

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/462

Estudo do Efeito da Energia de Compactação no Comportamento Mecânico de Rejeitos de Mineração de Cobre - Cimento Portland

Carlos Alberto Simões Pires Wayhs

Professor e doutorando, UNICRUZ e UFRGS, Cruz Alta e Porto Alegre, Brasil, engcaw@gmail.com

Nilo Cesar Consoli

Professor Ph.D. P.Eng. UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: Grandes acidentes ambientais provocados pelas rupturas de barragens de rejeitos de minério, levaram o governo brasileiro a criar uma legislação específica proibindo novas barragem com alteamento à montante, além da descaracterização obrigatória daquelas construídas através deste método. Nesse contexto, as empresas de mineração buscam melhores soluções para dispor os rejeitos. Assim, a presente pesquisa visa analisar o comportamento mecânico de misturas de rejeitos de minério de cobre de dois locais da bacia de rejeitos estabilizadas com cimento Portland e compactadas sob três energias de compactação com o intuito de avaliar o potencial de empilhamento. Para tal, são realizados ensaios de caracterização geotécnica dos materiais e misturas, caracterização em termos de resistência à compressão simples e rigidez inicial e ensaios triaxiais drenados com tensão de confinamento de 300 kPa, usando três energias de compactação: modificada, normal e baixa, para o teor de cimento de 3 %, para 7 dias de cura. A partir dos resultados preliminares, pode-se afirmar que quanto maior a energia de compactação, melhor o desempenho da mistura estabilizada. Nesse sentido, o estudo auxilia na avaliação dos limites aceitáveis em campo, relativos à variação de energia de compactação, para manter a qualidade da compactação da pilha de rejeitos.

PALAVRAS-CHAVE: Mineração, Rejeitos de Minério de Cobre, Cimento Portland, Energia de Compactação, Pilhas Estabilizadas de Rejeitos.

ABSTRACT: Major environmental accidents caused by the ruptures of ore tailings dams led the Brazilian government to create specific legislation prohibiting new dams raised upstream, in addition to the mandatory decharacterization of those built using this method. In this context, mining companies are looking for better solutions to dispose of tailings. Thus, the present research aims to analyze the mechanical behavior of mixtures of copper ore tailings from two locations in the tailings basin stabilized with Portland cement and compacted under three compaction energies in order to evaluate the stacking potential. To this end, geotechnical characterization tests of materials and mixtures are carried out, characterization in terms of simple compression resistance and initial stiffness and drained triaxial tests with confining stress of 300 kPa, using three compaction energies: modified, normal and low, to cement content of 3%, for 7 days of curing. From the preliminary results, it can be stated that the higher the compaction energy, the better the performance of the stabilized mixture. In this sense, the study helps in the evaluation of acceptable limits in the field, relating to the variation in compaction energy, to maintain the quality of compaction of the waste pile.

KEYWORDS: Mining, Cooper Ore Tailings, Portland Cement, Compaction Energy, Stabilized Tailings Piles.

1 INTRODUÇÃO

Os dois grandes desastres ambientais ocorridos nos últimos anos, provocados pela ruptura de barragens de rejeitos de minério, levaram o governo brasileiro, no ano de 2020, a criar uma legislação específica que prevê a proibição de novas barragem com alteamento à montante, bem como a descaracterização de todas as estruturas construídas através deste método.

Já em 2019, foi lançada a Revisão Global de Rejeitos (Global Tailings Review), co-convocada pelo Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e os Princípios para Investimento Responsável, apoiados pela ONU (PRI), com cada parte tendo

participação e voz iguais na tomada de decisões, assumindo o compromisso público de estabelecer um novo padrão para a gestão mais segura de instalações de rejeitos. Segundo o Global Tailings Review (2022), publicado em 2022, “o modelo co-convocado de representação igualitária da indústria, investidores e partes interessadas do governo foi projetado para dar à sociedade civil e ao público a confiança de que a iniciativa teria o nível necessário de independência e não estaria subordinada aos interesses da indústria. Foi também um reconhecimento de que nenhuma parte interessada pode resolver o problema e que a confiança da comunidade e dos investidores no setor de mineração precisa ser restaurada após vários desastres de alto nível. Além disso, a abordagem tripartite, co-convocada, ampliou a gama de perspectivas e conhecimentos especializados que poderiam ser utilizados para desenvolver um padrão credível, tecnicamente sólido e adequado à finalidade”.

Por outro lado, a produção de minério de cobre em 2021 em termos brutos (run of mine – ROM) foi de 99,6 milhões de toneladas, contendo 527.350 t de cobre, significando 0,53% de teor, a partir de dados do Anuário Mineral Brasileiro da ANM - Agência Nacional de Mineração (ANM, 2022). Também a publicação indica a produção beneficiada de 1.153 mil toneladas contendo 336 mil toneladas de cobre, teor de 29,13%.

De acordo com IBRAM (2021/2022, 2021), dos cerca de 339 bilhões de reais de faturamento da produção mineral no Brasil em 2021, cerca de 5% devem-se a do cobre (R\$ 17,8 bilhões). Em importância para o país, fica apenas atrás do faturamento da produção de ferro (R\$ 250 bilhões - 74%) e de ouro (R\$ 27,1 bilhões - 8%), portanto ocupando a terceira posição no Brasil em importância por substância mineral.

Em 2021, exportou-se 1.186 milhares de toneladas de minério de cobre, com receita gerada de 3.369 milhões de dólares (5,8% do total exportado) e importados 235 milhares de toneladas, com receita gerada de 437 milhões de dólares (4,8% do total importado) (IBRAM 2021/2022). Percebe-se que em 2021 o Brasil é um país exportador de cobre, diferente da posição ostentada em 2011 com produção apenas autossuficiente segundo o IPEA (2012).

Pode-se inferir ao analisar dos dados do Anuário Mineral do ano de 2021 da ANM (2022), que no Brasil a diferença entre a produção bruta de cobre (ROM) e a produção beneficiada pode ser considerada estéril, sendo de 99.046.099 t, com um teor de minério moído de 0,53%. Já, analisando os dados de produção beneficiada, pode-se inferir que é de rejeitos a diferença entre a produção beneficiada de cobre e o conteúdo de minério, sendo de 816.535 t, com um teor de 29,13% de cobre, significando que para mil toneladas de ROM de rocha extraída, 994,7 t é composta de estéril, 3,75 t é de rejeito de mineração de cobre (RMC) e 1,54 t é de cobre.

Adicionalmente, verifica-se que a contribuição média de rejeitos de mineração de cobre projetada pelo IPEA (2012) para os anos de 2010 a 2030 é de 7,18% comparado em relação ao total de rejeitos de mineração produzidos projetados. E pela tabela 2.5, o IPEA (2012) estimou que o percentual de rejeitos de mineração de cobre teria uma redução significativa de percentual, passando de 10,24 % em 2010 para 5,86% em 2030, reduzindo-se a quase metade da importância em relação ao universo total de produção de rejeitos.

Nesse contexto, as empresas de mineração buscam soluções viáveis e mais seguras para dispor os rejeitos, onde a disposição e compactação em pilhas é uma das formas mais visadas, seja utilizando rejeitos de bacias tradicionais, seja com rejeitos filtrados ou espessados, estabilizados ou não.

Nesse sentido, este trabalho objetiva apresentar análise do comportamento mecânico de misturas de RMC de dois locais diferentes de bacia de rejeitos estabilizadas com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e compactadas nas condições ótimas sob três distintas energias de compactação, com o intuito de avaliar o potencial de empilhamento, sendo parte de pesquisa de doutoramento do primeiro autor.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL E MATERIAIS

Neste item, apresentar-se á o programa experimental desta parte da pesquisa, dividido em três fases, assim como os materiais utilizados.

A primeira fase consiste na preparação e caracterização dos RMC's aqui estudados (P300 e P1500), onde foram avaliadas as características físicas, químicas e mineralógicas dos RMC, por meio dos seguintes ensaios: distribuição granulométrica; massa específica real dos grãos; limites de consistência e compactação Proctor (energias normal e modificada). Foram encaminhados para execução a espectrometria de fluorescência de raios-X e a difratometria de raios-X. Já para o cimento Portland não foram realizados ensaios de caracterização, uma vez que, na literatura, já são apresentados inúmeros estudos referentes a esse material.

Na segunda fase foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples e velocidade de pulso ultrassônico para 7 dias de cura, tempo suficiente para alcançar a maior parte da resistência final, equivalente

a resistência aos 28 dias com uso de cimento Portland comum, visando determinar a resistência e rigidez da mistura rejeito-cimento. Empregou-se o teor de cimento CP V-ARI de 3 % (valores sugeridos pela indústria mineradora fornecedora do RMC e pelo orientador), por ser o valor médio entre 1 e 5%, uma vez que vários autores evidenciaram que valores da ordem de 5% ou menos já são completamente satisfatórios para estabilizar um solo granular (GILLOTT, 1987; INGLES e METCALF, 1972; MURTHY, 2002; WINTERKORN e FANG, 1991). E, por fim, adotou-se três valores para a relação η/C_{iv} , correspondente à compactação das misturas de RMC's estabilizados com cimento CP V-ARI nas energias modificada, normal e baixa.

Na terceira fase foram realizados ensaios de compressão triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID) para analisar o comportamento tensão-deformação e rigidez do RMC estabilizado (mistura). Adotou-se as mesmas condições da segunda fase: teor de cimento Portland de 3%, cura de 7 dias e três valores para a relação η/C_{iv} correspondente a compactação das misturas de RMC estabilizadas com cimento CP V-ARI nas energias modificada, normal e baixa.

Os materiais empregados nesta pesquisa constam de dois RMC's como agentes a serem estabilizados, cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) como estabilizador e água destilada como lubrificante para a realização da compactação, a seguir apresentados.

Os RMC's foram cedidos por uma indústria mineradora localizada na região norte do Brasil, sendo coletados de um reservatório de uma barragem de rejeitos. O RMC P300, retirado da praia superior, está em uma posição de amostragem em relação ao ponto de descarga de rejeitos, distante cerca de 300 m, e o RMC P1500, retirado da praia inferior, distante cerca de 1.500 m do ponto de descarga. No aspecto visual observado dos dois RMC's imediatamente antes do ensaio de peneiramento, secos, percebeu-se que P1500 é pouco mais fino que o P300.

Ressalta-se que a escolha pelo emprego do RMC se deu devido ao fato que o Brasil é um grande produtor de minério de cobre do mundo (13° em 2019 de acordo com Reichl e Schatz (2021)), sendo a terceira substância em importância para o faturamento, com 5% do total. Além do mais, reforça-se a escolha de que o minério de cobre, é um dos metais mais minerados no Brasil e, conseqüentemente, produz enormes volumes de rejeito de minério de cobre, com contribuição média projetada de 7,18% em relação ao volume total de rejeitos para o período de 2010 a 2030 (IPEA, 2012).

3 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização e de compactação da fase 1 e classificação dos rejeitos conforme solo, resultados dos ensaios de resistência da fase 2 e resultados dos ensaios triaxiais da fase 3.

Foram realizados ensaios granulométricos para os tipos de RMC com uso de defloculante. Na Figura 1, apresentam-se as curvas dos dois rejeitos, permitindo melhor visualização das diferenças granulométricas.

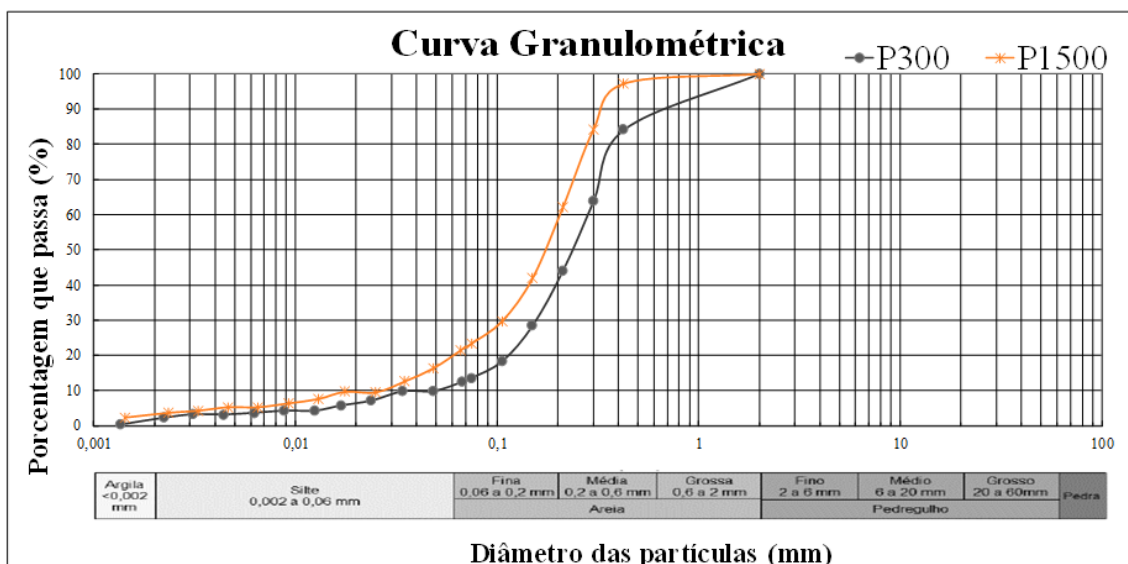


Figura 1. Curvas granulométrica dos RMC's P300 e P1500.

Na Tabela 1, apresentam-se resultados de propriedades físicas dos dois rejeitos estudados, de dois rejeitos pesquisados e apresentados em Velten et al. (2022) coletados à 304 m e 1.158 m do ponto de descarga de rejeitos na mesma bacia de rejeitos e cinco amostras coletadas apresentadas em relatório de empresa de consultoria também na mesma bacia de rejeitos. Utilizou-se tanto a escala de tamanho de partículas da ABNT e da ASTM, que diferem um pouco nas frações mais finas. Pode-se afirmar que os resultados das análises granulométricas são semelhantes, variando sutilmente à medida que se distancia do ponto de descarga. O RMC P300 tem teores percentuais de areia, silte e argila respectivamente de 88,55, 9,71 e 1,74 e o P1500 com teores de 80,21, 16,53 e 3,26, para a escala da ABNT. Os resultados da massa específica real dos grãos são muito semelhantes (média de todas as amostras de 2,886 e desvio padrão de 0,04 e desvio padrão médio de 0,033) mesmo sendo de épocas diferentes e de posições diferentes na bacia de rejeitos. Para os dois RMC's não se conseguiu executar os ensaios de limite de liquidez e os de limite de plasticidade. Assim, os dois rejeitos podem ser considerados NP, ou seja, não plásticos. Este comportamento era esperado já que também os rejeitos de Velten et al. (2022) e os cinco rejeitos coletados pela empresa de consultoria não tiveram possibilidade de execução e foram considerados NP, fato esperado pelo alto teor de areia em todos os rejeitos, especialmente os dois rejeitos estudados e os dois de Velten et al. (2022), com teor de areia variando de 75 a 90%.

Tabela 1. Propriedades físicas granulométricas dos rejeitos de cobre.

Observ.	Parâmetros	Amostras								
		Material da pesquisa		Velten et al (2022)		Mémória de Cálculo empresa de consultoria (2019)				
		P300 (300 m)	P1500 (1500 m)	Upper Beach (304 m)	Lower Beach (1158 m)	Saída Usina Am 1255	PC-01 Am 1234	PC-02 Am 1235	PC-03 Am 1236	PC-04 Am 1237
	Gravidade específica – G _s (g/cm ³)	2,915	2,867	2,844	2,943	2,880	2,844	2,943	2,847	2,894
ABNT	Pedregulho (%) (> 2 mm)	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Areia grossa (%) (0,6 a 2 mm)	14,12	2,45	1,5	0,0	1,0	1,5	0,0	0,0	0,0
	Areia média (%) (0,2 a 0,6 mm)	44,82	39,21	61,0	20,0	18,5	61,0	20,0	27,0	7,5
	Areia fina (%) (0,06 a 0,2 mm)	29,60	38,55	25,0	54,5	52,5	25,0	54,5	51,5	50,0
	Areia (%) (0,06 a 2 mm)	88,55	80,21	87,50	74,50	72,00	87,50	74,50	78,50	57,50
	Silte (%) (0,002 a 0,06 mm)	9,71	16,53	10,5	22,5	25,0	10,5	22,5	20,0	38,5
	Argila (%) (< 0,002 mm)	1,74	3,26	2,0	3,0	3,0	2,0	3,0	1,5	4,0
ASTM	Pedregulho (%) (> 4,75 mm)	0,0	0,00							
	Areia grossa (%) (2 a 4,75 mm)	0,00	0,00							
	Areia média (%) (0,425 a 2 mm)	15,88	2,76							
	Areia fina (%) (0,075 a 0,425 mm)	70,51	73,73							
	Areia (%) (0,075 a 4,75 mm)	86,40	76,49							
	Silte (%) (0,005 a 0,075 mm)	10,27	18,14							
	Argila (%) (< 0,005 mm)	3,33	5,37							
	LL (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	LP (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IP (%)	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
	D ₅₀ (mm)	0,28	0,21	0,3	0,13					
	D ₃₀ (mm)	0,16	0,11	0,17	0,075					
	D ₁₀ (mm)	0,012	0,028	0,035	0,018					
	Coefficiente de Curvatura C _c	7,62	2,06	2,75	2,40					
	Coefficiente de Não Uniformidade C _u	23,33	7,50	8,57	7,22					
	porcentagem passante #200	13,60	23,51	3,00	4,00					

Os RMC's foram classificados tanto pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) bem como pela classificação rodoviária da HRB/AASHTO. Na Tabela 2, estão indicadas as classificações dos rejeitos P300 e P1500, os dois de Velten et al. (2022) e os cinco coletados por empresa de consultoria. O P300, P1500, os dois de Velten et al. (2022) e dois da empresa consultora são considerados solos A-2-4 com índice de grupo igual a 0 pela classificação rodoviária HRB/AASHTO, podendo ser inferido, equivalente a uma areia fina com silte não plástico. Três das cinco amostras coletadas pela empresa consultora foram classificados como A-4 com índice de grupo entre 1 e 3, podendo ser inferido como solo siltoso não plástico.

Pelo SUCS, o P300 e P1500 e os dois rejeitos de Velten et al. (2022) foram inferidos como sendo um solo SM, sendo considerado equivalente a uma areia siltosa ou mistura de areia e silte. Os cinco solos da empresa consultora não foram classificados pelo SUCS devido à falta de dados passantes na peneira de n° 200 (0,074 mm).

Tabela 2. Classificações dos RMC's como solos.

Parâmetros	Amostras								
	Material da pesquisa		Velten et al (2022)		Mémória de Cálculo empresa de consultoria (2019)				
	P300 (300 m)	P1500 (1500 m)	Upper Beach (304 m)	Lower Beach (1158 m)	Saída Usina Am 1255	PC-01 Am 1234	PC-02 Am 1235	PC-03 Am 1236	PC-04 Am 1237

Tanto a classificação rodoviária da HRB/AASHTO como a do SUCS usam parâmetros do solo para efetuar a sua identificação. Já a classificação textural usa uma escala granulométrica de alguma instituição normativa e valores obtidos da curva granulométrica. Pela classificação textural pela escala da ABNT, os dois rejeitos de Velten et al. (2022), o P300 e P1500 e 3 dos rejeitos da empresa consultora se classificam como areia. Os outros dois da empresa consultora classificam-se como solo arenoso.

Ensaio de compactação foram realizados nas energias normal e energia modificada, de maneira a obter o conhecimento do comportamento dos rejeitos quanto a densificação. Na Tabela 3, demonstram-se os valores do peso específico aparente seco máximo e do teor de umidade ótimo para cada energia ensaiada dos dois RMC. Já na Figura 2, apresentam-se os resultados agrupados dos ensaios de compactação dos RMC P300 e P1500 nas energias normal e modificada, sendo abreviadas, respectivamente, na legenda do gráfico por EN e EM. Dentro da normalidade esperada, comparando as energias normal com a modificada, obteve-se menor teor de umidade ótimo e maior peso específico aparente seco máximo na energia modificada, indicando que a curva de compactação com energia normal posicionou-se mais à direita e inferior que a energia Proctor modificada. Este comportamento repetiu-se comparando-se os gráficos do solo mais fino (o P1500) com o solo mais grosso (o P300), comportamento também esperado.

Tabela 3. Pesos específicos aparentes secos máximos e umidades ótimas.

	w (%)	γ_d (kN/m ³)
P300	12,0	19,00
	10,2	20,40
P1500	13	18,44
	10,35	20,13

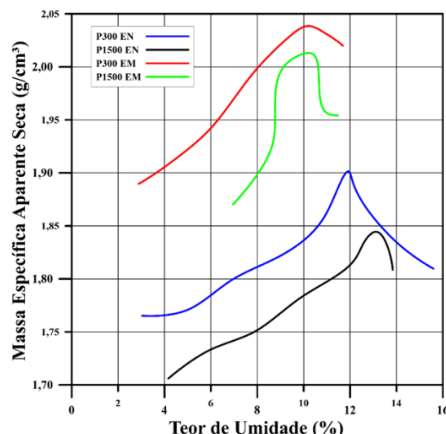


Figura 2. Curvas de compactação dos rejeitos de mineração de cobre.

Quanto aos ensaios da segunda fase, os resultados referem-se aos ensaios de resistência à compressão simples (q_u) e de velocidade de pulso ultrassônico (G_0), realizados em corpos de prova dos dois RMC's estabilizados com 3% de cimento CP V-ARI, para 7 dias de cura. Foram utilizados os pesos específicos aparente secos máximos e teores de umidade ótimos dos ensaios de compactação da energia normal e modificada. Também foi estabelecida uma terceira combinação de peso específico máximo e umidade ótima, equivalente a um ensaio de compactação com energia abaixo da normal, na mesma distância entre os pesos específicos secos máximos e entre as umidades ótimas, da energia modificada e normal. Na Tabela 4, apresentam-se os gráficos dos pesos específicos secos máximos e umidades ótimas para os dois RMC's.

Tabela 4. Pontos de energia modificada, normal e baixa.

	Energia	w (%)	γ_d (kN/m ³)
P300	modificada	10,2	20,40
	normal	12,0	19,00
	baixa	13,80	17,60
P1500	modificada	10,35	20,13
	normal	13	18,44
	baixa	15,65	16,80

Nos ensaios de compressão simples (q_u) quanto à porosidade empregada nas misturas, observou-se a sua influência sobre q_u , pois ao diminuir a porosidade, a resistência à compressão simples apresentou aumento significativo; quanto ao índice C_{iv} (teor de cimento-rejeito) empregado nas misturas, observou-se a sua influência sobre q_u , pois ao aumentar o teor de cimento, a resistência à compressão simples apresentou aumento relevante; quanto ao teor de umidade empregado nas misturas, observou-se a sua influência sobre q_u , pois ao reduzir o teor de umidade, a resistência à compressão simples apresentou aumento importante.

Foppa (2005) e Consoli et al. (2007), apresentaram um método racional de dosagem que se baseia na relação entre o volume absoluto de vazios (V_v) e o volume absoluto de cimento (V_c). Do mesmo modo, essa relação pode ser representada como o quociente entre a porosidade (η) e o teor de cimento (C_{iv}), como pode ser observado na Equação 1, onde, V_{total} corresponde ao volume total da amostra.:

$$\frac{V_v}{V_c} = \frac{\frac{V_v}{V_{total}}}{\frac{V_{cimento}}{V_{total}}} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (1)$$

Os mesmos autores ainda apresentaram uma relação do tipo potência entre a resistência à compressão simples (q_u) e a relação ajustada entre a porosidade e o teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}^k), como expresso na Equação 2. Nesse sentido, o ajuste foi feito por meio do expoente k que compatibiliza os efeitos da porosidade e do teor de cimento sobre a variável resposta, onde: se $k < 1$, significa que a influência da porosidade possui maior domínio em termos de resistência à compressão simples em relação ao teor volumétrico de cimento; se $k > 1$, o teor volumétrico de cimento exerce maior influência na resistência à compressão simples em relação a porosidade; e, se $k = 1$, ambos os parâmetros têm a mesma influência sobre a resistência à compressão simples, o que significa que, variações proporcionais dos parâmetros mantêm o valor da resistência à compressão simples constante. E ainda, A e B são constantes de ajuste que variam conforme cada material, considerando o máximo coeficiente de correlação (R^2).

$$q_u = A \left(\frac{\eta}{C_{iv}^k} \right)^B \quad (2)$$

Visando estabelecer relações matemáticas, os resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada podem ser relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cimento. Desse modo, relações da forma da Equação 2 foram propostas, nas quais o k foi adotado como 1, sendo esse o melhor ajuste. Sabe-se que, quando o coeficiente $k=1$, ambos os parâmetros (teor de cimento e peso específico) têm a mesma influência sobre a resistência à compressão simples, o que significa que, variações proporcionais dos parâmetros mantêm o valor da resistência à compressão simples constante. A Figura 3 apresenta a relação entre a resistência à compressão simples e o índice η/C_{iv} para os dois rejeitos. Como pode-se observar, as duas curvas são perfeitamente paralelas. Além disso, o P1500, rejeito um pouco mais fino que o P300, tem a sua curva um pouco mais à direita do gráfico comparado com a curva do P300.

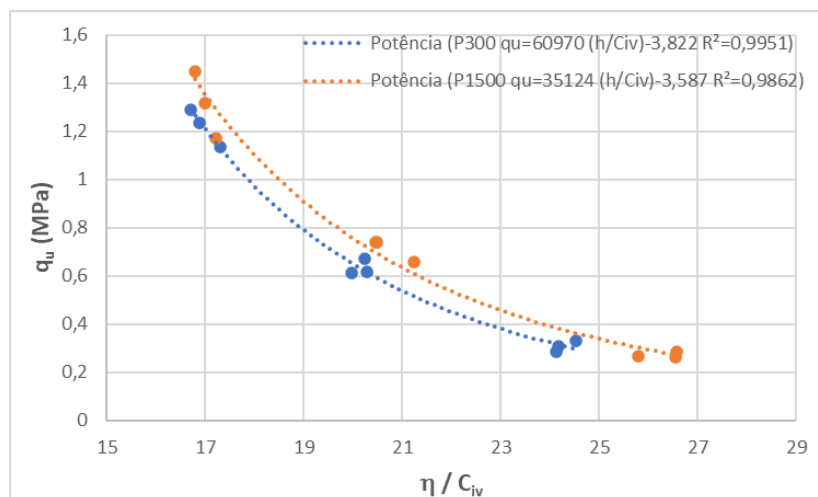


Figura 3. Relação entre q_u e η/C_{iv} para os dois RMC's.

Para os ensaios de módulo de rigidez inicial (G_0), quanto à porosidade empregada nas misturas, observou-se a sua influência sobre G_0 , pois ao diminuir a porosidade o módulo de rigidez inicial apresentou aumento significativo; quanto ao índice C_{iv} (teor de cimento-rejeito) empregado nas misturas, observou-se a sua influência sobre G_0 , pois ao aumentar o teor de cimento, o módulo de rigidez inicial apresentou aumento relevante; quanto ao teor de umidade empregado nas misturas, observou-se a sua influência sobre G_0 , pois ao reduzir o teor de umidade o módulo de rigidez inicial apresentou aumento importante; e, visando estabelecer relações matemáticas, os resultados dos ensaios de módulo de rigidez inicial podem ser relacionados ao índice porosidade/teor volumétrico de cimento. Desse modo, relações da forma da Equação 2 foram propostas, nas quais o k foi adotado como 1, sendo esse o melhor ajuste. Como já mencionado anteriormente, quando o coeficiente $k=1$, ambos os parâmetros (teor de cimento e peso específico) têm a mesma influência sobre a resistência à compressão simples, o que significa que, variações proporcionais dos parâmetros mantêm o valor da resistência à compressão simples constante. A Figura 4, apresenta a relação entre o módulo de rigidez inicial (G_0) e o índice η/C_{iv} para os dois rejeitos. Como pode-se observar, as duas curvas são perfeitamente paralelas. Além disso, o P1500, rejeito um pouco mais fino que o P300, tem a sua curva um pouco mais à esquerda do gráfico comparado com a curva do P300.

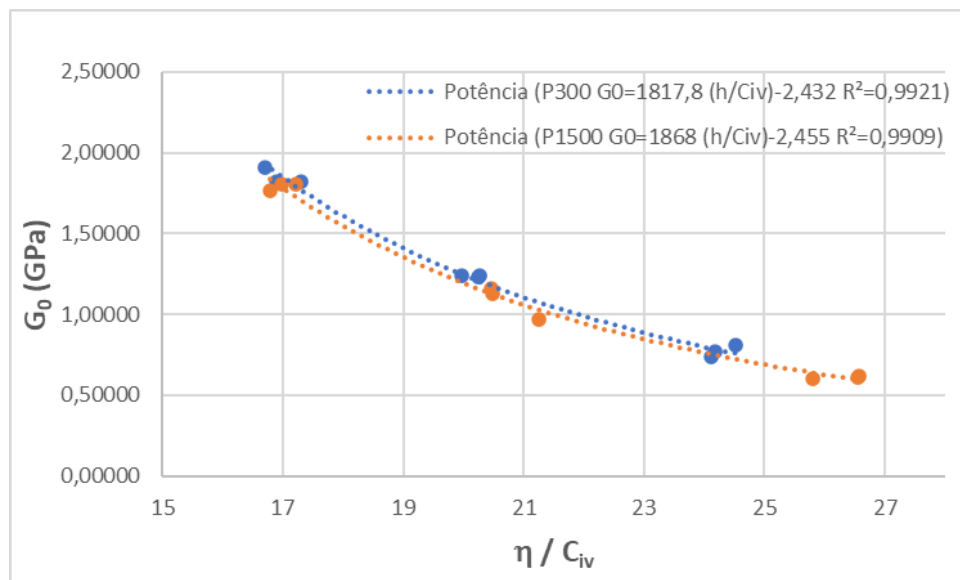


Figura 4. Relação entre G_0 e η/C_{iv} para os dois RMC's.

Quanto aos resultados referentes aos ensaios de compressão triaxiais drenados (CID), realizados em corpos de prova de rejeito de minério de cobre com teor de 3% de cimento Portland CP V-ARI com 7 dias de cura, para as energias de compactação modificada, normal e baixa, para a tensão de confinamento efetiva de 300 kPa, ao analisar o comportamento dos RMC's nas curvas tensão-deformação axial, percebeu-se aumento da tensão desviadora na ruptura (ou de pico) com o aumento da energia de compactação, apresentando valores de pico para q de 1.210 kPa para a energia baixa, 1.954 kPa para a energia normal e 2.902 kPa para a energia modificada. Estes valores máximos de q correspondem a uma deformação axial respectivamente para as três energias de 2,17%, 1,52%, 1,23%, ou seja, diminuem com a energia de compactação; analisando o comportamento deformação volumétrica e deformação axial para o rejeito estabilizado com C_i de 3 %, observou-se no início, para todas as energias, que o RMC estabilizado se comprime ($\epsilon_v < 0$) à medida que aumenta a tensão desvio, com valores percentuais próximos de ϵ_v de 0,93, 0,73 e 0,80 respectivamente para as energias baixa, normal e modificada. No entanto, logo após, o RMC começa a se dilatar (ou expandir) ($\epsilon_v > 0$) à medida que a tensão efetiva principal maior, σ_1 , aumenta, chegando, percentualmente, à 0,39 para a energia baixa, 2,19 para a normal e 3,51 para a modificada, indicando maior ϵ_v quanto maior a energia de compactação; quando a tensão desvio residual é aproximada, a curva se nivela, indicando que a deformação volumétrica permanecerá, ou pelo menos, tenderá a ser quase constante ao longo do aumento da deformação axial. As deformações volumétricas expansivas maiores ocorreram no término do ensaio, porém, muito próximas a deformação volumétrica correspondente a ϵ_a de 3%, para as 3 energias.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a finalização da pesquisa e defesa da tese, serão realizados ensaios de resistência à compressão simples e velocidade de pulso ultrassônico para teores de cimento de 1 e 5 % para os dois RMC's, ensaios de compressão triaxiais consolidado isotropicamente drenado (CID), sem cimento, com tensão de confinamento de 300 kPa e, sem e com 3 % de teor de cimento de 1, 2 e 6 MPa, para as três energias, com 7 dias de cura. Adicionalmente, serão realizados ensaios para a classificação e avaliação ambiental dos dois rejeitos e de duas misturas moldadas na energia modificada do RMC P1500, com 3% de cimento CP V-ARI, e sem cimento.

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a variação da energia de compactação gera influência no comportamento do material quanto à compressão simples, rigidez inicial e compressão triaxial drenada, sendo que quanto maior a energia de compactação, dentro dos limites aqui estudados, melhor o desempenho da mistura estabilizada. Nesse sentido, o estudo auxilia na avaliação de quais são os limites aceitáveis em campo, relativos à variação de energia de compactação, para manter a qualidade da compactação da pilha de rejeitos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio fundamental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental – LEGG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Agência Nacional de Mineração - ANM. Anuário Mineral Brasileiro 2022 (ano base 2021) *Principais substâncias metálicas: produção bruta, beneficiada e comercializada*. [s.l.: s.n.].
- CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 2, p. 197–205, 2007
- FOPPA, D. *Análise das variáveis-chave no controle da resistência de solos artificialmente cimentados*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- Global Tailings Review. (2022) *Towards Zero Harm: A compendium of papers*. Disponível em: <<https://globaltailingsreview.org/compendium/>>. Acesso em: 18 out. 2022.
- Gillott, J. E. (1987) Chapter 8 - soil stabilization. In: Clay in Engineering Geology. Em: *Developments in Geotechnical Engineering*. Elsevier ed. S.l.: [s.n.]. v. 41p. 251–283.
- Ingles, O. G.; Metcalf, J. B. (1972) *Soil stabilization: principles and practice*. 1. ed. Sydney - Australia: Butterworths, 1972.
- Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. (2021/2022) Coleta de dados de várias publicações. <https://ibram.org.br/publicacoes/> (acesso em 19/12/2021 e 10/02/2022).
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. (2012) Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Brasília: [s.n.], v. 1.
- Murthy, V. N. S. (2002) *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. 1. ed. New York: [s.n.].
- Winterkorn, H. F.; Fang, H. Y. (1991) *Foundation engineering handbook*. 1. ed. New York: [s.n.].
- Reichl, C.; Schatz, M. (2021) *World Mining Data 2021*. [s.l.: s.n.]. v. 36

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/463

Expansão Do Sistema Microsísmico Da Mina Pilar Correlacionado Ao Aprofundamento Das Atividades

João Alberto de Alencar Arrais Machado

Engenheiro Pleno, EroBrasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, joao.machado@erobr.com

Daniel Santos de Santana

Coordenador de Geotecnia, EroBrasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, daniel.santana@erobr.com

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo demonstrar o plano de expansão do sistema microsísmico da Mina Pilar, pertencente à EroBrasil, considerando a capacidade de cobertura dos eventos sísmicos em correlação com o aprofundamento da mina subterrânea ao longo dos anos. A avaliação da cobertura do sistema microsísmico é feita através do software IMS Vantage, utilizando a ferramenta *sensitivity analysis*. Esta análise permite avaliar a capacidade de captação de eventos de menores magnitudes em determinadas regiões da mina bem como o erro na localização dos eventos conforme distanciamento do raio de cobertura dos sensores. Também é possível avaliar cenários com inserção de novos sensores e substituição de sensores defeituosos. Este estudo comprovou a necessidade de aquisição de novas estações sísmicas em aderência ao plano de produção, de forma a garantir cobertura dos eventos sísmicos nos níveis mais profundos conforme aprofundamento da lavra, o que representará ganhos significativos na segurança das atividades, visto que o monitoramento destas ocorrências através de um sistema microsísmico moderno auxilia na identificação de instabilidades de escavações em regiões específicas. Com as informações obtidas pela microsísmica, são tomadas decisões de interdição de áreas instáveis, minimizando assim a exposição ao risco de colaboradores no subsolo.

PALAVRAS-CHAVE: Evento Sísmico, Sistema Microsísmico, Monitoramento, Cobertura, Expansão

ABSTRACT: This work aims to present the expansion plan for the microseismic system at Pilar Mine (EroBrasil company), regarding the capacity to cover seismic events in correlation with the deepening of the underground mine over the years. The coverage assessment of the microseismic system is carried out using the IMS Vantage software through the sensitivity analysis tool. This analysis allows to evaluate the ability to capture smaller seismic events in certain areas of the mine as well as the error in locating events as it moves away from the sensors' coverage radius. It is also possible to evaluate scenarios with the insertion of new sensors and replacement of defective sensors. This study proved the need to acquire new seismic stations in compliance with the production plan, in order to guarantee coverage of seismic events at deeper levels as the mine goes deeper, which will represent a significant gain in the safety of activities, since monitoring these occurrences through a modern microseismic system helps in identifying excavation instabilities in specific area. Through the information obtained by the microseismic system, decisions can be made to reduce personal exposure in areas under instabilities risks.

KEYWORDS: Seismic Event, Microseismic System, Monitoring, Coverage, Expansion

1. INTRODUÇÃO

Em obras de engenharia de abertura de escavações, tais como túneis, galerias e poços, a alteração do campo de tensões virgens é esperada a partir da indução de novos esforços no maciço. A redistribuição de tensões funciona muitas vezes como o gatilho para que ocorram processos de fraturamento na rocha ou movimentações em planos de fraqueza pré-existentes. Associado a esses mecanismos de ruptura, pode ocorrer a geração de ondas mecânicas no interior da rocha, que se configuram como sismos, em escala de intensidade muito inferior quando comparados aqueles de origem tectônica.