

Concrete crack repair analysis with metakaolin-based geopolymer cement

Análise de reparo de fissuras em concreto com cimento geopolimérico a base de metacaulim



B. J. FRASSON^a
brunajfrasson@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1074-0518>

F. PELISSER^a
pelisser@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6113-5473>

B. V. SILVA^b
dovalesilva@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5363-5657>

Abstract

Among the advances in the use of geopolymer cements is their use as repair materials in concrete structures. The objective of this work was to use a geopolymer cement to repair cracks in concrete specimens, observing its mechanical performance and fracture modes. Cubic test specimens were produced and two types of cracks were evaluated as variables. Cracks were induced by steel sheets during concreting. The geopolymer cement paste and an epoxy adhesive, as reference, were used for the repairs. The results showed a 13% decrease in compressive strength for unrepaired concrete, and 3.7% in concrete repaired with geopolymer. The binder presented mechanical performance similar to that of the epoxy resin regarding crack recovery. In conclusion, repairs made with geopolymer cement are a viable and efficient means of crack recovery.

Keywords: geopolymer cement, repair, cracks, epoxy, concrete.

Resumo

Entre os avanços para o uso de cimentos geopoliméricos encontra-se seu uso como material de reparo em estruturas de concreto. O objetivo desse trabalho foi utilizar uma pasta de cimento geopolimérico no reparo de fissuras em corpos de prova de concreto, observando seu desempenho mecânico e os modos de fraturas. Foram produzidos corpos de prova cúbicos, e, como variáveis, foram avaliados os tipos de fissuras. As fissuras foram induzidas por meio de chapas de aço durante a concretagem. Foram utilizados pasta de cimento geopolimérico e um adesivo epóxi – como referência de desempenho, para os reparos. Os resultados mostraram queda da resistência de 13% para o concreto sem reparo, e de 3,7% no reparado com geopolímero. O aglomerante geopolimérico apresentou desempenho mecânico semelhante ao da resina epóxi, para recuperação da fissura. Conclui-se que o reparo com cimento geopolimérico pode ser considerado eficiente para recuperação de fissuras.

Palavras-chave: cimento geopolimérico, reparos, fissuras, epóxi, concreto.

^a Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, SC, Brasil;

^b Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Departamento de Edificações, Ilha Solteira, SP, Brasil.

1. Introdução

Manifestações patológicas em forma de fissuras são comuns em estruturas de concreto, possuindo diversas causas, modificando a estética, comprometendo as propriedades mecânicas e durabilidade da construção. O conhecimento das causas e origens é imprescindível para a escolha dos materiais e metodologia de reparos proporcionando longa duração. As principais causas de fissuras são as variações volumétricas, esforços térmicos, reações químicas deletérias, corrosão de armadura, más práticas construtivas, entre outros [1].

Um dos métodos de reparos é o preenchimento de fissuras por gravidade, utilizando resinas de baixa viscosidade (de 0,03 a 2,00 mm de espessura), como a epóxi ou metacrilatos de alto peso molecular [2]. O epóxi como material de reparo apresenta, em teste de resistência, restauração das propriedades mecânicas do concreto [3-4], redução da percolação de íons cloreto, avaliado por meio de estudos empregando métodos numéricos [5], porém, quando submetidos à fadiga, a falha ocorre na interface entre o concreto e a resina [6].

Cimentos geopoliméricos, são obtidos por meio da reação química entre metal alcalino e pós de silicatos, formando redes tridimensionais de aluminossilicatos amorfos, tem como característica, elevada durabilidade [7], baixa retração [8], boa resistência aos ácidos [8], boa resistência ao fogo [7], baixa condutividade térmica [9-10] e resistência em elevadas temperaturas [9]. Grande parte das pesquisas com esse aglomerante foca nas propriedades mecânicas. Pelisser et al. [11] avaliaram o comportamento mecânico do concreto geopolimérico, comparando-o com o concreto de cimento Portland com mesma classe de resistência (C50), e, observaram resultados de aderência aço-concreto geopolimérico superiores, mostrando o potencial do desenvolvimento deste tipo de concreto.

Trabalhos recentes tem mostrado a eficiência da utilização dos cimentos geopoliméricos como materiais de reparo de estruturas de concreto. Ding, Cheng e Dai [12], utilizaram pastas de cimentos álcali ativados para preencher fissuras inclinadas nas estruturas de concreto. A pasta era composta de cinzas volantes e escórias de alto forno, e os autores analisaram que após o reparo a ruptura ocorreu no substrato de concreto, indicando que a pasta possui maior resistência. Ueng et al [13] analisaram a aderência entre substratos de argamassas e cimentos álcali ativados, produzidos com metacaulim, e verificam que, por meio da compreensão dos modelos mecânicos, é possível prever a forma de ruptura e as variadas tensões que surgem no concreto, quando o geopolímero é utilizado como material de reparo estrutural.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar o uso de cimento geopolimérico à base de metacaulim, como material de preenchimento de fissura em substratos de concreto, avaliando seu desempenho mecânico, por meio do ensaio de resistência à compressão. Foi proposta análise qualitativa da forma de ruptura dos corpos de prova, e, simulação pelo método dos elementos finitos, para observar o comportamento dos materiais utilizados e suas interfaces.

2. Materiais e programa experimental

O experimento foi definido para verificar o desempenho mecânico de pastas de cimento geopolimérico no reparo de fissuras, comparando-o com resina epóxi. Foram moldados corpos de prova cúbicos, conforme especificado pela norma [14], com as arestas de 15 cm. As variáveis são os tipos de fissuras nos corpos de prova (fissuras longitudinais em faces opostas (FG) e na mesma face (FP)) e a forma de recuperação (com resina epóxi ou geopolímero), a nomenclatura adotada para cada variável está indicada na Tabela 1. As fissuras foram induzidas nos corpos de prova (Figura 1), com utilização de chapas de aço de dois milímetros de espessura e dimensões de 35 mm × 150 e 50 mm × 70 mm (largura × altura), denominadas respectivamente de FG e FP. Sendo que em FG as chapas foram posicionadas no centro das faces paralelas e em FP as chapas estão fixadas no terço médio de uma mesma face. A metodologia será baseada no trabalho desenvolvido por Issa e Debs [4], em que os autores induziram fissuras nos corpos de prova, por meio de chapas de aço.

2.1 Materiais

Foi utilizada pasta de cimento geopolimérico, para o reparo das fissuras (FGG e FPG), constituída de metacaulim (45,2% Al_2O_3 , 53,4% SiO_2 e 0,4% P.F.), proveniente da calcinação do caulim à 800°C e solução ativadora, produzida com a dissolução de NaOH (Sigma Aldrich - Na₂O 97%) em Silicato de Sódio (Sigma Aldrich - Na₂OSiO₂.H₂O) com 63% de água. A composição tem relações molares de Na₂OSiO₂/NaOH de 1,6, SiO₂/Na₂O de 6,94, SiO₂/Al₂O₃ de 3,20, H₂O/MK de 0,75. Os materiais e as relações molares utilizadas para produção do cimento geopolimérico foram determinados em trabalho anterior [15].

A mistura do cimento geopolimérico foi realizada com a dissolução do NaOH em silicato de sódio, em seguida com o auxílio de uma argamassadeira, foi depositado todo o líquido na cuba e em velocidade baixa adicionado o metacaulim. Posteriormente,

Tabela 1

Nomenclatura das variáveis utilizadas no estudo

Tipos de fissuras	Material de recuperação	Nomenclatura adotada
Sem fissuras	—	M
Fissuras longitudinais em faces paralelas (35 mm x 150 mm)	Sem recuperação	FG
	Epóxi	FGE
	Geopolímero	FGG
Fissuras no terço médio da mesma face (50 mm x 70 mm)	Sem recuperação	FP
	Epóxi	FPE
	Geopolímero	FPG



Figura 1
Representação esquemática das amostras e das fissuras induzidas (a) grupo de controle (M); (b) fissuras paralelas (FG); (c) fissuras no terço médio da face (FP)

em velocidade alta, o material foi homogeneizado por 5 minutos. Para o reparo das fissuras (FGE e FPE), foi utilizado adesivo estrutural à base de epóxi, adesivo estrutural bi componente produto recomendado para selagem de trincas com bicos injetores de alta adesividade, baixa viscosidade, alta resistência química e mecânica. O concreto produzido tem composição unitária de 1: 2,58: 2,92 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), e relação a/c de 0,45 com teor de argamassa de 55%. Utilizou-se o cimento CP IV, brita um e areia média com módulo de finura 2,5, determinados conforme a ABNT NBR 7211 [16].

2.2 Métodos

Após a mistura do concreto os corpos de prova foram moldados, curados ao ar por 24 horas, desmoldados e submetidos à cura

imersa até os 21 dias. Nesta idade houve aplicação dos materiais de reparo (geopolímero e epóxi). O reparo consistiu no processo de: secagem, limpeza, e preenchimento das fissuras por gravidade, até o transbordo dos materiais e rasamento do excesso.

Após 24 horas da aplicação do reparo, os corpos de prova foram submetidos à cura submersa até que os concretos completassem 28 dias de idade, nessa idade foi realizado o ensaio de resistência à compressão. A Figura 2 apresenta os corpos de prova após o preenchimento das fissuras. Antes da ruptura os corpos de prova foram capeados com a utilização de uma pasta de cimento de relação a/c de 0,4. O ensaio de compressão seguiu a NP EN 12390-3 [17]. A Figura 3 apresenta a direção da aplicação de carga nos corpos de prova. Os resultados experimentais foram submetidos à metodologia análise de variância (ANOVA), com confiabilidade de 95%. Foram realizados, com as mesmas condições de carregamento e

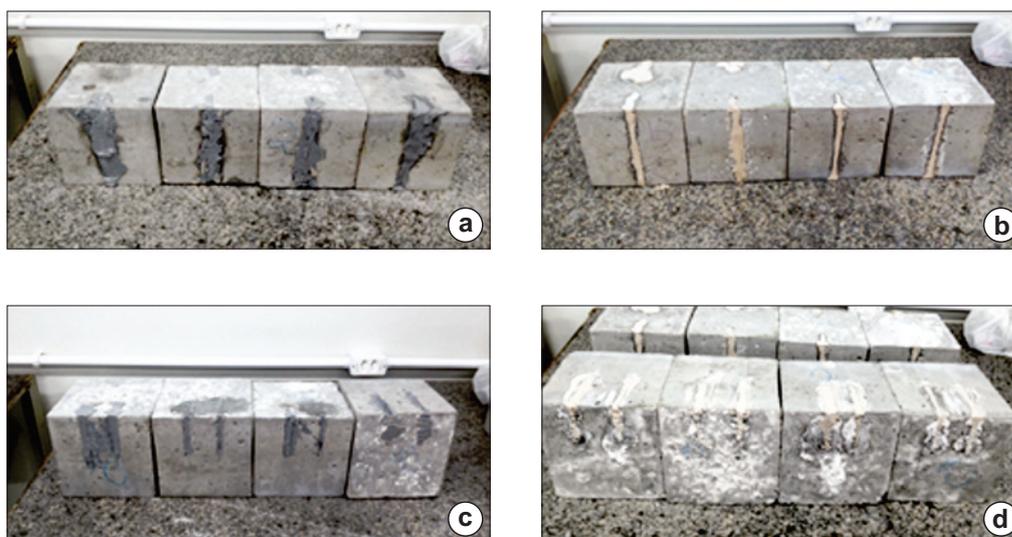


Figura 2
Corpos de prova preenchidos (a) FG-Epóxi; (b) FG-Geopolímero; (c) FP-Epóxi; (d) FP-Geopolímero



Figura 3
Ilustração da direção de aplicação das cargas nos corpos de prova

Tabela 2
Propriedades mecânicas e físicas dos materiais utilizados na análise de elementos finitos

Características	Epóxi	Geopolímero	Concreto
Elasticidade (GPa)	10,6	10,0	29,0
Resistência à compressão (MPa)	69,0	64,0	35,0
Densidade (g/cm ³)	1,80	1,50	2,30

fissuras pré-estabelecidas, simulações pelo método de elementos finitos (MEF), com o auxílio da ferramenta ANSYS, como forma de avaliação e validação dos resultados. Os elementos possuíam oito nós, sendo do tipo SOLID65, usado para modelagem 3D de sólidos, podendo sofrer esmagamento durante a compressão, e cada nó possui três graus de liberdade. A validação dos resultados da simulação foi obtida por meio de testes de hipóteses estatísticas, adotando um coeficiente de variação de 10% em relação à média da resistência à compressão experimental do grupo de controle (M). As propriedades dos materiais utilizados para a modelagem MEF estão descritas na Tabela 2, os dados referentes ao geopolímero foram obtidos do trabalho prévio [15], as propriedades do epóxi foram

retiradas do banco de dados do ANSYS e do fabricante [18], e para o concreto foi estabelecido resistência à compressão característica de 35 MPa, que apresenta, em sua função, um valor estimado de módulo de elasticidade de 29 GPa, conforme mostra a norma NBR 6118 [19]. O coeficiente de Poisson foi de 0,2 para todos os materiais.

3. Resultados e discussões

3.1 Resistência à Compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão estão expressos na Figura 4. O grupo de controle experimental obteve

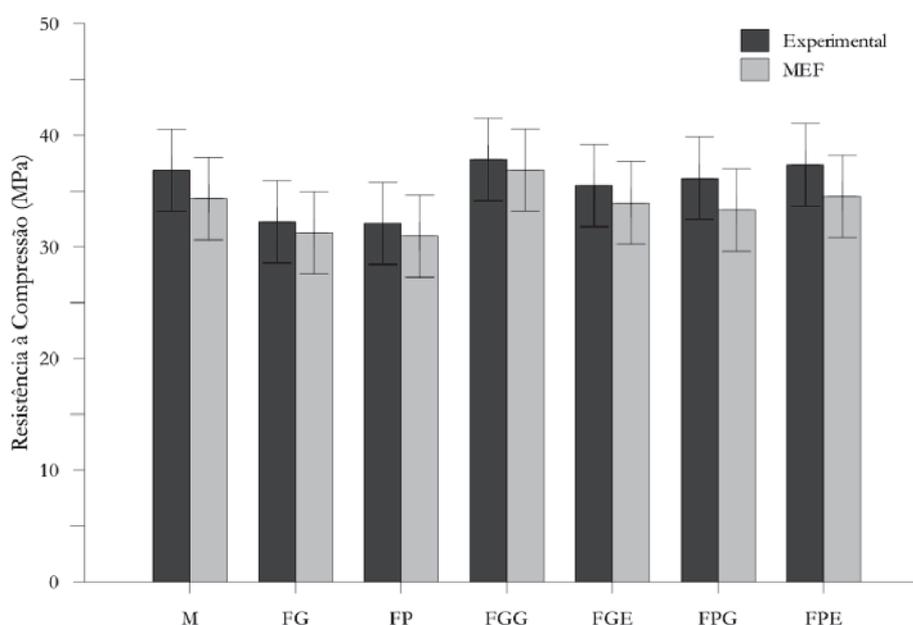


Figura 4
Resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Tabela 3

Resultados da análise de variância ($\alpha = 0,05$)

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Médias quadradas	F	$P_r > F_c$
Tipo de configuração	6	22,15	132,91	2,1793	0,08634
Erro	21	10,16	213,46	—	—

Tabela 4

Resultados resistência à compressão experimental e por simulação (MEF) em MPa

Procedimento	M	FG	FP	FGG	FGE	FPG	FPE	f_c mínima
Experimental	37 (4,4)	32 (2,2)	32 (3,3)	38 (1,8)	36 (3,3)	36 (2,8)	37 (3,7)	34 MPa (3,69)
Simulação	34	31	31	37	34	33	35	

Desvio padrão () de $N = 4 / f_c$: resistência à compressão mínima obtida pelo teste de hipóteses

resistência média de 37 MPa, e os grupos com fissuras, sem preenchimento obtiveram redução na resistência em torno de 12% e 13% em relação ao grupo M. A análise estatística dos corpos de prova com reparo das fissuras por ambos os materiais estudados, mostra que esses materiais foram eficientes para recuperar a resistência mecânica dos corpos de prova. Nos diferentes tipos de configuração e com ambos os materiais de recuperação não houve diferença significativa, como pode ser observado na Tabela 3. As cargas médias de ruptura foram 821 kN, 734 kN, 724 kN, 812 kN, 872 kN, 854 kN e 826 kN, para, respectivamente, M, FG, FP, FGE,

FGG, FPE e FPG. Essas cargas foram adotadas para utilizar na simulação por MEF dos corpos de prova. A Tabela 4 apresenta os resultados encontrados experimentalmente e por simulação. Adotando o teste de hipótese estatístico e por meio da média experimental do grupo de controle (M) foi obtida a resistência à compressão mínima de 34 MPa, portanto valores inferiores a esse serão rejeitados pelo teste. Os grupos M-Simulado, FGG-Simulado, FGE-Simulado e FPE-Simulado, foram semelhantes estatisticamente ao grupo experimental M, com resistência próximas e superiores a 34 MPa, e variação de até 9%, porém o grupo FPG-Simulado, apresentou resistência

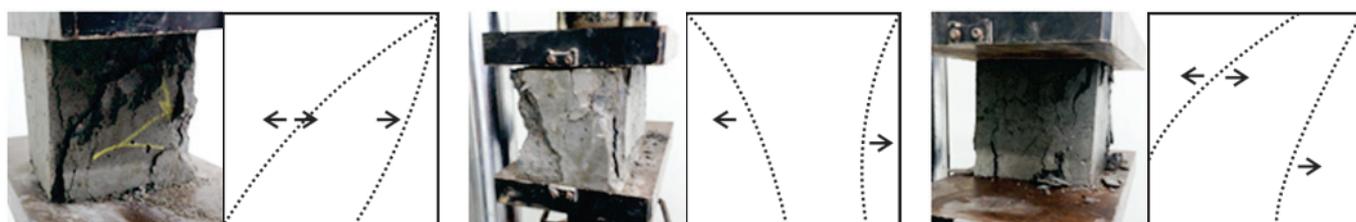


Figura 5

Propagação das fissuras durante o ensaio de resistência à compressão no grupo M

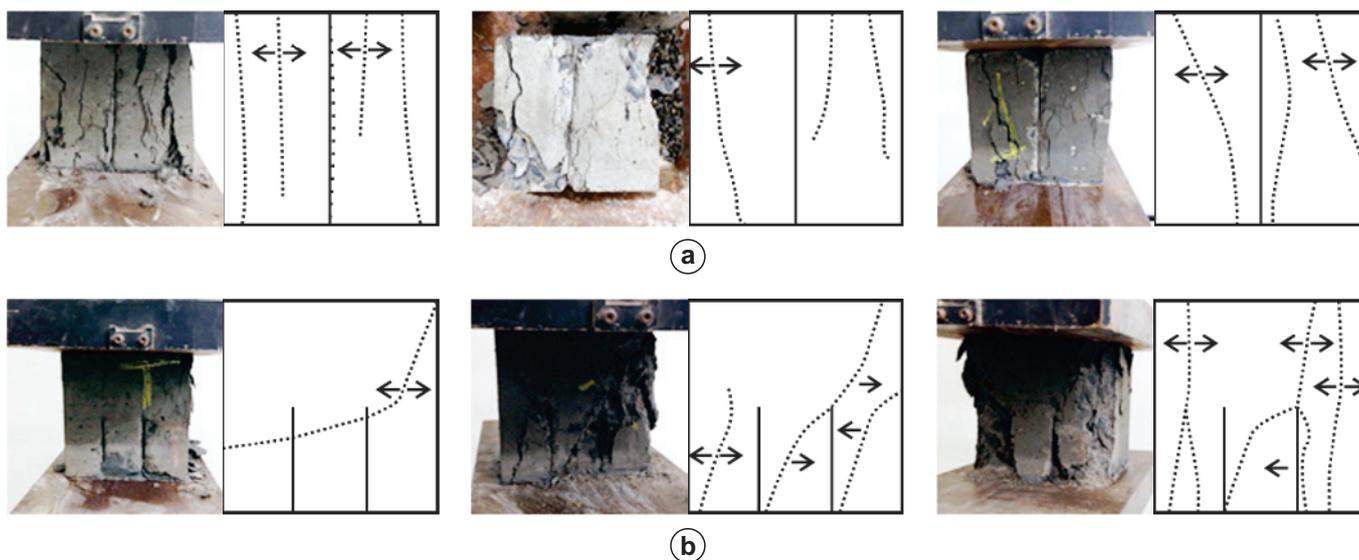


Figura 6

Propagação das fissuras durante o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova com fissura induzidas, (a) FG; (b) FP

à compressão próxima do estabelecido pela hipótese, com redução de 2%. Os demais grupos apresentaram variação negativa próxima de 10%, ou seja, obtiveram maior queda de resistência em relação aos dados experimentais.

O preenchimento das fissuras por epóxi e pasta geopolimérica apresentaram dados experimentais semelhantes ao concreto maciço, portanto houve uma restauração nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. A análise de simulação por MEF pode ser validada pela teste de hipóteses estatístico, pois os valores de resistência à compressão, dos materiais reparados foram semelhantes ao grupo de controle experimental.

3.2 Análise da ruptura dos corpos de prova

Após o ensaio de resistência à compressão foram registradas imagens,

para a análise dos modos de ruptura, considerando o aparecimento de fissuras, destacamento do concreto e resistência dos materiais.

Nos corpos de prova do grupo de concreto (M) o centro permaneceu íntegro, enquanto houve destacamento das extremidades e aparecimento de fissuras de aproximadamente 45° (Figura 5). Nas amostras FG e FP houve esmagamento da fissura induzida, implicando na ruptura do corpo de prova, e durante a aplicação de carga foi percebido o aparecimento de fissuras normais à aplicação de carga nas FG e perpendicular nas FP (Figura 6), semelhantes aos apresentados por Issa e Debs [4].

Nos grupos em que as fissuras foram preenchidas observou-se ruptura do substrato, ao invés dos materiais de preenchimento. Não houve destacamento dos materiais de preenchimento do substrato, indicando boa aderência entre esses materiais. Mesmo comportamento foi observado por Ding et al. [12].

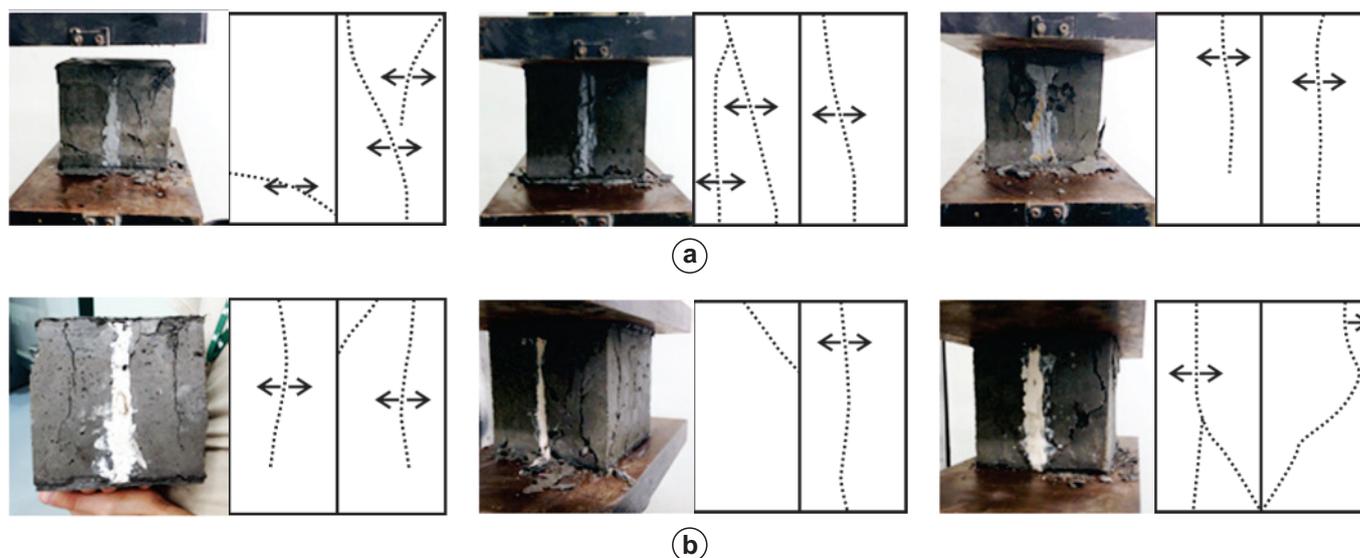


Figura 7

Propagação das fissuras durante o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova com fissuras induzidas recuperadas (a) FGE; (b) FGG

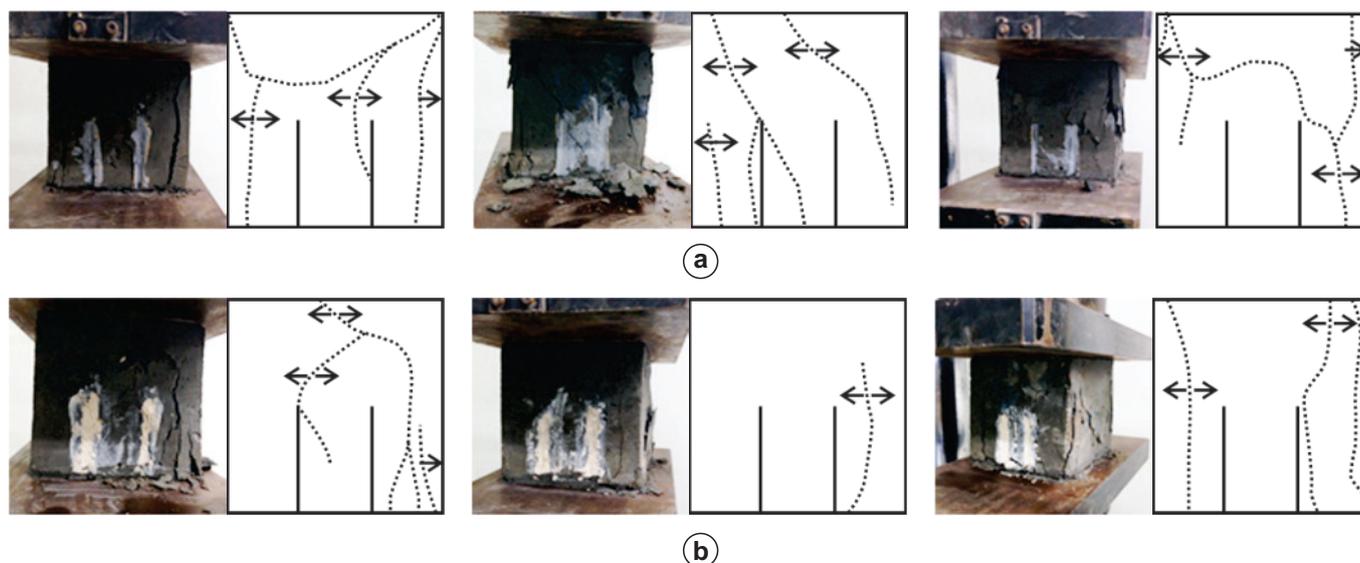


Figura 8

Propagação das fissuras durante o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova com fissuras induzidas recuperadas (a) FPE; (b) FPG

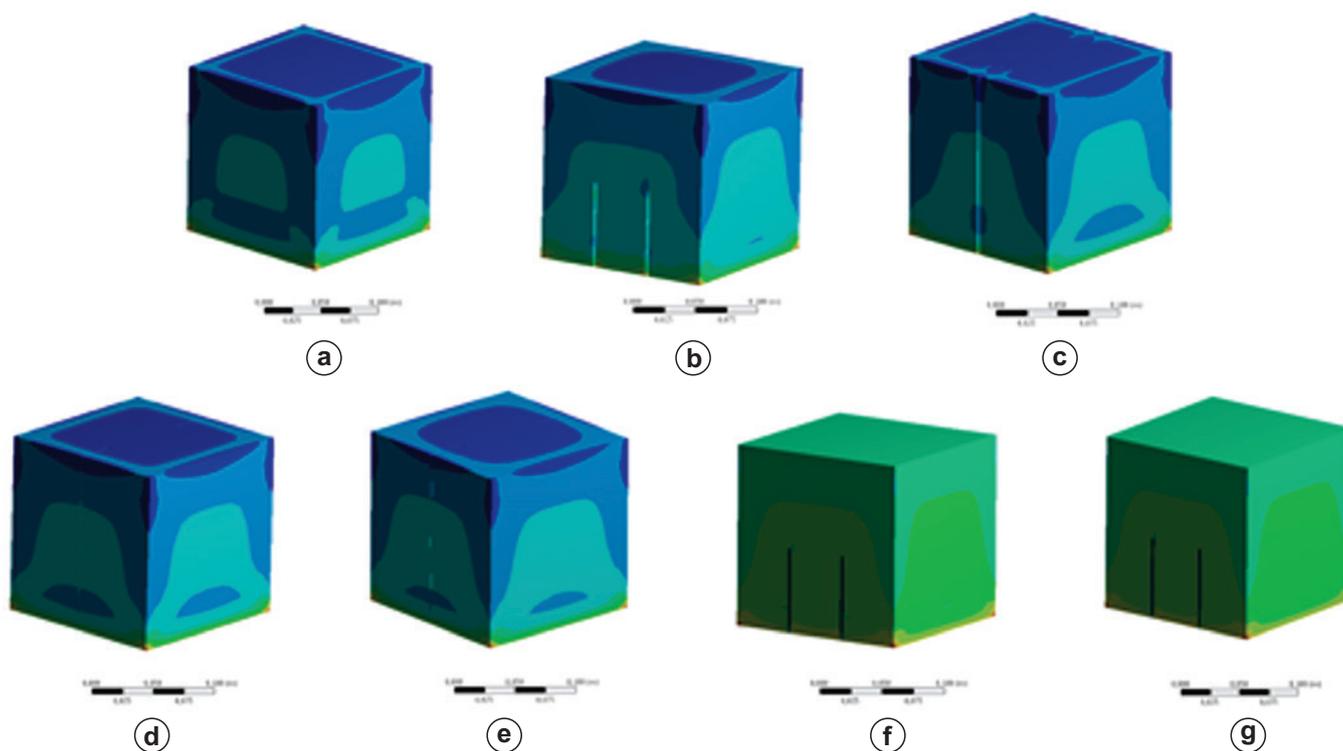


Figura 9

Imagens simulação MEF dos corpos de prova (a) M; (b) FG; (c) FP; (d) FGE; (e) FGG; (f) FPE; (g) FPG

Detectou-se nas amostras FGE e FGG (Figura 7) fissuras paralelas àquelas induzidas. Já nos corpos de prova FPE e FPG (Figura 8), houve aparecimento de fissuras inicialmente formando ângulos de aproximadamente 45°, porém quando encontra àquela induzida, atravessa-a e há uma mudança de direção das fissuras.

A Figura 9 apresenta as imagens retiradas do ANSYS após as simulações realizadas. A maior intensidade de tensões se encontra na matriz do concreto, ao invés dos materiais de reparo, sugerindo que a ruptura do corpo de prova aconteça na matriz, devido a menor resistência em relação ao material de preenchimento. Essa análise pode ser relacionada com os resultados experimentais, pois como visto, as rupturas aconteceram realmente no substrato de concreto. A boa aderência entre o substrato de concreto e o material de reparo pode estar relacionada com a metodologia utilizada para o preparo das superfícies das fissuras e posteriormente o preenchimento delas. A limpeza delas e o correto preenchimento permitiu que os materiais apresentassem bom comportamento mecânico quando ligados.

A análise do modo de fratura apresentou uma boa visão em relação ao comportamento dos materiais utilizados, porém, ensaios complementares, quanto à aderência, resistência à tração e durabilidade, é necessário para verificação do desempenho do reparo aplicado.

4. Conclusões

Essa pesquisa analisou o desempenho mecânico de cimento geopolimérico como material para recuperação de fissuras, comparando ao tradicional epóxi. Os resultados encontrados mostram

que é possível utilizar cimento geopolimérico como material de preenchimento de fissuras em estruturas de concreto, com resistência à compressão, experimental, para corpos de prova com fissuras em faces opostas (FGG) e na mesma face (FPG) de 38 MPa e 36 MPa, respectivamente. Estes valores são maiores ou equivalentes à resistência do concreto de referência. As fraturas ocorreram nos substratos de concreto, devido a boa aderência na interface entre os materiais, e a resistência mecânica superior das pastas de preenchimento em relação ao substrato. O preenchimento das fissuras induzidas, com os cimentos de reparo, transformou o corpo de prova em um material monolítico.

A análise de elementos finitos apresentou resultados semelhantes aos experimentais, o modelo adotado, se mostrou pertinente para a simulação da resistência à compressão de concretos fissurados, quando restaurados (preenchimento das fissuras) ou não. Esses resultados demonstram um novo potencial para aplicação dos cimentos geopoliméricos, considerando suas propriedades de coesão e aderência satisfatórias, e mostrando-se competitivo aos materiais para recuperação disponíveis no mercado.

5. Agradecimentos

Os autores são gratos pelo apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. Referências bibliográficas

- [1] American Concrete Institute - ACI Committee 224.

- Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures (224.1R-93). Farmington Hills (MI): American Concrete Institute, 1993. 22 p.
- [2] American Concrete Institute - ACI Committee E706. Crack repair by gravity feed with resin (ACI RAP Bulletin 2). Farmington Hills (MI). American Concrete, 2003. 4 p.
- [3] Ahmad S; Elahi A., Barbhuiya S, Farooqi Y. Repair of cracks in simply supported beams using epoxy injection technique. *Materials And Structures*, v. 46, n. 9, 2013, p. 1547-1559.
- [4] Issa CA; Debs P. Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 21, n. 1, 2007, p. 157-163.
- [5] Jones SZ, Bentz DP, Davis JM, Hussey DS, Jacobson DL, Molloy JL, Sieber JR. Measurement and modeling of the ability of crack fillers to prevent chloride ingress into mortar. *Cement and Concrete Composites*, v. 81, 2017, p. 109-121.
- [6] Hin H, Miyauchi H; Tanaka K. An experimental study of fatigue resistance in epoxy injection for cracked mortar and concrete considering the temperature effect. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 3, 2011, p. 1316-1324.
- [7] Komnitsas K, Zaharaki D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, n. 20, 2007, p. 1261-1277.
- [8] Duxson P. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, n. 42, 2007, p. 2917-2933.
- [9] Villaquirán-Caicedo MA, Gutiérrez RM, Sulekar S, Davis C, Nino JC. Thermal properties of novel binary geopolymers based on metakaolin and alternative silica sources. *Applied Clay Science*, v. 118, 2015, p.276-282.
- [10] Robati M; Kokogiannakis G, MCCarthy TJ. Impact of structural design solutions on the energy and thermal performance of an Australian office building. *Building and Environment*, v. 124, 2017, p.258-282.
- [11] Pelisser, F., Silva, B. V., Menger, M. H., Frasson, B. J., Keller, T. A., Torii, A. J., Lopez, R. H. Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, n. 3, 2018, 535-543.
- [12] Ding YC, Cheng TW, Dai YS. Application of geopolymer paste for concrete repair. *Structural Concrete*, v. 18, n. 4, 2017, p. 561-570.
- [13] Ueng TH, Lyu SJ, Chu HW, Lee HH, Wang TT. Adhesion at interface of geopolymer and cement mortar under compression: An experimental study. *Construction and Building Materials*, v. 35, 2012, p. 204-210.
- [14] BRITISH STANDARD. Testing hardened concrete: shape, dimensions and other requirements for specimens and molds: NP EN 12390-1. 2003.
- [15] Pelisser F, Guerrino E.L, Menger M, Michel M.D, Labrincha JA. Micromechanical characterization of metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, v. 49,2013, p. 547-553
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado para concreto - NBR 7211. Rio de Janeiro, 2009.
- [17] BRITISH STANDARD. Testing hardened concrete: compressive strength of test specimens - NP EN 12390-3, 2009.
- [18] VEDACIT®. Catálogo técnico Compounde® adesivo. Disponível em: <http://www.vedacit.com.br/neu/produtos.php?33>. Acesso em: Março de 2018.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento - NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.