



Caracterização de uma mistura de solo-cimento empregado como material de preenchimento em operações de mineração⁽¹⁾.

Eduardo Eiler Batista de Araújo⁽²⁾; Fagner Alexandre Nunes de França⁽³⁾

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da University of Toronto, Canadá.

⁽²⁾ Estudante; Universidade Federal do Rio Grande do Norte; Natal; Rio Grande do Norte; eduardoeiler@globo.com;

⁽³⁾

Professor; Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

RESUMO: O presente estudo analisou um solo-cimento utilizado para preencher escavações da mina Kidd Creek (Ontario, Canada), composto por resíduos de mineração, areia, água e ligante hidráulico. Foram utilizadas amostras de campo e amostras laboratoriais com matérias providos pela mina, bem como dados de estudos prévios para embasamento e reconhecimento inicial da mistura e seus componentes. Ensaio para determinação da massa específica dos sólidos e do teor de umidade foram realizados para se determinar os índices de vazios de corpos de prova moldados e curados por processos e períodos diferentes. Adicionalmente, dois ensaios de compressão simples com dosagens de ligante hidráulico de 4,5% e 2,5% foram realizados com o objetivo de se avaliar o comportamento mecânico do solo-cimento. Os corpos de prova ensaiados mostraram teores de umidade entre 22,21% e 24,01% e índices de vazios entre 0,5 e 0,6. A resistência à compressão simples foi igual a 3,32 Mpa e 0,85 Mpa, para os corpos de prova com 4,5% e 2,5% de ligante, respectivamente. Foi observado, portanto, significativo ganho de resistência com o aumento da dosagem de ligante. Adicionalmente, o solo-cimento apresentou uma significativa redução de vazios nos primeiros dias de cura, diminuindo este valor gradativamente após 28 dias de cura, conforme esperado. Além disso, as amostras que foram deixadas em cura por 24h após moldagem em uma roda giratória apresentaram um comportamento atípico ao aumentar o índice de vazios durante o período de cura.

Termos de indexação: Solo-cimento, resíduo de mineração.

INTRODUÇÃO

O acesso a depósitos de minérios em grandes profundidades exige operações de escavação profunda. Após a extração mineral, os vazios gerados pelas escavações podem afetar a estabilidade dos maciços. Aterros de solo-cimento, reconhecidos internacionalmente como *Cemented Paste Backfill* (CPB), apresentam-se como uma

alternativa bastante empregada para o preenchimento desses vazios.

Em geral, o aterro de solo-cimento é uma mistura composta pelo resíduo da mineração, água, areia e um ligante hidráulico, que, por sua vez, corresponde a algum material cimentício. O ligante hidráulico é responsável por proporcionar resistência mecânica à mistura.

Os aterros de solo-cimento empregados para o preenchimento de vazios em operações de extração mineral (CPB) destacam-se como alternativa competitiva em muitos casos devido a facilidade de lançamento e resistência mecânica. Adicionalmente, uma vez que é empregado o resíduo proveniente das operações de extração dos minérios, promove-se uma redução significativa na quantidade de materiais a serem dispostos na superfície, e.g. em barragens de rejeito. Adicionalmente, essa alternativa resulta em incrementos na estabilidade do maciço escavado.

Apesar de suas vantagens, existe ainda uma lacuna na definição do comportamento desses aterros de solo-cimento durante o lançamento nos vazios e após um pequeno período de cura. Esse aspecto se torna preponderante na sua aplicação, uma vez que o ganho de resistência nesse período é fator decisivo no planejamento de aberturas de frentes de escavação. Adicionalmente, destaca-se a necessidade de avaliar a evolução da resistência das misturas de solo-cimento em elevados níveis de tensões de confinamento. Isso se deve ao fato de serem comumente empregadas em escavações profundas.

Diante dessas necessidades, um estudo foi realizado na *University of Toronto* com o intuito de investigar esses aspectos. O objetivo deste artigo é apresentar os resultados preliminares desse estudo, com ênfase na caracterização geotécnica de uma mistura de solo-cimento empregada na mina *Kidd Creek*, localizada na província de Ontario, Canadá. Investigaram-se as características físicas da mistura e a evolução de sua resistência submetida a dois métodos de cura, aplicados por tempos diferentes.



MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo-cimento analisadas neste estudo foram compostas por areia fina, resíduos de mineração, ligante hidráulico e água. Esses materiais foram providenciados pela mina *Kidd Creek*, localizada na província de Ontário, Canadá, produtora de zinco e cobre. Apesar de os resíduos produzidos pela mina não serem adequados para a utilização em solo-cimento, resíduos de mineração de minas abandonadas próximas a ela são comumente empregados com o mesmo objetivo.

Abdelaal (2011) avaliou os mesmos componentes da mistura de solo-cimento empregada neste estudo, entre outras que utilizou em sua pesquisa.

O resíduo da mineração apresentou limites de liquidez e de plasticidade iguais a 23% e 18%, respectivamente. O índice de plasticidade igual a 5% corresponde, portanto, a um material de baixa plasticidade. Esses valores foram determinados segundo a ASTM D4318-05. A massa específica dos sólidos do resíduo de mineração é igual a 2,79, determinado com base na ASTM D854-06. Ensaio de fluorescência de raios-X (FRX) foram realizados para determinar a composição química do resíduo (Tabela 1). Silica e alumina foram os materiais preponderantes na sua composição.

Tabela 1 – Composição química do resíduo de mineração e do ligante empregados nas misturas de solo-cimento (Abdelaal, 2011).

Descrição	Resíduo de mineração	Ligante hidráulico
SiO ₂	47,1	30,5
Al ₂ O ₃	13,1	7,3
Fe ₂ O ₃	6,7	0,7
MgO	4,8	11,1
CaO	6,4	47,4
Na ₂ O	1,7	0,4
Ba	0,1	0,1
SO ₃	4,4	1,1
K ₂ O	2,1	0,5
Outros	1,0	1,1

A areia empregada foi também classificada por Abdelaal (2011). Trata-se de uma areia glacial, rica em sílica e que não foi submetida a nenhum processo industrial. A massa específica dos sólidos (2,70) foi obtida segundo ASTM D854-06 e ASTM C127-07.

O ligante utilizado neste estudo e caracterizado por Abdelaal (2011) é composto por 90% de escória de alto forno e 10% de Cimento Portland e foi quimicamente caracterizado por meio de ensaio

FRX (Tabela 1). Basicamente é composto por óxidos de cálcio e sílica, juntamente com menores proporções de magnésio e alumina. O ligante foi utilizado neste estudo em porcentagem igual a 4,5%, em massa seca dos materiais sólidos. Um corpo de prova adicional foi moldado com o percentual de ligante igual a 2,5% para realização de ensaio de compressão axial não-confinado. A água foi adicionada até o teor de umidade de 208% ser atingido.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com 110 mm de altura e 55 mm de diâmetro, com proporção de 45% de resíduo da mineração e 55% de areia (MTS55). A dosagem de ligante foi igual a 4,5% em quase todos os corpos de prova, exceto por um único, moldado com 2,5% de ligante para uso no ensaio de compressão axial, conforme mencionado acima. Destaca-se que Abdelaal (2011) utilizou também corpos de prova moldados apenas com o resíduo de minério (*mining tailings*, MT) e com proporção de 55% de resíduo de mineração e 45% de areia (MTS45). A Figura 1 indica as curvas granulométricas dos materiais empregados na mistura de solo-cimento, obtidas por Abdelaal (2011).

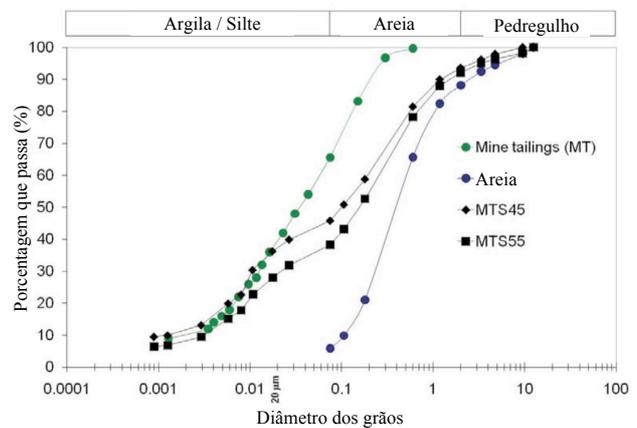


Figura 1: Curvas granulométricas dos materiais empregados nesta pesquisa (Abdelaal, 2011).

Dois métodos de cura foram empregados neste estudo. Um grupo de corpos de prova foi submetido à cura em repouso, submetido apenas ao peso próprio da mistura de solo-cimento. O segundo grupo, por sua vez, foi submetido à cura em roda giratória por um dia (uma rotação a cada cinco segundos), procedimento nomeado como "gravidade zero", seguido por cura em repouso. A Figura 2 ilustra a roda giratória empregada nesse procedimento. Adicionalmente, os corpos de prova foram submetidos a diferentes tempos de cura (1,

28 e 120 dias).



Figura 2: Roda giratória com os moldes fixados, simulando a “gravidade zero”.

A massa específica da mistura de solo-cimento com 45% de resíduo de mineração e 55% de areia (MTS55) e 4,5% de ligante hidráulico foi determinada por meio do método previsto na ASTM D854-06. Em seguida, a massa específica desse material foi determinada com base na norma ASTM D7263-09. Com esses ensaios, juntamente com determinações de teor de umidade dos materiais, foi possível determinar os índices físicos por meio das correlações usuais.

Os corpos de prova submetidos à cura em repouso foram nomeados segundo o tempo de cura, com sua indicação em dias (CP-1, CP-28, CP120). Apenas o tempo de cura de um dia foi analisado para corpos de prova submetidos à roda giratória (RG-1). Salienta-se que os índices físicos foram determinados também para as amostras frescas, antes da ocorrência de pega do ligante.

Após a fase de caracterização física das misturas empregadas em cada corpo de prova, foram realizados ensaio de resistência à compressão não confinada, segundo a norma ASTM D2166-13, para investigar a influência da dosagem de ligante nesse parâmetro. Assim, foram empregados os corpos de prova com 2,5% e 4,5% de ligante hidráulico nesses ensaios. O equipamento utilizado para realizar os ensaios de compressão axial não confinada foi um conjunto de uma célula de carga acompanhada de prensa hidráulica utilizada em mecânica das rochas, uma vez que eram esperados altos valores de resistência dos corpos de prova.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A massa específica dos sólidos e a massa específica das misturas apresentadas nesta pesquisa foram aproximadamente iguais a 2,63

g/cm³ e 2,05 g/cm³, respectivamente. Como esperado, o método e o tempo de cura não provocaram diferenças significativas entre os corpos de prova em relação a esses dois parâmetros, uma vez que todos os corpos de prova foram moldados a partir da mesma proporção entre os materiais sólidos.

O teor de umidade e o índice de vazios dos corpos de prova foi determinado enquanto frescos e após certos períodos de cura, em repouso ou em roda giratória. As Figuras 3 e 4 apresentam esses valores. Percebe-se que os valores de teor de umidade após os diferentes períodos de cura reduziram em torno de 12% para os corpos de prova submetidos à cura em repouso e cerca de 3% para o corpo de prova instalado na roda giratória. Em relação ao índice de vazios dos corpos de prova curados em repouso, verificou-se uma redução mais pronunciada (9,3%) para maiores tempos de cura (120 dias). O corpo de prova curado parcialmente na roda giratória apresentou uma conservação no valor de índice de vazios em relação ao material antes da cura.

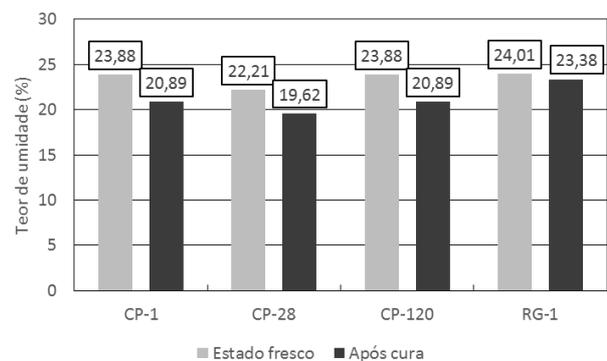


Figura 3: Teor de umidade entre diferentes corpos-de-prova antes e após períodos de cura.

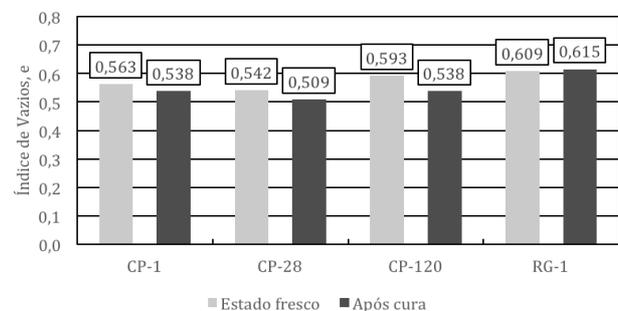


Figura 4: Índice de vazios entre diferentes corpos-de-prova antes e após períodos de cura.

A resistência à compressão axial não confinada dos corpos de prova foi igual a 3,32 Mpa e 0,85 Mpa, para os corpos de prova com 2,5% e 4,5% de



ligante hidráulico, respectivamente. Isso indica um ganho expressivo de resistência com o aumento da dosagem de ligante, conforme esperado. A Figura 5 apresenta as curvas obtidas nesse ensaio.

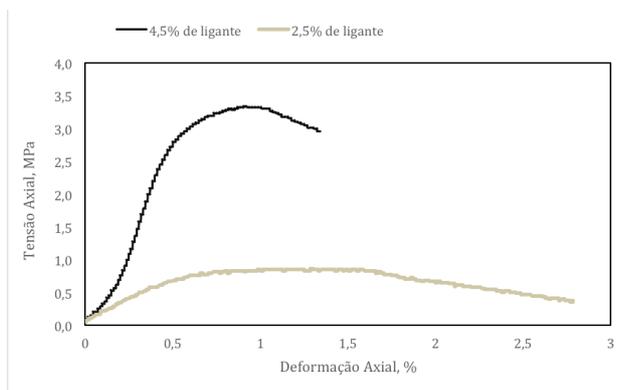


Figura 5: Curvas tensão-deformação axial obtidas em ensaios de compressão axial não confinada com corpos de prova com diferentes dosagens de ligante hidráulico.

CONCLUSÕES

Os ensaios de compressão de solo-cimento com 4,5% mostraram uma resistência elevada de 3,32 Mpa, enquanto a amostra de 2,5% apresentou uma resistência de 0,85Mpa. Assim, uma redução de 44,4% do percentual de ligante no solo-cimento diminuiu a resistência à compressão em 74,4%, o que retrata a influência da quantidade de ligante no comportamento mecânico da amostra.

Os corpos de prova apresentaram índices de vazios em torno entre 0,5 e 0,6 para umidades entre 22,21% e 24,01%, o que sugere que o solo-cimento tenha uma boa resistência. Segundo Stalteri (2014), ensaios triaxiais CU com pressões confinantes de 20kPa mostram que um solo-cimento com a mesma dosagem suporta tensões axiais da ordem de 300kPa.

Pode-se destacar também que, comparando-se os corpos de prova submetidos a maiores períodos de cura (28 e 120 dias), há uma maior variação de índice de vazios nos primeiros 28 dias. Nesse período ocorreram cerca de 65,6% da variação total do índice de vazios ao longo de 120 dias. Esse aspecto pode ser explicado pelo endurecimento do solo-cimento após a pega nos primeiros dias de cura.

Por fim, deve-se ressaltar o comportamento dos corpos de prova submetidos a um dia de cura na roda giratória, que teve um aumento no índice de vazios após esse procedimento. O resultado de índice de vazios de 0,615 foi o mais próximo do índice de vazios das amostras vindas de campo (0,63), o que significa que o método de cura no

primeiro dia tem uma colaboração significativa para os resultados de ensaios triaxiais realizados em corpos de prova que foram curados por longos períodos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a *University of Toronto* e seus colaboradores pelo suporte técnico e de infraestrutura para realização dos ensaios mencionados neste artigo. Agradecem, igualmente, ao Professor Murray Grabinsky e a Dragana Simon pelo apoio à realização desta pesquisa, como parte das atividades desenvolvidas durante período de intercâmbio na referida instituição.

REFERÊNCIAS

- ABDELAAL, A.M.G.M.I. *Early Age Mechanical Behavior and Stiffness Development of Cemented Paste Backfill with Sand*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada. 2011.
- ASTM D7263 - 09 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens. The Annual Book of ASTM Standards, Sect 4, Vol. 04-08.
- ASTM D854 2006. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. The Annual Book of ASTM Standards, Sect 4, Vol. 04-08.
- ASTM D4318-05 2007. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. The Annual Book of ASTM Standards. Sect 4, Vol. 04-08.
- STALTERI, C. *The stiffness evolution and mechanical behavior of cemented paste backfill with sand at different curing ages*. University of Toronto, Canada. 2014