

Concreto Geopolimérico: do cimento ao uso estrutural

FERNANDO PELISSER – DR. PROF., ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6113-5473>, pelisser@hotmail.com
UFSC

R E S U M O

O estudo de aglomerantes alternativos ao cimento Portland, como os cimentos geopoliméricos, contribui para o desenvolvimento de materiais eficientes, duráveis e com menores impactos ambientais na sua fabricação, associados ao emprego de matérias-primas de baixo impacto ambiental e redução das emissões dos gases do efeito estufa. As propriedades características de geopolímeros são a resistência à tração, menor retração, durabilidade em ambientes agressivos e sua resistência ao fogo. Este artigo apresentará um

resumo das propriedades mecânicas de geopolímeros compostos com metacaulim, silicato e hidróxido de sódio. Um resumo das propriedades mecânicas mostra que o concreto geopolimérico apresenta resultados competitivos, como a resistência à compressão, a resistência à tensão de ruptura à flexão de uma viga, a maior resistência de aderência à tração e a maior coesão na interface com a armadura. Limitações existem para aplicação deste tipo de concreto, mas são reduzidas desde que se conheça suas propriedades e se explore projetos com aplicações mais vantajosas.

PALAVRAS-CHAVE: GEOPOLÍMEROS, CONCRETO, PROPRIEDADES MECÂNICAS, METACULIM.

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade da construção civil é, atualmente, uma preocupação, visto o grande impacto ambiental, social e econômico desta indústria, devendo-se considerar, principalmente o impacto associado à fabricação de materiais, o consumo de cimento. O concreto é o material de construção mais consumido pelo homem e as diretrizes para sua sustentabilidade estão baseadas na redução do consumo de clínquer e uso de cimentos mais eficientes, utilização de materiais reciclados e no desenvolvimento de projetos com consumo racional de concreto, garantindo-se uma durabilidade satisfatória.

A produção global de cimento Portland foi de 4,6 bilhões de toneladas em 2015 (UN Environment, SCRIVENER, JOHN, GARTNER, 2018), representando um consumo médio global de clínquer de 0,8 tonelada por tonelada de cimento Portland produzido. A produção global de cimento tem aumentado contínua e significativamente devido ao aumento da população, à urbanização

e ao desenvolvimento de infraestrutura (SCHNEIDER, 2019). Atualmente a indústria cimenteira é o terceiro maior consumidor industrial de energia e sua produção representa 6-7% das emissões antropogênicas globais de CO₂ (*carbon footprint*), o que corresponde a 5% das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa em CO₂-equivalentes (OECD/IEA CSI, 2018). Dadas as diretrizes para reduções de emissões de CO₂, é um percentual elevado para uma única indústria, mesmo expondo toda a importância social e econômica de seu desenvolvimento. Apesar disso, o concreto pode ser considerado um material “sustentável”, pois minimiza seu impacto ambiental através da utilização de grande quantidade de resíduos de outras indústrias, captura o CO₂ da atmosfera e pode ser infinitamente reciclado. Comparativamente, também apresenta menor impacto ambiental em relação a inúmeros materiais alternativos, com custo competitivo.

Uma alternativa para reduzir o impacto ambiental da produção do cimento Portland é melhorar seu

rendimento, reduzindo a quantidade de cimento na composição de concretos e argamassas (DAMINELLI *et al.*, 2010) e através da utilização de materiais cimentícios suplementares (SCMs) (JUENGER e SIDDIQUE, 2015). As principais fontes de SCM são as usinas que utilizam carvão como combustível e fornos metalúrgicos produzindo ferro fundido, pozolanas naturais, sílica de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim. Outra alternativa é o desenvolvimento de cimentos alternativos, que apresentam propriedades técnicas diferenciadas e menores impactos ambientais durante a produção, destacando-se em relação ao cimento Portland para algumas aplicações. Estes tipos de cimento têm sido mais frequentemente estudados nos últimos anos e são denominados de cimentos geopoliméricos ou geopolímeros, também denominados de materiais cimentícios sem clínquer (*clinker-free*).

Polímeros inorgânicos, também denominados “geopolímeros”, são aluminossilicatos que mostram excelentes propriedades físico-

químicas e um grande potencial de aplicações, incluindo estruturas pré-fabricadas e elementos não estruturais, produtos e pavimentos de concreto; podem conter e imobilizar resíduos tóxicos e perigosos; formam cerâmicos refratários e ferramentas estruturais avançadas, bem como compósitos resistentes ao fogo, utilizados em edificações. Em 1972, Davidovits denominou "geopolímeros" os aluminossilicatos tridimensionais formados rapidamente a baixa temperatura por aluminossilicatos de ocorrência natural (DAVIDOVITS, 1991).

Este artigo pretende apresentar as propriedades mecânicas de cimentos geopoliméricos compostos com metaculimeativadores, sua aplicação em argamassas e concretos, bem como em um elemento estrutural e seu uso na produção de concretos de alta resistência utilizando microfibras de aço. Será analisado o comportamento mecânico, com objetivo de mostrar o potencial deste tipo de concreto, bem como as demais propriedades dos geopolímeros.

2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CIMENTO GEOPOLIMÉRICO PRODUZIDO

O cimento geopolimérico foi produzido utilizando metacaulim (MK), metassilicato de sódio ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{O}$, com 26,5%, 10,6% e 63%, respectivamente) e hidróxido de sódio (NaOH). Foi analisada a concentração do ativador alcalino nas propriedades mecânicas, variando a relação molar de $\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}/\text{Na}(\text{OH})$ igual a 2,2, 1,6 e 1,0.

O cimento geopolimérico apresentou resultados mecânicos satisfatórios, alcançando 64 MPa de resistência à compressão, módulo de elasticidade de 10 GPa e dureza de 0,4 GPa obtidos em ensaios nomenclônicos. A resistência à flexão e o módulo de elasticidade à flexão foram de 18 MPa e 8,4 GPa, respectivamente. Os melhores resultados foram obtidos para composição com

relação $\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}/\text{Na}(\text{OH})$ igual a 1,6, que foram equivalentes à relação $\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}/\text{Na}(\text{OH})$ de 2,2 e superiores à relação de 1,0, em relação à resistência à compressão. Essa variação foi devida à porosidade da matriz cimentícia, sendo que o detalhamento desses resultados podem ser explorados em Pelisser *et al.* (2013). Resultados deste cimento quando utilizado como material de recuperação estrutural foram equivalentes aos de adesivos à base de epóxi (FRASSON *et al.*, 2020).

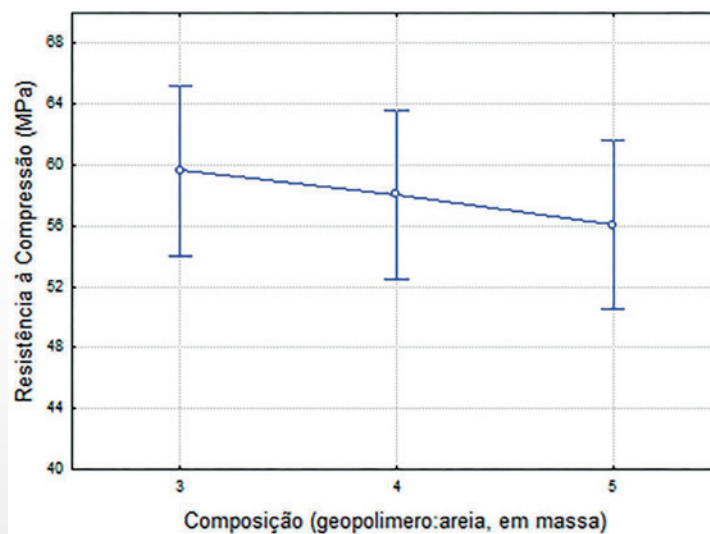
3. RESULTADOS DA APLICAÇÃO EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

O cimento geopolimérico com maior resistência, com concentração intermediária de ativador alcalino, foi testado em argamassa nas composições de cimento-agregados na proporção 1:3, 1:4 e 1:5 (cimento:areia) e em concreto nas composições 1:3, 1:4 e 1:5 (cimento:agregados, utilizando um teor de argamassa de 85% e 15% de agregados graúdos). Foi utilizada brita convencional (de basalto) e agregados reciclados de

concreto de construções demolidas (britado em laboratório).

Nas argamassas, os resultados mostraram pequena perda de resistência com o acréscimo dos agregados. Este comportamento é uma característica dos cimentos geopoliméricos devido à sua maior coesão. Os resultados de resistência à compressão foram de aproximadamente 60 MPa e 55 MPa para as composições 1:3 e 1:5 (Fig. 1), respectivamente. Na composição 1:5, é obtido o melhor resultado, considerando o índice de eficiência de consumo de cimento b_i (*binder intensity*) de $5,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$. Os valores de módulo de elasticidade foram de 24,4 GPa, 26,2 GPa e 31,3 GPa para as composições 1:3, 1:4 e 1:5, respectivamente.

Os resultados de resistência à compressão dos concretos foram de 57 MPa, 59 MPa e 60 MPa para as composições 1:3, 1:4 e 1:5, respectivamente. Já para as mesmas composições, utilizando concreto reciclado, os resultados de resistência foram de 54 MPa, 60 MPa e 59 MPa (traços 1:3, 1:4 e 1:5, respectivamente). O módulo de elasticidade foi de

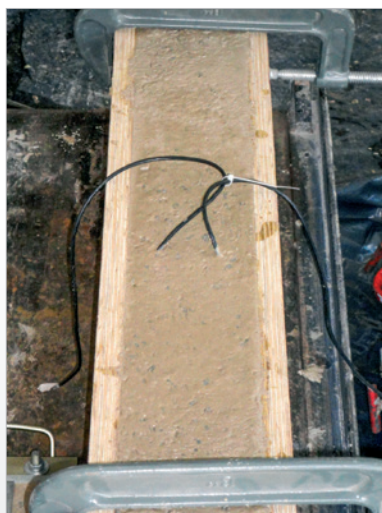


► **Figura 1**
Resistência à compressão de composições de argamassa
Fonte: Pelisser *et al.* (2013)

aproximadamente 20 GPa, 22 GPa e 26 GPa para as composições 1:3, 1:4 e 1:5, respectivamente. Foi verificado que este pequeno aumento na resistência à compressão (de 55 MPa para 59 MPa) pode ter sido causado pela redução da zona de transição entre o cimento geopolimérico e o agregado reciclado. Para composição de concreto, traço 1:5, foi obtido o melhor resultado de índice de eficiência de consumo de cimento b_1 de 5,0 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$. Este resultado é considerado de eficiência elevada por diversos autores em variados estudos que analisam o consumo eficiente de clínquer e/ou de cimento.

4. ANÁLISE DE UMA VIGA DE CONCRETO GEOPOLIMÉRICO

Considerando a grande aplicabilidade das estruturas de concreto como sistema construtivo e a importância de caracterizar este tipo de cimento aplicado em elemento estrutural, foram produzidas vigas, adotando uma armadura padrão (dimensionada conforme ABNT NBR 6118) e concreto geopolimérico com composição unitária de 1:3,8:1,2 (ci-



► **Figura 2**
Viga de concreto geopolimérico (Vgeo)
Fonte: Pelisser *et al.* (2018)

► **Tabela 1**

Composição dos concretos utilizados na produção das vigas

Materiais	Concreto geopolimérico (em massa)	Materiais	Concreto de cimento Portland (em massa)
Cimento geopolimérico	1	Cimento Portland	1
H ₂ O/MK (g/g)	0,75	a/c	0,40
Areia	3,8	Areia	2,3
Brita	1,2	Brita	2,7
Areia + Brita	5	Areia + Brita	5
Massa específica (kg/m ³)	2350	Massa específica (kg/m ³)	2360

Fonte: Pelisser *et al.* (2018)

mento:areia:brita). Foram produzidas duas vigas de concreto com dimensões de 12 × 25 × 220 cm. Uma viga de referência utilizando concreto de cimento Portland (traço unitário de 1:2,3:2,7:0,4 – cimento:areia:brita:relação a/c, em massa) e outra de concreto geopolimérico (Fig. 2). O concreto geopolimérico foi composto por metacaulim, silicato de sódio, hidróxido de sódio, areia e brita, com composições descritas na Tabela 1 e sem adição de água, com exceção a presente no silicato (63%). Foram produzidas mais 4 vigas, duas de cada tipo de concreto, com dimensões menores de 12 × 20 × 160 cm, com objetivo de facilitar a produção e mantendo uma relação adequada para análise.

As vigas foram testadas à flexão, ensaiadas em quatro pontos e utilizan-

do medidores de deformação do tipo strain gauges colados na armadura (tracionada) e na capa superior de concreto (comprimida). Mais informações sobre a produção das vigas podem ser verificadas em Pelisser *et al.* (2018).

O concreto geopolimérico apresentou uma resistência à compressão de 5,4 MPa, 44,5 MPa e 55,1 MPa nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente (Tabela 2). O módulo de elasticidade foi médio de 26,1 GPa. A resistência de aderência aço-concreto – medida pelo método push-in (SILVA, 2014) – foi de 34,1 MPa. O concreto de cimento Portland teve resistência à compressão média de 33,5 MPa, 49,1 MPa e 50,6 MPa nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente. O módulo de elasticidade foi 48,1 GPa. A resistência de aderência aço-concreto média foi de 26,1 MPa, e, bastante inferior a

► **Tabela 2**

Propriedades mecânicas dos concretos utilizados na produção das vigas (para cada ensaio foram utilizados 3 corpos de prova)

Concreto geopolimérico	Resistência à compressão (MPa) ¹			Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência de aderência (MPa)
	7 dias	21 dias	28 dias		
Média (desvio padrão)	5,4 ± 0,2	44,5 ± 5,4	55,1 ± 2,2	26,1 ± 0,2	34,1 ± 0,3

Concreto de cimento Portland	Resistência à compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa) ²	Resistência de aderência (MPa) ³
	7 dias	21 dias	28 dias		
Média (desvio padrão)	33,5 ± 0,6	49,1 ± 1,6	50,6 ± 1,4	48,1 ± 1,4	26,1 ± 1,0

Fonte: Pelisser *et al.* (2018) – Propriedades determinadas de acordo com as normas: ¹ ABNT NBR 5739 (2018); ² ABNT NBR 8522; ³ SILVA (2014)

capacidade de aderência do concreto geopolimérico.

O desempenho mecânico do concreto aplicado e testado em uma viga através do ensaio de flexão em quatro pontos foi satisfatório, principalmente, considerando que a cura foi realizada ao ar. As vigas (com dimensões de $12 \times 25 \times 220$ cm) de concreto geopolimérico (Vgeo) e de concreto de cimento Portland (Vpc) atingiram uma carga de ruptura máxima de 131,7 kN e 121,4 kN, respectivamente (Fig. 3). O deslocamento máximo na carga de ruptura foi de 27,6 mm e na carga de plastificação foi de 14,4 mm, o que resulta em um fator de ductilidade global de 1,92 para Vgeo. Já para Vpc o deslocamento máximo na carga de ruptura foi de 16,5 mm e na carga de plastificação foi de 10,4 mm, o que resulta em um fator de ductilidade global de 1,59. O conjunto desses resultados permite concluir que Vgeo apresentou um patamar de plastificação maior que Vpc, mostrando maior ductilidade (PELISSER *et al.*, 2018). Este comportamento já foi observado por outros pesquisadores ao avaliar a ductilidade de compósitos de cimento geopolimérico. Estes resultados estão relacionados a maior capacidade de deformação do concreto geopolimérico. Também foi observado maior resistência à propagação de fissuras ou tenacidade de Vgeo no regime plástico. Este efeito foi influenciado pela maior aderência aço-concreto. No regime elástico, pode-se constatar um comportamento mecânico equivalente entre os materiais.

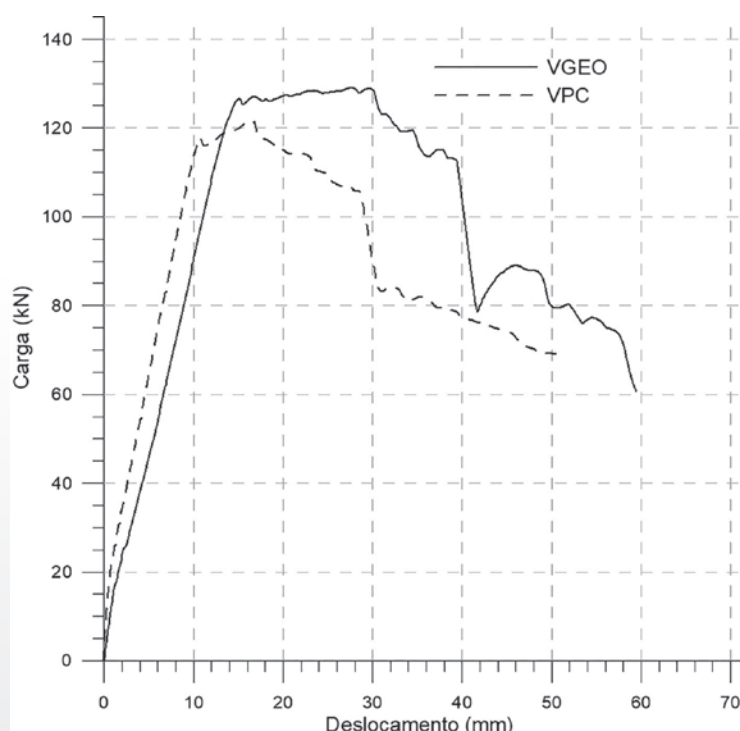
Estes resultados são importantes para aplicação do concreto geopolimérico, pois mostram a eficiência do material, podem contribuir para elaboração de normas técnicas de dimensionamento de estruturas e mostram o comportamento equivalente entre os dois tipos de vigas de concreto. Ao medir a deformação específica do aço (base da viga) e concreto (topo da viga), com o acréscimo de carga durante o ensaio de resistência à tração na flexão, pode-se verificar

uma deformação na carga máxima de 2,77‰ para Vgeo e de 2,78‰ para Vpc (Fig. 4). Esses resultados reforçam o comportamento equivalente entre os dois materiais quando aplicados em elemento estrutural.

5. CONCRETO GEOPOLIMÉRICO DE ALTA RESISTÊNCIA COM MICROFIBRAS DE AÇO

Considerando o melhor resultado obtido na composição do cimento na etapa inicial, a pesquisa verificou o efeito da adição das microfibras de aço (0%, 0,45%, 0,90% e 1,35% - em relação ao volume de concreto), com objetivo de melhorar o desempenho mecânico do concreto geopolimérico, utilizando as composições 1:2, 1:3 e 1:4 (cimento:areia, em massa). As argamassas são denominadas de concreto, devido a sua elevada resistência e aplicação.

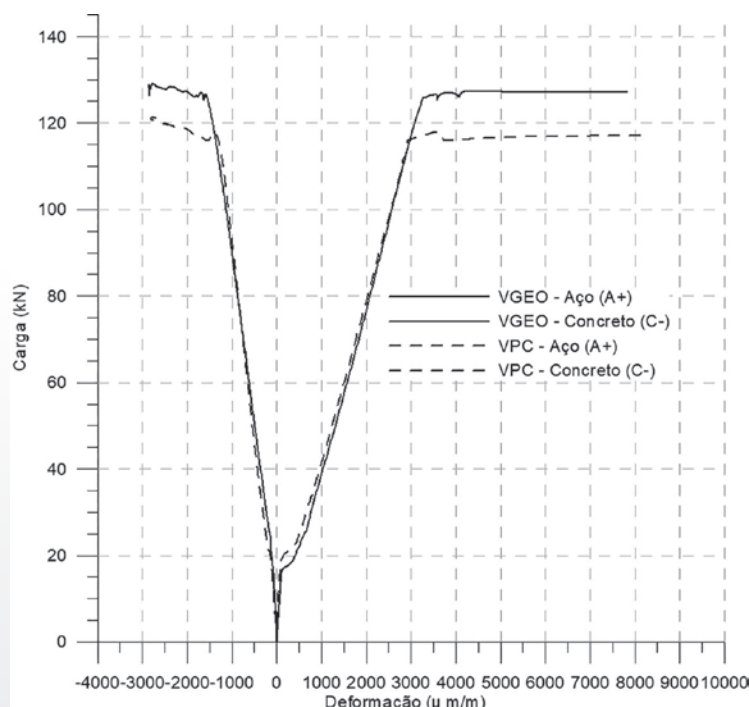
As microfibras metálicas têm dimensões de $13\text{mm} \times 200\mu\text{m}$, fator de forma igual a 65 e denominação comercial de OL 13/.20 (fabricante Belgo Bekaert). Foi utilizada areia padrão brasileira (quatro faixas granulométricas de 0,15mm, 0,3mm, 0,6mm e 1,2mm). Ao avaliar o efeito da concentração de fibras, $v_f=0,45$, $v_f=0,90$ e $v_f=1,35$, foi possível verificar um aumento significativo na resistência à tração na flexão, atingindo resultados de 10,1 MPa, 14,8 MPa e 19,8 MPa, respectivamente, com aumento de $\approx 100\%$ para o $v_f=1,35$ (Fig. 5). O aumento da resistência também foi observado à compressão, reforçando o efeito das microfibras na melhora da resistência à microfissuração, atingindo valores médios de 83 MPa e 95 MPa, para $v_f=0,45$ e $v_f=0,90$, respectivamente, representando um aumento de até 25% (Fig. 6). Para o maior volume de fibras utilizado ($v_f=1,35$), ocorreu



► Figura 3

Carga versus deslocamento das vigas de concreto geopolimérico (VGEO) e de concreto de cimento Portland (VPC)

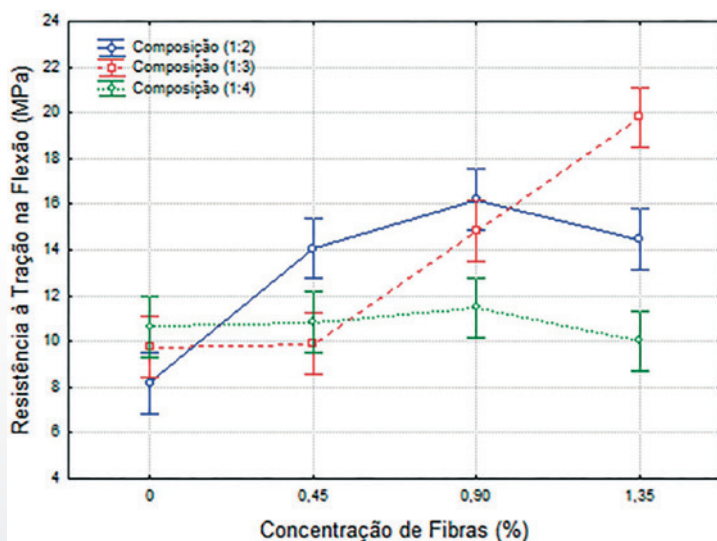
Fonte: Pelisser *et al.* (2018)



► **Figura 4**

Carga versus deformação das vigas de concreto geopolimérico (VGEO) e de concreto de cimento Portland (VPC), medidas na armadura (A+) e no concreto (C-)

Fonte: Pelisser et al. (2018)



► **Figura 5**

Efeito da composição e da concentração das microfibras de aço na resistência à tração na flexão dos concretos geopoliméricos (determinação realizada de acordo com a ABNT NBR 13279, 2005 – utilizando valores médios de três corpos de prova, sendo que as barras verticais referem-se ao desvio padrão)

Fonte: Menger (2018)

pequeno aumento (composição 1:2) e também uma redução da resistência (composições 1:3 e 1:4). Este efeito foi atribuído a maior dificuldade de compactação, quando utilizado maior quantidade de fibras e agregados.

O estudo reforça o potencial dos concretos geopoliméricos para indústria da construção, devido ao seu desempenho mecânico, atingindo resultados elevados de resistência à compressão e na resistência à tração na flexão. Também pode-se inferir que estas propriedades mecânicas tenham efeito na maior durabilidade deste tipo de concreto. Complementarmente, ensaios de retração – em andamento – mostram índices cinquenta por cento inferiores ao concreto de cimento Portland, para mesma classe de resistência.

6. CONCLUSÕES

A crescente demanda por concretos de alta eficiência, baixo custo e reduzido impacto ambiental, principalmente quando comparados aos concretos convencionais produzidos com cimento Portland, tem promovido o desenvolvimento de materiais cimentícios sem clínquer (*clinker-free*), dentre os quais estão incluídos os cimentos geopoliméricos, cuja utilização pode contribuir para redução das emissões de CO₂ (*carbon footprint*) em projetos de construção. O estudo dos geopolímeros é um tema ativo e em desenvolvimento pela comunidade de pesquisa mundial.

Nesse artigo foram apresentadas as propriedades mecânicas dos cimentos geopoliméricos, mostrando resultados satisfatórios e elevados, quando aplicados em argamassas e concretos, e, principalmente, menor influência da concentração dos agregados na alteração de suas propriedades mecânicas. Isso ocorre devido à maior coesão do cimento.

O concreto geopolimérico aplicado em um elemento estrutural apresentou comportamento mecânico superior a uma viga de concreto de cimento Portland, ambas utilizando concreto com mesma classe de resistência à compressão. Esse é um resultado

satisfatório, considerando, principalmente, que a cura foi realizada ao ar e não térmica, como é frequentemente utilizada em geopolímeros.

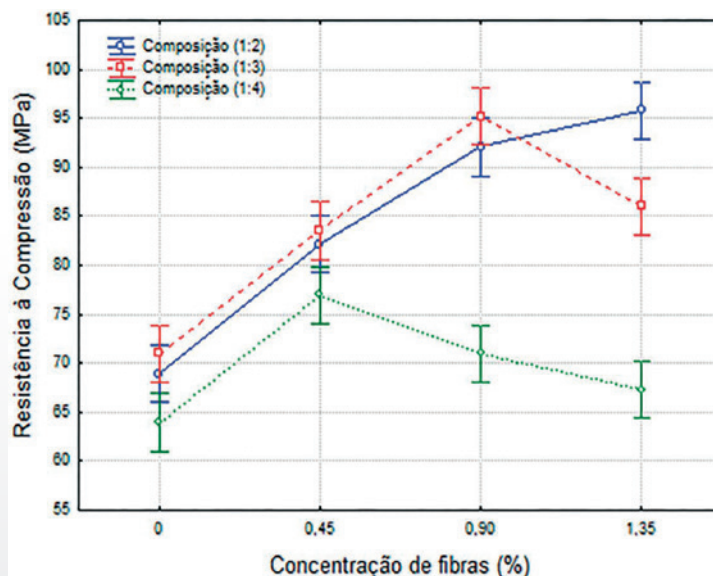
Quando utilizadas as microfibras de aço, a resistência à compressão aumentou significativamente, bem como a resistência à tração na flexão e a relação da resistência à compressão/tração na flexão, atingindo resultados superiores aos concretos convencionais. Provavelmente esse efeito é devido a melhor aderência do cimento as microfibras, potencializando seu efeito.

Os resultados mostram a eficiência mecânica do concreto geopolimérico, que traz outras vantagens na sua aplicação, podendo-se citar coloração clara e contribuição para a redução da formação de ilhas de calor em centros urbanos, sua durabilidade em ambientes agressivos ácidos e com presença de sulfatos e sua resistência à degradação em altas temperaturas. Contudo, naturalmente, também apresenta muitas limitações, sendo um material pouco explorado, mais difícil para produzir, sem normas técnicas orientativas e menos disponível. Porém, seu potencial é grande para ser utilizado pela indústria da construção em aplicações específicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Conselho Nacional de De-

envolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a empresa Belgo Bekaert (Brasil) pela doação das microfibras de aço. 



► **Figura 6**

Efeito da composição e da concentração das microfibras de aço na resistência à compressão dos concretos geopoliméricos (determinação realizada de acordo com a ABNT NBR 13279, 2005 – utilizando valores médios de três corpos de prova e as barras verticais referem-se ao desvio padrão)

Fonte: Menger (2018)

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DAMINELLI, B.L.; KEMEID, F.M.; AGUIAR, P.S.; JOHN V.M. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites* 32, 555-562, 2010.
- [2] DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis* 37, 1633-1656, 1991.
- [3] FRASSON, B. J. ; PELISSER, F.; SILVA, B.V. Concrete crack repair analysis with metakaolin-based geopolymer cement. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, Vol 13, Number 2, April 2020.
- [4] JUENGER, M.C.G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research* 78, 71-80, 2015.
- [5] MENDER, M.H. Comportamento Mecânico de Compósitos Contendo Cimento Alkali-Ativado e Microfibras Metálicas. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2018.
- [6] OECD/IEA, CSI, Low-carbon Transition in the Cement Industry: Technology Roadmap, International Energy Agency, IEA, Paris, 2018 [Access on: 19.01.2022]. Available at: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
- [7] PELISSER, F.; SILVA, B. V.; MENDER, M. H.; FRASSON, B. J.; KELLER, T.; TORII, A. J.; LOPEZ, R. H. Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v 11, 535-543, 2018.
- [8] SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research* 124, 2019.
- [9] SILVA, B.V. Proposição de um teste de aderência apropriado para controle tecnológico da resistência à compressão do concreto. Tese de Doutorado (Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2014.
- [10] UN ENVIRONMENT, SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research* 114, 2018.