

Vigas de concreto reparadas com argamassa geopolimérica

Concrete beams repaired with geopolymer mortar

Fernando Cesar Coelho França¹, Dylmar Penteadó Dias²,
Sergio Luiz González Garcia², Thais da Silva Rocha²

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

e-mail: fernandocesarcoelho@gmail.com

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF - Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

e-mail: dylmar@uenf.br, liluiser@yahoo.com.br, rocha.ths@gmail.com

RESUMO

Este trabalho avaliou a eficácia de uma argamassa geopolimérica como material para recuperação de vigas de concreto convencional, objetivando restaurar o caráter monolítico e a capacidade portante inicial da estrutura reparada. Para isso, vigas de concreto reabilitadas com argamassa geopolimérica e com argamassa de reparo comercial foram analisadas e comparadas com vigas de referência sem reparo, por meio de ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão. Os resultados mostram que as maiores deflexões ocorreram para os corpos de prova recuperados com argamassa geopolimérica (quando comparadas às vigas de referência de concreto monolítico) sem, no entanto, haver aumento considerável na carga de ruptura, justificado pelo baixo módulo de elasticidade longitudinal do material de reparo. As vigas recuperadas com argamassa geopolimérica apresentaram comportamento de ruptura muito semelhante ao das vigas de referência, ou seja, comportaram-se monoliticamente, ao contrário das recuperadas com argamassa comercial, que apresentaram descolamento da interface substrato/reparo. Os resultados sugerem que a argamassa geopolimérica possui potencial para ser utilizada como material alternativo em reparo de vigas de concreto convencional devido, principalmente, à aderência satisfatória ao concreto do substrato, à carga de ruptura próxima à da viga monolítica de referência e à melhor qualidade em relação à argamassa comercial.

Palavras-chave: argamassa geopolimérica, reparo, concreto, aderência.

ABSTRACT

This work evaluated the effectiveness of a geopolymer mortar as a material for the repair of conventional concrete beams, objectifying to restore the monolithic character and the initial load bearing capacity of the repaired structure. For this, rehabilitated concrete beams with geopolymer mortar and commercial repair mortar were analyzed and compared with reference beams without repair, by means of tests of tensile strength in the flexion and of strength of flexural shear adhesion. The results show that the greatest deflections occurred for the specimens recovered with geopolymer mortar (when compared to the reference beams of monolithic concrete) without, however, a considerable increase in the rupture load, justified by the low longitudinal modulus of elasticity of the repair material. The beams recovered with geopolymer mortar presented a very similar rupture behavior to the reference beams, that is, they behaved monolithically, unlike those recovered with commercial mortar, which showed substrate/repair interface displacement. The results indicate that the geopolymeric mortar has potential to be used as an alternative material for repairing conventional concrete beams due mainly to the satisfactory adhesion to concrete of the substrate, to the bursting load close to that of the reference monolith beam and to the best quality in relation to commercial mortar.

Keywords: geopolymer mortar, repair, concrete, adhesion.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos no campo das tecnologias de reparo e/ou reforço de estruturas de concreto armado têm objetivado, prioritariamente, a melhoria das propriedades dos materiais de recuperação com relação à compatibilidade estrutural e de deformações. Os reparos de estruturas são correções localizadas de problemas patológicos sem a finalidade de aumentar a capacidade portante, caso contrário, são denominados de reforço [1].

Existem no mercado diferentes opções de produtos para esta finalidade, que apresentam resultados confiáveis, entre os quais: adição ou substituição na face tracionada da viga por um novo concreto ou argamassa, com ou sem novas barras de aço longitudinais e/ou transversais; uso de argamassa convencional com adesivo PVA (Acetato de Polivinila) ou com adesivo acrílico; uso de resinas, quando há necessidade de liberação rápida da estrutura; entre outros.

Um material alternativo para reparo de estruturas é o geopolímero, que apresenta excelente aderência ao aço e ao concreto convencional, além de elevado ganho de resistência inicial [2,3]. Os geopolímeros são materiais poliméricos inorgânicos de microestrutura entre amorfa e semicristalina, que possuem propriedades físicas, químicas e mecânicas que permitem sua utilização como material de reparo. São produzidos a partir da mistura de materiais ricos em Si e Al (aluminossilicatos) com uma solução alcalina ativadora (em geral, silicatos e hidróxidos de sódio e potássio). Desde que foram desenvolvidos, as pesquisas com esses materiais se dão principalmente na área de engenharia civil, devido à sua potencial substituição aos materiais cimentícios. As argamassas geopoliméricas já foram alvo de diversas pesquisas em comparação com argamassas de cimento Portland, entre elas a avaliação da resistência ao ataque por ácidos e sulfatos [4], resistência à elevadas temperaturas [5] e aderência ao aço [6], apresentando, em geral, um desempenho superior aos materiais de referência.

Para que uma argamassa seja considerada adequada para reparar estruturas, como uma viga de concreto, é importante que possua características como: alta fluidez, baixa retração, boa trabalhabilidade e boa aderência, sendo esta última um dos parâmetros mais importantes [7]. Independente da interface formada, e por quais materiais ela é constituída, COSTA [8] afirma que a formação da aderência abrange muitos fenômenos, de modo que a elaboração de uma teoria única, que explique os seus mecanismos químicos e físicos, torna-se difícil devido à natureza e à interdisciplinaridade envolvidas. Alguns autores, entre eles, COSTA [8], PEREIRA [9], FUSCO [10], ELIGEHAUSEN *et al.* [11] e ACI COMMITTEE 408 [12], citam que a aderência resulta de três parcelas: ligações químicas; ancoragem mecânica; e forças eletrostáticas; podendo ocorrer de forma isolada ou simultânea conforme os constituintes das fases envolvidas. O entendimento da aderência junto ao concreto convencional e ao aço tem grande relevância para se obter a capacidade de carga última, flechas e deformações da estrutura.

Os parâmetros que determinam a eficácia de um material de reparo ainda não são bem compreendidos, tornando difícil estabelecer critérios para escolha de um material adequado para fazê-lo. Até o momento, pesquisas dão mais ênfase a materiais com matriz à base de cimento Portland e epóxi [13]. Pouco tem sido explorado no que se refere às características de aderência dos geopolímeros, que podem ser mais relevantes que a compatibilidade de propriedades entre estes materiais e o substrato, tais como módulo de elasticidade, resistência à tração e características superficiais como rugosidade, porosidade e absorção de água. Alto índice de manifestações patológicas ocorrem em sistemas recuperados com baixa aderência, mesmo que outras propriedades sejam similares as do substrato de concreto convencional.

Deste modo, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficácia de uma argamassa geopolimérica como material para recuperação de vigas de concreto convencional, de forma que se restaure o caráter monolítico e a capacidade portante da estrutura. Para isso, vigas de concreto reabilitadas com argamassa geopolimérica e com argamassa de reparo comercial foram analisadas e comparadas com vigas de referência sem reparo. Os resultados apresentados contribuem para o entendimento da importância da aderência na recuperação de um elemento estrutural de concreto convencional, bem como na avaliação do potencial de materiais geopoliméricos neste tipo de aplicação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram utilizados três tipos de materiais, a saber: um concreto convencional, uma argamassa geopolimérica e uma argamassa comercial. As matérias-primas utilizadas na produção de cada um destes são descritos a seguir.

Para o concreto convencional optou-se por utilizar a dosagem de SMIDERLE [14], conforme Tabela 1. Este concreto foi dosado para alcançar 50 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 1: Composição do concreto em kg/m³.

MATERIAIS	CONSUMO (KG/M ³)
Cimento CPV - ARI	511,60
Areia	719,77
Brita 0	905,20
Água	225,81
Superplastificante	1,47

Para argamassa geopolimérica foi adotada a dosagem utilizada por GOLIATH [15], adaptada dos trabalhos de DIAS [16] e MAZZA [17]. Os materiais empregados nesta argamassa foram:

- metacaulim comercial de alta reatividade, que na argamassa geopolimérica é a principal fonte de sílica e alumina;
- solução ativadora alcalina, composta por uma mistura de silicato de sódio alcalino (Na₂SiO₃) e hidróxido de potássio (KOH), em que o Na₂SiO₃ atua como fonte adicional de sílica e o KOH garante a alcalinidade da solução;
- cimento Portland CP II E-32, como fonte de cálcio.

A Tabela 2 mostra a composição deste material. Nos resultados a nomenclatura utilizada para a argamassa geopolimérica foi AG.

Tabela 2: Composição da argamassa geopolimérica em kg/m³.

MATERIAIS	CONSUMO (KG/M ³)
Metacaulim	420,97
Areia	1214,84
Cimento CP II E-32	191,56
Água	131,92
Silicato de sódio alcalino	447,77
Hidróxido de potássio	180,43

Foi utilizada uma argamassa comercial para reparo estrutural da marca Quartzolit. De acordo com a ficha técnica do fabricante, o produto é um concreto pronto formulado à base de cimento Portland, agregados classificados, aditivos especiais, polímeros e inibidores de corrosão, que quando misturados resultam em uma argamassa moldável de alta resistência mecânica, aderente a concretos prontos e à estrutura já existente, impedindo a penetração de água e agentes agressivos. A argamassa possui resistência à compressão especificada de 34 MPa aos 28 dias e foi escolhida por poder ser utilizada em reparos com profundidade superior a 30 mm, suficiente para preencher o entalhe trapezoidal proposto no programa experimental (item 2.2). Além da profundidade do reparo, esta argamassa permite a aplicação em uma só camada, assim como foi executado com a argamassa geopolimérica. Para sua produção, a relação água/aglomerante da argamassa foi de 0,13, assim como recomenda o fabricante. Nos resultados a nomenclatura utilizada para a argamassa comercial foi AC.

2.2 Métodos

Inicialmente, foi realizada a caracterização das matérias-primas, do concreto e das argamassas. Na caracterização das matérias-primas foram realizados ensaios de espectrometria de fluorescência de raios X no metacaulim, no cimento e no pó da argamassa comercial, a fim de obter suas composições químicas; granulometria a laser no metacaulim, para avaliar a dimensão e distribuição de suas partículas; granulometria e massa específica para os agregados miúdo (areia) e graúdo (brita 0).

Para a caracterização no estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos de $\varnothing 50$ mm x 100 mm das argamassas geopolimérica e comercial e de $\varnothing 100$ mm x 200 mm de concreto. Os ensaios realizados foram: resistência à compressão axial aos 28 dias, de acordo com a NBR 5739 [18]; resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, de acordo com a NBR 7222 [19]; módulo de elasticidade longitudinal, de acordo com a NBR 8522 [20]; coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento. Foram utilizados três corpos de prova para cada ensaio.

Após a caracterização, foram moldadas vigas prismáticas de seção quadrada com dimensões de 100 mm x 100 mm x 650 mm com entalhe trapezoidal, onde foram feitos os reparos. A Figura 1 mostra o sistema de reparo, que consiste em um entalhe construído com isopor na forma de prisma trapezoidal (durante a moldagem), onde as argamassas de reparo foram aplicadas. O formato do entalhe e suas dimensões foram definidos a partir das recomendações da AFNOR NF P18-851 [21].

O comportamento mecânico das vigas e a aderência das argamassas de reparo ao substrato foram analisados por meio de ensaios de resistência à tração na flexão a 4 pontos, baseado na NBR 12142 [22] (Figura 1) e a resistência de aderência ao cisalhamento na flexão, baseado na AFNOR NF P18-851 [21]. Os resultados foram obtidos por inspeção visual e por meio da leitura dos extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*) e de um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Os dados coletados foram utilizados para a determinação das curvas tensão *versus* deformação (nos corpos de prova cilíndricos), das curvas carga *versus* deflexão (no meio do vão livre das vigas) e das cargas de ruptura. Foram utilizados três corpos de prova para cada argamassa utilizada como reparo.

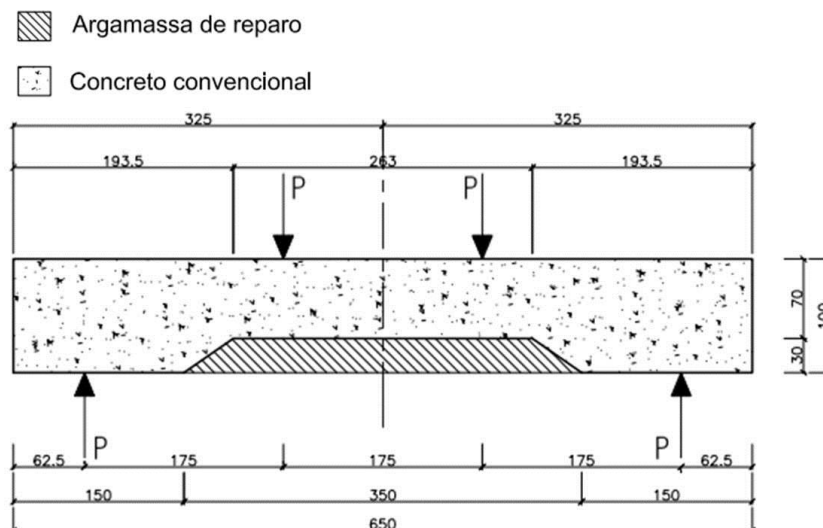


Figura 1: Esquema dos apoios e das cargas concentradas para os ensaios de resistência à tração na flexão a 4 pontos nas vigas (dimensões em mm).

Para medir as deformações nos corpos de prova foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (*strain gages*), da marca Excel Sensores, com autocompensação de temperatura e resistência de 120 ohms. Nos corpos de prova cilíndricos foram colados dois extensômetros do tipo roseta dupla a 90°, modelo PA-06-250TG-120-L, diametralmente opostos. A partir das deformações, foi possível obter o módulo de elasticidade longitudinal, o coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento. Nas vigas foi utilizado um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), a fim de se obter as deflexões (Figura 2).

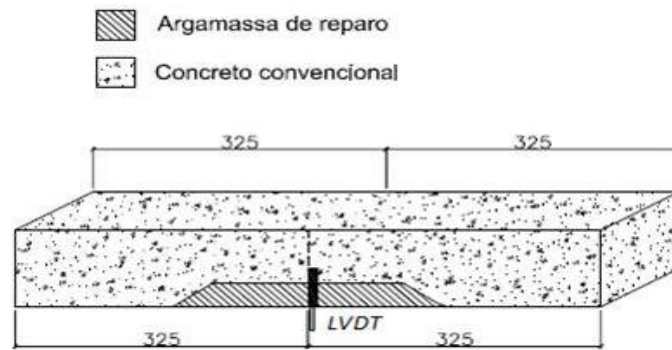


Figura 2: Posicionamento do LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) nas vigas (dimensões em mm).

Após 28 dias de cura submersa em água saturada de cal, as vigas foram retiradas e foi dado início à recuperação. Depois de 24 horas em temperatura ambiente, os moldes de isopor foram retirados. Os resquícios de isopor no entalhe foram inicialmente removidos com espátula e, em seguida, com lixa para concreto. Foram confeccionadas tábuas retangulares de compensado naval, que foram presas às vigas por meio de grampos de aço para que as argamassas de reparo pudessem ser aplicadas e as vigas reconstituídas. A Figura 3 mostra o procedimento descrito.

Apesar de não ser indicado pelo fabricante, para a argamassa comercial foi realizada cura submersa em água saturada com cal, além da cura à temperatura ambiente estabelecida pelo fabricante, devido ao não atendimento da resistência à compressão especificada na ficha técnica do produto neste último caso. A princípio optou-se por não apicoar a superfície do substrato, visando analisar a situação mais crítica de aderência, ou seja, com a superfície quase lisa, só com pequenas ranhuras provocadas pelo lixamento durante a limpeza. Porém, na data dos ensaios as vigas reparadas com argamassa comercial deslocaram do substrato. Segundo o fabricante, esse fato se deu por conta do não apicoamento da superfície do substrato (ancoragem mecânica), prejudicando a aderência. Então, para o reparo com argamassa comercial foi feita a preparação do substrato sem e com apicoamento, realizado com uma ponteira até exposição dos agregados graúdos, bem como com e sem cura úmida. As séries, nomenclaturas e características das vigas ensaiadas são mostradas na Tabela 3.

As vigas reparadas com argamassa comercial e geopolimérica são mostradas na Figura 4.

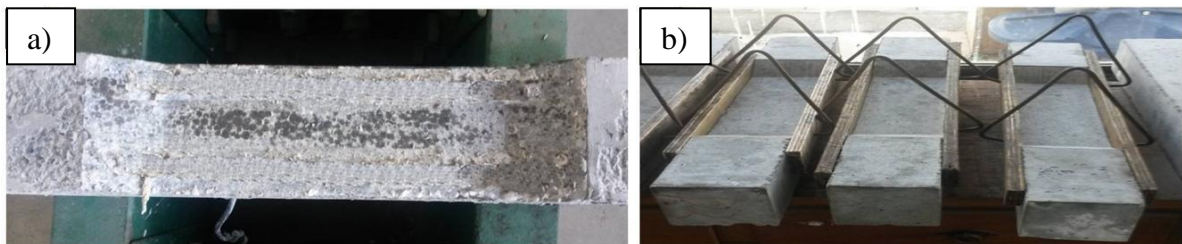


Figura 3: Preparação das vigas: (a) superfície sendo preparada; (b) superfície limpa e com tábuas fixadas com grampos de aço nas laterais das vigas.

Tabela 3: Séries, nomenclatura e características das vigas.

SÉRIE	NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS
A	A1	Substrato de concreto convencional sem reparo.
	A2	
	A3	
D	D1	Substrato de concreto convencional com reparo de argamassa comercial, com apicoamento e cura à temperatura ambiente.
	D2	Substrato de concreto convencional com reparo de argamassa comercial, sem apicoamento e cura úmida.
	D3	
G	G1	Substrato de concreto convencional com reparo de argamassa geopolimérica.

	G2	
	G3	

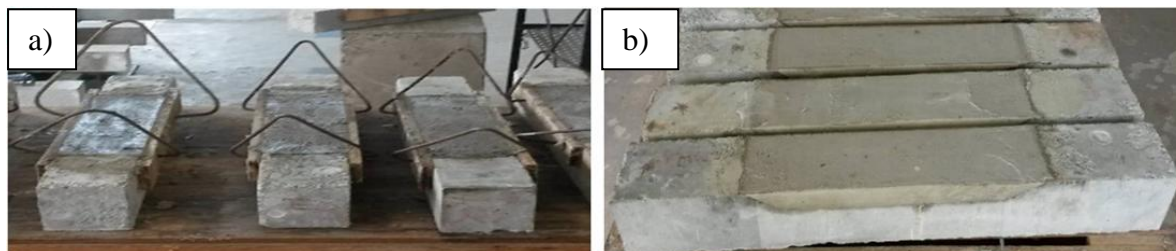


Figura 4: Preparação dos reparos: (a) vigas reparadas com argamassa geopolimérica; (b) vigas reparadas com argamassa comercial.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização das matérias-primas, das argamassas e do concreto, bem como os resultados e as discussões dos ensaios de aderência com as vigas reparadas são mostrados nos itens a seguir.

3.1 Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram caracterizadas em função da sua composição química e dimensão dos grãos ou partículas. A composição dos cimentos (CP II E-32 e CP V-ARI), do pó da argamassa comercial e do metacaulim são mostrados na Tabela 4. Os resultados do metacaulim foram comparados com a norma NBR 15894-1 [23] e os valores encontram-se dentro do recomendado.

Tabela 4: Composição química das matérias-primas.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	CP II E-32	CP V-ARI	QUARTZOLIT	METACAU LIM	NBR 15894-1 [23]
CaO	74,32	75,68	74,81	0,10	-
SiO ₂	14,88	13,35	14,96	48,43	≥ 44 e ≤ 65
Al ₂ O ₃	4,41	3,98	4,07	44,76	≥ 32 e ≤ 46
SO ₃	2,64	3,31	2,92	0,24	≤ 1
Fe ₂ O ₃	2,15	2,58	2,13	2,39	-
K ₂ O	0,97	0,62	0,97	1,51	-
TiO ₂	0,32	0,26	-	1,45	-
MnO	0,13	0,09	0,07	-	-
SrO	0,12	0,12	0,04	0,01	-
ZrO ₂	0,04	0,01	0,02	0,01	-

A areia, material inerte, utilizada para a fabricação do concreto do substrato e da argamassa geopolimérica possui dimensão máxima característica de 2,36 mm, módulo de finura de 2,68 e massa específica de 2,65 g/cm³. A granulometria do agregado miúdo é a passante na peneira #16 (1,18 mm) e sua curva granulométrica é mostrada na Figura 5.

Já o agregado graúdo utilizado na fabricação do concreto do substrato, brita 0, possui massa específica de 2,72 g/cm³, massa unitária compactada de 1,35, módulo de finura de 6,43 e dimensão máxima característica de 9,5 mm. A distribuição granulométrica do agregado graúdo é mostrada na Figura 5.

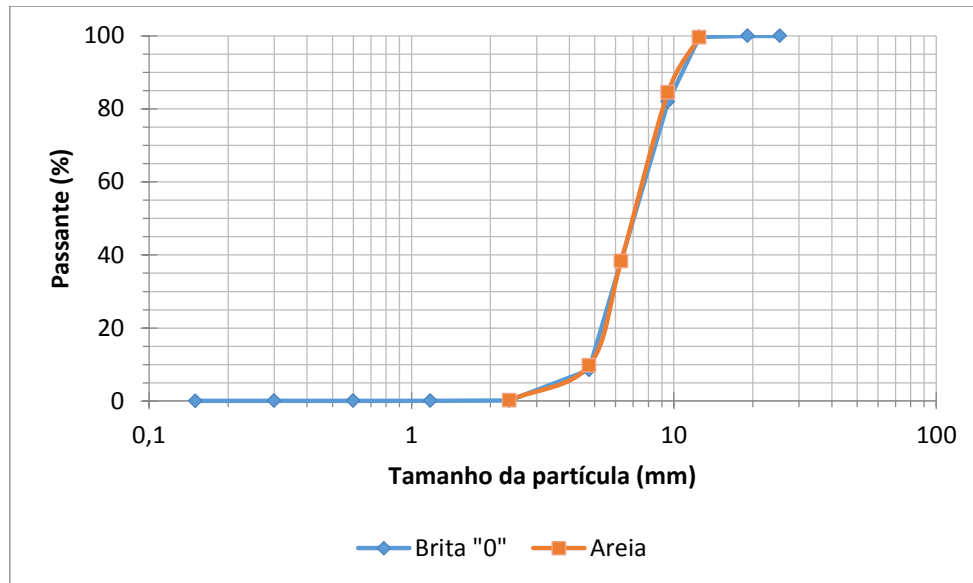


Figura 5: Curva granulométrica do agregado graúdo e miúdo.

O metacaulim possui massa específica de $2,09 \text{ g/cm}^3$, de acordo com a NBR NM 23 [24]. Para determinar o diâmetro de suas partículas e sua curva granulométrica, foi realizado o ensaio de granulometria a laser em um equipamento CILAS 1090 do LGMA da PUC-Rio. As dimensões das partículas são mostradas na Tabela 5 e a curva granulométrica na Figura 6.

Tabela 5: Diâmetro das partículas de metacaulim.

DIÂMETRO (%)	DIÂMETRO (μm)
D_{10}	2,91
D_{50}	19,20
D_{90}	46,15

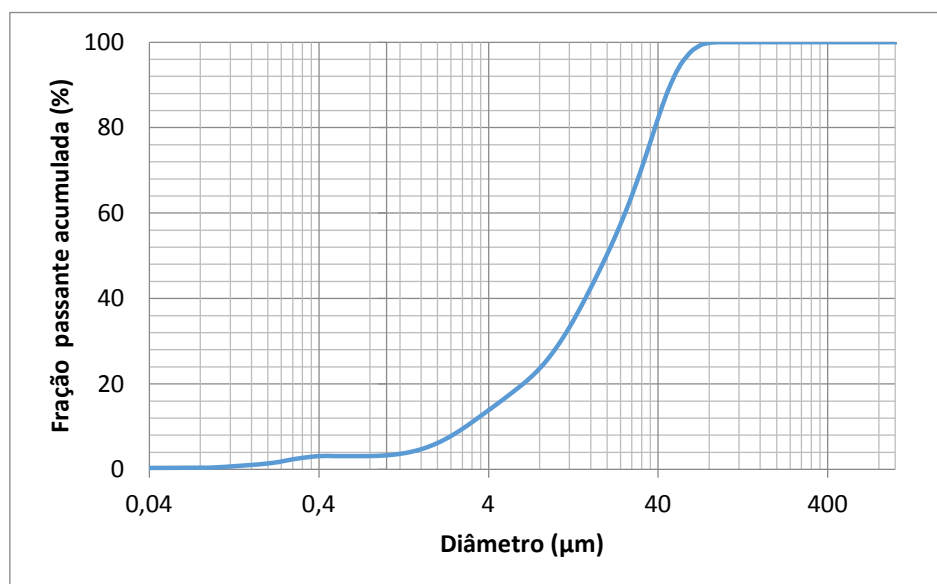


Figura 6: Curva granulométrica do metacaulim.

3.2 Caracterização do concreto e das argamassas de reparo no estado endurecido

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do

concreto convencional do substrato e das argamassas comercial e geopolimérica de reparo, a saber: resistência à compressão axial (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), módulo de elasticidade longitudinal (E), coeficiente de Poisson (ν) e módulo de cisalhamento (G).

A Tabela 6 mostra os resultados de resistência à compressão axial e de resistência à tração por compressão diametral do concreto de substrato e das argamassas de reparo.

Tabela 6: Resistências à compressão e à tração por compressão diametral do concreto convencional e das argamassas de reparo.

MATERIAL	f_c (MPa)	CV (%) ¹	$f_{ct,sp}$ (MPa)	CV (%) ¹
Concreto convencional	49,9 ± 0,7	1,4	3,7 ± 0,1	2,6
AC com cura à temperatura ambiente	12,9 ± 0,4	3,0	1,7 ± 0,1	2,8
AC com cura úmida	24,9 ± 0,8	3,3	2,3 ± 0,1	4,1
AG	25,2 ± 0,4	1,7	2,7 ± 0,1	3,8

¹CV = coeficiente de variação.

Os módulos de elasticidade, coeficientes de Poisson e módulos de cisalhamento do concreto de substrato e das argamassas de reparo são apresentados na Tabela 7. As curvas tensão *versus* deformação que foram obtidas a partir das leituras dos *strain gages* são mostradas nas Figuras 7 a 10.

Tabela 7: Módulos de elasticidade, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento do concreto e das argamassas de reparo.

Material	E (GPa)	CV (%) ¹	ν	CV (%) ¹	G (GPa)	CV (%) ¹
Concreto	32,3 ± 0,8	2,5	0,17 ± 0,7	4,2	13,9 ± 4,0	0,3
AC com cura à temperatura ambiente	10,5 ± 0,4	3,5	0,13 ± 0,3	2,5	4,7 ± 5,3	1,1
AC com cura úmida	17,1 ± 0,8	4,6	0,10 ± 0,5	4,5	7,8 ± 5,5	0,7
AG	6,8 ± 0,3	4,4	0,33 ± 0,2	0,6	2,5 ± 4,6	1,8

¹CV = coeficiente de variação.

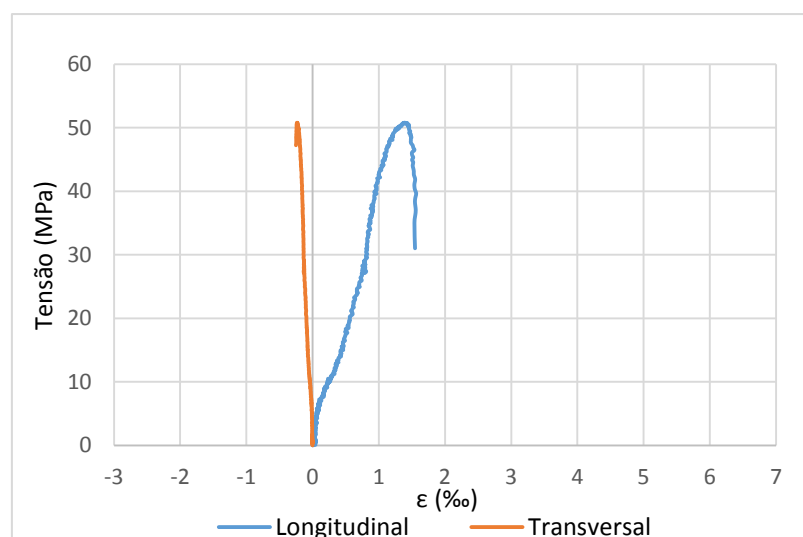


Figura 7: Curvas tensão *versus* deformação do concreto convencional.

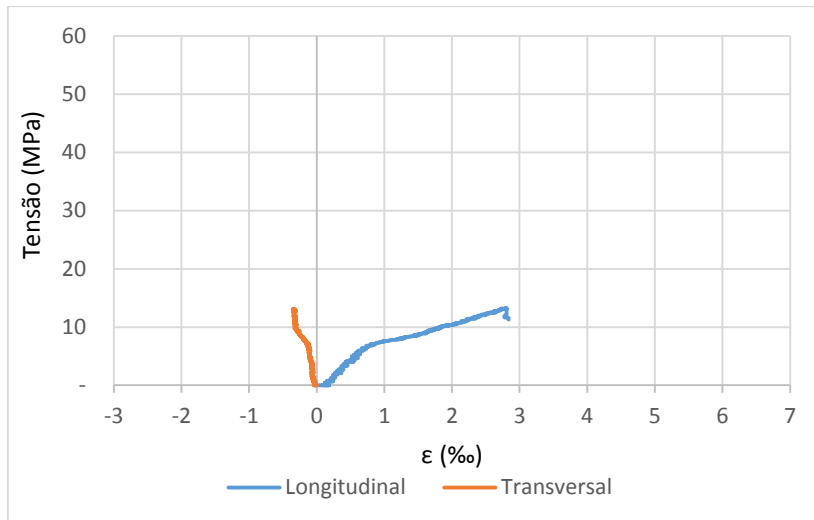


Figura 8: Curvas tensão versus deformação da AC com cura à temperatura ambiente.

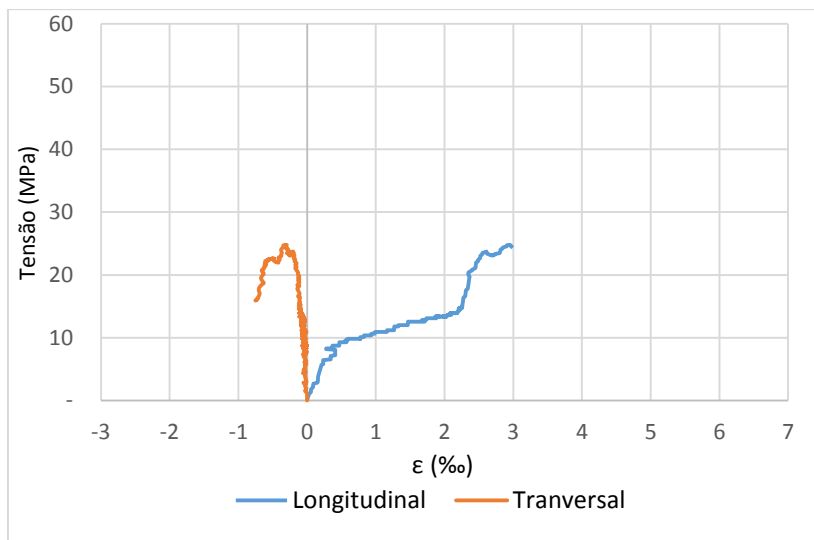


Figura 9: Curvas tensão versus deformação da AC com cura úmida.

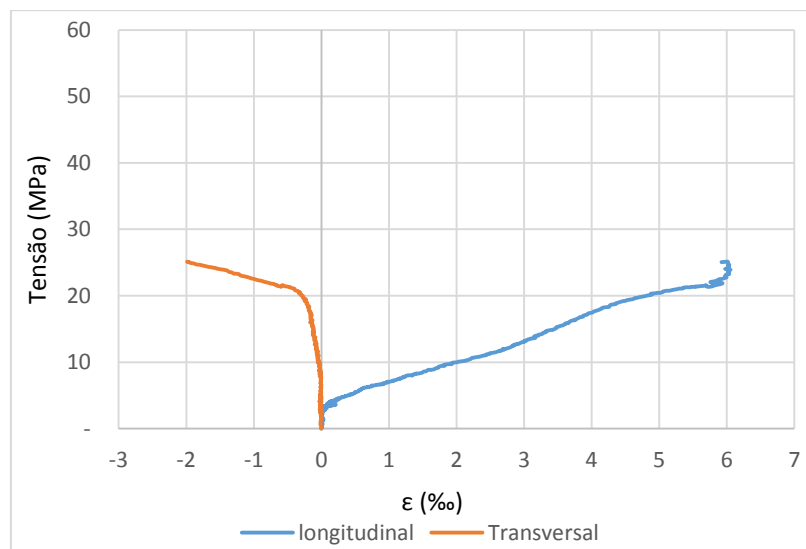


Figura 10: Curvas tensão versus deformação da AG.

O módulo de elasticidade encontrado para o concreto desta pesquisa foi de 32,3 GPa. Este valor encontra-se dentro do esperado para concreto que, de acordo com MEHTA e MONTEIRO [25], varia entre 14 GPa e 40 GPa. Quanto ao coeficiente de Poisson, o valor encontrado foi de 0,17. Esse valor é condizente pois, segundo MEHTA e MONTEIRO [25], esse valor varia em torno de 0,20 para concreto. Já o valor do módulo de cisalhamento foi de 13,9 GPa.

Já o módulo de elasticidade encontrado para a AG (6,8 GPa) foi relativamente baixo quando comparado com o concreto, mas coerente com outros autores [26,5] que encontraram valores variando entre 5 e 11 GPa. DUXSON *et al.* [27] sugerem que o módulo de elasticidade longitudinal dos geopolímeros é determinado em grande parte por sua microestrutura, ao invés simplesmente pela composição ou resistência mecânica. O coeficiente de Poisson também se assemelha muito ao encontrado por ROCHA [5], que encontrou uma variação entre 0,13 a 0,24.

3.3 Vigas reparadas com argamassa comercial e geopolimérica

Os resultados dos ensaios nas vigas prismáticas com e sem reparo são mostrados a seguir. Os resultados das Séries A e G são apresentados em função da média de três corpos de prova ensaiados. Já a Série D, por haver diferença na configuração dos corpos de prova, são mostrados seus valores individuais. A Figura 11 apresenta as cargas de ruptura teóricas ($P_{u,teor}$) e experimentais ($P_{u,exp}$) das vigas. A Figura 12 apresenta a razão $P_{u,teor}/P_{u,exp}$; nela pode ser observado que, em geral, o desempenho experimental das vigas foi superior ao teórico, em especial para as reparadas com argamassa geopolimérica, que alcançaram 58% a mais de resistência mecânica.

A Figura 13 apresenta as curvas carga *versus* flecha das vigas. Observa-se que as vigas das Séries A e G apresentaram comportamento semelhante, tanto em termos de carga de ruptura quanto em termos de flecha. Já as da Série D romperam com pouco mais do que a metade da carga de ruptura experimentada pelas demais Séries, apresentando, conseqüentemente, flecha bem inferior.

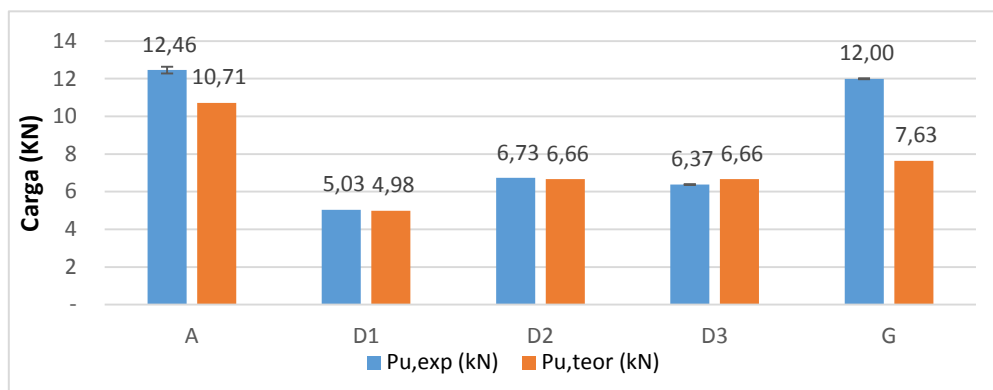


Figura 11: Valores das cargas de rupturas teóricas e experimentais das vigas.

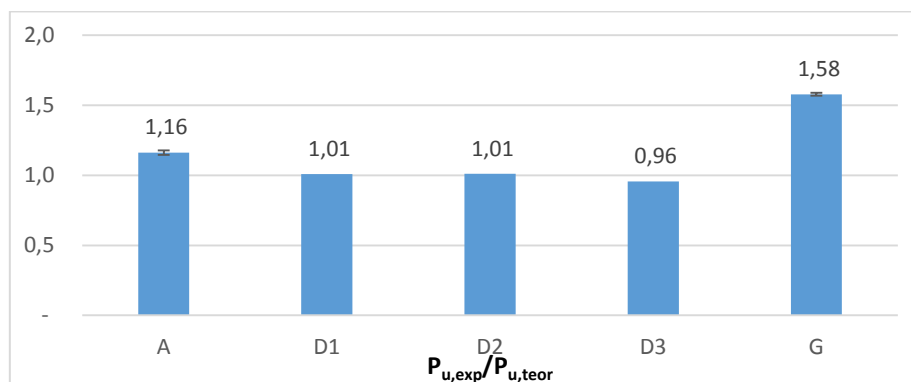


Figura 12: Razões $P_{u,exp}/P_{u,teor}$.

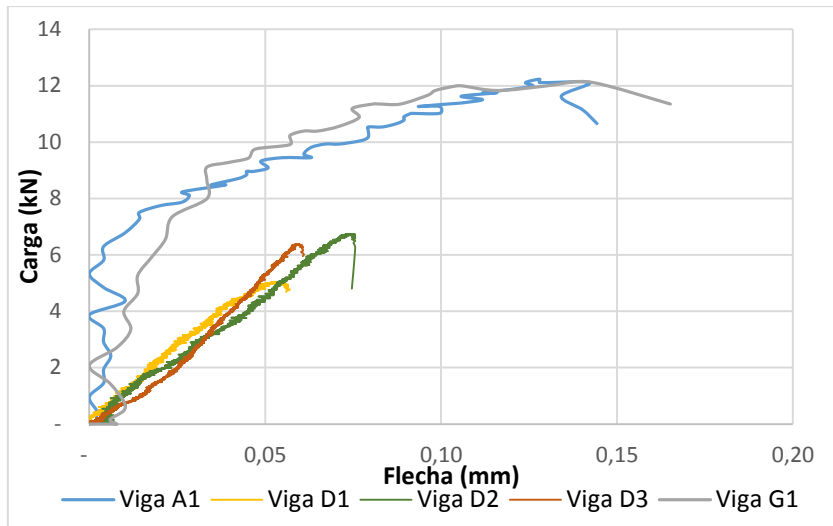


Figura 13: Curvas carga-flecha das vigas.

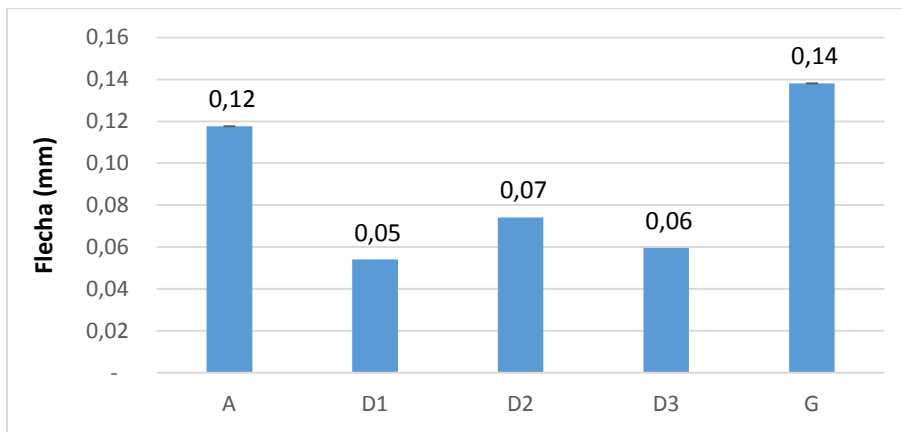


Figura 14: Valor das flecha das vigas com e sem reparo.

Todas vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos até o colapso (na região de flexão pura), de acordo com a configuração mostrada no item 2.2. O modo de ruptura das vigas foi avaliado pelo ensaio de resistência ao cisalhamento na flexão e são apresentadas nas Figuras 15 a 18.

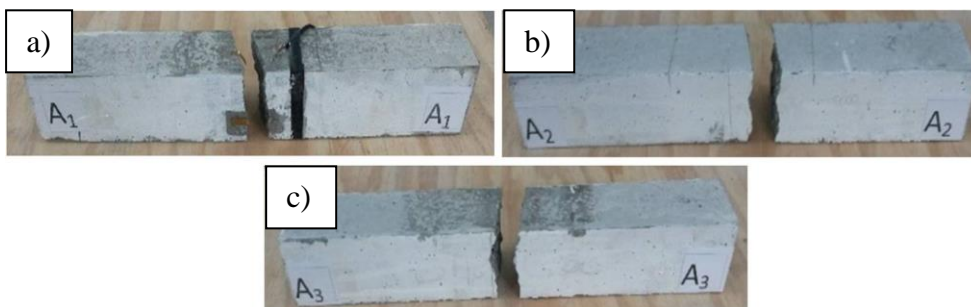


Figura 15: Vigas da Série A(monolíticas) após ruptura.

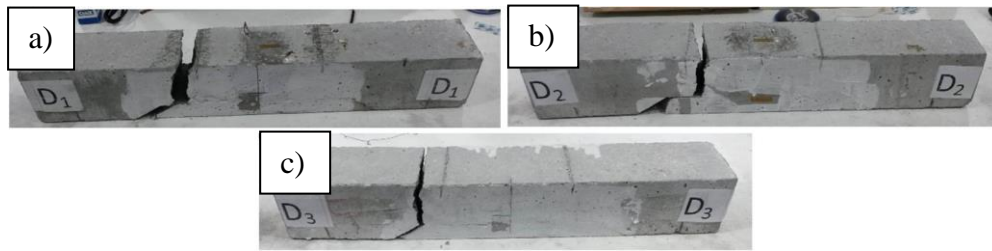


Figura 16: Vigas da Série D (reparadas com AC) após ruptura.

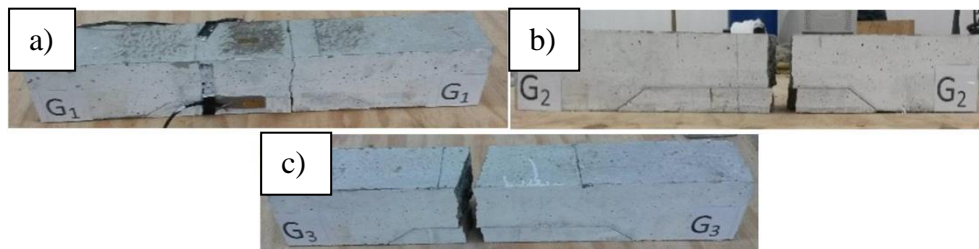


Figura 17: Vigas da Série G (reparadas com AG) após ruptura.

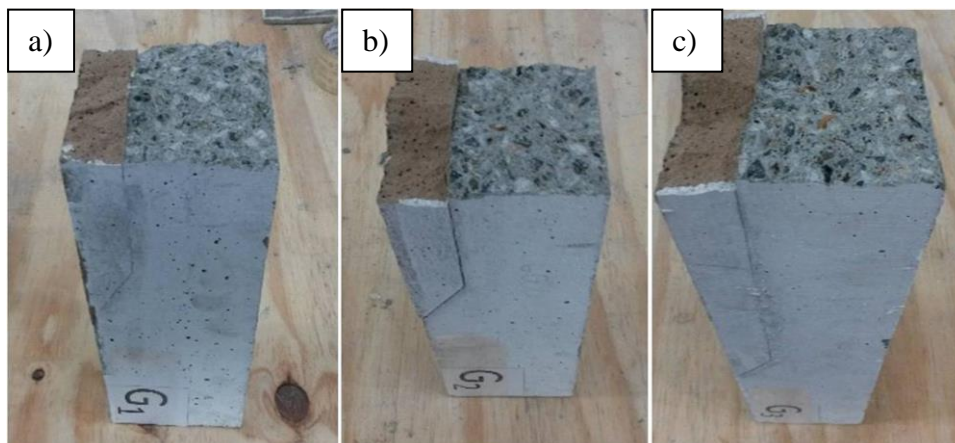


Figura 18: Detalhe da ruptura da Série G.

As vigas reparadas com a argamassa AG (Série G) apresentaram cargas de ruptura experimentais superiores as das argamassas AC (Série D). O gráfico $P_{u,exp}/P_{u,teor}$ (Figura 12) mostra que essas vigas tiveram carga de ruptura experimental 58% maior do que a carga de ruptura teórica. Apesar das resistências à compressão e à tração (mostradas na Tabela 6) das argamassas AC (com cura úmida) e AG serem muito próximas, a argamassa geopolimérica obteve melhor desempenho devido à sua superior aderência ao concreto de substrato, como pode ser observado no modo de ruptura obtido.

As Figuras 13 e 14 apresentam as curvas carga *versus* flecha e os valores das vigas com e sem reparos. A flecha máxima da viga A1 é 0,13 mm e da viga G1 é 0,14 mm. Esse resultado corrobora com o encontrado por RANJBAR [3], que produziu vigas de concreto com multicamadas de argamassa geopolimérica. Segundo este pesquisador, as vigas compostas com uma camada de geopolímero na zona de tração apresentaram maior deflexão do que as vigas de concreto convencional de referência, sem aumento considerável na sua capacidade portante. Já as das vigas D1, D2 e D3 são bem diferentes em relação à viga A1 (de referência), apresentando valores de flecha, respectivamente, iguais a 0,05 mm, 0,07 mm e 0,06 mm. Como já esperado, as menores deflexões foram encontradas para as vigas reparadas com argamassa comercial, reflexo das suas menores cargas de ruptura.

A ductilidade é uma propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua ruptura. Como o concreto é considerado um material frágil, suporta pouca deformação em

ensaios de flexão. As vigas reparadas com AG apresentaram um comportamento carga *versus* flecha muito semelhante a das vigas sem reparo. Isso significa que, mesmo após o reparo, as vigas recuperadas com argamassa geopolimérica, quando comparadas com as vigas monolíticas de concreto, reestabeleceram sua capacidade portante inicial e apresentaram-se como se fossem monolíticas. Apesar do comportamento similar a da viga de referência, as vigas reparadas com AG apresentaram uma maior ductilidade, o que pode ser justificado devido ao menor módulo de elasticidade da argamassa geopolimérica.

Os tipos de ruptura das vigas nos ensaios de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão, mostrados nas Figuras 15 a 18, são comparados com os padrões apresentados na Figura 19, de acordo com a norma AFNOR NF P18-851 [21]. As vigas das Séries A e G alcançaram cargas últimas bastante próximas e o mesmo tipo de ruptura, frágil na região de flexão pura (terço médio). Pela norma AFNOR NF P18-851 [21], a viga reparada com esse tipo de ruptura é do tipo M, que significa dizer que a viga reparada rompeu de forma monolítica por tração na extremidade inferior da seção, com posterior propagação da fissura para o concreto, ou seja, no colapso a fissura se propagou da base para o topo. Este tipo de ruptura ocorreu nas vigas das séries A e G como mostram as Figuras 15 e 17. Os detalhes da ruptura das vigas da Série G, apresentados na Figura 18, mostram aderência satisfatória da AG ao substrato de concreto.

As vigas da Série D tiveram a ruptura antecipada devido à baixa aderência da AC ao substrato de concreto convencional. A viga D1, que foi apicoada e curada à temperatura ambiente, teve sua ruína com carga inferior as das vigas D2 e D3, que não foram apicoadas e tiveram cura úmida. Neste caso, o apicoamento se mostrou um parâmetro menos influenciador da aderência do que o tipo de cura aplicado. De acordo com a AFNOR NF P18-851 [21], o padrão de ruptura apresentado se aproxima da ruptura do tipo I-1 (Figura 19). Segundo esta norma, nesses casos a ruptura se dá na região inclinada da reentrância, com consequente propagação da fissura para o concreto a partir da interface em sua região horizontal. Esse tipo de ruptura indica baixa aderência da argamassa de reparo ao substrato. Vale destacar que a viga D1 teve cura à temperatura ambiente e foi apicoada antes da aplicação do reparo (procedimento prescrito pelo fabricante). Já as vigas D2 e D3 não foram apicoadas e tiveram cura úmida. Neste caso o apicoamento foi necessário para a realização do reparo, mas não foi um fator determinante para garantir boa aderência ao substrato, como pode ser observado pelo modo de ruptura apresentado.

Fazendo uma comparação das vigas da Série G com as da Série D, em função do seu comportamento carga *versus* flecha e do seu tipo de ruptura, é possível dizer que a aderência ao substrato dos corpos de prova da série G foi melhor do que a da série D. É necessário notar, portanto, que as vigas reparadas com argamassas geopoliméricas obtiveram desempenho satisfatório nos ensaios de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão, pois tiveram resultados de ruptura à flexão semelhantes aos das peças monolíticas de concreto.

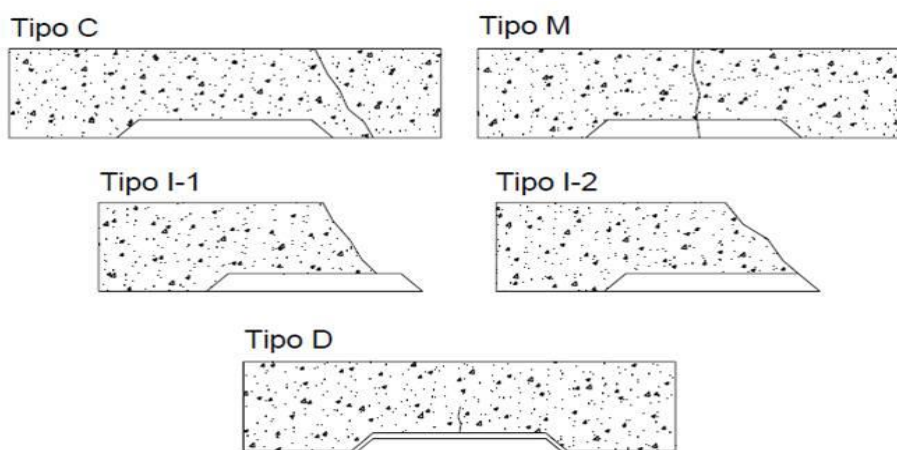


Figura 19: Tipos de rupturas possíveis no ensaio AFNOR NF P18-851 [21].

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que as maiores deflexões ocorreram para os corpos de prova recuperados com argamassa geopolimérica (quando comparadas às vigas de referência de concreto monolítico) sem, no entanto, haver aumento considerável na carga de ruptura. Este fato pode ser justificado pelo baixo módulo de elasticidade longitudinal da argamassa geopolimérica de reparo.

Mesmo com resistências à compressão e à tração bastante semelhantes, a argamassa geopolimérica obteve melhor desempenho do que a argamassa comercial, devido à sua superior aderência ao concreto de substrato, como foi observado pelo tipo de ruptura apresentado pelas vigas reparadas. Além disso, as vigas reconstituídas com argamassa geopolimérica apresentaram-se como se fossem monolíticas, de acordo com o modo de ruptura experimentado, ao contrário das recuperadas com argamassa comercial, que tiveram descolamento da interface substrato/reparo.

O teste t de Student foi utilizado para verificar se as médias das cargas de ruptura (P_u) da argamassa comercial e da argamassa geopolimérica apresentam diferenças relevantes com nível de significância de 5%. Por meio deste teste de hipótese, feito em um aplicativo de planilha eletrônica, verificou-se que a hipótese nula (médias das cargas de ruptura das argamassas são iguais) foi rejeitada e a hipótese alternativa (médias das cargas de ruptura das argamassas são diferentes) foi aceita. Esse resultado demonstrou que as maiores cargas de ruptura nas vigas da série G em relação as da série D foi devido à argamassa geopolimérica utilizada para o reparo.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a argamassa geopolimérica confeccionada neste estudo tem elevado potencial para ser utilizada como um material alternativo para reparo de vigas de concreto convencional, devido à aderência satisfatória ao substrato de concreto convencional, à carga de ruptura próxima à da viga monolítica de referência, ao aumento da ductilidade da viga recuperada e à melhor qualidade em relação à argamassa comercial.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SOUZA, V. C., RIPPER, T., *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*, 1 ed., São Paulo, Editora Pini, 1998.
- [2] SHAO, N., LIU, Z., XU, Y., *et al.*, “Fabrication of hollow microspheres filled fly ash geopolymer composites with excellent strength and low density”, *Materials Letters*, v. 161, pp. 451-454, Dez. 2015.
- [3] RANJBAR, N., BEHNIA, A., CHAI, H. K., *et al.*, “Fracture evaluation of multi-layered precast reinforced geopolymer concrete composite beams by incorporating acoustic emission into mechanical analysis”, *Construction and Building Materials*, v.127, pp. 274–283, Nov. 2016.
- [4] MAURI, J., DIAS, D.P., CORDEIRO, G.C., *et al.*, “Argamassa geopolimérica: estudo da degradação por sulfato de sódio e ácido sulfúrico”, *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, pp. 1039-1046, Nov. 2009.
- [5] ROCHA, T. S., *Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores alcalinos e seus comportamentos frente à elevação de temperatura*, Dissertação de M.Sc., LECIV/UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2017.
- [6] SOARES, J. C., *Aço-concreto geopolimérico: correlação entre tensão de aderência e comprimento de ancoragem*, Dissertação de M.Sc LECIV/UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2006.
- [7] SATOH, A., YAMADA, K. “FEM simulation of tension struts on adhesion performance. of mortar–repair interface”, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 167, pp. 84-100, Nov. 2016.
- [8] COSTA, E. B. C. *Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias*, Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2014.
- [9] PEREIRA, D. S. *Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre placa de concreto e base cimentada ou asfáltica*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2003.
- [10] FUSCO, P. B. *Técnica de armar as estruturas de concreto*. São Paulo. Editora Pini, 1995.
- [11] ELIGEHAUSEN, R., POPOV, E. P., BERTERO, V. V. Local bond-slip relationship of deformed bars under generalized excitations. Report nº UCB/EERC 83/23, University of California, College of Engineering, Earthquake Engineering Research Center, Berkley California, USA, 1983.
- [12] ACI COMMITTEE 408. Abstract of: State of the art report: Bond Under Cyclic Loads. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 6, p. 669-73, Nov./Dec. 1991.
- [13] DUAN, P., YAN, C., LUO, W., “A novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer”, *Construction and Building Materials*, v. 124, pp. 69–73, Jul. 2016.
- [14] SMIDERLE, A. P. R. S. *Avaliação da durabilidade e propriedades mecânicas de concretos expostos ao ataque ácido por vinhoto*, Dissertação de M.Sc., LECIV/UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2016.
- [15] GOLIATH, K. B. *Comportamento de colunas curtas reforçadas com compósitos de resina geopolimérica e fibras de carbono*, Dissertação de M.Sc., LECIV/UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2017.

- [16] DIAS, D. P. *Cimentos geopoliméricos: estudo de agentes químicos agressivos, aderência e tenacidade à fratura*, Tese de D.Sc., IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [17] MAZZA, S. C. *Estudo das propriedades mecânicas e da aderência entre argamassa de reparo geopolimérica e substrato de concreto com cimento Portland*, Dissertação de M.Sc., UFBA, Bahia, BA, Brasil, 2010.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739 (2007), Concreto- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7222 (2011), Concreto e argamassa- determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 8522 (2008): Concreto- Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro.
- [21] ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR NF P18-851 (1992), Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci. - Essai de flexion sur éprouvette évidée et reconstituée -. Bruxelles.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12142 (2010), Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15894-1 (2010), Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro.
- [24] ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO, NBR NM 23 (2001), CIMENTO PORTLAND. Determinação da Massa Específica. Brasil.
- [25] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, 3 ed., São Paulo, Pini, 2008.
- [26] YUAN, J., HE, P., JIA, D., *et al.*, “Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers”, *Ceramics International*, v.42, n.14, pp.16184–16190, Nov. 2016.
- [27] DUXSON, P., MALLICOAT, S. W., LUKEY, A., *et al.*, “The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers”, *Colloids Surface A*, v.292, n.1, pp. 8-20, Jan. 2007.