

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO REFORÇADO COM COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS

*Alan Rodrigo Palheta Silva¹
Verônica Scarpini Candido²
Sergio Neves Monteiro³
Ana Beatriz Rodrigues Porto⁴
Alisson Clay Rios Silva⁵*

Resumo

Recentemente vários estudos vêm sendo realizados para a utilização dos materiais compósitos avançados, com a intenção de superar algumas deficiências e inconvenientes nos materiais existentes. O geopolímero apresenta boa aderência com o concreto e boa durabilidade, apresentando grande potencial de aplicação no desenvolvimento de novos produtos para a Engenharia estrutural. O presente trabalho tem como objetivo, a partir do estudo de dosagem, o desenvolvimento de resinas geopoliméricas para a produção de produtos de reforço estrutural. Foram avaliadas as propriedades mecânicas dos geopolímeros através dos ensaios mecânicos de compressão e flexão, além de análises microestruturais. Os resultados mecânicos de compressão e flexão mostraram um desempenho similar aos compósitos convencionais. Os resultados microestruturais mostraram que os geopolímeros apresentam boa aderência com as fibras de carbono, além de boa aderência com a superfície do concreto que recebeu o reforço.

Palavras-chave: Geopolímero. Compósitos. Reforço.

MECHANICAL PROPERTIES OF REINFORCED CONCRETE WITH GEOPOLIMETRIC COMPOSITES

Abstract

Recently several studies have been carried out for the use of advanced composite materials, with the intention of overcoming some deficiencies and drawbacks in existing materials. The geopolymer presents good adhesion with concrete and good durability, presenting great potential of application in the development of new products for Structural Engineering. The present work has as objective, from the dosage study, the development of geopolymer resins for the production of structural reinforcement products. The mechanical properties of geopolymers were evaluated through mechanical compression and bending tests, as well as microstructural analysis. Mechanical compression and bending results showed similar performance to conventional composites. The microstructural results showed that the geopolymers have good adhesion with the carbon fibers, besides good adhesion with the surface of the concrete that received the reinforcement.

Keywords: Geopolymer. Composites. Reinforcement.

- ¹ *Graduando em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil*
- ² *Bióloga, Doutora em Ciência dos Materiais, Professora Adjunta I, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil.*
- ³ *Engenheiro de Materiais, PhD em Engenharia e Ciência dos Materiais, Professor, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais/Departamento de Engenharia mecânica e Materiais, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.*
- ⁴ *Graduanda em Engenharia de Materiais, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil*
- ⁵ *Químico industrial, Doutor em Ciência dos Materiais, Professor Adjunto I, Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Ananindeua-PA, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Geopolímero é uma terminologia adotada para abreviatura de poli-silico-aluminatos, são polímeros inorgânicos de uma nova classe de materiais que apresentam características particulares, sendo sintetizados a partir de reações de geopolimerização de vários constituintes, como matérias-primas naturais de origem geológica contendo alumino-silicatos, que conferem a esse material boas propriedades como elevada resistência, dureza, estabilidade química e durabilidade.[4][6]

A matéria-prima para a produção desse material é praticamente inesgotável, pois os aluminossilicatos representam mais de 75% da parte sólida inorgânica da crosta terrestre, estando presentes na maioria das rochas e dos solos que resultam da desagregação física e química das rochas [6]

No estudo desenvolvido em materiais geopoliméricos, o caulim exerce um importante papel, pois é um insumo para a produção da principal matéria-prima do geopolímero (metacaulim) [6]

Em estudo sobre o comportamento da resina geopolimérica em contato com fogo ao longo do tempo. O autor atribuiu o melhor desempenho a natureza inorgânica das resinas geopoliméricas, que são formadas basicamente por ligações Si-Al e Si-Si. [2] De uma forma resumida, pode-se dizer que o desenvolvimento dos geopolímeros é dividido por duas grandes linhas de aplicações. Uma dirigida à obtenção de materiais de baixo custo, para utilização em grandes quantidades, como materiais de construção [5]

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção do geopolímero foi utilizado Metacaulim (MK), como principal fonte de alumínio e silício e Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) como fonte de cálcio. Para a ativação alcalina foi utilizado hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio alcalino (SS) em solução.

A produção do metacaulim foi obtida através da calcinação a 850°C por duas horas, conforme estudos desenvolvidos[7], o tratamento térmico do caulim fornecido pela Metacaulim do Nordeste S.A. proveniente das jazidas localizadas no Estado do Rio Grande do Norte. A Fonte de CaO, Escória Granulada de Alto Forno (EGAF), foi produzida e fornecida pela Siderúrgica de Tubarão. Foi utilizado hidróxido de potássio (KOH) comercial, fabricado pela Panamericana S.A. Como fonte de SiO₂, foi utilizado silicato de sódio (Na₂SiO₃nH₂O) alcalino comercial, fornecido pela Una-Prozil S.A. O cimento usado para a produção dos concretos que foram reforçados pelos compósitos foi o CPV-ARI, Holcim. As resinas usadas e as mantas de fibra de carbono foram fornecidas pela empresa MC-Bauchemie.

A calcinação do caulim, para a produção do metacaulim, foi realizada em um forno mufla da marca EDG equipamentos, modelo EDG3P-S, com capacidade de aquecimento de até 1200°C, a uma temperatura de 850°C por um período de 2h.

Com base nas patentes de DAVIDOVITS referentes as formulações do geopolímero, procurou-se determinar as relações molares que estivessem dentro das faixas recomendadas pelo autor e que pudessem atender as necessidades do estudo.

A produção do geopolímero obedeceu a uma sequência de inserção das matérias primas, desenvolvidas nos diversos estudos do grupo de Materiais Compósitos da Universidade Federal do Pará - UFPA.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de ($\varnothing 15 \times 30$) cm para a determinação da resistência à compressão dos concretos nessas dimensões. A moldagem foi feita segundo a Norma 5738 (2003). Foram moldados três CP para cada investigação. Após a moldagem estes foram mantidos nos moldes por um período de 72 horas. Após esse período foram desmoldados e colocados em cura em câmara úmida por 7 dias e após isso em temperatura ambiente até a idade de ruptura.

Os CPs prismáticos de (15x15x50) cm foram moldados em apenas uma camada com tempo de vibração, em mesa vibratória, de aproximadamente 30 segundos, conforme a NBR 5738 (1994). O tempo de vibração de cada camada foi determinado em função de adensamento conveniente do concreto no molde. Esse tempo foi considerado suficiente, no instante em que o concreto apresentou superfície relativamente plana e brilhante.

Para a colagem da manta de fibra de carbono ao concreto com a resina geopolimérica, foi usado o mesmo consumo que o fabricante de epóxi recomenda. Segundo o mesmo, este valor consiste na quantidade necessária para que o adesivo envolva completamente a manta, formando a matriz do compósito. Este valor foi, portanto, o adotado na pesquisa para ambos os compósitos, assegurando que seria utilizada a mesma área de reforço (dimensões iguais de corte das fibras) e mesmo consumo de resinas e adesivos.

Para viabilizar a comparação mais próxima possível e levando em consideração a falta de um procedimento de aplicação para a resina geopolimérica, todos os procedimentos de aplicação usados na resina epóxi, foram adotados na pasta geopolimérica reparadora de superfície e na resina geopolimérica de imprimação usada nas fibras de carbono (manta), com as suas devidas adaptações quando necessário.

No caso das vigotas reforçadas com laminados de fibra de carbono, a obtenção dos compósitos de reforço foi iniciada com a aplicação de uma fina camada de adesivo em toda a superfície da viga onde foi efetuado o reforço.

A figura 1 mostra os procedimentos para a confecção dos compósitos, com manta e laminado, para reforço nas vigas.



(A)



(B)



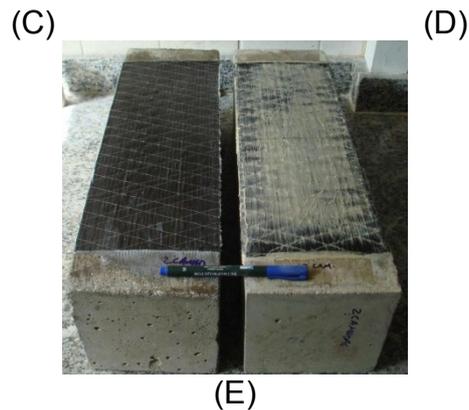


FIG. 1: Vigotas reforçadas para os ensaios: (A) (B) Aplicação da resina na superfície do concreto; (C) (D) Aplicação da manta de fibra de carbono; (E) à esquerda viga reforçada por compósitos de matriz epóxi, à direita viga reforçada por compósitos de matriz geopolimérica 1.

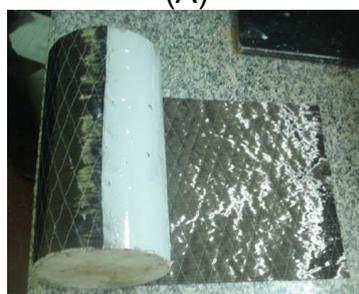
O procedimento de confecção dos compósitos de reforço para pilaretes consiste na aplicação de uma fina camada de adesivo em toda a superfície do cilindro com o auxílio de uma espátula. Imediatamente após, foi realizado o posicionamento do CP sobre a manta de fibra de carbono, executando um enrolamento da manta sobre toda a superfície do CP. No caso dos CP cilíndricos foi necessário um traspasse da manta, para um melhor desempenho do reforço. Os traspasses foram de 10cm. Após o envolvimento de todo o CP com a manta, foi retirado o ar com o auxílio de um rolo e aplica-se a última camada de resina. O procedimento de preparo do reforço estrutural é mostrado na FIG. 2.



(A)



(B)



(C)



(D)

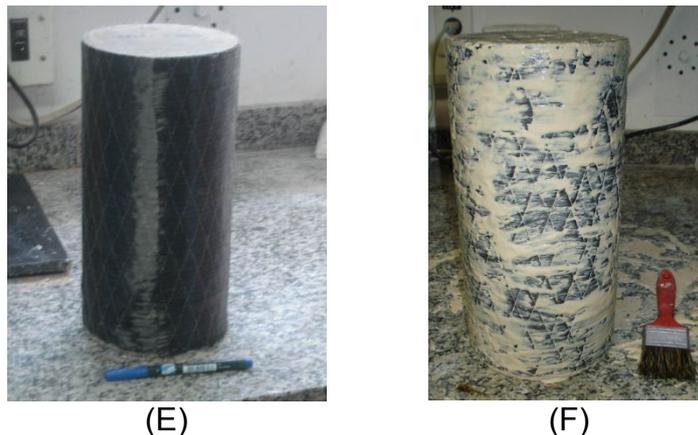


FIG. 2: Pilaretes reforçados e prontos para o ensaio.

Os ensaios de resistência à tração na flexão em quatro pontos foram realizados conforme recomendações da NBR 12142 (1991) no Laboratório de Materiais Conjugados da UFPA, utilizando prensas hidráulicas da marca CONTENCO, com capacidade máxima de carga de 100 toneladas.

Além da resistência à tração na flexão, foram também analisados os resultados de resistência à compressão conforme ABNT NBR 5738 (1994). Os CPs de concreto nas dimensões de ($\varnothing 15 \times 30$)cm foram submetidos à tensão normal na direção longitudinal uniforme até a ruptura com uma taxa constante de 0,22 MPa/s, por meio de uma prensa AMSLER com capacidade de 5000kN do Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA, de acordo com a norma ABNT NBR 7215 (FIG. 3.110 (B)). Os pilaretes de concreto foram ensaiados com uma ou duas camadas de reforço.

A análise das superfícies de fratura do geopolímero em estudo foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFPA, utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV JSM 5800 – LV) da marca Jeol.

2.2 Resultados e Discussões

O estudo de reforço das vigotas foi realizado através da variação do tipo de compósito empregado, sistema de reforço e número de camadas de reforço. No reforço de vigotas com compósitos laminados de fibra de carbono, com mais de uma lâmina, os compósitos foram confeccionados alinhando, lado a lado, as lâminas sobre o substrato do concreto previamente preparado com a resina usada como adesivo.

Para uma comparação mais adequada entre as vigotas reforçadas por compósitos com mantas e vigotas reforçadas por compósitos laminados, foi utilizada a mesma área por m² de fibra de carbono em cada compósito de reforço, apesar dos volumes de fibra de carbono serem diferentes. Assim, foram usadas em todas as vigotas reforçadas com laminados, 3 laminas alinhadas lado a lado, que corresponderam a mesma área de uma manta de fibra de carbono. Para facilitar a exposição dos resultados serão adotadas as nomenclaturas expostas na TAB. 1.

TAB. 1: Nomenclaturas adotadas.

V (vigota 15x15x50)cm	Nomenclatura
V1-RE	Vigotas Reforçadas por sistema de manta de matriz RE
V2- RG	Vigotas Reforçadas por sistema de manta de matriz RG1
V3 - LRE	Vigotas Reforçadas por Sistema Laminado colado com resina RE
V4 - LRG	Vigotas Reforçadas por Sistema Laminado colado com resina RG1

Fonte: Autor, 2018

Os parâmetros avaliados nesse ensaio foram o acúmulo de dano sofrido pelas vigotas em função do pré-carregamento e o número de camadas (taxa de reforço).

Da mesma forma que os ensaios com os pilaretes, os ensaios com acúmulo de dano foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico dos compósitos na recuperação de estruturas de concretos danificadas, ou seja, recuperação da capacidade portante perdida. O pré-carregamento nos pilaretes foi realizado até o percentual de 70% de fct. Em seguida as vigotas foram reforçadas, variando o número de camadas de reforço e ensaiadas à flexão.

A realização dos ensaios de resistência à flexão das vigotas V1 foi feita conforme a norma NBR 12142 (1991).

O aumento da capacidade portante das vigotas reforçadas foi proporcionada pela ação dos compósitos que foram capazes de absorver satisfatoriamente os esforços durante o carregamento, antes da ruptura dos CP.

Os ensaios com pré-carregamento mostraram que os dois tipos de compósitos foram capazes de recuperar a capacidade de suporte de carga das vigotas pré-carregadas. As V1RE sem pré-carregamento e reforçadas com uma e duas camadas apresentaram, respectivamente, resultados de incremento de resistência 18% e 8% maiores que às V1RG, nas mesmas condições de carregamento e taxa de reforço.

Com relação aos ensaios com pré carregamento em vigotas reforçadas por compósitos de matriz geopolimérica, é a primeira vez que é realizado esse tipo de estudo, constituindo assim uma contribuição inédita do presente trabalho.

Diversos autores reportaram a relação direta de ganho de resistência à flexão das vigotas de concreto reforçados por compósito de reforço com fibra de carbono e resina epóxi [9]

No caso dos compósitos de matriz geopolimérica, foi relatado os ganhos na resistência à flexão das vigotas é proporcional ao aumento do número de camadas de reforço.[9]

Os resultados dos ensaios quanto ao número de camadas de reforço mostraram que as V1RE e as V1RG reforçadas com duas camadas apresentaram

maiores valores de incremento de resistência em relação às respectivas vigotas com uma camada, como mostra a FIG. 3.

FIG. 3: Resistência à flexão das vigotas em função do número de camadas de reforço com o sistema de mantas de fibra de carbono.

As vigotas reforçadas com duas camadas apresentaram aumento de resistência à flexão em relação as vigotas com uma camada, sendo que as V1RE apresentam valores um pouco melhores em relação as V1RG1. Essas observações também foram feitas no caso dos ensaios de flexão com pré-carregamento.

Assim, em termos de recuperação estrutural, o objetivo foi alcançado, uma vez que o comportamento das vigotas com e sem pré-carregamento foi bem semelhante, tanto nas V1RE como nas V1RG.

No caso das vigotas reforçadas por compósitos laminados, houve aumento de resistência em relação às vigotas não reforçadas. As vigotas reforçadas por compósitos de matriz RE foram superiores as vigotas reforçadas por compósito de matriz RG1.

Todas as vigotas pré-carregadas apresentaram bom desempenho, comparadas com as vigas sem pré-carregamento. Na FIG. 4, é possível observar a semelhança no comportamento das curvas com e sem carregamento em ambos os casos. Isso indica o bom desempenho de ambos os compósitos laminados na recuperação de vigas com fissuras pré-existent, provocadas por sobrecarga geralmente não prevista em projeto, ou por retirada prematura do escoramento/forma, durante a fase de cura do concreto, por exemplo.

FIG. 4: Resistência à flexão em função do tipo de adesivo aplicado no sistema laminado de fibras de carbono.

Os resultados das vigotas mostraram que os compósitos laminados promoveram maiores incrementos de resistência à flexão em relação às mantas, independente da existência de pré-carregamento ou do tipo de resina usada no sistema de manta ou laminado.

O melhor desempenho ocorreu devido à utilização de três laminas de fibra de carbono no reforço das vigotas, que por apresentarem maior rigidez em relação às mantas promoveram maiores incrementos de resistência à flexão das vigotas.

Os compósitos com mantas flexíveis apresentaram comportamento distinto das vigotas reforçadas com laminados pré-fabricados. Embora as vigotas tenham sido reforçadas com a mesma seção transversal de reforço, as diferenças em relação à resistência ocorreram em virtude das características de cada sistema de reforço (manta ou laminado), notadamente, volume de fibra, resistência à tração, módulo de elasticidade, espessura e combinação de resinas de impregnação.

Os deslocamentos verticais de uma vigota dependem do carregamento, vão, geometria da seção e propriedades dos materiais. A incorporação de um elemento de reforço resulta em um aumento significativo na rigidez da vigota, embora, o aumento de área da seção transversal seja muito pequeno. [9]

O aumento em rigidez das vigas reforçadas ficou mais evidente após a fissuração do concreto. As vigas suportaram o carregamento até grandes deformações e romperam bruscamente quando do descolamento e/ou ruptura do compósito. O descolamento ou ruptura do compósito ocorreu sempre em uma situação designada por pós-ruptura e sob uma fissura de flexão de grande abertura.

Foi avaliada a resistência à compressão dos pilaretes reforçados com os dois tipos de compósitos. Os parâmetros avaliados nesse ensaio foram os acúmulos de danos sofridos pelos pilaretes em função do pré-carregamento, o número de camadas de reforço (taxa de reforço) e o tipo de compósito de reforço.

Os ensaios de compressão com pré-carregamento foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico dos compósitos na recuperação de estruturas de concretos danificadas. Esses testes tentaram aproximar as condições reais de uma estrutura danificada por um terremoto, por exemplo.

Os estudos de ensaios de compressão realizados em pilaretes de concreto, previamente carregados até 40% da sua resistência e reforçados com compósito de

fibras de carbono, mostraram que a resistência do concreto pré-carregado e confinado foi 7% menor que a do sem carregamento prévio.[5]

As fissuras em uma estrutura de concreto carregada, começam preferencialmente na interface entre os agregados e a matriz de materiais cimentícios. Essas fissuras se propagam à medida que a carga de compressão aplicada aumenta. Até a tensão de 30% f_c (resistência a compressão) as fissuras pré-existentes no concreto permanecem praticamente inalteradas. Isto significa que a energia interna disponível é menor do que a energia necessária para criar novas superfícies de microfissuras. Por isso, o limite de 30% f_c é chamado “começo de fissuração localizada” e tem sido proposto como o limite de elasticidade para concretos usuais.[7]

Para tensões de compressão acima de 80% f_c as fissuras atingem seus comprimentos críticos. Neste momento a energia interna disponível é maior do que a energia necessária para a propagação das fissuras. Este nível de tensão é chamado de tensão crítica ou início da propagação da fratura instável. Mantendo aplicado o carregamento, as fissuras se propagam e após certo tempo a fratura leva o material ao colapso total. Este limite foi estudado por RÜSCH em 1972 que deu o nome a esse efeito de fratura retardada ou fratura sob carregamento sustentado.

Assim, o pré-carregamento nos pilaretes foi realizado até o percentual de 70% de f_c . Após isso os concretos foram reforçados com uma e duas camadas de reforço e ensaiados à compressão.

No caso dos pilaretes reforçados e sem pré-carregamento, a análise dos resultados de resistência à compressão foi feita quanto à eficiência dos compósitos no reforço da estrutura do pilarete. Nos pilaretes com pré-carregamento, a análise dos resultados de compressão foi feita quanto à eficiência dos compósitos na recuperação da estrutura do pilarete previamente danificada.

A presença do reforço nos pilaretes acarretou incremento da resistência à compressão nos CP reforçados com os dois tipos de compósitos empregados. Os CP reforçados com duas camadas apresentaram melhor desempenho em relação aos CP reforçados com uma camada, devido a maior capacidade de confinamento que os compósitos com duas camadas desenvolvem quando empregados para essa finalidade.

Os concretos possuem cerca de 75% de agregados de vários tamanhos. Os agregados são os componentes rígidos do concreto e as forças de compressão caminham através deles. Para o equilíbrio são necessárias componentes laterais que no concreto não confinado são provenientes da coesão da pasta de cimento. Quando se supera esta coesão surgem as primeiras microfissuras entre agregados e a pasta de cimento. As microfissuras crescem com o aumento da carga e o concreto rompe com fissuração paralela à aplicação da carga. O confinamento aumenta a coesão, resultando em uma maior resistência CARRAZEDO (2005).

Para os pilaretes de concreto reforçados pelos compósitos de matriz RE os ganhos de resistência para os pilaretes reforçados com uma e duas camadas foram de 80% e 100%, respectivamente, em relação aos pilaretes sem reforço.

Os pilaretes reforçados pelos compósitos de matriz RG1 apresentaram ganhos de resistência médios de 75%, com uma camada, e 95% com duas camadas, em relação aos concretos sem reforço.

Foi avaliado as resistência à compressão e deformações de pilaretes de concreto reforçados por compósitos epoxi com fibra de carbono com uma, três e cinco camadas de reforço, concluindo que com o aumento do número de camadas ocorrem maiores ganhos de resistência. Entretanto, com o aumento de três para

cinco camadas de reforço as deformações apresentaram menores valores devido a maior rigidez desenvolvida pelos pilaretes reforçados com cinco camadas. Isso ocorre devido a maior capacidade de confinamento dado ao CP e favorece a ruptura do pilarete de forma brusca e repentina.[5]

Através da FIG. 5 é possível observar de forma mais detalhada o bom desempenho de ambos os compósitos na recuperação dos pilaretes previamente carregados. Os resultados mostraram que os CP previamente carregados apresentaram resistência à compressão muito próxima a dos pilaretes sem pré-carregamento, seja com uma ou duas camadas de reforço.

FIG. 5: Resistência à compressão dos pilaretes reforçados (com e sem carregamento prévio) em função do número de camadas de reforço.

Para os P1RE, os ganhos de resistência médios foram de 90%, para os reforçados com 1 camada, e de 105% para os reforçados com 2 camadas, em relação aos pilaretes com pré-carregamento e sem reforço.

No caso dos P1RG1, os ganhos de resistência médios encontrados foram de 90%, para os reforçados com 1 camada e de 100% para os reforçados com 2 camadas, em relação aos pilaretes previamente carregados e sem reforço.

Com relação ao pré-carregamento em peças de concreto reforçadas por compósitos de matriz geopolimérica, é a primeira vez que é realizado esse tipo de ensaio em geopolímeros, constituindo assim uma contribuição inédita do presente trabalho.

Avaliou-se o desempenho de pilaretes de concreto pré-carregados até o surgimento dos primeiros sinais de colapso do CP e repararam os mesmos com compósitos de fibra de carbono. Os autores observaram que os compósitos com fibra de carbono são capazes de restaurar a resistência inicial do concreto.[6]

Dessa forma, os resultados demonstram o potencial dos compósitos geopoliméricos como material de recuperação de estruturas intensamente danificadas, já que o desempenho dos mesmos foi muito similar ao encontrado pelos pilaretes reforçados por compósitos de matriz epóxi.

De forma geral, os resultados mostraram o melhor desempenho dos P1RE em relação aos P1RG1. Entretanto, os resultados dos P1RG1 foram satisfatórios, independentes do número de camadas de reforço e da condição de carregamento,

levando em consideração a proximidade com os valores de resistência à compressão encontrados nos P1RE.

Foram analisadas as morfologias dos concretos, resinas e compósitos através das características microestruturais, obtidas por MEV, desses materiais.

Além das resinas, foram feitas análises microestruturais dos compósitos para o estudo microestrutural das interfaces entre os materiais que compõe o compósito. A FIG. 6 apresenta a morfologia do compósito de matriz RE. A FIG. 6 (A) mostra uma superfície plana, porém, com a presença de alguns vazios gerados durante a impregnação da resina sobre as fibras de carbono. Entretanto, apesar disso, a resina RE apresenta excelente adesão com as fibras de carbono.

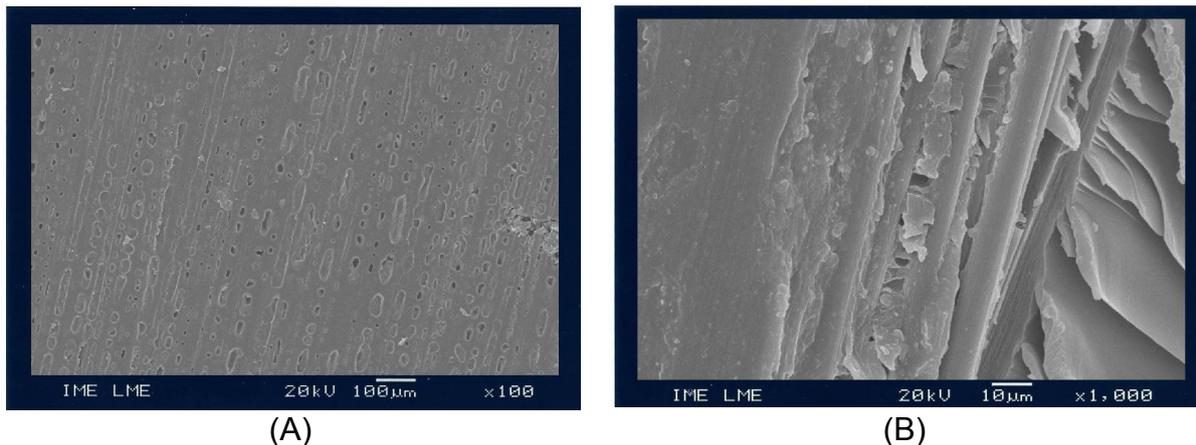


FIG. 6: Microestrutura do compósito de matriz RE: (A) (100X); (B) (1000X).

A FIG. 7 apresenta os resultados microestruturais dos compósitos de matriz geopolimérica.

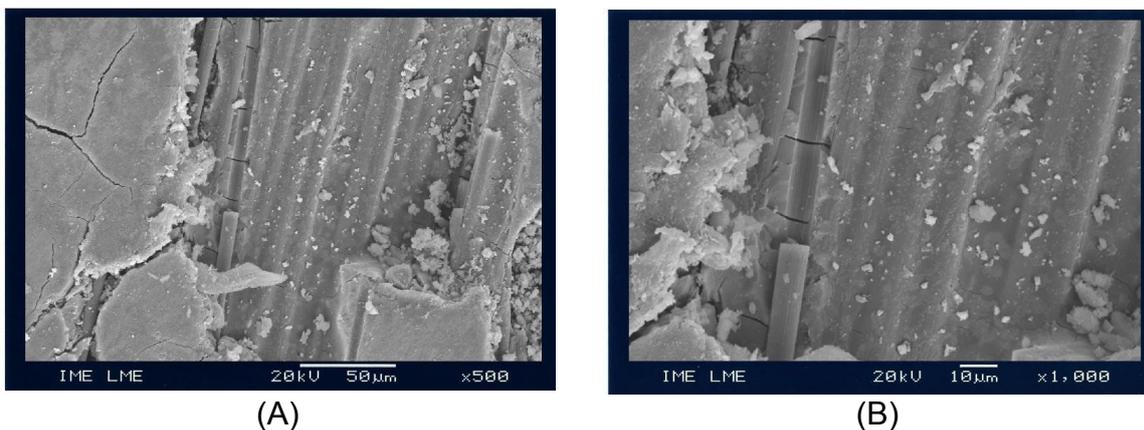


FIG. 7: Adesão fibra-resina RG1 após exposição térmica de 240°C: (A) (500X); (B) (1000X).

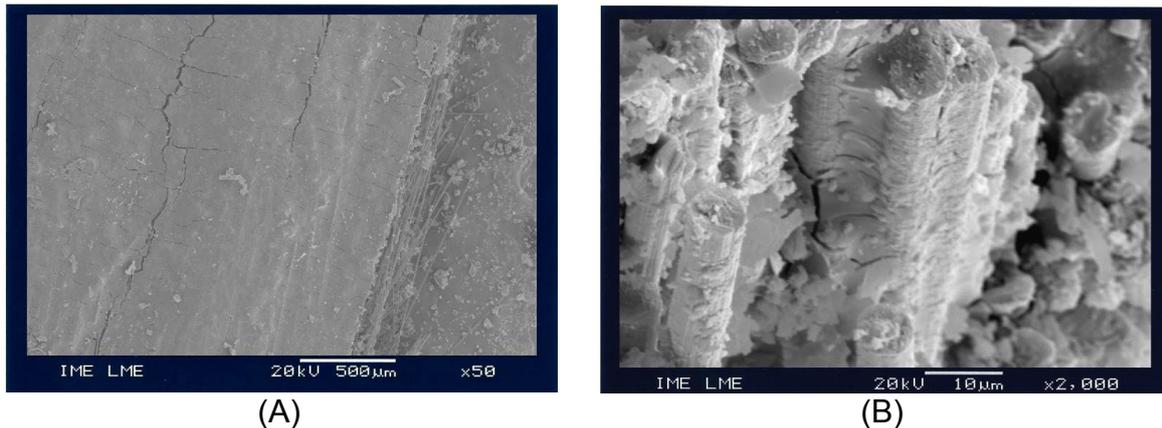


FIG. 8: Microestrutura do composto de matriz RG1 na temperatura ambiente: (A) (50X); (B) (2000X).

Apesar da baixa afinidade química com fibras de carbono, as resinas geopoliméricas apresentaram boa adesão interfacial com as mesmas, como mostram as FIG. 7 e FIG. 8. Isso mostra a capacidade das resinas geopoliméricas em atuar como proteção das fibras de carbono. Outra observação importante foi a ausência de bolhas sobre a superfície da resina após a impregnação nas fibras de carbono.

O efeito da incorporação de fibras curtas de carbono na matriz de pastas geopoliméricas a base de Metacaulim foi avaliado. Os autores concluíram que a incorporação das fibras de carbono promoveu significativos ganhos de resistência à matriz geopolimérica, devido à boa adesão fibra-matriz geopolimérica que foi contatada através do MEV.[10]

As falhas na interface resina e concreto reforçado foram caracterizadas por MEV e confirmam a boa adesão e resistência da resina geopolimérica. A FIG. 9 apresenta a fratura da interface concreto e matriz epóxi, enquanto a FIG. 10 apresenta as micrografias correspondentes à fratura microestrutural da interface concreto matriz geopolimérica.

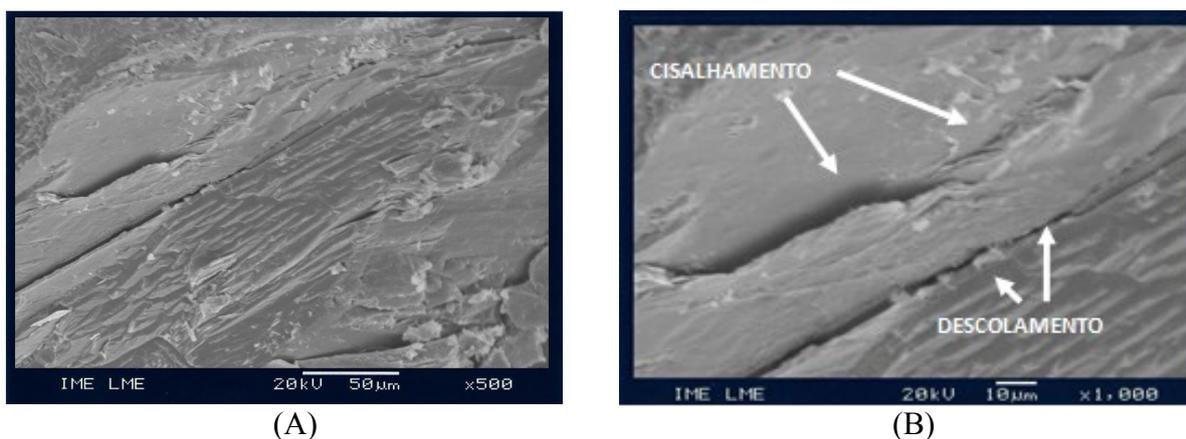


FIG. 9: Fratura da interface concreto matriz epóxi: (A) Fratura caracterizada pelo colapso em cisalhamento da resina (200X); (B) Detalhe da fratura evidenciando a o colapso da resina (500X).

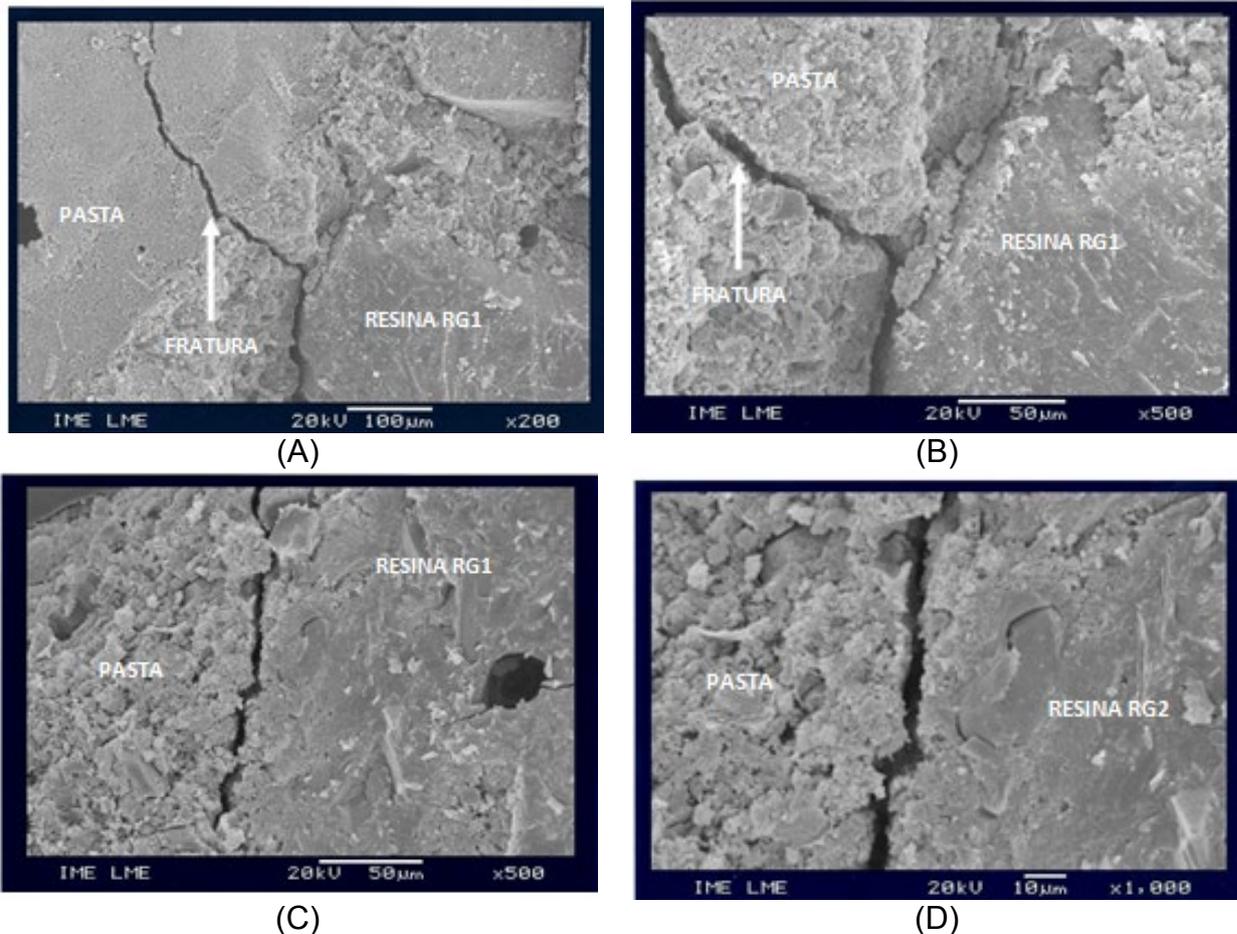


FIG. 10: Fratura da interface concreto matriz geopolimérica: (A) Fratura caracterizada pelo colapso do concreto (200X); (B) Detalhe da fratura evidenciando a fratura na pasta (500X); (C) Fratura caracterizada pelo colapso do concreto (500X); (D) Detalhe da fratura evidenciando a fratura na pasta (1000X).

Os resultados de adesão por cisalhamento oblíqua em compressão e também por flexão, tiveram por objetivo avaliar a interface entre as resinas e o substrato de concreto sob altas temperaturas, mostraram que tanto a resina RG1 quanto a resina RG2 permanecem integras mantendo sua função adesiva, ao contrário da resina epóxi RE1 que perde essa função devido a sua degradação térmica.

3 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no transcorrer desse estudo foi possível concluir que:

- Nos laminados o desempenho da resina geopolimérica RG1 foi prejudicado pela pouca afinidade química entre a superfície do laminado e a resina geopolimérica. Essa incompatibilidade é justificada pelo fato da natureza da resina RG1, que é inorgânica, ser diferente da resina epóxi usada durante a fabricação dos laminados, que é de natureza orgânica.

- A adesão das resinas RE1, RG1 e RG2 na interface resina-concreto mostraram que tanto a resina RG1 quanto a resina RG2 tem potencial de aplicação como adesivo, com pequena vantagem nos resultados de adesão para as resinas RG1 em relação à resina RG2.
- Adesão envolvendo as resinas RE2 e RG1 na interface resina-fibra de carbono mostraram valores 50% menores para as juntas impregnadas pela resina RG1, em relação aos valores das juntas impregnadas pela resina RE2.
- A resistência à compressão nos pilaretes reforçados com dimensões de (15x30)cm mostraram desempenho similar entre os dois compósitos de reforço. Os resultados dos pilaretes reforçados por compósitos de matriz geopolimérica mostraram-se satisfatórios, independentes do número de camadas de reforço e da condição de carregamento.
- A resistência à flexão das vigotas de (15x15x50)cm reforçadas com duas camadas de mantas de fibra de carbono apresentaram aumento em relação as vigotas com uma camada, sendo que as V1RE apresentam valores semelhantes aos encontrados nas V1RG1, independentes do número de camadas de reforço e da condição de carregamento. A resistência à flexão com sistema laminado foi maior em relação às mantas.
- Os pilaretes e vigotas pré-carregadas apresentaram, em média, níveis de tensão de ruptura e deformação muito próximos aos alcançados pelos pilaretes e vigotas sem pré-carregamento, mostrando o bom desempenho dos compósitos geopoliméricos como material de recuperação de estruturas danificadas.

REFERÊNCIAS

- 1 BALAGURU, P. N., LYON, R. E., HAMMEL, J. A., “Strength retention of fire resistant aluminosilicate–carbon composites under wet–dry conditions”, *Composites engineering*, 3, 107-111, 2000.
- 2 DAVIDOVITS, J., “**Mineral Polymers and Methods of making Them**”, U.S. Patent 4.349.386, 1982.
- 3 DAVIDOVITS, J., “**30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications**”, Market Trends and Potential Breakthroughs”, Keynote Conference on Geopolymer Conference 2002, Melbourne, Australia, 2002.
- 4 PROVIS, J. L., “**Modelling the formation of geopolymers**”, Doctor of Philosophy, Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, 2006.
- 5 SILVA, F.J., “**Reforço e Fratura em Compósitos de Matriz Álcali-ativada**”, Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais – Instituto Militar de Engenharia (IME) – Rio de Janeiro, 2000.
- 6 SILVA, A. C. R., “**Concreto geopolimérico para pavimento: uma alternativa ecológica para a indústria do cimento**”, Seminário sobre a indústria e o meio ambiente, Instituto Militar de Engenharia, <http://transportes.ime.eb.br> Rio de Janeiro, 2006.
- 7 SILVA, A. C. R., “**COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS COM FIBRA DE CARBONO PARA REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**”, Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais – Instituto Militar de Engenharia (IME) – Rio de Janeiro, 2010.

- 8 SOUZA, L.G., “**Geopolímeros à base de resíduos industriais**”, Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais – Instituto Militar de Engenharia (IME) , Brasil, 2005.
- 9 ZHANG, B; WU, K. **Residual fatigue strength and stiffnes of ordinary concrete under bending**. Cement and Concrete Research, v. 27, nº1, pp. 115-126. (1997).
- 10 KORMELING, H. A.; REINHARDT, H. W.; SHAH, S. P. **Static and Fatigue Properties of Concrete Beams Reinforced With Continuous Bars and With Fibers**, ACI Journal, v.77, n.1, pp 36-43. 1980.