

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE PÓS- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Luigi Teixeira Bavuzo

**DESEMPENHO DE COMPÓSITOS ÁLCALI - ATIVADOS REFORÇADOS COM  
FIBRA DE PVA**

BELO HORIZONTE

2017

**LUIGGI TEIXEIRA BAVUZO**

**DESEMPENHO DE COMPÓSITOS ÁLCALI - ATIVADOS  
REFORÇADOS COM FIBRA DE PVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Prof. Paulo Henrique Ribeiro Borges

Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. White José dos Santos

Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG

Prof. Conrado de Souza Rodrigues

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Belo Horizonte, 24 de Agosto de 2017

B353d Bavuzo, Luiggi Teixeira  
Desempenho de compósitos álcali - ativados reforçados com fibra de PVA / Luiggi Teixeira Bavuzo. – 2017.  
ix, 60 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.  
Orientador: Paulo Henrique Ribeiro Borges.  
Banca examinadora: Paulo Henrique Ribeiro Borges, White José dos Santos, Conrado de Souza Rodrigues.  
Bibliografia: f. 53-60.  
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

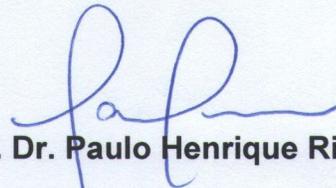
1. Reações agregadas alcalinas – Teses. 2. Cimento reforçado com fibras – Teses. 3. Acetato de vinila – Teses. I. Borges, Paulo Henrique Ribeiro. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 668.9

**Luigi Teixeira Bavuzo**

**Desempenho de compósitos álcali-ativados  
reforçados com fibra de PVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil



**Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges**  
Orientador  
Departamento de Engenharia Civil/CEFETMG



**Prof. Dr. White José dos Santos**  
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção /UFMG



**Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues**  
Departamento de Engenharia Civil /CEFET-MG

Belo Horizonte, 24 de agosto de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que nunca nos dá um fardo maior do que aquele que podemos carregar. Obrigado por sempre me iluminar e guiar os meus caminhos.

Aos meus pais Salvador e Soraia, que são a base de tudo. Dirigem a mim todo o amor, mostram a importância da educação e nunca se cansam de me apoiar na busca dos meus sonhos.

A minha irmã Martha, sempre tão presente como exemplo a ser seguido.

À Bárbara, por todo o carinho e apoio. Sempre disposta a dar uma palavra de incentivo e a me dar forças para seguir em frente.

A toda a minha família e amigos, tão especiais e importantes na minha caminhada.

Ao professor Paulo Borges, pela orientação segura e pela confiança na minha capacidade de executar este trabalho.

Ao professor Augusto Bezerra, pela disponibilidade em ajudar e por ceder seu laboratório para minhas pesquisas.

Aos professores do CEFET-MG, em especial ao Conrado, Eliene, Hersília, Maria Cristina, Rogério, Weber, Peter e Cláudio, pelos ensinamentos prestados.

Aos colegas de mestrado e amigos Himad, Raquel, Víctor, Cristiano e Raphael, pela convivência agradável e pela disponibilidade frequente em ajudar sem nunca pedir nada em troca, mesmo nas tarefas mais difíceis.

Aos funcionários Ivan, Adalberto e Ana Paula pelo auxílio nas mais diversas atividades.

Sem o apoio de todos, não seria possível a execução deste trabalho. Obrigado!

“A satisfação reside no esforço, não no resultado obtido.

O esforço total é a plena vitória.”

Mahatma Gandhi

## RESUMO

O elevado consumo do cimento Portland tem gerado preocupações ambientais, relacionadas ao alto teor de  $\text{CO}_2$  liberado durante seu processo produtivo. Sendo assim, intensifica-se a busca por processos produtivos e materiais construtivos mais sustentáveis e de menor impacto ambiental. Neste contexto, crescem cada vez mais os estudos dos materiais álcali-ativados (MAA) como aglomerantes alternativos ao cimento Portland e, por consequência, as pesquisas para o desenvolvimento destes compósitos reforçados com a adição de fibras. Os MAA possuem grande potencial na construção civil, já que atendem aos requisitos de sustentabilidade e de durabilidade, apresentando resultados mecânicos compatíveis e, muitas vezes, superiores aos materiais provenientes do cimento Portland. Este trabalho tem como objetivo principal analisar os efeitos da substituição de metacaulim por escória de alto forno, com consequente variação da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , nas formulações de compósitos álcali-ativados com matriz de metacaulim reforçadas com fibras de PVA. As argamassas foram formuladas com razões molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  iguais a 3.0, 3.45 e 3.9, a partir da substituição gradual da matéria prima principal (metacaulim) por escória de alto forno em 20%, 30% e 40%, e reforçadas com fibras de PVA em 1% e 2% em volume. Foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e flexão em três pontos. Os índices físicos avaliados foram massa específica, absorção de água e porosidade aparente. Os resultados mostraram que a variação do percentual de EAF entre 20% e 40% em substituição ao metacaulim, com consequente variação na relação molar, gerou efeitos perceptíveis na resistência à compressão dos álcali-ativados. A elevação da relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  causa uma queda na resistência mecânica das matrizes, que pode ser compensada com a adição de 2% PVA, permitindo inclusive um aumento de tenacidade de até 3487,88% com relação ao material sem fibras. Este percentual de reforço com fibra de PVA, no entanto, aumenta a absorção de água e porosidade dos compósitos, o que pode comprometer um pouco a durabilidade dos mesmos em ambientes agressivos.

Palavras-Chave: Compósitos álcali-ativados. Relação molar. Álcali-ativados reforçados com fibras. PVA.

## SUMMARY

The high consumption of Portland cement has generated environmental concerns related to the high content of CO<sub>2</sub> released during its production process. Therefore, the search for more sustainable production processes and construction materials with a lower environmental impact have been intensified. In this context, the studies of alkali-activated materials (AAM) as alternative binders to Portland cement and, consequently, the researches for the development of these composites reinforced with the addition of fibers are increasing. AAM have great potential in construction, since they meet the requirements of sustainability and durability, presenting equivalent or superior mechanical performance to Portland cement-based materials. This work has analyzed the effects of variation of the SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar ratio on the formulation of metakaolin-based alkali-activated composites reinforced with PVA fibers. The mortars were formulated with SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar ratios of 3.0, 3.45 and 3.9, from the gradual replacement of the main raw material (metakaolin, MK) with blast furnace slag (BFS) and reinforced with 1% and 2% by volume PVA fibers. The mechanical tests performed were compressive strength, modulus of elasticity and three point bending strength. The physical properties evaluated were water absorption, apparent density and porosity. The results showed that the variation of the percentage of EAF between 20% and 40% as MK replacement (with consequent variation in the SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar ratio) significantly affected the compressive strength of the alkali-activated composites. Furthermore, an increase in the SiO<sub>2</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar ratio causes a reduction in the mechanical strength of the matrices, which can be compensated with the addition of 2% PVA, with consequent increase in toughness (up to ~3500% compared to unreinforced matrices). This percentage of reinforcement with PVA fiber, however, increases the water absorption and porosity of the composites, which may compromise their durability in aggressive environments.

Key-words: Alkali-activated materials. Molar ratio. Alkali-activated reinforced with fibers. PVA.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo de cimento no Brasil. Fonte: SNIC (2011) .....	1
Figura 2 - Desenvolvimento de concreto reforçado com fibras. Fonte: Adaptado de Yool (2014).....	7
Figura 3 - Curva tensão x deformação à tração de ECC com 2% de fibras de PVA. Fonte: Li <i>et al.</i> (2001) .....	10
Figura 4 - Classificação dos diferentes sub-grupos de materiais álcali-ativados, em comparação com outros compósitos. Fonte: Adaptado de VAN DEVENTER <i>et al.</i> (2010).....	13
Figura 5 - Superfície de fratura do compósito álcali-ativado. Fonte: Zhang <i>et al.</i> (2009).....	18
Figura 6 - MEV demonstrando boa interação entre matriz e fibra de PVA. Fonte: Masi <i>et al.</i> (2015) .....	20
Figura 7 - Fibras de PVA.....	23
Figura 8 - Plano de cargas para determinação do módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522 (2008).....	28
Figura 9 - Curva granulométrica do MC e EAF .....	32
Figura 10 - Difração de raio-x para MC (a) e EAF (b) .....	33
Figura 11 - Resistência à compressão (barras) e módulo de elasticidade (linhas) para formulações com relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$ sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito.....	34
Figura 12 - Gráfico Força x Deflexão em ensaio de flexão em três pontos para formulações com relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$ sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito.....	36
Figura 13 - Tensão de ruptura (barras) e tenacidade (linhas) para formulações com relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$ sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito.....	37
Figura 14 - Massa específica para formulações com relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$ sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito.....	39
Figura 15 - Absorção de água (barras) e porosidade aparente (linhas) para formulações com relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$ sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito.....	40

Figura 16 - Resistência à compressão para formulações com diferentes relações molares.....	42
Figura 17 - Módulo de elasticidade para formulações com diferentes relações molares.....	42
Figura 18 - MEV mostrando a presença de EAF não reativa nos compósitos .....	43
Figura 19 - Gráfico Força x Deflexão de ensaio de flexão em três pontos para formulações com escória.....	44
Figura 20- Tensão de ruptura para formulações percentual de EAF entre 20% e 40% .....	46
Figura 21 - Tenacidade para formulações percentual de EAF entre 20% e 40%.....	46
Figura 22 - Massa específica para formulações com percentual de EAF entre 20% e 40% .....	48
Figura 23 - Absorção de água para formulações com percentual de EAF entre 20% e 40% .....	49
Figura 24 - Porosidade aparente para formulações com percentual de EAF entre 20% e 40% .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das fibras utilizadas em concreto.....	8
Tabela 2 - Propriedades do silicato de sódio alcalino .....	22
Tabela 3 - Propriedades das fibras de PVA .....	23
Tabela 4 - Formulações utilizadas.....	24
Tabela 5 - Quadro resumo das formulações .....	25
Tabela 6 - Composição química (principais óxidos) do MC e EAF.....	31
Tabela 7 - Composição granulométrica da areia.....	31
Tabela 8 - Diâmetro dos materiais (D50, D80 e D95) .....	32
Tabela 9 - Tenacidade para as formulações com baixo teor de EAF (até 20%) .....	38
Tabela 10 - Resultados de tenacidade e ganhos percentuais com adição de fibras.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

CP – Cimento Portland;

EAF - Escória de alto forno;

MC - Metacaulim;

MMA - Materiais álcali-ativados;

3.0- 100MC - 0%PVA - Argamassa álcali-ativada de referência com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 com matriz de metacaulim como principal fonte de aluminossilicato, sem reforço de fibras;

3.0- 100MC - 1%PVA - Argamassa álcali-ativada de referência com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 com matriz de metacaulim como principal fonte de aluminossilicato, reforçada com 1% em volume de fibras curtas de PVA;

3.0- 100MC - 2%PVA - Argamassa álcali-ativada de referência com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 com matriz de metacaulim como principal fonte de aluminossilicato, reforçada com 2% em volume de fibras curtas de PVA;

3.0 - 80MC - 20EAF - 0%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 80% de metacaulim e 20% de escória de alto forno em massa, sem reforço de fibras;

3.0 - 80MC - 20EAF - 1%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 80% de metacaulim e 20% de escória de alto forno em massa, reforçada com 1% em volume de fibras curtas de PVA;

3.0 - 80MC - 20EAF - 2%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 80% de metacaulim e 20% de escória de alto forno em massa, reforçada com 2% em volume de fibras curtas de PVA;

3.0 - 70MC - 30EAF - 0%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 70% de metacaulim e 30% de escória de alto forno em massa, sem reforço de fibras;

3.0 - 70MC - 30EAF - 1%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 70% de metacaulim e 30% de escória de alto forno em massa, reforçada com 1% em volume de fibras curtas de PVA;

3.0 - 80MC - 20EAF - 2%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 70% de metacaulim e 30% de escória de alto forno em massa, reforçada com 2% em volume de fibras curtas de PVA;

3.0 - 60MC - 40EAF - 0%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 60% de metacaulim e 40% de escória de alto forno em massa, sem reforço de fibras;

3.0 - 60MC - 40EAF - 1%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 60% de metacaulim e 40% de escória de alto forno em massa, reforçada com 1% em volume de fibras curtas de PVA;

3.0 - 60MC - 40EAF - 2%PVA - Argamassa álcali-ativada com relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 3,0 e matriz composta por 60% de metacaulim e 40% de escória de alto forno em massa, reforçada com 2% em volume de fibras curtas de PVA.

**SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Fibras em compósitos cimentícios .....	4
2.1.1. Tipos de concreto reforçados com fibras .....	6
2.2. Fibras de PVA.....	7
2.2.1. Definição e Propriedades das fibras de PVA .....	7
2.2.2. Compósitos reforçados com fibras de PVA.....	9
2.3. Materiais álcali-ativados (MAA).....	10
2.3.1. Materiais álcali-ativados à base de metacaulinita .....	13
2.3.2. MAA reforçados com fibras.....	15
2.3.3. Uso de fibras de álcool polivinílico (PVA) em álcali-ativados .....	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
3.1. Caracterização dos Materiais.....	21
3.2. Formulações dos MAA.....	24
3.3. Produção dos MAA .....	26
3.4. Métodos .....	26
3.4.1. Ensaio físicos .....	26
3.4.2. Ensaio mecânicos .....	27
3.4.3. Caracterização microestrutural .....	30
4. RESULTADOS.....	31

4.1. Caracterização das Matérias Primas .....	31
4.2. Influência da incorporação de baixos teores de EAF (20%) nos compósitos para relação sílica / alumina constante .....	34
4.3. Influência da incorporação de maiores teores de EAF (20% a 40%) nos compósitos com conseqüente aumento da relação sílica / alumina.....	41
5. CONCLUSÕES .....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

## 1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o material de construção mais utilizado em todo o mundo. É um material relativamente barato, que propicia elevada resistência mecânica e durabilidade em argamassas e concretos. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, SNIC (2011), somente no Brasil, o consumo de cimento alcançou o patamar de 60 milhões de toneladas, atingindo um expressivo consumo per capita de 311 kg/hab/ano (Figura 1).

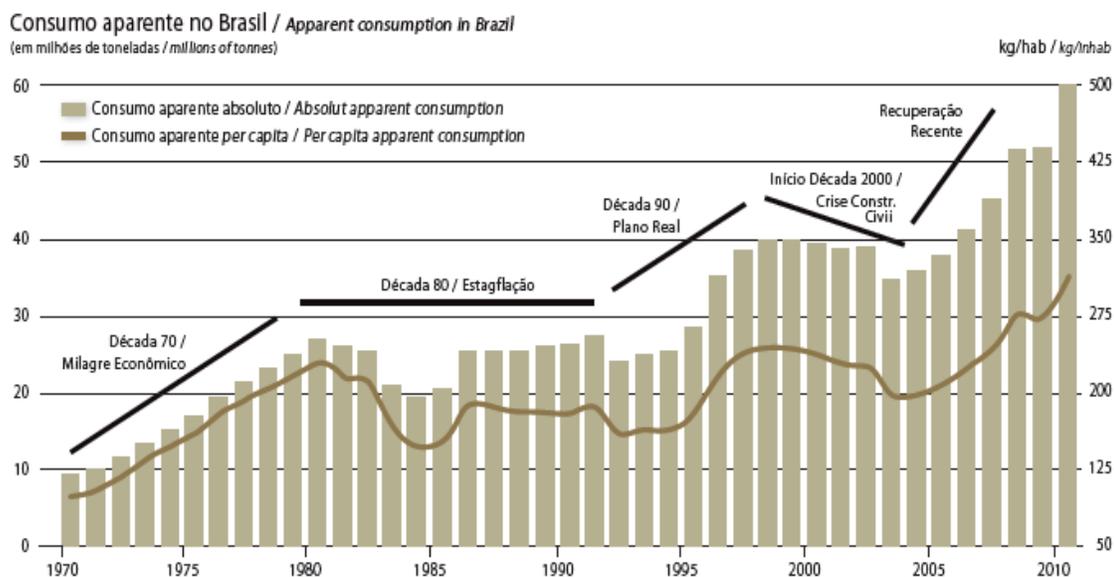


Figura 1 - Consumo de cimento no Brasil. Fonte: SNIC (2011)

Porém, o elevado consumo de cimento Portland (CP) tem gerado preocupações ambientais, relacionadas ao alto teor de CO<sub>2</sub> liberado durante seu processo de fabricação. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2007), a produção de CP mundial tem uma intensidade de emissão de CO<sub>2</sub> no intervalo de 0,65 a 0,92 de toneladas por tonelada produzida. Dados da World Wildlife Fund (WWF, 2008) mostram que a produção de CP contribui entre 5% a 8% da emissão mundial de carbono, sendo que a tendência de crescimento de infraestruturas civis em países como China e Índia deve aumentar ainda mais estes índices em escala mundial.

Sendo assim, a preocupação com o meio ambiente tem elevado a busca por processos produtivos e materiais construtivos mais sustentáveis e de menor impacto ambiental, tais como os materiais álcali-ativados (MAA). Estes materiais, produzidos pela ativação alcalina de aluminossilicatos, tais como a metacaulinita, cinza volante ou escória de alto forno, apresentam características importantes, como boa inércia química e resistência a altas temperaturas (DAVIDOVITS, 1994). As vantagens ambientais dos MAA com relação aos materiais à base de CP existem pelo fato de os primeiros poderem ser sintetizados sem a necessidade de calcinação à alta temperatura, ou seja, sem que ocorra liberação significativa de CO<sub>2</sub>, contribuindo, assim, para um menor impacto ambiental.

Neste contexto, crescem cada vez mais os estudos dos MAA como materiais aglomerantes alternativos ao cimento Portland, bem como seu potencial de aplicação como material de engenharia, como explica Davidovits (2002). O autor cita algumas importantes aplicações dos MAA no mundo, como o uso para fabricação de painéis resistentes ao fogo, painéis com material expandido para isolamento térmico, ladrilhos de cerâmica de baixa demanda energética, itens refratários, compósitos resistentes ao fogo para reparação e reforço de infraestruturas e aplicações de alta tecnologia à prova de fogo, como partes do interior de aeronaves e automóveis.

Porém, apesar de apresentar elevados índices de resistência à compressão, assim como as argamassas e concretos oriundos de cimento Portland, os MAA apresentam comportamento frágil, devido à sua baixa resistência à tração. O aumento da durabilidade das estruturas de concreto baseados em CP por inclusão de fibras, ou seja, por meio do aumento da ductilidade, tem sido objeto de interesse crescente há muito anos, resultando em compósitos reforçados de alto desempenho. Estudos como os de Lin *et al.* (2008), Zhang *et al.* (2009) e Bernal *et al.* (2010) demonstraram que, assim como ocorre nos materiais à base de CP, a adição de fibras também pode elevar a resistência à tração e resistência à flexão dos compósitos álcali-ativados.

O reforço de MAA pela adição de fibras, portanto, tem despertado um grande interesse nos últimos anos, haja visto que estes materiais tendem a ser, ao mesmo tempo, de menor impacto ambiental e mais duráveis. Em outras palavras, pode-se esperar que os MAA reforçados com fibras sejam materiais de grande potencial na

construção civil, já que podem vir a atender requisitos de sustentabilidade e de durabilidade, apresentando resultados mecânicos compatíveis e, muitas vezes, superiores aos materiais provenientes do CP.

O uso de fibras de PVA como reforço de compósitos cimentícios possui vantagens, já que as mesmas apresentam ótima aderência à matriz, boa estabilidade alcalina e excelentes índices de resistência à tração e módulo de elasticidade. Apesar disso, é interessante notar que a utilização das fibras de PVA como reforço dos MAA é ainda incipiente.

Além disso, não há na literatura informações sobre o efeito da adição de escória em substituição ao metacaulim nas propriedades dos MAA reforçados com fibras. Pouco se sabe também sobre a influência da relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  nas propriedades mecânicas (compressão, módulo de elasticidade, resistência à flexão e tenacidade) desses compósitos.

### 1.1. Objetivos

Este trabalho teve como objetivo principal analisar os efeitos da incorporação de escória em argamassas álcali-ativadas com matriz de metacaulim reforçadas com fibras de PVA, bem como avaliar o efeito da variação da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  nas propriedades dos mesmos compósitos.

São objetivos específicos do trabalho:

- Avaliar a incorporação de 20% de escória em substituição ao metacaulim nas propriedades físicas e mecânicas de matrizes sem reforço e compósitos álcali-ativados contendo 1% e 2% em volume de fibras de PVA, sem alteração da relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  das matrizes. As propriedades avaliadas são: resistência à compressão, flexão, tenacidade, módulo de elasticidade, absorção de água, massa específica e porosidade.
- Avaliar a variação da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  a partir da elaboração de argamassas álcali-ativadas com três relações molares distintas (3.0, 3.45 e 3.9), por meio da substituição parcial de metacaulinita por escória de alto forno. Foram utilizadas fibras de PVA (0%, 1% e 2% em volume) como reforço e as mesmas propriedades avaliadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Fibras em compósitos cimentícios

O uso de fibras de reforço para materiais que são muito menos resistentes à tração do que à compressão remonta a tempos antigos (BENTUR & MINDESS, 2006). Provavelmente, a citação mais antiga escrita de um material compósito ocorre na Bíblia, em Êxodo 5:6-7, no qual é descrita uma espécie de tijolo de barro reforçado com palha. No mesmo período de tempo, cerca de 3500 anos atrás, tijolos reforçados com palha também foram usados para construir a colina de Aqar Quf, com 57m de altura, próxima da atual Bagdá (SWAMY, 1980).

O primeiro compósito amplamente utilizado nos tempos modernos foi o cimento reforçado com amianto, desenvolvido em meados de 1900. Atualmente, fibras de vários tipos são usadas para reforçar um vasto número de diferentes materiais, como epóxis, polímeros e materiais cerâmicos. Desde a utilização inicial de fibras de amianto, fibras diversas têm sido utilizadas para reforço de cimentos hidráulicos: fibras convencionais, tais como aço e vidro; novas fibras, como carbono ou kevlar; e fibras de baixo módulo, feitas pelo homem (polipropileno, nylon) ou naturais (celulose, sisal, juta) (BENTUR & MINDESS, 2006).

O principal objetivo da incorporação de fibras em argamassas e concretos de cimento Portland é melhorar sua resistência à flexão e tração e alterar o modo de falha de frágil para dúctil. Porém, o uso de fibras em compósitos cimentícios também pode apresentar outros efeitos como a melhoria na resposta ao impacto, aumento da resistência à flexão residual pós-fissuração, aumento da capacidade de absorção de energia, diminuição dos efeitos da retração, elevação da resistência ao aparecimento de fissuras e melhoria da durabilidade do material, como foi demonstrado por diversos autores, como Glinicki (1994), Islam (2011) e Li (2003).

De fato, uma das aplicações mais difundidas para as fibras se dá para o controle da retração hidráulica em concretos em suas primeiras idades. As fibras são capazes de controlar a fissuração do concreto, tornando-o capaz de suportar tensões mesmo acima de sua própria resistência. Para se ter uma ideia, um estudo de Kronlof *et al.* (1995) concluiu que o uso de fibras de polipropileno a 1% em volume foi capaz de reduzir a retração plástica do concreto em cerca de 30%. Outros

estudos como os de Grzybowski & Shah (1990), Banthia *et al.* (1993) e Bloom & Bentur (1995) também demonstraram que a presença de fibras é capaz de influenciar a quantidade e a geometria das fissuras induzidas pela retração do concreto. Neste caso, o objetivo não é a produção de materiais de maior desempenho e, portanto, fibras de menor custo podem ser utilizadas, tais como a de polipropileno.

Se o objetivo é melhorar a resistência ao impacto de concretos, as fibras também têm se mostrado bastante eficientes. Um estudo da ACI (1996) demonstrou, utilizando o método "*dropweight*", que avalia a resistência do concreto à golpes, que concretos contendo 0,1% a 0,2% em volume de fibras de polipropileno possuem maior resistência ao impacto do que concretos não reforçados, tanto para o aparecimento das primeiras fissuras, "*first crack*", quanto para resistência final à fratura. Estudos de Marar *et al.* (2001) e Nataraja *et al.* (2005) encontraram resultados similares de aumento da resistência ao impacto, com a utilização de reforço com fibras de aço. Banthia *et al.* (2012) explicam que as fibras melhoram a capacidade de absorção de energia do concreto, melhorando, assim, sua resistência ao impacto. Os autores ainda ressaltam que a escolha do tipo de fibra, seu comprimento e a sua forma influenciam diretamente nestas propriedades.

Visando ao aumento de durabilidade, percebe-se que a utilização de fibras é capaz de diminuir a permeabilidade hidráulica do concreto. Um estudo de Sappakittipakorn *et al.* (2010) utilizou o método de intrusão de mercúrio para mostrar que a adição de fibras de celulose aumentou a estanqueidade do concreto, por meio do refinamento dos poros. A redução da porosidade e permeabilidade dos compósitos cimentícios por meio do reforço com fibras é de extrema importância, uma vez que a permeabilidade do concreto está diretamente relacionada a fenômenos de degradação como o ataque de sulfatos ou íons de cloreto, ciclo de congelamento e descongelamento, reação álcali-sílica, dentre outros. Sendo assim, ao aumentar a estanqueidade do concreto, a adição de fibras contribui de forma ativa na elevação da durabilidade e da vida útil do material. Banthia (1994) explica que, em condições normais sem aplicação de carga, o uso de fibras reduz a permeabilidade do concreto, e esta redução é proporcional à fração em volume de fibras.

### 2.1.1. Tipos de concreto reforçados com fibras

Com a ampla utilização de fibras em concreto e a vasta diversidade de aplicações, é importante definir os diferentes tipos de concretos reforçados com fibras, ressaltando as suas nomenclaturas e aplicações. Em 2003, durante o 4º Congresso Internacional de Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho Reforçados com Fibras (*4th International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*) foi discutida uma classificação geral dos compósitos reforçados com fibras de acordo com suas propriedades.

Alguns principais tipos de concretos reforçados com fibras, da sigla em inglês *FRC - Fiber Reinforced Concrete*, são o *DFRC - Ductile Fiber Reinforced Concrete*, e o *UHPFRC - Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*. Este último, segundo Naaman & Reinhardt (2003), se destaca por possuir excelentes índices de resistência, ductilidade, tenacidade e grande preocupação na otimização da mistura, que incorpora um alto volume de fibras. Além disso, como explica Yoo (2014), compósitos classificados como UHPFRC apresentam excelentes propriedades mecânicas quando submetidos à compressão ou tração, além de comportamento tipo "*strain-hardening*" e múltipla fissuração ("*multiple-cracking*"), o que os tornam úteis para aplicações estruturais de solicitações extremas de carregamento. A Figura 2, adaptada de Yoo (2014), mostra os principais tipos de concretos reforçados com fibras de acordo com suas propriedades, por meio de um diagrama.

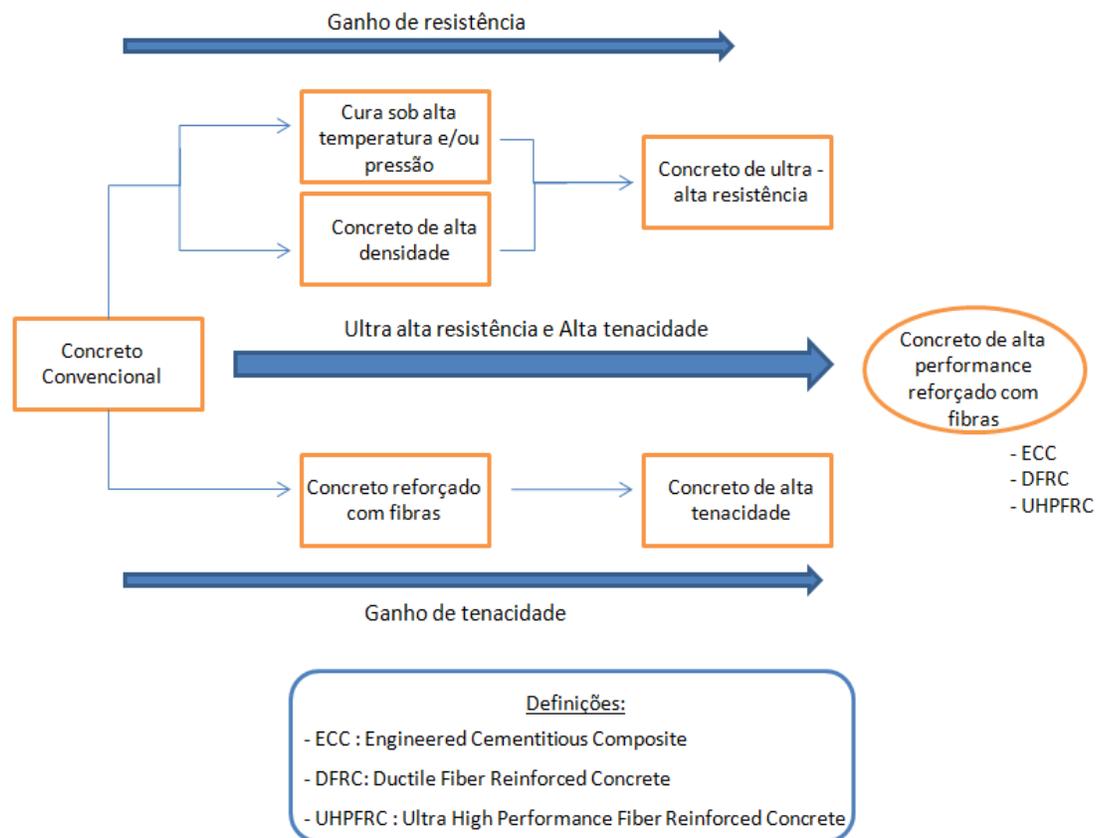


Figura 2 - Desenvolvimento de concreto reforçado com fibras. Fonte: Adaptado de Yool (2014)

## 2.2. Fibras de PVA

### 2.2.1. Definição e Propriedades das fibras de PVA

A fibra de álcool polivinílico é fabricada a partir da resina de PVA por meio de um processo de produção composto por várias etapas de estiramento do material, que proporciona uma alta rigidez e insolubilidade em água (Banthia *et al.*, 2012).

Bentur & Mindess (2006) explicam que fibras de PVA de alta resistência foram desenvolvidas principalmente para a substituição do amianto. As fibras são produzidas por fiação úmida ou seca e é adicionado boro para alcançar alta resistência e rigidez através da formação de ligações intermoleculares. A superfície das fibras é tratada para melhorar a sua compatibilidade com a matriz e para permitir dispersão eficiente. O tratamento de superfície, em combinação com a afinidade intrínseca deste polímero com a água, devido à presença de grupos OH<sup>-</sup>, acarreta

não só a uma dispersão eficiente, mas também a uma forte ligação no compósito endurecido. A Tabela 1, adaptada de Banthia *et al.* (2012), mostra as propriedades das diversas fibras utilizadas no reforço de concretos, na qual é possível destacar algumas vantagens das fibras de PVA frente às demais fibras de reforço.

Tabela 1 - Propriedades das fibras utilizadas em concreto

Tipo de Fibra	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	Deformação (%max/min)	Diâmetro da fibra (µm)	Aderência à matriz	Estabilidade alcalina
Amianto	600 a 3600	69 a 150	0,3 a 0,1	0,02 a 30	Excelente	Excelente
Carbono	590 a 4800	28 a 520	2 a 1	7 a 18	Ruim a boa	Excelente
Aramida	2700	62 a 130	4 a 3	11 a 12	Razoável	Boa
Polipropileno	200 a 700	0,5 a 9,8	15 a 10	10 a 150	Ruim	Excelente
Poliamida	700 a 1000	3,9 a 6,0	15 a 10	10 a 50	Boa	n/c
Poliéster	800 a 1300	até 15	20 a 8	10 a 50	Razoável	n/c
Raiom	450 a 1100	até 11	15 a 7	10 a 50	Boa	Razoável
<b>Álcool Polivinílico (PVA)</b>	<b>800 a 1500</b>	<b>29 a 40</b>	<b>10 a 6</b>	<b>14 a 600</b>	<b>Excelente</b>	<b>Boa</b>
Poliacrilonitrila	850 a 1000	17 a 18	9	19	Boa	Boa
Poliétileno	400	2 a 4	400 a 100	40	Boa	Excelente
Poliétileno em polpa (orientado)	n/a	n/a	n/a	1 a 20	Boa	Excelente
Poliétileno orientado (alto peso molecular)	2585	117	2,2	38	Boa	Excelente
Aço carbono	1000	200	2 a 1	50 a 85	Excelente	Excelente
Aço inoxidável	1000	200	2 a 1	50 a 85	Excelente	Excelente
Vidro resistente à álcalis	1700	72	2	12 a 20	Excelente	Boa

Nota: n/a = não aplicável; n/c = não consensual. 1 Mpa = 145 psi, 1 Gpa = 145 ksi.

Fonte: Adaptado de Banthia *et al.* (2012)

É possível verificar que a fibra de PVA possui excelentes índices de resistência à tração e módulo de elasticidade, quando comparada às demais fibras poliméricas. Os mesmos autores explicam que a fibra de PVA é geralmente resistente a meios alcalinos e solventes orgânicos, mas demonstra uma pequena perda de resistência após longa exposição à radiação ultravioleta. Por se tratar de uma fibra polimérica, o PVA evita o processo de corrosão na matriz cimentícia, evitando o aparecimento de manchas no compósito, como pode ocorrer com outros tipos de fibras, como a de aço.

Infelizmente, segundo Banthia *et al.* (2012), as fibras de PVA possuem um coeficiente de expansão térmica negativo, retraindo 4% em comprimento a 200°C. Talvez seja esta a sua principal limitação técnica, ou seja, a impossibilidade de aplicação em compósitos sujeitos à elevada temperatura térmica ou materiais cimentícios resistentes ao fogo. Outra desvantagem a ser considerada é o alto custo do material, que pode ser bastante superior a outras fibras comumente utilizadas e inviabilizar seu emprego.

### 2.2.2. Compósitos reforçados com fibras de PVA

As fibras de PVA ganharam destaque em matrizes cimentícias a partir do desenvolvimento dos chamados *ECC - Engineered Cementitious Composites*. Trata-se de uma classe de compósitos cimentícios altamente dúcteis reforçados com um teor de fibras igual ou inferior a 2%. Uma característica marcante dos compósitos classificados como ECC é a ocorrência do mecanismo conhecido como *strain-hardening*, que consiste na capacidade de o compósito apresentar um aumento de resistência à tração após o aparecimento das primeiras fissuras na matriz.

PVA-ECC é uma aplicação de reforço com fibras de PVA em uma matriz desenvolvida pelo Prof. Victor C. Li, da Universidade de Michigan, importante pesquisador que possui diversos estudos e patentes na área de compósitos reforçados com fibras de PVA. Li *et al.* (2014) também classificam este tipo de material como um compósito que apresenta alta ductilidade à tração (acima de 1%) e largura de fissuras limitada (abaixo de 100 µm). Segundo Li (2003), os PVA-ECC possuem ductilidade à tração pelo menos cem vezes maior do que o concreto convencional.

Em seus estudos, Li *et al.* (2001) desenvolveram um PVA-ECC reforçado com 2% de fibra de PVA que apresentou uma altíssima ductilidade à tração de 5% (Figura 3), aproximadamente 500 vezes maior do que um concreto convencional também reforçado com fibras.

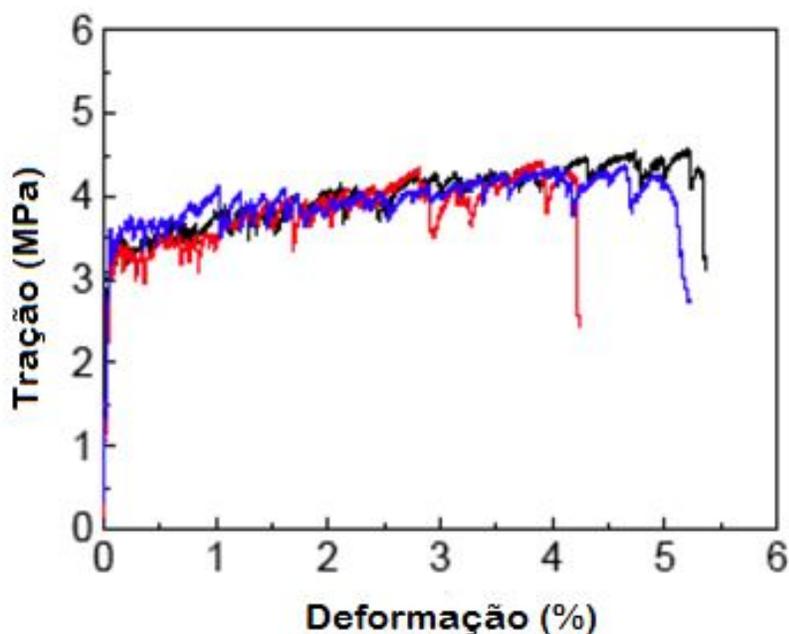


Figura 3 - Curva tensão x deformação à tração de ECC com 2% de fibras de PVA. Fonte: Li *et al.* (2001)

A partir dos estudos de Victor Li, outros pesquisadores, como Lee *et al.* (2009), Pan *et al.* (2015) e Said *et al.* (2015) também estudaram a utilização de reforço com fibras de PVA em compósitos cimentícios, demonstrando a ocorrência dos efeitos de *strain-hardening* e *multiple-cracking* (fissuração múltipla) nos compósitos estudados. Porém, ainda há poucos estudos sobre a inclusão de fibra de PVA em matrizes alternativas ao cimento Portland, como aquelas dos materiais álcali-ativados (MAA).

### 2.3. Materiais álcali-ativados (MAA)

O termo “álcali-ativado” foi criado por Davidovits (1994), na década de 90, para denominar os produtos obtidos por ele em suas pesquisas com ativação alcalina de aluminossilicatos. Estes materiais foram desenvolvidos pela primeira vez pelo próprio Davidovits (1989) no final de 1970, que os classifica como membros da família de polímeros inorgânicos, formados sobre uma cadeia principal de alumínio (Al) e íons de silício (Si).

Portanto, quaisquer materiais ricos em  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na forma amorfa podem ser uma possível fonte para a sintetização de um ligante álcali-ativado. Os principais precursores utilizados para a produção de materiais álcali-ativados são, no entanto, as cinzas volantes, escória de alto forno e o metacaulim. A síntese ocorre pela mistura dos aluminossilicatos reativos com fortes soluções alcalinas, ou seja, com soluções alcalinas aquosas ativadoras, como o hidróxido de potássio (KOH) ou o hidróxido de sódio (NaOH), bem como silicatos de sódio de potássio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  e  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ).

A grande importância dada a estes materiais se deve ao fato de os mesmos apresentarem vantagens ambientais e físico-químicas quando comparados ao cimento Portland. Os MAA podem ser produzidos à temperatura ambiente ou baixa temperatura de cura, com baixa ou nenhuma liberação direta de  $\text{CO}_2$ . Além disso, como explica Davidovits (1994), apresentam boa inércia química, baixa permeabilidade e boa resistência a altas temperaturas.

Estudos de Duxson *et al.* (2007) relatam que os MAA possuem uma vasta gama de propriedades e características, incluindo bom ganho de resistência, cura rápida, excelente resistência a ácidos, álcalis e temperaturas extremas, baixo índice de retração e baixa condutividade térmica. A diferença nas propriedades é função da composição da matriz, normalmente determinada por algumas relações molares.

A relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  é um dos fatores que influencia diretamente nas propriedades do compósito obtido, com efeitos na durabilidade e comportamento mecânico. Davidovits (1991), nos seus primeiros artigos dos anos 90, já falava de relação sílica alumina ótima, destacando a importância da composição química destes compósitos. Duxson *et al.* (2007), em seus estudos, concluíram que MAA com relação molar entre 3,0 e 3,8 apresentaram melhores propriedades mecânicas, principalmente à compressão. Rashad (2013), por sua vez, ao fazer uma análise de vários artigos e seus resultados, amplia os valores ótimos de relação molar, considerando-os entre 3,5 e 5,5, ressaltando sua importância para o desempenho do produto final. Bernal *et al.* (2011), ao estudarem MAA com matriz mista de metacaulim e escória de alto forno, concluíram que a razão  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  possui uma forte inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito. Os autores

afirmam, portanto, que uma compreensão química da formulação utilizada na mistura é fundamental para a otimização do desempenho final do material.

Gao *et al.* (2013) realizaram um estudo para determinar o comportamento de um MAA a partir da ativação de metacaulim em soluções ácidas (pH 2), avaliando a resistência química do material. A rede polimérica permaneceu intacta depois de 28 dias, como foi provado por imagens de difração de raios-x, microscopia eletrônica de varredura e ensaios de resistência à compressão.

Zuda *et al.* (2010) estudaram o comportamento de MAA a altas temperaturas, concluindo que houve um aumento de porosidade de somente 7%, entre temperatura ambiente e 1000°C. O material manteve 35% da sua resistência à compressão e 66% da sua resistência à flexão quando submetido a 800 °C. Os resultados experimentais mostraram que o material estudado possui ótimas propriedades térmicas, bem superiores ao concreto com cimento Portland.

Existe na atualidade uma diferenciação entre os termos "materiais álcali-ativados" (*alkali-activated materials, AAM*) e "geopolímeros" (*geopolymers*). VAN DEVENTER *et al.* (2010) preconizam que álcali-ativado é a classificação mais ampla que engloba, essencialmente, qualquer sistema ligante derivado da reação de um sal alcalino (sólido ou dissolvido) com silicato em pó sólido. Este sólido pode ser um silicato de cálcio, ou um precursor mais rico em aluminossilicato, tal como uma escória metalúrgica, pozolana natural ou cinzas volantes. Por sua vez, os geopolímeros são polímeros inorgânicos, subconjunto adicional dos MAA, quando a fase ligante é quase exclusivamente aluminossilicato e muito altamente coordenada. Para formar um gel, o cálcio disponível será baixo, permitindo a formação de uma rede pseudo-zeolítica, ao invés das cadeias características de silicato de cálcio hidratado. O ativador normalmente será um hidróxido de um metal alcalino ou silicato. Cinzas volantes com baixo teor de cálcio e argilas calcinadas são os mais predominantes precursores usados na síntese geopolimérica. A Figura 4, dos mesmos autores, ilustra essa classificação.

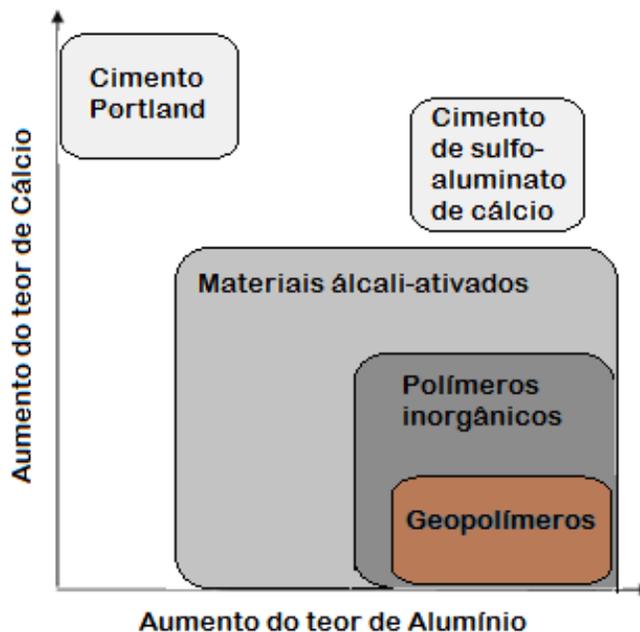
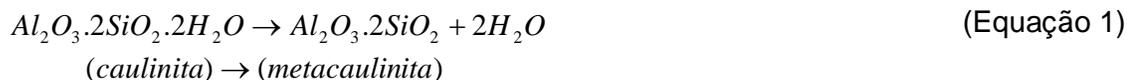


Figura 4 - Classificação dos diferentes sub-grupos de materiais álcali-ativados, em comparação com outros compósitos. Fonte: Adaptado de VAN DEVENTER *et al.* (2010)

### 2.3.1. Materiais álcali-ativados à base de metacaulinita

O metacaulim é o produto obtido pelo tratamento térmico do caulim, um mineral composto de silicatos hidratados de alumínio como a caulinita, em geral de cor branca ou quase branca, devida ao baixo teor de ferro. Durante a queima do caulim, entre 500 e 900 °C, por um período de tempo longo o suficiente, ocorre um processo de desidroxilação e a liberação de uma molécula de água, com consequente alteração da coordenação do alumínio (PINTO, 2004). Tal reação pode ser descrita basicamente conforme a equação 1:



A transformação do caulim em metacaulim torna o material muito mais reativo, conferindo-lhe uma estrutura potencialmente amorfa e importantes propriedades pozolânicas.

A ativação alcalina do metacaulim produz um material que, conforme já mencionado, apresenta propriedades interessantes como alta resistência mecânica e inércia química. As propriedades dos MAA com matriz de metacaulim dependerá dos fatores de síntese, como relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , tipo de ativador e condições de cura, que implicarão diretamente na microestrutura e desempenho do material.

Marín-Lopez *et al.* (2009) estudaram o efeito da temperatura de cura no processo de ativação alcalina do metacaulim, analisando as propriedades mecânicas e físicas do produto final. Melhores resultados foram obtidos com temperatura de cura de 60°C. Rovnanik (2010) também analisou o mesmo efeito, avaliando as resistências à compressão e flexão e a distribuição de poros em argamassas álcali-ativadas de metacaulim. Os resultados mostraram que a cura em altas temperaturas acelerou o ganho de resistência, porém as propriedades mecânicas aos 28 dias foram deterioradas em comparação à cura em temperaturas mais baixas ou ambiente. Houve também um aumento na distribuição e volume dos poros com a elevação da temperatura de cura.

Vários outros autores, como Wang *et al.* (2005), Granizo *et al.* (2007), Zhang *et al.* (2009) e Pinto (2004) analisaram o efeito do tipo e concentração do ativador na mistura de compósitos álcali-ativados à base de metacaulim. A maioria dos autores utilizou o hidróxido de sódio (NaOH) como ativador alcalino, sendo que Granizo *et al.* (2007) concluíram que uma mistura de silicato de sódio e hidróxido de sódio resultou na produção de materiais com melhor resistência mecânica, comparado com a ativação somente com NaOH.

Rashad (2013), em sua revisão da literatura sobre as propriedades dos compósitos álcali-ativados com matriz de metacaulim, também ressalta outros fatores que influenciam no desempenho do material, como o grau de finura do metacaulim empregado. Um pó com maior área superficial específica contribui para uma maior resistência à compressão e homogeneidade estrutural do material. O mesmo autor também ressalta algumas vantagens dos compósitos álcali-ativados à base de metacaulim com relação ao cimento Portland. Os primeiros demonstraram boa inércia química, com maior resistência contra ácidos e ataques de sulfatos, além de apresentarem excelente resistência ao calor, demonstrando estabilidade térmica à temperaturas até 1200 e 1400 °C (RASHAD, 2013).

Duxson *et al.* (2007), porém, ressaltam uma desvantagem do uso do metacaulim na produção de álcali-ativados. Segundo os autores, tais materiais exigem muita água na mistura, o que aumenta a porosidade do compósito.

### 2.3.2. MAA reforçados com fibras

Surgindo na década de 1990, MAA reforçados com fibras têm recebido crescente interesse. Em geral, o foco se dividiu em dois grupos: compósitos álcali-ativados reforçados por tecidos 2D e reforçados por fibras descontínuas orientadas aleatoriamente.

Muitos tipos de fibras têm sido utilizados, nas mais diversas proporções, em compósitos álcali-ativados com diferentes tipos de matrizes. Alguns exemplos de utilização são as fibras de carbono, basalto, vidro, álcool polivinílico (PVA), poliéster, polipropileno (PP), aço e algodão.

Zhang *et al.* (2009) realizaram um estudo com álcali-ativados com matriz de metacaulim e cinzas volantes, reforçados com fibras de polipropileno. A resistência à compressão, resistência à flexão e energia absorvida por impacto dos compósitos contendo 0,5% de fibras de PP, aumentaram 67,8%, 36,1% e 6,25%, respectivamente. Enquanto isso, houve uma diminuição de 38,6% na retração do material. Os resultados de microscopia de varredura (MEV) confirmaram que a fibra de PP pode oferecer um efeito de transição ao longo dos poros, resultando em uma grande melhoria de resistência e tenacidade.

Lin *et al.* (2008) estudaram MAA com matriz de metacaulim reforçados com fibras curtas de carbono (3,5% em volume) de 2, 7 e 12 mm de comprimento, pré-moldadas em formato de folha. Os compósitos com fibras de 7 mm apresentaram máxima resistência à flexão, 91,3 MPa, um aumento de 4,4 vezes em comparação com a matriz sem fibras.

Li & Xu (2009) analisaram a influência da adição de fibras de basalto na resistência ao impacto de materiais álcali-ativados com matriz de escória de alto forno e cinzas volantes. Os autores concluíram que as fibras de basalto podem melhorar significativamente a deformação e a capacidade de absorção de energia

do material. Uma fração de volume de fibras ótima de 0,3% resultou em um aumento de 8,9% na absorção de energia específica do compósito.

Bernal *et al.* (2010) estudaram a resistência à flexão de escória de alto forno álcali-ativada reforçada com fibras de aço testados aos 7, 14 e 28 dias. Em seu estudo é observado um aumento na resistência à flexão em todas as idades. Relatou-se, também, um aumento da resistência à flexão com o aumento do tempo de cura em todos os teores de fibra analisados. Foi observado um aumento de 70% na resistência à flexão aos 28 dias. Bernal *et al.* (2010) também mediram a resistência à compressão diametral dos mesmos compostos e relataram tendência similar à resistência à flexão. Verificou-se, também, que a adição de fibras de aço na matriz álcali-ativada melhora efetivamente o comportamento do compósito com relação ao surgimento de fissuras.

Jin *et al.* (2012) estudaram a incorporação de fibras de poliéster em um álcali-ativado com matriz de metacaulim, com o objetivo de obter a condição de síntese ótima pelos ensaios de flexão e compressão. Foram elaborados compósitos com diferentes teores de fibras (0%, 0,1%, 0,2%, 0,3% e 0,4%). Análise de difração de raios-x e microscópio eletrônico de varredura foram empregados para explorar a estrutura cristalina e microestrutura dos compósitos. Resultados mostraram que a adição de 0,2% de fibra foi considerada a proporção mais adequada para álcali-ativados reforçados com poliéster, apresentando os valores máximos de resistência, para flexão e compressão. Os valores de resistência à flexão aumentaram de 0,58 MPa no compósito sem fibras, para 1,21 MPa com adição de 0,2% de poliéster. Para o primeiro dia de cura, a resistência à compressão do compósito com 0,2% de adição de poliéster foi 175,84% mais elevada do que a do álcali-ativado puro.

Alomayri *et al.* (2014) elaboraram uma pesquisa com compósitos reforçados com diferentes camadas de tecidos de algodão. As propriedades mecânicas, tais como resistência à flexão, módulo de flexão, resistência ao impacto e tenacidade à fratura dos compósitos álcali-ativados reforçados com 3,6%, 4,5%, 6,2% e 8,3% em peso de fibras de algodão foram estudados. Os resultados mostraram que todas as propriedades mecânicas dos compósitos são melhoradas pelo aumento dos teores de fibra de algodão. Verificou-se, portanto, que as propriedades mecânicas do compósito reforçado pelo tecido de algodão são superiores àquelas da matriz pura.

Alzeer & MacKenzie (2013) fizeram um estudo sobre as propriedades mecânicas de um MAA resultados da ativação de metacaulim unidirecionalmente reforçados com 4 a 10% de fibras de linho, à base de celulose natural. As propriedades mecânicas dos compósitos reforçados melhoraram com o aumento do teor de fibras, atingindo resistências à flexão finais na faixa de 70 MPa para um teor de fibra de 10% em volume. Isto representou uma melhoria significativa em relação à resistência à flexão do material sem reforço (cerca de 5,8 MPa), e todos os compósitos mostraram falha dúctil, ao contrário da falha frágil da matriz. As fibras de linho não parecem ser comprometidas pelo ambiente alcalino da matriz, sugerindo novas aplicações possíveis para estes compósitos de baixo custo.

### 2.3.3. Uso de fibras de álcool polivinílico (PVA) em álcali-ativados

Li *et al.* (2005) analisaram compósitos álcali-ativados reforçados com fibras curtas de PVA, fabricados utilizando a técnica de extrusão. Ensaios foram utilizados para investigar as propriedades mecânicas do material, que apresentou boa resistência à flexão e tenacidade. Os resultados mostraram que a adição das fibras de PVA aumentam significativamente a ductilidade do compósito, resultando em mudança do modo de falha de frágil para dúctil.

Zhang *et al.* (2009) desenvolveram um compósito álcali-ativado com matriz de cinzas volantes reforçada com fibras curtas de PVA nos teores de 0, 1 e 2%. Os resultados experimentais mostraram que a adição de fibras aumentou a ductilidade do material, especialmente no caso de volume mais elevados de fibras (2%), também resultando na mudança de modo de falha do material, de frágil para dúctil. As imagens de microscopia da superfície fraturada, realizadas após o ensaio de flexão, podem ser vistas por meio da Figura 5. No compósito sem fibras (Figura 5a) nota-se uma única fissura em linha reta, sugerindo um modo de falha frágil. Por outro lado, ocorre uma fissura tortuosa no compósito com 1% de fibras (Figura 5b). O aumento do teor de fibras para 2% (Figura 5c), permite a formação de fissuras ramificadas, esquema típico de um modo de falha dúctil. A mudança no modo de falha indica o efeito do aumento do teor de fibra no ganho de ductilidade do compósito.

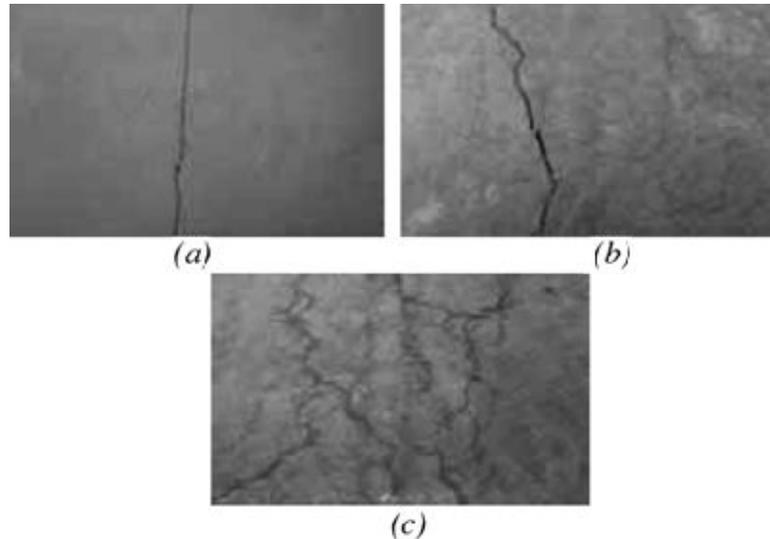


Figura 5 - Superfície de fratura do compósito álcali-ativado. Fonte: Zhang *et al.* (2009)

Varela & Rogers (2011) realizaram ensaios para avaliar os efeitos no desempenho mecânico da adição de fibras de PVA em compósitos álcali-ativados com matriz de cinzas volantes. Eles demonstraram que as microfibras de PVA, além de estáveis sob condições alcalinas elevadas, melhoram a resistência à compressão, resistência à flexão e a ductilidade da pasta. Os resultados mostraram que o acréscimo de fibras aumentou em aproximadamente cinco vezes a ductilidade do material.

Lee *et al.* (2012) estudaram a viabilidade do uso de fibras de PVA em matriz de escória de alto forno álcali-ativada. Uma série de ensaios foram realizados para investigar as propriedades mecânicas do compósito. Os resultados demonstraram que a matriz reforçada mostrou maior resistência à tração e flexão, apresentando comportamento do tipo *strain-hardening* e índices de ductilidade elevados de 4,7%, em comparação com 0,02% da matriz sem fibras.

Ohno & Li (2014) utilizaram uma matriz de cinzas volantes para sintetizar um compósito álcali-ativado com reforço de 2% de fibra de PVA. Foi necessária a adição de água à mistura para torná-la trabalhável, o que acarretou uma perda de resistência mecânica. Porém, o compósito reforçado apresentou comportamento dúctil e características de *strain-hardening* em ensaio de tração direta.

Nematollahi *et al.* (2014) realizaram uma pesquisa utilizando uma matriz de cinzas volantes reforçada com 2% de fibras curtas de PVA, dispersas aleatoriamente. Os resultados experimentais mostraram que o compósito apresentou boa resistência à flexão, suportando deflexões e cargas cada vez mais altas, mesmo após o aparecimento das primeiras fissuras, comportamento conhecido como *deflection-hardening* e caracterizado por microfissuração múltipla.

Masi *et al.* (2015), ao analisarem materiais álcali-ativados com matriz de cinzas volantes reforçados com fibras de PVA, mostraram que a presença das fibras aumentou consideravelmente a resistência à flexão do compósito, além de elevar significativamente a energia absorvida durante o período de carregamento.

A interface entre a matriz do compósito e a fibra de reforço utilizada é de extrema importância nas características e no desempenho do material. Shaikh (2013) utilizou imagens de microscopia eletrônica de varredura para caracterizar as interfaces fibra-matriz de álcali-ativados à base de cinzas volantes e compósitos de cimento Portland reforçados com 2% de fibras de PVA. Foi constatado que a alcalinidade mais elevada da matriz álcali-ativada não afeta as fibras de PVA, já que não foram encontrados sinais de degradação nas mesmas.

Masi *et al.* (2015) utilizaram imagens de MEV em seus estudos com compósitos álcali-ativados de cinzas volantes reforçados com fibras de PVA, concluindo que há uma boa interação entre a fibra e a matriz. Estrias longitudinais presentes na superfície das fibras levaram a um aumento da aderência entre as fases. A maioria das fibras foi coberta pelo gel álcali-ativado, demonstrando boa relação entre as fibras e o meio alcalino presente, como mostrado na Figura 6.

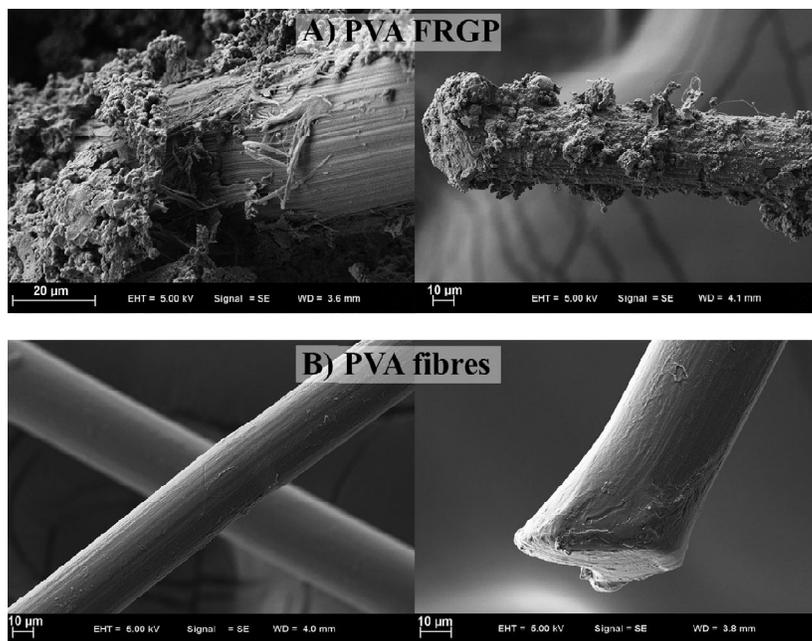


Figura 6 - MEV demonstrando boa interação entre matriz e fibra de PVA. Fonte: Masi *et al.* (2015)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão descritos os materiais e métodos que serão utilizados durante a pesquisa, englobando a caracterização dos materiais, preparação das amostras e a execução dos ensaios utilizados.

#### 3.1. Caracterização dos Materiais

Os seguintes materiais foram utilizados neste trabalho:

- Metacaulim branco (MC), tipo HP ultra, fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil (Jundiaí, SP);
- Escória de alto forno (EAF) fornecida pela empresa Central IBEC (Matozinhos, MG);
- Areia de quartzo de dimensão máxima 0,6 mm;
- Solução de silicato de sódio alcalino da empresa Getex - Indústria e Comércio Ltda;
- Solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 50% em massa (19 Molar), da empresa Sulfal Química Ltda.;
- Fibras de PVA, fornecidas pela empresa Kuraray (Japão);
- Água destilada.

Somente a parte amorfa do metacaulim foi considerada como material reativo para produção dos materiais álcali-ativados. Para se chegar a este percentual de material amorfo, considerou-se que a alumina presente no compósito final vem exclusivamente do metacaulim. A partir daí, calculou-se a quantidade de sílica equivalente também na metacaulinita, por relação molar (conforme equação 1). A diferença de sílica é provavelmente composta por quartzo e, portanto, considerado inerte (fíler).

Para se alterar a relação  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  dos materiais álcali-ativados, foi feita a substituição parcial do metacaulim por escória de alto forno, um produto da produção do ferro e do aço que é, então, seco e moído em um pó fino.

A composição química das escórias de alto forno, expressa em óxidos, tem como principais constituintes a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que correspondem a aproximadamente 95% do total (MOREIRA, 2006). A ativação da escória é influenciada por sua estrutura e composição química. Em geral, as escórias ajudam no ganho de resistência mecânica de materiais álcali-ativados nas primeiras idades e requerem menos solução para desenvolver a mesma trabalhabilidade, por serem mais finas que o metacaulim (BORGES *et al.*, 2014).

A solução ativadora utilizada é composta de uma mistura de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). O hidróxido é importante, pois aumenta o pH do sistema, quebrando a estrutura do metacaulim e da sílica ativa, permitindo a formação de uma cadeia polimérica de Si-O-Al, caracterizando o processo de ativação alcalina. Por sua vez, o silicato garante uma reação mais rápida, ou seja, um rápido ganho de resistência, devido a presença de  $\text{SiO}_2$  em solução (PINTO, 2006). A quantidade de solução utilizada na produção de álcali-ativados depende do material a ser ativado. Segundo Borges *et al.* (2014), para materiais finos, como o metacaulim, a relação ideal em massa solução/sólidos fica em torno de 1,30.

As propriedades físico-químicas para a solução de silicato de sódio alcalino foram fornecidas pelo fabricante por meio de laudo técnico e encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do silicato de sódio alcalino

Composição Química (%)	Resultado
$\text{Na}_2\text{O}$	15,00
$\text{SiO}_2$	31,79
Módulo de Sílica (MS)	2,12
Massa Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,58

Fonte: Getex - Indústria e Comércio Ltda

As fibras de PVA (Figura 7) utilizadas na pesquisa foram de comprimento de 8 mm, uma vez que este comprimento de fibra forneceu os melhores resultados nas pesquisas de Ahmed & Lu (2013), que compararam o desempenho de fibras de PVA de 8 e 12 mm. As propriedades das fibras de PVA estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades das fibras de PVA

<b>Parâmetro</b>	<b>Características</b>
Tipo de Fibra	PVA RECS 15
Diâmetro	40 $\mu\text{m}$
Comprimento	8 mm
Módulo de Elasticidade	41 GPa
Elongação	6%
Densidade	1,3 g/cm <sup>3</sup>
Resistência à Tração	1600 Mpa

Fonte: Kuraray

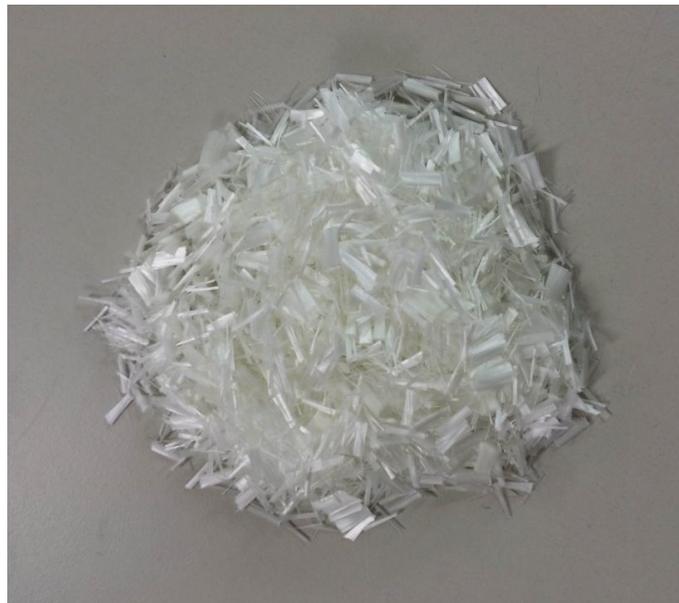


Figura 7 - Fibras de PVA

A determinação da composição química dos materiais precursores (metacaulim e escória de alto forno) foi realizada no Centro de Desenvolvimento Técnico Nuclear (CDTN), por meio do espectrômetro de energia dispersiva de raios-x (EDS), modelo EDX-720 da Shimadzu.

A composição mineralógica dos mesmos se deu por difração raios-x, utilizando-se um difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD-7000, com radiação de cobre ( $\text{Cu-K}\alpha$ ,  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 30 mA. Para determinação das fases, foram realizadas varreduras com velocidade angular de  $1^\circ$  por minuto, a cada  $0,02^\circ$ , e intervalo de medida entre os ângulos de Bragg ( $2\theta$ ) de  $5^\circ$  e  $80^\circ$ .

Determinou-se, ainda, as distribuições granulométricas por difração a LASER para o MC e a EAF, utilizando-se um equipamento CILAS1090. As amostras foram dispersas em água destilada. As condições de ensaio foram: agitação de 1500 rpm, tempo de ultrassom de 2,5 min, obscuração entre 10 e 20% e tempo de dispersão de 5 min.

Realizou-se, também, ensaio de composição granulométrica da areia (agregado miúdo), de acordo com a ABNT NBR NM 248, com a utilização de um agitador mecânico marca Mesh e peneiras de abertura 0,075; 0,150; 0,300; 0,600 e 1,180 (em mm).

### 3.2. Formulações dos MAA

Uma vez que o objetivo principal do trabalho é analisar os efeitos da variação da composição da matriz nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos, foram produzidos compósitos álcali-ativados com diferentes relações molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Conforme mencionado anteriormente, a escória de alto forno substituirá o metacaulim para elevar a relação molar dos compósitos, conforme Tabela 4. As porcentagens dos aglomerantes foram calculadas em massa. Foram definidas quatro formulações, variando a relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 3.0 e 3.9, que foram reforçadas com fibras de PVA, em até 2% em volume.

Tabela 4 - Formulações utilizadas

Formulação	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Metacaulim	Escória
3.0 - 100MC	3,0	100%	-
3.0 - 80MC - 20EAF	3,0	80%	20%
3.45 - 70MC - 30EAF	3,45	70%	30%
3.9 - 60MC - 40EAF	3,9	60%	40%

O percentual máximo de 2% em volume de fibras de PVA para reforço dos álcali-ativados foi adotado com base nos resultados de desempenho de autores como Li *et al.* (2001), Zhang *et al.* (2009), Shaikh (2013), Nematollahi *et al.* (2014) e outros abordados na revisão bibliográfica.

Com relação aos parâmetros de ativação, a relação molar  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  foi mantida fixa em 0,25 para todas as formulações, enquanto a relação molar  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  foi mantida constante para formulações com o mesmo percentual de fibra, variando entre 10,25 e 12,65 (Tabela 5). A fixação destes parâmetros busca facilitar a compreensão do efeito específico da variação da relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  nas propriedades dos compósitos.

A trabalhabilidade de todas as formulações também foi mantida constante, medida por meio do ensaio de "Flow Table" (ASTM C-230, 2008). Para todas elas, o índice foi mantido constante com  $185 \pm 10$  mm.

A solução ativadora utilizada na formulação dos materiais álcali-ativados foi composta de uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). A proporção entre silicato e hidróxido de sódio variou entre 1,29 e 4,44, para acertar a relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  desejada, conforme pode ser verificado pela Tabela 5.

Tabela 5 - Quadro resumo das formulações

Formulação	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ no ativador	Fibra PVA
3.0 - 100MC - 0%PVA	3,0	0,25	0,75	10,25	3,40	1,34	0%
3.0 - 100MC - 1%PVA	3,0	0,25	0,75	11,45	2,64	1,34	1%
3.0 - 100MC - 2%PVA	3,0	0,25	0,75	12,65	2,15	1,34	2%
3.0 - 80MC - 20EAF - 0%PVA	3,0	0,25	0,75	10,25	1,80	1,06	0%
3.0 - 80MC - 20EAF - 1%PVA	3,0	0,25	0,75	11,45	1,51	1,06	1%
3.0 - 80MC - 20EAF - 2%PVA	3,0	0,25	0,75	12,65	1,29	1,06	2%
3.45 - 70MC - 30EAF - 0%PVA	3,45	0,25	0,86	10,25	3,00	1,29	0%
3.45 - 70MC - 30EAF - 1%PVA	3,45	0,25	0,86	11,45	2,37	1,29	1%
3.45 - 70MC - 30EAF - 2%PVA	3,45	0,25	0,86	12,65	1,96	1,29	2%
3.9 - 60MC - 40EAF - 0%PVA	3,9	0,25	0,97	10,25	4,44	1,44	0%
3.9 - 60MC - 40EAF - 1%PVA	3,9	0,25	0,97	11,45	3,29	1,44	1%
3.9 - 60MC - 40EAF - 2%PVA	3,9	0,25	0,97	12,65	2,61	1,44	2%

### 3.3. Produção dos MAA

Primeiramente, preparou-se a solução ativadora, cerca de 2h antes da moldagem, uma vez que a reação entre o silicato de sódio e o hidróxido de sódio é exotérmica, aquecendo a mistura. Em seguida, o metacaulim, a escória, a areia e as fibras foram pesados, de acordo com as formulações nas quais foram empregadas.

Em um recipiente plástico, colocou-se a mistura dos materiais sólidos, adicionando-se, aos poucos, à solução ativadora. Com um misturador mecânico misturou-se os componentes por aproximadamente 5 minutos em rotação baixa, adicionando-se as fibras lentamente. Desligou-se o misturador e, com uma espátula, foi retirado o material aderido nas paredes e no fundo do recipiente. Então, iniciou-se novamente a mistura por um período de 3 minutos em alta rotação, até que se obtivesse completa homogeneização dos componentes.

Ao finalizar o procedimento de mistura, procedeu-se a moldagem dos compósitos, de acordo com o ensaio a ser realizado. A cura dos materiais foi realizada em temperatura ambiente. Os ensaios foram executados após a cura de 28 dias.

### 3.4. Métodos

Os itens seguintes apresentam os procedimentos de ensaios que foram realizados ao longo da pesquisa.

#### 3.4.1. Ensaios físicos

Os corpos de prova rompidos no ensaio de flexão em três pontos foram utilizados para determinação da absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente, todos pelo método de saturação em água (RILEM, 1984).

Testaram-se quatro corpos de prova por formulação. Foram medidas a massa das amostras secas em estufa (105 °C por 24h), a massa das amostras imersas em água em um dessecador sob vácuo por 6h e a massa das amostras saturadas submersas.

A absorção de água (a), porosidade aparente (p) e densidade aparente (d) são obtidos utilizando-se as equações 2, 3 e 4.

$$a = \frac{m_3 - m_1}{m_1} \quad (\text{Equação 2})$$

$$p = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \quad (\text{Equação 3})$$

$$d = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- $m_1$  é a massa seca (g);
- $m_2$  é a massa da amostra saturada submersa (g);
- $m_3$  é a massa da amostra saturada com superfície seca (g).

#### 3.4.2. Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma prensa universal de ensaios EMIC modelo DL 30000.

A resistência à compressão das argamassas foi determinada de acordo com a NBR 13279 (2005). Foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de dimensão 50 x 100 mm (diâmetro x altura) para cada formulação, submetidos à compressão uniaxial em prensa hidráulica a uma velocidade de carregamento de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s. A resistência à compressão é calculada através da relação entre a carga de ruptura e a área da seção transversal do corpo de prova, através da equação 5 a seguir:

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

- $R_c$  é a tensão na ruptura (MPa);

- $F$  é a força aplicada (kN);
- $A_c$  é a área da seção transversal de carregamento ( $\text{mm}^2$ ).

O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com a norma NBR 8522 (2008). Foram ensaiados quatro corpos de prova cilíndricos para cada formulação, também de dimensão (50 x 100) mm. Neste ensaio, submete-se o corpo de prova a ciclos de carga e descarga consecutivos, de acordo com a Figura 8.

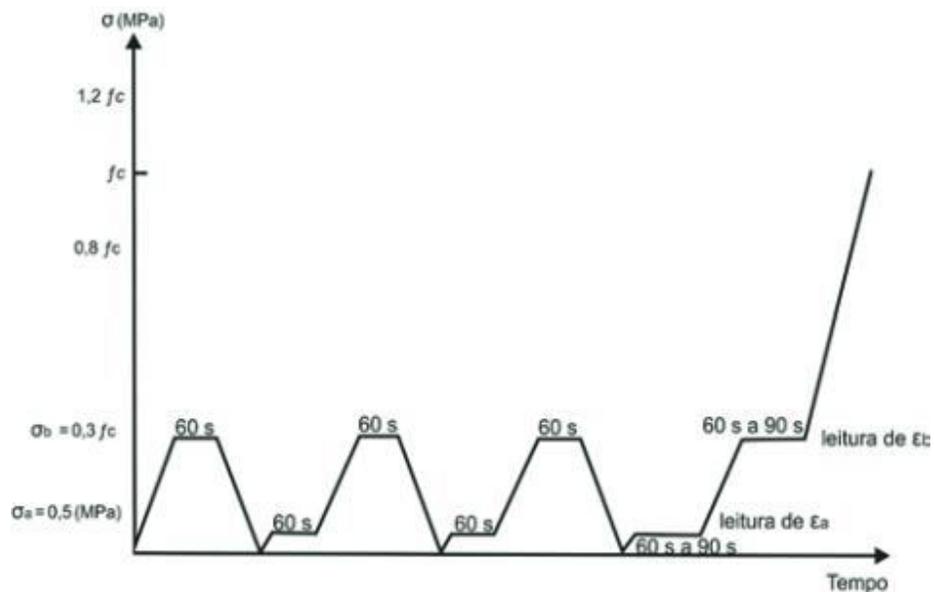


Figura 8 - Plano de cargas para determinação do módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522 (2008)

Na primeira etapa deve-se carregar o corpo-de-prova até uma tensão correspondente a 30% da tensão de ruptura, obtida por meio do ensaio de resistência à compressão, e manter esta força aplicada por um período de 60 segundos. Em seguida, descarrega-se o corpo-de-prova até uma força próxima de zero ou a primeira marcação correspondente a uma divisão da escala analógica. Na etapa 2, deve-se carregar o corpo-de-prova até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa e mantê-la neste nível por 60 segundos. Em seguida, carrega-se o corpo-de-prova até a força correspondente a 30% da tensão de ruptura, mantendo a força neste nível pelos mesmos 60 segundos e assim sucessivamente.

O módulo de elasticidade é dado pela equação 6:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo:

- $\sigma_b$  - tensão maior ( $\sigma_b = 0,3 f_c$ ) ou outra tensão especificada em projeto (MPa);
- 0,5 – tensão básica (MPa);
- $\varepsilon_b$  - deformação específica média ( $\varepsilon = \Delta L/L$ ), dos corpos-de-prova sob a tensão maior;
- $\varepsilon_a$  - deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão de 0,5 Mpa.

A resistência à tração na flexão foi determinada por meio do ensaio de flexão em três pontos, segundo a NBR 12142 (2010). Uma carga central é aplicada a um corpo de prova apoiado em dois cutelos inferiores e um superior. Foram utilizadas quatro amostras de cada formulação realizada, moldadas em forma prismática com dimensões de (40x40x160) mm. O ensaio foi conduzido a uma velocidade de carregamento de  $1,0 \pm 0,1$  MPa/min. Os prismas foram colocados sobre os apoios distanciados de 120 mm. Foram calculados o módulo de ruptura e a tenacidade do material até a fratura, expressa pela área do gráfico sob a curva carga x deflexão.

O módulo de ruptura é calculado pela equação 7:

$$R_F = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

- $R_F$  é a tensão na ruptura (MPa);
- $P$  é a força aplicada (kN);
- $L$  é a distância entre os apoios (m);

- $b$  é a largura do corpo de prova (m);
- $d$  é a espessura do corpo de prova (m)

#### 3.4.3. Caracterização microestrutural

Para avaliação da reatividade dos MAA e melhor compreensão dos resultados físicos e mecânicos, foram feitas imagens de microscopia eletrônica utilizando-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Hitachi TM3000. O aparelho foi operado com feixe de 15kV, fonte de filamento de tungstênio e detector de elétrons retroespalhados com câmara de vácuo.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Caracterização das Matérias Primas

A Tabela 6, a seguir, mostra os resultados de composição química dos materiais utilizados como aglomerantes nessa pesquisa, ou seja, metacaulim e escória de alto forno.

Tabela 6 - Composição química (principais óxidos) do MC e EAF

<b>Análise Química (% em massa)</b>		
<b>Óxidos</b>	<b>Metacaulim</b>	<b>Escória de alto forno</b>
SiO <sub>2</sub>	43,55	34,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,00	12,63
CaO	0,10	32,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47	2,3
MgO	-	5,38
MnO	-	1,38
K <sub>2</sub> O	0,17	0,93
SO <sub>3</sub>	0,04	0,44
TiO <sub>2</sub>	0,06	0,43

A Tabela 7 apresenta a composição granulométrica da areia utilizada na fabricação dos compósitos.

Tabela 7 - Composição granulométrica da areia

# (mm)	% Retida	
	Individual	Acumulada
0,6	-	-
0,3	23,65	23,65
0,15	56,01	79,66
0,075	18,30	97,96
Fundo	2,04	100,00
Módulo de Finura		1,03
φ máx		0,6 mm

A Figura 10, a seguir, apresenta a distribuição de tamanho de partículas (curva granulométrica) para o MC e EAF. A Tabela 8 apresenta os diâmetros D50, D80 e D95 dos mesmos materiais sólidos utilizados. Esses diâmetros correspondem aos tamanhos de partículas abaixo dos quais se encontram 50%, 80% e 95% da massa do material analisado. Percebe-se que o metacaulim é um material mais fino que a escória de alto forno; portanto, a substituição do primeiro por escória de alto forno tende a influenciar (melhorar) a trabalhabilidade das formulações estudadas ou até mesmo demandar menos quantidade de solução para uma mesma trabalhabilidade.

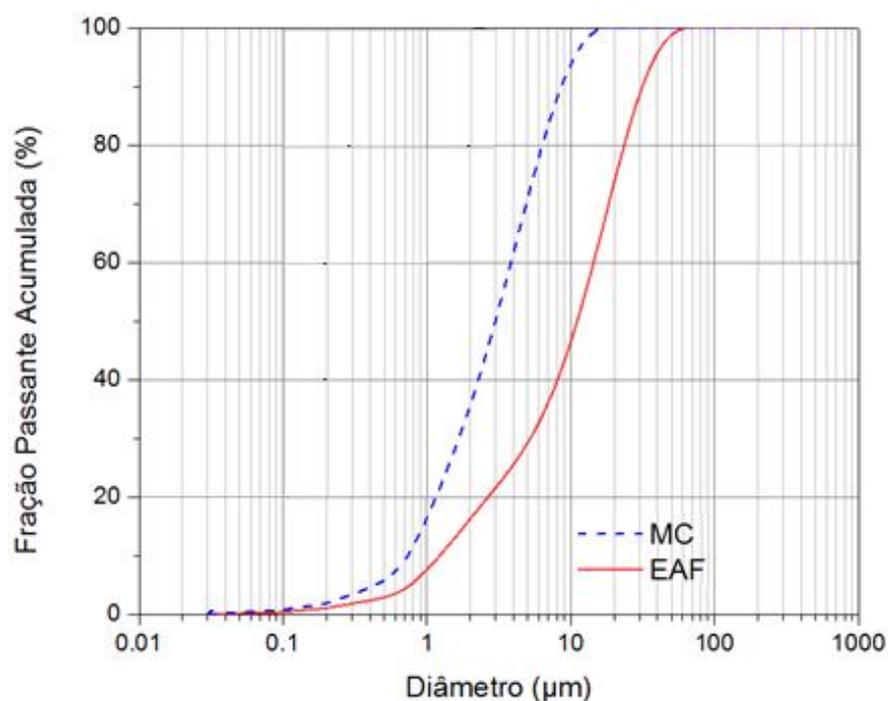


Figura 9 - Curva granulométrica do MC e EAF

Tabela 8 - Diâmetro dos materiais (D50, D80 e D95)

Diâmetro	Metacaulim (μm)	Escória de alto forno(μm)
D50	3	11
D80	6	24
D95	10	40

A Figura 10, que se segue, apresenta os resultados para a difração de raio-x para o metacaulim (17a) e a escória de alto forno (17b). Percebe-se que estes dois materiais são aluminossilicatos, na sua maioria amorfo. O MC contém picos de quartzo, caulinita, illita e muscovita, sendo alguns detectados devido a impurezas do material e outros devido à transformação incompleta da caulinita em metacaulinita durante o processo de calcinação. A EAF apresenta picos cristalinos para o mineral gehlenita e akermanita, normalmente encontrados em escórias de ferro-gusa.

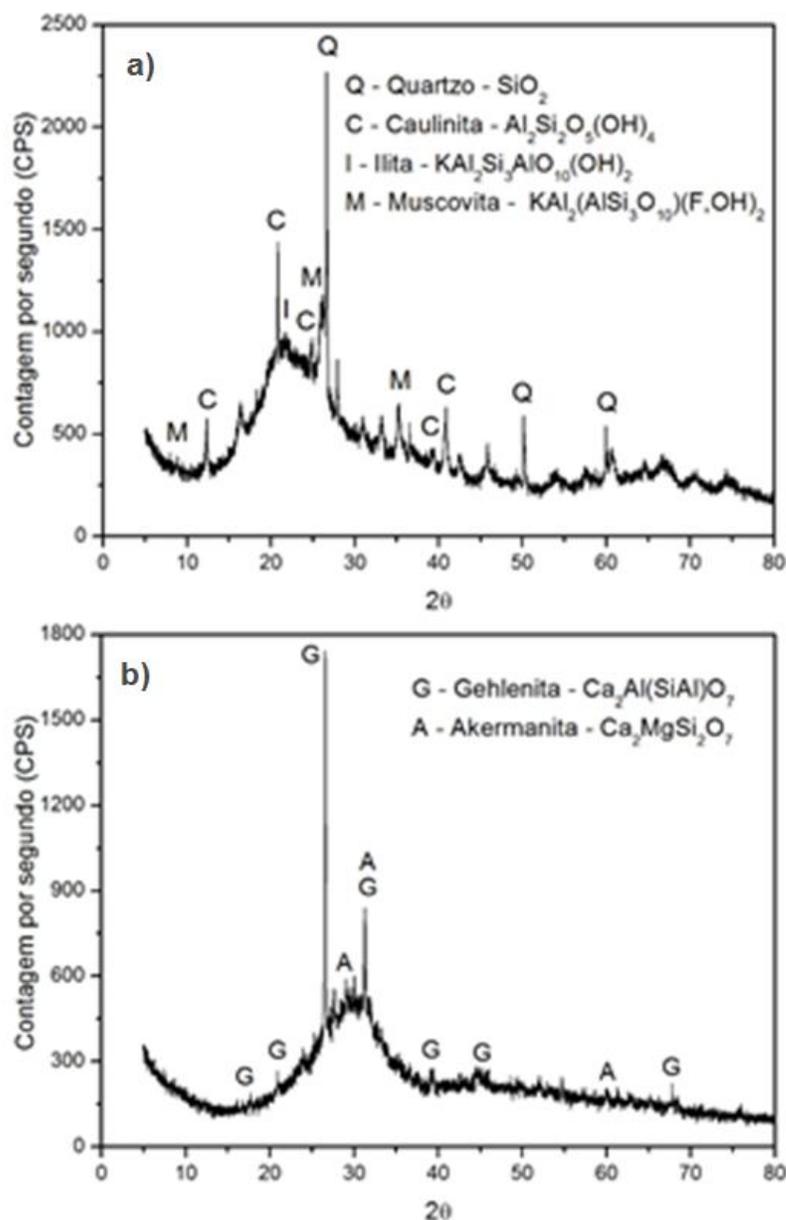


Figura 10 - Difração de raio-x para MC (a) e EAF (b)

#### 4.2. Influência da incorporação de baixos teores de EAF (20%) nos compósitos para relação sílica / alumina constante

Para análise da influência da incorporação de escória nos compósitos, foram inicialmente comparados os resultados das formulações "3.0-100MC" e "3.0-80MC-20EAF". Ao se compararem essas duas formulações, que possuem a mesma relação molar  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ , pode-se analisar separadamente qual o efeito da adição de pequenos teores de escória na matriz do compósito em suas propriedades físicas e mecânicas avaliadas.

A Figura 11 mostra os resultados de resistência à compressão (barras) e módulo de elasticidade (linhas) obtidos para as duas formulações, contendo 0%, 1% e 2% de fibras de PVA.

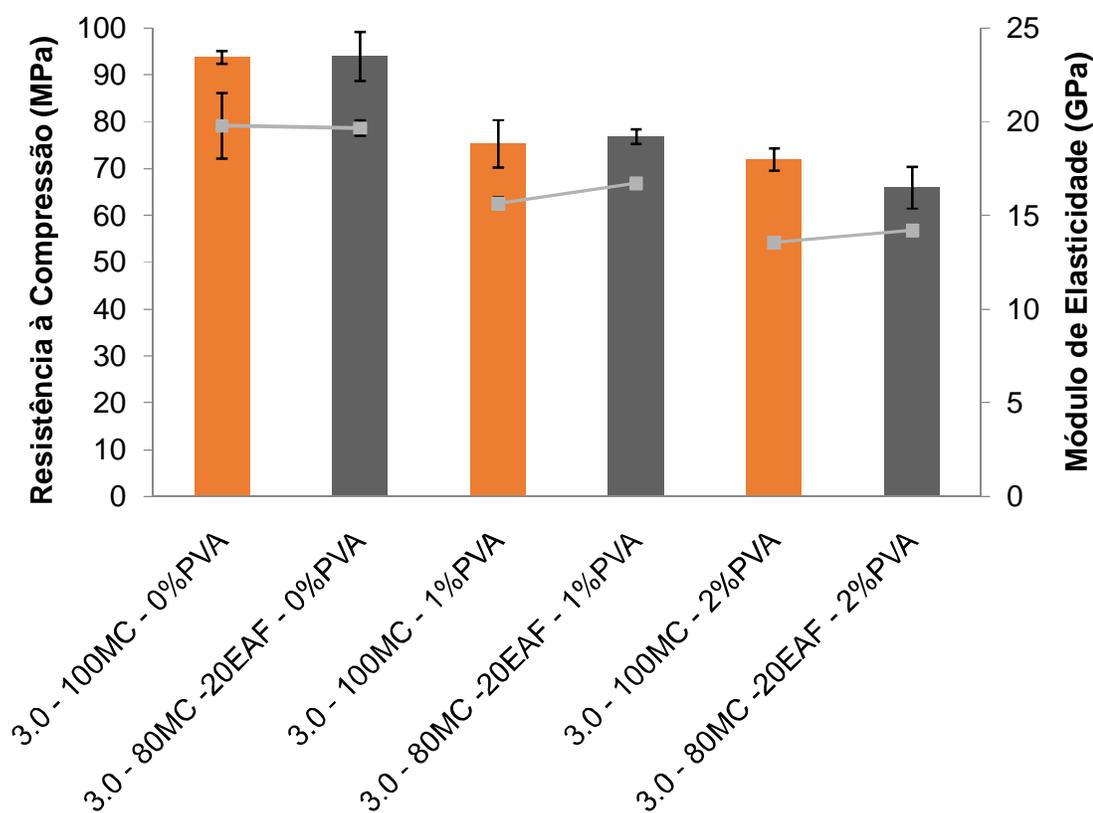


Figura 11 - Resistência à compressão (barras) e módulo de elasticidade (linhas) para formulações com relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$  sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito

Observa-se pela análise da Figura 11 que, considerando-se a margem de erro, os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade se mantêm praticamente constantes com a incorporação de 20% de escória no compósito, quando analisadas duas formulações com o mesmo percentual de reforço de fibras. Em outras palavras, somente a adição de 20% de EAF não foi capaz de ocasionar alterações nos materiais que causassem efeitos nos índices mecânicos citados. Os resultados de módulo de elasticidade estão próximos daqueles encontrados na literatura: Němeček *et al.* (2011) indicam que os materiais álcali-ativados, independentemente dos fatores de formulação, possuem um módulo de elasticidade intrínseco entre 17 e 18 GPa.

Por sua vez, quando é analisado o efeito da incorporação de fibras de PVA nos resultados de resistência à compressão, nota-se que o reforço com fibras causa uma significativa diminuição na resistência à compressão com relação à formulação sem reforço. Li *et al.* (2014) explicam que a incorporação de fibras de PVA eleva a presença de ar aprisionado na matriz, explicando a perda de resistência à compressão. No entanto, para o mesmo percentual de reforço (seja 1% ou 2% de PVA), a inclusão de 20% de EAF não interfere na resistência à compressão e módulo de elasticidade.

As Figuras 12 e 13, que se seguem, mostram o gráfico força x deflexão e os resultados para tensão de ruptura e tenacidade, obtidos por meio do ensaio de flexão em três pontos, para as formulações sem escória e com adição de 20% de EAF. Pode-se perceber que somente a incorporação de 20% de escória, mantendo-se constante a relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , não gerou uma tendência clara ou um efeito significativo nos valores de tensão de ruptura à flexão dos compósitos, considerando-se as barras de erro. É interessante notar, contudo, que a adição de fibras gera uma tendência de elevação nos resultados de tensão de ruptura, em relação às formulações sem fibras. Para todas as formulações percebe-se um maior desvio padrão nos resultados de resistência à flexão; de fato, durante o ensaio de flexão, as fissuras se propagam rapidamente pelo material, aumentando o índice de variabilidade dos resultados encontrados. Os resultados estão próximos àqueles encontrados na literatura para compósitos semelhantes. Zhang *et al.* (2009), por exemplo, ao ensaiarem um material álcali-ativado à flexão com matriz de metacaulim

reforçado com 2% de fibras de PVA, encontraram valores médios próximos de 11 MPa para tensão de ruptura.

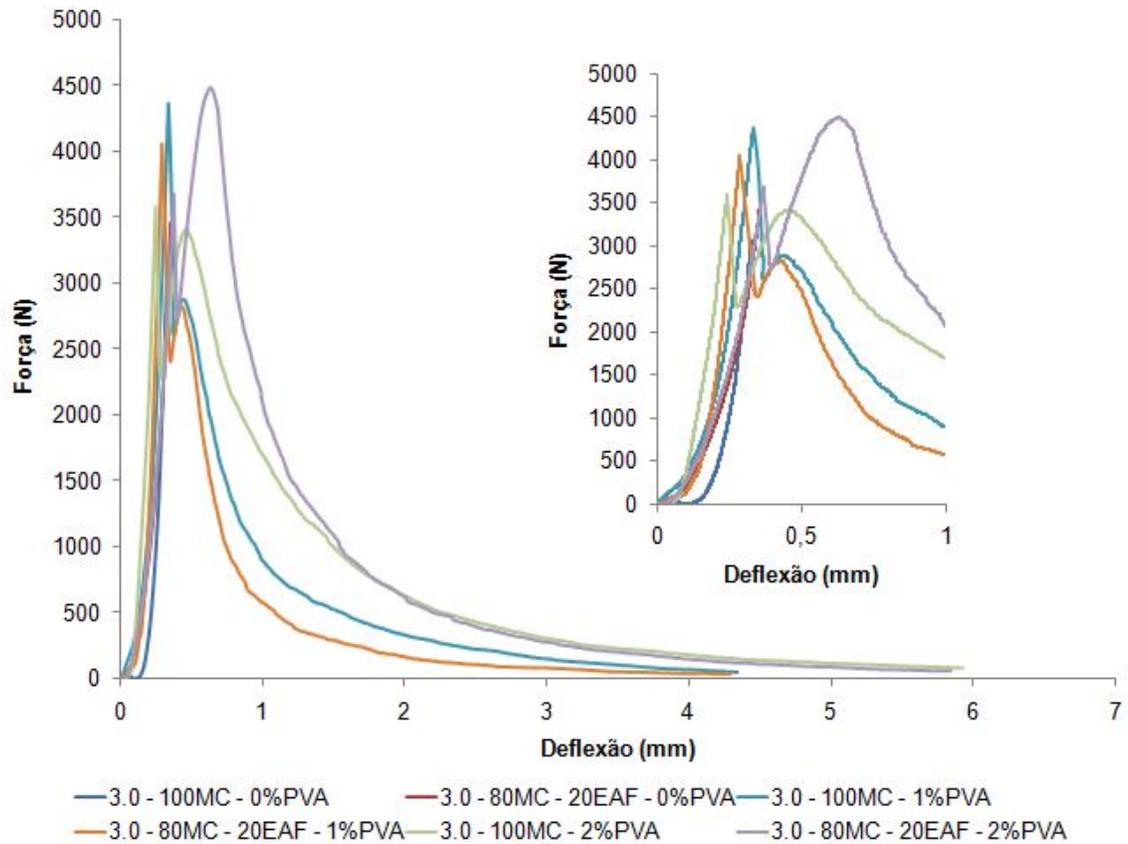


Figura 12 - Gráfico Força x Deflexão em ensaio de flexão em três pontos para formulações com relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$  sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito

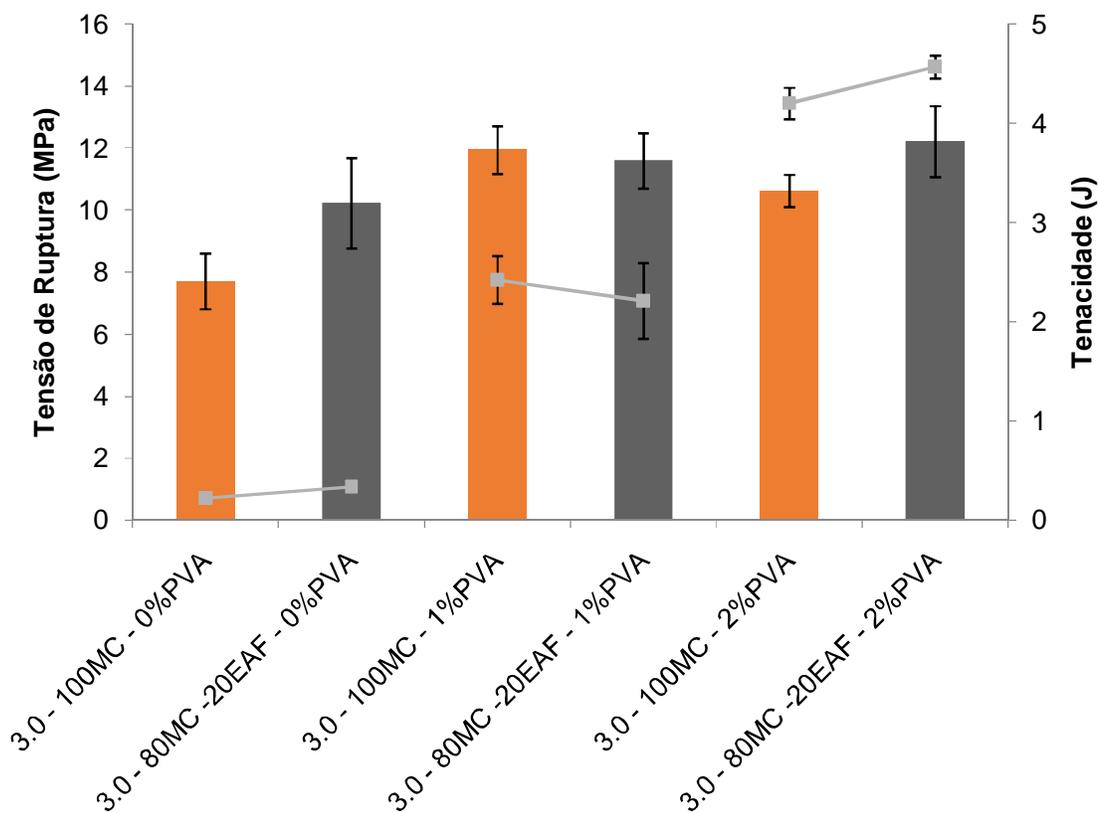


Figura 13 - Tensão de ruptura (barras) e tenacidade (linhas) para formulações com relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$  sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito

Analisando-se o efeito da incorporação de 20% de escória, a tenacidade também se mantém praticamente constante para as formulações, quando comparados compósitos com o mesmo percentual de fibras. No entanto, verifica-se que o reforço com fibras de PVA aumenta significativamente a tenacidade do material para todas as formulações, sendo que os melhores resultados são verificados para os compósitos reforçados com 2% de fibras, como já havia sido mostrado em pesquisas de Zhang *et al.* (2009) e Nematollahi *et al.* (2014). Observa-se, por meio da Tabela 9 que, para as formulações com adição de até 20% de EAF, o reforço com 2% de PVA chega a ocasionar um expressivo ganho de 1788,76% de tenacidade comparado ao material sem fibra (para o caso das formulações "3.0 - 100MC").

Tabela 9 - Tenacidade para as formulações com baixo teor de EAF (até 20%)

Percentual de fibra	Formulação	Tenacidade (J)	Percentual de aumento com relação a formulação sem fibra
0%	3.0 - 100MC	0,22	-
	3.0 - 80MC - 20EAF	0,34	-
1%	3.0 - 100MC	2,43	989,89%
	3.0 - 80MC - 20EAF	2,21	550,74%
2%	3.0 - 100MC	4,20	1788,76%
	3.0 - 80MC - 20EAF	4,57	1244,12%

As Figuras 14 e 15 mostram os resultados de massa específica, absorção de água e porosidade aparente para as formulações com  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$  e matriz composta por 100% metacaulim e com substituição de 20% de escória de alto forno.

Pode-se perceber que a incorporação de escória causa uma elevação significativa na massa específica e queda na absorção de água e porosidade aparente de todos os compósitos analisados. De acordo com as pesquisas de Borges *et al.* (2016), a substituição parcial do metacaulim por escória de alto forno eleva a presença de cálcio na matriz, levando à formação adicional de um gel de aluminossilicato alcalino hidratado,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  (C-A-S-H), que atua no preenchimento dos poros e espaços vazios, contribuindo para a redução da porosidade e da absorção de água do material.

Os resultados obtidos para porosidade aparente do material estão condizentes com aqueles encontrados na literatura. Zhang *et al.* (2006), por exemplo, ao avaliarem um MAA com matriz 100% de metacaulim e reforço de 2% de fibras de PVA, encontraram um valor de médio de porosidade de 25,59%.

Os percentuais de absorção de água e porosidade mostraram elevação com a incorporação de 1% e 2% de fibras, o que está de acordo com a queda de resistência à compressão observada na Figura 11.

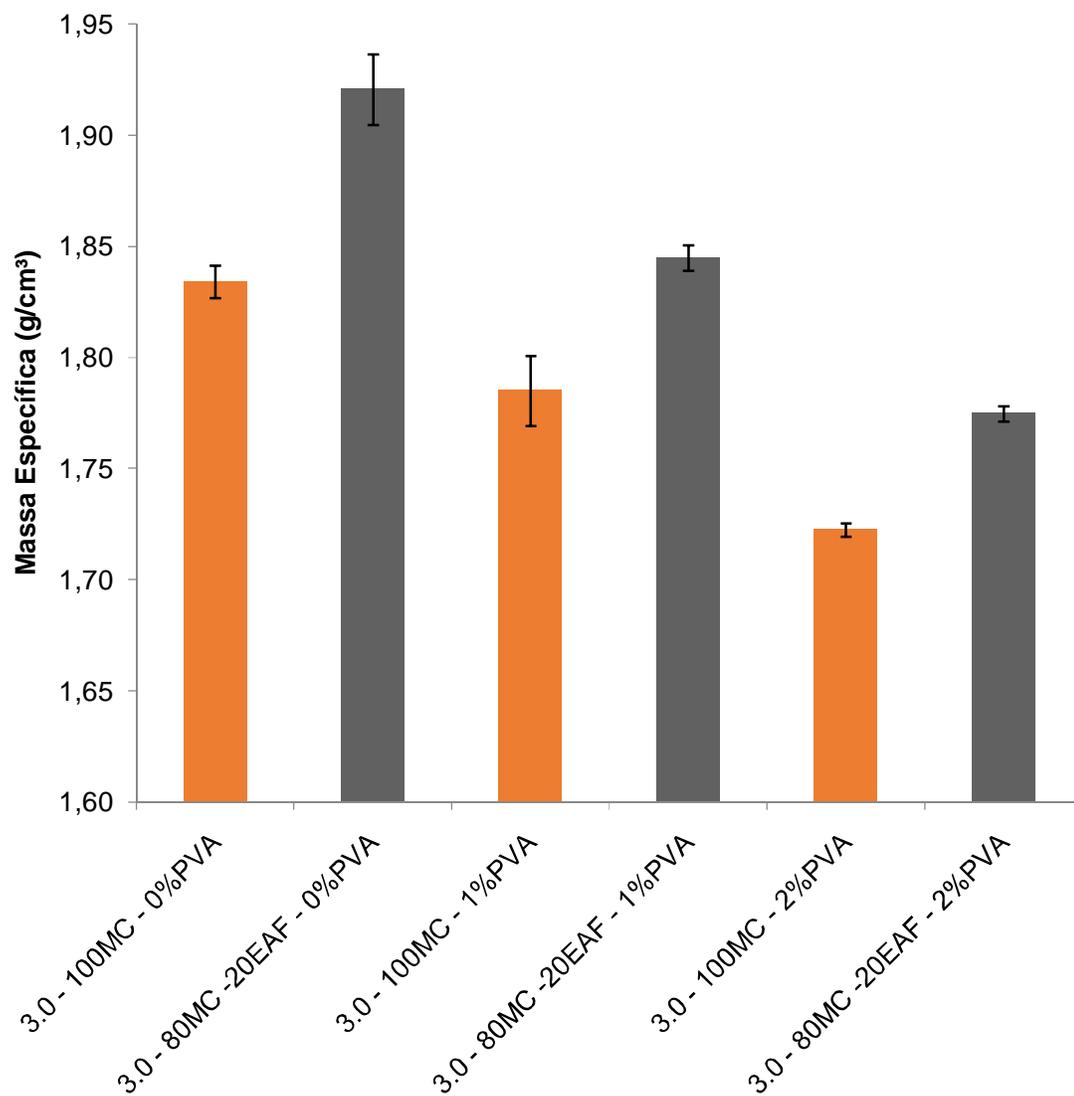


Figura 14 - Massa específica para formulações com relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$  sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito

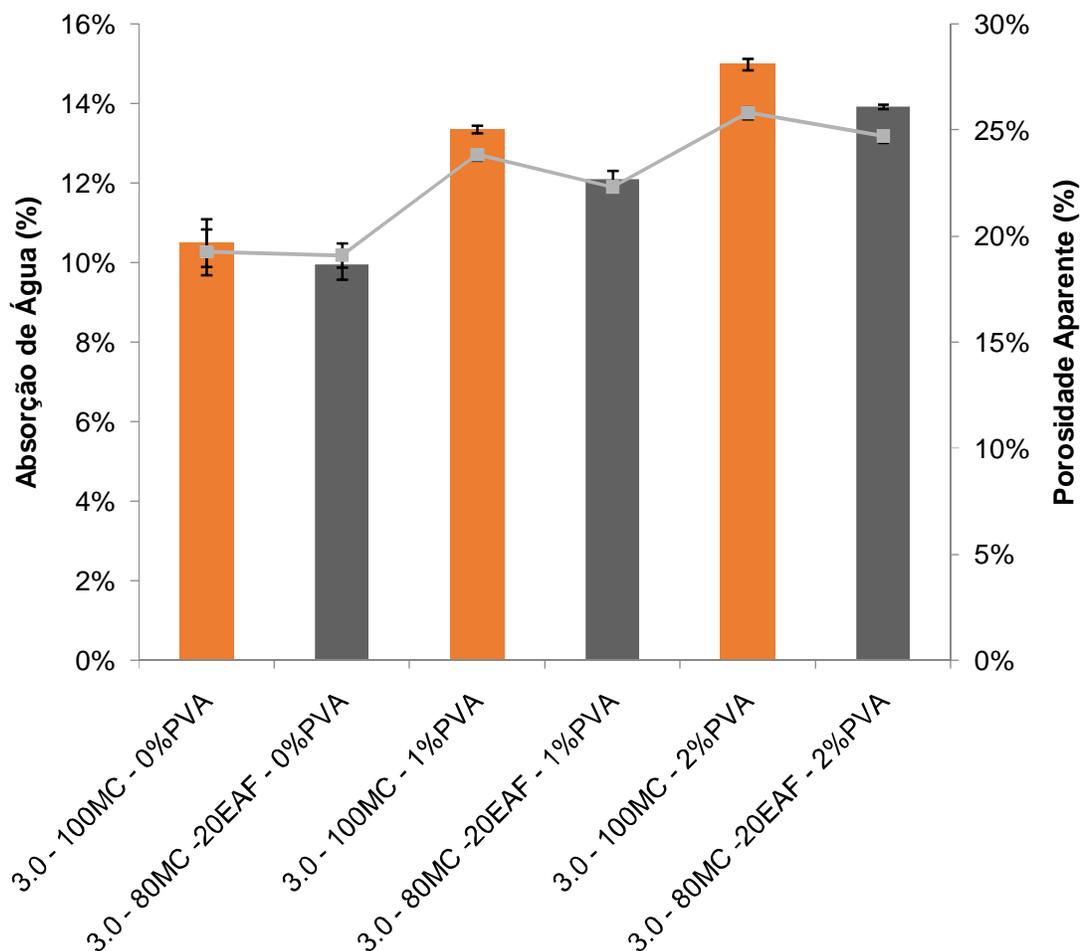


Figura 15 - Absorção de água (barras) e porosidade aparente (linhas) para formulações com relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.0$  sem escória e com incorporação de 20% de escória no compósito

Conclui-se que somente a adição de 20% de escória, mantendo-se constante a relação molar da formulação, não produz efeitos significativos nas propriedades mecânicas avaliadas. No entanto, as propriedades físicas (absorção de água, massa específica e porosidade) sofreram maiores variações com a incorporação de 20% de escória no compósito. Em outras palavras, a substituição parcial do metacaulim por 20% de escória de alto forno elevou a massa específica do material, contribuindo também para a diminuição da absorção de água e porosidade aparente do compósito. Além disso, em todos os casos, a adição de 2% de fibras de PVA melhorou significativamente a tenacidade dos compósitos.

#### 4.3. Influência da incorporação de maiores teores de EAF (20% a 40%) nos compósitos com consequente aumento da relação sílica / alumina

Para análise da influência da variação da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  nos compósitos, foram comparados os resultados das formulações "3.0-80MC-20EAF", "3.45-70MC-30EAF" e "3.9-60MC-40EAF", com diferentes percentuais de reforço de fibras (0%, 1% 2%). A comparação dessas formulações permite analisar qual o efeito da incorporação de maiores percentuais de escória na matriz, com consequente variação da relação molar  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  nas propriedades físicas e mecânicas do compósito.

As Figuras 16 e 17 que se seguem mostram os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos para as formulações em questão. Observa-se que, para as formulações sem fibras e com 1% de PVA, os resultados de resistência à compressão e de módulo de elasticidade sofrem uma queda à medida que aumenta-se a relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  do compósito a partir da elevação do percentual de escória. Ou seja, para essas formulações, quanto maior o percentual de escória na matriz e a relação molar do material álcali-ativado analisado, menor a resistência à compressão e, também, o módulo de elasticidade. No entanto, para os materiais com reforço de 2% de fibras, os índices se mantêm constantes com a variação do percentual de EAF. Isso pode ser explicado quando observamos que estes materiais possuem os menores resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade, ou seja, a incorporação de 2% de PVA causa tantos defeitos estruturais na composição do material que o efeito da elevação da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  não é notado.

De fato, Bernal *et al.* (2011), ao também estudarem MAA ativado com matriz mista de metacaulim e escória de alto forno, obtiveram uma redução da resistência à compressão com a elevação da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Naquele trabalho, os autores explicam que, para MAA com matriz rica em metacaulim, o excesso de silicatos associado a maiores relações molares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  acarreta uma redução da resistência à compressão. Isso ocorre uma vez que, nesses casos, a polimerização da sílica acontece de forma intensa, diminuindo a reatividade da mesma. Sendo assim, a sílica reage mais lentamente do que é necessário para o desenvolvimento ideal da resistência do material.

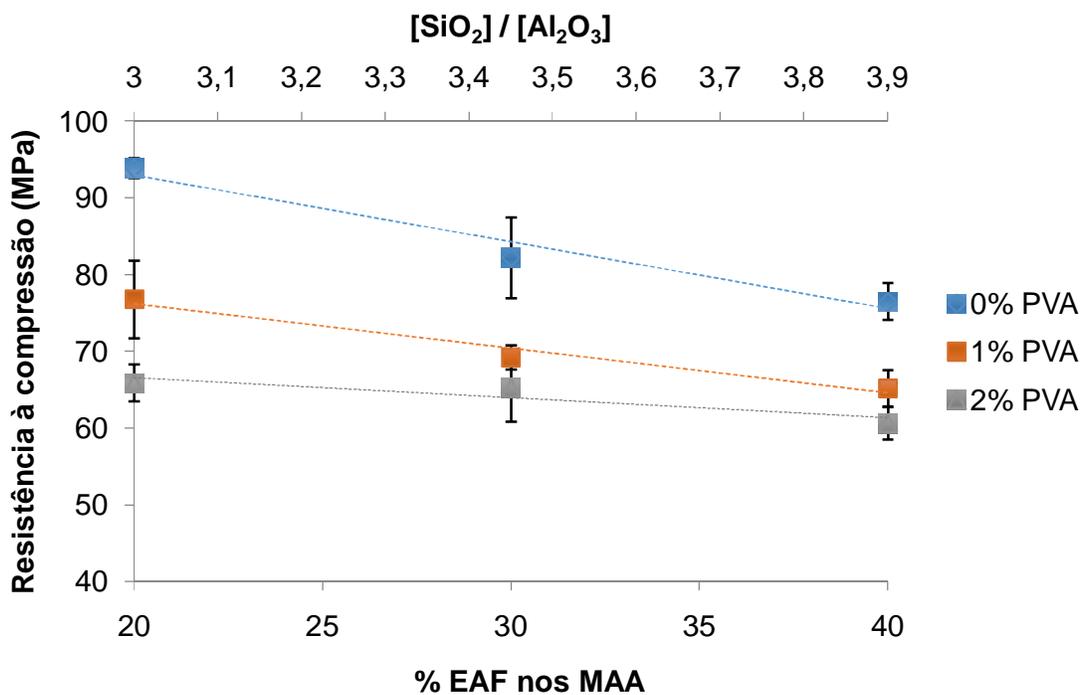


Figura 16 - Resistência à compressão para formulações com diferentes relações molares

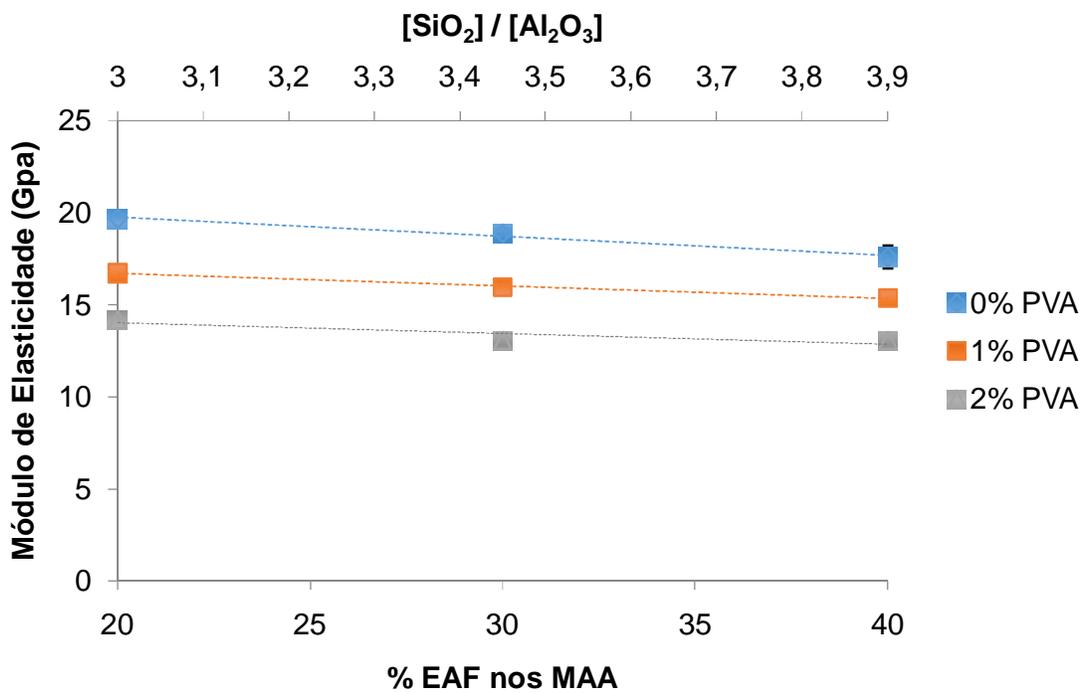


Figura 17 - Módulo de elasticidade para formulações com diferentes relações molares

A Figura 18, obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura, mostra que a escória de alto forno adicionada na matriz para a elevação do índice molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  não reage em sua totalidade. De fato, é possível observar vários pontos de concentração de EAF não ativada, o que é mais evidente para a formulação "3.9-60MC-40EAF", contendo 40% de EAF em substituição ao metacaulim. Essa situação ajuda a explicar a perda de resistência à medida que eleva-se o percentual de escória na matriz, uma vez que parte da EAF não reagiu como deveria, levando a resultados mecânicos menores.

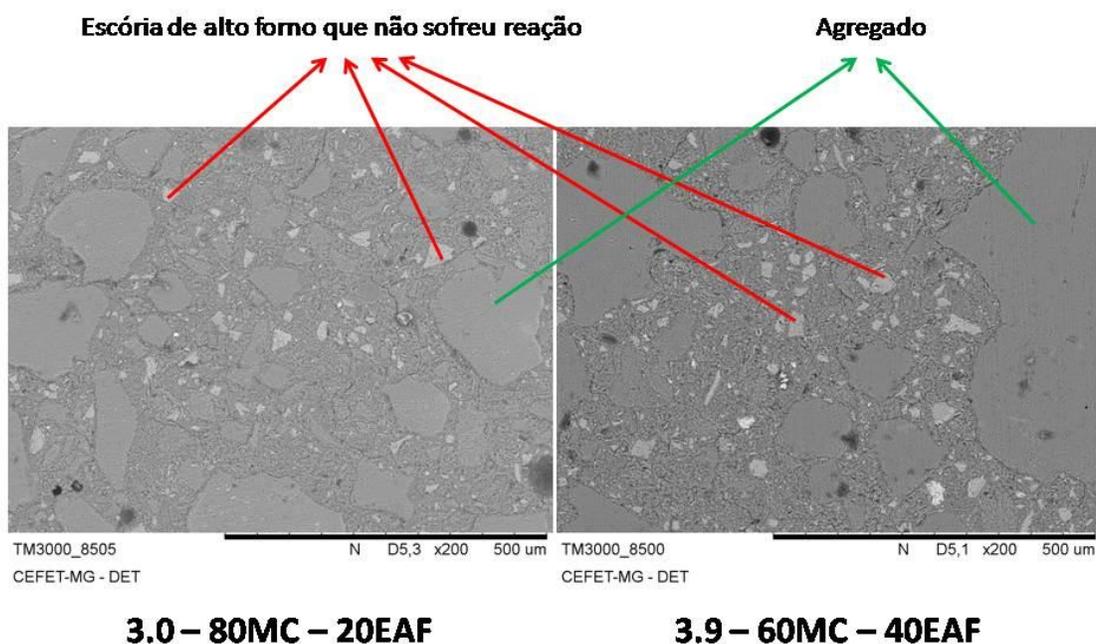


Figura 18 - MEV mostrando a presença de EAF não reativa nos compósitos

A Figura 19 mostra as curvas força x deflexão, obtidas por meio do ensaio de flexão em três pontos, para as formulações com percentuais de EAF de 20%, 30% e 40%. O gráfico mostra que somente as formulações com 2% de reforço de fibras de PVA apresentam o comportamento conhecido como *deflection-hardening*, caracterizado pela capacidade do material suportar cargas e deflexões crescentes, mesmo depois do surgimento das primeiras fissuras.

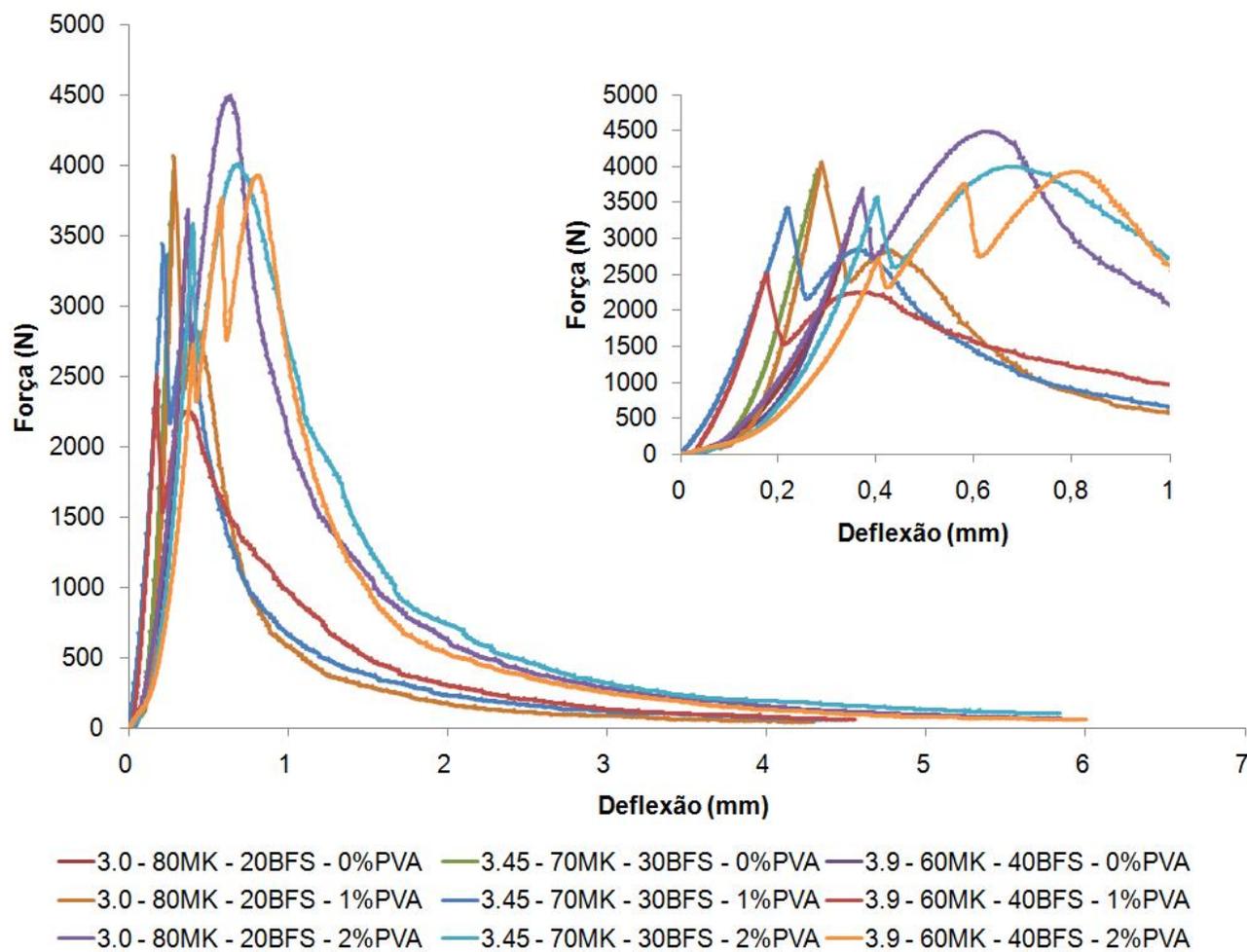


Figura 19 - Gráfico Força x Deflexão de ensaio de flexão em três pontos para formulações com escória

As Figuras 20 e 21 mostram, respectivamente, os resultados de tensão de ruptura e de tenacidade alcançados por meio do ensaio de flexão em três pontos.

Nota-se, pela Figura 20, que a elevação do percentual de EAF e, conseqüentemente da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , também é responsável pela redução da tensão de ruptura à flexão das formulações sem fibra de PVA e com 1% de PVA. No entanto, nos compósitos reforçados com 2% de PVA, a queda de resistência mecânica da matriz é compensada pela maior tensão de ruptura proporcionada pela adição das fibras (fenômeno de *deflection-hardening*). Assim sendo, uma combinação entre maiores percentuais de EAF com o reforço de 2% de PVA não prejudica o comportamento à flexão desse compósito.

A Figura 21 mostra novamente que os compósitos reforçados com 2% de fibras de PVA possuem maior tenacidade à flexão do que aqueles com 0% ou 1% de PVA, para um mesmo percentual de EAF (ou relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). No entanto, esta figura mostra principalmente um superior aumento na tenacidade média para o compósito com 2% de PVA contendo 40% EAF ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.9$ ), em relação aos demais compósitos. De fato, a queda de resistência mecânica da matriz quando adiciona-se 40% EAF parece diminuir a aderência entre fibra e matriz, provavelmente proporcionando melhor arrancamento (*pullout*) das fibras de PVA, com conseqüente fenômeno de *deflection-hardening* e aumento de tenacidade. O estudo do modo de falha dos compósitos contendo fibra de PVA (por arrancamento ou ruptura) em função da relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  é objeto de estudo em outras pesquisas no CEFET-MG, mas está fora do escopo deste trabalho.

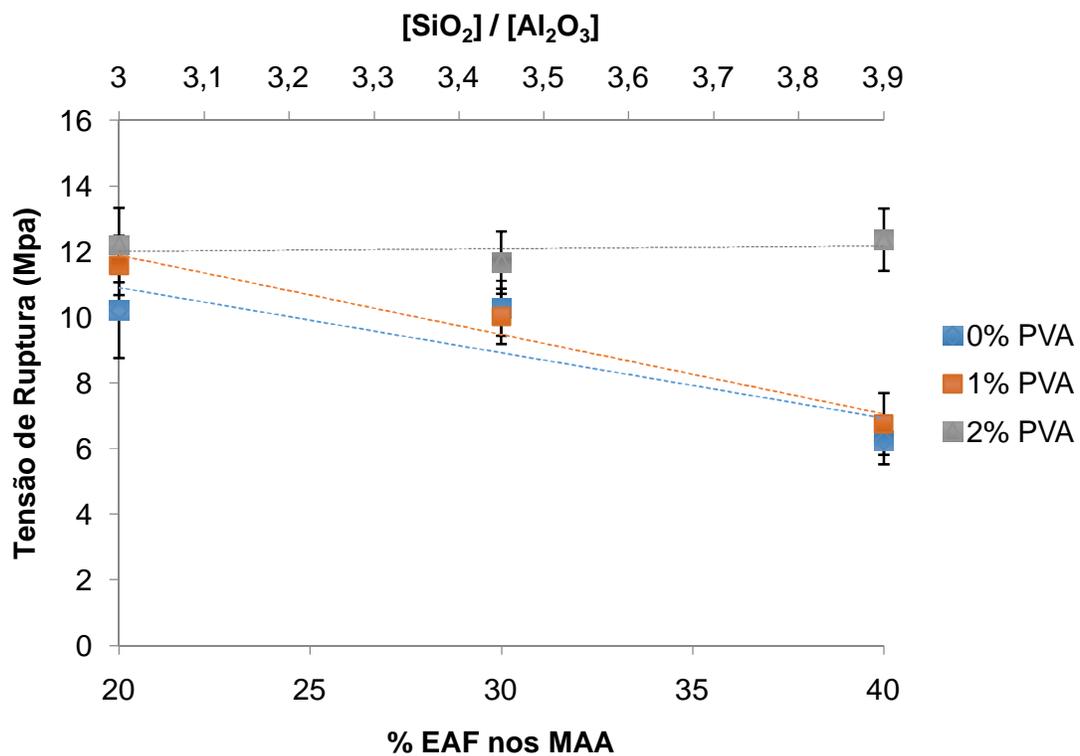


Figura 20- Tensão de ruptura para formulações percentual de EAF entre 20% e 40%

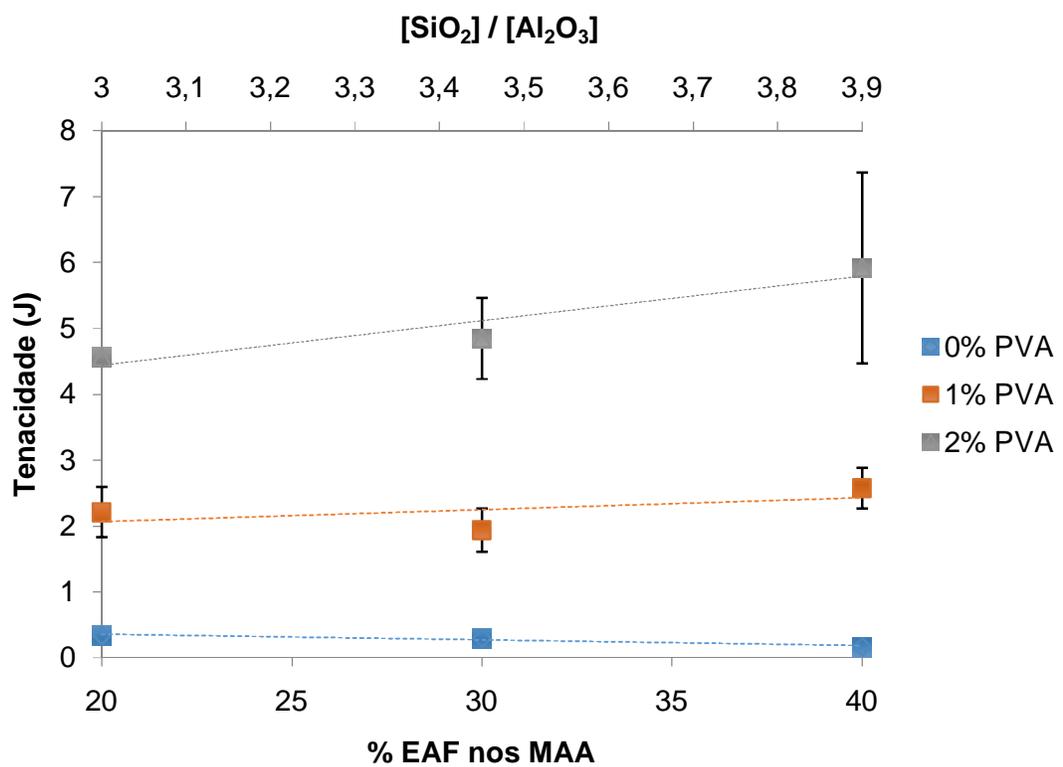


Figura 21 - Tenacidade para formulações percentual de EAF entre 20% e 40%

A Tabela 10 apresenta um quadro com os valores de tenacidade e os ganhos ocasionados pelo reforço com fibras para todas as formulações estudadas. É possível verificar a elevação na tenacidade dos compósitos com a adição das fibras de PVA. Novamente, os maiores valores são encontrados para os materiais com 2% de reforço. Por meio da tabela, visualiza-se também, conforme citado, o expressivo ganho de tenacidade média para a formulação com 40% de EAF ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.9$ ) com relação aos demais. Para este caso, o reforço com 2% de PVA ocasionou uma elevação de 3487,88% na tenacidade comparando-se com a mesma formulação sem fibras.

Tabela 10 - Resultados de tenacidade e ganhos percentuais com adição de fibras

<b>Percentual de fibra</b>	<b>Formulação</b>	<b>Tenacidade (J)</b>	<b>Percentual de aumento com relação a formulação sem fibras</b>
0%	3.0 - 100MC	0,22	-
	3.0 - 80MC - 20EAF	0,34	-
	3.45 - 70MC - 30EAF	0,30	-
	3.9 - 60MC - 40EAF	0,17	-
1%	3.0 - 100MC	2,43	989,89%
	3.0 - 80MC - 20EAF	2,21	550,74%
	3.45 - 70MC - 30EAF	1,94	546,67%
	3.9 - 60MC - 40EAF	2,58	1460,61%
2%	3.0 - 100MC	4,20	1788,76%
	3.0 - 80MC - 20EAF	4,57	1244,12%
	3.45 - 70MC - 30EAF	4,85	1516,67%
	3.9 - 60MC - 40EAF	5,92	3487,88%

As Figuras 22, 23 e 24 mostram os resultados de massa específica, absorção de água e porosidade aparente para as formulações com substituição parcial do metacaulim por escória de alto forno na matriz e consequente variação na relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Nota-se que a variação da relação molar não causa uma variação significativa nos índices de massa específica, absorção de água e porosidade aparente dos compósitos analisados, que se mantém praticamente constantes, levando-se em conta a margem de erro dos resultados.

Por outro lado, o índice de reforço de fibras influencia diretamente nos parâmetros físicos citados, sendo que a elevação do percentual de reforço, como explicam Li *et al.* (2014), causa um aumento do índice de vazios na matriz, acarretando a diminuição da massa específica e elevação da absorção de água e porosidade do material.

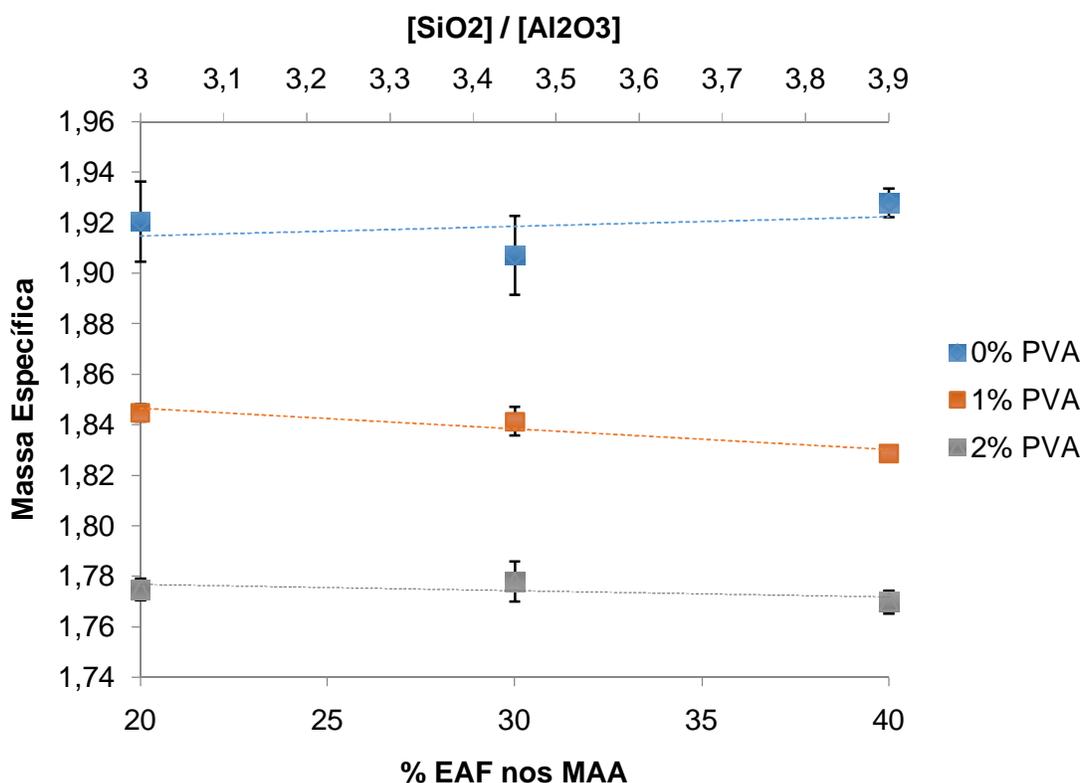


Figura 22 - Massa específica para formulações com percentual de EAF entre 20% e 40%

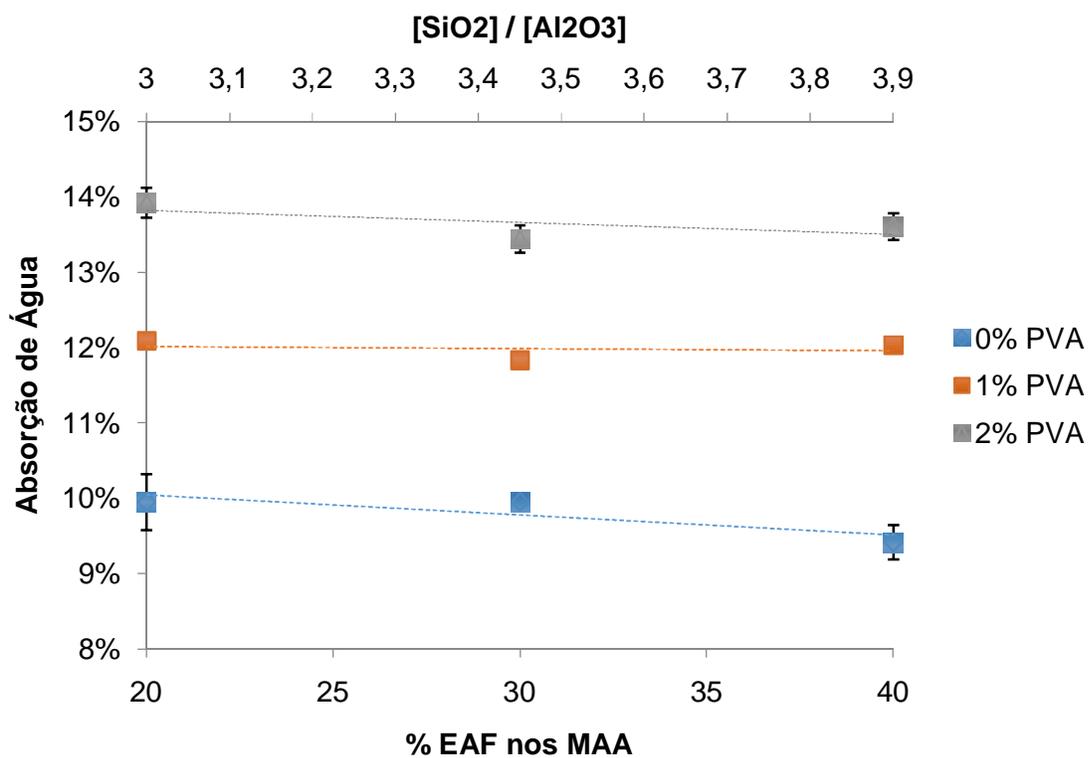


Figura 23 - Absorção de água para formulações com percentual de EAF entre 20% e 40%

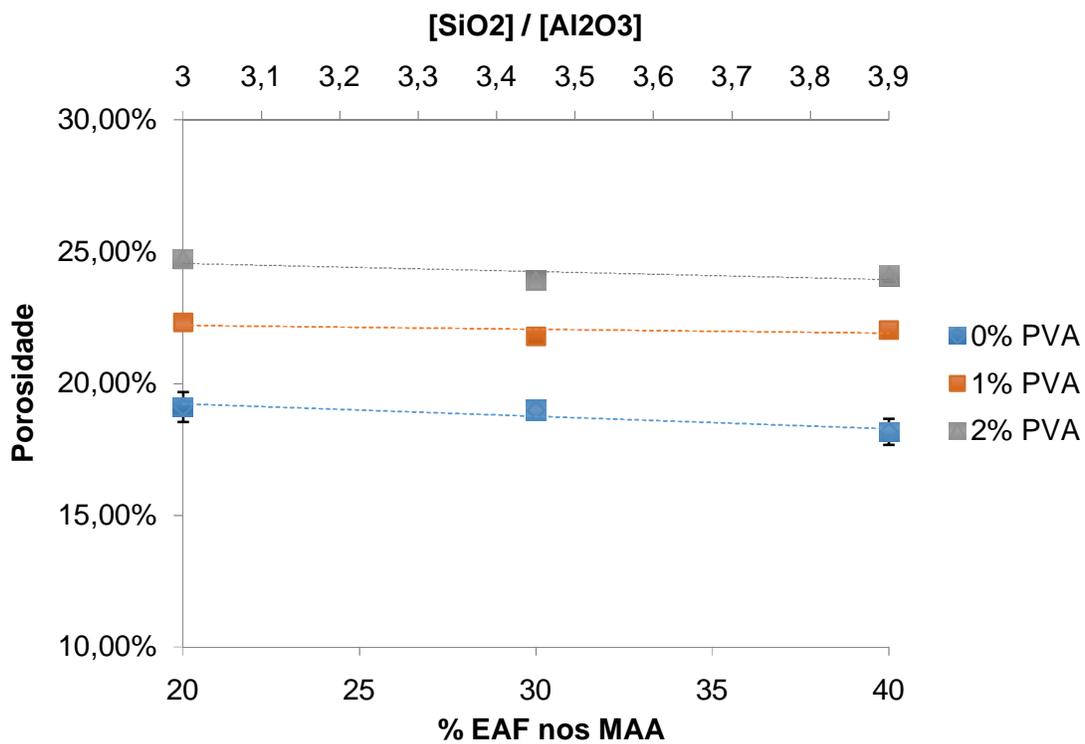


Figura 24 - Porosidade aparente para formulações com percentual de EAF entre 20% e 40%

Conclui-se que a variação do percentual de EAF entre 20% e 40% em substituição ao metacaulim, com conseqüente variação na relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 3.0 a 3.9 gerou efeitos perceptíveis na resistência à compressão dos álcali-ativados. A elevação da relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  causa uma queda na resistência mecânica das matrizes, que pode ser compensada com a adição de 2% de PVA, permitindo inclusive um aumento de tenacidade. Este percentual de fibra de PVA, no entanto, aumenta a absorção de água e porosidade dos compósitos, o que pode comprometer um pouco a durabilidade dos mesmos em ambientes agressivos.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou os efeitos da incorporação de escória em argamassas álcali-ativadas com matriz de metacaulim reforçadas com fibras de PVA, bem como avaliou o efeito da variação da relação molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  nas propriedades dos mesmos.

São conclusões deste trabalho:

- A adição de 20% de escória de alto forno no compósito álcali-ativado analisado, mantendo a relação molar constante, causou efeitos perceptíveis nas propriedades físicas avaliadas, comparadas à argamassa composta somente por metacaulim. A incorporação da EAF na matriz proporcionou um aumento na massa específica do material, com conseqüente diminuição da absorção de água e porosidade aparente do compósito;
- A variação da relação molar  $[\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]$  nos compósitos álcali-ativados, por meio da mudança de proporcionalidade entre os elementos aglomerantes (metacaulim e escória de alto forno) presentes na matriz do material proporcionou efeitos perceptíveis nas propriedades mecânicas avaliadas. O aumento da relação molar, de 3.0 até 3.9 (percentual de EAF entre 20% e 40%) reduz a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura dos compósitos analisados. A exceção ocorre nos compósitos reforçados com 2% de PVA, nos quais a queda de resistência mecânica da matriz é compensada pela maior tensão de ruptura proporcionada pela adição das fibras (fenômeno de *deflection-hardening*);
- A incorporação de fibras de reforço e a variação do percentual das mesmas causou expressivos efeitos nas propriedades mecânicas testadas. Quanto maior o índice de fibras no álcali-ativado analisado, menor a resistência à compressão e, também, o módulo de elasticidade do material. O aumento do percentual de fibras presente nos compósitos gerou, também, uma tendência de elevação na tensão de ruptura;
- A adição de fibras de PVA também causou uma elevação extremamente expressiva da tenacidade do material, com os melhores resultados

obtidos para um teor de 2% de fibras de PVA em volume, que chegou a ocasionar um expressivo ganho de 3487,88% na tenacidade dos compósitos, comparando-os com a mesma formulação sem fibras;

- O reforço dos álcali-ativados com fibras de PVA também causou grande influência nas propriedades físicas testadas. O aumento do teor de fibras levou a uma acentuada queda na massa específica do compósito. Além disso, a elevação do percentual de reforço levou a um expressivo aumento dos índices de absorção de água e porosidade aparente.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779. **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248, **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.522. **Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.142. **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, ABNT, 2010.

ACI Committee 544. **State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.** ACI 544.1R, 1996.

AHMED, S. F. U. & LU, Y. Y. Development of deflection-hardening geopolymer-based ductile fibre reinforced cementitious composites. **Journal of the Chinese Advanced Materials Society**, v. 1, n. 1, p. 7-20, 2013.

ALOMAYRI, Thamer *et al.* Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 60, p. 36-42, 2014.

ALZEER, Mohammad & MACKENZIE, Kenneth. Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormiumtenax). **Applied Clay Science**, v. 75, p. 148-152, 2013.

ASTM, C. 230, Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. **West Conshohocken, PA: ASTM International**, 2008.

BANTHIA, Nemkumar *et al.* Restrained Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Cementitious Composites. **Materials and Structures**, v. 26, p. 405–413, 1993.

BANTHIA, Nemkumar. Fiber reinforced concrete. **ACI SP-142ACI**, Detroit, MI, p. 91-119, 1994.

BANTHIA, Nemkumar *et al.* Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products. **PCI journal**, v. 57, p. 33, 2012.

BENTUR, A. & MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. CRC Press, 2006.

BERNAL, Susan A. *et al.* Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 2, p. 208-214, 2010.

BERNAL, Susan A. *et al.* Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 16, p. 5477-5486, 2011.

BLOOM, R. & BENTUR, A. Free and Restrained Shrinkage of Normal and High Strength Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 92, p. 211–217, 1995.

BORGES, P. H. R. *et al.* Andreasen particle packing method on the development of geopolymer concrete for civil engineering. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, p. 692-697, 2014.

BORGES, P. H. R. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland (CP II). **Ambiente Construído**, 14. 2014, p. 153–168.

BORGES, P. H. R. *et al.* Performance of blended metakaolin / blast furnace slag alkali-activated mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 42-52, 2016.

BRAMESHUBER, W. *et al.* Uniaxial tensile test - Test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete

(Proposal for a recommendation by RILEM TC 232-TDT to be published in **Materials and Structures**). 2010.

CUNHA, M. L. **Influência da interface da cinética de embebição e secagem de paredes com múltiplas camadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers and geopolymeric materials. **Journal of thermal analysis**, v. 35, n. 2, p. 429-441, 1989.

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers. **Journal of thermal analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, Joseph. Properties of geopolymer cements. **First international conference on alkaline cements and concretes**, p. 131-149, 1994.

DAVIDOVITS, Joseph. Global warming impact on the cement and aggregates industries. **World Resource Review**, v. 6, n. 2, p. 263-278, 1994.

DAVIDOVITS, Joseph. 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. **Keynote Conference on Geopolymer Conference**, 2002.

DUXSON, Peter *et al.* Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1, p. 47-58, 2005.

DUXSON, Peter *et al.* Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

DUXSON, Peter *et al.* The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 292, n. 1, p. 8-20, 2007.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

GAO, X. X. *et al.* Behavior of metakaolin-based potassium geopolymers in acidic solutions. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 380, p. 95-102, 2013.

GLINICKI, M. A. Toughness of Fiber Reinforced Mortar at High Tensile Loading Rates. **ACI Materials Journal**, v. 91, p. 161–166, 1994.

GRANIZO, M. Luz *et al.* Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2934-2943, 2007.

GRZYBOWSKI, M. & SHAH, S. P. Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, p. 138–148, 1990.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions - Executive Summary**. 2007. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/npsum/tracking2007SUM.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

ISLAM, M. T. *et al.* The Impact Resistance of Masonry Units Bound with Fiber Reinforced Mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2851–2859, 2011.

JIN, Man Tong *et al.* Influences of Fiber Content on Mechanical Properties of Geopolymer Reinforced by Polyester Fibers. **Applied Mechanics and Materials**, p. 141-145, 2012.

KRONLOF, A., L. *et al.* Experimental Study on the Basic Phenomena of Shrinkage and Cracking of Fresh Mortar. **Cement and Concrete Research**, v.25, p. 1747–1754, 1995.

LEE, Bang Yeon *et al.* Quantitative evaluation technique of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber dispersion in engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, p. 408-417, 2009.

LEE, B. Y. *et al.* Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar – a feasibility study. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 15-20, 2012.

LI, Victor C. On engineered cementitious composites (ECC). **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 3, p. 215-230, 2003.

LI, Victor C. *et al.* Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). **ACI materials Journal**, v. 98, n. 6, 2001.

LI, Victor C. *et al.* The role of flaw size and fiber distribution on tensile ductility of PVA-ECC. **Composites Part B: Engineering**, v. 56, p. 536-545, 2014.

LI, Weimin & XU, Jinyu. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading. **Materials Science and Engineering: A**, v. 505, n. 1, p. 178-186, 2009.

LI, Zongjin *et al.* Short fiber reinforced geopolymer composites manufactured by extrusion. **Journal of materials in civil engineering**, v. 17, n. 6, p. 624-631, 2005.

LIN, Tiesong *et al.* Effects of fiber length on mechanical properties and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites. **Materials Science and Engineering: A**, v. 497, n. 1, p. 181-185, 2008.

MARAR, Khaled *et al.* Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete. **Materials letters**, v. 47, n. 4, p. 297-304, 2001.

MARÍN-LÓPEZ, C. *et al.* Synthesis and characterization of a concrete based on metakaolin geopolymer. **Inorganic Materials**, v. 45, n. 12, p. 1429-1432, 2009.

MASI, Giulia *et al.* The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers. **Composites Part B: Engineering**, v. 76, p. 218-228, 2015.

MOREIRA, Cristiano Costa. Características e desempenho das escórias de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos. **37ª Reunião Anual de Pavimentação / 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 37ª RAPv / 11º ENACOR**, Goiânia, Brasil, 2006.

NAAMAN, A. E. & REINHARDT, H. W. High performance fiber reinforced cement composites HPRCC-4: International RILEM Workshop. **Materials and Structures**, v. 36, n. 10, p. 710-712, 2003.

NATARAJA, M. C. *et al.* Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 12, p. 2350-2359, 2005.

NEMATOLLAHI, Behzad *et al.* Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 54-64, 2014.

NĚMEČEK, J. *et al.* Nano indentation characteristics of alkali-activated aluminosilicate materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 163-170, 2011.

OHNO, Motohiro & LI, Victor C. A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. **Construction and Building Materials**, v. 57, p. 163-168, 2014.

PAN, Zuanfeng *et al.* Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 397-404, 2015.

PINTO, A. Teixeira. **Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino**. Tese de doutorado, Universidade do Minho, Portugal, 2004.

PINTO, A. Teixeira. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 2006.

RASHAD, Alaa M. Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer – an overview. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 751-765, 2013.

RILEM, CPC. 11.3. Absorption of water by immersion under vacuum. **Materials and Structures**, v. 17, n. 101, p. 391-394, 1984.

RILEM, T. C. 116-PCD: Recommendations of TC 116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. Measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM. CEMBUREAU method. **Materials and Structures**, v. 32, p. 176-179, 1999.

RODRIGUES, M. P. S. F. F. **Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004.

ROKUDO *et al.* Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. **Materials and Structures**, v. 42, p. 1197 -1208, 2009.

ROVNANÍK, Pavel. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1176-1183, 2010.

SAID, Shwan H. *et al.* Flexural behavior of engineered cementitious composite (ECC) slabs with polyvinyl alcohol fibers. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 176-188, 2015.

SAPPAKITTIPAKORN, M. *et al.* Cryoporometry for Pore Size Characterization. **The Indian Concrete Journal**, v.84, p. 17–24, 2010.

SHAIKH, F. U. A. Deflection hardening behaviour of short fibre reinforced fly ash based geopolymer composites. **Materials & Design**, v. 50, p. 674-682, 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2010**. 2011. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11\\_web.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf)>. Acesso em: 03 abr. 2015.

SWAMY, R. N. Prospects of fibre reinforcement in structural applications. **Materials Research Society Symposium on Advances in Cement - Matrix Composites**, p. 159-169, 1980.

VAN DEVENTER, J. S. J. *et al.* Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 145-155, 2010.

VARELA, B. & ROGERS, J. W. Mechanical Response of Discontinuous Filament PVA Fiber Reinforced Geopolymers. **Developments in Strategic Materials and Computational Design II: Ceramic Engineering and Science Proceedings**, v. 32, p. 29-34, 2011.

VERDIER, J. & CARCASSÈS, M. Equivalent gas permeability of concrete samples subjected to drying. **Magazine of Concrete Research**, v. 56, n. 4, p. 223-230, 2004.

WANG, Hongling *et al.* Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 268, n. 1, p. 1-6, 2005.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF International). **A Blueprint for a Climate Friendly Cement Industry: How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions.** 2008. Disponível em: <[http://assets.panda.org/downloads/cement\\_blueprint\\_climate\\_fullenglrep\\_lr.pdf](http://assets.panda.org/downloads/cement_blueprint_climate_fullenglrep_lr.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2015.

YOO, D. Y. Performance enhancement of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and model development for practical utilization. **Seoul, Korea: Korea University**, v. 586, 2014.

ZHANG, Yunsheng *et al.* Impact behavior and microstructural characteristics of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer boards prepared by extrusion technique. **Journal of materials science**, v. 41, n. 10, p. 2787-2794, 2006.

ZHANG, Zu-hua *et al.* Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer. **Journal of Central South University of Technology**, v. 16, p. 49-52, 2009.

ZHANG, Yunsheng *et al.* Geopolymer extruded composites with incorporated fly ash and polyvinyl alcohol short fiber. **ACI materials journal**, v. 106, n. 1, p. 3-10, 2009.

ZHANG, Bo *et al.* Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate. **Journal of materials science**, v. 44, n. 17, p. 4668-4676, 2009.

ZUDA, Lucie *et al.* Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant lightweight aggregates exposed to high temperatures: mechanical and water transport properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 2, p. 157-163, 2010.