

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE PISOS CERÂMICOS

SELF-COMPACTING CONCRETE WITH LOW CEMENT CONSUMPTION WITH ADDITION POLISHING RESIDUE FOR CERAMIC FLOORS

André Freitas¹ Andrey Freitas² Danilo Maciel Rodrigues³ Lucas da Silva Barboza⁴

Resumo: O Concreto Autoadensável (CAA) deve apresentar alta fluidez, resistência à segregação e habilidade de passagem. Entretanto, para se atingir tais características é necessário maior consumo de aglomerante e adições, gerando um custo maior na fabricação do concreto. O presente trabalho tem como objetivo analisar as propriedades no estado fresco e endurecido do Concreto Autoadensável com Baixo Consumo de Cimento (CAABCC) com adição de resíduo de polimento de pisos cerâmicos. Para os métodos de ensaio, foram analisados 3 tipos de dosagens, sendo elas de 32%, 33% e 40% do volume de pasta, respectivamente. Os concretos estudados apresentam consumo de cimento entre 434 e 347 kg/m³, apresentando uma redução de até 20% do consumo de cimento em relação ao concreto de referência. As propriedades mecânicas analisadas foram: resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias. Foram realizados os ensaios no estado fresco: *slump-flow* test, funil-V e caixa L, no qual apresentou resultados que atenderam a ABNT NBR 15823:2017. Constatou-se que, independentemente das porcentagens de resíduo de polimento de pisos cerâmicos incorporada, houve uma melhoria nas propriedades mecânicas do concreto, mesmo com a redução do consumo de cimento. Conclui-se que o CAABCC atingiu elevada resistência e baixo consumo de cimento, atendendo aos parâmetros normativos, tanto no estado fresco quando no estado endurecido.

Palavras-chaves: Resistência à Compressão, Resíduos de Polidora, Concreto Autoadensável, Baixo Consumo de Cimento.

Abstract: Self-compacting concrete (SCC) must have high fluidity, resistance to segregation and ability to pass. However, to achieve these characteristics it is necessary to consume more binder and additions, generating a higher cost in the manufacture of concrete. The present work aims to analyze how properties in the fresh state and hardened state of the Self-compacting Concrete with Low Cement Consumption (SCCLCC) with the addition of polishing residues from ceramic floors. For the test methods, 3 types of dosages were analyzed, being 32%, 33% and 40% of the mass volume, respectively. The studied concretes present a cement consumption between 434 and 347 kg / m³, presenting a reduction of up to 20% in cement consumption in relation to the reference concrete. The following mechanical properties were analyzed: axial compressive strength, tensile strength by diametrical compression and dynamic elastic modulus at the ages of 3, 7, 28 and 91 days. For the tests in the fresh state, the tests were performed: *slump-flow* test, V-funnel and L-box, in which it presented results that comply with ABNT NBR 15823: 2017. It was found that, regardless of the percentages of residue of polishing of ceramic floors incorporated, there was an improvement in the mechanical properties of the concrete, even with the reduction of cement consumption. It is concluded that the SCCLCC achieved high resistance and low cement consumption, meeting the normative parameters, both in the fresh and in the hardened state.

Keywords: Compression Resistance. Polisher Waste. Self-compacting Concrete. Low cement consumption.

1 Introdução

A construção civil é uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social de um país, mas em contrapartida, apresenta-se como uma grande geradora de impactos ambientais, quer pelo consumo de recursos naturais ou pela geração de resíduos (JOHN, 2000). Segundo o Conselho Internacional da Construção (CIB, 2013), a construção civil é o setor de todas as atividades humanas que mais consomem recursos naturais. O consumo exagerado desses recursos sem alguma preocupação e sem limites vem gerando uma grande devastação ao meio ambiente. Esses resíduos são muitas vezes descartados na natureza sem receber um devido tratamento, gerando grandes impactos ambientais (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A quantidade de materiais que são gerados pela construção civil é em torno de 4 a 7 toneladas de resíduos por habitante por ano. Para reduzir a utilização de recursos naturais e diminuir os problemas ambientais, uma das soluções é a reciclagem de resíduos (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Um destes materiais é a cerâmica, oriunda da argila, da qual se originam os pisos cerâmicos. No Brasil, em 2018 a produção de pisos cerâmicos foi de 795 milhões de metros quadrados tendo uma perda de até 5%, e cerca de 90% deste material é descartado no meio ambiente sem nenhum tratamento (ANFACER, 2019). Este material quando moído apresenta composição físico-química dentro das diretrizes da ASTM C618:2019 que especifica, por exemplo, a adição mineral em misturas com cimento Portland.

A utilização deste material é uma alternativa interessante para agregar valor, diminuir os desperdícios e minimizar os impactos ambientais, fornecendo destinação favorável aos resíduos (SOUZA; ASSIS; SOUTO, 2014).

Uma forma de utilização destes resíduos é na produção de concreto, visando à sustentabilidade na construção civil, possibilitando assim, a produção de concretos com consumo de cimento relativamente baixo, contribuindo para a redução de impactos ambientais e econômicos, porém mantendo a resistência e a durabilidade do concreto (ALI; SAIDUR; HOSSAIN, 2011; LIMA, 2015).

Com novas pesquisas para a melhoria do concreto, se apresenta a possibilidade de inserir resíduos industriais em sua composição, com propriedades pozolânicas, para a redução de custos e impactos ambientais. Como no caso do Concreto Autoadensável (CAA), no qual se permite a utilização de resíduos industriais para a melhoria de suas propriedades. A utilização desses resíduos é uma alternativa viável para a diminuição do consumo de cimento e agregados (DINIZ, 2005).

O CAA se diferencia dos outros concretos, pois apresenta alta fluidez, coesão, resistência à segregação e ótimas habilidades de passagem, apresentando assim, menor tempo e energia para lançá-lo. O resultado é um concreto com ótimo acabamento e com baixa falha proveniente da má execução (OKAMURA, 1997; EFNARC, 2005; STORCH; BARBOZA; ALMEIDA FILHO, 2019).

Para garantir tais características no CAA é necessária uma maior quantidade de materiais finos, maior consumo de ligantes totais e adições para garantir a qualidade do produto, o que gera um custo maior na fabricação do concreto (SUKUMAR; NAGAMANI; RAGHAVAM, 2008; BARBOZA, 2018). O consumo de cimento para misturas de CAA podem apresentar valores entre 450 – 600 kg/m³ (EFNARC, 2005; STORCH; BARBOZA; ALMEIDA FILHO, 2019).

Diante desse contexto, o Concreto Autoadensável com Baixo Consumo de Cimento (CAABCC) apresenta resistências mecânicas diferentes em comparação com o Concreto Convencional (CC), mostrando que não é preciso um alto consumo de cimento para se atingir

boas resistências (BARBOZA, 2018). O CAABCC se diferencia do CC, pois com o emprego de aditivos e adições, possibilita sua aplicação em peças que são difíceis de se alcançar com elementos de concreto armado tradicional (BARBOZA, 2016). Além disso, com a presença de minerais ultrafinos, torna-se pouco poroso e pouco permeável à umidade (ALMEIDA FILHO, 2006).

Por ser autoadensável, tornando o uso de equipamento de vibração desnecessário, pode apresentar resistência elevada, o que eleva os níveis de desempenho, tais como: maior resistência à compressão, maior durabilidade, aumento da vida útil e resistência a corrosão (BARBOZA, 2016).

Pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de produzir um concreto autoadensável com baixo consumo de cimento. Gonçalves (2007) pesquisou as propriedades de concreto produzido com resíduos da indústria cerâmica. Os resíduos utilizados atendem as propriedades para sua utilização como material pozolânico e foram utilizadas na fração de 20% em substituição ao cimento. Segundo o autor, a presença do resíduo cerâmico não influenciou significativamente na resistência à compressão, na resistência à tração por compressão diametral e na resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias, independente da relação água/cimento.

Em sua pesquisa Lima (2015) utilizou Resíduo de Polimento de Porcelanato (RPP) que é produzido no final do processo de fabricação da cerâmica, decorrente da etapa de polimento, para produção de um CAA com utilização de cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI. Utilizando-se de adições de 10%, 20% e 40% de RPP. Segundo a autora, os resultados apontaram um aumento da resistência à compressão, atingindo a grandeza de aproximadamente 69 MPa com 40% de RPP aos 90 dias, enquanto o concreto de referência (concreto convencional) atingiu aproximadamente 38 MPa aos 91 dias. Demonstrando deste modo, a eficiência do resíduo, bem como a possibilidade de reduzir os impactos ambientais provocados pela construção civil utilizando-se de resíduos na produção do concreto.

Esta pesquisa tem como objetivo contribuir para os estudos de utilização do resíduo de polimento de pisos cerâmicos no CAA, fazendo substituição parcial do cimento pelo resíduo, sendo analisadas as propriedades mecânicas: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico. Deste modo, o que se pretende fazer é a incorporação deste resíduo reciclado (no qual foi moído) na produção de um concreto autoadensável com baixo consumo de cimento. Ressalta-se a importância desta pesquisa, pois se obtém um CAA com baixo consumo de aglomerantes, o que se apresenta vantajoso tanto economicamente quanto na busca do desenvolvimento sustentável.

2 Materiais e procedimento experimental

Para se atingir os objetivos específicos desta pesquisa, esta foi dividida em quatro partes: estudo bibliográfico, seguido da seleção e caracterização dos materiais, dosagem fundamentado no Método de Gomes (2002) e caracterização mecânica das amostras.

Os ensaios para a execução desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas do Centro Universitário Adventista de São Paulo – UNASP-EC. Os materiais utilizados para a produção do concreto autoadensável com baixo consumo de cimento estão ilustrados na Figura 1.



Figura 1. Materiais selecionados para a pesquisa

Fonte: Autores

2.1 Caracterização dos Materiais

Neste item, são apresentados os materiais que foram utilizados na produção do CAABCC com resíduo de polimento de pisos cerâmicos, Concreto Autoadensável de Baixo Consumo de Cimento de Referência (CAABCCR) e suas propriedades.

2.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento CP-V-ARI fabricado pela Votorantim. Foi escolhido esse cimento, pois ele tem a característica de atingir alta resistência inicial. Seguindo a ABNT NBR 16605:2017 a sua massa específica apresentou um resultado de 2,62 g/cm³.

2.1.2 Resíduo de polimento de pisoscerâmicos

Para o estudo, foi utilizado o resíduo de polimento de pisos cerâmicos, oferecido pela empresa Embramaco® de Santa Gertrudes – SP. Este material é obtido por meio da retificação dos pisos cerâmicos com o objetivo de nivelar e tirar as imperfeições dos pisos cerâmicos. Esse processo é feito por uma retifica com jateamento de água. NoQuadro 1 estão representadas as composições químicas deste material e noQuadro 2 estão representadas as composições físicas do material em análise.

Quadro 1 – Composições químicas do resíduo de polimento de pisos cerâmicos

Material	Resultados %
Perda ao Fogo	3,13
Dióxido de Silício (SiO ₂)	64,85
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	10,40
Óxido de Ferro II (Fe ₂ O ₃)	0,45
Dióxido de Titânio (TiO ₂)	0,30
Óxido de Cálcio-Cal Virgem (CaO)	9,97
Óxido de Magnésio (MgO)	1,95
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	2,00

Óxido de Potássio (K_2O)	2,30
Pentóxido de Fósforo (P_2O_5)	0,14
Óxido de Bário (BaO)	0,90
Óxido de Zinco (ZnO)	3,01
Óxido de Estrôncio (SrO)	0,61

Fonte: Adaptado da Empresa Embramaco(2020)

Quadro 2– Composições físicas do resíduo de polimentode pisos cerâmicos.

Determinação	Resultado
Tempo de Moagem	8 min
Peneira # 270	80,00%
Perda ao Fogo	7,77%
Densidade	1,44 g/cm ³
Viscosidade	Não Deflocula

Fonte: Adaptado da Empresa Embramaco(2020)

De acordo com oQuadro 1, a grande porcentagem desse resíduo tem sua formação feita por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Segundo a ABNT NBR 12653:2015 que classifica os materiais pozolânicos em classes, observou-se que o resíduo de polimentode pisos cerâmicos se classifica na classe N como argila calcinada e tem na sua composição uma quantidade de Dióxido de Silício (SiO_2) + Óxido de Alumínio (Al_2O_3) + Óxido de Ferro II (FeO_3) superior a 70%. O Óxido Sulfúrico (SO_3) está abaixo de 4%, o Óxido de Sódio (Na_2O) se apresenta um pouco acima de 1,5%, e apresenta uma perda ao fogo menor que 10%, com base na análise feita. Nota-se também, que a à presença de Óxido de Cálcio (CaO), componente essencial do cimento, que reagem com o SiO_2 e o Al_2O_3 formando silicatos de cálcio, o qual, reagirá quimicamente com a água.O resíduo de polimentode pisos cerâmicos é considerado pela ABNTNBR 12653:2015 um material pozolânico. Para um material ser considerado pozolânico, deve-se atender aos requisitos da Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos químicos.

Propriedades	Classe do Material Pozolânico		
	N	C	E
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	$\geq 50\%$
SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Perda de fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Álcalis disponível em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$

Fonte: ABNT NBR 12653:2015

2.1.3 Agregado miúdo

Foi selecionado apenas um tipo de agregado miúdo, a areia fina, proveniente da cava de rio. Para a determinação da composição granulométrica foi seguida a ABNT NBR 7217:1987. A dimensão máxima característica da areia fina é de 0,3 mm e módulo de finura igual a 0,82. Foi seguida as ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR NM 52:2009, no qual apresentou massa unitária de 1,46 kg/dm³ e massa específica de 2,44 kg/dm³, respectivamente.

2.1.4 Agregado graúdo

Foi selecionado apenas um tipo de agregado graúdo britado de origem basáltica. Para a determinação da composição granulométrica foi seguida a ABNT NBR 7217:1987. O agregado graúdo apresenta dimensão máxima característica de 9,5 mm e módulo de finura de 5,84. De acordo com as ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR NM 53:2009 apresentou massa unitária de 1,48 kg/dm³ e massa específica de 2,86 kg/dm³, respectivamente.

2.1.5 Aditivo superplastificante

A escolha do aditivo se deu pelo fato do material ser um potente redutor de água, sem alterar a consistência no estado fresco, garantindo maior fluidez e resistência. Tais características são fundamentais para a produção de concretos com baixo consumo de cimento e com baixa relação água/cimento.

Foi utilizado um único superplastificante, o aditivo ADVA TMCAST 525, fabricado pela empresa GRACE[®], à base de policarboxilato com consistência líquida, na cor laranja. Segundo o fabricante, apresenta massa específica de 1,06 kg/m³ e é isento de cloreto.

2.1.6 Sílica ativa

Foi utilizada apenas uma adição mineral: a sílica ativa produzida pela empresa TECNOSIL[®]. A sílica ativa possui diâmetro médio de 0,40 μ m e massa específica de 2,22 g/cm³.

2.2 Metodologia Experimental

Para esta pesquisa, a escolha da dosagem foi fundamentada na pesquisa de Gomes (2002). Este método foi alicerçado na otimização da composição da pasta e do esqueleto granular em separado.

Inicialmente, estabeleceu-se duas relações no estudo da pasta para se obter uma melhor dosagem, SP/C (Superplastificante/cimento) e R/C (Resíduo/cimento). Fixa-se então, uma relação A/C (água/cimento) de 0,4, posteriormente.

Segundo Gomes (2002), para garantir a fluidez de um CAA, o volume de pasta deve ser de 30% a 40% do volume de concreto. Para esta pesquisa foi utilizada um volume de pasta de 40% como Concreto Autoadensável com Baixo consumo de Cimento de Referência (CAABCCR), e com o objetivo de diminuir o consumo de cimento, foi utilizado o volume de pasta de 32 e 33% do volume de concreto. Foram adotados outros valores de pasta dentro do intervalo de 30% a 40%, porém, os valores que atenderam os critérios do estado fresco para um CAA foram os de 32%, 33% e 40%, e de acordo com a variação de pasta, encontram-se consumos de cimentos diferentes.

Com a dosagem determinada, foram inseridas as porcentagens de resíduo de polimento de pisos cerâmicos para os respectivos volumes de pasta. Para a execução da pesquisa foi utilizado um único tipo de cimento: CP-V ARI.

2.3 Dosagens

Para a dosagem do concreto de referência, foi seguida a ABNT NBR 12655:2015 respeitando o parâmetro de consumo de cimento, relação água/cimento e

resistência, que estabelece os limites exigidos para atender a classe de agressividade ambiental tipo II. Esses limites estabelecem um consumo de cimento de no mínimo 280 kg/m³, relação água/cimento de no máximo 0,60. Estes parâmetros devem ser seguidos simultaneamente. As dosagens para a elaboração do concreto autoadensável com baixo consumo de cimento com adição de resíduo de polimento de pisos cerâmicos atende a ABNT NBR 12655:2015.

O cimento utilizado foi o mesmo para o concreto de baixo consumo de cimento, assim como os outros materiais que irão compor o CAABCCR. No Quadro 3 está apresentada a composição do CAABCCR e no Quadro 4 os seus parâmetros de referência.

Quadro3 – Composição do CAABCCR

Materiais	CAABCCR- 40%
Cimento (kg/m ³)	434,05
Resíduo de Polidora (kg/m ³)	173,62
Sílica Ativa (kg/m ³)	43,40
Areia (kg/m ³)	641,95
Brita (kg/m ³)	962,93
Superplastificante (kg/m ³)	10,85
Água (kg/m ³)	173,62

Fonte: Autores, 2020.

Quadro4 – Parâmetro da dosagem do CAABCCR

Parâmetro	CAABCCR - 40%
Relação Água/cimento	0,40
Relação Resíduo/cimento	0,40
Volume de pasta (%)	40
Massa específica da pasta (kg/dm ³)	2,062
Consumo de cimento (kg/m ³)	434,05
Teor de superplastificante (%)	2,50

Fonte: Autores, 2020.

Foi adotado 10% de sílica ativa e 40% de resíduo de polimento de pisos cerâmicos como adições minerais, com o objetivo de redução do consumo de cimento que é o foco principal desta pesquisa. Estas porcentagens foram obtidas por meio dos ensaios de funil Marsh e Kantro, para determinar o abatimento e fluidez da pasta de cimento em misturas de concretos autoadensáveis.

Para o agregado graúdo e agregado miúdo foi determinado a composição ideal do esqueleto granular de acordo com o ensaio de empacotamento apresentado por Barboza (2018), sendo 60% de brita e 40% de areia fina.

Com esses parâmetros obteve-se as dosagens do concreto com baixo consumo de cimento com adição de resíduo de polimento de pisos cerâmicos. No Quadro 5 estão indicadas essas dosagens e no Quadro 6 estão indicados os parâmetros destas dosagens.

Quadro5 – Composição do concreto com baixo consumo de cimento

Materiais	CAABCC1 - 33%	CAABCC2 - 32%
Cimento (kg/m ³)	358,05	347,19
Resíduo de Polidora (kg/m ³)	143,22	138,88
Sílica Ativa (kg/m ³)	35,80	34,72
Areia (kg/m ³)	716,85	727,55
Brita (kg/m ³)	1075,25	1091,32
Superplastificante (kg/m ³)	16,76	17,36

Fonte: Autores, 2020.**Quadro 6** – Pârametros da dosagem do concreto com baixo consumo de cimento

Parâmetro	CAABCC1 - 33%	CAABCC2 - 32%
Relação Água/cimento	0,40	0,40
Relação Resíduo/cimento	0,40	0,40
Volume de pasta (%)	33,00	32,00
Massa específica da pasta (kg/dm ³)	2,062	2,062
Consumo de cimento (kg/m ³)	358,05	347,19
Teor de superplastificante (%)	4,68	5,00

Fonte: Autores, 2020.

2.3.1 Concreto no estado fresco

A mistura foi realizada em betoneira com capacidade de 400 litros, capacidade de mistura 320 litros e rotação do tambor de 28 Rpm, seguindo a mesma ordem de mistura para todos os tipos de dosagens.

Para a mistura, foi seguido o procedimento apresentado por Barboza (2018), na seguinte sequência: primeiro adiciona-se o agregado graúdo e mais $\frac{3}{4}$ da água de amassamento e mistura-se por 30 segundos. Depois se adiciona o cimento, a sílica ativa e o resíduo de polidora de cerâmica com o superplastificante e o restante da água e mistura-se por 120 segundos. E por fim, adiciona-se o agregado miúdo e mistura-se por mais 120 segundos.

A mistura foi submetida aos ensaios de estado fresco, sendo eles, *slump-flow test*, Funil-V e caixa L como é ilustrado na Figura 2. Em todos os ensaios não se realizou nenhum tipo de adensamento, além do peso próprio do concreto. Na Figura 3 pode-se observar aspectos dos concretos no estado fresco, no qual os concretos apresentaram alta fluidez, teor de argamassa adequado, bom aspecto de acabamento e não houve segregação dos materiais.

Nesta pesquisa atendeu-se as recomendações da ABNT NBR 15823:2017. No Quadro 7 estão apresentados os dados das características dos concretos em análise no estado fresco.



Figura 2. Ensaio de caracterização do concreto no estado fresco – a) Slump-flow test, b) caixa-L, c) Funil-V.

Fonte: Autores, 2020.



Figura 3. Aspecto dos concretos no estado fresco – a) CAABCCR; b) CAABCC1 e c) CAABCC2

Fonte: Autores, 2020.

Quadro 7 – Caracterização dos concretos.

Propriedades	Limites NBR 15823	CAABCCR - 40%	CAABCC1 - 33 %	CAABCC2 - 32%
Slump-flow, d_f (mm)	$550 \leq d_f \leq 850$	615	580	575
T_{500} (s)	>2	6"82	13"55	23"23
Caixa L, h_2/h_1^*	$\geq 0,80$	1,03	1,03	1,08
Caixa L, t_{20} (s)	-	2"48	2"88	5"58
Caixa L, t_{40} (s)	-	5"20	3"93	8"99
Funil V, t_v (s)	$9 \leq t_v \leq 25$	16"76	21"30	23"62

Fonte: Autores, 2020.

Depois da confirmação das propriedades no estado fresco, os corpos de prova foram moldados sem nenhum tipo de compactação. Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e retificados nas duas faces por meio de uma retifica de eixo vertical e posteriormente, permaneceram em cura submersa em água saturada com cal, até atingirem as idades dos ensaios.

3 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados e as análises da pesquisa experimental para os concretos de baixo consumo de cimento com adição de resíduo de polimento de pisos cerâmicos. No Quadro 8 está representado o tipo de ensaio realizado e o número de amostras para cada ensaio.

Quadro 8 – Tipo de ensaio e número de amostras.

Ensaio	Idades	Número de Amostras
Compressão axial	3, 7, 28 e 91 dias	12
Tração por compressão diametral	3, 7, 28 e 91 dias	12
Módulo de elasticidade dinâmico	3, 7, 28 e 91 dias	12

Fonte: Autores, 2020.

Os ensaios foram feitos em uma prensa universal servo-hidráulica de Classe I, com capacidade total de 1000 kN.

3.1 Resistência à compressão axial

O ensaio foi realizado em Corpos de Prova (CP) cilíndricos, de diâmetro de 10 x 20 cm de acordo com a ABNT NBR 5739:2018, com uma velocidade de carregamento constante de 0,5 MPa/s.

São apresentados nas tabelas 2 e 3 os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão axial.

Tabela 2 - Resultados do ensaio à compressão axial para o CAABCCR

	CAABCCR - 40%			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP	3	3	3	3
CP01	73,13	97,32	114,91	124,1
CP02	66,34	93,17	116,68	106,7
CP03	74,22	94,11	108,43	132,0
Média (MPa)	71,23	94,87	113,34	120,93
Desvio Padrão (MPa)	3,49	1,78	3,55	10,57
Coeficiente de Variação (%)	4,89	1,87	3,13	8,74

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 3 - Resultados do ensaio à compressão axial para os concretos de baixo consumo de cimento

	CAABCC1 - 33%				CAABCC2 - 32%			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP	3	3	3	3	3	3	3	3
CP01	63,85	85,93	110,72	139,7	59,44	98,1	107,18	126,6
CP02	61,47	62,98	110,57	124,1	61,46	91,35	101,81	125,2
CP03	60,79	72,22	108,78	135,3	56,67	80,2	121,58	124,01
Média (MPa)	62,04	73,71	110,02	133,03	59,19	89,883	110,19	125,27
Desvio Padrão (MPa)	1,31	9,43	0,88	6,57	1,96	7,38	8,35	1,06
Coeficiente de Variação (%)	2,11	12,79	0,80	4,94	3,32	8,21	7,58	0,84

Fonte: Autores, 2020.

Na Figura 4 se ilustram os corpos de prova submetidos à compressão axial. Todos os corpos de prova apresentaram o tipo de ruptura cônica.

**Figura 4.** Corpo de prova submetido à compressão axial**Fonte:** Autores, 2020.

3.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos, de diâmetro de 10 x 20 cm, e foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7222:2011, com velocidade de carregamento constante de 0,05 MPa/s. Nas tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral.

Tabela 4 – Resistência à tração por compressão diametral para o CAABCCR

	CAABCCR - 40%			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP	3	3	3	3
CP01	6,23	6,74	7,7	6,2
CP02	6,36	7,78	6,21	8,35
CP03	5,91	6,28	5,46	7,21
Média (MPa)	6,17	6,93	6,46	7,25
Desvio Padrão (MPa)	0,19	0,63	0,93	0,88
Coeficiente de Variação (%)	3,07	9,05	14,42	12,11

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 5 – Resistência à tração por compressão diâmetral para os concretos com baixo consumo de cimento com resíduo de polimento de pisos cerâmicos

	CAABCC1 - 33%				CAABCC2 - 32%			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP	3	3	3	3	3	3	3	3
CP01	5,01	6,11	8,54	6,88	4,85	6	7,83	7,34
CP02	4,5	6,45	7,87	7,39	5,08	6,96	8,92	10,09
CP03	4,98	6,78	5,82	7,77	4,64	7,07	5,64	9,09
Média (MPa)	4,83	6,45	7,41	7,35	4,86	6,68	7,46	8,84
Desvio Padrão (MPa)	0,23	0,27	1,16	0,36	0,18	0,48	1,36	1,14
Coeficiente de Variação (%)	4,84	4,24	15,62	4,96	3,70	7,20	18,27	12,86

Fonte: Autores, 2020.

Na Figura 5 está indicado o ensaio de um corpo de prova à tração por compressão diametral, no qual a força é aplicada com o auxílio de uma ferramenta de seção retangular, posicionadas nas duas faces diametralmente opostas do corpo de prova, provocando assim uma ruptura por tensão de tração.

**Figura 5** – Ensaio à tração por compressão diametral

Fonte: Autores, 2020

3.3 Módulo de elasticidade dinâmico

Nas tabelas 6 e 7 se mostram os resultados médios obtidos pelo ensaio do módulo de elasticidade dinâmico em GPa.

Tabela 6 – Módulo de elasticidade dinâmico para o CAABCCR

	CAABCCR - 40%			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP	3	3	3	3
CP01	44,49	48,46	50,44	49,93
CP02	43,92	47,96	50,7	51,0
CP03	43,27	47,29	50,06	50,0
Média (GPa)	43,89	47,90	50,40	50,31
Desvio Padrão (GPa)	0,50	0,48	0,26	0,49
Coeficiente de Variação (%)	1,14	1,00	0,52	0,97

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 7 – Módulo de elasticidade dinâmico para os concretos com baixo consumo de cimento

	CAABCC1 - 33%				CAABCC2 - 32%			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Número de CP	3	3	3	3	3	3	3	3
CP01	45,26	50,56	52,07	51,47	45,33	50,02	51,77	53,76
CP02	46,18	50,67	52,6	53,50	45,83	50,51	53,59	54,50
CP03	43,08	50,88	53,39	53,61	45,24	50,24	52,57	53,23
Média (GPa)	44,84	50,70	52,69	52,86	45,47	50,26	52,64	53,83
Desvio Padrão (GPa)	1,30	0,13	0,54	0,98	0,26	0,20	0,74	0,52
Coeficiente de Variação (%)	2,90	0,26	1,03	1,86	0,57	0,40	1,41	0,97

Fonte: Autores, 2020.

Na Figura 6 está ilustrado o aparelho utilizado para a realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico.



Figura 6 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

Fonte: Autores, 2020.

4 Análise dos resultados

Nesta seção será apresentada as análises dos resultados obtidos através dos ensaios realizados.

4.1 Resistência à compressão axial

De acordo com a Figura 7 pode-se analisar a evolução do ganho de resistência à compressão dos concretos estudados. Este ganho de resistência se dá devido a adição de resíduo de polimento de pisos cerâmicos ser muito fino, que segundo Okamura (1997), quanto mais finos forem as partículas, maior a sua capacidade de preenchimento de poros não preenchidos com os agregados graúdos, aumentando dessa forma, a densidade da mistura e consequentemente a sua resistência à compressão.

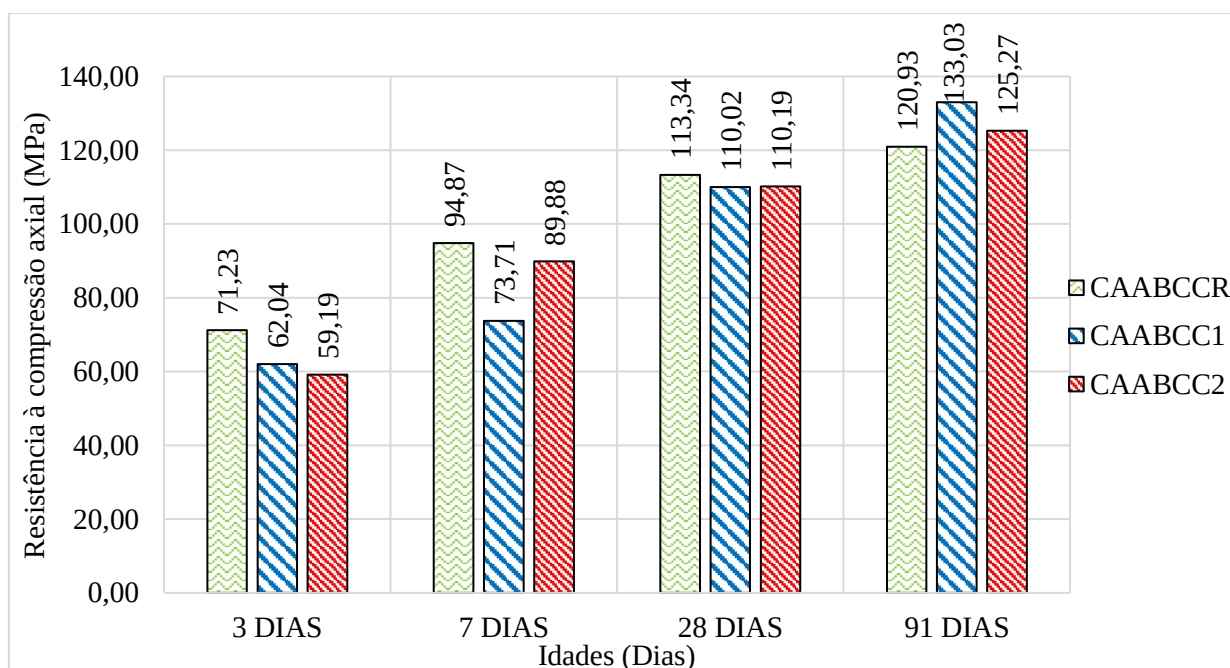


Figura 7 – Resultados de resistência à compressão axial

Fonte: Autores, 2020.

Pelisser, Vieira e Bernardin (2018) afirmam que misturas com diferentes distribuições granulométricas e com maiores índice de empacotamento, contribuem para a redução da porosidade e para o aumento da resistência à compressão.

Analisando-se os valores apresentados na Figura 7, observa-se que em todas as dosagens com o resíduo de polimento de pisos cerâmicos obtiveram-se elevada resistência à compressão axial aos 91 dias. E que o CAABCC1, com 33% do volume de pasta, teve um ganho de resistência de 10%, quando comparado ao CAABCCR.

Este comportamento superior dos concretos constituído com resíduo de polimento de pisos cerâmicos, para todas as substituições, pode ser justificado devido à grande porcentagem de silicato (SiO_2) e aluminato (Al_2O_3) na composição química do resíduo, nos quais ajudara na formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), tendo assim a capacidade de elevação da resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A grande presença de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e Óxido de Cálcio (CaO) no resíduo de polimento de pisos cerâmicos, ajudará na formação dos cristais de etringita, e ao reagirem, contribuirá na formação dos silicatos de cálcio hidratado (SANTOS, 2008).

De forma geral, o comportamento mecânico dos concretos estudados foi satisfatório e apresentou uma alta resistência à compressão aos 91 dias. Tal comportamento pode ser justificado pelo empacotamento eficiente entre os grãos utilizados, a relação água/cimento relativamente baixa e a adição empregada na mistura como o resíduo de polimento de pisos cerâmicos. Com relação à adição do resíduo, por apresentar em sua composição uma grande quantidade de Óxido de Cálcio, que é o componente essencial do cimento, no qual o Ca e O irá reagir quimicamente, contribuindo na formação do hidróxido de cálcio. O que consequentemente aumentará a sua resistência (SANTOS, 2008; NEVILLE, 2016).

Pelo fato do resíduo apresentar grandes porcentagens de dióxido de silício e óxido de alumínio, irá aumentar a resistência do concreto pela reação do SiO_2 , diminuindo as porcentagens de vazios, e a permeabilidade do concreto.

Conclui-se, que de forma geral, o aproveitamento de tal resíduo se torna viável como substituição parcial do cimento, sem causar danos na resistência do concreto. Neste contexto, indica-se a possibilidade de realizar o aproveitamento do resíduo de polimento de pisos cerâmicos gerado na própria indústria.

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Notam-se, de acordo com a Figura 8, que os concretos analisados apresentaram boa resistência. É possível concluir que a redução de cimento e a adição do resíduo de polimento de pisos cerâmicos não contribuirá para a perda de resistência à tração do concreto.

Pode-se justificar tal comportamento pelo fato que o concreto com baixo consumo de cimento apresenta uma diminuição da porosidade e maior índice de empacotamento. De acordo com Metha e Monteiro (2014), à medida que a resistência à compressão aumenta, a resistência à tração também aumenta. Segundo os mesmos autores, concretos com alto índice de empacotamento é possível obter uma resistência à tração elevada.

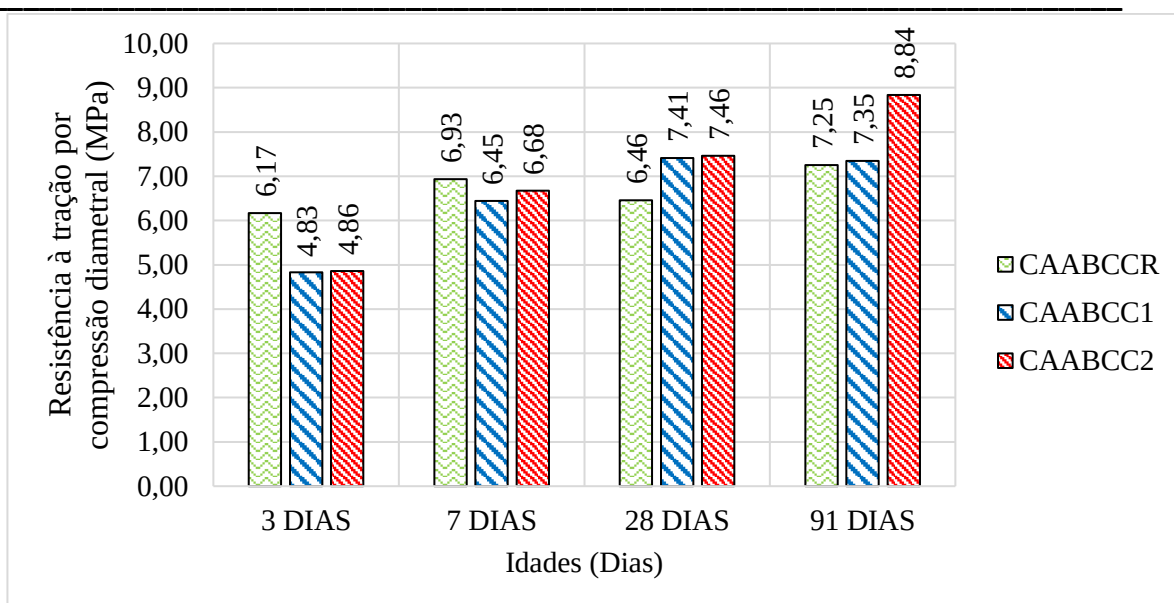


Figura 8 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral
Fonte: Autores, 2020.

4.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O CAABCC1 e o CAABCC2 apresentaram resultados maiores que o CAABCCR, no qual o módulo de elasticidade foi de 53 GPa aos 91 dias, enquanto o concreto autoadensável com baixo consumo de cimento de referência foi de 50 GPa para os mesmos 91 dias, tornando assim viável a redução de cimento com a adição do resíduo de polidora de cerâmica. Os resultados podem ser analisados na Figura 9.

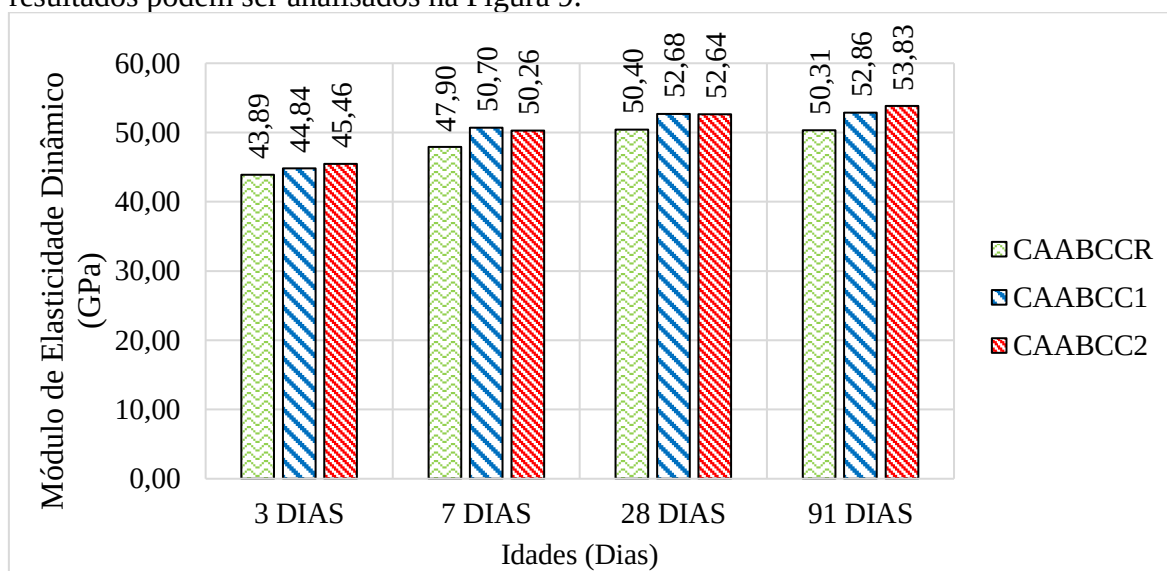


Figura 9 – Resultados de resistência do módulo de elasticidade dinâmico
Fonte: Autores, 2020.

Segundo Barboza (2018), a alta resistência é fruto do empacotamento e da baixa porosidade no concreto. O acréscimo de valores no módulo de elasticidade se dá devido a

características elásticas dos agregados. Nos concretos com baixo consumo de cimento tem-se uma maior quantidade de agregados, o que aumenta o módulo de elasticidade dos concretos.

Proske e Graubner (2005), afirmam que quanto maior a quantidade de agregado no concreto, maior será o módulo de elasticidade. Da mesma forma que a diminuição do volume de agregados e o aumento do volume de pasta, proporcionam uma diminuição no módulo de elasticidade. Desta forma, é possível afirmar que o CAABCC apresentará maior módulo de elasticidade pois apresenta maior quantidade de agregados.

5 Conclusão

Pelo resultado obtido nos ensaios no estado fresco do concreto, nota-se que todas as misturas com o resíduo de polimento de pisos cerâmicos atingiram os parâmetros conforme citado na ABNT NBR 15823:2017, no qual os concretos apresentaram bom aspecto de acabamento, fluidez e não houve segregação dos materiais.

Para as propriedades mecânicas do CAABCC, pode-se concluir que as amostras estudadas apresentaram ótimas resistências. É possível verificar, que o CAABCC2 que apresenta o menor volume de pasta e o menor consumo de cimento, apresentou resistência à compressão semelhante ao concreto de referência. De forma geral o CAABCC2 apresentou um resultado satisfatório e alta resistência à compressão aos 91 dias em função do consumo de cimento utilizado. Nota-se, que de acordo com o Quadro 3 e o Quadro 5, houve uma redução do consumo de cimento de aproximadamente 87 kg/m³ em comparação com o CAABCCR e o CAABCC2, provando que não é necessária uma grande quantidade de cimento para se atingir boas resistências.

Entretanto, ressalta-se a necessidade de realização de novos ensaios, como resistência à tração na flexão, absorção e ensaio de aderência, para verificar o comportamento do resíduo de polidora cerâmica no concreto.

Referências

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo. Ed. Edgard Blucher, v.5, 2011.

ANFACER, **Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica**. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/>. Acesso em: 30 Ago. 2019.

ALI, M.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 15, p. 2252-2261, 2011.

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos autoadensáveis**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 350p, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro: 2016.

_____. **NBR 5739:2018** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

_____. **NBR 7222:2011** Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

_____. **NBR 10004:2004** Classificação de resíduos sólidos.

_____. **NBR 15116:2014** Agregados reciclados de resíduos da construção civil.

_____. **NBR 16697:2018** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 7211:2005** Agregado para concreto.

_____. **NBR 13276:2005** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para determinação de índice de consistência.

_____. **NBR NM 67:1998** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

_____. **NBR NM 45:2006** Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR NM 52:2009** Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 53:2009** Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 248:2003** Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 15823:2017** Concreto autoadensável. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 12655:2015** Concreto de Cimento Portland: Preparo, controle e recebimento: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

_____. **NBR 12653:2015** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 16605:2017** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASTM C618-19, **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

BARBOZA, L. S. **Produção de concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e sua influência na aderência aço-concreto**. 2018. 263p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

CIB, Conselho Internacional da Construção. Disponível em: <http://www.ebc.com.br/conselho-internacional-da-construcao>. Acesso em: 27 ago. 2019.

DINIZ, F. E. G. **Utilização de resíduo cerâmico moído e adições industriais em compósitos cimentícios autoadensáveis**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

EFNARC, **European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete System**. Specification and guidelines for self-compacting concrete.s.I.: EFNARC, 2005.

GOMES, P. C. C. (2002) **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002.150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 60, n.4, p. 639-644, 2007.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LIMA, E. E. P. **Concreto autoadensável produzido com resíduo de polimento do porcelanato – comportamento em relação a corrosão de armaduras**. 2015. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª edição Brasileira. 4ª Edição em inglês. São Paulo. Brasil, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2016.

OKAMURA, H. (1997). **Self – compacting high-performance concrete**. Concrete Internatinal.Vol. 19, n.7, p. 50-54, 1997.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**. v. 175, p. 324-332, 2018.

PROSKE, T.; GRAUBNER, C. A. **Influence of the coarse aggregates on the concrete properties of SCC**, Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth RILEM, International Symposium on Self-Compacting Concrete, volume 1, Hanley Wood, LCC, Chicago, 2005.

SANTOS, M.L.L.O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008. 165p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SOUZA, L. M.; ASSIS, C. D.; SOUTO, S. B. G. Agregado reciclado: um novo material de construção. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Digital**, v.18, n.1, p.273-278, 2014.

SUKUMAR, B., NAGAMANI, K., RAGHAVAN, R.S., 2008. Evaluation of strength at early ages of self-compacting concrete with high volume flyash. **Construction Building Materials**. 22, 1394-1401.

STORCH, I. S. A.; BARBOZA, L. S.; FILHO, F. M. A. **Produção de concreto autoadensável com baixo consumo de cimento**. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO, 9., Foz do Iguaçu, 2019. Anais (2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade). Foz do Iguaçu, 2019. 9p.

TECNOSIL (2019). **Sílica Ativa** (Ficha técnica do produto). Disponível em: <http://www.tecnosilbr.com.br/produtos/>. Acesso em: 9 out. 2019.

VOTORANTIM (2019). Cimento Portland Composto (Ficha técnica do produto). Disponível em: <http://www.votorantimcimentos.com.br/hotsites/cimento/base.htm>. Acesso em: 9 out. 2019.