

Utilização de argamassas geopoliméricas em alternativa às resinas epoxídicas na reabilitação de betão com CFRP.

Eduardo Luís de Castro Vasconcelos¹, José Barroso de Aguiar²

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800 Guimarães, Portugal

Fernando Pacheco Torgal^{3, †}

Universidade do Minho, Unidade de Investigação C-TAC, 4800 Guimarães, Portugal

RESUMO

Novos desenvolvimentos na reabilitação de betões passam pela utilização de faixas de fibra de carbono (CFRP) coladas ao substrato de betão com resinas epoxídicas. Contudo estas apresentam o inconveniente de serem sensíveis a temperaturas não muito elevadas. Dado que os geopolímeros são conhecidos por possuir elevada estabilidade mesmo a altas temperaturas, os mesmos podem ser uma alternativa às resinas epoxídicas.

Este artigo apresenta resultados sobre o uso de argamassas geopoliméricas à base de metacaulino para garantir a aderência entre faixas de CFRP e o betão. Foram executadas diversas composições de argamassas geopoliméricas, fazendo variar a percentagem de ligante, a razão mássica areia/ligante e a concentração do hidróxido de sódio. Verificou-se que as argamassas geopoliméricas demonstram desempenhos fracos mas promissores.

Por outro lado a aderência entre os CFRP e as argamassas geopoliméricas revelou-se menor do que o previsto o que poderá dever-se ao facto da composição das argamassas não estar otimizada ou à própria natureza do CFRP.

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica dos materiais tornou possível a substituição das clássicas chapas de aço para reforço de estruturas de betão por outros materiais como as mantas, tecidos ou laminados de fibras unidireccionais de carbono (Nanni, 1993).

O interesse nestes materiais resulta da sua elevada resistência à tracção, baixo peso específico, resistência à corrosão, elevada resistência à fadiga, etc.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (carbon fibre reinforced polymers-CFRP), destacam-se como sendo os mais apropriados para o reforço estrutural de elementos de betão armado, devido ao alto desempenho mecânico das fibras de carbono, permitindo uma

¹ Mestrando em Engenharia Civil

² Professor Associado com Agregação

³ Doutor em Engenharia Civil

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (torgal@civil.uminho.pt)

significativa redução nas dimensões dos elementos utilizados no reforço estrutural (Moura, et al., 2005).

De acordo com alguns estudos (Gamage et al., 2006) foi possível apurar que as resinas epoxídicas utilizadas na colagem dos CFRP, são extremamente sensíveis a altas temperaturas. Alguns autores concluem que a temperatura dos não deve exceder 70 °C de modo a garantir a aderência das resinas epoxídicas e o funcionamento adequado dos CFRP. De notar que a própria exposição directa à luz solar é capaz de provocar temperaturas de aproximadamente 70 °C.

O termo “geopolímero” apareceu pela primeira vez em 1979 na sequência de uma série de descobertas efectuadas por Joseph Davidovits. De acordo com este autor os “geopolímeros”, são “polímeros” devido à sua capacidade de se policondensarem e adquirirem forma rapidamente a baixas temperaturas. A denominação “geo” é atribuída devido ao facto destes materiais serem inorgânicos, duros, estáveis até temperatura de 1250 °C e não inflamáveis (Torgal, 2007).

As argamassas geopoliméricas, compreendem fundamentalmente duas etapas, uma de dissolução da sílica e alumina da matéria prima, quando misturada com uma solução alcalina (activador) e outra de policondensação e endurecimento dos produtos de reacção numa estrutura polimérica (Pinto, 2004).

As investigações sobre este tipo de material, demonstram que é possível sintetizar novos ligantes a partir de materiais inorgânicos constituídos por sílica e alumina activados com soluções de elevada alcalinidade (hidróxidos e silicatos de sódio ou potássio) (Torgal, et al., 2009). A elevada durabilidade e resistência mecânica destes produtos são admiráveis quando comparadas com as que os betões modernos apresentam, sobretudo em termos ambientais (Torgal, et al., 2010).

Dado que os geopolímeros são conhecidos por possuir estabilidade a altas temperaturas, esses materiais podem ser uma alternativa para as resinas epoxídicas.

O objectivo do presente artigo é nessa sequência o de apresentar resultados em termos da resistência mecânica, aderência ao betão e aderência entre CFRP e betões.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais, argamassas geopoliméricas, composição e fabrico do betão do substrato

Neste trabalho foi utilizado como material de partida para o fabrico das argamassas geopoliméricas o metacaulino. A desidroxilação do caulino para a obtenção do metacaulino foi efectuada numa temperatura de 650°C utilizando um forno industrial a gás e a sua composição química é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição química do metacaulino

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Mg O	Ti O ₂	Outros óxidos
50,75	43,48	2,45	-	0,04	0,11	0,57	2.6

Relativamente às argamassas geopoliméricas, as variáveis objecto de investigação no presente estudo foram, a concentração de hidróxido de sódio (12M, 14M e 16M) e a percentagem da razão mássica areia/ligante (30%, 60% e 90%). Para dissolver as palhetas de hidróxido de sódio utilizou-se água destilada para evitar a influência de contaminantes desconhecidos da água da rede. A fim de se poder analisar o efeito de alguns parâmetros de composição na resistência à compressão a longo prazo, foram ensaiadas composições mantendo constante a razão silicato de sódio/hidróxido.

O activador alcalino é composto por silicato e hidróxido de sódio, sendo preparado previamente pela mistura dos dois compostos, antes da sua mistura aos componentes sólidos. A areia, cal e o metacaulino são misturados à parte antes da adição do activador alcalino, pelo facto desta ordem de mistura dos componentes se ter revelado como a mais adequada. Os provetes foram moldados imediatamente a seguir à preparação das argamassas, tendo sido desmoldados após 24h. A cura foi efectuada à temperatura ambiente.

Para a execução dos betões foi utilizado um cimento da classe 32,5 e dois tipos de agregados (uma areia de rio e uma brita).

A composição do betão do substrato que se apresenta no Quadro 2 foi feita de acordo com o método das curvas de referência de Faury.

Quadro 2 – Composição do betão por m³

Cimento II 32.5 (kg)	400
Água (L)	211,14
Areia (kg)	578
Brita (kg)	1066,15

Foi também utilizada uma manta flexível de fibra de carbono designada comercialmente por MBrace CF130 cujas propriedades são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades da manta de CFRP MBrace CF130

Espessura da manta de fibra (mm)	Módulo elasticidade (GPa)	Resistência à tracção (MPa)	Extensão máxima (%)
0,176	230	4900	2,1

2.3 Condições experimentais

2.3.1 Resistência à flexão das argamassas geopoliméricas

A resistência à flexão foi efectuada segundo a norma NP EN 196-1. Utilizaram-se séries de 3 provetes 40x40x160 mm³. O valor da resistência à flexão é obtido com a média aritmética de 3 valores individuais.

2.3.2 Resistência à compressão das argamassas geopoliméricas

A determinação da resistência à compressão foi efectuada com recurso ao ensaio das metades originadas do ensaio à flexão. O valor da resistência à compressão de cada amassadura é obtido com a média aritmética de 6 valores individuais.

2.3.3 Aderência (ensaio de arrancamento por tracção “pull-off”)

Para a realização do ensaio foi aplicada uma camada de 1 cm de argamassa geopolimérica incorporada com a manta de fibra de carbono. A metodologia adoptada para a determinação da aderência das misturas geopoliméricas segue as especificações prescritas na norma EN 1015-12.

2.3.4 Resistência à flexão em vigas de betão

O ensaio de flexão para a determinação da ruptura das vigas foi realizado segundo a recomendação da NP EN 12390-5. Os provetes utilizados para a execução do ensaio foram provetes prismáticos com $10 \times 10 \times 85 \text{ mm}^3$, sendo que o tipo de reforço a que foram sujeitos está descrito no Quadro 4.

Quadro 4 – Identificação das vigas ensaiadas

CFRP0	Viga de betão
CFRP1	Viga de betão com CFRP colado com resina epoxídica
CFRP2	Viga de betão reforçada com CFRP e argamassa geopolimérica (concentração de hidróxido de sódio 14; Teor de Cal (10%); Areia 30%)
CFRP3	Viga de betão reforçada com CFRP e argamassa geopolimérica (concentração de hidróxido de sódio 14; Teor de Cal (10%); Areia 60%)
CFRP4	Viga de betão reforçada com CFRP e argamassa geopolimérica (concentração de hidróxido de sódio 14; Teor de Cal (10%); Areia 90%)

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Resistência à flexão e à compressão

A Fig. 1 apresenta os resultados da resistência à flexão de acordo com a idade de cura, a concentração do hidróxido de sódio para várias razões mássicas areia/ligante. Os resultados obtidos revelam que estas argamassas apresentam uma elevada resistência à flexão ao fim de apenas 7 dias. Revelam também que a quantidade de areia utilizada é um factor determinante na resistência à flexão, contribuindo para minimizar as perdas de resistência a partir dos 7 dias de cura. Misturas com baixa quantidade de areia apresentaram-se fendilhadas à superfície, devido à retracção associada a fenómenos de rápida “hidratação” típica deste tipo de ligantes, o que poderá explicar as perdas de resistência observadas.

Outros autores (Torgal, 2007) também observaram perdas na resistência à flexão, referindo que se podem ficar a dever ao aparecimento de um excesso de precipitados de hidróxido de cálcio no produto final. Contudo estes utilizaram uma quantidade de areia bastante superior e não observaram qualquer fendilhação da superfície dos provetes.

Relativamente ao aumento da concentração do hidróxido de sódio os resultados não foram muito conclusivos, não levando como seria de esperar a um aumento substancial das resistências mecânicas por via de uma maior dissolução do metacaulino. O aumento da concentração de hidróxido de sódio levou sim a uma maior dificuldade no fabrico das argamassas geopoliméricas, que poderá contribuir para explicar os resultados observados.

A Fig. 2 apresenta os resultados da resistência à compressão de acordo com a idade de cura, a concentração do hidróxido de sódio para várias razões mássicas areia/ligante. Os resultados revelam uma elevada resistência mecânica ao fim de apenas 7 dias, a qual estabiliza a partir dessa data na maior parte das argamassas com algumas excepções. A explicação para a referida perda de resistência poderá ser aquela já referida anteriormente.

Novamente não se observa uma distinção nítida relativa à influência da concentração do hidróxido de sódio no aumento da resistência à compressão.

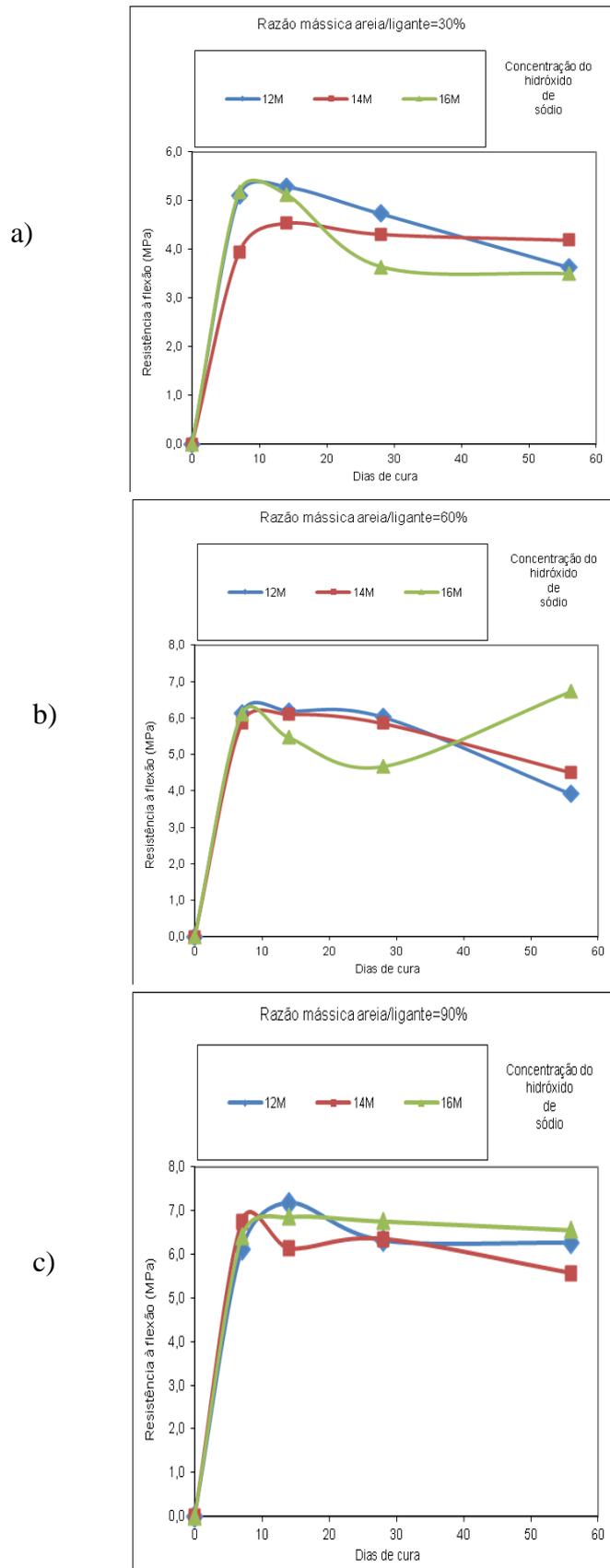
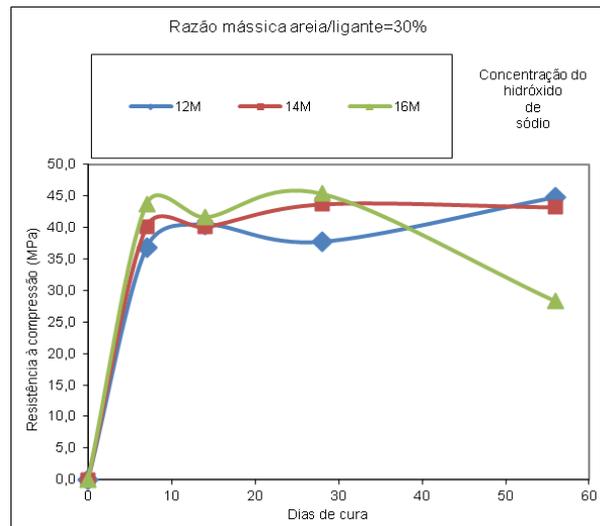
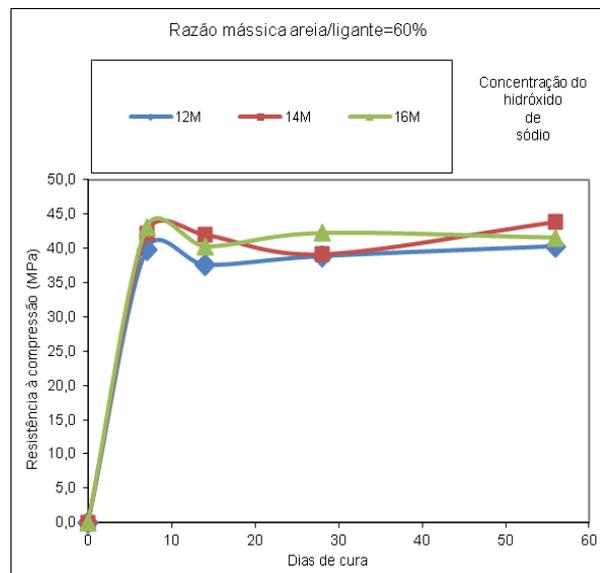


Figura 1 – Resultados da resistência à flexão de acordo com a idade de cura, a concentração do hidróxido de sódio para várias razões mássicas areia/ligante: a) 30%; b) 60%; 90%

a)



b)



c)

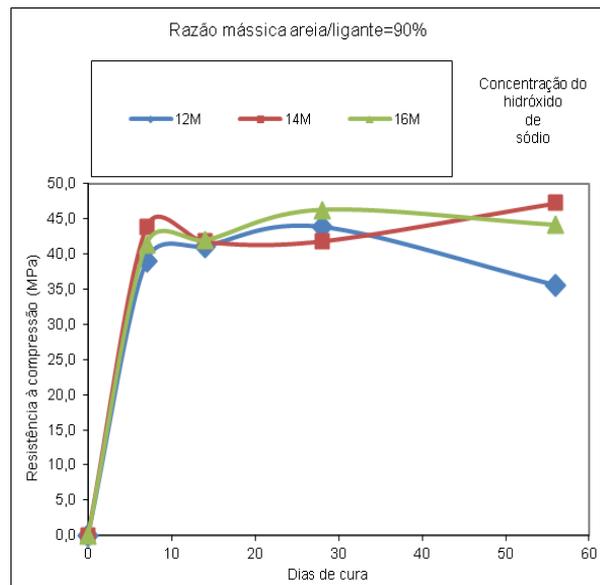


Figura 2 – Resultados da resistência à compressão de acordo com a idade de cura, a concentração do hidróxido de sódio para várias razões mássicas areia/ligante: a) 30%; b) 60%; 90%.

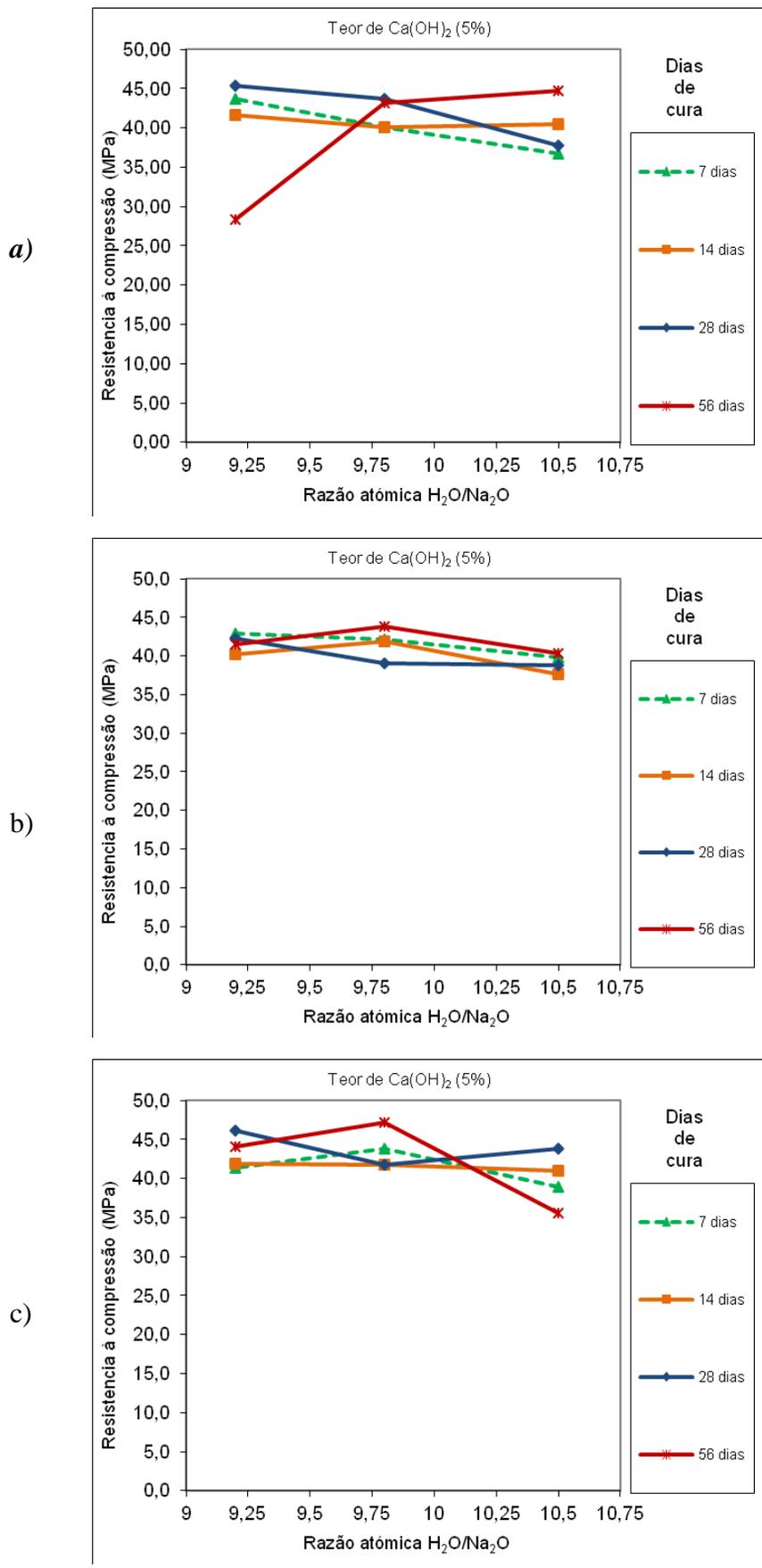


Figura 3 – Resistência à compressão vs razão atômica H₂O/Na₂O de acordo com a idade de cura, para várias razões mássicas areia/ligante: a) 30%; b) 60%; 90%

A Fig. 3 apresenta a resistência à compressão vs razão atômica H_2O/Na_2O de acordo com a idade de cura, uma adição de 5% de hidróxido de cálcio, para várias razões mássicas areia/ligante. Constanta-se a existência de uma relação moderada entre as duas variáveis, o que contrasta com a forte correlação obtida por outros autores (Torgal, 2007).

3.2 Pull-Off

Os resultados da aderência argamassa/CFRP obtidos no ensaio Pull-Off são apresentados na Fig.4.

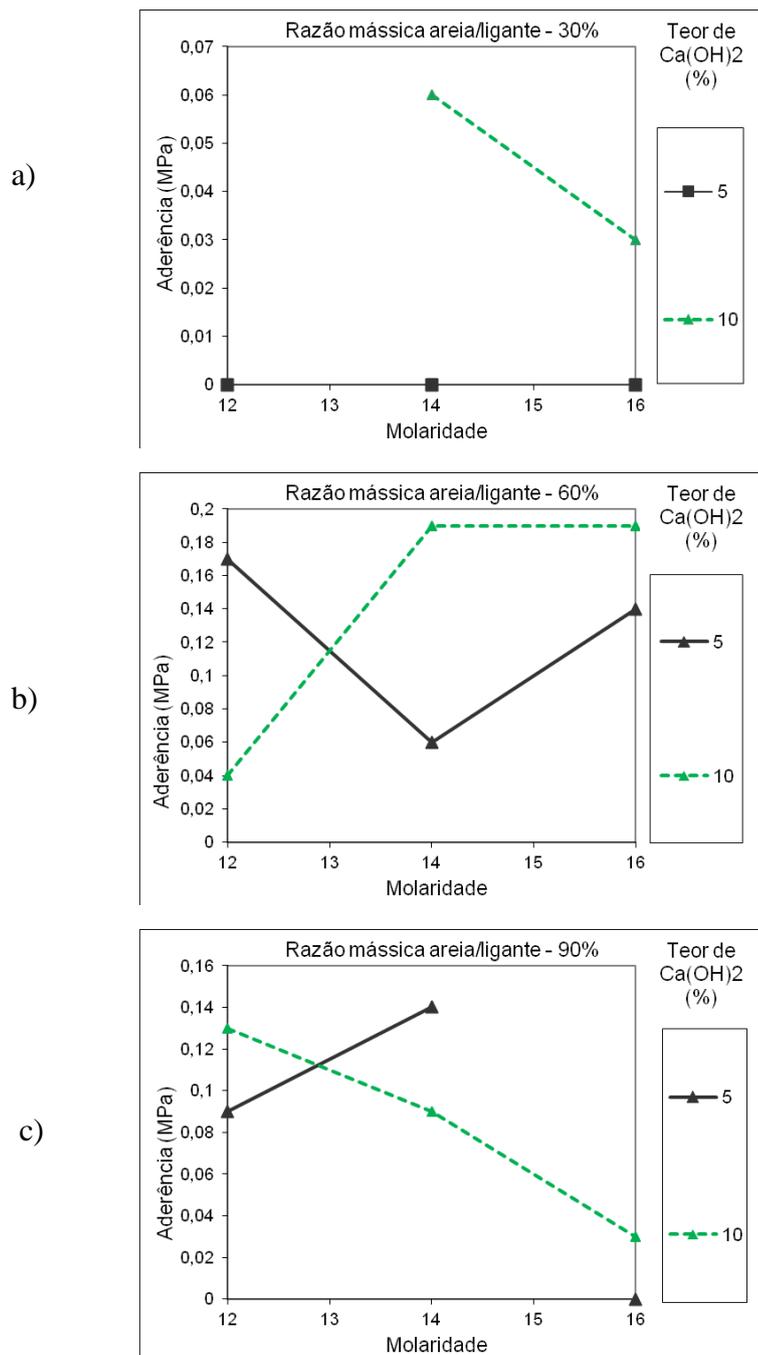


Figura 4 – Resultados da aderência argamassa/CFRP para dois teores de hidróxido de cálcio e várias razões mássicas areia/ligante: a) 30%; b) 60%; 90%

Os resultados obtidos revelam que a quantidade de areia é um parâmetro condicionador da aderência entre as argamassas e as faixas de CFRP, as misturas com uma razão mássica areia/ligante de apenas 30% e 5% de hidróxido de cálcio apresentam uma aderência nula, independentemente da concentração do hidróxido de sódio. O aumento da razão mássica areia/ligante contribui para uma melhor aderência.

O aumento da concentração de hidróxido de sódio contribuiu para uma ligeira melhoria da aderência nalguns casos, provocando efeito inverso para uma razão mássica areia/ligante de 90% e 10% de hidróxido de cálcio.

Regra geral os resultados são pouco interessantes e parecem significar que se torna necessário otimizar a composição da argamassa. Por outro lado importa também perceber se diferentes tipos de faixas CFRP terão maior aptidão para apresentar maior aderência a este tipo de argamassas.

3.3 Resistência à flexão em vigas de betão

No Quadro 4 são apresentados os resultados da resistência à flexão das vigas de betão, consoante o reforço utilizado.

Quadro 4 – Resultados do ensaio à flexão

	Valor à flexão (MPa)	Tipo de rotura
CFRP0	4,5	No betão, por flexão
CFRP1	15	No betão, por corte
CFRP2	6,1	Destacamento, CFRP/geopolímero
CFRP3	7	Destacamento, CFRP/geopolímero
CFRP4	6,9	Destacamento, CFRP/geopolímero

A viga de betão reforçada com CFRP e resina epoxídica foi a que apresentou o melhor desempenho. Nas vigas reforçadas com argamassas geopoliméricas e faixas de fibra de carbono, os resultados são muito similares entre si e são bastantes inferiores aos apresentados pela solução convencional.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que as argamassas geopoliméricas estudadas ainda não são indicadas para poderem substituir as resinas epoxídicas, o que se pode ficar a dever à baixa quantidade de agregados utilizado e à retracção daí decorrente.

Os resultados mostram que se torna necessário otimizar a composição das argamassas para evitar a retracção e também analisar outros tipos de faixas de FRP, à base de aramida ou fibra de vidro. Importa também analisar faixas com uma estrutura em malha, as quais permitam uma aderência da argamassa geopolimérica simultaneamente a estas e ao substrato de betão.

REFERÊNCIAS

Ferreira, R., Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono, Universidade do Minho, Guimarães (2001).

Fonseca, S., Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras usados na engenharia civil - características e aplicações, LNEC, Lisboa (2005).

Gamage, J.; Al-Mahaidi, R.; Wong, M., Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures, *Composite Structures*, Vol.75, 199–205 (2006).

Moura, M.; Morais, A.; Magalhães, A. , Materiais compósitos - materiais, fabrico e comportamento mecânico, Publindústria (2005).

Nanni, A., Fiber reinforced plastic (FRP) - reinforcement for concrete structures: properties and applications, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, Holanda (1993).

Pinto, A., Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino, Universidade do Minho, Guimarães (2004).

Torgal, F. P., Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das minas da Panasqueira, Universidade da Beira Interior, Covilhã (2007).

Torgal, F. Pacheco; Jalali, S., Ligantes obtidos por activação alcalina. ISBN 978-989-95961-4-6, Edição TecMinho, 157 pg., Guimarães, Portugal (2009).

Torgal, F. Pacheco; Jalali, S., A sustentabilidade dos materiais de construção, ISBN 978-972-8600-22-8, Edição TecMinho, 400 pg., Guimarães, Portugal (2010).

Zhang, M., Shim, V., Lu, G., Chew, C., Resistance of high-strength concrete to projectile impact, National University of Singapore, Singapore (2005).