



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NILVAN TEIXEIRA DE ARAÚJO JÚNIOR

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA PRODUZIDO COM ESCÓRIA  
ÁLCALI-ATIVADA**

Recife

2019

NILVAN TEIXEIRA DE ARAÚJO JÚNIOR

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA PRODUZIDO COM ESCÓRIA  
ÁLCALI-ATIVADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Estruturas.

**Orientador:** Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.

Recife

2019

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A663c Araújo Júnior, Nilvan Teixeira de.  
Concreto de alta resistência produzido com escória álcali-ativada / Nilvan  
Teixeira de Araújo Júnior. – 2019.  
105 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.  
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto de escória álcali-ativada. 3. Silicato de  
sódio. 4. Concreto de alta resistência. 5. Método IPT/EPUSP modificado.  
I. Melo Neto, Antônio Acácio de. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-57



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA PRODUZIDO COM ESCÓRIA  
ÁLCALI-ATIVADA**

defendida por

Nilvan Teixeira de Araújo Júnior

Considera o candidato APROVADO

Recife, 08 de fevereiro de 2019

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto - UFPE  
(orientador)

---

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros – UFPR  
(examinador externo)

---

Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes – UFAL  
(examinador externo)

*“Dar-te-ei graças, Senhor, Deus meu, de todo o coração,  
e glorificarei para sempre o teu nome” [Salmos 86: 12].*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida. Pela saúde e pela paz sempre presentes. Toda honra e glória sejam dadas a ele.

Aos meus pais. Em especial, à minha mãe Onilda, muito amorosa, zelosa e incentivadora; a ela devo todo o meu caráter e sem ela aqui não teria chegado. Aos meus tios Nilson e Rita pelo apoio incondicional.

Aos meus irmãos Diego, Pedro Emanuel e Maria Luiza, pelas orações e incentivo. A eles ofereço, com carinho, este trabalho.

À minha noiva Kamilla, pelo incentivo e por estar sempre presente durante essa jornada; sem seu estímulo não estaria aqui e nem teria tido a tranquilidade para desenvolver este trabalho.

Ao Prof. Dr. Antônio Acácio pela orientação, dedicação a este trabalho e ensinamentos sobre como fazer pesquisa de qualidade.

Ao Prof. Dr. Paulo Régis pelo conhecimento dividido e conselhos.

Aos colegas Victor Estolano, Sara Martins, Priscilla Basto, Rodrigo Portela, Larissa Barbosa, Tacila Bertulino, Leandro Maia pela inestimável ajuda na moldagem dos corpos de prova e na execução dos ensaios.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME), João Cazuzza da Rocha e Rivaldo Catunda de Oliveira, pelo auxílio na parte experimental deste trabalho.

À Tecomat pelo auxílio na retificação dos corpos de prova e na execução dos ensaios, em particular ao Prof. Tibério Wanderley e ao Eng. André Miranda.

À NOVAKEM pela doação do aditivo utilizado, em particular ao Eng. Humberto Benini que sempre respondeu às nossas solicitações.

À SUPERMIX pela doação da sílica ativa e da areia utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, em particular ao Eng. João Protásio que sempre respondeu às nossas solicitações.

À PERNAMBUCO QUÍMICA S/A pela doação da solução de silicato de sódio, em particular ao Eng. João Jungmann que sempre respondeu às nossas solicitações.

À CIMENTO MIZU S/A pela doação da escória granulada de alto-forno moída, em particular à José Antero e à Roberto Lima.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado.

Em suma, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O concreto de escória álcali-ativada está atraindo cada vez mais atenção devido ao seu potencial como alternativa ao concreto confeccionado com cimento Portland, sendo objeto de estudo em diversos países. Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver um concreto de alta resistência feito com escória ativada com silicato de sódio. Com a finalidade de comparar os resultados, foi primeiramente confeccionado um concreto de alta resistência com cimento Portland e sílica ativa utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP modificado. Em seguida, produziu-se o concreto de escória álcali-ativada com a mesma metodologia utilizada para o concreto de alta resistência, sendo realizada uma alteração na relação água/materiais secos. Nestes concretos, realizaram-se ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico com 1, 3, 7 e 28 dias e, além destes ensaios, aos 28 dias foram feitos os ensaios de módulo de elasticidade estático e resistência à tração por compressão diametral. Os resultados mostraram que tanto o concreto de alta resistência como o concreto de escória álcali-ativada desenvolveram altas resistências iniciais e finais. Os traços confeccionados para o concreto de alta resistência alcançaram resistências à compressão acima de 50 MPa com 1 dia e acima de 109 MPa aos 28 dias, enquanto que os traços de concreto de escória álcali-ativada alcançaram resistências à compressão acima de 40 MPa com 1 dia e acima de 86 MPa aos 28 dias. De forma geral, ao realizar a comparação entre o concreto de alta resistência e o concreto de escória álcali-ativada com resistências à compressão equivalentes, verificou-se que o módulo de elasticidade estático, a resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico do primeiro apresentaram resultados maiores que os do segundo.

Palavras-chave: Concreto de escória álcali-ativada. Silicato de sódio. Concreto de alta resistência. Método IPT/EPUSP modificado.

## ABSTRACT

Alkali-activated slag concrete is attracting increasing attention due to its potential as an alternative to Portland cement concrete, being studied in several countries. This work had as main objective to develop a high strength concrete made with slag activated with sodium silicate. In order to compare the results, a high strength concrete with Portland cement and silica fume was firstly made using the modified IPT/EPUSP method. Subsequently, the alkali-activated slag concrete was produced with the same method used for the high strength concrete, with a change in the water / dry materials ratio. In these concretes, tests of compressive strength and dynamic elastic modulus with 1, 3, 7 and 28 days were carried out and, in addition to these tests, tests of elastic modulus and splitting tensile strength were done at 28 days. The results showed that both high strength concrete and alkali-activated slag concrete developed high initial and final compressive strengths. The mixtures made for the high strength concrete reached compressive strengths above 50 MPa at 1 day and above 109 MPa at 28 days, while the mixtures of alkali-activated slag concrete obtained resistance to compression above 40 MPa with 1 day and above 86 MPa at 28 days. In general, when comparing high strength concrete with alkali-activated slag concrete of equivalent compressive strengths, it was verified that the elastic modulus, the splitting tensile strength and dynamic elastic modulus of the first presented higher results than the second.

Keywords: Alkali-activated slag concrete. Sodium silicate. High strength concrete. Modified IPT/EPUSP method.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Evolução da produção anual de ferro gusa, conforme dados da World Steel Association (2017), e da estimativa de escória de alto forno (EAF) (a) no Brasil e (b) no mundo (Estima-se que 1 tonelada de ferro gusa resulta em 300 kg de escória granulada de alto-forno). ....	16
Figura 2 –	Representação gráfica do planejamento da dissertação. ....	19
Figura 3 –	Representação esquemática de duas pastas frescas de cimento tendo uma relação água/cimento de 0,65 e 0,25. Nesta representação, a relação da superfície da água para aquela do cimento é igual a relação água/cimento em massa. ....	22
Figura 4 –	Distribuição de porosidade na zona de transição de concretos com e sem sílica ativa. ....	25
Figura 5 –	Passo-a-passo do método Mehta-Aïtcin. ....	26
Figura 6 –	Fluxograma para a dosagem de concreto de alta resistência através do método de Nawy. ....	28
Figura 7 –	Fluxograma do método de Aïtcin. ....	31
Figura 8 –	Relação entre a resistência à compressão e a relação água/aglomerante. ...	32
Figura 9 –	Determinação da dosagem mínima de água. ....	32
Figura 10 –	Quantidade de agregado graúdo. ....	33
Figura 11 –	Procedimento do método IPT/EPUSP modificado para CAR. ....	34
Figura 12 –	Procedimento do método De Larrard (1999) com o auxílio de um programa computacional. ....	36
Figura 13 –	Retração por secagem de vários concretos. ....	45
Figura 14 –	Resultados do ensaio do miniabatimento para pastas com relação a/agl=0,21, contendo 90% de cimento Portland e 10% de sílica ativa como aglomerantes e com diferentes teores de aditivo superplastificante. ....	50
Figura 15 –	Distribuição granulométrica do agregado graúdo e do agregado miúdo (ABNT NBR NM 248:2003). ....	52
Figura 16 –	Corpos de prova moldados e identificados. ....	57
Figura 17 –	Retificação das bases dos corpos de prova. ....	58
Figura 18 –	Medição do abatimento do concreto. ....	59
Figura 19 –	Linhas pontilhadas mostrando as posições de medição a) dos diâmetros e b) das alturas do cilindro. ....	60
Figura 20 –	Ensaio de resistência à compressão. ....	61
Figura 21 –	Execução do ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. ....	63
Figura 22 –	Evolução da resistência à compressão do CAR ao longo do tempo. ....	67
Figura 23 –	Gráfico IPT/EPUSP para o CAR. ....	69

Figura 24 –	Ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral. ....	70
Figura 25 –	Relação entre o módulo de elasticidade estático aos 28 dias e a relação $a/agl$ no CAR. ....	72
Figura 26 –	Relação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão do CAR aos 28 dias. ....	72
Figura 27 –	Evolução, ao longo do tempo, (a) da velocidade de propagação da onda ultrassônica e (b) do módulo de elasticidade dinâmico do CAR. ....	74
Figura 28 –	Relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CAR. ....	75
Figura 29 –	Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CAR. ....	75
Figura 30 –	Consistência do traço rico de CEAA com a) $H = 6,0\%$ , b) $H=7,0\%$ , c) $H = 8,0\%$ . ....	77
Figura 31 –	Evolução da resistência à compressão do CEAA ao longo do tempo. ....	79
Figura 32 –	Gráfico IPT/EPUSP para o CEAA. ....	80
Figura 33 –	Análise da relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão do CEAA, utilizando os resultados experimentais e os dados obtidos por Mithun e Narasimhan (2014), Manjunath e Narasimhan (2018) e Ding, Dai e Shi (2018). ....	82
Figura 34 –	Relação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão do CEAA aos 28 dias. ....	83
Figura 35 –	Evolução, ao longo do tempo, (a) da velocidade de propagação da onda ultrassônica e (b) do módulo de elasticidade dinâmico do CEAA. ....	85
Figura 36 –	Relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CEAA. ....	86
Figura 37 –	Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CEAA. ....	86
Figura 38 –	Evolução da resistência à compressão do CAR e do CEAA ao longo do tempo. ....	87
Figura 39 –	Evolução percentual da resistência à compressão a) do CAR e b) do CEAA em função da idade. ....	88
Figura 40 –	Evolução, ao longo do tempo, (a) da velocidade de propagação da onda ultrassônica e (b) do módulo de elasticidade dinâmico do CEAA e do CAR. ....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Relação entre a resistência à compressão média e o consumo de água máximo. ....	26
Tabela 2 –	Fração volumétrica, em m <sup>3</sup> , dos componentes em 0,35 m <sup>3</sup> de pasta de cimento. ....	27
Tabela 3 –	Relação, em volume, entre o agregado miúdo e o agregado graúdo. ....	27
Tabela 4 –	Tamanho máximo do agregado graúdo. ....	29
Tabela 5 –	Proporção do volume de agregado graúdo/volume de concreto (módulo de finura da areia 2,5-3,2). ....	29
Tabela 6 –	Requisitos para o consumo de água e teor de ar do concreto fresco usando areia com taxa de vazios de 35% (primeiro teste do consumo de água). ....	29
Tabela 7 –	Relação água/(cimento + pozolana) para concretos confeccionados com aditivo superplastificante. ....	30
Tabela 8 –	Resultados obtidos experimentalmente por diversos autores para o concreto de escória álcali-ativada com silicato de sódio ou com uma composição de silicato de sódio e hidróxido de sódio. ....	39
Tabela 9 –	Quantidade de corpos de prova 10cm x 20cm usados para os ensaios feitos com o CAR no estado endurecido. ....	47
Tabela 10 –	Caracterização química do cimento CP V-ARI MAX. ....	48
Tabela 11 –	Características físicas e mecânicas do CP V-ARI MAX. ....	48
Tabela 12 –	Caracterização química da sílica ativa. ....	49
Tabela 13 –	Especificações técnicas do aditivo superplastificante Hyperkem <sup>TM</sup> 42. ...	49
Tabela 14 –	Caracterização química da escória de alto-forno. ....	51
Tabela 15 –	Caracterização física da escória de alto-forno. ....	51
Tabela 16 –	Especificações técnicas do silicato de sódio. ....	51
Tabela 17 –	Caracterização física do agregado graúdo e do agregado miúdo. ....	52
Tabela 18 –	Consumo dos materiais para a produção de 30 CP's de CAR. ....	54
Tabela 19 –	Consumo dos materiais para a produção de uma batelada (4 CP's) de CEAA. ....	56
Tabela 20 –	Tolerância para a idade de ensaio. ....	61
Tabela 21 –	Características dos traços no estado fresco e consumo real dos materiais empregados para a produção de 1 m <sup>3</sup> do CAR. ....	65
Tabela 22 –	Resistência à compressão dos traços do CAR. ....	66
Tabela 23 –	Valores de R <sup>2</sup> das equações de Abrams, Bhanja e Sengupta e polinomial de 2º grau obtidos para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. ....	68
Tabela 24 –	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias para os traços do CAR. ....	70

Tabela 25 –	Módulo de elasticidade estático aos 28 dias para os traços do CAR. ....	71
Tabela 26 –	Resultados obtidos para o CAR no ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica, massa específica dos corpos de prova na condição saturada e módulos de elasticidade dinâmicos. ....	73
Tabela 27 –	Equações correlacionando a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CAR. ....	75
Tabela 28 –	Equações correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CAR. ....	75
Tabela 29 –	Resistência à compressão em argamassas de escória ativada com e sem sílica ativa. ....	76
Tabela 30 –	Características dos traços no estado fresco e consumo real dos materiais empregados para a produção de 1 m <sup>3</sup> do CEAA. ....	77
Tabela 31 –	Resistência à compressão dos traços do CEAA. ....	78
Tabela 32 –	Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias para os traços do CEAA. ....	81
Tabela 33 –	Módulo de elasticidade estático aos 28 dias para os traços do CEAA. ....	82
Tabela 34 –	Resultados obtidos para o CEAA no ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica, massa específica dos corpos de prova na condição saturada e módulos de elasticidade dinâmicos. ....	84
Tabela 35 –	Equações correlacionando a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CEAA. ....	86
Tabela 36 –	Equações correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CEAA. ....	86
Tabela 37 –	Custos unitários dos materiais utilizados para a dosagem do CAR e do CEAA na região metropolitana de Recife-PE. ....	90
Tabela 38 –	Comparação do custo/m <sup>3</sup> e do custo/MPa entre o CEAA e o CAR com resistências à compressão equivalentes. ....	91

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR) .....</b>	<b>20</b>
2.1	MICROESTRUTURA DO CONCRETO .....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Fase pasta de cimento hidratada .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Fase agregado ou esqueleto granular .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Fase zona de transição .....</b>	<b>23</b>
2.2	MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA .....	25
<b>2.2.1</b>	<b>Método Mehta-Aitcin .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Método Nawy .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Método Aitcin .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Método IPT/EPUSP modificado .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Método De Larrard .....</b>	<b>35</b>
2.3	CONCLUSÕES .....	37
<b>3</b>	<b>CONCRETO COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO ÁLCALI-ATIVADA (CEAA) .....</b>	<b>38</b>
3.1	EXPERIÊNCIAS MUNDIAIS .....	38
3.2	PARTICULARIDADES DO CONCRETO DE ESCÓRIA ÁLCALI- ATIVADA .....	42
<b>3.2.1</b>	<b>Produtos de hidratação da pasta de escória álcali-ativada com silicato de sódio .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Zona de transição interfacial do CEAA .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Início de pega .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Retração .....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>46</b>
4.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	46
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	47
<b>4.2.1</b>	<b>Cimento Portland .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Sílica ativa .....</b>	<b>48</b>

4.2.3	<b>Aditivo superplastificante .....</b>	<b>49</b>
4.2.4	<b>Escória de alto-forno.....</b>	<b>50</b>
4.2.5	<b>Silicato de sódio .....</b>	<b>51</b>
4.2.6	<b>Agregados .....</b>	<b>51</b>
4.2.7	<b>Água .....</b>	<b>52</b>
4.3	<b>PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....</b>	<b>53</b>
4.3.1	<b>Procedimento de produção dos corpos de prova .....</b>	<b>53</b>
4.3.1.1	Preparo das argamassas .....	53
4.3.1.2	Preparo dos concretos .....	53
4.3.1.2.1	<i>Preparo do CAR .....</i>	<i>54</i>
4.3.1.2.2	<i>Preparo do CEAA .....</i>	<i>55</i>
4.3.1.3	Moldagem dos corpos de prova .....	56
4.3.1.4	Cura dos corpos de prova .....	57
4.3.1.5	Preparação das bases dos corpos de prova .....	58
4.3.2	<b>Métodos de determinação das propriedades do concreto no estado fresco ...</b>	<b>58</b>
4.3.2.1	Massa específica e teor de ar .....	59
4.3.2.2	Abatimento do tronco de cone .....	59
4.3.3	<b>Métodos de determinação das propriedades do concreto e da argamassa no estado endurecido .....</b>	<b>60</b>
4.3.3.1	Resistência à compressão .....	60
4.3.3.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	61
4.3.3.3	Módulo de elasticidade estático .....	62
4.3.3.4	Módulo de elasticidade dinâmico .....	62
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>65</b>
5.1	<b>CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR) .....</b>	<b>65</b>
5.1.1	<b>Características do concreto no estado fresco .....</b>	<b>65</b>
5.1.2	<b>Resistência à compressão .....</b>	<b>66</b>
5.1.3	<b>Resistência à tração por compressão diametral .....</b>	<b>69</b>
5.1.4	<b>Módulo de elasticidade estático .....</b>	<b>71</b>
5.1.5	<b>Módulo de elasticidade dinâmico .....</b>	<b>73</b>
5.2	<b>ESTUDO EXPLORATÓRIO .....</b>	<b>75</b>
5.2.1	<b>Resistência à compressão das argamassas .....</b>	<b>76</b>
5.2.2	<b>Determinação da relação água/materiais secos .....</b>	<b>76</b>

5.3	CONCRETO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADA (CEAA) .....	77
5.3.1	Características do concreto no estado fresco .....	77
5.3.2	Resistência à compressão .....	78
5.3.3	Resistência à tração por compressão diametral .....	80
5.3.4	Módulo de elasticidade estático .....	82
5.3.5	Módulo de elasticidade dinâmico .....	84
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE O CAR E O CEAA .....	87
5.4.1	Resistência à compressão .....	87
5.4.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	88
5.4.3	Módulo de elasticidade estático .....	89
5.4.4	Módulo de elasticidade dinâmico .....	89
5.4.5	Custo do m <sup>3</sup> de concreto .....	90
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	92
6.1	CONCLUSÕES .....	92
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	93
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE MINIABATIMENTO</b> .....	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE B – ANÁLISE DE REGRESSÃO</b> .....	<b>103</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este estudo está inserido na linha de pesquisa de novos materiais para a construção civil do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, que enfatiza o reaproveitamento de resíduos e a utilização de subprodutos na construção civil. O material estudado, nesta pesquisa, é a escória granulada de alto-forno, subproduto da indústria siderúrgica, tendo em vista sua aplicação como um aglomerante hidráulico. Este trabalho tem como meta produzir um concreto de alta resistência utilizando escória álcali-ativada e avaliar as suas propriedades.

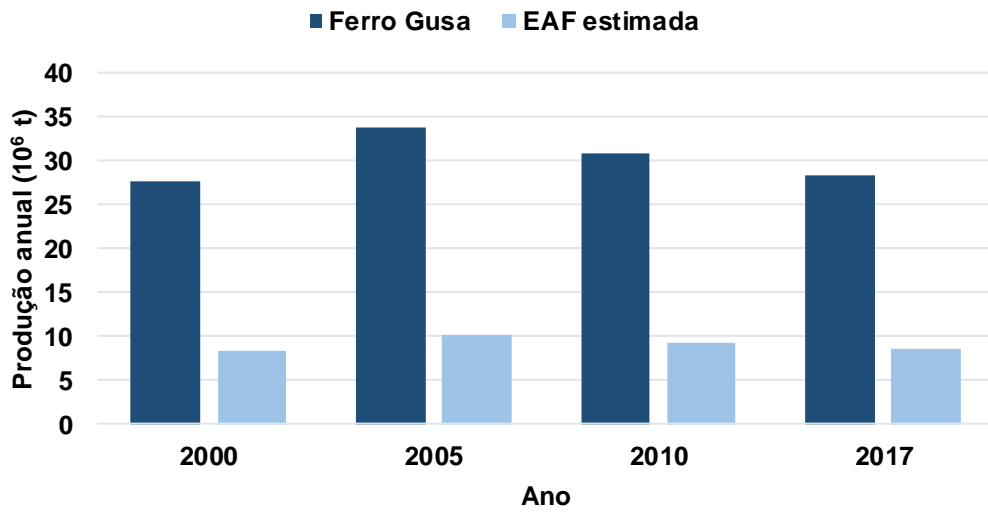
Os produtos à base de cimento Portland, principalmente concretos, são os materiais de construção mais utilizados no mundo. Devido à sua enorme produção mundial, a indústria de cimento Portland apresenta problemas econômicos, energéticos e ambientais (7% do total mundial de emissões de CO<sub>2</sub>). A preocupação internacional sobre como reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> deu origem, no seio da comunidade científica, a um crescente interesse no desenvolvimento de materiais e tecnologias capazes de reduzir o impacto do cimento Portland e tornar a construção uma indústria mais sustentável (GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013).

Como sugestão para o desenvolvimento sustentável das indústrias de cimento e concreto, Mehta (1999) afirma que um esforço para a utilização completa dos subprodutos cimentícios e pozolânicos produzidos pelas usinas termoelétricas e indústrias metalúrgicas é fundamental para alcançar este desenvolvimento sustentável. Pois, evitaria o descarte indevido de milhões de toneladas de subprodutos, como a cinza volante e a escória granulada de alto forno, e ainda resultaria em uma economia significativa de energia e custo com a utilização destes como adições minerais ou materiais cimentícios (MEHTA, 1999).

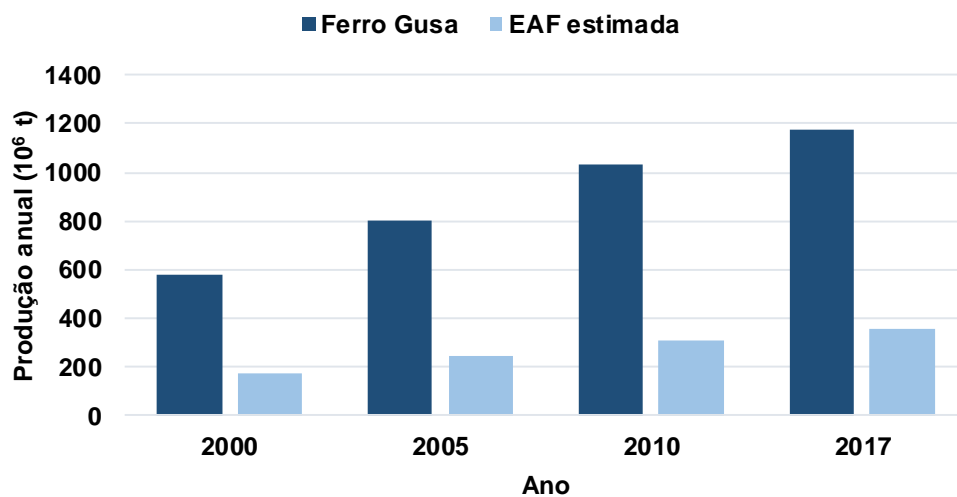
A indústria cimenteira no Brasil, com o passar do tempo, já utiliza quase que 100 % da escória granulada de alto forno gerada pela indústria siderúrgica. De acordo com o Relatório de Sustentabilidade publicado pelo Instituto Aço Brasil (2018), vendeu-se em torno de 96% (ano de 2016) e 92% (ano de 2017) da escória granulada de alto-forno produzida, sendo que 98% do material vendido foi aplicado na indústria cimenteira. Conforme consta na Figura 1, a produção anual de ferro gusa no Brasil pouco aumentou do ano 2000 ao ano de 2017, ainda assim a produção anual no mundo deste material aumentou significativamente, cerca de 104% neste intervalo de tempo. Dado isso, compreende-se a importância de estudar a utilização da escória granulada de alto forno como aglomerante, uma vez que compreende um assunto de relevância internacional.



Figura 1 - Evolução da produção anual de ferro gusa, conforme dados da World Steel Association (2017), e da estimativa de escória de alto forno (EAF) (a) no Brasil e (b) no mundo (Estima-se que 1 tonelada de ferro gusa resulta em 300 kg de escória granulada de alto-forno<sup>1</sup>).



(a)



(b)

Fonte: O autor (2019)

Atualmente, uma das alternativas amplamente aceitas nesta indústria para reduzir os problemas ambientais relacionados ao cimento Portland é incluir adições minerais ou subprodutos industriais ao clínquer moído para a produção de cimento Portland. No Brasil, a norma ABNT NBR 16697:2018 é que especifica os requisitos exigidos para cada tipo de cimento Portland,

<sup>1</sup>Quantidade estimada por Melo Neto (2008) e admitida após análise dos dados expostos no Relatório de Sustentabilidade publicado pelo Instituto Aço Brasil (2018), uma vez que se produziu em 2016 e 2017, respectivamente, 299 e 308 kg de escória granulada de alto-forno / tonelada de ferro gusa produzida.

indicando a quantidade máxima de substituições permitidas. No caso do CP II-E e do CP III, que são os cimentos que contêm escória de alto forno moída, a taxa de substituição em massa para o material cimentício total é limitada entre 6-34% e 35-75%, respectivamente.

Uma alternativa mais inovadora consiste na concepção de um aglomerante alternativo ao clínquer baseado na ativação da escória de alto forno, que tem se mostrado como uma opção viável para atender requisitos de desempenho em aplicações específicas (WANG et al., 1995; DING; DAI; SHI, 2016). Segundo Ding, Dai e Shi (2016), as emissões de dióxido de carbono produzidas na fabricação de cimentos álcali-ativados são cerca de 50 a 80% menores do que na produção de cimento Portland convencional. À vista disso, estudos foram e vêm sendo realizados para o aproveitamento da escória de alto forno álcali-ativada como aglomerante sem a utilização de clínquer (JOHN, 1995; COLLINS; SANJAYAN, 1999, 2000, 2001; BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2000, 2001; MELO NETO, 2002, 2008; MITHUN; NARASIMHAN, 2014; THOMAS; PEETHAMPARAN, 2015; PUERTAS et al., 2018; DING; DAI; SHI, 2018; MANJUNATH; NARASIMHAN, 2018).

Os estudos experimentais realizados com o concreto de escória álcali-ativada (CEAA) mostram que este concreto, quando ativado por silicato de sódio (com módulo de sílica e teor de óxido de sódio adequados), apresenta uma resistência inicial relativamente alta e uma evolução rápida de resistência (PU et al., 1988 apud WANG et al., 1995; MITHUN; NARASIMHAN, 2014; MANJUNATH; NARASIMHAN, 2018). Conforme os resultados apresentados por Pu et al. (1988 apud WANG et al., 1995, p. 94), a resistência à compressão de 1 dia pode atingir 60 MPa e a resistência à compressão de 1 ano pode ultrapassar 100 MPa.

Wang et al. (1995) relatam que o cimento de escória álcali-ativada tem outras vantagens sobre o cimento Portland tais como a boa durabilidade, baixo calor de hidratação e alta resistência ao ataque químico; no entanto, também apresenta desvantagens, que correspondem ao rápido início de pega e a elevada retração. Quanto ao custo, eles alegam que o custo de produção do CEAA com resistência à compressão abaixo de 50 MPa é normalmente superior ao do concreto com cimento Portland com resistência equivalente. No entanto, citam que se o CEAA apresentar resistência entre 70-120 MPa, quando comparado ao concreto feito com cimento Portland e sílica ativa com desempenho similar, o primeiro economiza entre 10%-40% no custo.

Portanto, observa-se que o concreto confeccionado com escória granulada de alto forno moída ativada com silicato de sódio pode ser uma alternativa para a produção de concretos de alta resistência confeccionados com cimento Portland. Assim, este trabalho pretende estabelecer

parâmetros para a dosagem do CEAA ativado com silicato de sódio e analisar suas propriedades.

### 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um concreto de alta resistência utilizando escória de alto-forno moída ativada com silicato de sódio como aglomerante. Este compósito será designado como concreto de escória álcali-ativada (CEAA) no decorrer deste trabalho.

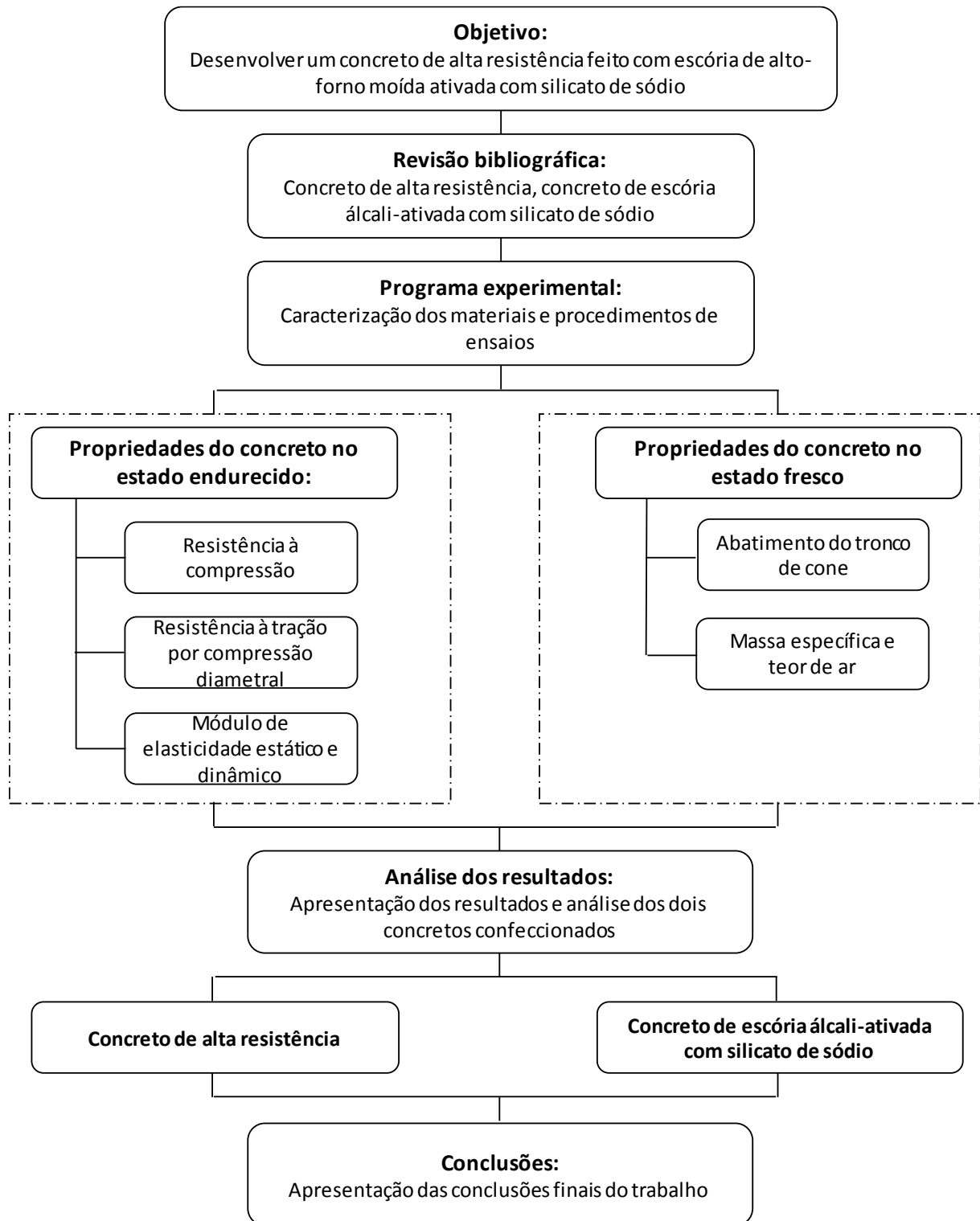
Os objetivos específicos deste trabalho estão descritos a seguir:

- Confeccionar um concreto de alta resistência (CAR) utilizando cimento Portland, o qual será o concreto de referência para o CEAA;
- Estabelecer parâmetros para a dosagem do concreto de escória álcali-ativada (CEAA);
- Analisar as propriedades do CEAA e do CAR e realizar a comparação dos resultados obtidos para estes;
- Verificar se há viabilidade econômica do CEAA frente ao CAR.

### 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 6 capítulos. No Capítulo 1, foram expostos conhecimentos introdutórios ao tema, no qual a dissertação teve seu embasamento contextualizado e justificado. No Capítulo 2, foram expostos métodos de dosagem de concretos de alta resistência (CAR), a fim de selecionar um deles para a dosagem do CAR e do CEAA, e foram apresentadas informações sobre a microestrutura do CAR. No Capítulo 3, foram relatadas experiências mundiais sobre o CEAA e descritas particularidades deste concreto. No Capítulo 4, foram descritos: o planejamento experimental, os materiais empregados e os procedimentos utilizados nos ensaios. No Capítulo 5, foi feita a análise dos resultados obtidos para o CAR e CEAA e também foi realizada a comparação de seus resultados. Por fim, no Capítulo 6, foram apresentadas as conclusões decorrentes dos resultados deste trabalho, assim como as sugestões para a progressão do tema dissertado. Em síntese, a Figura 2 apresenta o desenho esquemático da estratégia elaborada para a realização deste estudo.

Figura 2 - Representação gráfica do planejamento da dissertação.



Fonte: O autor (2019)

## **2 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)**

Neste capítulo, serão apresentadas as fases que compõe a microestrutura do concreto e alguns dos princípios teóricos que explicam como aperfeiçoar o desempenho dessas fases para poder obter concretos com elevadas resistências. Além disso, serão abordados os principais métodos para a produção de concretos de alta resistência.

Segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011), os métodos propostos por Mehta e Aïtcin (1990), Aïtcin (2000) e Nawy (2001) estão entre os mais utilizados para dosagens de concretos de alta resistência. Os métodos de Nawy (2001) e Aïtcin (2000) baseiam-se no critério de volume absoluto, isto é, determina-se a quantidade de agregado graúdo, aglomerantes, água e o volume que for preciso para totalizar um metro cúbico preenche-se com areia. No método Mehta e Aïtcin (1990) a obtenção do traço é feita de maneira bastante simples, em razão de este método utilizar vários valores tabelados para a determinação das quantidades dos constituintes da mistura; porém, para quaisquer materiais, estes valores tabelados mantêm-se constantes.

Existem também outros métodos para a dosagem de CAR, como o IPT/EPUSP modificado (CREMONINI, 2001) e De Larrard (1999). O último fundamenta-se na otimização do esqueleto granular. O método IPT/EPUSP modificado, segundo Freitas Júnior (2005), é um método experimental ajustado para concreto de alta resistência, fundamentado no método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), objetivando alcançar elevadas resistências com o menor consumo de cimento possível.

Diante da variedade de métodos, este levantamento bibliográfico tem como objetivo abranger os principais métodos e servir como base de avaliação de qual se enquadra melhor nos objetivos da pesquisa, levando em consideração a estrutura disponível para a realização do trabalho experimental e a possibilidade de aplicação prática do mesmo.

### **2.1 MICROESTRUTURA DO CONCRETO**

O concreto tem uma microestrutura bastante heterogênea e complexa. Assim, é muito difícil desenvolver-se modelos exatos, a partir dos quais o comportamento deste compósito pode ser medido com segurança. Porém, um conhecimento da microestrutura e das propriedades de cada constituinte do concreto e a relação entre elas é útil para se exercer um certo controle sobre as propriedades deste compósito (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme expõe Aïtcin (2000), a partir da abordagem de mecânica da fratura, o concreto pode ser considerado como um material heterogêneo composto de três fases: pasta de cimento hidratada; zona de transição (entre os agregados e a pasta); e agregados. Este autor também cita

que a ruptura do concreto irá ocorrer sempre na parte mais fraca de uma dessas três fases. Assim, com o propósito de elevar a resistência à compressão do concreto, é necessário ter bastante cuidado para reforçar essas três fases.

### 2.1.1 Fase pasta de cimento hidratada

A pasta de cimento hidratada decorre da mistura das partículas de cimento anidro com água, que proporcionam o desenvolvimento dos produtos de hidratação. Essas partículas de cimento são basicamente compostas de silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) e ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF). Quanto aos principais produtos de hidratação da pasta, pode-se citar que são basicamente três: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH) e sulfoaluminatos de cálcio (AFt e AFm), além dos grãos de cimento que continuam na fase sólida, pois alguns grãos não chegam a se hidratar totalmente (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TAYLOR, 1997).

Conforme afirma Aïtcin (2000), há três parâmetros que se deve enfatizar para melhorar a resistência da pasta hidratada: porosidade, uma vez que um grande número de poros grandes ou vazios, especialmente quando concentrados em um local, reduzem a resistência; tamanho dos grãos dos produtos de hidratação, pois, de forma geral, a resistência dos produtos hidratados aumenta com a diminuição do tamanho dos grãos; e heterogeneidades, pois elas são a origem das perdas de resistência.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), na maior parte dos casos, é o fator água/cimento que determina a porosidade da matriz da pasta de cimento para um dado grau de hidratação; porém, quando vazios no estado de ar são incorporados ao composto, como consequência de adensamento inadequado ou utilização de aditivo incorporador de ar, eles também têm o efeito de aumentar a porosidade e reduzir a resistência do composto. Isso foi relatado por Féret em 1892, o qual formulou a seguinte expressão:

$$f'_c = k \cdot \left( \frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right)^2 \quad (1)$$

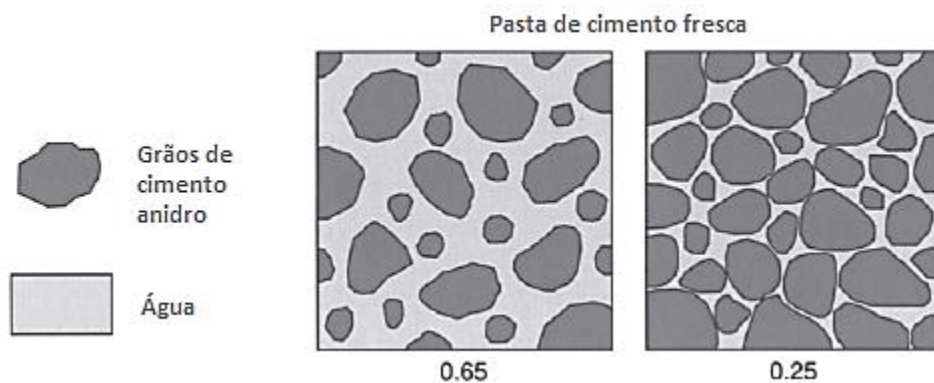
Onde  $f'_c$  é a resistência à compressão da pasta de cimento hidratada,  $V_c$ ,  $V_w$  e  $V_a$  são os volumes de cimento, água e ar, respectivamente, e  $k$  é uma constante que depende do tipo de cimento. Se o numerador e o denominador da equação acima forem divididos por  $V_c$ , a expressão de Féret pode ser reescrita do seguinte modo (AÏTCIN, 2000):

$$f'_c = k. \left( \frac{1}{1 + V_w/V_c + V_a/V_c} \right)^2 \quad (2)$$

Com base na Equação 2, está claro que quanto menor o  $V_w$  e o  $V_a$  numa mistura de concreto, maior será a resistência à compressão. Mehta e Monteiro (2014) expõe que concretos de alta resistência (com alto consumo de cimento), para um dado fator a/c, podem apresentar uma perda considerável de resistência com o aumento da quantidade de ar incorporado, enquanto que concretos de baixa resistência (com baixo teor de cimento) tendem a apresentar somente uma pequena perda de resistência. Aïtcin (2000) relata que bolhas de ar incorporadas podem ser consideradas como heterogeneidades microestruturais que podem ser reduzidas no concreto de alta resistência quando a elevada resistência é o objetivo principal.

Aïtcin (2000) cita que o aumento da resistência do concreto é obtido principalmente pela redução da porosidade da pasta de cimento hidratada. Esta redução de porosidade ocorre quando a relação água/cimento da pasta de cimento hidratada é reduzida, como resultado, as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras na pasta de cimento fresca, conforme ilustra a Figura 3. Como consequência, existe menos porosidade e menos espaço livre para os produtos externos de hidratação se desenvolverem.

Figura 3 - Representação esquemática de duas pastas frescas de cimento tendo uma relação água/cimento de 0,65 e 0,25. Nesta representação, a relação da superfície da água para aquela do cimento é igual a relação água/cimento em massa.



Fonte: Aïtcin (2000)

Como há uma quantidade menor de água disponível, a pasta que compõe o concreto fica rapidamente saturada com íons que ocasionam o desenvolvimento dos produtos externos de hidratação. Com a maior proximidade entre as partículas de cimento, os produtos externos têm menos distância a cobrir para desenvolver uma ligação inicial entre estas partículas. Isso explica

por que concretos com baixa relação água/cimento desenvolvem resistência mais rapidamente (AÏTCIN, 2000).

Quanto à diminuição do tamanho dos grãos dos produtos de hidratação, Aïtcin (2000) informa que diminuir a relação água/aglomerante favorece a formação dos produtos internos (C-S-H) altamente compactos. Com relações água/aglomerante muito baixas, a pasta de cimento hidratada não contém grandes pilhas de plaquetas hexagonais de hidróxido de cálcio, longas agulhas de etringita ou longos filamentos pilosos de C-S-H que são característicos das pastas com relação água/aglomerante alta.

Com base nessas informações, nota-se que para aumentar a resistência da pasta de cimento hidratada é necessário, principalmente, reduzir tanto quanto possível a porosidade, através da diminuição da quantidade de ar incorporado e da relação água/cimento na pasta fresca. Isso tem que ser conseguido enquanto a pasta fresca permanece fluida o bastante para dar ao concreto a trabalhabilidade necessária ao transporte e lançamento.

### **2.1.2 Fase agregado ou esqueleto granular**

Os agregados são os componentes que constituem a maior parte do concreto, eles compreendem cerca de 60 a 80% do volume do concreto (NAWY, 2001). Devido a essa superioridade volumétrica, a fase “agregado” é predominantemente responsável por propriedades como a massa específica, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional do concreto. Estas propriedades do concreto dependem amplamente da densidade e resistência do agregado, que, por sua vez, são determinadas mais por características físicas do que por características químicas da estrutura do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para a produção de concretos usuais não é necessária a utilização de agregados muito resistentes, uma vez que o elo fraco deste compósito, geralmente, é a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento hidratada. Em compensação, no concreto de alta resistência, a pasta de cimento hidratada e a zona de transição podem ser tão resistentes que, se os agregados, principalmente os graúdos, não forem suficientemente resistentes, eles podem virar os elementos mais fracos dentro do concreto (AÏTCIN, 2000).

### **2.1.3 Fase zona de transição**

Conforme expõe Taylor (1997), o concreto não pode ser descrito apenas como uma mistura composta de agregado graúdo e miúdo em uma matriz de pasta de cimento, uma vez que a microestrutura da pasta próxima ao agregado difere daquela da pasta de cimento isolada. Como



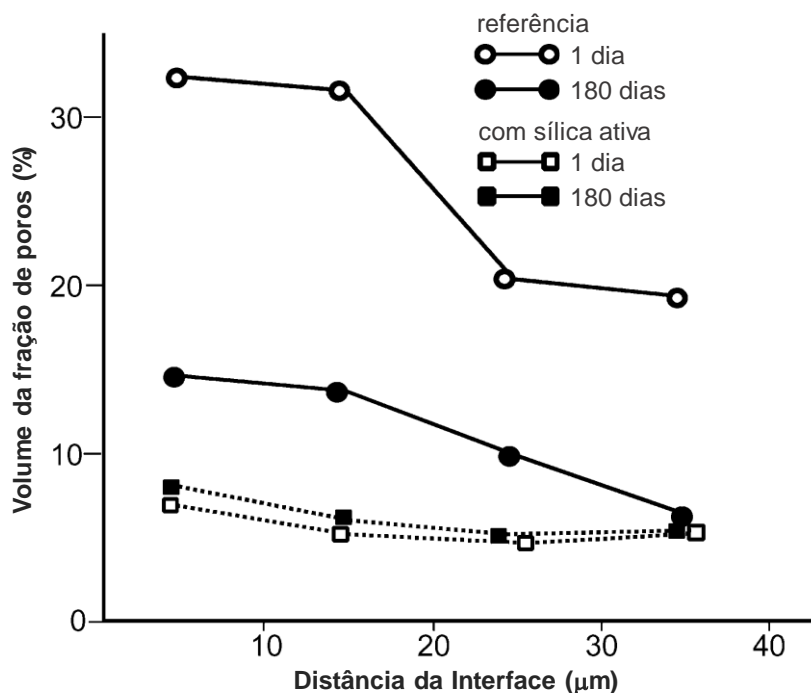
a resistência e a durabilidade do concreto dependem, em parte, das características da interface pasta-agregado, é necessário buscar melhorar a resistência dessa zona.

Em concretos convencionais, a zona de transição é considerada como o elo mais fraco da estrutura, ou seja, ela é a fase responsável pelo limite da resistência à compressão, já que o concreto rompe a um nível de tensão mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais, anteriormente citados (AİTCIN, 2000). Em comparação com a pasta de cimento como um todo, a microestrutura da zona de transição é caracterizada por ser mais porosa (AİTCIN, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2014; SCRIVENER; CRUMBIE; LAUGESSEN, 2004; TAYLOR, 1997).

Scrivener, Crumbie e Laugesen (2004) constataram, através de análise de imagens de elétrons retroespalhados, que a zona de transição não é radicalmente diferente do restante da pasta de cimento e sua espessura efetiva depende da característica microestrutural que está sendo considerada e do grau de hidratação. Conforme expõem estes autores, a zona de transição é uma região de transformação gradual e é altamente heterogênea. Através da caracterização quantitativa da zona de transição, eles relatam que a origem dela está no chamado “efeito parede” ocasionado pelo empacotamento de grãos de cimento contra a superfície do agregado, o que leva a um aumento local na porosidade, com espessura de 15 a 20  $\mu\text{m}$ , e predominância de partículas menores de cimento nessa região. Esses autores também expuseram que o empacotamento dos grãos de cimento sobre o agregado também favorece a deposição de mais hidróxido de cálcio na zona de transição e que água extra é incorporada nesta zona, conseqüentemente, a relação efetiva entre água e cimento da pasta isolada é menor quando comparada a pasta presente na zona de transição.

Com o intuito de melhorar a resistência da zona de transição, Aİtcin (2000) afirma que a redução da relação água/aglomerante e o uso de sílica ativa tendem a reduzir a espessura e a fraqueza na zona de transição. Scrivener, Crumbie e Laugesen (2004) citam que a maneira mais eficaz de modificar a zona de transição, para uma mesma relação água/aglomerante, é adicionando uma proporção de partículas finas, como a sílica ativa, que ajudam na redução da porosidade na zona de transição, conforme ilustra a Figura 4. Estes autores ainda mencionam que a utilização de sílica ativa ocorre, geralmente, adicionando cerca de 5 a 10%, e que esta tecnologia é amplamente utilizada na produção de concretos de alta resistência.

Figura 4 - Distribuição de porosidade na zona de transição de concretos com e sem sílica ativa.



Fonte: adaptado de Scrivener, Crumie e Laugesen (2004).

## 2.2 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

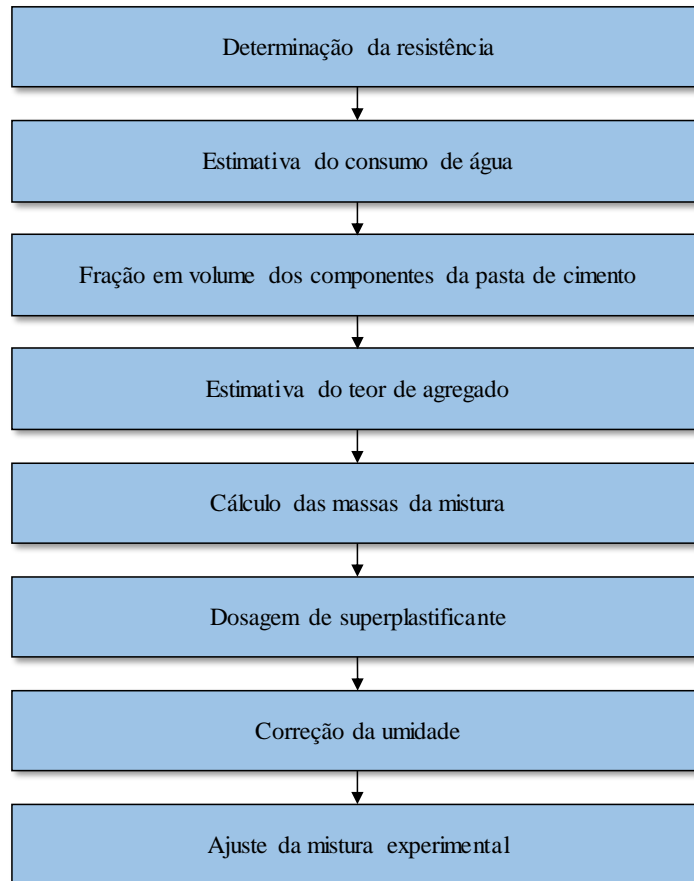
A seguir serão abordados os métodos de dosagem de Mehta e Aïtcin (1990), Aïtcin (2000), Nawy (2001), IPT/EPUSP modificado (CREMONINI, 2001) e De Larrard (1999) para a produção de concretos de alta resistência, visando avaliar qual destes métodos melhor se enquadra nos objetivos da pesquisa, levando em consideração a estrutura disponível para a realização do trabalho experimental e a possibilidade de aplicação prática dos mesmos.

### 2.2.1 Método Mehta-Aïtcin

Mehta e Aïtcin (1990) apresentaram uma metodologia simples de dosagem aplicável para concretos de massa específica convencional com valores de resistência à compressão entre 60 e 120 MPa. O método é adequado para agregados graúdos de tamanho máximo entre 10 e 15 mm e valores de abatimento entre 200 e 250 mm. O valor ótimo sugerido para o volume de agregados é 65% do volume total do concreto de alta resistência, como consequência, o volume de pasta é fixado em 35%, sendo considerado que a pasta de cimento fresco contém cimento, água e ar. Os autores assumem que o concreto de alta resistência tende a reter o volume de ar aprisionado de 2%, que pode ser aumentado até 5 ou 6% quando a incorporação de ar é necessária para a durabilidade do congelamento e descongelamento. O passo-a-passo desta metodologia está ilustrado na Figura 5. Observa-se na Figura 5 que o primeiro passo para o

desenvolvimento deste método consiste na determinação da resistência à compressão do concreto. No estudo de Mehta e Aïtcin (1990), cinco classes de concreto com resistência à compressão média aos 28 dias variando de 65 a 120 MPa são listadas e seus respectivos consumos de água estimados, conforme apresentado na Tabela 1.

Figura 5 - Passo-a-passo do método Mehta-Aïtcin.



Fonte: O autor (2019)

Tabela 1 - Relação entre a resistência à compressão média e o consumo de água máximo.

Classe de resistência	Resistência à compressão média (MPa)	Consumo de água máximo (kg/m <sup>3</sup> )
A	65	160
B	75	150
C	90	140
D	105	130
E	120	120

Fonte: adaptado de Mehta e Aïtcin (1990)

Depois de estabelecer o consumo de água, determina-se a proporção dos materiais cimentícios, mistura entre cimento Portland (CP) e adições minerais (escória de alto forno - EAF, cinza volante - CV e/ou sílica ativa - SA), que serão utilizados. Em Mehta e Aïtcin (1990), a Tabela

2 especifica as três opções dos volumes de cada fração de aglomerante para cada classe de resistência à compressão. Conforme citado antes, o volume de pasta do aglomerante é fixado como 35% do volume total do concreto e o teor de ar adotado é de 2%. Os volumes do teor de ar e da água de mistura são subtraídos do volume total de pasta para calcular o volume remanescente de aglomerante.

Tabela 2 - Fração volumétrica, em m<sup>3</sup>, dos componentes em 0,35 m<sup>3</sup> de pasta de cimento.

Classe de resistência	Água	Ar	Materiais cimentícios			
			Total	Opção 1 somente CP	Opção 2 CP + (CV ou EAF)	Opção 3 CP + (CV ou EAF) + SA
A	0,16	0,02	0,17	0,17	0,1275 + 0,0425	0,1275 + 0,0255 + 0,0170
B	0,15	0,02	0,18	0,18	0,1350 + 0,0450	0,1350 + 0,0270 + 0,0180
C	0,14	0,02	0,19	0,19	0,1425 + 0,0475	0,1425 + 0,0285 + 0,0190
D	0,13	0,02	0,20	... <sup>i</sup>	0,1500 + 0,0500	0,1500 + 0,0300 + 0,0200
E	0,12	0,02	0,21	... <sup>i</sup>	0,1575 + 0,0525	0,1575 + 0,0315 + 0,0210

<sup>i</sup> As classes de concreto D e E não são feitas sem adições minerais.

Fonte: adaptado de Mehta e Aïtcin (1990)

Em seguida, é feita a escolha do teor de agregado graúdo, tendo em conta que o volume total de agregado é igual a 65% do volume do concreto. Mehta e Aïtcin (1990) sugerem as relações entre os volumes do agregado miúdo e agregado graúdo de acordo com as classes de resistência referidas, como pode ser visto na Tabela 3. Logo depois, as massas por unidade de volume do concreto podem ser calculadas, usando-se os volumes das frações do concreto e os valores da massa específica de cada um dos constituintes do concreto.

Tabela 3 - Relação, em volume, entre o agregado miúdo e o agregado graúdo.

Classe de resistência	Relação Volumétrica (agregado miúdo : agregado graúdo)
A	2,00 : 3,00
B	1,95 : 3,05
C	1,90 : 3,10
D	1,85 : 3,15
E	1,80 : 3,20

Fonte: adaptado de Mehta e Aïtcin (1990)

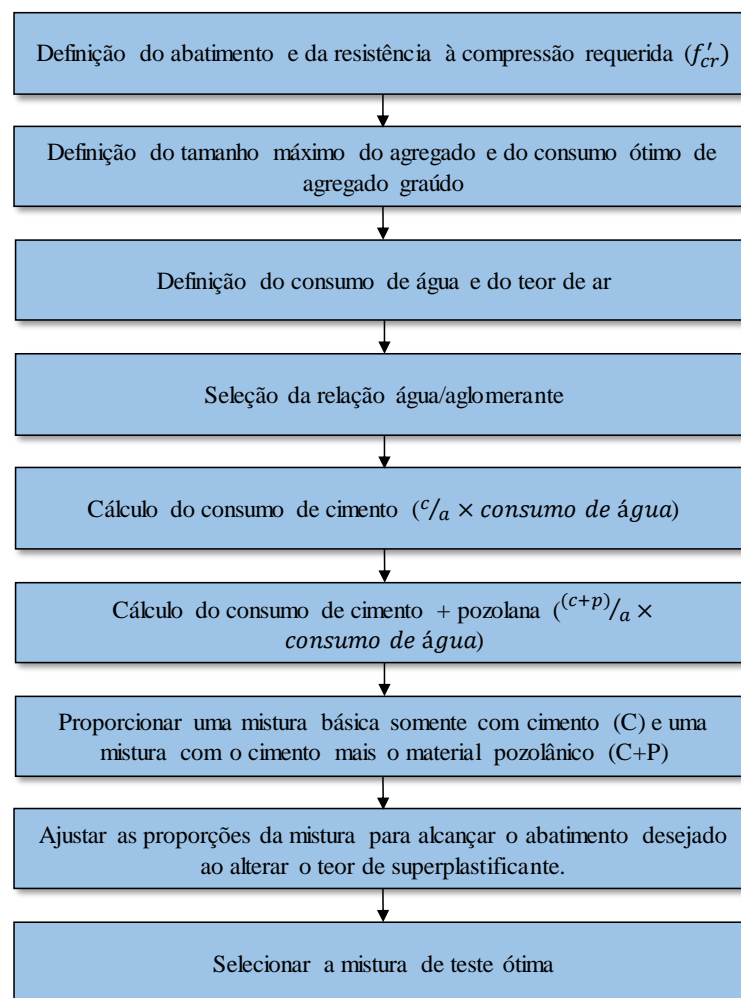
Para a primeira mistura experimental, não havendo experiência prévia com o superplastificante, sugere-se que se comece com 1,0% de superplastificante em relação à massa dos aglomerantes. O volume de água incluído no superplastificante é calculado e subtraído da quantidade inicial de água de mistura. De maneira semelhante, a massa do agregado e a de água são corrigidas conforme as condições de umidade. No final, em virtude das muitas estimativas que foram

feitas na dosagem, normalmente a primeira mistura experimental tem que ser ajustada para atingir a trabalhabilidade desejada e os critérios de resistência (MEHTA; AİTCIN, 1990).

### 2.2.2 Método Nawy

Nawy (2001) apresenta uma metodologia de dosagem de concretos de alto desempenho de alta resistência baseada na aplicação de algumas equações empíricas e tabelas. Para alcançar o traço ideal, é necessário reproduzir o procedimento que está exposto na Figura 6, na qual é possível notar que a sequência descrita serve para a determinação de uma mistura que atenda requisitos de resistência e trabalhabilidade.

Figura 6 - Fluxograma para a dosagem de concreto de alta resistência através do método de Nawy.



Fonte: adaptado de Nawy (2001)

Verifica-se na Figura 6 que o desenvolvimento deste método se inicia com a definição do abatimento e da resistência à compressão requerida do concreto. Nawy (2001) recomenda que o abatimento para concretos de alta resistência, que utilizem aditivo superplastificante, seja entre 25 e 50 mm antes de adição do superplastificante e, conforme exposto pelo autor, o ajuste do

abatimento é feito após com esta adição. A resistência à compressão requerida ( $f_{cr}'$ ) é calculada através da Equação 3 a partir da resistência à compressão estabelecida ( $f_c'$ ).

$$f_{cr}' = \frac{f_c' + 9,65}{0,90} \quad (MPa) \quad (3)$$

Após isso, é definido o tamanho máximo do agregado graúdo em função da resistência à compressão requerida por meio da Tabela 4. À vista disso, é feita a seleção da fração em volume do agregado graúdo em relação ao volume total do concreto mediante os valores apresentados na Tabela 5. Com essas informações é possível calcular o consumo ótimo de agregado graúdo (NAWY, 2001).

Tabela 4 - Tamanho máximo do agregado graúdo.

Resistência à compressão requerida do concreto (MPa)	Tamanho máximo do agregado (mm)
< 62	19,0 – 25,0
≥ 62	9,5 – 12,7

Fonte: adaptado de Nawy (2001)

Tabela 5 – Proporção do volume de agregado graúdo/volume de concreto (módulo de finura da areia 2,5-3,2).

Tamanho máximo nominal (mm)	9,5	12,7	19,0	25,0
Fração, em volume, do agregado graúdo seco	0,65	0,68	0,72	0,75

Fonte: adaptado de Nawy (2001)

Em seguida, define-se o consumo de água e o teor de ar aprisionado através da Tabela 6. Como pode ser visto nesta tabela, o consumo de água é determinado em função do abatimento e do diâmetro máximo do agregado graúdo e o teor de ar é estabelecido em função do diâmetro máximo do agregado (NAWY, 2001).

Tabela 6 - Requisitos para o consumo de água e teor de ar do concreto fresco usando areia com taxa de vazios de 35% (primeiro teste do consumo de água).

Abatimento (mm)	Consumo de água (kg/m <sup>3</sup> ) para agregado graúdo com tamanho máximo (mm) de:			
	9,5	12,7	19	25
25 – 50	183	174	168	165
50 – 75	189	183	174	171
75 – 100	195	189	180	177
Ar aprisionado (%) <sup>i</sup>	2,5 <sup>ii</sup>	2,0 <sup>ii</sup>	1,5 <sup>ii</sup>	1,0 <sup>ii</sup>

<sup>i</sup> Ajustar os valores do consumo de água para a taxa de vazios de areia ( $V$ ) acima de 35%, sendo que  $V = \left(1 - \frac{\text{Massa unitária da areia seca}}{\text{massa específica da areia}}\right) \times 100$  e o consumo de água ajustado é igual ao valor retirado da tabela somado a  $4,7(V - 35)$  kg/m<sup>3</sup>.

<sup>ii</sup> Estes valores são para misturas que utilizam superplastificante.

Fonte: adaptado de Nawy (2001)

A seleção da relação água/materiais cimentícios advém dos valores presentes na Tabela 7 e, como pode ser visto, é dada em função da resistência à compressão do concreto e do diâmetro máximo do agregado. Diante disso, pode ser feito o cálculo do consumo dos aglomerantes, o cômputo da proporção da mistura básica somente com cimento e da mistura com adições em substituição parcial à massa de cimento. Caso os agregados possuam alguma umidade é necessário fazer o ajuste da mistura de teste para o teor de água absorvida no agregado (NAWY, 2001).

Tabela 7 - Relação água/(cimento + pozolana) para concretos confeccionados com aditivo superplastificante.

Resistências do campo (MPa) <sup>i</sup>	Idade (dias)	Relação água / (cimento + pozolana) para tamanho máximo de agregado graúdo de:			
		9,5	12,7	19	25
48	28	0,50	0,48	0,45	0,43
	56	0,55	0,52	0,48	0,46
55	28	0,44	0,42	0,40	0,38
	56	0,48	0,45	0,42	0,40
62	28	0,38	0,36	0,35	0,34
	56	0,42	0,39	0,37	0,36
69	28	0,33	0,32	0,31	0,30
	56	0,37	0,35	0,33	0,32
76	28	0,30	0,29	0,27	0,27
	56	0,37	0,31	0,29	0,29
83	28	0,27	0,26	0,25	0,25
	56	0,30	0,28	0,27	0,26

<sup>i</sup> Estes são valores médios de campo; entrar na tabela com 0,9 x (valores requeridos).

Fonte: adaptado de Nawy (2001)

Sabendo a proporção dos traços para a produção das misturas teste, faz-se o ajuste das proporções dos materiais experimentalmente para alcançar o abatimento desejado ao alterar o teor de superplastificante. Por fim, ensaios de campo subsequentes devem ser realizados para verificar a mistura de ensaio de laboratório escolhida (NAWY, 2001).

### 2.2.3 Método Aïtcin

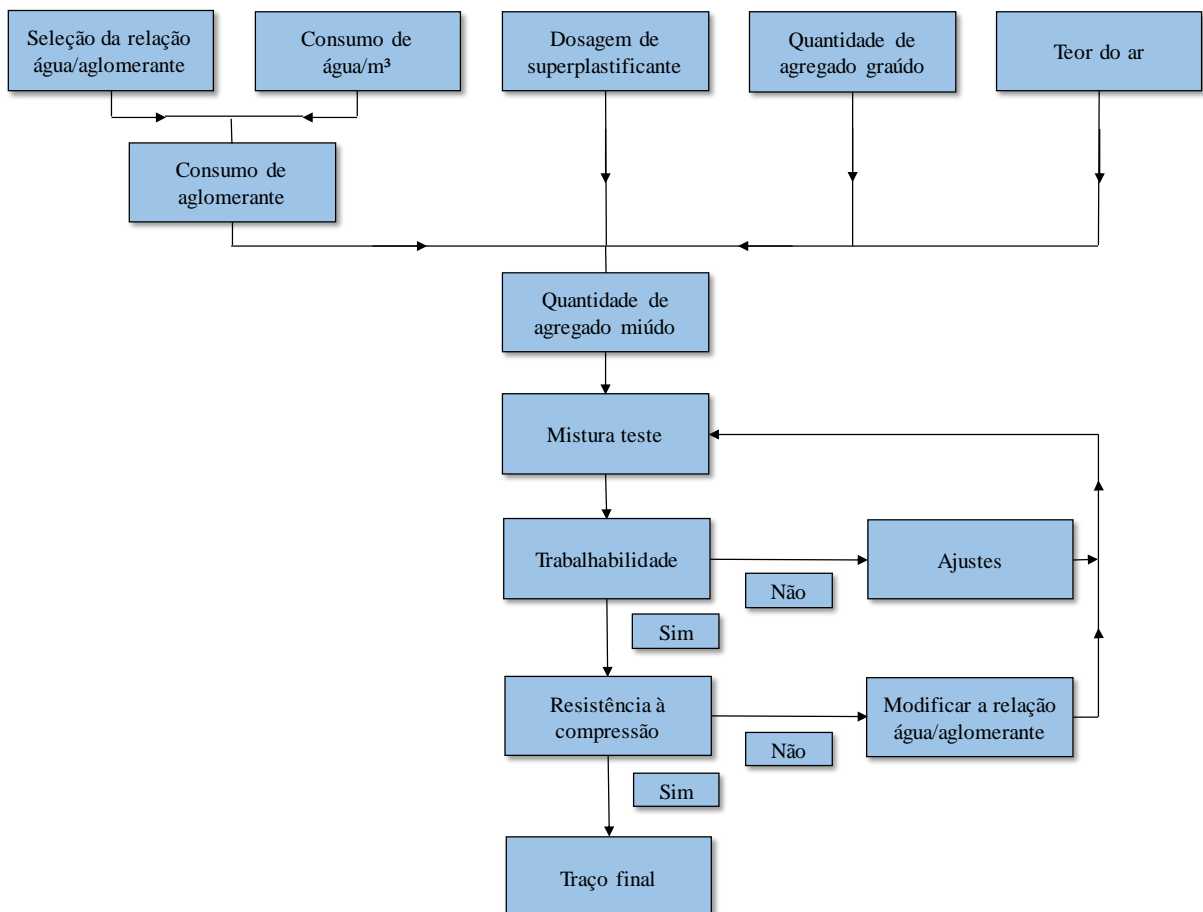
Aïtcin (2000) relata que seu método é muito simples, uma vez que segue a mesma abordagem da norma ACI 211.1:1991. O método consiste na combinação de resultados empíricos e cálculos matemáticos com base no método do volume absoluto. A Figura 7 ilustra o fluxograma deste método para o projeto de concretos de alta resistência.

O procedimento para a dosagem do CAR é iniciado pela seleção de cinco diferentes características ou proporções de materiais, na seguinte sequência:

- relação água/aglomerante;
- consumo de água;
- dosagem do superplastificante;
- quantidade de agregado graúdo;
- teor de ar aprisionado (valor adotado).

A princípio, a definição da relação água/aglomerante pode ser obtida na Figura 8 para uma determinada resistência à compressão aos 28 dias.

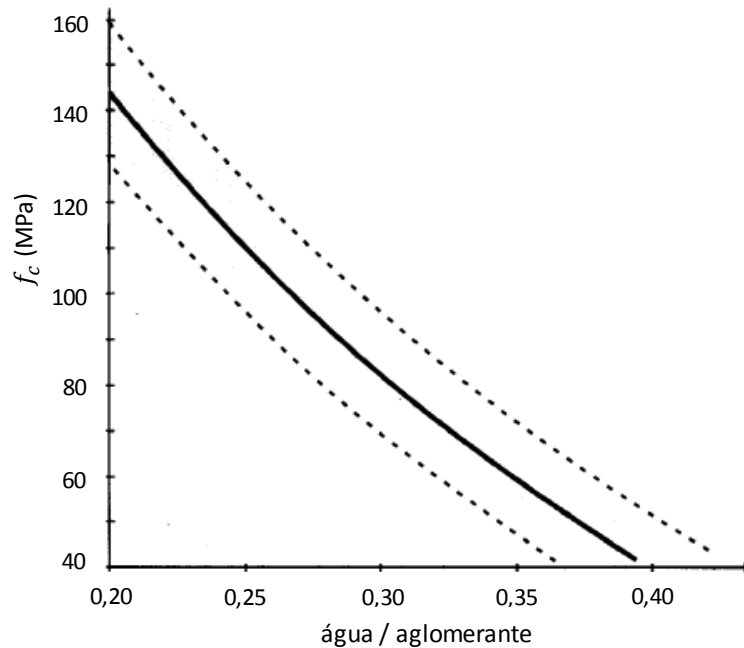
Figura 7 - Fluxograma do método de Aïtcin.



Fonte: adaptado de Aïtcin (2000)



Figura 8 - Relação entre a resistência à compressão e a relação água/aglomerante.



Fonte: Aïtcin (2000)

Quanto a determinação da dosagem mínima de água, na Figura 9 é feita uma abordagem simplificada, fundamentada no conceito do ponto de saturação do aditivo superplastificante. Caso o ponto de saturação de algum superplastificante não seja conhecido, recomenda-se iniciar com um consumo de água de 145 litros/m<sup>3</sup> (AÏTCIN,2000).

Figura 9 - Determinação da dosagem mínima de água.

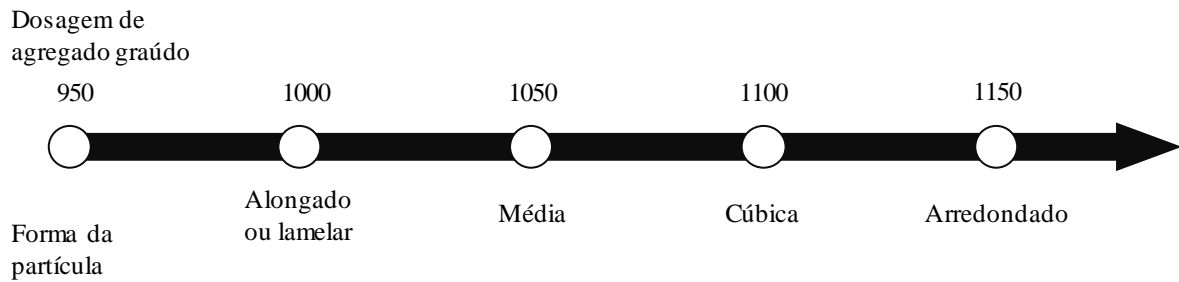
Ponto de saturação	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	(%)
Dosagem de água	120 a 125	125 a 135	135 a 145	145 a 155	155 a 165	(l/m <sup>3</sup> )

Fonte: Aïtcin (2000)

A dosagem de superplastificante pode ser estipulada a partir da dosagem no ponto de saturação. Caso o ponto de saturação não seja conhecido, recomenda-se iniciar com um teor de 1,0% (AÏTCIN,2000).

Para a determinação da quantidade de agregado graúdo, pode-se utilizar a Figura 10 para auxiliar na escolha deste valor em função da forma geral das partículas. Caso exista qualquer incerteza sobre a forma do agregado graúdo ou se a sua forma não é conhecida, recomenda-se utilizar inicialmente uma quantidade de 1000 kg/m<sup>3</sup> de agregado graúdo (AÏTCIN,2000).

Figura 10 - Quantidade de agregado graúdo.



Fonte: Aïtcin (2000)

Para estabelecer o teor de ar aprisionado, Aïtcin (2000) relata que se descobriu experimentalmente que é difícil obter, em concretos de alta resistência, menos de 1% de ar aprisionado e que, na pior situação, o teor de ar aprisionado pode atingir os 3%. Portanto, o autor sugere usar 1,5% como uma estimativa inicial do teor de ar aprisionado e, em seguida, ajustá-lo com base no resultado obtido com as misturas experimentais.

No final, conhecendo as características definidas anteriormente, pode-se encontrar o consumo de aglomerante, que é dado pelo quociente do consumo de água pela relação água/aglomerante, e o consumo de agregado miúdo, que é calculado de acordo com o método do volume absoluto tal como é feito no método ACI 211.1:1991. Após a definição dos consumos de cada material utilizado na dosagem, deve ser feita uma mistura experimental, objetivando avaliar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco e a resistência à compressão no estado endurecido. A análise da trabalhabilidade é realizada através do ensaio de abatimento e, caso seja necessário, ajustes devem ser feitos na quantidade de aditivo superplastificante para se obter o abatimento preestabelecido. A resistência à compressão estimada numa determinada idade é verificada através das amostras feitas com a mistura experimental e, caso a mesma não seja atingida, a relação água/aglomerante deve ser alterada até se obter o produto esperado. Tendo as resistências pretendidas, obtém-se a composição final do traço (AÏTCIN,2000).

#### 2.2.4 Método IPT/EPUSP modificado

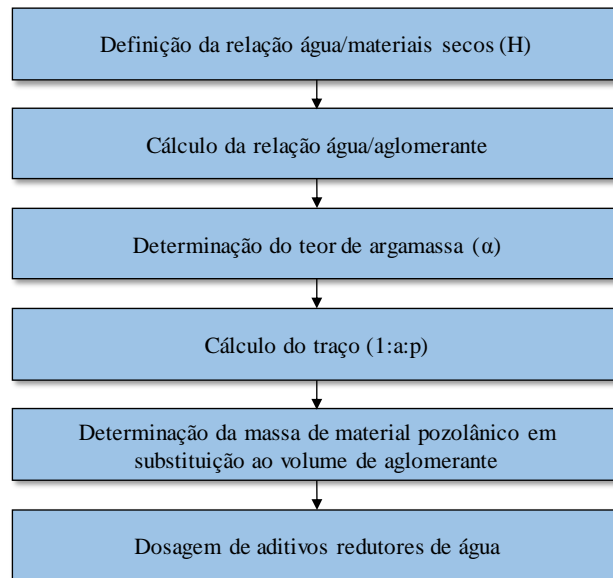
Cremonini et al. (2001) desenvolveram um método adaptado para CAR, a partir do método experimental IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), objetivando alcançar elevadas resistências com o menor consumo de cimento possível. Este método de dosagem para concreto de alta resistência (CAR) prescreve as seguintes considerações:

- Fixação de uma baixa relação água/materiais secos (H);
- Determinação do teor de argamassa ( $\alpha$ );

- Utilização de material pozolânico como substituição de parte do volume de material cimentante.

A partir dessas considerações, segue-se o procedimento do método proposto para CAR, conforme explicitado na Figura 11.

Figura 11 - Procedimento do método IPT/EPUSP modificado para CAR.



Fonte: O autor (2019)

Segundo Cremonini et al. (2001), a fixação inicial de uma baixa relação água/materiais secos (H) garante a manutenção de baixas relações água/aglomerante, característica imprescindível para produção de CAR. Logo, para a dosagem de CAR, este autor propõe valores de H menores que 6 %.

Definido o valor de H, calcula-se a relação água/aglomerante (a/agl) por meio da Lei de Lyse, conforme as Equações 4 e 5. Determinam-se traços com diferentes relações 1:m (material aglomerante : agregados secos totais, em massa), e para cada valor de m calcula-se um valor para a razão a/agl . Neste método, o número de traços confeccionados deve ser maior ou igual a 3 e menor ou igual a 6 (CREMONINI et al., 2001).

$$H(\%) = \frac{a/agl}{1 + m} \quad (4)$$

$$a/agl = H(\%) \times (1 + m) \quad (5)$$

O teor ideal de argamassa é determinado empiricamente, seguindo o procedimento proposto por Helene e Terzian (1992).

Sabendo-se o teor ótimo de argamassa ( $\alpha$ ) e a proporção de agregados secos totais ( $m$ ), pode-se calcular o traço unitário 1:a:p (material aglomerante: agregado miúdo: agregado graúdo, em massa) a partir das Equações 6 e 7.

$$a = \alpha \times (1 + m) - 1 \quad (6)$$

$$p = m - a \quad (7)$$

Considerando que o volume de cimento mais o volume de adição pozolânica constituem o volume total de aglomerante, pode-se determinar para uma ou mais substituições sua massa equivalente ao volume de aglomerante substituído.

Por fim, para produzir o CAR, utilizam-se relações água/aglomerante pequenas e a consistência almejada é atingida através do uso de aditivos superplastificantes.

### **2.2.5 Método De Larrard**

O estudo elaborado por De Larrard (1999) não propõe apenas um método de dosagem para concreto, ele propõe uma abordagem científica apoiada em diversas equações, que relacionam diferentes parâmetros da mistura com as propriedades do concreto. O autor enumera uma série de regras que fundamentam essas equações e esclarece através de uma solução analítica a relação comum entre os constituintes da mistura de concreto.

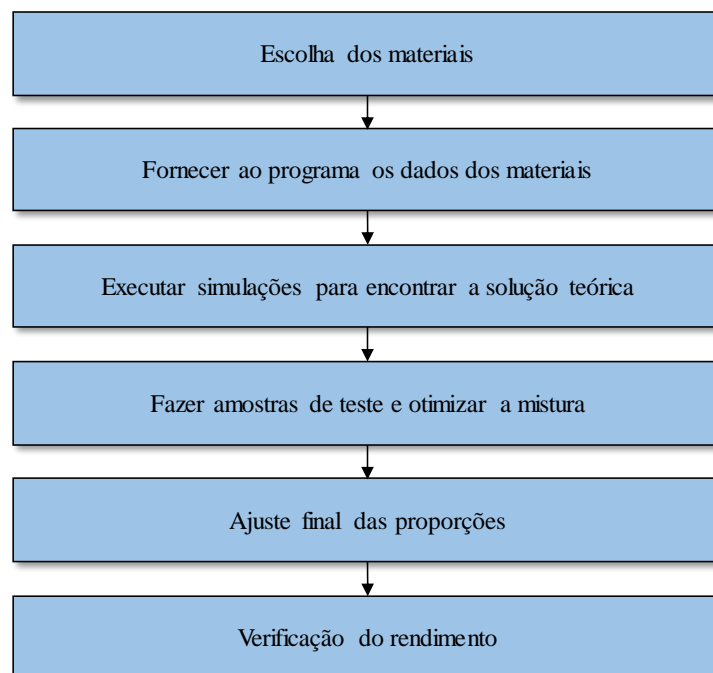
Rohden (2015) descreve sumariamente esse método. Ele cita que a sua idealização é definida sob três questões diferentes. A primeira questão estudada está relacionada à densidade de empacotamento granular das misturas. De Larrard (1999) estudou a influência das várias características dos agregados na compactidade e na densidade do esqueleto granular, dentre essas características ele deu maior relevância a dimensão máxima característica e a forma dos grãos como as variáveis determinantes da compactidade granular. A segunda questão discutida refere-se à influência da resistência da matriz (definida como a pasta de cimento mais todas as partículas com dimensão menor do que 80 micrômetros) na resistência do concreto. A terceira questão considerada é a reologia do concreto. De Larrard (1999) estudou a influência dos diversos parâmetros de dosagem na viscosidade do concreto, e propôs um modelo geral que mensura a viscosidade em função das características do concreto.

Conhecendo os preceitos descritos por De Larrard (1999), este recomenda, para a otimização do processo de dosagem, a utilização de um computador, equipado com um pacote de planilhas eletrônicas para a resolução do sistema de equações descrito em seu estudo. O autor desenvolveu um programa chamado de BETONLAB que auxilia a resolução deste sistema de

equações. Para o mesmo funcionar é necessária a determinação dos parâmetros relativos à caracterização de todos os materiais. Ele destaca que o resultado obtido depende da precisão das medidas experimentais realizadas para definir a resolução do sistema de equações. Enfim, o autor defende que é o uso combinado de simulações e experimentos de laboratório que permite a melhor e mais rápida otimização.

A Figura 12 ilustra o procedimento descrito para a dosagem do concreto com o auxílio do computador. Primeiramente, deve ser feita a escolha dos materiais conforme a disponibilidade local, de modo que satisfaçam as especificações técnicas, visando sempre obter a mistura mais econômica possível. Dispondo desses dados, pode-se fornecer ao programa computacional os dados relativos aos materiais. Após inserir os dados, deve-se buscar uma solução que atenda às especificações, com custo mínimo, através da realização de simulações para encontrar a solução teórica. Possuindo esta, é importante fazer amostras de teste para medir qualquer propriedade que foi definida na mistura, para assegurar que as especificações foram atendidas. Caso alguma delas não for satisfeita, deve-se buscar uma solução para o ajuste final das proporções. Por fim, depois de produzir uma mistura adequada às especificações definidas, pode-se fazer a verificação do “rendimento” do traço para as condições reais de produção, ou seja, os conteúdos corretos dos constituintes da mistura por unidade de volume são calculados com a finalidade de possuir dados sólidos para a avaliação econômica.

Figura 12 – Procedimento do método De Larrard (1999) com o auxílio de um programa computacional.



Fonte: O autor (2019)

### 2.3 CONCLUSÕES

Conforme citado anteriormente, a escolha do método para confeccionar o CAR e o CEAA nesta pesquisa foi feita tendo em vista a estrutura disponível para a realização do trabalho experimental e a possibilidade de aplicação prática do mesmo. Diante dos métodos expostos, nota-se que cada um deles possui algumas especificidades próprias.

Quanto a aplicabilidade do método De Larrard (1999), verificou-se que este é bastante trabalhoso, que requer vários ensaios preliminares e que, na prática, estes inviabilizam a sua utilização. Sendo assim, nota-se que o método como um todo não é de fácil aplicação.

Os métodos Mehta e Aïtcin (1990), Aïtcin (2000) e Nawy (2001) baseiam-se na utilização de tabelas para a dosagem do CAR e, além disso, é necessária a caracterização prévia dos materiais para a execução destes. Segundo Dafico (2001), mesmo para o concreto convencional, que possui muito menos variáveis envolvidas, a dosagem com base em tabelas universais, como o método do ACI, nunca foi totalmente aceita. Este autor relata que mesmo considerando a praticidade aparente de uma dosagem passo a passo utilizando-se de equações empíricas e tabelas, os desvios iniciais prováveis e a demora até encontrar o traço ideal são questões que sempre levam os tecnologistas de concreto a terem restrições a esse tipo de método.

Em relação ao método IPT/EPUSP modificado, identifica-se que o mesmo é um método experimental, simples e de fácil aplicação, uma vez que a caracterização prévia dos materiais não é necessariamente obrigatória, isto é, o mesmo pode ser executado em obra sem necessidade de ensaios especiais em laboratório. Este método torna-se elegante por não apresentar tabelas de aplicação geral, mas por criar uma metodologia simples que leva em conta as condições próprias de cada lugar e os recursos materiais disponíveis.

Portanto, considerando a análise dos métodos abordados no referencial bibliográfico, optou-se pelo método IPT/EPUSP para confeccionar a dosagem do CAR e do CEAA, por considerar que este método é de fácil aplicação e exequível na infraestrutura disponível para a realização do trabalho.

### 3 CONCRETO COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO ÁLCALI-ATIVADA (CEAA)

Neste capítulo serão abordadas pesquisas sobre o concreto confeccionado com escória de alto-forno moída ativada com silicato de sódio, visto que este é o ativador que proporciona resistências à compressão mais elevadas (WANG et al., 1995; JOHN, 1995; MELO NETO, 2002; BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2000). Além disso, serão apresentadas, sumariamente, algumas particularidades deste concreto. É importante deixar claro que, no decorrer deste trabalho, a escória de alto forno moída será designada, por vezes, apenas como escória.

#### 3.1 EXPERIÊNCIAS MUNDIAIS

Na Tabela 8 estão expostos os resultados obtidos experimentalmente por diversos autores (PU et al., 1988 apud WANG et al., 1995; BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2000; MITHUN; NARASIMHAN, 2014; THOMAS; PEETHAMPARAN, 2015; PUERTAS et al., 2018; DING; DAI; SHI, 2018; MANJUNATH; NARASIMHAN, 2018) para os concretos de escória álcali-ativada (CEAA) que utilizaram silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ou uma composição de silicato de sódio com hidróxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ ) como ativador. Nesta tabela, o símbolo MS é a abreviação utilizada para o módulo de sílica (que equivale a relação entre  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ , em massa), Mesc corresponde a massa de escória, Cesc representa o consumo de escória, a relação a/agl se refere a razão entre o consumo de água e de escória e os símbolos  $f_{c,28}$ ,  $f_{ct,sp}$  e  $E_c$  equivalem, respectivamente, a resistência à compressão aos 28 dias, a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade estático.

Segundo Wang et al. (1995), podem ser obtidas resistências à compressão para o CEAA de 60 MPa a 150 MPa sem utilização de aditivos químicos ou procedimento especial de moldagem. Estes autores expuseram os dados de resistência à compressão dos ensaios realizados por Pu et al. (1988 apud WANG et al., 1995, p. 94) para os concretos de escória ativados com soluções de silicato de sódio. Pode-se observar que uma das misturas confeccionadas pelo último autor atingiu resistência de 68 MPa em um dia, 96 MPa em três dias, 117 MPa em 28 dias e 132,2 MPa em 1 ano. De acordo com Wang et al. (1995), um ganho tão rápido de resistência é difícil de obter com o concreto confeccionado com cimento Portland. Estes autores citam que a solução de silicato de sódio com um módulo de sílica de 1 a 1,5 é o ativador mais eficaz para todos os tipos de escória. No entanto, eles relatam que o enrijecimento do cimento de escória álcali-ativada pode ocorrer em 15 minutos. Eles citam ainda que existe uma dosagem ótima de componente alcalino em termos de resistência, que varia entre 3,5% e 5,5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  por peso de escória; quando a dosagem alcalina atinge este valor, nenhum aumento significativo na

resistência ocorre em dosagens mais altas. No entanto, doses mais baixas de componente alcalino levam a reduções acentuadas na resistência.

Tabela 8 - Resultados obtidos experimentalmente por diversos autores para o concreto de escória álcali-ativada com silicato de sódio ou com uma composição de silicato de sódio e hidróxido de sódio.

Autor	MS	%(Na <sub>2</sub> O) / (Mesc)	Cesc (kg/m <sup>3</sup> )	a/agl	fc,28 (MPa)	fct,sp (MPa)	Ec (GPa)	Poisson
Pu et al. (1988 apud WANG et al., 1995)	-	-	≈ 420 <sup>ii</sup>	-	117,0 <sup>i</sup>	-	-	-
Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000)	0,75	4,0	360	0,5	40,0	-	-	-
	1,25	7,0			58,0	-	-	-
Mithun e Narasimhan (2014)	1,25 <sup>i</sup>	4	370	0,45	55,8	3,9	-	-
		6			62,4	4,3	-	-
		8			83,2	5,4	-	-
Thomas e Peethamparan (2015)	0,75	5,0	570	0,31 <sup>ii</sup>	35,0	6,3	27,9	0,134
	0,75	4,0			33,7	6,8	34,2	0,129
	0,75	5,0			44,7	7,2	26,2	0,130
	0,75	6,0			46,7	6,3	27,0	0,127
	1,5	2,0			45,7	8,3	22,4	0,125
	1,5	2,5			52,6	8,4	33,5	0,127
Puertas et al. (2018)	1,2	5,0	357	0,55 <sup>ii</sup>	60,0	-	-	-
Ding, Dai e Shi (2018)	1,5	3	350		41,5 <sup>iii</sup>	4,1 <sup>iii</sup>	20,0 <sup>iii</sup>	-
	1,5	4	380	0,45	53,5 <sup>iii</sup>	5,1 <sup>iii</sup>	22,4 <sup>iii</sup>	-
	2,0	4,5	420		70,0 <sup>iii</sup>	6,1 <sup>iii</sup>	23,6 <sup>iii</sup>	-
Manjunath e Narasimhan (2018)	1,0	7	800 <sup>i</sup>	0,480	77,8	3,7	-	-
		8		0,470	75,6	3,7	-	-
		9		0,475	79,0	3,9	-	-

<sup>i</sup> Melhores resultados;

<sup>ii</sup> Valores calculados pelo autor (2019);

<sup>iii</sup> Valores aproximados, pois, foram retirados de um gráfico.

Fonte: O autor (2019)

Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000) apresentam o estudo da trabalhabilidade no estado fresco, retração e resistência à compressão do CEAA, e o efeito de aditivos químicos e do tipo de ativador nessas propriedades. Os autores concluíram que: o concreto ativado com silicato de sódio líquido apresentou as melhores propriedades mecânicas; o aditivo incorporador de ar, o redutor de retração e a adição de gesso reduziram sua retração; o aditivo incorporador de ar também melhorou a trabalhabilidade e não teve efeito negativo na resistência à compressão. Com base neste estudo, os autores recomendam que o aditivo incorporador de ar seja utilizado



na produção de CEAA. Além disso, conforme está exposto na Tabela 8, os resultados obtidos para o CEAA com solução de silicato de sódio, utilizando 4% Na<sub>2</sub>O (MS = 0,75) e 7% Na<sub>2</sub>O (MS = 1,25) da massa de escória, apresentaram resistência à compressão de 40 MPa e 58 MPa aos 28 dias, respectivamente. Ou seja, a maior porcentagem de Na<sub>2</sub>O e um aumento do MS no ativador produziu uma resistência maior. Porém, os autores relatam que a trabalhabilidade no estado fresco estava diminuindo rapidamente com o aumento na concentração do ativador.

Mithun e Narasimhan (2014) pesquisaram o efeito do aumento das dosagens de óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O, 4%, 6% e 8% do peso total de escória foram consideradas) e do módulo de sílica (MS) (no intervalo de 0,5 a 1,5) das soluções alcalinas sobre as características de trabalhabilidade e resistência das misturas de concreto de escória indiana álcali-ativadas. Eles observaram que o aumento na concentração de Na<sub>2</sub>O ocasionou o aumento das resistências à compressão, à tração e à flexão, tanto nas primeiras idades quanto nas idades posteriores, e constataram que o aumento do MS diminuiu a capacidade de trabalho das misturas. Um MS ótimo de 1,25 foi encontrado nas três dosagens de Na<sub>2</sub>O, visto que proporcionava maiores resistências à compressão, à tração e à flexão.

O trabalho de Thomas e Peethamparan (2015) apresenta uma pesquisa sobre a resistência à tração, o módulo de elasticidade, a relação de Poisson e as relações tensão-deformação do concreto com escória de alto-forno álcali-ativada. Estes autores relataram que a resistência à tração do CEAA é significativamente maior do que a do concreto de cimento Portland com resistência à compressão similar; que o coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) para o CEAA é de cerca de dois terços ( $\mu = 0,127 \pm 0,003$ ) do valor encontrado para o concreto de cimento Portland ( $\mu = 0,18$ ), com excelente repetibilidade; que o módulo de elasticidade do CEAA permanece relativamente constante, em torno de 30 GPa, em toda a faixa de resistência à compressão representada neste estudo,  $20 \text{ MPa} \leq f_c \leq 60 \text{ MPa}$ ; e que o CEAA exibe um comportamento de tensão-deformação altamente frágil, marcado por uma elasticidade linear quase perfeita, seguida por uma falha repentina e total.

Puertas et al. (2018) pesquisaram o comportamento de concretos de escória álcali-ativada no estado fresco e endurecido e o efeito do tempo de mistura na confecção do CEAA. Foram utilizadas duas soluções ativadoras, uma de silicato de sódio e a outra de hidróxido de sódio (NaOH), e dois procedimentos de mistura. Estes autores relataram que a natureza do ativador alcalino foi o principal determinante na reologia do CEAA, principalmente quando a escória foi ativada com o uso de silicato de sódio. Eles verificaram que o CEAA obteve maior resistência à compressão quando ativado com silicato de sódio e, além disso, constataram que

tempos de mistura mais longos proporcionavam comportamento reológico melhor nos concretos confeccionados com este ativador. No primeiro e no segundo procedimento de mistura utilizados, após realizar a mistura da escória com o silicato de sódio, o CEAA permaneceu trabalhável por cerca de 22 min e 30 s e 30 min, respectivamente. É conveniente citar também que após o término do primeiro procedimento de mistura o CEAA permaneceu trabalhável por cerca de 13 minutos e 30 segundos, enquanto que ao encerrar o segundo procedimento de mistura o CEAA permaneceu trabalhável por 17 minutos.

Ding, Dai e Shi (2018) verificaram mediante pesquisa experimental que, para uma mesma resistência à compressão, o concreto feito com cimento Portland e o CEAA têm resistências à tração similares. No entanto, eles relataram que os módulos de elasticidade dos concretos confeccionados com escória álcali-ativada são geralmente menores do que seus equivalentes com cimento Portland, em torno de 25 a 35%. Ao ver os resultados de Ding, Dai e Shi (2018) na Tabela 8, observa-se que para alcançar as resistências predefinidas em sua pesquisa (40 MPa, 50MPa e 70 MPa) os autores apenas variaram a %Na<sub>2</sub>O sobre a massa de escória e o módulo de sílica, mas não variaram a relação a/agl. Enquanto que no caso dos concretos confeccionados com cimento Portland, estes autores variaram a relação a/agl para chegar à essas resistências. Ou seja, nota-se que o teor de ativador e o módulo de sílica têm influência significativa na resistência à compressão do CEAA.

No trabalho de Manjunath e Narasimhan (2018), uma tentativa foi feita para desenvolver misturas de concreto autoadensável utilizando escória de alto forno álcali-ativada como ligante, com seu consumo variando entre 700 kg/m<sup>3</sup> e 900 kg/m<sup>3</sup>. O estudo investigou propriedades como resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água dessas misturas. A relação a/agl das misturas variou no intervalo de 0,47 a 0,48. As soluções alcalinas utilizadas apresentaram percentuais de Na<sub>2</sub>O de 7, 8% e 9%, no entanto o módulo de sílica foi mantido constante, igual a 1,0, em todas as misturas. Os resultados mostraram valores do *slump flow* maiores que 700 mm para as misturas, resistências à compressão elevadas aos 28 dias (71,3 – 80,1 MPa), resistências à tração por compressão diametral satisfatórias aos 28 dias (2,75 - 3,90 MPa) e baixos valores de absorção de água no intervalo de 2 a 3%.

Enfim, ao examinar os estudos anteriores fica evidente que o teor de Na<sub>2</sub>O e o módulo de sílica do silicato de sódio têm grande efeito sobre as propriedades do concreto tanto no estado endurecido como no estado fresco. Porém, verifica-se que não há um consenso desses autores sobre qual é a melhor concentração de silicato de sódio (Na<sub>2</sub>O + MS.SiO<sub>2</sub>) para a produção do CEAA.

## 3.2 PARTICULARIDADES DO CONCRETO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADO

Conforme exposto anteriormente, o CEAA desenvolve altas resistências iniciais e finais quando ativado com silicato de sódio contendo concentração ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{MS.SiO}_2$ ) e módulo de sílica adequados. A explicação para as altas resistências deste concreto está nos produtos de hidratação da pasta de escória álcali-ativada, que forma basicamente C-S-H, e na zona de transição do CEAA, a qual é mais densa e mais uniforme do que a zona de transição de concretos confeccionados com cimento Portland. No entanto, algumas de suas propriedades, como elevada retração e rápido enrijecimento, limitam sua aplicação prática.

### 3.2.1 Produtos de hidratação da pasta de escória álcali-ativada com silicato de sódio

Publicações precedentes (JOHN, 1995; MELO NETO, 2002; SHI; KRIVENKO; ROY, 2003; PACHECO-TORGAL et al., 2014) apresentam revisão bibliográfica sobre a hidratação da escória de alto-forno moída ativada por álcalis. Assim, apenas alguns aspectos referentes aos produtos de hidratação das pastas de escória ativada com silicato de sódio serão apresentados a seguir.

O principal produto de hidratação da escória ativada com silicato de sódio corresponde a um gel C-S-H, cuja composição e estrutura variam em relação ao gel C-S-H gerado na hidratação do cimento Portland, e que se forma junto com alguns produtos secundários, sendo o mais comum a hidrotalcita<sup>2</sup> (MELO NETO, 2002; PACHECO-TORGAL et al., 2014).

Quanto à parcela de C-S-H formada na hidratação da pasta de escória álcali-ativada com silicato de sódio, os resultados de termogravimetria obtidos por Melo Neto (2002) constataram a predominância quase que total do C-S-H como produto hidratado do cimento de escória ativada: 92% de C-S-H, 6% de hidrotalcita e o restante composto por outros produtos hidratados. Segundo Shi, Krivenko e Roy (2003) é geralmente aceito que o cimento Portland totalmente hidratado consiste em 70% de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), 20% de hidróxido de cálcio, 7% de sulfoaluminatos de cálcio e 3% de partículas de cimento anidras. Ou seja, nota-se que a pasta de escória álcali-ativada com silicato de sódio forma mais C-S-H que a pasta de cimento Portland. Como descrito por Melo Neto (2002), esta característica influencia significativamente nas propriedades mecânicas do cimento de escória ativada.

---

<sup>2</sup> A hidrotalcita é um mineral natural com fórmula igual a  $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  e tem estrutura baseada em camadas de brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) intercaladas por moléculas de água e íons de  $\text{CO}_3^{2-}$  (PACHECO-TORGAL et al., 2014).

### 3.2.2 Zona de transição interfacial do CEAA

Ding, Dai e Shi (2018) e Ji et al. (2017) concluíram que a zona de transição interfacial (ZTI) em torno do agregado graúdo no CEAA com silicato de sódio é mais densa, uniforme e tem menor espessura do que a zona de transição do concreto de cimento Portland (CCP). Ding, Dai e Shi (2018) realizaram observações microscópicas através de MEV-EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura – Espectroscopia por Energia Dispersiva) e do ensaio de microdureza para caracterizar a ZTI do CEAA e do CCP. Através dos resultados da varredura linear das razões atômicas de Ca/Si do agregado para os aglomerantes circundantes do concreto, eles constataram que a ZTI do CEAA era mais densa e mais uniforme do que a do CCP. Além disso, os autores relataram que a espessura da ZTI em torno do agregado no CEAA foi menor do que no CCP. Eles também verificaram que embora as resistências à compressão do CCP e do CEAA fossem semelhantes (em torno de 50 MPa), a microdureza da ZTI no CEAA foi cerca de 31,5% mais alta do que no CCP. Por fim, eles concluíram que os resultados acima indicam que a ZTI do CEAA é mais densa, mais resistente e mais uniforme do que a do CCP, para uma mesma resistência à compressão.

Ji et al. (2017) pesquisaram o efeito de tipos de ativadores nas características da ZTI no CEAA. Dois tipos de ativadores químicos foram utilizados,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + silicato de sódio, para a confecção do CEAA e um CCP também foi feito para efeito de comparação. Na pesquisa da ZTI, a microdureza foi medida e analisada em conjunto com observações de microestrutura por MEV-EDX (Microscopia Eletrônica de Varredura - Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raio-X). Neste estudo, os autores relatam que o uso combinado  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + silicato de sódio como ativador se mostrou muito eficaz, uma vez que a hidratação do CEAA ocorreu rapidamente, e os produtos de hidratação se formaram rapidamente. Eles constataram que a microestrutura da ZTI deste concreto é muito densa, sendo o C-S-H o principal produto de hidratação, e sua microdureza da ZTI é significativamente maior que a microdureza do CCP (feito com agregado natural), que apresentou quantidades substanciais de cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e de AFt na ZTI. Além disso, os autores verificaram que a espessura da ZTI, determinada pela distribuição das razões Ca/Si, do CEAA com  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + silicato de sódio é de 42 mm e a do CCP é de 72 mm. Isto é, o CEAA com  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + silicato de sódio tem uma espessura da ZTI menor do que a do CCP.

### 3.2.3 Início de pega

Uma das características que limita a aplicação do CEAA com silicato de sódio é o rápido início de pega deste concreto. Wang et al. (1995) sugerem que em cimentos de escória ativada com silicato de sódio, o início de pega em torno de 15 minutos se dá em razão da formação conjunta de C-S-H e de um gel rico em sílica. Collins e Sanjayan (1999) relatam que o concreto contendo escória ativada por silicato de sódio líquido mostra consideravelmente menos trabalhabilidade inicial e demonstra perda significativa de abatimento quando comparado ao concreto com cimento Portland. Mithun e Narasimhan (2014) constataram que o aumento do módulo de sílica (MS), para uma mesma dosagem de  $\text{Na}_2\text{O}$ , diminuiu a trabalhabilidade das misturas de CEAA e, ao analisar a pesquisa destes autores, nota-se também que ela diminui com o aumento na concentração do ativador ( $\% \text{Na}_2\text{O} + \text{MS} \cdot \% \text{SiO}_2$ ).

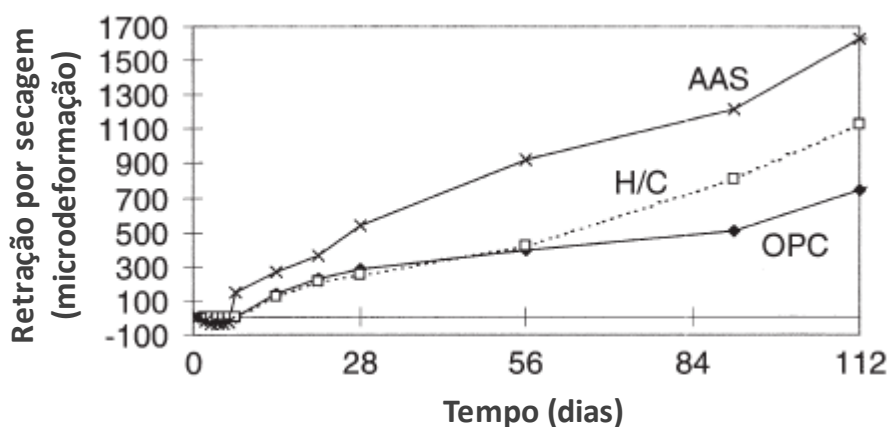
Na pesquisa de Puertas et al. (2018), conforme visto anteriormente, o CEAA permaneceu trabalhável por 17 minutos após o encerramento do procedimento de mistura mais apropriado. Manjunath e Narasimhan (2018) relatam que os tempos de início de pega de todos os CEAA's confeccionados na pesquisa deles estavam na faixa de 20 a 30 min. Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000) observaram que o concreto de escória ativado por silicato de sódio, com 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , permaneceu trabalhável durante 30 minutos. Enfim, com base nos estudos citados, percebe-se que o concreto de escória ativado com silicato de sódio tem um rápido início de pega, em torno de 15 a 30 minutos, e que o aumento do teor silicato de sódio e do módulo de sílica são fatores determinantes para que ocorra um rápido início de pega.

### 3.2.4 Retração

Diversos trabalhos constataram que concretos e argamassas confeccionados com escória de alto forno moída ativada com silicato de sódio apresenta maior retração que os feitos com cimento Portland (DOUGLAS et al., 1992; COLLINS; SANJAYAN, 1999, 2000; MELO NETO, 2002; PALACIOS; PUERTAS, 2007). Conclusões de alguns destes trabalhos estão descritas abaixo. Melo Neto (2002) investigou as retrações por secagem e autógena do cimento de escória álcali-ativada em função do tipo e teor de diversos ativadores. O mesmo verificou que a ativação da escória com silicato de sódio apresentou retração por secagem e autógena superior à apresentada pelos demais ativadores e pelo cimento Portland. Douglas et al. (1992) pesquisaram a retração por secagem de concreto de escória álcali-ativado com diferentes quantidades de silicato de sódio com um MS de 1,47. Os autores deste trabalho relataram que as retrações por secagem do CEAA foram mais altas do que as do concreto feito com cimento Portland (CCP) com relação água/aglomerante e trabalhabilidade equivalentes.

Collins e Sanjayan (1999) constataram que o CEAA apresenta maior retração por secagem que o CCP, como pode ser visto na Figura 13. O concreto AAS (CEAA ativado com silicato de sódio em pó e cal) mostrou uma taxa consideravelmente maior de retração por secagem quando exposto, quando comparado ao concreto OPC (CCP). A retração por secagem do concreto H/C (CEAA ativado com NaOH + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) é semelhante à do concreto OPC até 56 dias; no entanto, é consideravelmente maior além de 56 dias. Estes autores citaram, neste trabalho, que a maior retração por secagem pode levar a uma maior incidência de fissuras no concreto. Esta observação foi comprovada em estudo posterior de Collins e Sanjayan (2001), os quais pesquisaram o nível de microfissuração que ocorre no CEAA quando submetido a vários tipos de regimes de cura. Os resultados mostraram que a cura úmida foi a mais adequada e que ao realizar os demais tipos de cura, a cura selada ou a exposta, o nível de microfissuração do CEAA aumentou. Além disso, o desenvolvimento da resistência do CEAA também foi significativamente reduzido pela falta de cura úmida.

Figura 13 - Retração por secagem de vários concretos.



Fonte: adaptado de Collins e Sanjayan (1999).

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental foi elaborado com o objetivo de produzir um concreto de alta resistência com escória ativada com silicato de sódio (CEAA). Em razão da pouca experiência internacional em CARs com este tipo de ligante, constatada na revisão bibliográfica, optou-se pela produção do concreto de alta resistência (CAR) com cimento Portland e sílica ativa utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP modificado na parte inicial desta pesquisa. Com isto foi possível identificar as nuances do método utilizando ligantes tradicionais para embasar sua aplicação na confecção do CEAA, assim como para a comparação dos resultados. Também foi realizado um estudo exploratório para verificar: (a) se a substituição de sílica ativa sobre a massa de aglomerante em argamassas de escória ativada contribui para o aumento da resistência à compressão assim como em argamassas feitas com cimento Portland; (b) qual o teor de água/materiais secos (H) adequado para a confecção do CEAA. Tendo estes resultados do CAR e do estudo exploratório, produziu-se o CEAA. A análise dos resultados de desempenho do concreto apoiou-se nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.

### 4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental dividiu-se basicamente em 4 etapas, as quais referem-se a: caracterização dos materiais; confecção do CAR; estudo exploratório; e confecção do CEAA. Na primeira etapa, foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais que compõem os concretos.

Na segunda etapa, utilizou-se o método IPT/EPUSP modificado para a confecção do concreto de alta resistência. Foram produzidos três traços do CAR e realizados os ensaios no estado fresco e endurecido. No estado fresco, foram feitos os ensaios de determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico e de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. No estado endurecido, realizaram-se os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico, que foi obtido através da determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. A quantidade de corpos de prova para os ensaios realizados no estado endurecido está descrita na Tabela 9.

Tabela 9 - Quantidade de corpos de prova 10cm x 20cm usados para os ensaios feitos com o CAR no estado endurecido.

Idade	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade dinâmico	Módulo de elasticidade estático	Resistência à tração por compressão diametral
1 dia	6	10	-	-
3 dias	6	10	-	-
7 dias	6	10	-	-
28 dias	6	10	3	3
Total	24	40	3	3

Fonte: O autor (2019)

Após concluir os ensaios com o CAR, na terceira etapa, efetuou-se o estudo exploratório para verificar se a substituição de sílica ativa sobre a massa de aglomerante em argamassas de escória ativada contribui para o aumento da resistência à compressão e para examinar se a relação água/materiais secos (H) utilizada na dosagem do CAR possibilitaria a confecção do CEAA com trabalhabilidade suficiente para a moldagem dos corpos de prova. O ensaio executado nas argamassas foi o de resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, em corpos de prova cilíndricos 5 cm x 10 cm e a análise de H ocorreu mediante análise visual da consistência do CEAA com o auxílio do ensaio de abatimento do tronco de cone.

Por fim, com base nos resultados obtidos no estudo exploratório, na quarta etapa, foram confeccionadas as misturas de CEAA utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP modificado. Os ensaios no estado fresco e endurecido do CEAA foram feitos com a mesma quantidade de corpos de prova que foram empregados no CAR.

Para realização dos ensaios, foi utilizado o Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME) e o Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LABTAG), os quais estão localizados no galpão de Estruturas e Construção Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 4.2.1 Cimento Portland

O cimento foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V-ARI MAX, produzido pela Cimento Nacional. A caracterização química do cimento foi realizada por fluorescência de raios-X no Laboratório de Isótopos Estáveis do Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG-Labise) do Departamento de Geologia da UFPE. As características químicas do cimento encontram-se na Tabela 10 e as características físicas e mecânicas estão apresentadas na Tabela 11.



Tabela 10 - Caracterização química do cimento CP V-ARI MAX.

<b>Óxidos</b>	<b>Média (%)</b>
CaO	64,29
SiO <sub>2</sub>	16,98
SO <sub>3</sub>	4,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,79
MgO	1,82
K <sub>2</sub> O	1,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,65
TiO <sub>2</sub>	0,30
Na <sub>2</sub> O	0,29
SrO	0,06
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
MnO	0,03
NiO	0,01
ZnO	0,01
ZrO <sub>2</sub>	0,01
PF	3,29

Fonte: O autor (2019)

Tabela 11 - Características físicas e mecânicas do CP V-ARI MAX.

<b>Ensaio</b>	<b>Média</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,13
Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	459,3
Índice de finura - # 200 (%)	0,03
Resíduo na peneira # 325 (%)	0,78
Água de consistência normal (%)	32,4
Início de pega (min)	140
Fim de pega (min)	201
Expansibilidade à quente (mm)	0,50
Resistência à compressão – 1 dia (MPa)	29,3
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	42,7
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	49,2
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	57,6

Fonte: CIMENTO NACIONAL (2018)

#### 4.2.2 Sílica ativa

A sílica ativa foi a fornecida pela Tecnosil, sendo própria para aplicação em concretos e argamassas. Conforme dados do fabricante, a mesma tem uma superfície específica (B.E.T.) de 19.000 m<sup>2</sup>/kg, formato de partícula esférico e o diâmetro médio das partículas é de 0,20 µm. A

massa específica da sílica ativa foi determinada através do ensaio estabelecido pela ABNT NBR 16605:2017 e é igual a 2,21 g/cm<sup>3</sup>. A caracterização química deste material foi realizada por fluorescência de raios-X no Laboratório de Isótopos Estáveis do Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG-Labise) do Departamento de Geologia da UFPE. As características químicas da sílica ativa encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Caracterização química da sílica ativa.

<b>Óxidos</b>	<b>Média (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	91,49
CaO	0,73
K <sub>2</sub> O	0,61
MgO	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18
Na <sub>2</sub> O	0,17
SO <sub>3</sub>	0,12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09
MnO	0,01
ZnO	0,01
Br	0,01
PF	6,04

Fonte: O autor (2019)

#### 4.2.3 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante foi o Hyperkem<sup>TM</sup> 42, que é a base de policarboxilato, fornecido pela NOVAKEM. Segundo a fabricante, ele é um aditivo redutor de água tipo SP II, isento de cloretos, sendo recomendado para a produção de concretos de alta resistência, podendo promover o aumento do abatimento e a redução de mais de 40% do consumo de água em concretos com alto consumo de cimento, com ganhos de resistência à compressão iniciais e finais sem efeito sobre o tempo de pega. As características físico-químicas do Hyperkem<sup>TM</sup> 42 estão expostas na Tabela 13.

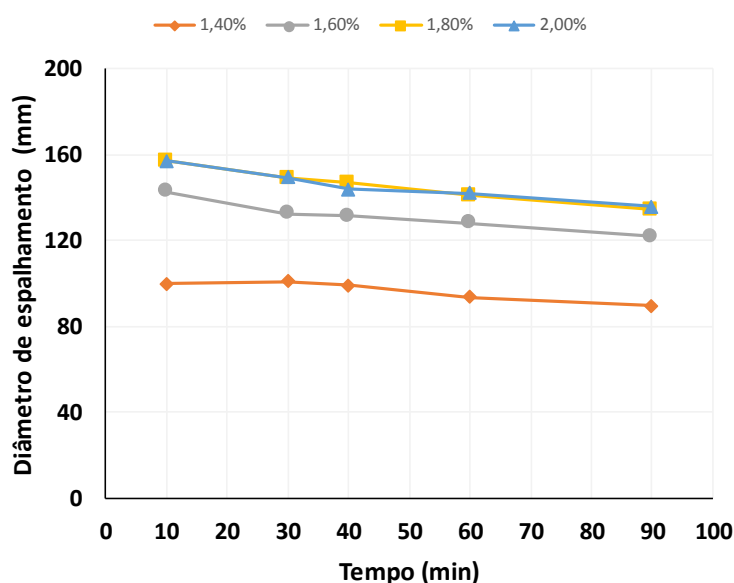
Tabela 13 - Especificações técnicas do aditivo superplastificante Hyperkem<sup>TM</sup> 42.

<b>Propriedade</b>	<b>Especificação</b>
Coloração	Líquido laranja
Aspecto Visual	Solução homogênea
Teor de sólidos (%)	48,0
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,12
pH	4,2

Fonte: NOVAKEM (2018)

A compatibilidade entre este aditivo e os aglomerantes (90 % cimento + 10% sílica ativa) utilizados para a produção do CAR foi verificada através do ensaio de miniabatimento em uma pasta com relação  $a/agl = 0,21$ , conforme procedimento descrito no Apêndice A. As quantidades de cimento, sílica ativa e água foram mantidas constantes em todas as pastas, variando-se somente a quantidade de aditivo. O teor de água presente no aditivo foi descontado da água adicionada. Os resultados obtidos foram ilustrados na Figura 14, com o intuito de mostrar que o diâmetro de espalhamento medido nas pastas não apresentou diminuição significativa com o decorrer do tempo. Esta constatação demonstra, conforme exposto por Aïtcin (2000), que o aditivo superplastificante e os aglomerantes utilizados são compatíveis. Além disso, verifica-se nesta imagem que a dosagem ótima ou ponto de saturação deste material ocorre com 1,8%, em razão do diâmetro de espalhamento não aumentar mais com o acréscimo no teor de aditivo.

Figura 14 - Resultados do ensaio do miniabatimento para pastas com relação  $a/agl=0,21$ , contendo 90% de cimento Portland e 10% de sílica ativa como aglomerantes e com diferentes teores de aditivo superplastificante.



Fonte: O autor (2019)

#### 4.2.4 Escória de alto-forno

A escória de alto-forno moída foi fornecida pela Cimento Mizu S/A. As características químicas e físicas deste material encontram-se, respectivamente, nas Tabela 14 e Tabela 15. Analisando os valores da Tabela 14, classifica-se a escória como básica, segundo Pacheco-Torgal et al. (2014), pois a relação  $(CaO + MgO)/SiO_2$  é igual a 1,28 ( $>1$ ).

Tabela 14 - Caracterização química da escória de alto-forno.

<b>Óxidos</b>	<b>Média (%)</b>
CaO	42,33
SiO <sub>2</sub>	38,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40
MgO	6,96
K <sub>2</sub> O	0,10
Na <sub>2</sub> O	0,10

Fonte: CIMENTO MIZU S/A (2018)

Tabela 15 - Caracterização física da escória de alto-forno.

<b>Ensaio</b>	<b>Média</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,89
Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	457,2
Índice de finura - # 200 (%)	0,07
Resíduo na peneira # 325 (%)	1,33

Fonte: CIMENTO MIZU S/A (2018)

#### 4.2.5 Silicato de sódio

O silicato de sódio foi fornecido pela Pernambuco Química S/A com um módulo de sílica (relação SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O, em massa) igual a 1,73. As especificações técnicas fornecidas pela empresa estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Especificações técnicas do silicato de sódio

<b>Determinação:</b>	<b>Resultado</b>
Estado físico (25°C)	Líquido
Na <sub>2</sub> O (%)	16,50
SiO <sub>2</sub> (%)	28,50
Sólidos totais (%)	45,00
Relação Si <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1,73

Fonte: PERNAMBUCO QUÍMICA S/A (2018)

#### 4.2.6 Agregados

O agregado graúdo foi uma brita 0 de origem granítica, que foi lavada para retirar a excessiva quantidade de material pulverulento que continha e, posteriormente, este material foi seco em estufa (105°C por 24 horas). Em seguida, a brita foi armazenada em sacos até a sua utilização.

O agregado miúdo foi uma areia quartzosa, que foi lavada e seca em estufa (105°C por 24 horas). Após isso, a mesma foi armazenada em sacos plásticos vedados até a sua utilização.

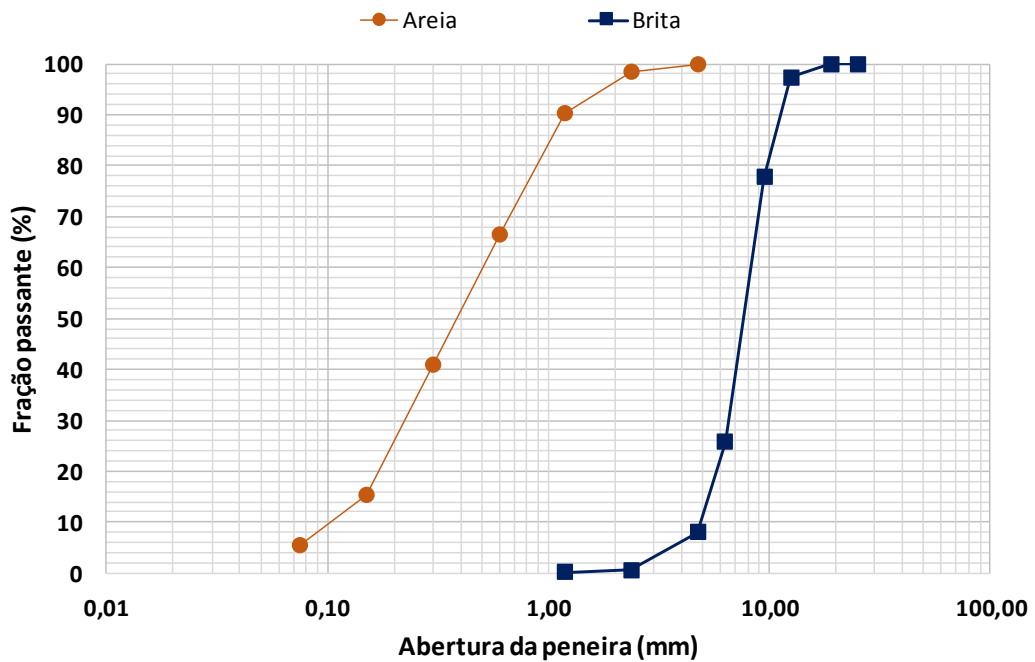
As características físicas e a distribuição granulométrica dos agregados estão expostas, respectivamente, na Tabela 17 e na Figura 15.

Tabela 17 - Caracterização física do agregado graúdo e do agregado miúdo.

Ensaio	Brita	Areia
Massa específica (ABNT NBR NM 53:2009 e ABNT NBR NM 52:2009)	2,69 g/cm <sup>3</sup>	2,65 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água (ABNT NBR NM 53:2009 e ABNT NBR NM 30:2001)	0,47 %	0,46 %
Módulo de finura (ABNT NBR NM 248:2003)	6,13	1,89
Dimensão máxima característica (ABNT NBR NM 248:2003)	12,5 mm	2,4 mm

Fonte: O autor (2019)

Figura 15 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo e do agregado miúdo (ABNT NBR NM 248:2003).



Fonte: O autor (2019)

#### 4.2.7 Água

A água utilizada para a confecção dos concretos e argamassas foi a do abastecimento local do município de Recife - PE. O fornecimento desta água é realizado pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

### 4.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Neste item, foram descritos os procedimentos para a produção dos corpos de prova e foram expostos os procedimentos para a realização dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido de concretos e argamassas.

#### 4.3.1 Procedimento de produção dos corpos de prova

A seguir foram relatados os procedimentos para o preparo, moldagem, cura e preparação das bases nos corpos de prova das argamassas e dos concretos.

##### 4.3.1.1 Preparo das argamassas

Foram preparadas duas argamassas em laboratório com a proporção em massa igual a 1:1,6:0,28 (ligantes: areia: água) e utilizando 1% de aditivo superplastificante em relação a massa dos aglomerantes. Uma das argamassas tinha como ligantes escória e silicato de sódio e a outra diferenciava-se da primeira por apresentar uma substituição de 10 % de sílica ativa sobre a massa destes. A proporção dos ligantes utilizada para a produção da argamassa contendo somente escória e ativador foi 87,85% de escória e 12,15% da parte sólida do silicato de sódio<sup>3</sup>. A quantidade de água de composição do ativador foi considerada como parte da água total de mistura.

As argamassas foram preparadas com auxílio de um misturador mecânico, colocando inicialmente na cuba toda a quantidade de água, superplastificante e escória ou escória e sílica ativa. A mistura destes materiais foi feita com o misturador na velocidade baixa, durante 30 s. Após este tempo, e sem paralisar a operação de mistura, iniciou-se a colocação gradual da areia durante o tempo de 30 s. Imediatamente após o término da colocação da areia, adicionou-se o silicato de sódio e misturou-se os materiais nesta velocidade durante 120 s.

##### 4.3.1.2 Preparo dos concretos

Utilizaram-se diferentes procedimentos para a produção do CAR e do CEEA, devido ao fato de o segundo apresentar uma rápida perda de trabalhabilidade.

---

<sup>3</sup> Esses valores baseiam-se nos resultados obtidos por MELO NETO (2002), nos quais esta proporção entre escória e silicato de sódio mostrou-se como a ativação que apresentou melhor desempenho mecânico. É importante citar que este autor utilizou silicato de sódio com módulo de sílica (MS) igual a 1,7, ou seja, utilizou silicato de sódio com MS equivalente ao utilizado nesta pesquisa.

#### 4.3.1.2.1 Preparo do CAR

Utilizou-se o método IPT/EPUSP modificado para a confecção do concreto de alta resistência. Para a obtenção das proporções das misturas no CAR, estabeleceram-se algumas especificações, as quais foram:

- Proporção 1:m dos traços rico, médio e pobre, respectivamente: 1:2,5, 1:3,5 e 1:4,5;
- Relação água/materiais secos (H) igual a 6%, tendo como base os estudos de Cremonini et al. (2001) e Freitas Júnior (2005);
- Teor de argamassa ( $\alpha$ ) igual a 52%, o qual foi encontrado experimentalmente tendo como exemplo as observações apresentadas por Helene e Terzian (1992);
- Utilização de 10% de sílica ativa como substituição de parte da massa de cimento<sup>4</sup>.

Com base nessas informações, as proporções utilizadas para a confecção do CAR foram determinadas, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Consumo dos materiais para a produção de 30 CP's de CAR.

Traço	Cimento (kg)	Sílica Ativa (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo superplastificante (kg)
Rico	34,40	3,82	31,34	64,22	7,67	0,688
Médio	26,63	2,96	39,64	63,91	7,77	0,347
Pobre	21,72	2,41	44,89	63,71	7,84	0,272

Fonte: O autor (2019)

Devido ao fato de serem utilizadas relações água/ligantes muito baixas, fez-se necessário utilizar um processo de mistura um pouco diferente do convencional. O procedimento de mistura aplicado consistiu em realizar a homogeneização da pasta com o auxílio de um misturador mecânico, adicioná-la a betoneira já imprimada e contendo toda a brita e, por fim, adicionar a areia à mistura. Caso fosse necessário, mais aditivo superplastificante era adicionado a mistura até atingir a trabalhabilidade requerida. O abatimento foi fixado com base no resultado obtido para o traço rico, que era o traço mais crítico quanto à trabalhabilidade. Este traço foi o único que já tinha a quantidade de superplastificante preestabelecida, a qual foi fixada em seu ponto de saturação.

O procedimento detalhado está descrito a seguir:

<sup>4</sup> Este teor foi fixado considerando a sugestão de Aïtcin (2000) sobre a dosagem de sílica ativa, a qual o autor recomenda ser entre 8% e 10% em relação à massa de cimento. Estudos, como os de Duval e Kadri (1998) e Khodabakhshian et al. (2018), demonstraram que a substituição de 10% de sílica ativa sobre a massa de cimento conduz as melhores resistências à compressão.

- Primeiramente, realizou-se a imprimação da betoneira, conforme recomendam Helene e Terzian (1992);
- Em seguida, os componentes da pasta foram divididos em duas frações iguais, que eram homogeneizadas separadamente com o auxílio de um misturador mecânico de 20 litros, visto que não era possível realizar a mistura do volume integral da pasta. Quanto a sequência de colocação dos materiais na cuba, acrescentava-se primeiramente cerca de 90% da água e toda a quantidade de ligante, deixava-se misturar por aproximadamente 1 min em velocidade baixa, logo após, adicionava-se gradualmente o restante da água misturada com o superplastificante. O tempo total de mistura de cada fração da pasta era de aproximadamente 8 min. No caso dos traços médio e pobre, partiu-se de um teor de aditivo igual a 1% em relação a massa dos ligantes, enquanto que o traço rico contava com um teor prefixado de 1,8%.
- Após concluir a mistura da pasta, iniciava-se o processo de mistura na betoneira. Inicialmente, colocava-se toda a brita e por cima desta toda a pasta, imediatamente ligava-se a betoneira e mistura-se por cerca de 4 minutos. Após este tempo, e sem paralisar a operação de mistura, colocava-se a areia aos poucos e deixava-se misturar por aproximadamente 7 minutos.
- Terminada a mistura era feito o ensaio de abatimento do tronco de cone para verificar se o concreto havia atendido a trabalhabilidade requerida. Caso contrário, acrescentava-se mais aditivo à mistura e ligava-se a betoneira por mais 3 minutos. Concluído este tempo, verificava-se novamente o abatimento até que este atendesse ao valor especificado.

#### *4.3.1.2.2 Preparo do CEAA*

A proposta inicial era manter as mesmas proporções em massa para os traços do CEAA e do CAR, porém os dados obtidos no estudo exploratório mostraram que seria mais apropriado não utilizar a substituição de sílica ativa e alterar o H para 8% para a confecção do CEAA. Objetivando não efetuar alterações nos demais parâmetros empregados para determinar as proporções dos traços, as relações 1:m, os teores de aditivo superplastificante e o teor de argamassa utilizados para a produção CEAA foram os mesmos que os utilizados para o CAR. Além disso, cabe ressaltar que o consumo de aglomerante utilizado para a produção do concreto, assim como ocorreu para as argamassas, corresponde a 87,85% de escória e 12,15% da parte sólida do silicato de sódio e que a quantidade de água de composição do ativador foi considerada como parte da água total de mistura.



Com base nessas informações, determinaram-se as proporções que foram utilizadas para a confecção do CEAA, as quais encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Consumo dos materiais para a produção de uma batelada (4 CP's) de CEAA.

<b>Traço</b>	<b>Escória (kg)</b>	<b>Silicato de sódio (kg)</b>	<b>Areia (kg)</b>	<b>Brita (kg)</b>	<b>Água (kg)</b>	<b>Aditivo superplastificante (kg)</b>
Rico	4,178	1,284	3,900	7,990	0,581	0,086
Médio	3,236	0,995	4,936	7,957	0,757	0,043
Pobre	2,638	0,811	5,586	7,929	0,858	0,034

Fonte: O autor (2019)

Para o preparo do CEAA utilizou-se um procedimento distinto do descrito anteriormente, pois, como já foi citado, o concreto de escória álcali-ativa apresenta uma perda de trabalhabilidade muito rápida. Com isso, decidiu-se realizar a moldagem deste concreto em 8 bateladas, sendo que cada batelada continha volume suficiente para preencher 4 corpos de prova 10 cm x 20 cm. Utilizou-se o misturador mecânico, com capacidade de 20 litros, para a realização da mistura.

O procedimento detalhado está descrito a seguir:

- Primeiramente, colocava-se no interior da cuba do misturador, respectivamente, a brita, a areia e a escória.
- Em seguida, ligava-se o misturador em velocidade baixa e acrescenta-se toda a água gradualmente durante 1 minuto.
- Terminado este período, sem paralisar a operação de mistura, colocava-se o silicato de sódio aos poucos durante 30 s e, logo depois, deixava-se misturar por mais 1 minuto.

Cabe destacar que a trabalhabilidade do concreto, neste caso, não foi fixada. Uma vez que se optou por não alterar o teor de aditivo, o qual foi predeterminado conforme evidenciado acima.

#### 4.3.1.3 Moldagem dos corpos de prova

Antes de iniciar o enchimento dos corpos de prova, tanto de concreto como de argamassa, verificou-se o fechamento de todos os moldes e, em seguida, uma fina camada de desmoldante foi aplicada na superfície interna dos mesmos.

A moldagem dos corpos de prova de argamassa foi feita imediatamente após o término da mistura da mesma. O enchimento dos moldes ocorreu em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformemente distribuídos com soquete e, para terminar a moldagem, efetuou-se a rasadura do topo dos corpos de prova. Em seguida, os corpos de prova foram cobertos com plástico filme, que continham a identificação

da argamassa, e foram presos com uma liga, para evitar a perda de água para o meio ambiente no período de cura inicial ao ar.

Os corpos de prova de concreto foram moldados em conformidade com as recomendações descritas na BS EN 12390-2:2009. As amostras foram adensadas em duas camadas de alturas aproximadamente iguais com auxílio de um vibrador mecânico. Ao vibrar cada camada, o elemento vibrante foi introduzido apenas uma vez, no centro do corpo de prova, por um período de 13 segundos. Este tempo foi fixado com o intuito de padronizar o processo de adensamento do concreto e o mesmo mostrou-se adequado, uma vez que após esse tempo não ocorria mais o aparecimento de grandes bolhas de ar na superfície do concreto e, além disso, a superfície tornava-se relativamente lisa sem sinais de exsudação. Imediatamente após o adensamento, a rasadura da superfície dos corpos de prova foi realizada com o auxílio de uma colher de pedreiro. Em seguida, os corpos de prova foram cobertos com plástico filme, que continham a identificação do concreto, e presos com uma liga, para evitar a perda de água para o meio ambiente no período de cura inicial ao ar, conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16 - Corpos de prova moldados e identificados.



Fonte: O autor (2019)

#### 4.3.1.4 Cura dos corpos de prova

Os corpos de prova tanto de concreto como de argamassa foram submetidos a um período de cura inicial ao ar e a um período final em água.

A cura inicial ocorreu logo após a moldagem. Nela os moldes foram colocados sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que pudesse perturbar o material dentro das formas. Durante as primeiras 24 h, os corpos de prova ficaram cobertos

com material não reativo e não absorvente, conforme ilustra a Figura 16, com a finalidade de evitar perda de água do concreto.

Terminado o período de cura inicial, os corpos de prova foram retirados das formas, identificados e, exceto aqueles que precisaram ser rompidos com 24 h de idade, imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio a  $(25 \pm 2)$  °C até o momento do ensaio.

#### 4.3.1.5 Preparação das bases dos corpos de prova

Antes de ensaiar as amostras, é imprescindível preparar suas bases, de modo que se tornem superfícies planas e perpendiculares ao eixo longitudinal do corpo de prova. No caso das argamassas, utilizou-se um par de pratos de aço com discos de neoprene para corpos de prova 5x10 cm. Nos corpos de prova de concreto, o preparo das bases foi feito por retificação, conforme recomenda a BS EN 12390-3:2009 para amostras com resistências elevadas. A Figura 17 ilustra as superfícies dos corpos de prova de concreto logo após a retificação.

Figura 17 - Retificação das bases dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2019)

#### 4.3.2 Métodos de determinação das propriedades do concreto no estado fresco

A seguir foram descritos os procedimentos para a determinação da massa específica, teor de ar e abatimento do tronco de cone dos concretos.

#### 4.3.2.1 Massa específica e teor de ar

Utilizou-se o método gravimétrico para determinar a massa específica e o teor de ar do concreto no estado fresco. Primeiramente, antes de realizar a moldagem, quatro formas foram pesadas e identificadas. Ao terminar a moldagem, sem demora, as superfícies externas das mesmas foram limpas e as formas, agora preenchidas, pesadas novamente. Ao subtrair o peso da forma vazia do peso da forma com concreto obtém-se a massa do concreto. Para determinação da massa específica fez-se a média das massas de concreto e dividiu-a pelo volume do corpo de prova 10 cm x 20 cm. O cálculo do teor de ar foi feito conforme o procedimento de cálculo da ABNT NBR 9833:2008.

#### 4.3.2.2 Abatimento do tronco de cone

A determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone ocorreu em conformidade com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR NM 67:1998, o qual consiste, basicamente, no preenchimento de um tronco de cone em três camadas de igual altura, sendo em cada camada aplicados 25 golpes com uma haste, imediatamente após a retirada do molde, mediu-se o abatimento do concreto, como pode ser visto na Figura 18, que foi determinado pela diferença entre a altura do molde e a altura do concreto assentado.

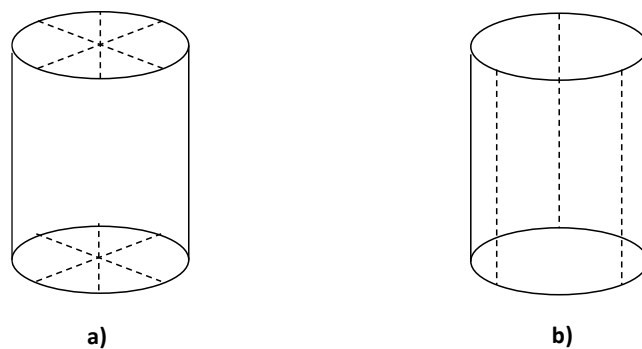
Figura 18 - Medição do abatimento do concreto.



### 4.3.3 Métodos de determinação das propriedades do concreto e da argamassa no estado endurecido

Antes de realizar os ensaios do concreto no estado endurecido, as dimensões dos corpos de prova foram medidas em diferentes posições em conformidade com o método descrito pela BS EN 12390-3:2009. Três medidas de diâmetro, com uma precisão de  $\pm 0,5$  mm, foram feitas em cada uma das bases dos cilindros, em posições de aproximadamente  $60^\circ$  entre si, como pode ser visto na Figura 19. Com isso, o diâmetro médio,  $d_m$ , das bases do cilindro foi calculado a partir das seis medições obtidas anteriormente. A altura do cilindro foi medida, com uma precisão de  $\pm 0,5$  mm, em três posições de aproximadamente  $120^\circ$  entre si, conforme ilustra a Figura 19. A área média da face de carregamento do corpo de prova cilíndrico foi calculada utilizando o diâmetro médio.

Figura 19 - Linhas pontilhadas mostrando as posições de medição a) dos diâmetros e b) das alturas do cilindro.



Fonte: BS EN 12390-3:2009

#### 4.3.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi executado em uma máquina universal para ensaios mecânicos, da marca INSTRON, modelo 5598, eletromecânica, microprocessada e com célula de carga com capacidade de 3000 KN (ou 300000 kgf). Os corpos de prova foram rompidos à compressão nas idades preestabelecidas, obedecendo as tolerâncias de tempo descritas na Tabela 20. Antes de iniciar o carregamento, realizava-se a limpeza das superfícies que os corpos de prova tinham contato e tomava-se o cuidado em centralizá-los bem, com o intuito de evitar alguma excentricidade considerável, como pode ser visto na Figura 20. A aplicação de carga nos corpos de prova de concreto foi realizada de forma contínua, com velocidade de carregamento de 0,6 MPa/s. Nos corpos de prova de argamassa a taxa de carregamento utilizada foi de 0,25 MPa/s.

Tabela 20 - Tolerância para a idade de ensaio.

Idade de ensaio	Tolerância permitida - argamassa (horas)	Tolerância permitida - concreto (horas)
24 horas	0,5	0,5
3 dias	1	2
7 dias	2	6
28 dias	4	24

Fonte: ABNT NBR 7215:1996 e ABNT NBR 5739:2018

Figura 20 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: O autor (2019)

#### 4.3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral ocorreu conforme o método descrito pela ABNT NBR 7222:2011. Inicialmente, duas tiras de chapa dura de madeira foram posicionadas em geratrizes diametralmente opostas do corpo de prova, em seguida, passou-se fita adesiva em torno do mesmo para que as tiras de madeira continuassem na mesma posição. Logo depois, utilizou-se um dispositivo feito de aço para auxiliar o posicionamento do corpo de prova entre os pratos da máquina de ensaio. A carga foi aplicada continuamente e sem choques a uma velocidade de carregamento de 0,05 MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência a tração por compressão diametral foi calculada conforme a Equação 8, a qual é exposta nesta norma.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (8)$$

onde,

$f_{ct,sp}$  – resistência à tração por compressão diametral (MPa);

$F$  – força máxima obtida no ensaio (N);

$d$  – diâmetro do corpo de prova (mm);

$l$  – comprimento do corpo de prova.

#### 4.3.3.3 Módulo de elasticidade estático

A determinação do módulo de elasticidade estático ocorreu de acordo com o procedimento exposto na ABNT NBR 8522:2017. Primeiramente, realizou-se o ensaio de resistência à compressão, conforme especificado no item 4.4.3.1, em 6 corpos de prova aos 28 dias, para indicar a tensão de ruptura ( $f_c$ ). Em seguida, foram ensaiados três corpos de prova para a determinação do módulo de elasticidade seguindo a Metodologia A, a qual fixa as tensões correspondentes ao limite inferior ( $\sigma_a = 0,5$  MPa) e superior ( $\sigma_b = 30\%$  de  $f_c$ ) e submete o corpo de prova a ciclos de carregamento e descarregamento para obter, no último ciclo, as deformações específicas  $\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_b$  relativas as tensões  $\sigma_a$  e  $\sigma_b$ , respectivamente. Para medir as deformações foram utilizados extensômetros eletrônicos, os quais foram fixados na superfície externa do corpo de prova. O módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) do concreto foi calculado através da Equação 9.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (9)$$

onde,

$E_{ci}$  – módulo de elasticidade (GPa);

$\sigma_b$  – tensão maior (MPa), considerada como 30% da resistência à compressão;

0,5 – tensão básica (MPa);

$\varepsilon_b$  – deformação específica do concreto sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  – deformação específica do concreto sob a tensão básica.

#### 4.3.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico

Para calcular o módulo de elasticidade dinâmico, teve-se que realizar, primeiramente, o ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos corpos de prova de concreto, que foi realizada em conformidade com o procedimento da ABNT NBR 8802:2013. O equipamento utilizado para a medição da velocidade foi o Pundit Lab, que foi configurado

com frequência de transmissão igual a 54 kHz. O ensaio foi realizado com os corpos de prova de concreto na condição saturada, em uma sala climatizada ( $24 \pm 2$  °C), com os transdutores posicionados nas faces opostas do corpo de prova, no arranjo de transmissão direta, conforme ilustra a Figura 21. O acoplamento adequado dos transdutores foi verificado pela visualização da forma da onda recebida através do programa Punditlink. A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas foi calculada a partir da divisão do comprimento do corpo de prova pelo tempo decorrido desde a emissão da onda até sua recepção. Vale ressaltar que imediatamente antes de realizar este ensaio, os corpos de prova foram pesados e suas dimensões foram medidas, com a finalidade de calcular a massa específica deles, posto que as medições de densidade devem idealmente ser feitas ao longo da mesma linha de visão que as medições de velocidade de pulso.

Figura 21 - Execução do ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.



Fonte: O autor (2019)

Tendo posse dos resultados do ensaio descrito no parágrafo anterior, pode-se realizar o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico através da Equação 10<sup>5</sup>:

$$E_d = \rho \times V^2 \times \frac{(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (10)$$

onde,

$E_d$  – módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

$\rho$  – densidade do concreto (kg/m<sup>3</sup>);

$V$  – velocidade de propagação de onda ultrassônica (km/s);

$\nu$  – coeficiente de Poisson;

---

<sup>5</sup> Esta expressão foi publicada na ABNT NBR 15630:2008, BS EN 12504-4:2004, ASTM C597:2016.



Das variáveis que compõem a Equação 10, o coeficiente de Poisson é o único que foi estimado. Os dados sobre o coeficiente de Poisson do concreto são muito limitados, especialmente para o CAR e o CEAA. Segundo Ding, Dai e Shi (2016) e Thomas e Peethamparan (2015) o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) em concretos comuns feitos com cimento Portland tem um valor médio de 0,18. Persson (1999) encontrou este coeficiente em torno de 0,16 para o CAR utilizando granito como agregado graúdo. Vale ressaltar que a mistura utilizada pelo último autor tinha consumo de cimento de 490 kg/m<sup>3</sup>, a/c=0,30, teor de ar igual a 1% e resistência à compressão de 122 MPa aos 28 dias. Estas informações são similares às correspondentes ao traço médio feito para o CAR nesta dissertação. Com isso, o valor adotado para o coeficiente de Poisson do CAR nesta pesquisa foi de 0,16. Ainda segundo Ding, Dai e Shi (2016) nenhuma conclusão consistente pode ser feita sobre o coeficiente de Poisson em concretos álcali-ativados, pois, embora vários estudos tenham-no determinado, os resultados mostram-se inconsistentes. Thomas e Peethamparan (2015) relataram que este coeficiente para concretos de escória álcali-ativada é de  $0,127 \pm 0,003$ . Criado, Aperador e Sobrados (2016) relataram que ele era igual a 0,22 para CEAA. Nesta pesquisa, utilizou-se um coeficiente de Poisson de 0,13 para o CEAA, seguindo o valor apresentado por Thomas e Peethamparan (2015). Isto porque estes autores também determinaram o coeficiente de Poisson em concretos feitos com cimento Portland e os valores apresentados estavam dentro da normalidade, enquanto que Criado, Aperador e Sobrados (2016) não o determinaram para concretos convencionais, ou seja, um maior grau de confiabilidade foi dado ao trabalho que realizou a determinação de  $\nu$  em um concreto de referência.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, foi feita a apresentação dos resultados do concreto de alta resistência (CAR), do estudo exploratório e do concreto de escória álcali-ativada (CEAA), assim como as discussões acerca deles.

### 5.1 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)

A seguir foram apresentados os resultados do concreto de alta resistência no estado fresco e no estado endurecido e foram feitas argumentações sobre os mesmos.

#### 5.1.1 Características do concreto no estado fresco

Na Tabela 21, encontram-se os resultados obtidos para o abatimento do tronco de cone, massa específica do concreto, teor de ar e as proporções dos materiais para confeccionar 1 m<sup>3</sup> de cada traço.

Tabela 21 - Características dos traços no estado fresco e consumo real dos materiais empregados para a produção de 1 m<sup>3</sup> do CAR.

Componentes	Traço rico	Traço médio	Traço pobre
Aglomerantes (kg/m <sup>3</sup> )	669,42	520,12	421,59
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	602,48	468,11	379,43
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )	66,94	52,01	42,16
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	548,92	696,78	784,30
Brita (kg/m <sup>3</sup> )	1124,81	1123,39	1113,12
Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	12,05	6,11	4,74
Água (kg/m <sup>3</sup> )	134,34	136,58	136,98
Ar aprisionado (%)	0,68	0,43	0,87
a/agl (kg/kg)	0,21	0,27	0,33
m (kg/kg)	2,50	3,50	4,50
H (%)	6,0	6,0	6,0
Teor de aditivo (%)	1,80	1,17	1,13
Abatimento (mm)	250	230	210
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2489,53	2482,98	2460,73

Fonte: O autor (2019)

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 21, nota-se que todos os traços produzidos resultaram em concretos com abatimento superior a 200 mm. Isso ocorreu graças à utilização de altos teores de aditivo superplastificante. Percebe-se também que ocorre uma leve diminuição na massa específica do concreto quando há um menor consumo de aglomerante nos traços, pois, como pode ser observado, ao diminuir o consumo de aglomerante o consumo de

areia aumenta e como a areia tem massa específica inferior à massa específica resultante dos aglomerantes essa dedução torna-se evidente.

### 5.1.2 Resistência à compressão

Os resultados individuais ( $f_{ci}$ ) obtidos para todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão, bem como a resistência média ( $f_{cm}$ ), o desvio padrão amostral ( $s$ ) e o coeficiente de variação (CV) correspondentes a cada traço e idade estão expostos na Tabela 22.

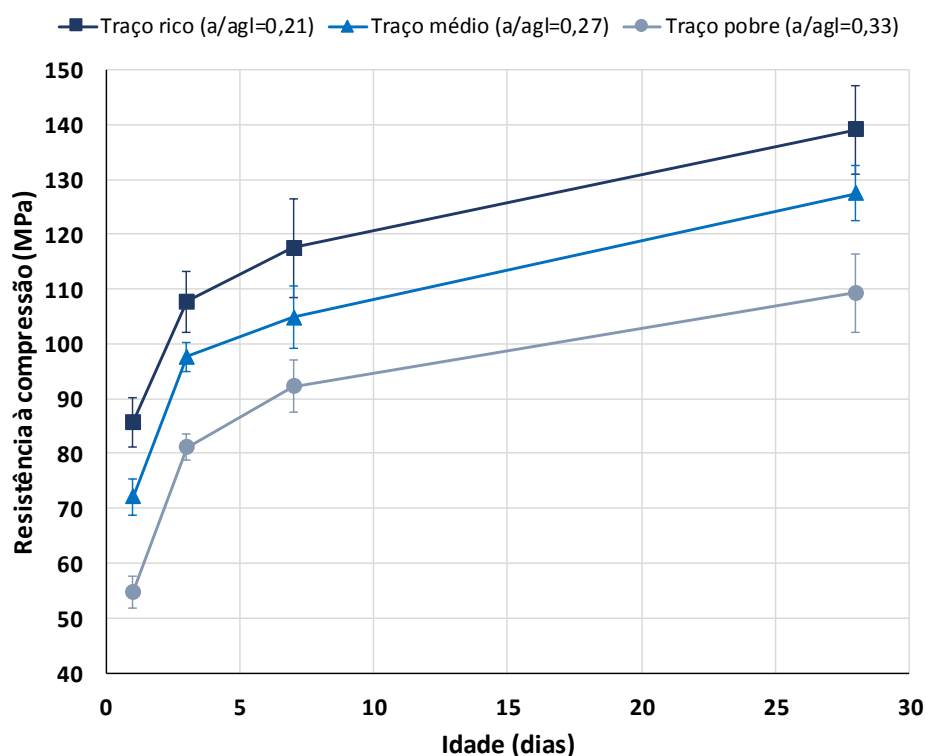
Tabela 22 - Resistência à compressão dos traços do CAR.

Idade (dias)	Traço rico				Traço médio				Traço pobre			
	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)
1	84,03				70,16				54,08			
	82,76				75,19				51,87			
	85,93	85,71	2,70	3,15	73,82	72,06	2,02	2,80	55,49	54,71	1,73	3,17
	84,45				71,76				54,43			
	86,65				70,44				57,05			
	90,44				70,99				55,35			
	104,89				97,57				83,02			
104,24				96,50				80,33				
3	105,70	107,70	3,39	3,14	99,78	97,59	1,66	1,71	79,79	81,17	1,42	1,75
	111,13				95,00				79,66			
	112,35				98,19				82,04			
	107,92				98,48				82,16			
	81,04 <sup>i</sup>				105,13				93,58			
	121,48				106,24				92,97			
7	123,85	117,51	5,47	4,66	107,81	104,84	3,40	3,25	86,69	92,22	2,89	3,13
	110,00				99,69				95,09			
	117,41				108,29				92,87			
	114,80				101,90				92,11			
	134,27				129,14				101,37			
28	136,95				122,06				112,86			
	146,18	139,06	4,89	3,52	128,42	127,48	3,05	2,39	111,06	109,31	4,33	3,96
	142,62				131,03				107,50			
	133,86				127,58				112,48			
	140,47				126,62				110,58			

<sup>i</sup> Este valor não foi considerado nos cálculos da média, desvio padrão, coeficiente de variação e também não foi utilizado para a construção do diagrama IPT/EPUSP.

A evolução da resistência à compressão do concreto de alta resistência ao longo do tempo está apresentada na Figura 22, na qual estão identificados os valores médios (símbolos) com a representação gráfica da dispersão dos resultados (barras verticais). A dispersão em torno da média foi calculada multiplicando-se o desvio padrão por 1,65, valor adotado para uma distribuição normal, que garante que, estatisticamente, 95% dos resultados obtidos terão resistência à compressão superior à resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ). Nos resultados obtidos, observa-se que a evolução da resistência à compressão do CAR em todos os traços ocorre de forma rápida, alcançando-se resistências acima de 50 MPa com 1 dia de idade. Quanto as resistências obtidas aos 28 dias, percebe-se que todas têm valor superior a 109 MPa. Estes valores são satisfatórios quando comparados aos resultados encontrados em pesquisas que utilizaram o método IPT/EPUSP modificado para a produção de CAR. Por exemplo, Cremonini et al. (2001) e Freitas Júnior (2005) utilizaram esta metodologia para a confecção de CAR e obtiveram como maior valor de resistência à compressão aos 28 dias, respectivamente, 98,83 MPa e 101,6 MPa. Vale ressaltar que nestes estudos o traço rico tinha um maior consumo de cimento e uma relação a/agl inferior quando comparados ao traço rico desta dissertação, que apresentou resistência à compressão igual 139,06 MPa.

Figura 22 - Evolução da resistência à compressão do CAR ao longo do tempo.



Fonte: O autor (2019)

No método IPT/EPUSP apresentado por Helene e Terzian (1992), utiliza-se a expressão matemática desenvolvida por Abrams para estabelecer a equação que relaciona a resistência à compressão com a relação  $a/agl$ . No entanto, realizou-se também, nesta pesquisa, uma análise de regressão em outros modelos matemáticos com o intuito de verificar qual regressão ocasiona um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mais próximo de 1. As equações analisadas foram as propostas por Abrams (1918), Bhanja e Sengupta (2005) e a equação polinomial de 2° grau. No Apêndice B estão expostos os modelos matemáticos que foram analisados, as equações teóricas, as equações resultantes e o  $R^2$  obtido em cada análise de regressão. Na Tabela 23, estão apresentados os valores obtidos para o  $R^2$ . Convém informar que foram utilizados os resultados individuais de resistência à compressão para o cálculo das constantes das equações e do  $R^2$ .

Tabela 23 - Valores de  $R^2$  das equações de Abrams, Bhanja e Sengupta e polinomial de 2° grau obtidos para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias.

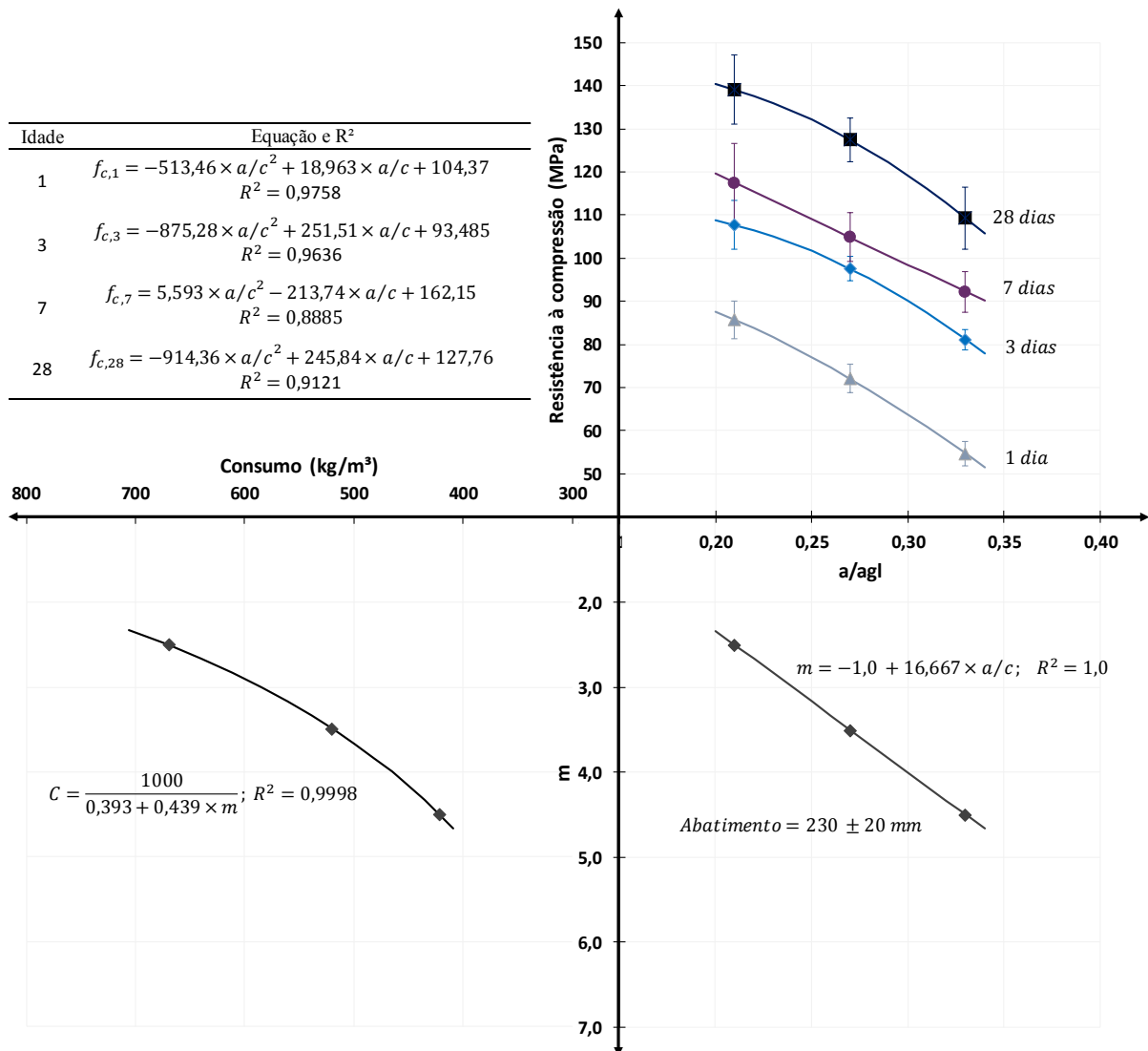
Equação	$R^2$			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Abrams	0,95796657	0,93337282	0,88741343	0,87835987
Polinomial (2° grau)	0,97580352	0,96363668	0,88854010	0,91214958
Bhanja e Sengupta	0,97580261	0,96363667	0,88854008	0,91214725

Fonte: O autor (2019)

Com base nos valores apresentados na Tabela 23 para os coeficientes de determinação, chegou-se à conclusão que a equação polinomial do 2° grau é a que melhor se ajusta aos resultados experimentais, devido ao fato de ela sempre gerar valores de  $R^2$  mais próximos de 1 que os demais métodos.

Com isso, o gráfico IPT/EPUSP para o CAR, nesta pesquisa, foi construído através da equação polinomial de 2° grau, equação de Lyse e equação de Molinari, conforme ilustrado na Figura 23. Observa-se nesta figura que a relação  $a/agl$  é inversamente proporcional a resistência à compressão do CAR, sendo visível que quanto menor for esta relação, maior será a resistência à compressão do concreto em uma determinada idade.

Figura 23 - Gráfico IPT/EPUSP para o CAR.



Fonte: O autor (2019)

### 5.1.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) aos 28 dias encontram-se na Tabela 24, na qual verifica-se que os valores médios foram praticamente iguais, em torno de 7,1 MPa. Um valor equivalente a esse, 7,20 MPa, foi obtido por Francisco et al. (2015), para um concreto confeccionado com relação  $a/c=0,20$ , que atingiu resistência à compressão de 130,7 MPa aos 28 dias.

É comum ver na literatura que ao diminuir a relação  $a/agl$  ocorre o aumento da resistência à tração por compressão diametral, mesmo em concretos com elevadas resistências, como pode ser visto nos estudos de Wu et al. (2001), Mendes (2002) e Francisco et al. (2015). Porém, esta tendência não foi verificada nesta pesquisa. Ressalta-se que isso pode ter ocorrido devido a uma

maior dispersão dos resultados obtidos neste ensaio, em razão da maior sensibilidade do método frente às possíveis falhas no preparo dos corpos de prova e no procedimento de ensaio, ou isso pode ter acontecido por causa da limitação da resistência do agregado graúdo, uma vez que o planos de ruptura propagaram-se através das partículas do agregado graúdo, como pode ser visto na Figura 24, a qual expõe a superfície de ruptura após a execução do ensaio de tração por compressão diametral.

Tabela 24 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias para os traços do CAR.

<b>Traço</b>	<b>f<sub>ct,sp</sub> (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>	<b>s (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
Rico	7,10	7,10	1,01	14,28%
	6,08			
	8,11			
Médio	7,57	7,17	0,78	10,94%
	7,68			
	6,27			
Pobre	7,55	7,13	0,58	8,18%
	6,47			
	7,38			

Fonte: O autor (2019)

Figura 24 - Ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: O autor (2019)

Verifica-se também que a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão ( $f_{ct,sp}/f_{cm}$ ) para os traços rico, médio e pobre correspondem a, respectivamente, 5,10%, 5,63% e 6,53%, ou seja, quanto maior o valor da resistência à compressão menor foi o valor da relação  $f_{ct,sp}/f_{cm}$ . Essa tendência também foi verificada por

Alves (2000). O ACI 363R:2010 informa que em concretos de resistência baixa, a resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) pode chegar a 10 % da resistência à compressão, enquanto que, nos concretos de alta resistência, essa relação pode se reduzir a 5%.

#### 5.1.4 Módulo de elasticidade estático

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) aos 28 dias encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 - Módulo de elasticidade estático aos 28 dias para os traços do CAR.

Traço	$E_c$ (GPa)	Média (MPa)	s (MPa)	CV (%)
Rico	45,90	45,33	0,51	1,13%
	45,20			
	44,90			
Médio	44,10	44,23	0,91	2,05%
	45,20			
	43,40			
Pobre	44,80	42,93	1,85	4,31%
	41,10			
	42,90			

Fonte: O autor (2019)

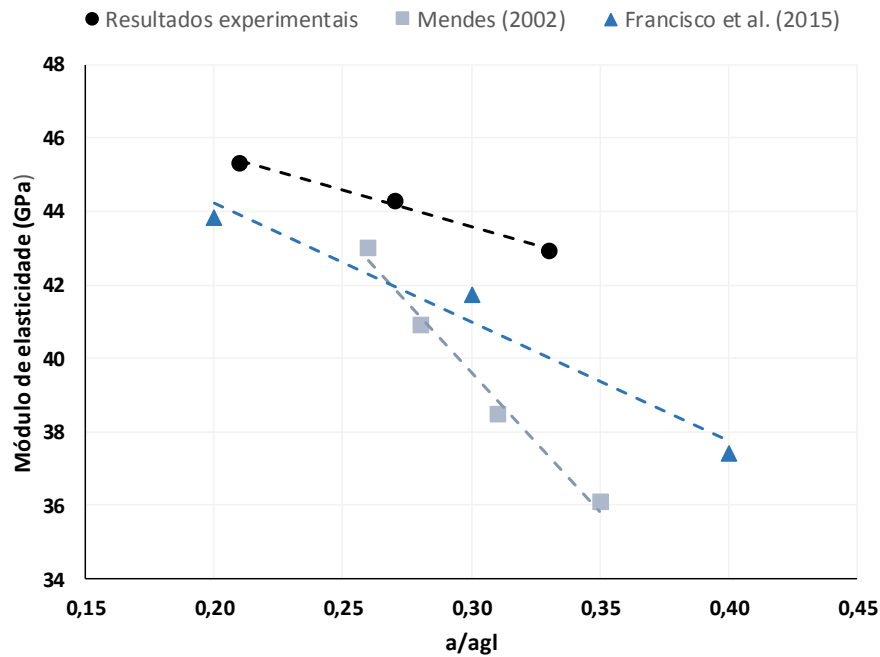
Para auxiliar na análise destes resultados, buscou-se selecionar resultados de estudos que utilizaram o granito como agregado graúdo para a produção do CAR, pois, como já é sabido, o módulo de elasticidade do CAR é fortemente influenciado pelas características mineralógicas dos diferentes tipos de agregados graúdos utilizados. À vista disso, foram selecionados os resultados dos estudos de Mendes (2002) e Francisco et al. (2015) para compará-los com os resultados experimentais, relacionando o módulo de elasticidade e a relação  $a/agl$ , conforme ilustra a Figura 25, e o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, como pode ser visto na Figura 26. Nesta última, foram ilustradas as curvas feitas a partir das expressões do *fib* Model Code 2010, ACI 318:2014 e ABNT NBR 6118:2014 com o intuito de verificar se elas têm alguma relação com os resultados experimentais.

Como pode ser visto na Figura 25, percebe-se que há um aumento no valor do módulo de elasticidade ao diminuir a relação  $a/agl$ . Nota-se também que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade nesta pesquisa apresentaram valores um pouco superiores quando comparados aos demais que foram expostos.



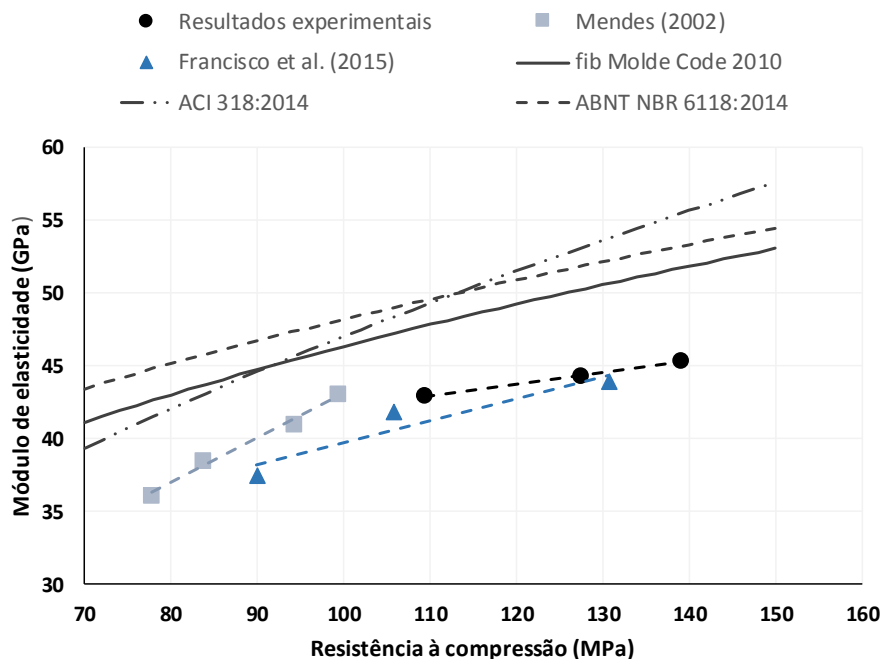
Ao analisar a Figura 26, verifica-se que os resultados obtidos a partir das expressões das normas citadas superestimam os valores do módulo de elasticidade encontrados para os concretos com elevada resistência. Ao observar todos os pontos expostos nesta figura, nota-se que ao atingir valores de resistência à compressão superiores a 100 MPa não há uma variação significativa no módulo de elasticidade, uma vez que o maior e o menor valor obtido para o módulo acima dessa resistência correspondem a, respectivamente, 41,75 GPa e 45,33 MPa.

Figura 25 - Relação entre o módulo de elasticidade estático aos 28 dias e a relação a/agl no CAR.



Fonte: O autor (2019)

Figura 26 - Relação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão do CAR aos 28 dias.



Fonte: O autor (2019)

### 5.1.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados obtidos para o ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica (V), massa específica dos corpos de prova na condição saturada ( $\rho_{\text{sat}}$ ) e os módulos de elasticidade dinâmicos ( $E_{c,d}$ ) encontram-se na Tabela 26. Estes são apresentados com os valores médios, seus respectivos desvios padrões (s) e coeficientes de variação (CV). Nesta tabela, observa-se que o CV da velocidade de propagação da onda ultrassônica, obtido de 10 corpos de prova em cada idade, foi geralmente menor que 1,0%. Isso mostra a pouca variabilidade do ensaio e também a homogeneidade dos corpos de prova de concreto produzidos. Nota-se também que os resultados obtidos para a velocidade de propagação da onda ultrassônica apresentaram valores acima de 4500 m/s. De acordo com a IS 13311-1:1992, o concreto que obtiver V superior a 4500 m/s é classificado com qualidade excelente.

Ao relacionar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ) com o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) dos traços rico, médio e pobre aos 28 dias, verifica-se que  $E_{c,d}$  é 29,4%, 31,5% e 32,7 % maior que  $E_c$ , respectivamente. Isto é, o módulo de elasticidade dinâmico do CAR é em média 31,2% maior que o módulo de elasticidade estático. Mehta e Monteiro (2014) relatam que, geralmente, o módulo de elasticidade dinâmico é 20%, 30% e 40% mais alto que o módulo de elasticidade estático para concreto de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

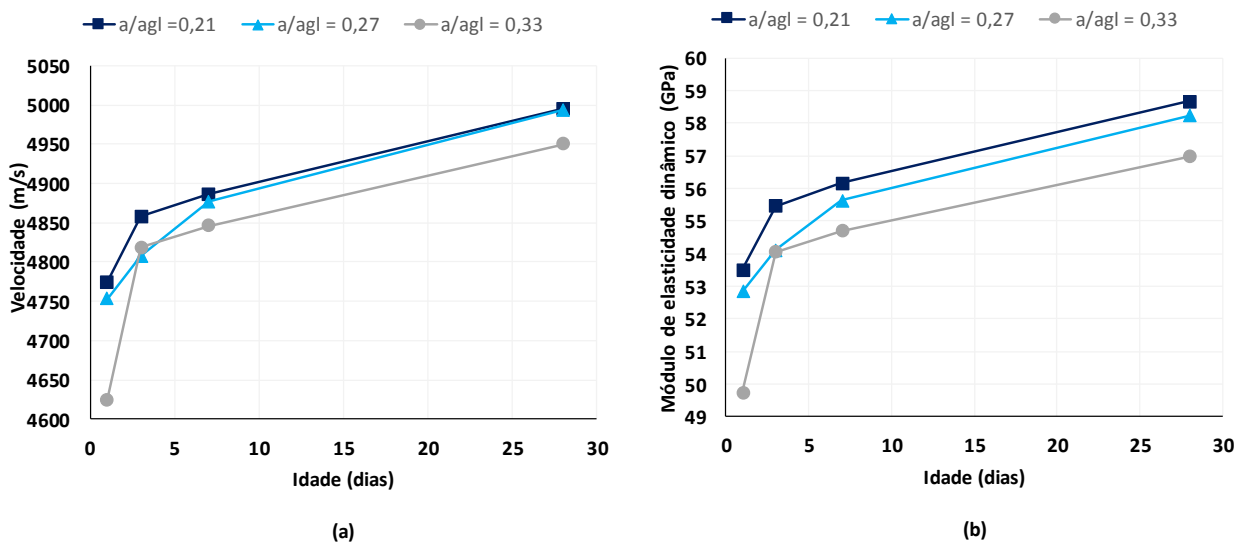
Tabela 26 - Resultados obtidos para o CAR no ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica, massa específica dos corpos de prova na condição saturada e módulos de elasticidade dinâmicos.

Traço	Idade (dias)	Velocidade (m/s)	s (m/s)	CV (%)	$\rho_{\text{sat}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	s (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	$E_{c,d}$ (GPa)	s (Gpa)	CV (%)
Rico (a/agl = 0,21)	1	4774,2	22,7	0,48	2499,6	18,4	0,74	53,50	0,60	1,12
	3	4858,0	47,1	0,97	2504,6	18,2	0,73	55,47	1,03	1,86
	7	4886,5	43,1	0,88	2502,8	17,6	0,70	56,16	1,05	1,88
	28	4995,1	33,1	0,66	2503,6	16,3	0,65	58,66	1,05	1,78
Médio (a/agl = 0,27)	1	4753,0	47,2	0,99	2491,1	9,4	0,38	52,85	0,97	1,84
	3	4807,2	50,2	1,04	2493,6	9,3	0,37	54,12	0,97	1,79
	7	4876,4	27,4	0,56	2491,5	9,0	0,36	55,63	0,64	1,15
	28	4993,1	29,5	0,59	2487,1	8,7	0,35	58,23	0,75	1,29
Pobre (a/agl = 0,33)	1	4624,4	42,6	0,92	2477,0	11,6	0,47	49,74	0,74	1,49
	3	4818,2	34,9	0,72	2479,7	11,8	0,48	54,06	0,90	1,67
	7	4846,2	27,4	0,57	2479,9	12,9	0,52	54,69	0,59	1,08
	28	4949,6	24,4	0,49	2476,6	11,3	0,46	56,98	0,61	1,07

Fonte: O autor (2019)

Os resultados expostos na Tabela 26 foram apresentados graficamente na Figura 27 com o propósito de mostrar a evolução da velocidade de propagação da onda ultrassônica e do módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo. Como esperado, a  $V$  e o  $E_{c,d}$  aumentam com o tempo de cura, conforme relatam Bogas, M. Gomes e A. Gomes (2013) e S. Rao, Sravana e T. Rao (2016). De fato, quanto maior a hidratação da pasta, menor o volume dos macroporos e maior a  $V$ . Verifica-se ainda nesta imagem que ocorre um crescimento da velocidade e do módulo dinâmico mais acentuado no período de 1 a 3 dias, assim como ocorreu nos resultados obtidos para a resistência à compressão. Observa-se também que o concreto de menor relação  $a/agl$  apresenta os maiores valores de  $V$  e  $E_{c,d}$  em relação aos demais, em todas as idades.

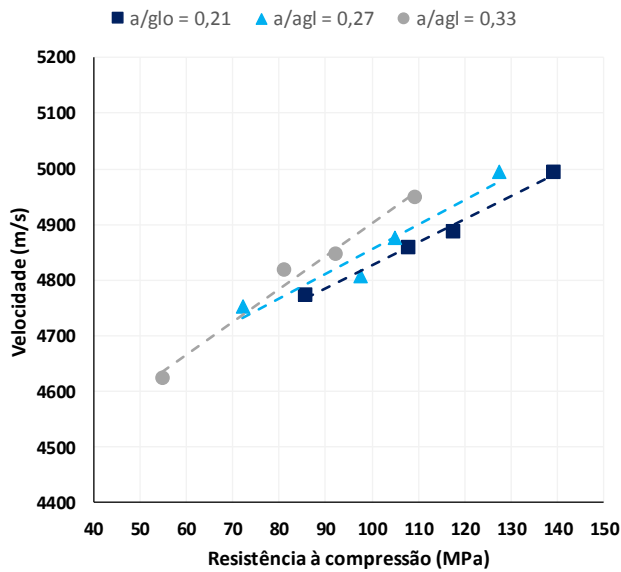
Figura 27 – Evolução, ao longo do tempo, (a) da velocidade de propagação da onda ultrassônica e (b) do módulo de elasticidade dinâmico do CAR.



Fonte: O autor (2019)

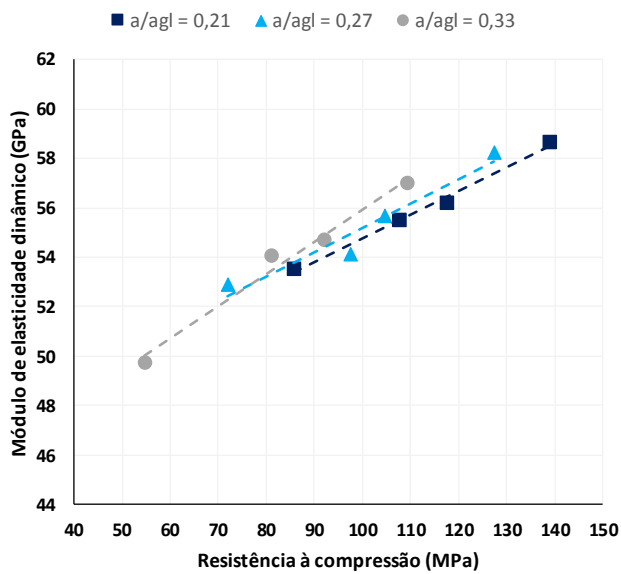
A Figura 28 ilustra o gráfico que relaciona os valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica e da resistência à compressão. Ao lado desta imagem, na Tabela 27, verifica-se que correlações satisfatórias são obtidas quando cada composição de concreto é avaliada individualmente, uma vez que foram obtidos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,90 para as equações estabelecidas. Além disso, nota-se que a resistência à compressão do concreto tende a aumentar mais rapidamente que a velocidade. Essas observações também foram relatadas por S. Rao, Sravana e T. Rao (2016). Consequentemente, ao relacionar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico de cada traço de concreto individualmente, como pode ser visto na Figura 29 e Tabela 28, também observam-se  $R^2$  satisfatórios para as equações determinadas, visto que o  $E_{c,d}$  varia em função de  $V^2$ .

Figura 28 - Relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CAR.



Fonte: O autor (2019)

Figura 29 - Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CAR.



Fonte: O autor (2019)

Tabela 27 - Equações correlacionando a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CAR.

Traço	Equação e R <sup>2</sup>
Rico (a/agl = 0,21)	$V = 4,0983 \times f_{c,m} + 4417,4;$ $R^2 = 0,9901$
Médio (a/agl = 0,27)	$V = 4,3857 \times f_{c,m} + 4416,7;$ $R^2 = 0,9343$
Pobre (a/agl = 0,33)	$V = 5,8749 \times f_{c,m} + 4314;$ $R^2 = 0,9818$

Fonte: O autor (2019)

Tabela 28 - Equações correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CAR.

Traço	Equação e R <sup>2</sup>
Rico (a/agl = 0,21)	$E_{c,d} = 0,0959 \times f_{c,m} + 45,163;$ $R^2 = 0,9817$
Médio (a/agl = 0,27)	$E_{c,d} = 0,0982 \times f_{c,m} + 45,337;$ $R^2 = 0,9392$
Pobre (a/agl = 0,33)	$E_{c,d} = 0,1308 \times f_{c,m} + 42,839;$ $R^2 = 0,9916$

Fonte: O autor (2019)

## 5.2 ESTUDO EXPLORATÓRIO

Conforme relatado anteriormente, o estudo exploratório foi feito com o intuito de decidir sobre a utilização de sílica ativa como substituição em relação a massa de aglomerante no CEEA e de estabelecer a relação água/materiais secos apropriada para a confecção do CEEA.

### 5.2.1 Resistência à compressão das argamassas

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa estão apresentados na Tabela 29. Com base nesses dados, pode-se concluir que a substituição de sílica ativa não causou um acréscimo relevante na resistência à compressão das argamassas feitas com escória ativada, uma vez que aos 28 dias os resultados obtidos mostraram-se praticamente iguais. Aos 7 dias a resistência à compressão da argamassa contendo somente escória ativada apresentou um resultado 12% superior ao da argamassa com sílica ativa, ou seja, até os 7 dias a substituição de sílica ativa resulta numa menor resistência à compressão.

Tabela 29 – Resistência à compressão em argamassas de escória ativada com e sem sílica ativa.

Idade (dias)	100% (escória + silicato)				90% (escória + silicato) + 10% de sílica			
	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)	fci (MPa)	fcm (MPa)	s (MPa)	CV (%)
	99,82				87,60			
7	97,78	98,97	1,06	1,07	88,62	88,28	0,59	0,67
	99,31				88,62			
	114,08				115,61			
28	115,61	115,95	2,06	1,78	116,63	116,46	0,78	0,67
	118,16				117,14			

Fonte: O autor (2019)

Com base no que foi apresentado, decidiu-se não utilizar a substituição de sílica ativa no CEAA, devido ao fato de ela gerar menores resistências à compressão nas primeiras idades do concreto e por ela apresentar um custo superior ao da escória granulada de alto forno.

### 5.2.2 Determinação da relação água/materiais secos

A determinação da relação água/materiais secos (H) do CEAA foi definida mediante análise visual da consistência do traço rico, em razão de este traço apresentar maior consumo de escória de alto-forno moída. Foram testadas as relações de 6,0%, 6,5%, 7,0%, 7,5% e, por fim, 8%. Ao atingir 8% verificou-se que já seria possível realizar a mistura e a moldagem dos corpos de prova de CEAA, visto que este concreto apresentava consistência satisfatória, conforme ilustra a Figura 30.

Figura 30 - Consistência do traço rico de CEAA com a) H = 6,0%, b) H=7,0%, c) H = 8,0%.



Fonte: O autor (2019)

### 5.3 CONCRETO DE ESCÓRIA ÁLCALI-ATIVADA (CEAA)

A seguir, foram apresentados os resultados do concreto de escória álcali-ativada (CEAA) no estado fresco e no estado endurecido e foram feitas argumentações sobre os mesmos.

#### 5.3.1 Características do concreto no estado fresco

Na Tabela 30, encontram-se os resultados obtidos para o abatimento do tronco de cone, massa específica do concreto, teor de ar e as proporções dos materiais para confeccionar 1 m<sup>3</sup> de cada traço.

Tabela 30 - Características dos traços no estado fresco e consumo real dos materiais empregados para a produção de 1 m<sup>3</sup> do CEAA.

Componentes		Traço rico	Traço médio	Traço pobre
Aglomerantes (kg/m <sup>3</sup> )		626,73	492,93	403,63
Escória (kg/m <sup>3</sup> )		550,58	433,04	354,59
Silicato de sódio (MS = 1,73)	Sólidos (kg/m <sup>3</sup> )	76,15	59,89	49,04
	Água em solução (kg/m <sup>3</sup> )	93,07	73,20	59,94
Areia (kg/m <sup>3</sup> )		513,95	660,50	750,82
Brita (kg/m <sup>3</sup> )		1052,94	1064,75	1065,75
Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )		11,33	5,75	4,57
Água (kg/m <sup>3</sup> )		76,57	101,30	115,33
Ar aprisionado (%)		2,96	1,46	0,89
a/agl (kg/kg)		0,28	0,36	0,44
m (kg/kg)		2,50	3,50	4,50
H (%)		8,0	8,0	8,0
Teor de aditivo (%)		1,81	1,17	1,13
massa de Na <sub>2</sub> O / massa de escória (%)		5,07	5,07	5,07
Abatimento (mm)		150	230	230
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		2374,59	2398,46	2400,06

Fonte: O autor (2019)

Observa-se na Tabela 30 que o teor de ar decresceu do traço rico ao pobre, conseqüentemente, a massa específica do traço rico resultou em um valor inferior às massas específicas do traço médio e pobre, respectivamente. Quanto à trabalhabilidade, nota-se que o traço rico obteve um abatimento inferior em relação aos outros traços, que obtiveram abatimento igual a 230 mm. Conforme citado no programa experimental, a trabalhabilidade do concreto para o CEAA não foi fixada, uma vez que se optou por utilizar o mesmo teor de aditivo que foi utilizado no CAR. É importante citar que após o encerramento da mistura dos traços de CEAA, este concreto permanecia trabalhável entre 10 e 15 minutos.

### 5.3.2 Resistência à compressão

Os resultados individuais ( $f_{ci}$ ) obtidos para todos os corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão, bem como a resistência média ( $f_{cm}$ ), o desvio padrão amostral ( $s$ ) e o coeficiente de variação (CV) correspondentes a cada traço e idade estão expostos na Tabela 31.

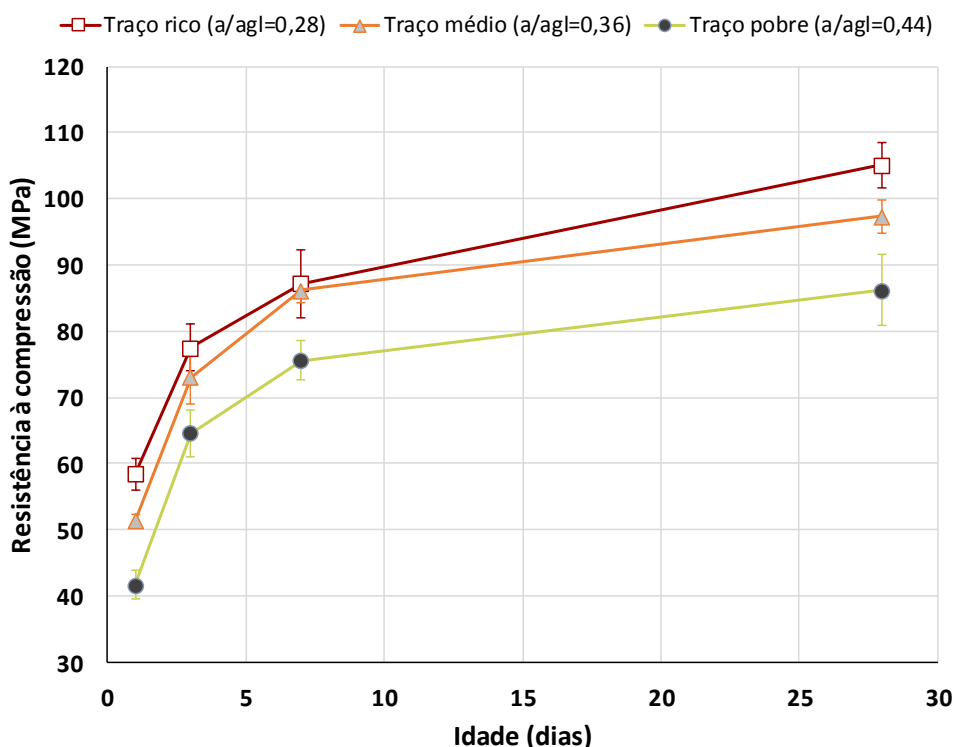
Tabela 31 - Resistência à compressão dos traços do CEAA.

Idade (dias)	Traço rico				Traço médio				Traço pobre												
	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	$s$ (MPa)	CV (%)	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	$s$ (MPa)	CV (%)	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	$s$ (MPa)	CV (%)									
1	56,60				51,56				40,75												
	59,51				50,69				41,84												
	57,82	58,44	1,46	2,50	50,75	51,32	0,63	1,23	42,38	41,64	1,34	3,22									
	57,38				51,39				39,44												
	60,57				52,40				43,17												
	58,73				51,12				42,28												
79,05													71,91				65,18				
74,38													73,17				61,32				
3	78,96	77,54	2,11	2,72	73,83	73,07	2,51	3,44	65,57	64,58	2,12	3,28									
	79,84				74,29				65,09												
	77,03				68,88				67,34												
	75,97				76,33				62,96												
	84,04													86,44				76,30			
	86,86													87,36				78,08			
7	90,81	87,16	3,11	3,57	86,58	86,13	1,18	1,37	72,45	75,58	1,84	2,43									
	90,54				86,31				75,84												
	87,26				83,88				75,70												
	83,46				86,20				75,10												
	106,75													98,00				88,43			
	104,16													95,06				83,63			
28	102,15	105,09	2,11	2,01	97,85	97,38	1,54	1,58	81,15	86,22	3,19	3,70									
	103,83				99,13				88,68												
	105,77				95,94				86,50												
	107,91				98,27				88,95												

Fonte: O autor (2019)

A evolução da resistência à compressão do CEAA ao longo do tempo está apresentada na Figura 31, na qual estão identificados os valores médios (símbolos) com a representação gráfica da dispersão dos resultados (barras verticais). A dispersão em torno da média foi calculada multiplicando-se o desvio padrão por 1,65, valor adotado para uma distribuição normal, que garante que, estatisticamente, 95% dos resultados obtidos terão resistência à compressão superior à resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ). Assim como ocorreu no CAR, observa-se que a evolução da resistência à compressão do CEAA em todos os traços ocorreu de forma rápida, alcançando-se resistências acima de 40 MPa com 1 dia de idade. Quanto as resistências obtidas aos 28 dias, percebe-se que todos os traços resultaram em um valor superior a 86 MPa. Estes valores são satisfatórios quando comparados aos resultados encontrados na literatura para o CEAA que utilizaram silicato de sódio como ativador, pois, como pode ser visto na Tabela 8, o único estudo citado que obteve maior resistência à compressão foi o de Pu et al. (1988 apud WANG et al., 1995) (117,0 MPa), enquanto que os demais apresentaram resultados de resistência à compressão inferiores.

Figura 31 - Evolução da resistência à compressão do CEAA ao longo do tempo.



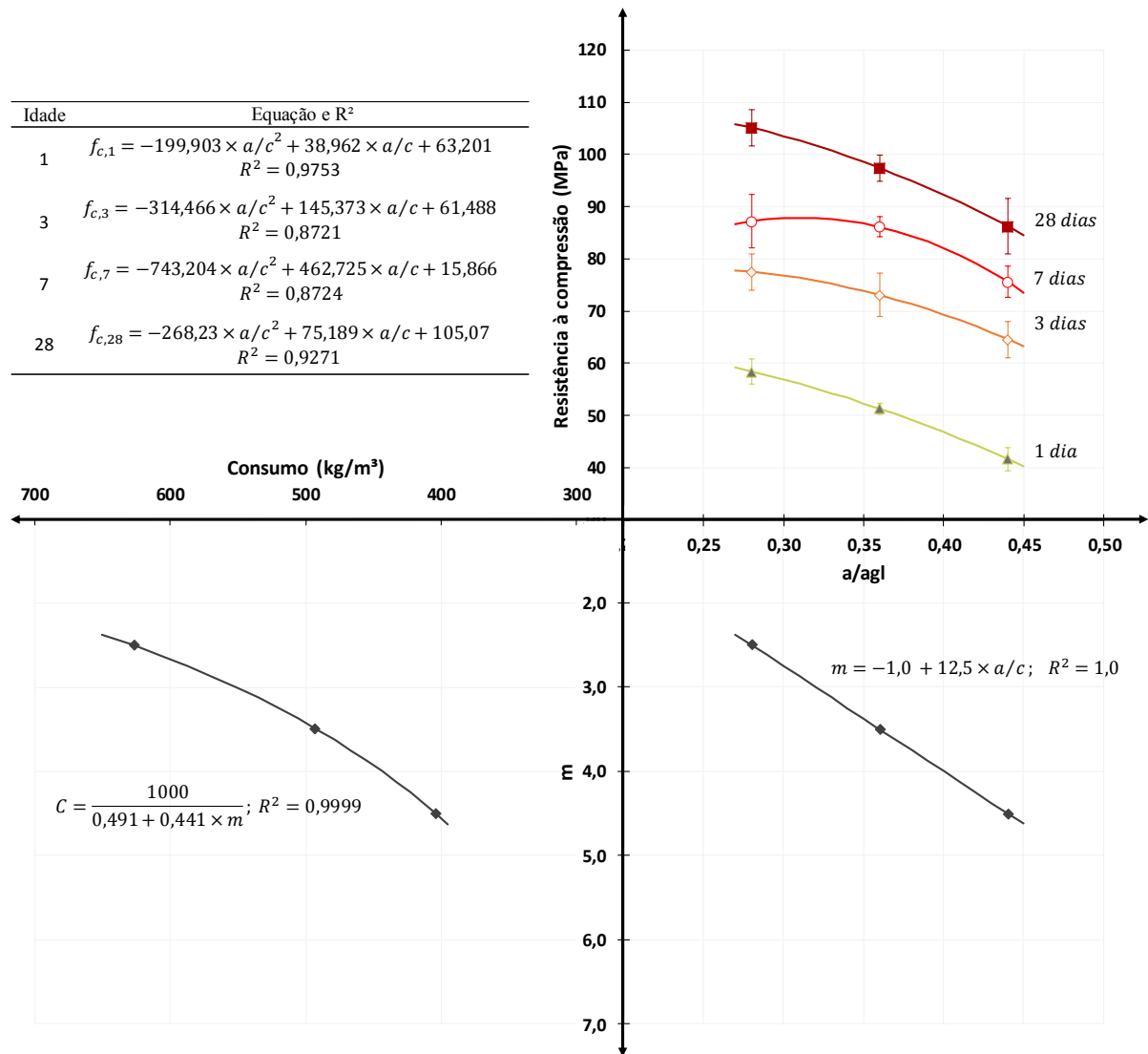
Fonte: O autor (2019)

Na Figura 32 está ilustrado o gráfico IPT/EPUSP para o CEAA. Neste gráfico a equação que melhor correlacionou a resistência à compressão e a relação a/agl foi a equação polinomial de 2° grau, assim como ocorreu para o CAR. Verifica-se também nesta imagem que a relação a/agl



é inversamente proporcional a resistência à compressão do CEAA, sendo visível que quanto menor for esta relação, maior será a resistência à compressão do concreto em uma determinada idade.

Figura 32 - Gráfico IPT/EPUSP para o CEAA.



Fonte: O autor (2019)

### 5.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) aos 28 dias encontram-se na Tabela 32. Nela observa-se que os traços rico e médio resultaram num valor praticamente igual, enquanto o traço pobre em um valor um pouco maior que estes. Nota-se também que os dois primeiros traços citados tiveram um coeficiente de variação bem maior que o último. Isto pode ter ocorrido devido à maior microfissuração interna dos traços médio e rico, em razão do elevado consumo de escória álcali-ativada ou pode ter sido ocasionado pela maior dispersão

dos dados obtidos neste ensaio, em razão da maior sensibilidade do método frente às possíveis falhas no preparo dos corpos-de-prova e no procedimento de ensaio.

Ao analisar a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão ( $f_{ct,sp}/f_{cm}$ ) verifica-se que para os traços rico, médio e pobre ela corresponde a, respectivamente, 4,28%, 4,57% e 5,60%, ou seja, quanto maior o valor resistência à compressão, menor o valor da relação  $f_{ct,sp}/f_{cm}$ . Essa tendência também foi verificada por Mithun e Narasimhan (2014). Porém, estes autores relatam que a relação entre  $f_{cm}/f_{ct,sp}$  do CEAA variou de 6,5% a 7% da resistência à compressão, valores superiores aos encontrados nesta pesquisa.

Tabela 32 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias para os traços do CEAA.

Traço	$f_{ct,sp}$ (MPa)	Média (MPa)	s (MPa)	CV (%)
Rico	4,78	4,50	0,40	8,84%
	4,67			
	4,04			
Médio	3,46	4,45	0,87	19,59%
	5,12			
	4,76			
Pobre	4,95	4,83	0,12	2,43%
	4,84			
	4,71			

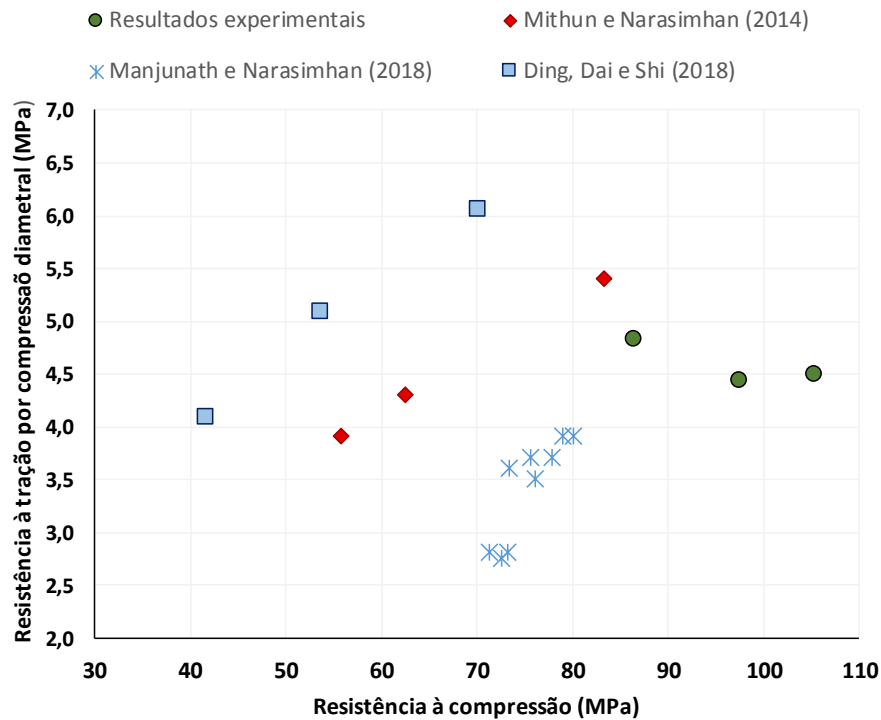
Fonte: O autor (2019)

Com o intuito de auxiliar na análise dos resultados, os dados da Tabela 32 foram ilustrados na Figura 33 juntamente com alguns resultados encontrados na literatura para concretos de escória ativada com silicato de sódio. Como pode ser visto nesta figura, os resultados experimentais de tração por compressão diametral não aumentaram com a elevação da resistência à compressão, como ocorreu nos estudos de Mithun e Narasimhan (2014), Manjunath e Narasimhan (2018) e Ding, Dai e Shi (2018). Além disso, ao realizar uma análise global dos pontos plotados nesta imagem, nota-se também que não há uma relação geral bem definida entre a resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) e a resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) destes concretos, conseqüentemente, torna-se difícil estabelecer uma equação para previsibilidade de  $f_{ct,sp}$  a partir de  $f_{cm}$ .

É conveniente mencionar que os estudos citados anteriormente produziram concretos com diferentes módulos de sílica, diferentes concentrações de ativadores e tiveram resistências à

compressão inferiores as obtidas nesta pesquisa. Ou seja, estabelecer alguma comparação entre os resultados expostos na literatura se torna um pouco difícil.

Figura 33 – Análise da relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão do CEEA, utilizando os resultados experimentais e os dados obtidos por Mithun e Narasimhan (2014), Manjunath e Narasimhan (2018) e Ding, Dai e Shi (2018).



Fonte: O autor (2019)

### 5.3.4 Módulo de elasticidade estático

Os resultados de módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) aos 28 dias para o CEEA encontram-se na Tabela 33.

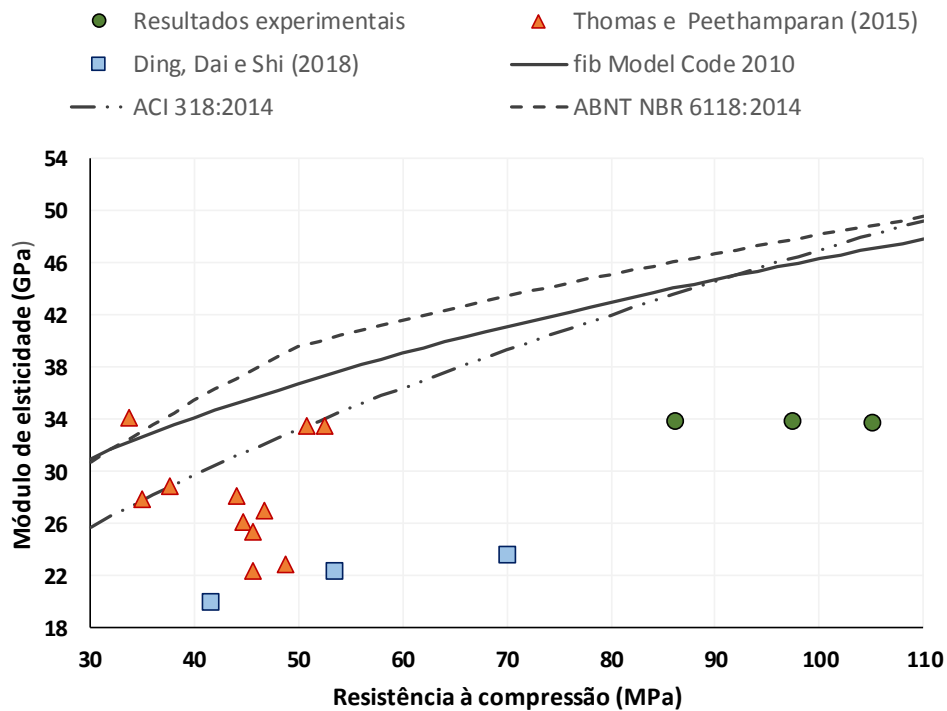
Tabela 33 - Módulo de elasticidade estático aos 28 dias para os traços do CEEA.

Traço	$E_c$ (GPa)	Média (MPa)	s (MPa)	CV (%)
Rico	33,20	33,80	0,79	2,35%
	33,50			
	34,70			
Médio	33,40	33,90	0,62	1,84%
	33,70			
	34,60			
Pobre	34,00	33,90	0,36	1,06%
	33,50			
	34,20			

Fonte: O autor (2019)

Para auxiliar na análise dos resultados de módulo de elasticidade, buscou-se selecionar resultados de estudos de concretos que foram confeccionados com escória ativada com silicato de sódio. À vista disso, foram selecionados os resultados dos estudos de Thomas e Peethamparan (2015) e Ding, Dai e Shi (2018) para compará-los com os resultados experimentais, como pode ser visto na Figura 34. Além disso, foram ilustradas as curvas feitas a partir das expressões do *fib* Model Code 2010, ACI 318:2014 e ABNT NBR 6118:2014 com o intuito de verificar se elas têm alguma relação com os resultados experimentais.

Figura 34 - Relação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão do CEAA aos 28 dias.



Fonte: O autor (2019)

Ao analisar a Figura 34 nota-se de imediato que as curvas construídas a partir das expressões normativas para prever o módulo de elasticidade não condizem com os resultados obtidos para o CEAA. Além disso, baseado nos dados que foram expostos nesta figura, observa-se que não há uma correlação bem definida entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Essas observações também foram constatadas por Thomas e Peethamparan (2015).

Como pode ser visto na Figura 34, os resultados experimentais têm valores praticamente constantes, em torno de 33,9 GPa. Thomas e Peethamparan (2015) relatam que a pouca variabilidade dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade em concretos com escória ativada com silicato de sódio pode ser resultado do microfissuramento significativo que tem sido demonstrado neste tipo de concreto, conforme evidenciam Collins e Sanjayan (2001), que pode ser cada vez maior com o aumento na resistência à compressão.

### 5.3.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados obtidos para o ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica ( $V$ ), massa específica dos corpos de prova na condição saturada ( $\rho_{\text{sat}}$ ) e os módulos de elasticidade dinâmicos ( $E_{c,d}$ ) encontram-se na Tabela 34. Estes são apresentados com os valores médios, seus respectivos desvios padrões ( $s$ ) e coeficientes de variação ( $CV$ ). Nesta tabela, observa-se que o  $CV$  da  $V$ , da  $\rho_{\text{sat}}$  e, conseqüentemente, de  $E_{c,d}$  apresentaram valores superiores quando comparados aos obtidos para o CAR. Ainda assim, nota-se que o  $CV$  da velocidade de propagação da onda ultrassônica foi geralmente menor que 1,5%, o que mostra a pouca variabilidade do ensaio e também a homogeneidade dos corpos de prova de concreto produzidos. Nota-se também que os resultados obtidos para a velocidade de propagação da onda ultrassônica aos 7 e 28 dias apresentaram valores acima de 4500 m/s. De acordo com a IS 13311-1:1992, o concreto que obtiver  $V$  superior a 4500m/s é classificado com qualidade excelente.

Ao relacionar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ) com o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) dos traços rico, médio e pobre aos 28 dias, verifica-se que  $E_{c,d}$  é 41,2%, 43,2% e 43,3 % maior que  $E_c$ , respectivamente. Assim, vê-se que os resultados obtidos para o  $E_{c,d}$  foram em média 42,6% maiores que os de  $E_c$ . Este resultado, provavelmente, é inédito na literatura, visto que nenhum resultado similar a este foi identificado.

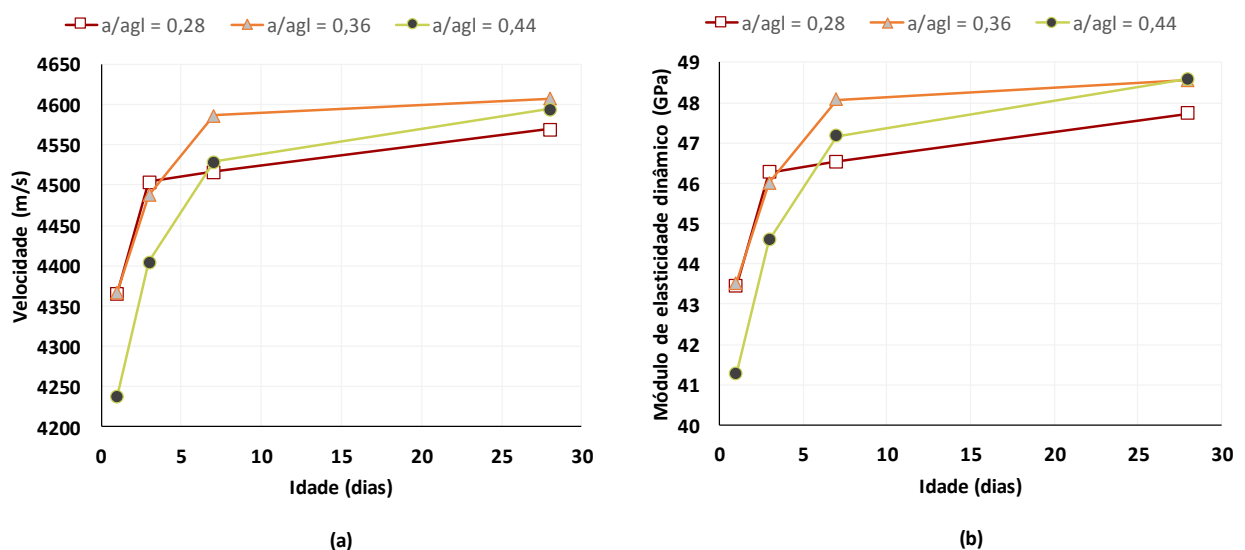
Tabela 34 - Resultados obtidos para o CEAA no ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica, massa específica dos corpos de prova na condição saturada e módulos de elasticidade dinâmicos.

Traço	Idade (dias)	Velocidade (m/s)	s (m/s)	CV (%)	$\rho_{\text{sat}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	s (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	$E_{c,d}$ (GPa)	s (Gpa)	CV (%)
Rico (a/agl = 0,28)	1	4365,9	43,4	0,99	2371,2	17,7	0,75	43,45	1,01	2,31
	3	4503,8	33,4	0,74	2372,9	17,6	0,74	46,27	0,89	1,93
	7	4516,4	40,4	0,90	2373,2	17,7	0,74	46,53	0,78	1,68
	28	4569,7	71,5	1,56	2377,9	17,6	0,74	47,73	1,38	2,89
Médio (a/agl = 0,36)	1	4367,1	25,0	0,57	2373,8	30,4	1,28	43,51	0,53	1,22
	3	4488,0	65,6	1,46	2376,0	30,6	1,29	46,00	1,14	2,47
	7	4586,4	71,9	1,57	2377,4	30,6	1,29	48,07	1,26	2,63
	28	4607,5	55,3	1,20	2380,0	30,7	1,29	48,56	0,87	1,78
Pobre (a/agl = 0,44)	1	4237,8	52,8	1,24	2390,3	23,1	0,97	41,26	1,02	2,46
	3	4404,2	58,2	1,32	2391,6	23,1	0,97	44,59	1,12	2,51
	7	4529,0	59,0	1,30	2392,6	22,9	0,96	47,18	1,21	2,57
	28	4594,3	42,6	0,93	2395,2	23,3	0,97	48,59	0,84	1,73

Fonte: O autor (2019)

Os resultados expostos na Tabela 34 foram apresentados graficamente na Figura 35 com o propósito de mostrar a evolução da velocidade de propagação da onda ultrassônica e do módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo. Assim como ocorreu nas misturas do CAR, a  $V$  e o  $E_{c,d}$  dos traços do CEEA também aumentaram com o tempo de cura. Esta observação corrobora com os resultados apresentados por W. Wang, H. Wang e Lo (2014, 2015), que realizaram ensaios com pasta de escória álcali-ativada. No entanto, observa-se que o traço com relação  $a/agl$  igual a 0,28 a partir dos 7 dias apresentou menor valor para  $V$  e  $E_{c,d}$  em relação aos outros traços. Geralmente, quanto menor a relação  $a/agl$  maiores são os valores de  $V$  e  $E_{c,d}$ . W. Wang, H. Wang e Lo (2014, 2015) relatam que a velocidade do pulso ultrassônico diminui à medida que a relação  $a/agl$  aumenta. Este desempenho atípico pode ter ocorrido devido a maior porosidade deste traço frente aos demais, uma vez que ele apresenta um teor de ar, aproximadamente, duas vezes maior que o traço médio e três vezes maior que o traço pobre, como pode ser visto na Tabela 30; ou estes resultados podem ser atribuídos às fissuras de retração mais sérias formadas na pasta de escória.

Figura 35 - Evolução, ao longo do tempo, (a) da velocidade de propagação da onda ultrassônica e (b) do módulo de elasticidade dinâmico do CEEA.

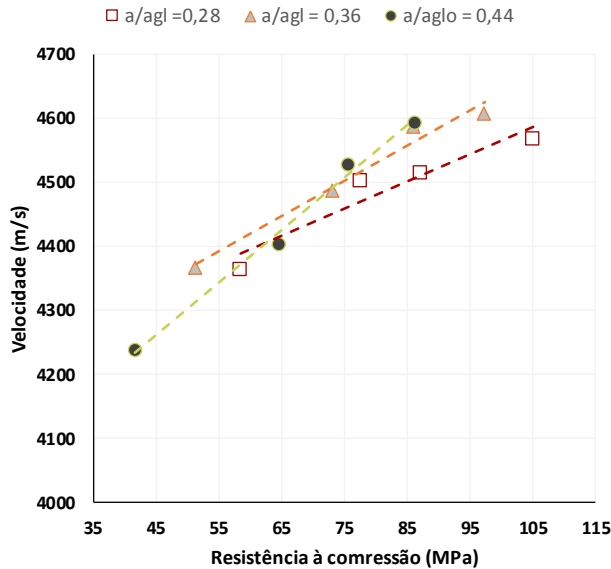


Fonte: O autor (2019)

A Figura 36 ilustra o gráfico que relaciona os valores médios da velocidade de propagação da onda ultrassônica e da resistência à compressão. Ao lado desta imagem, na Tabela 35, verifica-se que correlações satisfatórias são obtidas quando cada composição de concreto é avaliada individualmente, uma vez que foram obtidos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,90 para as equações estabelecidas. Além disso, assim como aconteceu para o CAR, nota-se que a resistência à compressão do concreto tende a aumentar mais rapidamente que a

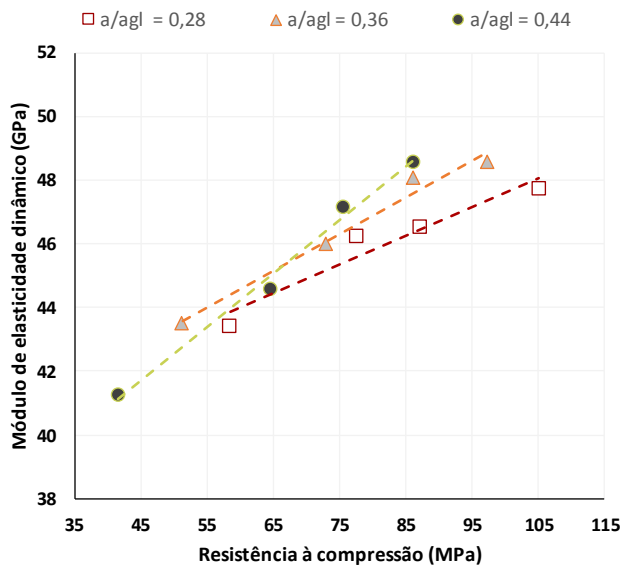
velocidade. Consequentemente, ao relacionar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico de cada traço de concreto individualmente, como pode ser visto na Figura 37 e Tabela 36, também observam-se  $R^2$  satisfatórios para as equações determinadas, visto que o  $E_{c,d}$  varia em função de  $V^2$ .

Figura 36 - Relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CEEA.



Fonte: O autor (2019)

Figura 37 - Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CEEA.



Fonte: O autor (2019)

Tabela 35 - Equações correlacionando a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do CEEA.

Traço	Equação e $R^2$
Rico (a/agl = 0,28)	$V = 4,265 \times f_{c,m} + 4139;$ $R^2 = 0,9116$
Médio (a/agl = 0,36)	$V = 5,4886 \times f_{c,m} + 4089,8;$ $R^2 = 0,9758$
Pobre (a/agl = 0,44)	$V = 8,1888 \times f_{c,m} + 3892,6;$ $R^2 = 0,9914$

Fonte: O autor (2019)

Tabela 36 - Equações correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do CEEA.

Traço	Equação e $R^2$
Rico (a/agl = 0,28)	$E_{c,d} = 0,0896 \times f_{c,m} + 38,639;$ $R^2 = 0,9233$
Médio (a/agl = 0,36)	$E_{c,d} = 0,115 \times f_{c,m} + 37,68;$ $R^2 = 0,9782$
Pobre (a/agl = 0,44)	$E_{c,d} = 0,168 \times f_{c,m} + 34,149;$ $R^2 = 0,9907$

Fonte: O autor (2019)

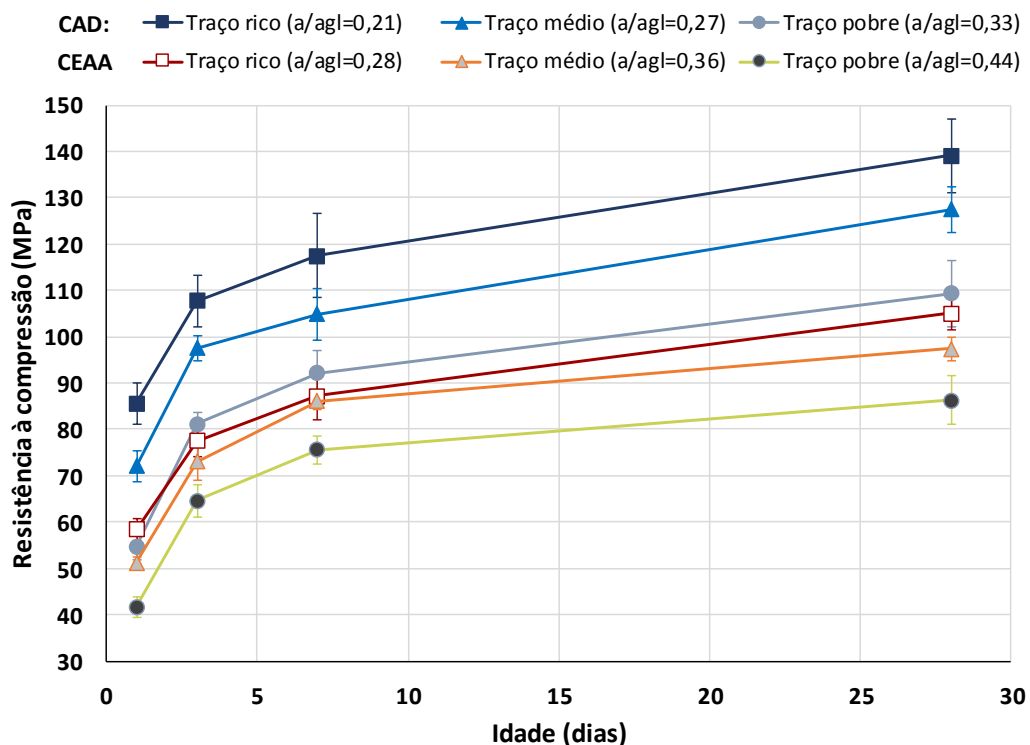
## 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE O CAR E O CEAA

Neste item, foi feita a comparação entre os resultados do concreto de alta resistência e do concreto de escória álcali-ativada.

### 5.4.1 Resistência à compressão

Primeiramente, foi comparada a evolução percentual da resistência à compressão do CAR e do CEAA, tendo em vista que os intervalos de resistência dos mesmos diferem, como pode ser visto na Figura 38. Nesta imagem nota-se que o único valor de resistência à compressão do CEAA presente no intervalo de resistência do CAR ocorre com 1 dia, nas demais idades os valores obtidos para o CEAA são sempre inferiores aos do CAR. Porém, nota-se que os resultados obtidos para o traço rico do CEAA são análogos aos obtidos para o traço pobre do CAR. À vista disso, posteriormente, foi feita a comparação entre os resultados obtidos para estes traços, uma vez que, na literatura, a comparação entre concretos de escória álcali-ativa e concretos confeccionados com cimento Portland, normalmente, é feita com resistências à compressão equivalentes.

Figura 38 - Evolução da resistência à compressão do CAR e do CEAA ao longo do tempo.



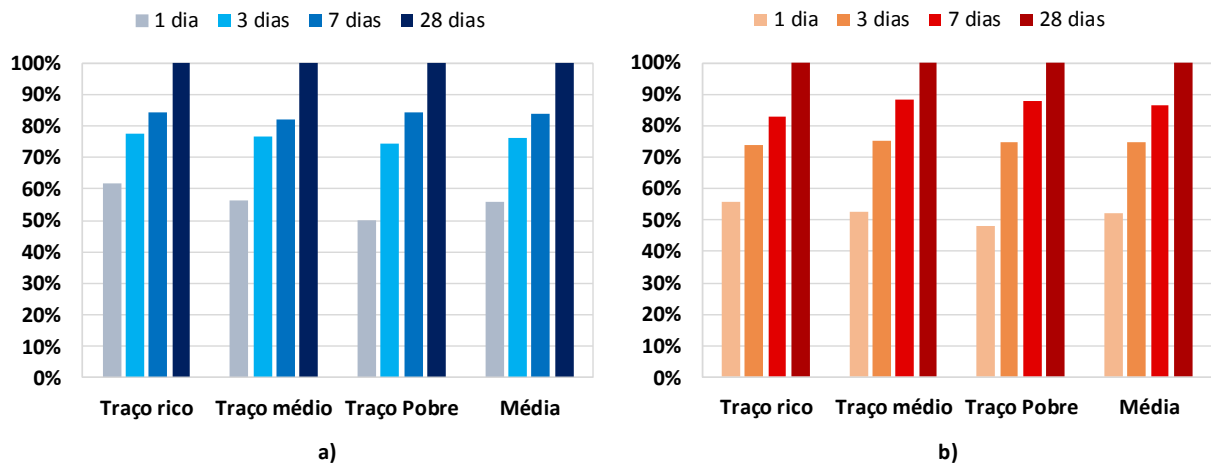
Fonte: O autor (2019)

Na Figura 39, apresenta-se a evolução percentual da resistência à compressão em função da idade, para os traços de CAR e CEAA produzidos através do método IPT/EPUSP modificado, considerando a resistência aos 28 dias igual a 100%. Na Figura 39-a) observa-se que a



resistência à compressão do CAR alcançou com 1 dia, 3 dias e 7 dias, em média, 56%, 76% e 84% da resistência final, respectivamente. Na Figura 39-b) verifica-se que a resistência à compressão do CEAA alcançou com 1 dia, 3 dias e 7 dias, em média, 52%, 75% e 86% da resistência aos 28 dias, respectivamente.

Figura 39 - Evolução percentual da resistência à compressão a) do CAR e b) do CEAA em função da idade.



Fonte: O autor (2019)

Em suma, observa-se que a evolução percentual média da resistência à compressão do CEAA é similar à do CAR. No entanto, ao analisar os percentuais obtidos com 1 dia, verifica-se que o percentual médio do CEAA foi um pouco menor que o do CAR. Isto pode ter ocorrido em razão da menor relação  $a/agl$  utilizada nos traços de CAR, uma vez que quanto menor for esta, menos porosidade e menos espaço livre existe para os produtos externos de hidratação se desenvolverem, conseqüentemente, conforme expõe Aïtcin (2000), com a maior proximidade entre as partículas de material cimentício, os produtos externos têm menos distância à cobrir para desenvolver uma ligação inicial entre estas partículas. Logo, segundo este autor, isso explica por que concretos com baixa relação  $a/agl$  desenvolvem resistência mais rapidamente.

#### 5.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Nota-se que os resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral do CEAA, nesta pesquisa, foram inferiores aos obtidos para o CAR. Ao comparar o traço rico do CEAA com o traço pobre do CAR, em razão de eles apresentarem resistências à compressão aos 28 dias similares, observa-se que o resultado do primeiro é 37% menor que o do segundo. No estudo de Ding, Dai e Shi (2018), os resultados obtidos para resistência à tração por compressão diametral do CEAA foram similares aos encontrados para concretos feitos com cimento Portland em uma mesma faixa de resistência à compressão (40MPa – 70 MPa). No estudo de Thomas e Peethamparan (2015), a resistência à tração por compressão diametral do

CEAA foi maior do que a observada para as misturas de concreto com cimento Portland em uma faixa de resistência similar ( $\approx 40$  MPa).

#### **5.4.3 Módulo de elasticidade estático**

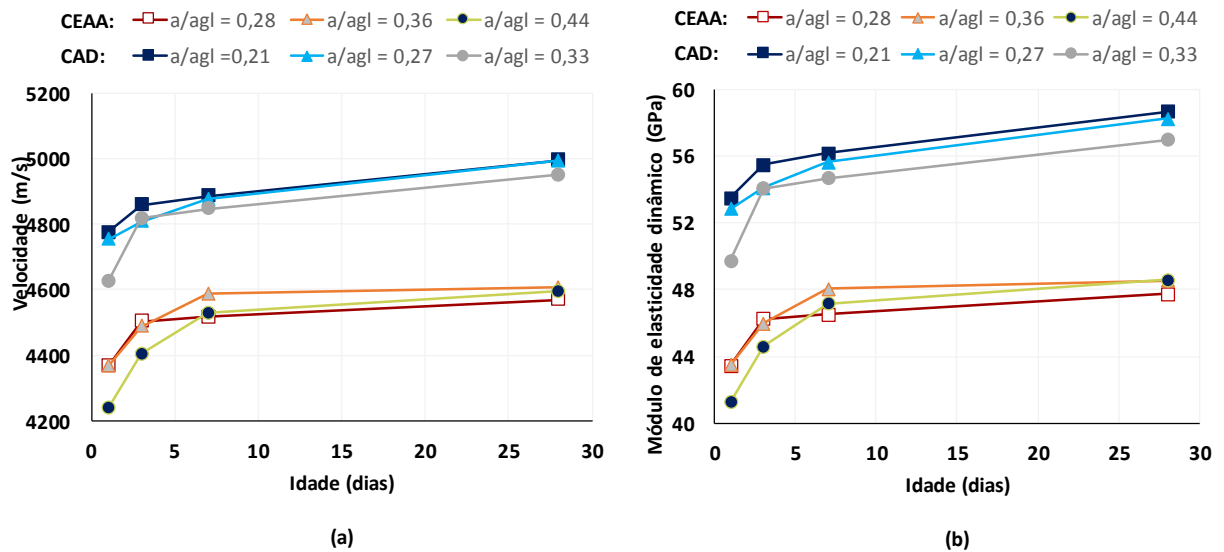
Os resultados experimentais obtidos para o módulo de elasticidade do CEAA também apresentaram valores inferiores aos do CAR. Ao comparar o traço rico do CEAA com o traço pobre do CAR, em razão de eles apresentarem resistências à compressão aos 28 dias similares, observa-se que o resultado do primeiro é 21% menor que o do segundo. Na pesquisa experimental realizada por Ding, Dai, Shi (2018), eles relataram que, para uma mesma resistência à compressão, o módulo de elasticidade do CEAA é geralmente menor do que o do concreto confeccionado com cimento Portland em torno de 25 a 35%. Segundo estes autores isto pode ser atribuído principalmente às fissuras de retração mais sérias formadas na matriz cimentícia da pasta de escória, o que foi demonstrado pelas observações microscópicas realizadas por eles.

#### **5.4.4 Módulo de elasticidade dinâmico**

No caso dos valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ), observa-se que os valores encontrados para o  $E_{c,d}$  do CEAA também foram menores que os do CAR, conforme ilustra a Figura 40-b). Um dos fatores que influenciou para que isso ocorresse foi a menor massa específica do CEAA, que ocorreu devido ao fato de este concreto apresentar relação água/materiais secos (H) igual a 8%, enquanto o CAR apresenta esta relação igual a 6%, e em razão de os traços de CEAA apresentarem maior teor de ar em sua composição. Como consequência, há uma maior porosidade no CEAA quando comparado ao CAR. Em virtude dessa maior porosidade do CEAA, a velocidade de propagação da onda acaba sendo menor, como pode ser visto na Figura 40-a), sendo outro motivo para o menor valor de  $E_{c,d}$ . A influência da porosidade na velocidade de propagação da onda ultrassônica é claramente demonstrada por Lafhaj et al. (2006).

Quanto a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ) e o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ), verificou-se que os resultados obtidos para o  $E_{c,d}$  do CEAA e do CAR foram em média 42,6% e 31,2 % maiores que os de  $E_c$ , respectivamente.

Figura 40 - Evolução, ao longo do tempo, (a) da velocidade de propagação da onda ultrassônica e (b) do módulo de elasticidade dinâmico do CEAA e do CAR.



Fonte: O autor (2019)

#### 5.4.5 Custo do m<sup>3</sup> de concreto

Conforme foi citado anteriormente, os valores médios obtidos para a resistência à compressão do CEAA aos 3, 7 e 28 dias estão fora do intervalo das resistências médias obtidas para o CAR. Assim, a fim de realizar uma comparação do custo destes concretos, foram utilizados os valores dos consumos do traço rico do CEAA e do traço pobre do CAR, em razão de eles apresentarem resistências à compressão aos 28 dias equivalentes, para o cálculo do custo do m<sup>3</sup>. Os custos unitários dos materiais utilizados na dosagem do CAR e do CEAA estão expostos na Tabela 37 e os custos do m<sup>3</sup> destes concretos estão apresentados na Tabela 38.

Tabela 37 - Custos unitários dos materiais utilizados para a dosagem do CAR e do CEAA na região metropolitana de Recife-PE.

Cimento (R\$/t)	Sílica ativa (R\$/t)	Escória (R\$/t)	Silicato de sódio (R\$/t)	Areia <sup>i</sup> (R\$/m <sup>3</sup> )	Brita 0 <sup>i</sup> (R\$/m <sup>3</sup> )	Aditivo SP (R\$/kg)	Água (R\$/t)
300,00	720,00	150,00	1197,00	60,00	60,00	7,77	3,70

<sup>i</sup> As massas unitárias da areia e da brita 0 utilizadas foram, respectivamente, 1560 kg/m<sup>3</sup> e 1500 kg/m<sup>3</sup>.

Fonte: O autor (2019)

Ao analisar os dados expostos na Tabela 38, nota-se de imediato que o custo do m<sup>3</sup> de CEAA é consideravelmente maior que o custo do CAR para um concreto com resistências à compressão similares. Constata-se que o custo para produzir 1 m<sup>3</sup> de CEAA é 70% maior que o de CAR. Wang et al. (1995), por sua vez, citam que se o CEAA apresentar resistência entre 70-120 MPa, quando comparado ao concreto feito com cimento Portland e sílica ativa com desempenho similar, o primeiro economiza entre 10%-40% no custo. Um fator que pode

explicar essa diversidade no custo pode ser o custo unitário atribuído aos materiais em cada localidade. Além disso, observa-se que o Custo/MPa para produzir CAR e CEAA com resistências em torno de 105 MPa aos 28 dias é de, respectivamente, R\$ 2,34 e R\$ 4,13.

Tabela 38 - Comparação do custo/m<sup>3</sup> e do custo/MPa entre o CEAA e o CAR com resistências à compressão equivalentes.

Idade	Resistência à compressão (MPa)		Custo (R\$/m <sup>3</sup> )		Custo/Resistência à compressão (R\$/MPa)	
	CAR	CEAA	CAR	CEAA	CAR	CEAA
1	54,71	58,44			4,67	7,44
3	81,17	77,54			3,15	5,60
7	92,22	87,16	255,74	434,54	2,77	4,99
28	109,31	105,09			2,34	4,13

Fonte: O autor (2019)

Analisando quais fatores não possibilitaram que o CEAA apresentasse custo equivalente ao CAR é factível, com base na Tabela 37, afirmar que o custo silicato de sódio foi um dos fatores que impossibilitou esta equivalência. Pois, por exemplo, o custo de 500 kg/m<sup>3</sup> de aglomerantes no CAR é igual a R\$ 171,00 e no CEAA corresponde a R\$ 227,48<sup>6</sup>, ou seja, a escória ativada com silicato de sódio tem um custo superior ao do cimento + substituição de 10% sílica ativa. Ao observar o consumo de aglomerantes utilizado para a confecção do CAR (421,59 kg/m<sup>3</sup>) e do CEAA (626,73 kg/m<sup>3</sup>) verifica-se que o consumo de aglomerantes do CEAA foi bem superior quando comparado ao do CAR, sendo outro fator que contribui no custo. O elevado custo do silicato de sódio e o maior consumo de aglomerantes no CEAA foram decisivos para o custo deste concreto ser superior ao do CAR, no entanto, o aspecto importante ao comparar o custo destes concretos decorre como consequência da não compatibilidade do aditivo superplastificante com a escória álcali-ativada. Na hipótese de ser possível confeccionar o CEAA com relação água/materiais secos e trabalhabilidade similar ao do CAR, seria provável que estes concretos tivessem custos um pouco mais próximos.

<sup>6</sup> 500 kg/m<sup>3</sup>, no CAR, corresponde a 450 kg/m<sup>3</sup> de cimento (90%) + 50 kg/m<sup>3</sup> de sílica ativa (10%). No CEAA, 500 kg/m<sup>3</sup> equivale a 439,25 kg/m<sup>3</sup> de escória (87,85%) + 60,75 kg/m<sup>3</sup> da parte sólida do silicato de sódio (12,15%). Porém, o custo é estabelecido para a solução de silicato de sódio, logo, o consumo desta é igual a 60,75/0,45, que resulta em 135 kg/m<sup>3</sup>.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver um concreto de alta resistência utilizando escória de alto-forno moída ativada com silicato de sódio como aglomerante. Para a confecção deste concreto (CEAA), utilizou-se o método de dosagem IPT/EPUSP modificado, a partir do qual estabeleceram-se critérios para a dosagem do mesmo: a relação água/materiais secos foi fixada em 8%; e não foi utilizada substituição de sílica ativa para confecção deste concreto. Além deste concreto, também foi feito um concreto de alta resistência (CAR) utilizando cimento Portland e sílica ativa como referência para o CEAA. Foram estudadas algumas propriedades mecânicas destes concretos, como: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e módulo de elasticidade dinâmico. Além disso, verificou-se o custo do m<sup>3</sup> do CEAA frente ao CAR.

### 6.1 CONCLUSÕES

Levando em consideração os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- O concreto contendo escória ativada com silicato de sódio apresentou rápido início de pega quando comparado ao concreto confeccionado com cimento Portland e sílica ativa;
- Tanto o CEAA quanto o CAR desenvolveram altas resistências à compressão iniciais e finais. Os traços confeccionados para o CAR alcançaram resistências acima de 50 MPa com 1 dia e acima de 109 MPa aos 28 dias, enquanto que os traços de CEAA alcançaram resistências acima de 40 MPa com 1 dia e acima de 86 MPa aos 28 dias. Ao comparar estes valores com os presentes na literatura observou-se que os resultados alcançados para esta propriedade, nesta pesquisa, foram acima da média;
- A equação que melhor correlacionou a resistência à compressão e a relação a/agl tanto no CAR como no CEAA foi a equação polinomial do 2º grau, devido ao fato de ela sempre gerar valores de R<sup>2</sup> mais próximos de 1;
- A evolução percentual média da resistência à compressão do CEAA foi similar à do CAR. Observou-se que a resistência à compressão do CAR alcançou com 1 dia, 3 dias e 7 dias, em média, 56%, 76% e 84% da resistência aos 28 dias, respectivamente. No caso do CEAA, verificou-se que a resistência à compressão alcançou com 1 dia, 3 dias e 7 dias, em média, 52%, 75% e 86% da resistência aos 28 dias, respectivamente;
- Os resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) do CEAA foram inferiores aos obtidos para o CAR. Ao comparar a  $f_{ct,sp}$  do CEAA e do

CAR, com resistências à compressão aos 28 dias equivalentes, observou-se que o resultado do primeiro é 37% menor que o do segundo;

- Os resultados experimentais obtidos para o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) do CEAA também apresentaram valores inferiores aos do CAR. Ao comparar o  $E_c$  do CEAA e do CAR, com resistências à compressão aos 28 dias similares, observou-se que o resultado do primeiro é 21% menor que o do segundo;
- Há um aumento no valor do módulo de elasticidade ( $E_c$ ) do CAR simultaneamente com o aumento da resistência à compressão, o que não foi observado nos traços de CEAA, os quais obtiveram  $E_c$  praticamente iguais;
- Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) a partir das expressões do *fib* Model Code 2010, ACI 318:2014 e ABNT NBR 6118:2014 superestimam os valores de  $E_c$  encontrados para o CAR e CEAA.
- Ao relacionar a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão, tanto no CAR como no CEAA, verificaram-se correlações satisfatórias, uma vez que foram obtidos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,90 para as equações estabelecidas. Como consequência, também se observam  $R^2$  satisfatórios para as equações determinadas para a relação entre resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico, visto que o  $E_{c,d}$  varia em função de  $V^2$ .
- Ao comparar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{c,d}$ ) e o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ), verificou-se que os resultados obtidos para o  $E_{c,d}$  do CEAA e do CAR foram em média 42,6% e 31,2 % maiores que os de  $E_c$ , respectivamente.
- O custo do  $m^3$  de CEAA foi consideravelmente maior que o custo do CAR em concretos com resistências à compressão equivalentes. Constatou-se que o custo para produzir 1  $m^3$  de CEAA é 70% maior que o de CAR.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho, algumas questões ainda necessitam de maiores estudos e sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Estudo da aplicação de aditivos retardadores do início de pega em concretos com escória ativada com silicato de sódio, com o intuito de aumentar a trabalhabilidade deste material sem prejudicar o desenvolvimento das propriedades mecânicas;
- Estudo da dosagem de concretos de escória ativada com silicato de sódio com diferentes teores deste ativador ( $\%Na_2O + MS.\%SiO_2$ ) e com diferentes módulos de sílica (MS,

relação entre  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ , em massa), com o intuito de verificar qual composição acarreta as melhores propriedades;

- Estudo sobre a possibilidade de produzir cimentos de escória ativados com silicato de sódio seco em pó como um produto pronto para uso que pode ser embalado em sacos e misturado com água para produzir um concreto.
- Estudo da retração autógena e por secagem do concreto de escória ativado com silicato de sódio;
- Estudo da durabilidade a longo prazo do concreto de escória ativado com silicato de sódio, com o intuito de verificar o comportamento dele frente a cloretos, sulfatos, ácidos e carbonatação.

## REFERÊNCIAS

ACI Committee 211.1. **ACI 211.1**: standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. Farmington Hills, 1991.

ACI Committee 318. **ACI 318**: building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, 2014.

ACI Committee 363. **ACI 363R**: report on high-strength concrete. Farmington Hills, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. **ASTM C597**: standard test method for pulse velocity through concrete. ASTM International, West Conshohocken, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018;

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014;

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996;

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011;

\_\_\_\_\_. **NBR 8802**: concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013;

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017;

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: concreto fresco – determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008;

\_\_\_\_\_. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008;

\_\_\_\_\_. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017;

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018;

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001;

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009;



\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009;

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998;

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003;

AÏTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.

ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. 2000. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BAKHAREV, T; SANJAYAN, J.; CHENG, Y. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 30, n. 9, p.1367-1374, set. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00349-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00349-5).

BAKHAREV, T; SANJAYAN, J.; CHENG, Y. Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 31, n. 9, p.1277-1283, set. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00574-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00574-9).

BHANJA, Santanu; SENGUPTA, Bratish. Water-cement ratio law and silica fume concrete mix design. **Cement Combinations For Durable Concrete**, [s.l.], p.107-112, jan. 2005. Thomas Telford Publishing. <http://dx.doi.org/10.1680/ccfdc.34013.0012>.

BOGAS, J. A.; GOMES, M. G.; GOMES, A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. **Ultrasonics**, [s.l.], v. 53, n. 5, p.962-972, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2012.12.012>.

BRITISH STANDARD. **EN 12390-2**: testing hardened concrete – making and curing specimens for strength tests. London, 2009.

\_\_\_\_\_. **EN 12390-3**: testing hardened concrete - compressive strength of test specimens. London, 2009.

\_\_\_\_\_. **EN 12504-4**: testing concrete - determination of ultrasonic pulse velocity. London, 2004.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 13311-1**: method of non-destructive testing of concrete, Part 1: ultrasonic pulse velocity. New Delhi, 1992.

CIMENTO MIZU S/A. **Certificado de ensaios em escória**. 2018.

CIMENTO NACIONAL. **Certificado de ensaios em cimento**. Pitimbu, 2018.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 30, n. 9, p.1401-1406, set. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00327-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00327-6).

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 23, n. 4-5, p.345-352, ago. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465\(01\)00003-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0958-9465(01)00003-8).

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 29, n. 3, p.455-458, mar. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00236-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00236-1).

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 2010** - First complete draft. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2010.

CREMONINI, R. A.; DAL MOLIN, D. C. C.; CECCATTO, D. M.; MANCIO, M.; GOULART, J. Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** . Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001.

CRIADO, M.; APERADOR, W.; SOBRADOS, I. Microstructural and Mechanical Properties of Alkali Activated Colombian Raw Materials. **Materials**, [s.l.], v. 9, n. 3, 5 mar. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma9030158>.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. 2001. 191 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DE LARRARD, François. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. London: E&FN Spon, 1999.

DING, Yao; DAI, Jian-Guo; SHI, Cai-Jun. Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 165, p.310-320, mar. 2018. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.202>.

DING, Yao; DAI, Jian-Guo; SHI, Cai-Jun. Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 127, p.68-79, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.121>.

DOUGLAS, E. et al. Properties and Durability of Alkali-Activated Slag Concrete. **ACI Materials Journal**, [s.l.], v. 89, n. 5, p.509-516, 1992. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/1832>.

DUVAL, R; KADRI, E.H. Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 28, n. 4, p.533-547, abr. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(98\)00010-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(98)00010-6).

FRANCISCO, R. C.; PINHEIRO, A.; MATOS, L. F. S.; ROHDEN, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica de produção de concretos classe II de acordo com a ABNT NBR 6118/2014 utilizando agregados encontrados na região do Vale do Itajaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 57., 2015, Bonito. **Anais...** . Bonito: IBRACON, 2015.

FREITAS JÚNIOR, J. A. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali-activated based concrete. In: PACHECO-TORGAL, F. et al. **Eco-Efficient Concrete**. [s.l.]: Woodhead Publishing Limited, 2013. Cap. 17. p. 439-487.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade**. 11. ed. Brasil, 2018. 81 p.

JI, Tao et al. Interfacial Transition Zone of Alkali-Activated Slag Concrete. **ACI Materials Journal**, [s.l.], v. 114, n. 3, p.347-354, jun. 2017. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/51689473>.

JOHN, Vanderley M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 200 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KHODABAKHSHIAN, Ali et al. Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 170, p.42-60, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.116>.

LAFHAJ, Zoubeir et al. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 36, n. 4, p.625-633, abr. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.009>.

MANJUNATH, R.; NARASIMHAN, Mattur C. An experimental investigation on self-compacting alkali activated slag concrete mixes. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 17, p.1-12, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.009>.

MEHTA, P. K. Concrete technology for sustainable development. **Concrete International**, [s.l.], v. 21, n. 11, p.47-53, jan. 1999.

MEHTA, P. K.; AİTCIN, P.C. Principles underlying production for high performance concrete. **Cement, Concrete & Aggregates**. v. 12, n.2, p. 70-78. 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada.** 2008. 253 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MENDES, S. E. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba.** 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Self-cured alkali activated slag concrete mixes - an experimental study. **World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering.** s.l., p. 477-482. jun. 2014. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1093468>

NAWY, E. G. **Fundamentals of high-performance concrete.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

NOVAKEM. **Certificado de análise.** Simões Filho, 2018.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J. A.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIRT, P. (Ed.). **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes.** [s.l.]: Woodhead Publishing, 2014. 852 p.

PALACIOS, M.; PUERTAS, F.. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. **Cement and Concrete Research,** [s.l.], v. 37, n. 5, p.691-702, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.021>.

PERNAMBUCO QUÍMICA S/A. **Certificado de análise.** Jaboatão dos Guararapes, 2018.

PERSSON, Bertil. Poisson's ratio of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research,** [s.l.], v. 29, n. 10, p.1647-1653, out. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00159-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00159-3).

PUERTAS, F. et al. Alkali-activated slag concrete: fresh and hardened behaviour. **Cement and Concrete Composites,** [s.l.], v. 85, p.22-31, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.003>.

RAO, S. K.; SRAVANA, P.; RAO, T. Chandrasekhara. Experimental studies in ultrasonic pulse velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand. **International Journal of Pavement Research And Technology,** [s.l.], v. 9, n. 4, p.289-301, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.003>.

ROHDEN, A. B. **Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura.** 2015. 177 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SCRIVENER, Karen L.; CRUMBIE, Alison K.; LAUGESEN, Peter. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, [s.l.], v. 12, n. 4, p.411-421, out. 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/b:ints.0000042339.92990.4c>.

SHI, Caijun; KRIVENKO, Pavel V.; ROY, Della. **Alkali-activated cements and concretes**. London: Taylor & Francis, 2003. 392 p.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

THOMAS, Robert J.; PEETHAMPARAN, Sulapha. Alkali-activated concrete: engineering properties and stress-strain behavior. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 93, p.49-56, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.039>.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36. p. 1283-1326.

WANG, S. D.; PU, X. C.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. **Advances in Cement Research**, [s.l.], v. 7, n. 27, p.93-102, jul. 1995. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.1995.7.27.93>.

WANG, Wei-Chien; WANG, Her-Yung; LO, Ming-Hung. The engineering properties of alkali-activated slag pastes exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 68, p.409-415, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.016>.

WANG, Wei-Chien; WANG, Her-Yung; LO, Ming-Hung. The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 84, p.224-229, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.059>.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Economics Committee. **Steel statistical yearbook**. [s.l.], 2017. 126 p.

WU, Ke-Ru et al. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, [s.l.], v. 31, n. 10, p.1421-1425, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00588-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00588-9).

## APÊNCICE A – PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE MINIABATIMENTO

O procedimento utilizado para o ensaio de miniabatimento baseou-se na metodologia descrita por Aitcin (2000), sendo que foram realizadas alguns ajustes nesta metodologia para poder fluidificar as pastas com relação a/agl muito baixas, neste caso, igual a 0,21. Normalmente, o ensaio é realizado com relação a/agl entre 0,35 e 0,45, conforme relata este autor. O procedimento utilizado está descrito a seguir:

### Preparação da amostra

- Inicialmente, tomou-se o cuidado em manter a temperatura da sala com  $23 \pm 1$  °C.
- Foram pesados 200 g do material cimentício que foi testado.
- Pesou-se a quantidade adequada de água, descontando a água presente no superplastificante.
- Pesou-se a quantidade selecionada de superplastificante, que foi adicionada e diluída na quantidade de água citada acima.
- Realizou-se a mistura da pasta, conforme descrito a seguir:
  - i. Primeiramente, misturou-se manualmente cerca de 50% dos aglomerantes na água + superplastificante em um béquer com uma espátula por 30 segundos após ligar o cronômetro;
  - ii. Em seguida, misturou-se mecanicamente a pasta por dois minutos, com o auxílio de um agitador mecânico, adicionando neste intervalo de tempo o restante dos aglomerantes tomando o cuidado para não deixar o pó extravasar o béquer;
  - iii. Nos próximos 50 s, retirou-se das paredes do béquer com a espátula o que ficou retido e misturou-se manualmente a pasta com o intuito de soltar alguma fração de pó que ficou fixada na base do béquer;
  - iv. Logo depois, misturou-se mecanicamente a pasta por mais um minuto, a fim de homogeneizar as partículas de pó que ficaram retidas na parte interna do béquer.
- Terminada a mistura, cobriu-se o béquer com plástico filme para evitar a dessecação da pasta até o momento da realização do ensaio.

### Realização do ensaio

- O abatimento foi medido aos 10 min, 30 min, 40 min, 60 min e 90 min.
- Para a realização da primeira medição, colocou-se a placa de vidro sobre uma bancada nivelada.

- O minicone foi colocado no centro da placa e, depois de uma mistura manual de 15 segundos para homogeneizar a pasta, foi preenchido com a mesma.
- Dez batidas foram dadas no topo do minicone antes de levantá-lo rapidamente, de tal forma que a pasta se espalhasse sobre a placa de vidro.
- O diâmetro da pasta espalhada foi medido em duas direções perpendiculares e a média desses dois valores foi calculada.
- Após a medição, a pasta foi colocada outra vez no béquer e então misturada manualmente com uma espátula por 5 segundos, cobrindo-se então o béquer para evitar dessecação.
- A placa de vidro e o minicone foram limpos com água e enxutos para a próxima medição.

## APÊNDICE B – ANÁLISE DE REGRESSÃO

Conforme citado no desenvolvimento da dissertação, normalmente, utiliza-se a expressão matemática desenvolvida por Abrams (1918) para estabelecer a equação que relaciona a resistência à compressão com a relação  $a/agl$ . Porém, fez-se uma análise de regressão em outros modelos matemáticos com o intuito de verificar qual regressão ocasiona um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mais próximo de 1. As equações analisadas foram as propostas por Abrams (1918), Bhanja e Sengupta (2005) e a equação polinomial de 2º grau. Logo abaixo, estão expostas as equações teóricas que foram utilizadas, as equações resultantes e o  $R^2$  obtido em cada análise de regressão. É importante informar que foram utilizados os resultados individuais de resistência à compressão para o cálculo das constantes das equações e do  $R^2$ .

### Equações teóricas:

- Abrams:

$$f_{c,i} = \frac{K1}{K2^{a/agl}}$$

- Bhanja e Sengupta:

$$f_{c,i} = \frac{C1}{C2^\beta}; \beta = \frac{a}{agl} + \frac{a_3}{a_2}(C_{cim} + k \cdot C_{sf}) + \frac{a_4}{a_2} \left( \frac{k \cdot C_{sf}}{C_{cim} + k \cdot C_{sf}} \right)$$

- Polinomial (2º Grau):

$$f_{c,i} = a \cdot (a/agl)^2 + b \cdot (a/agl) + c$$

Onde,

$f_{c,i}$  – resistência à compressão do concreto com  $i$  dias de idade, em MPa;

$a/agl$  – relação água/aglomerante em massa (kg/kg). Aglomerante está sendo considerado como o somatório dos materiais cimentícios;

$K1$  e  $K2$  – constantes obtidas através da análise de regressão;

$C1$ ,  $C2$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$  – constantes obtidas através da análise de regressão;

$k$  – fator de eficiência da substituição de sílica ativa. Para substituições de 5, 10, 15, 20, 25 e 30% são obtidos como fator de eficiência ( $k$ ) 6,83, 5,33, 4,06, 3,01, 2,19 e 1,59, respectivamente;

$C_{sf}$  – consumo de sílica ativa, em kg/m³;

$C_{cim}$  – consumo de cimento Portland, em kg/m³;



$a$ ,  $b$  e  $c$  – constantes obtidas através da análise de regressão;

### **Equações obtidas com 1 dia:**

- Abrams: 
$$f_{c,1} = \frac{191,1600}{42,1237^{a/agl}} ; R^2 = 0,95796657$$

- Bhanja e Sengupta: 
$$f_{c,1} = \frac{3530,6150}{2657,2723^\beta} ; R^2 = 0,97580261$$

$$\beta = \frac{a}{agl} + \frac{0,0011}{6,1913} (C_{cim} + 5,33 \cdot C_{sf}) + \frac{1,5160}{71,8135} \left( \frac{5,33 \cdot C_{sf}}{C_{cim} + k \cdot C_{sf}} \right)$$

- Polinomial: 
$$f_{c,1} = -513,4565 \cdot (a/agl)^2 + 18,9627 \cdot \left( \frac{a}{agl} \right) + 104,3714 ; R^2 = 0,97580352$$

### **Equações obtidas com 3 dias:**

- Abrams: 
$$f_{c,3} = \frac{179,0779}{10,5374^{a/agl}} ; R^2 = 0,93337282$$

- Bhanja e Sengupta: 
$$f_{c,3} = \frac{1457,7993}{343,6515^\beta} ; R^2 = 0,96363667$$

$$\beta = \frac{a}{agl} + \frac{0,0006}{2,8635} (C_{cim} + 5,33 \cdot C_{sf}) + \frac{0,3299}{2,8635} \left( \frac{5,33 \cdot C_{sf}}{C_{cim} + k \cdot C_{sf}} \right)$$

- Polinomial: 
$$f_{c,3} = -875,2812 \cdot (a/agl)^2 + 251,5142 \cdot \left( \frac{a}{agl} \right) + 93,4853 ; R^2 = 0,96363668$$

### **Equações obtidas com 7 dias:**

- Abrams: 
$$f_{c,7} = \frac{179,9261}{7,5346^{a/agl}} ; R^2 = 0,88741343$$

- Bhanja e Sengupta: 
$$f_{c,7} = \frac{290,3917}{13,4927^\beta} ; R^2 = 0,88854008$$

$$\beta = \frac{a}{agl} + \frac{0,0001}{1,6946} (C_{cim} + 5,33 \cdot C_{sf}) + \frac{0,2966}{1,6946} \left( \frac{5,33 \cdot C_{sf}}{C_{cim} + k \cdot C_{sf}} \right)$$

- Polinomial: 
$$f_{c,7} = 5,5933 \cdot (a/agl)^2 - 213,7439 \cdot \left( \frac{a}{agl} \right) + 162,1451 ; R^2 = 0,88854010$$

### **Equações obtidas com 28 dias:**

- Abrams: 
$$f_{c,28} = \frac{214,2557}{7,4433^{a/agl}} ; R^2 = 0,87835987$$

- Bhanja e Sengupta: 
$$f_{c,28} = \frac{1103,5816}{110,4952^\beta} ; R^2 = 0,91214725$$

$$\beta = \frac{a}{agl} + \frac{0,0004}{1,8411} (C_{cim} + 5,33 \cdot C_{sf}) + \frac{0,2197}{1,8411} \left( \frac{5,33 \cdot C_{sf}}{C_{cim} + k \cdot C_{sf}} \right)$$

- Polinomial: 
$$f_{c,28} = -914,3598 \cdot (a/agl)^2 + 245,8377 \cdot \left( \frac{a}{agl} \right) + 127,7567 ; R^2 = 0,91214958$$