50,4	51,2	51,9	50,1	55880	21,57	
		50,8	50,9	51,1	51,0	58350	22,48	
48		51,7	49,9	52,4	49,0	91920	35,71	34,33
		51,5	50,8	50,6	52,6	78120	29,60	
		51,3	50,2	50,6	50,0	96160	37,67	
72		51,7	50,7	51,2	50,8	102480	39,25	39,00
		51,4	50,1	51,2	50,8	89120	34,44	
		50,6	51,4	52,0	50,5	113200	43,31	
196		50,5	52,1	50,4	52,0	108720	41,40	44,51
		50,7	52,0	50,6	51,9	125320	47,63	
		-	-	-	-	-	-	
384		51,4	50,8	51,8	50,7	122520	46,79	48,40
		49,8	52,0	49,4	52,6	80320	30,96	
		50,5	51,8	50,5	51,6	130600	50,02	

**Tabela 22** – Resultados dos ensaios ultrassônicos nas argamassas curadas à temperatura ambiente.

Temperatura Ambiente				
Idade (horas)	Distância AB (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Velocidade (m/s)	Velocidade Média (m/s)
18	50,6	16,29	3106	3115
	50,5	16,31	3096	
	49,8	15,83	3145	
24	50,0	15,11	3308	3281
	49,8	15,81	3156	
	51,0	15,09	3380	
48	51,2	12,42	4121	4018
	50,0	12,62	3962	
	51,2	12,89	3971	
72	50,4	13,04	3866	3856
	49,9	13,02	3833	
	49,0	12,66	3871	
196	50,5	12,90	3915	3946
	49,4	12,42	3979	
	-	-	-	
384	52,2	12,90	4047	3993
	50,4	12,89	3910	
	51,9	12,90	4023	

**Tabela 23** – Resultados dos ensaios à compressão na argamassa curada à temperatura de 40°C.

40°C							
Idade (horas)	Face A (mm)		Face B (mm)		Força (N)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)
	x	y	x	y			
8.5	49,1	50,8	50,4	50,4	12710	5,05	5,17
	50,7	50,9	50,6	49,9	13120	5,14	
	50,2	50,2	49,1	50,4	13320	5,33	
24	50,7	50,6	51,2	50,7	83080	32,19	30,07
	50,7	50,6	50,6	50,5	79640	31,11	
	52,0	50,7	51,3	50,9	67280	26,92	
33	50,5	49,9	50,5	48,1	82600	33,38	32,74
	50,9	50,6	50,6	51,7	84640	32,61	
	49,5	50,6	50,1	50,7	80600	32,25	
72	50,2	50,4	50,7	50,5	94160	36,99	39,28
	50,9	51,0	51,3	50,5	105760	40,78	
	50,6	50,9	50,8	50,6	100120	40,06	
105	50,4	50,0	50,5	50,8	101200	39,80	44,30
	50,2	50,7	50,6	50,9	124920	48,79	
	-	-	-	-	-	-	
249	49,4	50,4	49,9	51,3	120480	47,49	44,30
	50,6	50,5	50,7	50,4	102640	40,17	
	51,0	50,5	50,5	51,4	117000	45,25	

**Tabela 24** – Resultados dos ensaios ultrassônicos nas argamassas curadas à temperatura de 40°C.

40°C				
Idade (horas)	Distância AB (mm)	Tempo ( $\mu$ s)	Velocidade (m/s)	Velocidade Média (m/s)
8,5	50,3	18,37	2737	2648
	50,8	19,34	2626	
	50,7	19,64	2581	
24	50,2	12,82	3916	3861
	50,9	13,30	3827	
	50,6	13,18	3840	
33	49,4	12,90	3829	3848
	50,0	13,26	3839	
	50,9	12,90	3874	
72	50,4	12,38	4071	4009
	50,6	12,90	3922	
	50,0	12,39	4035	
105	50,3	11,64	4321	4281
	50,3	11,86	4242	
	-	-	-	
249	50,5	12,38	4079	4200
	50,3	11,80	4264	
	50,8	11,94	4256	

Na Tabela 25, estão os resultados do CAA. A distância entre as faces de leitura ultrassônica é de 20,18 cm.

**Tabela 25** – Resultados da VPU e dos ensaios à compressão axial no CAA.*Slump Flow* = 76cm

Idade (dias)	Força (N)	Tensão (MPa)	Tempo ( $\mu$ s)	Velocidade Média (m/s)	Tensão Média (MPa)
1	107040	13,63	51,94	3885	14,14
	117080	14,91			
	109000	13,88			
2	190240	24,22	51,61	3910	20,43
	155520	19,80			
	135720	17,28			
4	362800	46,19	45,50	4435	44,88
	341800	43,52			
	352760	44,91			
7	397800	50,65	45,21	4464	50,94
	402200	51,21			
	400200	50,96			
14	440400	56,07	44,14	4572	55,16
	426000	54,24			
28	460800	58,67	43,86	4601	57,62
	444300	56,57			

**Figura 43** – Correlação entre a resistência necessária para desforma, içamento e pós-tensão, e idade equivalente.