

COMPORTAMENTO AO CORTE DE UM REJEITADO MINEIRO ESTABILIZADO ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE CINZAS VOLANTES ATIVADAS ALCALINAMENTE

SHEAR BEHAVIOR OF A MINE TAILING STABILIZED THROUGH THE ADDITION OF ALKALINE ACTIVATED FLY ASH

Manaviparast, Hamid, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, id8028@alunos.uminho.pt
Pinheiro, João, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, pg47315@alunos.uminho.pt
Najafi, Elmira, Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, Departamento de Engenharia, Vila Real, Portugal, e.khaksar@utad.pt
Abreu, Cláudia, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal, claudiaa8698@gmail.com
Araújo, Nuno, Universidade do Minho, Guimarães, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, nuno@civil.uminho.pt
Cristelo, Nuno, Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, Escola da Ciência e Tecnologia, Vila Real, Portugal, ncristel@utad.pt
Miranda, Tiago, Universidade do Minho, IRISE, ARISE, Guimarães, Portugal, tmiranda@civil.uminho.pt

RESUMO

A atividade mineira é fundamental para a economia de muitos países. No entanto, a exploração destes recursos naturais causa impactos negativos significativos no ambiente em parte devido à grande quantidade de rejeitados produzidos. Para a sua deposição estes rejeitados são frequentemente misturados com cimento Portland de modo a melhorar as suas propriedades mecânicas e controlar a sua toxicidade. Contudo, a produção de cimento Portland está, também ela, associada a elevados impactos ambientais, por isso é também importante o desenvolvimento de ligantes que possam substituir o cimento Portland. Neste estudo é analisada a estabilização de um rejeitado mineiro proveniente da mina Neves Corvo através da adição de um ligante sustentável com base na ativação alcalina de cinzas volantes. Para isso foram realizados ensaios triaxiais de modo a avaliar as diferenças no comportamento ao corte do rejeitado mineiro natural e estabilizado. Este estudo demonstrou que a estabilização do rejeitado mineiro com a adição de cinzas volantes ativadas alcalinamente conduz a melhorias significativas na resistência ao corte mesmo para reduzidas idades de cura e poderá ser uma alternativa ao uso de cimento Portland.

ABSTRACT

Mining is a key sector for the economy of many countries. However, the exploitation of these natural resources causes significant negative environmental impacts in part due to the large amount of produced tailings. For their disposal, these tailings are often mixed with Portland cement to improve their mechanical properties and control their toxicity. However, the production of Portland cement is also associated with high environmental impacts, so it is important to develop binders that can replace Portland cement. This study addresses the application of a sustainable binder based on the alkaline activation of fly ash to stabilize a mine tailing from Neves Corvo mine. Triaxial tests were performed

to obtain the differences on the shear behaviour of natural and stabilized mining tailings. This study showed that the stabilization of mining tailings with the addition of alkaline activated fly ash leads to significant improvements in the shear strength even for short curing ages and could be an alternative to the use of Portland cement.

1. INTRODUÇÃO

A indústria mineira produz entre 5 a 7 mil milhões de toneladas de rejeitados globalmente todos os anos (Marín et al., 2022). Os rejeitados mineiros podem prejudicar os ecossistemas devido à sua composição química, mineralógica e propriedades físicas (Almeida et al., 2020; Song et al., 2017) e são normalmente ácidas, especialmente os derivados de metais como o cobre e o zinco. Quando são colocados em aterros sanitários, os elementos tóxicos podem ser lixiviados criando potenciais riscos de poluição para o ambiente. Assim, é essencial desenvolver soluções para reduzir o volume de resíduos mineiros produzidos que são conduzidos para aterros (Perumal et al., 2020). Para além disso, a deposição de rejeitados em aterros implica a necessidade de melhorar as suas características mecânicas, o que é realizado através da adição de cimento Portland. No entanto, o impacto ambiental da produção de cimento Portland é muito significativo e, por isso, têm vindo a ser exploradas alternativas baseadas na ativação alcalina de resíduos.

A ativação alcalina (AA), também denominada como geopolimerização, é uma reação química produzida por uma solução aquosa, na qual se misturam um precursor sólido rico em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e um ativador com alto pH, baseado em sódio (Na) ou potássio (K) (Abreu, 2021). Os ligantes obtidos pela AA são mais sustentáveis e reduzem a quantidade de CO_2 emitida, como no caso da utilização de cinzas volantes (CV) como precursor que pode permitir uma redução de até 45% nas emissões de CO_2 em relação ao cimento Portland (Provis et al., 2015). Normalmente, qualquer material que contenha uma determinada quantidade de sílica e alumina é um potencial precursor a ser utilizado na AA (Khalifa et al., 2019). Sendo as CV maioritariamente compostas por sílica e alumina no estado amorfo, torna-as suscetíveis à reação de ativação alcalina juntamente com ativadores baseados em sódio e potássio (Cristelo et al., 2011). A AA aplicada em rejeitados mineiros tem demonstrado eficiência na imobilização de metais tóxicos (Rao e Liu, 2015), contudo este processo de geopolimerização só é eficiente quando ao rejeitado mineiro é adicionado um precursor rico em sílica e alumina de modo a aumentar as reações e melhorar as propriedades do geopolímero sintetizado (Akinymi et al., 2022; Pacheco-Torgal et al., 2008; Xiaolong et al., 2021). AA utilizando CV da classe F como precursor e hidróxido de sódio como ativador apresentou já resultados interessantes em aplicações anteriores como por exemplo no melhoramento de solos e será a abordagem adotada no presente trabalho (Cristelo et al., 2013).

Este estudo teve como principal foco a avaliação da melhoria da resistência ao corte de um rejeitado mineiro após a sua estabilização através da mistura deste material com um ligante baseado na AA de cinzas volantes. Esta avaliação foi realizada através de ensaios triaxiais para um período curto de cura (7 dias).

2. MATERIAIS

O rejeitado mineiro (RM) utilizado neste estudo foi proveniente da mina Neves Corvo (Figura 1), localizada na zona sul de Portugal, cedido pela empresa Somincor. Foram realizados vários testes de caracterização ao RM e os seus resultados encontram-se resumidos na Tabela 1. Grande parte do RM apresenta dimensões de um silte. A

classificação do rejeitado foi realizada segundo a classificação unificada revista ASTM (2006) tendo sido classificado como uma argila magra – CL.



Figura 1- Rejeitado Mineiro

Tabela 1- Ensaios de caracterização

Parâmetro	Ensaio	Resultado
Limite liquidez (ω_l)	IGPAI (1969) (Casagrande)	23%
Limite plasticidade (ω_p)	IGPAI (1969)	12%
Índice de plasticidade (I_p)	-	11%
Densidade das partículas sólidas (G)	IGPAI (1965)	3.51
Proctor modificado	LNEC (1966b)	Teor ótimo em água (ω_{opt}) = 11% e Densidade máxima seca ($\rho_{d,max}$) = 2.29 g/cm ³
Proctor normal	LNEC (1966b)	ω_{opt} = 14.9% e $\rho_{d,max}$ = 2.14 g/cm ³
CBR	LNEC (1967)	19% e 5%*
Permeabilidade	BS 1377-5 (1990) standard	10 ⁻⁹ m/s
Granulometria	LNEC (1966a)	Areia (12%), silte (74.2%) e argila (13.8%)

* Valores antes e após saturação do provete, respetivamente

As CV utilizadas como precursor no processo de ativação alcalina foram provenientes da central termoelétrica do Pego e são classificadas como classe F. Esta central deixou de operar pelo que, no futuro, terão de se estudar precursores alternativos. No entanto, as cinzas volantes são um dos precursores mais comuns na produção de cimentos ativados alcalinamente e são uma boa base de trabalho para avaliação da viabilidade da aplicação desta abordagem em contextos ainda não anteriormente testados. O ativador foi o hidróxido de sódio (NaOH), sendo adquirido no estado sólido, sob a forma de grãos, com um grau de pureza de 99%.

3. ENSAIOS TRIAXIAIS NO REJEITADO NATURAL

3.1. Preparação dos provetes e programa de ensaios

Os provetes não estabilizados foram construídos usando um consolidómetro com uma densidade seca de 2.14 g/cm³ e 30% de teor em água inicial para garantir a saturação

da mistura e a ausência de pré-consolidação. A mistura foi colocada no interior de um tubo cilíndrico em PVC, com 68 mm de diâmetro e 195 mm de altura. Após o preenchimento completo do molde, este foi colocado num recipiente plástico cheio de água, de modo a manter o processo de saturação do provete durante o processo de consolidação. Ao fim de 3 a 4 dias, o provete estava estabilizado e era removido do molde e colocado na câmara triaxial.

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados de modo a determinar os parâmetros de resistência ao corte do rejeitado mineiro e foram realizados segundo a norma BS 1377-7 (1990).

Foram realizados três ensaios normalmente consolidados (NC) com tensões de confinamento de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa e um sobreconsolidado (OC) com grau de sobreconsolidação de 3.5 e tensão de confinamento de 200 kPa. A fase de corte foi realizada em condições não drenadas com medições da pressão intersticial (Δu) (CU). Estes ensaios triaxiais permitiram determinar os parâmetros de resistência ao corte em termos de tensões totais (i.e., c e ϕ) e efetivas (i.e., c' e ϕ'). Esta fase foi realizada aplicando ciclos de carga e descarga, para valores de extensão axial (ϵ_a) de 0.2%, 0.5%, 2% e 5%.

3.2. Análise dos resultados

A evolução da tensão de desvio (q) com a extensão axial (ϵ_a) está representada na Figura 3. Como esperado o aumento da tensão de confinamento originou um aumento dos valores de q . Para tensões de confinamento de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa o rejeitado mineiro revelou um comportamento típico de um solo NC, não apresentando tensões de desvio de pico. O provete com um grau de sobreconsolidação de 3.5 demonstrou um comportamento mais típico de um material OC, mostrando uma tensão de desvio de pico ($\epsilon_a = 6.9\%$) e uma tensão de desvio residual, bastante superiores às do provete NC ensaiado para a mesma tensão de confinamento. A sobreconsolidação provoca um arranjo das partículas mais estável, que conseqüentemente provoca uma diminuição do índice de vazios e respetivo aumento da resistência ao corte. A evolução da pressão intersticial (Δu) com a ϵ_a está representada na Figura 3, na qual se verifica uma tendência contratante dos provetes NC, tendo uma evolução positiva da pressão intersticial ao longo de toda a fase de corte. O provete OC com $\sigma_3 = 200$ kPa apresenta um comportamento bastante distinto do provete NC ensaiado para a mesma tensão de confinamento, com a curva de evolução de pressão intersticial a situar-se abaixo da curva do provete NC. Os picos observados ao longo das curvas devem-se aos ciclos de carga e descarga que foram realizados.

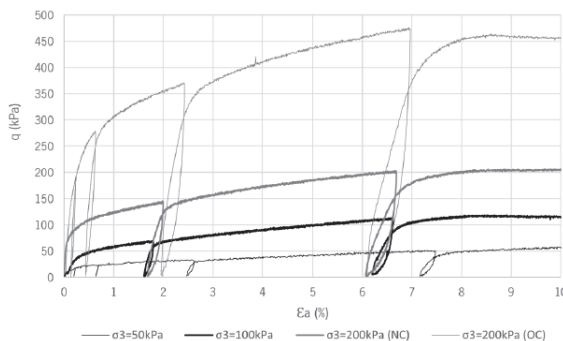


Figura 3- Evolução da tensão de desvio com a extensão axial ($\epsilon_a \times q$)

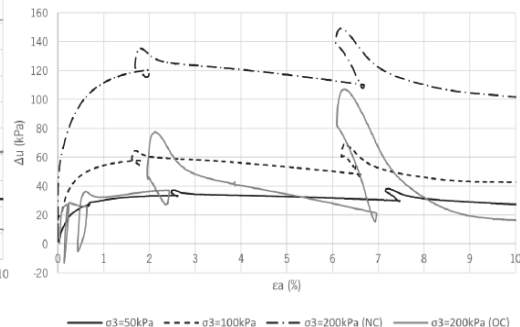


Figura 2 - Evolução da pressão intersticial com a extensão axial ($\epsilon_a \times \Delta u$)

O gráfico da trajetória de tensões totais e efetivas está representado na Figura 4. Observa-se que para os provetes NC, em termos de tensões efetivas, a trajetória move-se para a esquerda. Por outro lado, o provete sobreconsolidado resultou numa trajetória de tensões efetivas com curvatura a tender para a direita, típico de um material sobreconsolidado. A partir destas trajetórias de tensões traçaram-se as envolventes de rotura do rejeitado mineiro, em termos de tensões totais e efetivas. Os parâmetros de resistência ao corte dos provetes reconstituídos foram obtidos com base nas tensões de desvio residuais e são apresentados na Tabela 2.

Tensões totais		Tensões efetivas	
c	Φ	c'	Φ'
0	27°	0	31°

4. ENSAIOS TRIAXIAIS NO REJEITADO MINEIRO ESTABILIZADO

4.1. Escolha da mistura e programa de ensaios

Para o ligante alcalino utilizou-se uma razão ativador/cinzas volantes de 0.4 e concentração de NaOH de 10 molal já que estes valores mostraram ser eficazes em estudos anteriores (Fernández-Jiménez et al., 2017). Numa primeira fase foram realizadas três misturas (Tabela 3) variando apenas a quantidade de rejeitado utilizada em cada mistura e avaliada a sua resistência à compressão uniaxial.

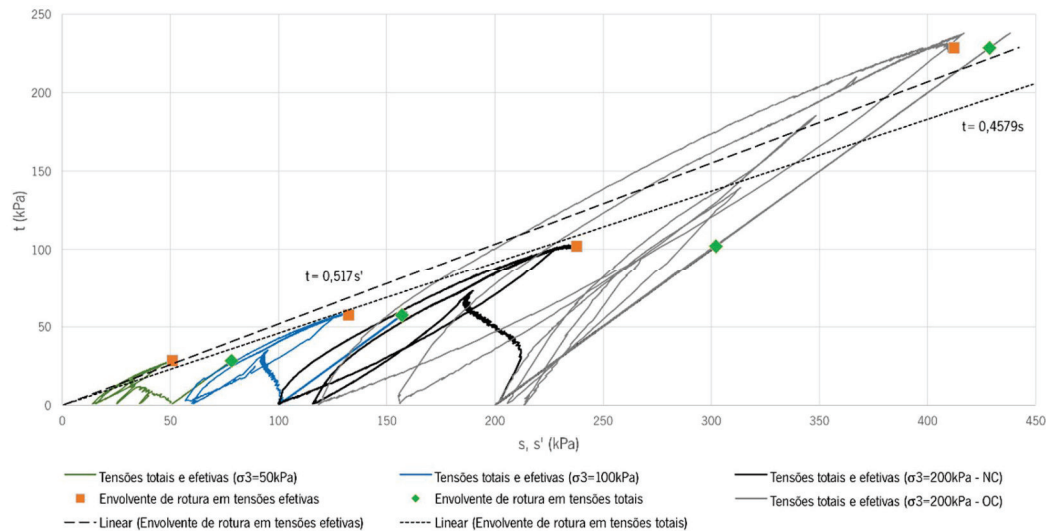


Figura 4 – Trajetórias de tensões e envolventes de rotura do rejeitado

Tabela 3 - Composição das misturas estudadas

	CV (g)	RM (g)	Ativador (g)	Água (g)	NaOH (g)
M1	500	500	200	142.9	57.1
M2	500	400	200	142.9	57.1
M3	500	600	200	142.9	57.1

Os ensaios à compressão uniaxial foram realizados segundo a norma BS (1990). Foram preparados três provetes para cada uma das misturas ensaiadas para um tempo de cura de 7 dias. Todos os ensaios foram realizados no mesmo dia, e obtiveram-se para as misturas M1, M2 e M3, resistências à compressão médias de 529.9 kPa, 385.4 kPa e 874.6 kPa, respetivamente. Assim, decidiu adotar-se a formulação M3 para os ensaios triaxiais de RM estabilizado.

Os ensaios triaxiais efetuados para os provetes de rejeitado reconstituído foram iguais aos realizados nos provetes não estabilizados, nomeadamente para tensões de confinamento de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, e um sobreconsolidado com grau de sobreconsolidação de 3.5 e tensão de confinamento de 200 kPa. Os provetes foram ensaiados ao fim de 7 dias de cura.

4.2. Análise dos resultados

As curvas $\varepsilon_a \times q$ para os provetes de rejeitado mineiro estabilizado são apresentadas na Figura 5. Verifica-se, como esperado, que o aumento da tensão de confinamento resultou num aumento dos valores de q e que, também nos provetes estabilizados, a sobreconsolidação inicial do provete tem um efeito significativo no aumento da resistência do material. Tendo em conta os valores de q obtidos para os provetes reconstituídos e estabilizados para as mesmas tensões de confinamento verificou-se que os segundos obtiveram resistências consideravelmente superiores, evidenciando os efeitos do mecanismo de geopolimerização na resistência mecânica do rejeitado mineiro. Todos os provetes revelaram uma tensão de desvio de pico e uma tensão de desvio residual com exceção do provete submetido a uma tensão de confinamento de 200 kPa (NC), cujo ensaio foi interrompido com um nível de extensão axial de 4.5%, devido a uma quebra pontual no abastecimento elétrico no laboratório.

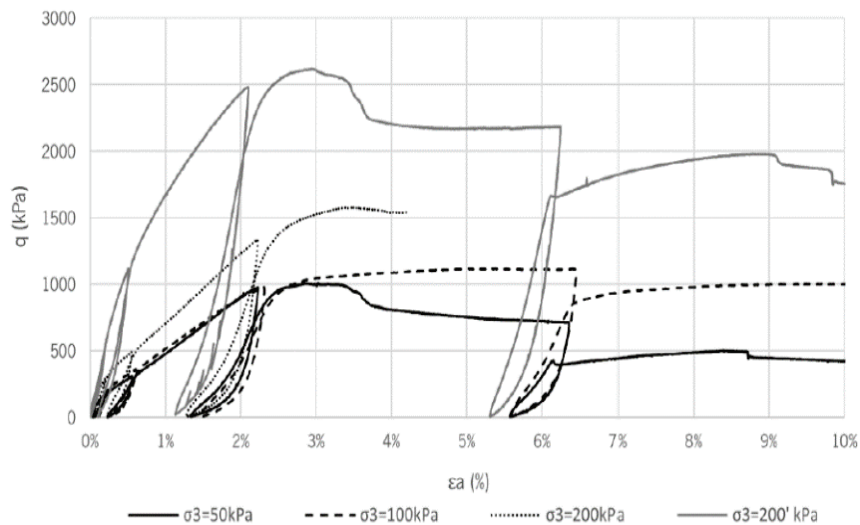


Figura 5 - Evolução da tensão de desvio com a extensão axial ($\varepsilon_a \times q$) (provetes estabilizados)

As curvas $\varepsilon_a \times \Delta u$ para os provetes de resíduo estabilizado estão representadas na Figura 6. Observa-se que todos os provetes revelaram um comportamento típico de material sobreconsolidado, apresentando uma tendência contratante ($\Delta u > 0$) durante uma primeira fase do ensaio, e uma tendência dilatante ($\Delta u < 0$) durante o resto do ensaio. Este comportamento indica que os provetes manifestam um excesso de pressão intersticial até ao desenvolvimento da resistência ao corte de pico, seguido da dissipação do excesso de pressão intersticial e conseqüente dilatação dos provetes. Os

picos observados ao longo das curvas devem-se aos ciclos de carga e descarga que foram realizados.

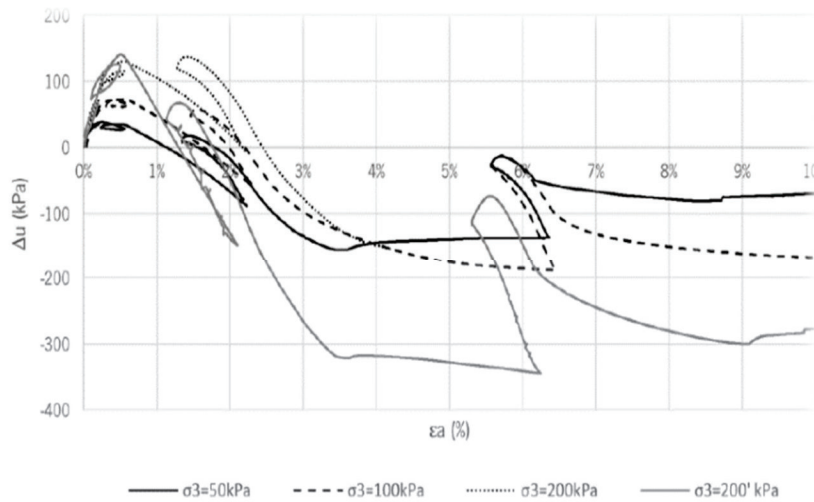


Figura 6 - Evolução da pressão intersticial com a extensão axial ($\epsilon_a \times \Delta u$) (provetes estabilizados)

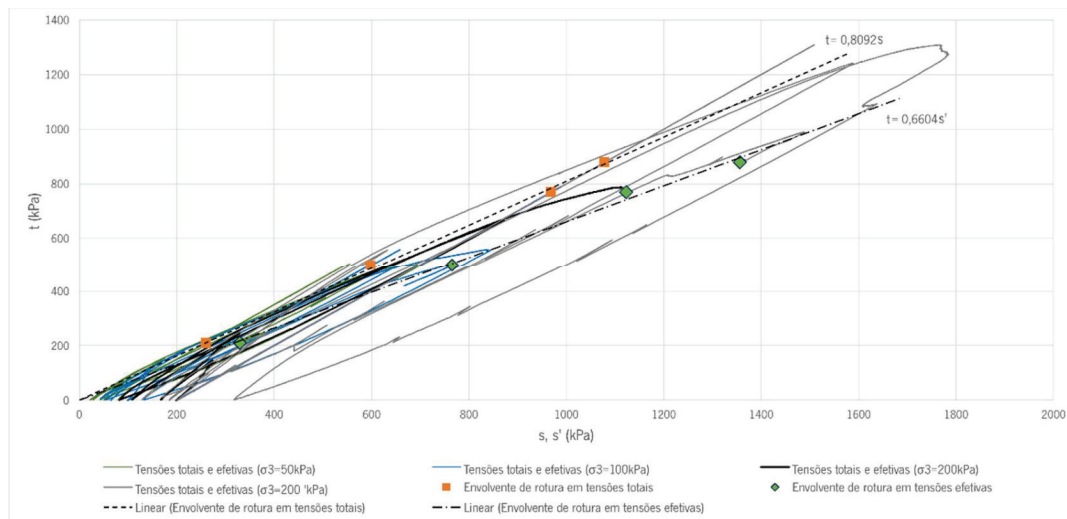


Figura 7 – Trajetórias de tensões e envolturas de rotura residuais do rejeitado mineiro estabilizado

Nas Figura 7 e Figura 8 apresentam-se as trajetórias de tensões resultantes, em termos de tensões totais e efetivas. Observa-se que todas as trajetórias de tensões, em termos de tensões efetivas, tendem para a direita. Este desenvolvimento das tensões confirma a sobreconsolidação e o comportamento dilatante destes provetes. A partir das trajetórias de tensões identificou-se, mais uma vez, os pontos de rotura de cada um dos provetes, permitindo assim traçar as envolturas de rotura do rejeitado mineiro estabilizado. Esta análise foi realizada para as tensões de desvio de pico e tensões residuais. Na Tabela 4 e Tabela 5 encontram-se sintetizados os parâmetros de resistência ao corte determinados a partir das envolturas de rotura resultantes.

Tabela 4 - Parâmetros de resistência ao corte do rejeitado mineiro, antes e após estabilização (tensões de desvio residuais)

	Tensões totais		Tensões efetivas	
	c	Φ	c'	Φ'
RM original	0	27°	0	31°
RM após estabilizado	0	54°	0	41°

Tabela 5 - Parâmetros de resistência ao corte do rejeitado mineiro, antes e após estabilização (tensões de desvio de pico)

	Tensões totais		Tensões efetivas	
	c	Φ	c'	Φ'
RM original	0	27°	0	31°
RM após estabilizado	0	58°	0	46°

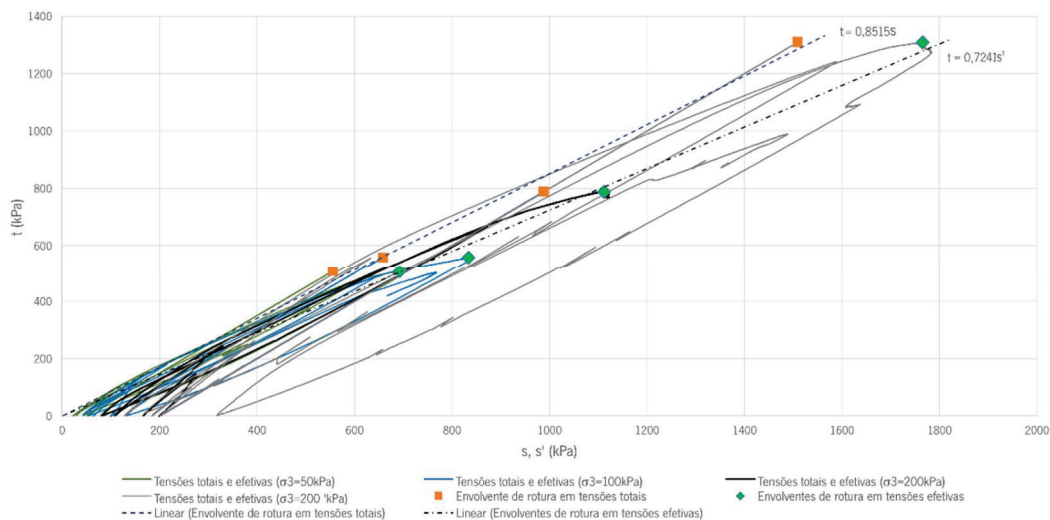


Figura 8 – Trajetórias de tensões e envoltórias de rotura de pico do rejeitado mineiro estabilizado

Comparando os parâmetros de resistência ao corte obtidos antes e após a estabilização do rejeitado mineiro verificou-se que os mesmos exibiram um aumento significativo. No que toca à coesão esta manteve-se nula quer para o rejeitado original quer para o rejeitado melhorado. Este facto mostra que 7 dias de cura são insuficientes para o desenvolvimento de ligações significativas entre o ligante e as partículas sólidas do solo. Verificou-se, todavia, um aumento considerável do ângulo de atrito, total e efetivo, para a mistura rejeitado-ligante estudada. O aumento considerável do ângulo de atrito após a estabilização do rejeitado pode estar relacionado com o facto de a adição de uma percentagem considerável de cinzas volantes à mistura contribuir para um melhor preenchimento dos vazios existentes entre as partículas de rejeitado, originando um material mais rígido e dilatante, com conseqüente maior ângulo de atrito.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como principal foco o estudo da estabilização de um rejeitado mineiro com base na utilização de um ligante sustentável obtido pela ativação alcalina de cinzas volantes, nomeadamente na avaliação do impacto no seu comportamento ao corte.

O rejeitado mineiro foi inicialmente submetido a uma série de ensaios de caracterização do ponto de vista geotécnico. Com base nestes resultados foi possível classificar o rejeitado mineiro como uma argila magra (CL).

Os ensaios triaxiais permitiram concluir que a estabilização mecânica do rejeitado através de um ligante baseado na ativação alcalina de um resíduo conduziu a alterações significativas do comportamento ao corte do material com ganhos significativos desta resistência. De facto, mesmo para um curto período de cura (7 dias), foi observado um aumento significativo do ângulo de atrito, embora a coesão se tenha mantido nula, uma vez que este período não é suficiente para desenvolver ligações mensuráveis entre o ligante e as partículas sólidas. Neste sentido, espera-se que a resistência ao corte aumente significativamente com o tempo de cura, nomeadamente com o aumento da coesão.

Em suma, este estudo caracterizou, em termos mecânicos, o comportamento do rejeitado antes e após estabilização por ativação alcalina de cinzas volantes. Os resultados obtidos revelaram-se bastante promissores para trabalhos futuros com foco na aplicação específica deste material, nomeadamente para fins geotécnicos. Em trabalhos futuros será realizada a avaliação do comportamento das misturas para idades mais avançadas, a modelação numérica dos materiais antes e após estabilização e a comparação do seu comportamento com misturas estabilizadas com cimento Portland.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Somincor, S.A. a disponibilização do rejeitado para a realização deste estudo. Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) através do centro de investigação ISISE (Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering) com a referência UIDB/04029/2020, e através do Laboratório Associado ARISE (Advanced Production and Intelligent Systems) com a referência LA/P/0112/2020. Este trabalho foi também parcialmente financiado através do projeto de investigação “MINECO - New Eco-Innovative Materials for Mining Infra”, com a referência ERA-MIN/0001/2018, financiado pela FCT/MCTES.

Referências

- Abreu, C. (2021). *Melhoramento de rejeitado mineiro através de ligantes sustentáveis*.
- Akinyemi, B. A., Alaba, P. A., & Rashedi, A. (2022). Selected performance of alkali-activated mine tailings as cementitious composites: A review. *In Journal of Building Engineering* (Vol. 50).
- Almeida, J., Faria, P., Ribeiro, A. B., & Santos Silva, A. (2020). Effect of mining residues treated with an electro-dialytic technology on cement-based mortars. *Cleaner Engineering and Technology*, 1.
- Cristelo, N., Glendinning, S., & Pinto, A. T. (2011). Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 164(2), 73–82.

- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., & Pinto, A. T. (2013). Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotechnica*, 8(4), 395–405.
- Fernández-Jiménez, A., Cristelo, N., Miranda, T., & Palomo, Á. (2017). Sustainable alkali activated materials: Precursor and activator derived from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1200–1209.
- Khalifa, A. Z., Pontikes, Y., Elsen, J., & Cizer, Ö. (2019). Comparing the reactivity of different natural clays under thermal and alkali activation. *RILEM Technical Letters*, 4, 74–80.
- Marín, O. A., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2022). Estimating processing cost for the recovery of valuable elements from mine tailings using dimensional analysis. *Minerals Engineering*, 184.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. P., & Jalali, S. (2008). Investigations of tungsten mine waste geopolymetric binder: Strength and microstructure. *Construction and Building Materials*, 22(11), 2212–2219.
- Perumal, P., Niu, H., Kiventerä, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2020). Upcycling of mechanically treated silicate mine tailings as alkali activated binders. *Minerals Engineering*, 158.
- Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015). Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 110–125.
- Rao, F., & Liu, Q. (2015). Geopolymerization and its potential application in mine tailings consolidation: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(6), 399–409.
- Song, X., Pettersen, J. B., Pedersen, K. B., & Røberg, S. (2017). Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway. *Journal of Cleaner Production*, 164, 892–904.
- Xiaolong, Z., Shiyu, Z., Hui, L., & Yingliang, Z. (2021). Disposal of mine tailings via geopolymerization. *Journal of Cleaner Production*, 284.