

Argamassas Obtidas Através da Activação Alcalina de Lamas Residuais de Minas. Eficiência Técnico-Económica na Reparação de Elementos de Betão.



Fernando Pacheco Torgal
EST-IPCB
Portugal
fernandotorgal@est.ipcb.pt



J.P. de Castro Gomes
Univ. da Beira Interior
Portugal
castro.gomes@ubi.pt



Said Jalali
Universidade do Minho
Portugal
said@civil.uminho.pt

Resumo: O presente artigo descreve resultados de uma investigação, sobre o uso de uma argamassa obtida por activação alcalina de lamas residuais de minas (AALRM), para reparar estruturas de betão. A aderência entre betões correntes e argamassas activadas alcalinamente foi avaliada através do ensaio de “slant shear”. Os resultados obtidos, indicam que as argamassas AALRM possuem uma elevada aderência a betões correntes, sendo essa aderência pouco influenciada pela rugosidade da superfície do betão a reparar. As argamassas comerciais, apresentam uma aderência que é dependente da idade de cura e da rugosidade da superfície de betão. As argamassas AALRM, apresentam um custo inferior ao das argamassas comerciais correntes.

Palavras-chave: lamas residuais, activação alcalina, ligantes AALRM, aderência.

1. INTRODUÇÃO

Em termos históricos os ligantes que estiveram na base do desenvolvimento dos actuais ligantes geopoliméricos, foram ligantes à base de escórias de alto forno com elevadas percentagens de óxido de cálcio, obtidos por activação com soluções alcalinas de baixa ou média concentração, e objecto de intensas análises por parte de investigadores do Leste da Europa e da Escandinávia [1]. Em 1978 Joseph Davidovits introduziu o termo “geopolímero”, para caracterizar um novo tipo de materiais ligantes, obtidos a partir da activação de aluminossilicatos com soluções alcáli-silicatadas e com capacidade para evidenciarem um processo de polimerização e endurecerem a baixas temperaturas como polímeros, diferindo dos cimentos alcalinos estudados até essa altura por não conterem óxido de cálcio. Aquele investigador descreve várias vantagens dos ligantes geopoliméricos sobre o cimento Portland, principalmente de cariz ambiental, devido ao

facto de apresentarem uma vida útil muito superior, terem capacidade para encapsularem resíduos tóxicos mas principalmente pelo facto de apresentarem um nível de emissões de carbono, quase 7 vezes inferior ao do cimento Portland [2,3]. Os ligantes geopoliméricos podem utilizar como matéria prima qualquer material inorgânico constituído por sílica e alumina e que tenha sido sujeito a um tratamento térmico, que torne o material amorfo (mais reactivo), como as cinzas, escórias ou resíduos de minas e pedreiras.

Investigações recentes mostram que a partir da activação das lamas residuais das Minas da Panasqueira é possível sintetizar um ligante de características geopoliméricas [4], no entanto e atendendo a que actualmente não existe qualquer benefício económico para a utilização de resíduos minerais, constata-se que o fabrico de ligantes geopolimérico com lamas residuais apresenta um custo superior aos dos ligantes tradicionais, o que se fica a dever ao custo relativamente elevado das soluções alcalinas de activação à base de hidróxidos e silicatos. É no entanto expectável que a longo prazo esta situação se possa inverter, muito por força do aumento do custo dos ligantes tradicionais devido à contabilização do custo de emissões de carbono [5]. Dessa forma e a curto prazo a utilização de ligantes do tipo geopolimérico passará necessariamente por aplicações alternativas a materiais de elevado custo como sejam os produtos de reparação de estruturas de betões correntes.

A aderência entre o material de reparação e o betão da estrutura a reparar é uma das mais importantes propriedades dos materiais de reparação. Esta propriedade depende não só das características do material de reparação, mas também da rugosidade da superfície do betão do substrato. Para quantificar o nível de aderência tem sido utilizados vários ensaios, como o ensaio de “pull-off”, o ensaio de compressão, de flexão ou o ensaio de “slant shear”, os quais são influenciados quer pelo material de reparação quer pelo estado de tensão na superfície de reparação [8]. O ensaio “slant shear” tem mostrado ser um ensaio significativo, sendo um ensaio económico, sensível à rugosidade da superfície de ligação e apresentando uma boa correlação com o ensaio de pull-off [9].

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

2.1.1 Betão do substrato

Usando o método das curvas de referência de Faury foi feito o estudo da composição de um betão da classe de resistência C30/37. Na Tabela 1 são apresentados elementos relativos ao betão do substrato, quer em termos da sua composição como das suas propriedades mecânicas. Os provetes de betão foram curados em água durante 3 meses, pois este período de cura leva a um processo de hidratação quase completo à semelhança do que acontece em betões já com alguma idade, como referem alguns autores [10].

Tabela 2 – Características do betão do substrato

Componentes	C30/37
Cimento II 32,5 (Kg/m ³)	504
Areia	417
Agregados	1154
Razão A/C	0,43
f _{c28d} ^a (MPa)	37,8

^aValor médio para 3 provetes com (150×150×150mm³)

2.1.2 Argamassas comerciais para reparação de betão

Foram utilizados duas argamassas comerciais correntemente utilizados para reparação de estruturas de betão, aqui genericamente designados somente por R1 e R2. Estes produtos, são fornecidos como misturas pré-preparadas de areia fina ($D_{máx}=2\text{mm}$), cimento, sílica de fumo e outros aditivos bastando misturar água, sendo a densidade do material fresco de 2100 Kg/ m^3 . As suas características mecânicas, fornecidas pelo fabricante, são as seguintes:

Argamassa R1 - $f_{c_{28d}} = 45\text{MPa}$, $f_{t_{28d}} = 9\text{Mpa}$

Argamassa R2 - $f_{c_{28d}} = 49\text{MPa}$, $f_{t_{7d}} = 6\text{Mpa}$, $f_{t_{28d}} = 8\text{Mpa}$

2.1.3 Argamassas comerciais para reparação de betão

A argamassa geopolimérica AALRM utilizada no presente trabalho como material de reparação, foi obtida a partir da activação de lamas residuais das Minas da Panasqueira. Em termos mineralógicos as lamas são constituídas por moscovite e quartzo. As lamas foram submetidas previamente a um tratamento térmico com uma temperatura de $950 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 2 horas, a fim de se conseguir aumentar a sua reactividade por desidroxilação. O ligante AALRM é constituído por uma mistura de agregados, lamas, hidróxido de cálcio, activador alcalino e água. Os agregados foram os mesmos já descritos para a execução do betão do substrato. A razão mássica entre agregados, lamas e activador alcalino é 1,5:1:1. O hidróxido de cálcio é utilizado numa percentagem de 10%, devido ao facto de investigações sobre a influência da composição deste tipo de ligante na resistência aos 7 dias, terem revelado que esta percentagem conduz à optimização da resistência à compressão [11]. O activador alcalino é constituído por hidróxido de sódio com uma concentração de (24M) e silicato de sódio ($\text{Na}_2\text{O}=8,6\%$, $\text{SiO}_2=27,8\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=0,4\%$ e água=63,2%), sendo utilizados numa proporção mássica de 1:2,5. A execução do activador alcalino inicia-se com a operação de dissolução do hidróxido de sódio em palhetas, tendo-se utilizado água destilada para evitar o efeito de contaminantes desconhecidos da água da rede. 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. Os agregados, as lamas e o hidróxido de cálcio são misturados á parte antes da adição do activador alcalino, pelo facto desta ordem de mistura dos componentes se ter revelado como a mais adequada. Para a obtenção de uma mistura com alguma trabalhabilidade, utilizou-se água extra, água que é adicionada à mistura, após todos os componentes já estarem misturados. A razão mássica água/sólidos foi de 4%. O desempenho mecânico desta mistura em termos de resistência à compressão e à flexão é o seguinte:

$f_{c_{1d}} = 47\text{MPa}$, $f_{c_{7d}} = 60,3\text{MPa}$, $f_{c_{28d}} = 78,3\text{MPa}$

$f_{t_{1d}} = 7\text{MPa}$, $f_{t_{7d}} = 11,5\text{MPa}$, $f_{t_{28d}} = 10,7\text{MPa}$

2.2 Ensaio de “slant shear”

A quantificação da aderência entre o betão do substrato e as argamassas de reparação, foi levada a cabo através da análise da resistência ao corte no ensaio “slant shear”. O ensaio utiliza provetes prismáticos, compostos por duas metades, uma de betão e outra de material de reparação, sendo submetidas a um esforço de compressão. A dimensão dos

provetes é de $50 \times 50 \times 125 \text{ mm}^3$, com uma superfície de ligação fazendo um ângulo de 30° com a vertical (Figura 3).

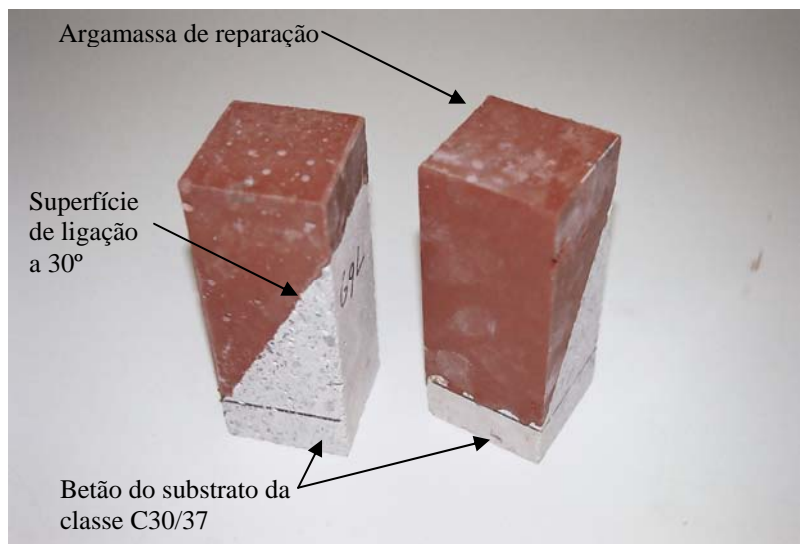


Figura 1 – Provetes utilizados no ensaio slant shear

A resistência ao corte foi calculada, dividindo a carga máxima de rotura pela área da superfície de ligação e foi obtida da média do ensaio de 4 provetes para cada idade de cura. Os provetes foram ensaiados para as idades de cura de 1, 3, 7 e 28 dias. Com o objectivo de se aumentar a superfície específica do betão do substrato, algumas superfícies do betão do substrato, foram tratadas com uma solução ácida. A superfície dessas metades de betão foi imersa numa fina lâmina líquida, com 5% de ácido clorídrico durante 5 minutos, sendo posteriormente lavadas para assegurar a remoção do CaCl_2 resultante da reacção entre o ácido HCl e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, presente na superfície do betão do substrato. De acordo com alguns investigadores este procedimento conduz a um aumento da micro-rugosidade do betão [12].

Os provetes aparecem referenciados ao material de reparação utilizado e ao acabamento da superfície de ligação. Os provetes reparados com ligantes AALRM aparecem designados por GP, enquanto os reparados com os produtos comerciais aparecem designados por R1 e R2. Os diferentes tipos de superfície do betão do substrato, aparecem referenciados com as seguintes designações:

NTS – Superfície serrada sem tratamento

ES – Superfície serrada sujeita a tratamento químico

MF – Superfície betonada sobre cofragem metálica

WF - Superfície betonada sobre cofragem de madeira de pinho

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os resultados da resistência ao corte para as diversas soluções de reparação. Pode constatar-se que os valores da resistência ao corte por aderência nos provetes reparados com ligantes AALRM, apresentam altas resistências logo a partir do primeiro dia, apresentando nessa idade uma resistência superior aos

provetes reparados com produtos comerciais ensaiados aos 28 dias. São ainda, bastante superiores ao valor mínimo recomendado para a resistência à adesão pela Concrete

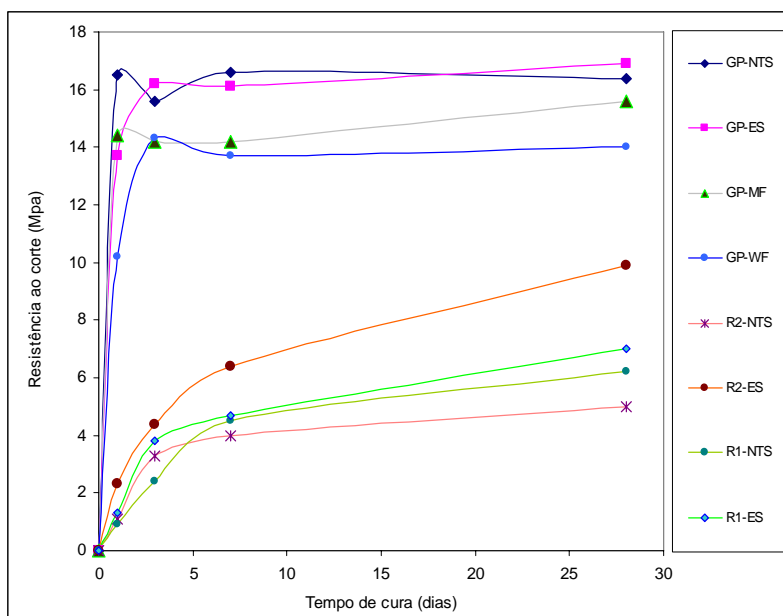


Figura 2 – Resistência ao corte no ensaio “slant shear”

Society [13] de 0,8MPa no ensaio de (pull-off test), valor que corresponde a aproximadamente 5MPa no ensaio de “slant shear” de acordo com a correlação obtida por Júlio et al. [9].

A resistência ao corte nos provetes reparados com ligantes AALRM não é influenciada pelo tratamento químico da superfície serrada do betão do substrato, pois os resultados são idênticos para a superfície serrada com e sem tratamento químico, mas sim pelo uso de provetes de substrato com superfícies betonadas contra cofragem. Nestes dois casos a resistência diminui ligeiramente. A justificação para este comportamento tem que ver com o facto deste tipo de superfície ser composta essencialmente por hidróxido de cálcio, sem agregados expostos, cuja dissolução permite um aumento da resistência da ligação entre os materiais como acontece nos provetes de betão serrados. Estes resultados confirmam investigações relacionadas com a influência dos agregados [14]. O desempenho em termos de aderência dos provetes reparados com produtos de reparação comerciais é muito dependente do tempo de cura, pelo que isso constitui um obstáculo quando se pretendem altas aderência iniciais. Os resultados mostram que a utilização do produto R2 é claramente influenciada pelo tipo de tratamento da superfície do betão do substrato, evidenciando um ganho de resistência muito substancial (quase o dobro) relativamente à adesão sobre superfície serrada. Por seu lado o produto R1, apresenta em superfícies sem tratamento um valor de aderência superior ao produto R2, contudo o nível de aderência pouco cresce com o aumento da rugosidade da superfície. Porque sendo uma rugosidade quase microscópica, deverá influenciar de forma pouco significativa a capacidade adesiva deste produto, porquanto deve só ser utilizado em superfícies de elevada rugosidade,

sujeitas aos tratamentos de superfícies convencionais, com escova de aço ou a jacto de areia.

4. ANÁLISE ECONÓMICA

Com o objectivo de analisar a eficiência económica das diversas soluções de reparação, comparam-se na Figura 3 os rácios custo/resistência ao corte para as diversas soluções. A solução envolvendo o produto comercial mais barato é 13,8 vezes mais cara que a solução com ligantes AALRM, o que é indicativo da capacidade concorrencial evidenciada por este tipo de ligantes.

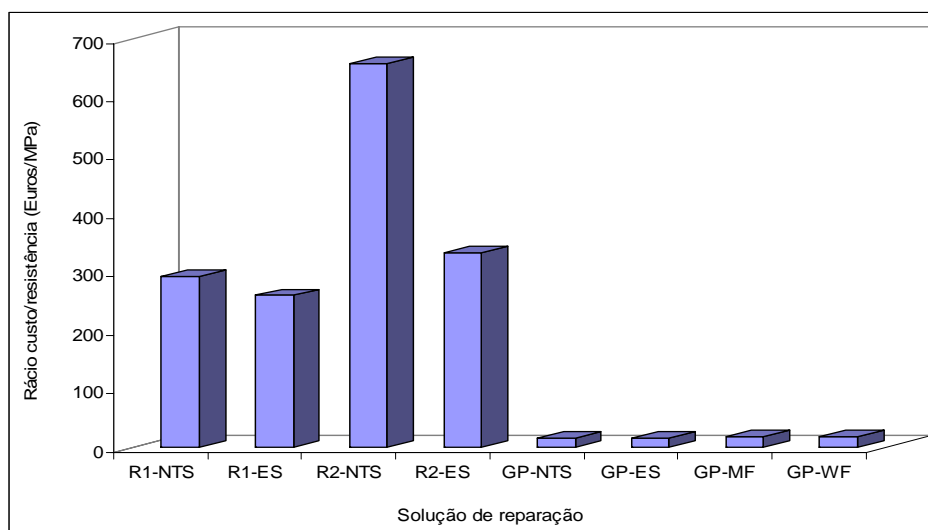


Figura 3 – Rácio custo/resistência ao corte para as diversas soluções de reparação

5. CONCLUSÕES

Os ligantes AALRM apresentam uma elevada aderência aos betões correntes, logo a partir do primeiro dia de cura, não estando dependentes da rugosidade da superfície. Já os produtos comerciais usualmente utilizados na reparação de betão, revelaram que a sua aplicabilidade se restringe a superfícies com um determinado nível de rugosidade, além do que o seu desempenho é bastante influenciado pelo tempo de cura. Não sendo por isso adequados a situações em que se exige um elevado nível de aderência logo a seguir á operação de reparação. Além das vantagens mecânicas, os ligantes AALRM, caracterizam-se ainda por apresentarem um custo bastante mais baixo do que o dos produtos comerciais.

4. REFERÊNCIAS

[1] Roy, Della M. ; *Alkali – activated cements. Opportunities and challenges*. Cement and Concrete Research 29 (1999) 249-254.

- [2] Davidovits, J. *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials*. Journal of Thermal Analysis 37 (1991) 1633-1656.
- [3] Davidovits, J. *Chemistry of geopolymeric systems, Terminology*. Proceedings of Geopolymer 1999 International Conference. France
- [4] Torgal, F. M. Alves S. P.; Castro Gomes, J. P.; Jalali, Said. *Geopolymeric Binder Using Tungsten Mine Waste: Preliminary Investigation*. In Proceedings of Geopolymer 2005 World Congress, pp.93-98. S. Quentin, France
- [5] Torgal, F. M. Alves S. P.; Castro Gomes, J. P.; Jalali, Said. *Cimento Portland versus ligantes geopoliméricos: Considerações económicas sobre as implicações do mercado de carbono no custo dos betões*. Engenharias 2005. Universidade da Beira Interior. Covilhã.
- [8] Momayez, A.; Ehsani, M.; Ramezani pour, A. A.; Rajaie, H. *Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials*. Cement and Concrete Research 35 (2005) 748-757
- [9] Julio, E.N.B.S.; Branco, F.A B.; Silva, V.D. *Concrete to concrete bond strength. Influence of the roughness of substrate surface*. Construction and Building materials 18 (2004) 675-681
- [10] Hassan, K.E.; Brooks, J.J., Al-Alawi, L. *Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment*. Cement & Concrete Composites 23 (2001) 93-101
- [11] Torgal, F. M. Alves S. P.; Castro Gomes, J. P.; Jalali, Said. *Effect of mixture composition on the early age strength of alkali-activated mine waste mud mortars*. Construction and Building Materials. Elsevier Science Ltd (in press)
- [12] Xiong, G.; Cui, Y.; Chen, Liqiang; Jiang, H. *Influence of hydrochloric acid etching on bond strength between concrete substrate and repair materials*. Cement & Concrete Composites 26 (2004) 41-45
- [13] Concrete Society. *Patch repair of reinforced concrete. Model specification and method of measurement*. Concrete Society Technical Report nº 38 (1991)
- [14] F. Pacheco-Torgal, J. P. Castro-Gomes, S. Jalali. *Effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders*. Cement and Concrete Research. (in press)