

# Ciência e Engenharia de Materiais

3

Marcia Regina Werner Schneider Abdala  
(Organizadora)



 **Atena**  
Editora

Ano 2018

**MARCIA REGINA WERNER SCHNEIDER ABDALA**

(Organizadora)

# **Ciência e Engenharia de Materiais**

## **3**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C569 Ciência e engenharia de materiais 3 [recurso eletrônico] / Marcia Regina Werner Schneider Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Ciência e Engenharia de Materiais; v. 3)

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-85-85107-65-9  
DOI 10.22533/at.ed.659183010

1. Engenharia. 2. Materiais I. Abdala, Marcia Regina Werner Schneider. II. Série.

CDD 620.11

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

Você já percebeu a importância dos materiais na sua vida diária? Os materiais estão provavelmente mais imersos na nossa cultura do que a maioria de nós imagina. Diferentes segmentos como habitação, saúde, transportes, segurança, informação/comunicação, vestuário, entre outros, são influenciados em maior ou menor grau pelos materiais.

De fato a utilização dos materiais sempre foi tão importante que os períodos antigos eram denominados de acordo com os materiais utilizados pela sociedade primitiva, como a Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, etc.

A humanidade está em constante evolução, e os materiais não são exceções. Com o avanço da ciência e da tecnologia a cada dia surgem novos materiais com características específicas que permitem aplicações pormenorizadas e inovação nas mais diferentes áreas.

Todos os dias centenas de pesquisadores estão atentos ao desenvolvimento de novos materiais e ao aprimoramento dos existentes de forma a integrá-los em tecnologias de manufatura economicamente eficientes e ecologicamente seguras.

Estamos entrando em uma nova era caracterizada por novos materiais que podem tornar o futuro mais fácil, seguro e sustentável. O campo da Ciência e Engenharia de Materiais aplicada está seguindo por novos caminhos. A iminente escassez de recursos está exigindo inovações e ideias criativas.

Nesse sentido, este livro evidencia a importância da Ciência e Engenharia de Materiais, apresentando uma coletânea de trabalhos, composta por quatro volumes, que permitem conhecer mais profundamente os diferentes materiais, mediante um exame das relações entre a sua estrutura, as suas propriedades e o seu processamento.

Considerando que a utilização de materiais e os projetos de engenharia mudam continuamente e que o ritmo desta mudança se acelera, não há como prever os avanços de longo prazo nesta área. A busca por novos materiais prossegue continuamente...

Boa leitura!

Marcia Regina Werner Schneider Abdala

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE AGREGADOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD PÓS-PROCESSADA PARA CONCRETOS SUSTENTÁVEIS	
<i>Bárbara Ponciano de Souza</i>	
<i>Wanna Carvalho Fontes</i>	
<i>José Maria Fontes de Carvalho</i>	
<i>Rosana Marcia de Resende Mol</i>	
<i>Ellen Cristine Pinto da Costa</i>	
<i>Ricardo André Fiorotti Peixoto</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>12</b>
ANÁLISE MICROESTRUTURAL E FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUO DE SEIXO PARA UTILIZAÇÃO COMO AGREGADO MIÚDO	
<i>Marco Antonio Barbosa de Oliveira</i>	
<i>Kleber Roberto Matos da Silva</i>	
<i>Vitória Santos Barroso</i>	
<i>José de Ribamar Mouta Araújo</i>	
<i>Marcelo de Souza Picanço</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>25</b>
PROPRIEDADES MECÂNICAS E MORFOLOGIA DA FRATURA DE CONCRETO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS DO PROCESSO DE RECAPAGEM	
<i>Fábio Santos de Sousa</i>	
<i>Edwillson Gonçalves de Oliveira Filho</i>	
<i>César Tadeu Nasser Medeiros Branco</i>	
<i>Laércio Gouvêa Gomes</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>33</b>
PLANEJAMENTO FATORIAL PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE AGREGADOS DE RESÍDUOS CIMENTÍCIOS	
<i>Jonath Oliveira do Nascimento</i>	
<i>Bruno Diego de Moraes</i>	
<i>Marcos Mattheus Lopes da Silva</i>	
<i>Felipe Lira Formíga Andrade</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>44</b>
ESTUDO DO EFEITO DA RADIAÇÃO UV EM COMPOSTOS DE POLIETILENO COM ADITIVOS OXI-BIODEGRADANTES	
<i>Caroline Henrique de Souza Borba</i>	
<i>Zora Ionara Gama dos Santos</i>	
<i>Raul Franklin Andrade Santos</i>	
<i>Grazielle Rozendo de Cerqueira</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>54</b>
USO DO PÓ DA PALHA DE CARNAÚBA COMO IMPERMEABILIZANTE EM TIJOLO DE SOLO-CIMENTO	
<i>Ana Raira Gonçalves da Silva</i>	
<i>Marília Pereira de Oliveira</i>	
<i>Marineide Jussara Diniz</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>61</b>
EVALUATION OF THE COLOR CHANGES IN ARTIFICIALLY AGED PINE	
<i>Tiago Hendriço de Almeida</i>	
<i>Diego Henrique de Almeida</i>	
<i>André Luis Christóforo</i>	
<i>Francisco Antonio Rocco Lahr</i>	

**CAPÍTULO 8 ..... 66**

COLORIMETRIC PARAMETERS OF BRAZILIAN TROPICAL WOOD SPECIES

*Diego Henrique de Almeida*  
*Tiago Hendrigo de Almeida*  
*Francisco Antonio Rocco Lahr*  
*André Luis Christoforo*

**CAPÍTULO 9 ..... 70**

ABSORÇÃO DE ÁGUA E CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DO RESÍDUO DE FIBRA DE PIAÇAVA MODIFICADO COM ÁGUA MORNA

*JanettyJany Pereira Barros*  
*Danusa de Araújo Moura*  
*Camila Gomes Moreno*  
*Fabiana de Carvalho Fim*  
*Eduardo Braga Costa Santos*  
*Lucineide Balbino da Silva*

**CAPÍTULO 10 ..... 82**

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO PROVENIENTE DA PRODUÇÃO DE BREU E TEREBINTINA A PARTIR DA GOMA RESINA DE *PINUS SP.* E IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS ADVINDAS DA SUA UTILIZAÇÃO PARA FINS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

*Juliana Esteves Fernandes Cieslinski*

**CAPÍTULO 11 ..... 93**

ESTUDO DA INTEGRIDADE E DURABILIDADE DE MATERIAIS ESTABILIZADOS POR SOLIDIFICAÇÃO CONTENDO LODO DE CURTUME

*Maria Rosiane de Almeida Andrade*  
*Marília Claudino Moreira Cunha*  
*André Luiz Fiquene de Brito*  
*Ana Cristina Silva Muniz*  
*Bianca Viana de Sousa Barbosa*  
*Carlos Eduardo Pereira*

**CAPÍTULO 12 ..... 104**

TESTE DE ATIVIDADE E EFICÁCIA DE AGENTES BIOCIDAS EM TINTA ACRÍLICA

*Túlio Valério Agostinho da Silva*  
*Sara Horácio de Oliveira*  
*Magda Rosângela Santos Vieira*  
*Ildnay de Souza Lima Brandão*

**CAPÍTULO 13 ..... 112**

ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA FIBRA CALOTROPIS PROCERA E SUA POTENCIAL APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE HIDROCARBONETOS E DERIVADOS

*Anaxmandro Pereira da Silva*  
*Erick Buonora Tabosa do Egíto*  
*Késia Karina de Oliveira Souto Silva*  
*Rasiah Ladchumananandasivam*  
*José Heriberto Oliveira do Nascimento*  
*Ana Rita Leandro dos Santos*

**CAPÍTULO 14 ..... 118**

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POZOLÂNICO DA MICROSSÍLICA COM ALTO TEOR DE CARBONO: ANÁLISE QUÍMICA, MINERALÓGICA E MECÂNICA

*Ruan Landolfo da Silva Ferreira*  
*Marcos Alyssandro Soares dos Anjos*  
*Andreza Kelly Costa Nóbrega*

**CAPÍTULO 15..... 129**

INFLUÊNCIA DA IMPREGNAÇÃO CONTRA DEMANDA BIOLÓGICA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MADEIRAS DE CEDROARANA (*CEDRELINGA CATENAEFORMIS*)

*Andréa de Souza Almeida*

*Tiago Hendrigo de Almeida*

*Francisco Antonio Rocco Lahr*

*André Luis Christoforo*

**CAPÍTULO 16..... 139**

ESTUDO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM EFLUENTES REFRAATÓRIOS POR PROCESSO FENTON PARA DEGRADAÇÃO E MINERALIZAÇÃO DESSES COMPOSTOS EM REATOR DE ESCALA LABORATORIAL MODELO PARR

*Camila Freire Berenguer*

*Yana Batista Brandão*

*Mohand Benachour*

**CAPÍTULO 17 ..... 156**

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ÓLEOS DE TRANSFORMADORES POR ESPECTROSCOPIA FTIR/ATR E ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

*Isabela Nogueira*

*Maísa Maciel Machado Santos*

*Thiago Arantes Nogueira*

*Estácio Tavares Wanderley Neto*

*Credson de Salles*

*Tessa Martins de Carvalho Carneiro*

*Álvaro Antônio Alencar de Queiroz*

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 171**

## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL POZOLÂNICO DA MICROSSÍLICA COM ALTO TEOR DE CARBONO: ANÁLISE QUÍMICA, MINERALÓGICA E MECÂNICA

**Ruan Landolfo da Silva Ferreira**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRN  
Natal – RN

**Marcos Alyssandro Soares dos Anjos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba  
João Pessoa – PB

**Andreza Kelly Costa Nóbrega**

Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Angicos – RN

**RESUMO:** A utilização de adições minerais contribui para melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade de compósitos cimentícios, tais como concretos e argamassas. Permitem ainda, reduzir a produção do clínquer, o que minimiza o impacto ambiental causado pela produção do cimento e a geração de resíduos industriais. Assim, este artigo visa avaliar a potencialidade da utilização de microssílica de alto teor de carbono como material pozolânico, com base nos requisitos da NBR 12653/2015. As técnicas de fluorescência de raios X (FRX), difração de raios-X (DRX) e resistência à compressão de argamassas de cal e cimento (aos 7 e 28 dias, respectivamente), foram utilizadas para avaliar o potencial pozolânico. Os resultados indicaram que a microssílica de alto teor de carbono possui estrutura amorfa

e elevado percentual de dióxido de silício. Os difratogramas das argamassas indicaram a presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), justificando as maiores resistências à compressão das argamassas com o material analisado, especialmente quando o cimento foi utilizado como aglomerante. Desta forma, a adição mineral utilizada nesta pesquisa pode ser considerada como um material pozolânico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Adições minerais, atividade pozolânica, microssílica.

**ABSTRACT:** The use of mineral additives contributes to the improvement of the mechanical and durability properties of cementitious composites, such as concretes and mortars. They also reduce clinker production, which minimizes the environmental impact caused by the production of cement and the generation of industrial waste. Thus, this article aims to evaluate the potential of the use of high carbon silica fume as pozzolanic material, based on the requirements of NBR 12653/2015. X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) and compressive strength of lime and cement mortars (at 7 and 28 days, respectively) were used to evaluate pozzolanic potential. The results indicated that the high carbon silica fume has an amorphous structure and a high percentage of silicon dioxide. The diffractograms of the mortars indicated the presence of calcium

silicate hydrate (C-S-H), justifying the higher compressive strength of the mortars with the analyzed material, especially when the cement was used as a binder. In this way, the mineral addition used in this research can be considered as a pozzolanic material. **KEYWORDS:** Mineral additions, pozzolanic activity, silica fume.

## 1 | INTRODUÇÃO

O consumo dos recursos naturais tem aumentado proporcionalmente ao crescimento urbano e ao desenvolvimento dos setores econômicos. Como resultado, são gerados grandes impactos, muitas vezes irreversíveis, ao meio ambiente.

O alto consumo de energia e de matérias-primas, bem como as elevadas emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção do cimento Portland, têm preocupado a sociedade sobre a sustentabilidade do seu uso em concreto (KOTENG; CHEN, 2015), que continua a ser uma força motriz essencial para o desenvolvimento humano (GRIST *et al.*, 2015) em função de sua elevada produção que gira em torno de 2 milhões de toneladas anualmente (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011).

Por outro lado, a produção de 1 tonelada de cimento Portland emite 0,94 toneladas de CO<sub>2</sub>, consome mais de 1,5 toneladas de matérias primas e 2,93-6,28GJ (gigajoule) de energia térmica, além de 65 a 141kWh de energia elétrica (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2017; STAFFORD *et al.*, 2016). Estima-se ainda, que são emitidos quase dois bilhões de toneladas de dióxido de carbono por ano, o que representa de 6 a 7% do total de emissões de CO<sub>2</sub> no planeta (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011). Além disso, são consumidos cerca de 10 a 11 EJ (exajoule) de energia por ano, o correspondente a cerca de 2 a 3% do consumo de energia primária global (JUENGER *et al.*, 2011).

O aumento dos custos de combustível, as metas de redução de carbono e a crescente demanda por alternativas mais sustentáveis estão impulsionando os fabricantes de cimento a buscar mudanças e a criação de novas tecnologias e produtos (GRIST *et al.*, 2015).

Com o adequado controle de qualidade, grandes quantidades de muitos resíduos industriais podem ser utilizadas em concretos e argamassas, em forma de adições minerais, proporcionando considerável ganho ambiental e econômico, como a minimização do impacto causado pela emissão de gases poluentes, decorrentes da fabricação do cimento, e redução consumo desordenado dos recursos naturais (KOTENG; CHEN, 2015). À exemplo disto, tem-se a sílica ativa, também chamada de microssílica, que é um subproduto da indústrias de silício metálico e ligas de ferrosilício (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NOCHAIYA; WONGKEO; CHAIPANICH, 2010).

A microssílica é constituída por partículas esféricas de dióxido de silício amorfo e é um material altamente reativo (GRIST *et al.*, 2015), podendo melhorar significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade dos materiais cimentícios, dado o seu efeito pozolânico e de empacotamento da mistura (WU; SHI; KHAYAT, 2016).

Além dos aspectos ambientais, a adição de pozolanas em materiais cimentícios, proporciona alguns benefícios, tais como: aumento da durabilidade da estrutura, melhoria das propriedades mecânicas, diminuição do consumo do aglomerante hidráulico por ser um dos insumos de mais alto custo em uma obra e o proporciona um destino adequado aos resíduos, uma vez que grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais e cujo destino é o aterro sanitário (CARMO; PORTELLA, 2008).

O uso de microssílica constitui uma argamassa mais homogênea, por reduzir a espessura da zona de transição interfacial, pelo consumo de hidróxido de cálcio. Além de minimizar a retração e o aparecimento de microfissuras, por reduzir o calor das reações de hidratação. A finura das partículas proporciona o preenchimento de vazios, o que torna a argamassa mais compacta devido ao efeito fíler (JAWAHAR *et al.*, 2013).

Neste sentido, o presente trabalho pretende avaliar o efeito da utilização de microssílica com alto teor de carbono como material pozolânico segundo as prescrições da NBR 12653 (ABNT, 2015).

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado cimento CP II F-32, cal hidratada do tipo CH-I, areia normal produzida conforme a NBR 7214 (ABNT, 2015a) e microssílica de alto teor de carbono fornecida pela empresa Elken. Nas Tabelas 1 e 2, verificam-se, respectivamente, as massas específicas e a composição química dos materiais utilizados para produção das argamassas.

Materiais	Massas específicas (g/cm <sup>3</sup> )*
CP II F-32	2,93
Cal CH I	2,64
Areia normal	2,62
Microssílica	2,00

Tabela 1. Massas específicas dos materiais utilizados na pesquisa.

\* Para os aglomerantes utilizou-se a NBR NM 23 (ABNT, 2001) e para os agregados a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Óxidos	Composição (%)		
	Cimento	Cal	Areia normal
SiO <sub>2</sub>	14,71	0,79	65,50
CaO	68,68	97,66	4,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,41	0,38	12,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,35	0,37	8,99
MgO	2,70	-	0,80

SO <sub>3</sub>	5,48	0,15	-
K <sub>2</sub> O	1,26	0,48	3,51
Outros	0,41	0,17	2,13

Tabela 2. Composição química por FRX dos materiais utilizados.

## 2.2. Produção das Argamassas

Para avaliação do índice de atividade pozolânica (IAP), com a cal e com o cimento, formulou-se três argamassas que foram definidas nesse estudo, como argamassa de cal (ARGCAL), argamassa de cimento, sendo uma de referência (ARGCIM-REF) e outra com a microssílica de alto teor de carbono (ARGCIM-M). Moldaram-se, para cada argamassa, seis corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015b) e a NBR 5752 (ABNT, 2014). As proporções em massa de cada material são apresentadas na Tabela 3.

Materiais	Quantidade (g)		
	ARGCAL	ARGCIM-REF	ARGCIM-M
Cimento	-	628,0	468,0
Cal	208,0	-	-
Areia normal	1872,0	1872,0	1872,0
Microssílica	315,2	-	156,0
Água	621,4	302,0	302,0
Aditivo superplastificante (SIKAMENT PF 171)	-	-	6,3

Tabela 3. Quantidade, em massa, dos materiais utilizados para confecção das argamassas.

A quantidade de água estabelecida para a ARGCAL corresponde a um índice de consistência de  $(225 \pm 5)$  mm. Para manter a consistência da ARGCIM-M com uma variação de  $\pm 10$  mm em relação a consistência da ARGCIM-REF, foi necessário utilizar um aditivo superplastificante. A dosagem foi de 1,0% sobre o peso do cimento e da adição mineral estudada. Tem-se na literatura (MEHTA; MONTEIRO, 2008) o conhecimento sedimentando de que a microssílica demandada elevadas quantidades de água para a realização da mistura, justificando o uso do aditivo superplastificante.

A mistura das argamassas seguiu as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 1997), na qual inicialmente, adiciona na cuba do misturador toda a água e o cimento e, em seguida, adiona a areia normal. No caso da argamassa com a cal, a água foi adicionada gradativamente a fim de se verificar sua consistência, de modo a não ultrapassar os limites estabelecidos pela referida norma.

A cura dos corpos de prova com a cal foi realizada no próprio molde, sendo realizado encamisamento com látex na parte superior, e envolvido com filme plástico transparente. Durante as primeiras 24 horas, os corpos de prova foram mantidos a temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C, contidos em recipiente plástico com água e envolvido

com filme plástico transparente. Durante as 144 horas posteriores, os corpos de prova foram mantidos em cura úmida aquecida a temperatura de 55 °C.

Para os corpos de prova com cimento, a cura nas primeiras 24 horas, também foram nos moldes com proteção em sua superfície. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em reservatório com água saturada de cal, durante 28 dias.

### 2.3. Análise Química por Frx

As análises químicas dos materiais estudados foram realizadas por FRX através do método semiquantitativo e sob atmosfera à vácuo. Para tanto, utilizou-se o equipamento do fabricante SHIMADZU, modelo EDX-720.

### 2.4. Análise Mineralógica por Drx

Para a análise mineralógica por DRX da microssilica e das argamassas à base de cal e cimento, utilizou-se o equipamento modelo XRD-6000 (SHIMADZU). As amostras foram submetidas às seguintes condições de análise: radiação  $K\alpha$  de um anodo de cobre igual a  $1,54056\text{\AA}$ , com voltagem de 30 kV e corrente de 30 mA, com ângulo de difração  $2\theta$  no intervalo de  $5-55^\circ$  com velocidade angular de  $5^\circ/\text{min}$  e  $0,02^\circ$  de intervalo de amostragem. Após o rompimento dos corpos de prova das argamassas, retirou-se amostras que foram previamente destorroadas com o auxílio de um almofariz de porcelana e, em seguida, submetidas ao peneiramento na peneira 200 ( $75\ \mu\text{m}$ ) para obtenção do material a ser analisado.

### 2.5. Análise Mecânica

Avaliou-se a resistência à compressão das argamassas com a cal (ARGCAL), aos 7 dias. Os corpos de prova com cimento (ARGCIM-REF e ARGCIM-M), foram avaliados aos 28 dias. Todos os corpos de prova foram secos ao ar e capeados com enxofre. O ensaio foi realizado em prensa universal com carga de compressão a velocidade de  $0,25\ \text{MPa/s}$ , conforme as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1997).

O IAP, com a cal, é atingido quando a resistência à compressão do composto é maior ou igual a  $6,0\ \text{MPa}$ . O índice de desempenho com o cimento (IDC) é definido pela razão entre a média das resistências dos corpos de prova moldados com cimento e adição mineral ( $f_{cB}$ ) e a média das resistências dos corpos de prova moldados, apenas, com cimento ( $f_{cA}$ ), conforme a Equação 1.

$$IDC = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} 100 \quad (1)$$

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Requisitos Químicos

A composição química da amostra de material pozolânico (microsílica), determinados por FRX, são apresentadas na Tabela 4. A microsíllica apresenta percentuais de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de 90,33%, 1,21% e 1,10%, respectivamente, cujos valores superam o mínimo estabelecido por norma, que é de 50%. O percentual de  $\text{SO}_3$  também satisfaz o valor máximo de 5% exigido, atendendo, assim, às especificações químicas exigidas pela NBR 12653 (ABNT, 2015) para que uma amostra seja considerada material pozolânico pertencente à classe E.

Composição	Teor (%)	Requisitos da NBR 12653: Pozolana Classe E
$\text{SiO}_2$	90,33	
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,21	$\geq 50\%$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,10	
$\text{SO}_3$	0,96	$\leq 5\%$
$\text{Na}_2\text{O}$	1,0	$\leq 1,5\%$
$\text{K}_2\text{O}$	1,66	-
CaO	0,15	-
Outros	3,59	-

Tabela 4. Composição química por FRX da microsíllica

Além disso, os elevados percentuais de  $\text{SiO}_2$ , indicam uma provável atividade pozolânica, visto que elevados teores de sílica são desejáveis em materiais ativos e tem papel importante, pois ao longo do tempo, tem-se reações que formam os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, responsáveis pela resistência mecânica desenvolvida.

### 3.2. Análise Mineralógica

Com a análise de DRX, pode-se verificar que no difratograma (Figura 1) que as amostras de material pozolânico apresentaram característica amorfa, ausente de picos característicos, o que pode contribuir para que ocorram as reações pozolânicas.

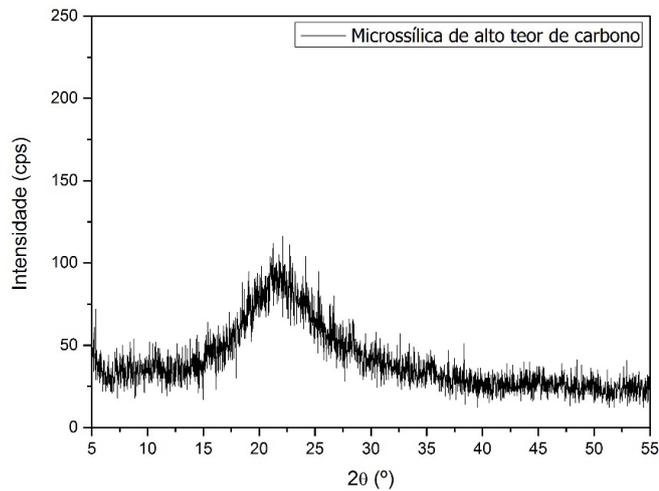


Figura 1. Difratograma da microssílica de alto teor de carbono.

As características que delimitam as adições minerais são de acordo com a sua granulometria (quanto mais finas as partículas, mais reativo será o material), a cristalinidade de origem e o grau de amorfização (quanto mais amorfo, maior a reatividade). Dessa forma, os resultados do DRX mostram, do ponto de vista de estrutura intermolecular, que a microssílica de alto teor de carbono apresenta potencial para que as reações pozolânicas ocorram.

### 3.3. Requisitos Mecânicos

Os resultados do índice de atividade pozolânica com cal e com o cimento, encontrados para as amostras de material analisado, estão apresentados na Figura 2. As ARGCAL apresentaram resistência média aos 7 dias de 4,42 MPa, sendo inferior a 6,0 MPa, isto é, aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015) para que o material analisado seja considerado como pozolânico com a cal.

No difratograma da argamassa de cal com a microssílica de alto teor de carbono (Figura 3) é possível verificar a ausência de picos de portlandita, o que indica a sua provável atividade pozolânica, decorrente da reação com  $\text{SiO}_2$  na formação do C-S-H.

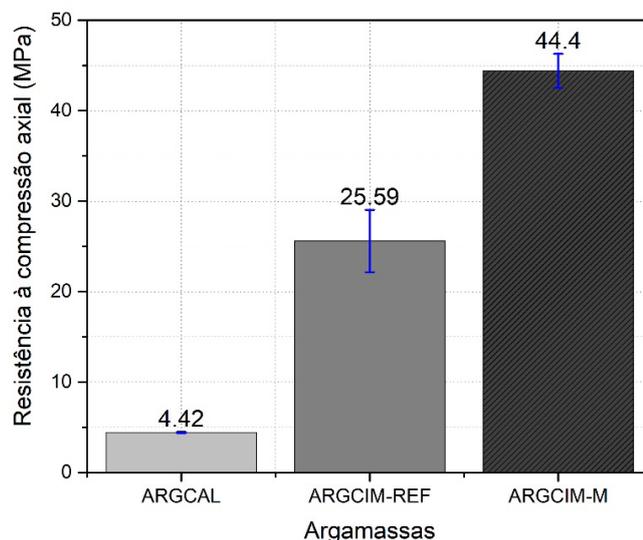


Figura 2. Resistência à compressão axial das argamassas de cal e cimento com a microsilica de alto teor de carbono.

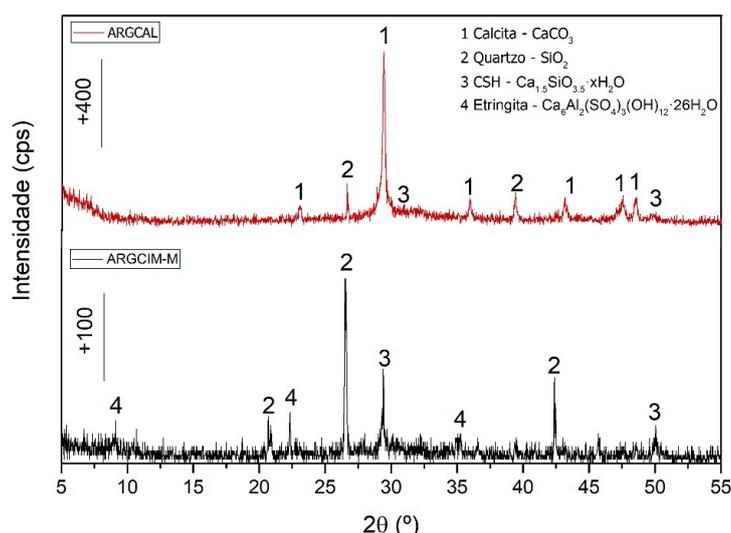


Figura 3: DRX das argamassas de cal (ARGCAL) e cimento (ARGCIM-M) com microsilica.

Deve-se ressaltar que a elevada quantidade de água requerida pela mistura da argamassa de cal com a microsilica, possivelmente, influenciou para a não evolução da resistência mecânica das argamassas. Sabe-se que a adição de microsilica melhora tanto a resistência mecânica como a durabilidade do material. Entretanto, como a sílica é constituída por um alto teor de finos implica numa grande quantidade de água requerida. Dessa forma, esta adição pode ser combinada com outras para amenizar esse efeito na mistura, ou com dosagens específicas de superplastificantes que não interfiram nos resultados finais (NEPOMUCENO; OLIVEIRA; LOPES, 2012).

As resistências médias obtidas pelas ARGCIM-REF foram de 25,59 MPa e de 40,40 MPa para as ARGCIM-M (Figura 2), ressaltando que as amostras que apresentaram desvio relativo máximo superior a 6% foram desconsideradas no cálculo das resistências médias, assim como recomenda a NBR 7215 (ABNT, 1997). Dessa

forma, obteve-se um IDC de 173,5%, sendo significativamente superior ao requerido pela NBR 12653 (ABNT, 2015), que é de no mínimo 90%, o que corrobora com o observado no difratograma da argamassa de cimento com a microssílica (Figura 3), devido a presença dos picos de C-S-H e etringita, responsáveis, respectivamente, pela reação pozolânica e elevada resistência mecânica.

O alto teor de sílica com comportamento amorfo e partículas extremamente finas das adições minerais proporciona melhorias na microestrutura das argamassas. Em razão do refinamento dos poros, a matriz se torna mais densa, o que contribui para a diminuição da porosidade e permeabilidade e, por consequência, fortalece a zona de transição interfacial da matriz, promovendo um ganho na resistência a compressão (SABET; LIBRE; SHEKARCHI, 2013; SHAIKH; SUPIT, 2015; JALAL *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2015).

O acréscimo na propriedade mecânica ocorre devido a formação adicional de C-S-H. Durante o processo de hidratação do cimento, o excesso de hidróxido de cálcio reage com a pozolana. No caso da argamassa de referência, como não ocorre esta reação, o acúmulo de hidróxido de cálcio na zona de transição enfraquece as ligações entre a pasta e o agregado, reduzindo assim a resistência mecânica em comparação com a argamassa com substituição de microssílica. Devido a lentidão das reações pozolânicas, tais melhorias tornam-se mais perceptível em idades posteriores (LEUNG *et al.*, 2016).

#### 4 | CONCLUSÕES

Com o objetivo de avaliar a potencialidade pozolânica da microssílica de alto teor de carbono, conclui-se que:

- A microssílica de alto teor de carbono é bastante reativa, especialmente com o cimento, justificada por sua composição química (elevado teor de  $\text{SiO}_2$ ) e mineralógica (perfil amorfo);
- Os resultados obtidos no estado endurecido, por meio das resistências mecânicas, demonstram que a microssílica de alto teor de carbono atinge os parâmetros mínimos para o índice de desempenho com a cal e para o índice de desempenho com o cimento;
- Tais resultados, corroboraram com as micrografias das argamassas de cal e cimento, visto que houve formação de C-S-H.

Dessa forma, obtém-se que a microssílica de alto teor de carbono utilizada nesta pesquisa, atende os requisitos estabelecidos por norma e, portanto, pode ser considerada como um material pozolânico bastante reativo, sobretudo, em misturas com o cimento.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 12653: **Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. NBR 5751: **Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.
- ABNT. NBR 5752: **Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ABNT. NBR 7214: **Areia normal para ensaio de cimento – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.
- ABNT. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ABNT. NBR NM 23: **Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ABNT. NM 52: **Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Norma Mercosur. Rio de Janeiro, 2009.
- CARMO, J. D.; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**. *Cerâmica*, v. 54, n. 331, p. 309-318, 2008.
- GRIST, E. R. *et al.* **The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes**. *Journal of Cleaner Production*, v. 93, p. 26-37, 2015.
- JALAL, M. *et al.* **Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 90-104, 2015.
- JAWAHAR, J. G. *et al.* **Micro and macrolevel properties of fly ash blended self compacting concrete**. *Materials & Design*, v. 46, p. 696-705, 2013.
- JUENGER, M. C. G. *et al.* **Advances in alternative cementitious binders**. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1232-1243, 2011.
- KOTENG, D. O.; CHEN, C. **Strength development of lime–pozzolana pastes with silica fume and fly ash**. *Construction and Building Materials*, v. 84, p. 294-300, 2015.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. **Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders**. *Construction and Building Materials*, v. 26, n. 1, p. 317-326, 2012.
- NOCHAIYA, T.; WONGKEO, W.; CHAIPANICH, A. **Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete**. *Fuel*, v. 89, n. 3, p. 768-774, 2010.
- PACHECO-TORGAL, F. **Criação de startups de alta tecnologia para ambientes construídos com eficiência energética**. *Revisões de Energia Renovável e Sustentável*, v. 71, p. 618-629, 2017.

SABET, F. A.; LIBRE, N. A.; SHEKARCHI, M. **Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash.** Construction and Building Materials, v. 44, p. 175-184, 2013.

SHAIKH, F. U. A.; SUPIT, S. W. M. **Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles.** Construction and Building Materials, v. 99, p. 208-225, 2015.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. **New cements for the 21st century:** the pursuit of an alternative to Portland cement. Cement and concrete research, v. 41, n. 7, p. 750-763, 2011.

STAFFORD, F. N. *et al.* **Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study.** Journal of Cleaner Production, v. 126, p. 159-165, 2016.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. **Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC).** Cement and Concrete Composites, v. 71, p. 97-109, 2016.

ZHAO, H. *et al.* **The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures.** Journal of Cleaner Production, v. 95, p. 66-74, 2015.

## **SOBRE A ORGANIZADORA:**

**Marcia Regina Werner Schneider Abdala:** Mestre em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Graduada em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui experiência na área de Educação a mais de 06 anos, atuando na área de gestão acadêmica como coordenadora de curso de Engenharia e Tecnologia. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se a atuação como professora de ensino superior atuando em várias áreas de graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Atuou como inspetora de Aviação Civil, nas áreas de infraestrutura aeroportuária e segurança operacional em uma instituição federal.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-65-9

