


Estabilização polimérica de rejeito de minério de ferro para disposição em pilhas

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.003-072>

Giovana Abreu de Oliveira

Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: giovana.oliveira@fonntesgeotecnica.com

Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil
E-mail: gabriellavieiraeng@gmail.com

Michel Fontes

Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, MG, Brasil
E-mail: michel@fonntesgeotecnica.com

Giovanna Monique Alelvan

DSc
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil
E-mail: giovannaalelvan@etg.ufmg.br

Gabriella Melo de Deus Vieira

MSc

RESUMO

Busca-se cada vez mais tecnologias a fim de reduzir os impactos ambientais nos processos de mineração e torná-los mais eficazes e seguros, sendo o empilhamento à seco uma das alternativas à disposição dos rejeitos de mineração em barragens. Contudo, as etapas de filtração e disposição dos materiais necessitam de otimização, visto que ainda demandam muitos processos para se alcançar as condições de compactação das pilhas, utilizando materiais auxiliares, como a cal e o cimento. Por outro lado, tem-se o desenvolvimento de estudos com novos materiais geotécnicos, que, muita das vezes, além de serem uma alternativa ao uso de materiais que trazem maiores prejuízos ao meio ambiente, emitindo substâncias tóxicas durante sua produção, como é o caso do cimento, proporcionam aumento das resistências mecânica, química e hidráulica dos rejeitos. Visando isso, este artigo propõe a utilização do polímero High Performance Agglomerate (HPA) na estabilização de um rejeito de minério de ferro. Devido à sua formulação e capacidade de absorção, este material tem grande potencial para melhorar as propriedades mecânicas do rejeito e agir como solidificante nos processos de filtração da lama de rejeitos. Para tal finalidade, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados e testes especiais, como de resistência à compressão simples e de adensamento com diferentes dosagens de HPA. Embora alguns dos resultados tenham sido inconclusivos, algumas tendências foram observadas quanto ao potencial do material para ser utilizado nos processos de mineração.

Palavras-chave: Rejeito, Estabilização, Compósitos, Novos Materiais Geotécnicos.

1 INTRODUÇÃO

A atividade minerária é fundamental para a economia do Brasil, tendo gerado um faturamento de R\$ 339,1 bilhões em 2021, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). Minas Gerais, um dos principais estados produtores de minérios do país, é responsável por cerca de 50% da produção nacional de minério de ferro, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). A atividade minerária em Minas Gerais contribui significativamente para a economia do estado e do país, gerando empregos diretos e indiretos. No entanto, é importante destacar que a mineração também apresenta desafios e impactos ambientais significativos. Para minimizar esses impactos e garantir a sustentabilidade da atividade minerária, é necessário o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, bem como a adoção de práticas de mineração responsável (IBRAM, 2021; DNPM, 2021).

Uma das abordagens promissoras para reduzir os impactos ambientais da atividade minerária é o método de empilhamento a seco dos rejeitos de mineração. Esse processo envolve a retirada de uma porção da umidade dos materiais por meio de diferentes procedimentos, compactação e disposição em pilhas, evitando o armazenamento em barragens e reduzindo problemas como liquefação. No entanto, muitas vezes é necessário utilizar técnicas de estabilização dos rejeitos para melhorar suas propriedades mecânicas. Entre as técnicas mais utilizadas está a estabilização química com cimento, que tem se mostrado eficiente na melhoria das propriedades mecânicas dos rejeitos, tornando-os mais resistentes e duráveis (CONSOLI, 2019a).

Estudos indicam que a aplicação de cimento pode reduzir a permeabilidade, aumentar a resistência à compressão e melhorar a estabilidade dos rejeitos (Zhu et al., 2021; Lee et al., 2019). Outra técnica comum é a estabilização com adição de cinzas volantes, que também tem se mostrado eficiente na redução da permeabilidade e no aumento da resistência dos rejeitos (Liu et al., 2020). É importante ressaltar que a escolha da técnica de estabilização deve levar em consideração as características dos rejeitos e o impacto ambiental da aplicação das técnicas, sendo fundamental a adoção de práticas de mineração responsável.

Entretanto, a utilização de cimento para estabilização dos rejeitos apresenta uma problemática ambiental e de sustentabilidade devido à alta emissão de gases do efeito estufa durante a fabricação. Estudos brasileiros têm destacado a necessidade de buscar alternativas para reduzir o consumo de cimento e minimizar os impactos ambientais propondo a utilização de aditivos orgânicos (Oliveira et al., 2020) e materiais pozolânicos (Reis et al., 2021). A utilização de cinza de carvão mineral também é apontada como uma alternativa para a estabilização de rejeitos de minério de ferro (Fernandes & Sales, 2018). Assim, é fundamental o desenvolvimento de novas técnicas de estabilização que reduzam a dependência do cimento (Reis et al., 2021).

Além disso, uma nova alternativa para essa problemática consiste na adição de polímeros capazes de melhorar as capacidades mecânicas da matriz de rejeito. Estudos como os de Alelvan (2022) já avaliaram o uso de polímeros orgânicos em rejeitos de mineração, obtendo resultados positivos em relação à melhoria das propriedades mecânicas dos rejeitos estabilizados e da possibilidade de redução dos efeitos de contaminação.

Nesse contexto, este trabalho propõe a utilização do polímero *High Performance Agglomerate* (HPA) para estabilização de um rejeito de minério de ferro. Foram realizados ensaios de caracterização, de resistência à compressão simples, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e determinação da curva de retenção de água no solo com os teores de 1% e 3% de HPA em tempos de cura de 7 e 28 dias a fim de se verificar a dosagem ótima e tempo de cura ideal. Posteriormente, foi conduzida uma análise dos resultados para verificação da estabilização do material de rejeito de minério de ferro para disposição em pilhas e em outras estruturas geotécnicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

O rejeito de minério de ferro utilizado nesta pesquisa é oriundo da Mina de Pau Branco, localizada em Nova Lima, Minas Gerais. Conforme apresentado no mapa geológico da Figura 2., os litotipos alofrantes são constituídos por itabiritos na porção leste e por filitos na porção oeste pertencente à Formação Cauê e Formação Batatal, respectivamente.

Figura 2.1 - Mapa Geológico – Mina de Pau Branco – MG



A amostra em polpa foi coletada na etapa final de desaguamento, conforme Figura 2.2, com um teor de umidade de campo de 22.93%.

Figura 2.2 - Local de coleta das amostras.

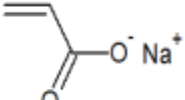


2.2 ESTABILIZANTE HPA

O estabilizante utilizado nesta pesquisa se trata de um tipo de solidificante chamado de High Performance Agglomerate (HPA). Ele é uma mistura de cinzas vulcânicas, compostas em sua maioria por sílica e alumina, e um polímero orgânico do tipo poliacrilato de sódio. Nesta pesquisa os compósitos foram formados por misturas de 20% de cinzas vulcânicas (polímero inorgânico) e 80% de poliacrilato de sódio (polímero orgânico).

A composição química (80%) do polímero orgânico utilizado nesta pesquisa é apresentada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Composição química do acrilato de sódio

Acrilato de sódio		Sintético	Iônico (Aniônico)
-------------------	---	-----------	----------------------

As cinzas vulcânicas utilizadas na mistura (20%) provém da consolidação do magma de vulcões e são extraídas na cidade de Kagoshima, no Japão. O processo de extração é bem simples e consiste, inicialmente, em separar com uma pá escavadeira o material de interesse. Na Figura 2.4 é apresentado o vulcão ativo local.

Figura 2.4 - Vulcão em Atividade em Kagoshima



Fonte: Fontes Geotécnica, 2023

A extração das cinzas é feita por meio de cortes verticais nas montanhas de rochas vulcânicas evitando, desta forma, o acúmulo de água e conseqüente desmoronamento. A cor das cinzas varia conforme a montanha em que foram extraídas. A Figura 2.5 apresenta um dos locais de extração das cinzas.

Figura 2.5 – Local de extração das cinzas vulcânicas

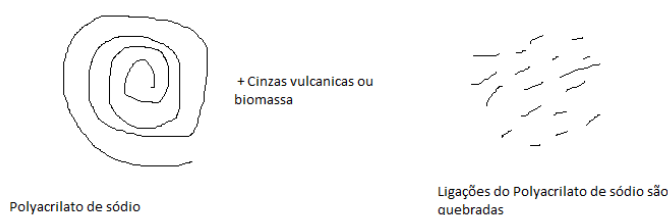


Fonte: Fontes Geotécnica, 2023

Em seguida é feita uma seleção apenas das cinzas que possuem granulometria menor que 590 micromilímetros. Este processo é realizado por meio da passagem das cinzas por peneiras imersas em água. Por fim, a fração selecionada de cinzas passa por uma centrífuga e passa por um processo de secagem à temperaturas entre 400 e 500 °C.

A mistura, na proporção 80/20, que forma o HPA utilizado nos ensaios, é proveniente de fábrica e não foram feitas alterações em sua composição. O poliacrilato tem uma solidificação surpreendentemente rápida quando homogêneo ou sob aspersão de um rejeito com determinada umidade. Já as cinzas vulcânicas ajudam na cimentação, que pode alterar as características mecânicas dos rejeito. Além disso, elas possuem a função de quebrar algumas ligações do poliacrilato na mistura e permitir que a evaporação da água seja mais rápida, uma vez que impede que o poliacrilato reabsorva água após liberá-la. A Figura 2.6 contém um esquema que representa a ação das cinzas vulcânicas sobre o comportamento do poliacrilato de sódio.

Figura 2.6 – Ação das cinzas sobre o poliacrilato de sódio

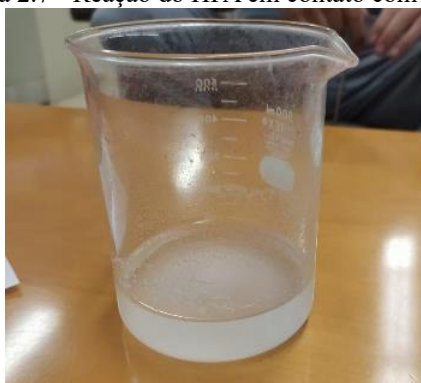


Fonte: Fontes Geotécnica, 2023

Quando o HPA é introduzido em meio aquoso, as unidades iônicas se dissociam e geram densidade de carga ao longo da cadeia, resultando em repulsão eletrostática, que expande o gel e promove o inchamento. Além disso, uma alta concentração de íons é gerada no gel, o que leva a uma diminuição da pressão osmótica devido à diluição da carga, ou seja, ao inchamento do gel (KIATKAMJORNWONG, 2007).

Este polímero possui como característica a alta capacidade de absorção da umidade. De acordo com Jensen (2011), a evaporação da água retida pelo HPA ocorre apenas quando sob o sol e, após esta evaporação o produto é capaz de absorver mais água no meio. A Figura 2.7 ilustra a reação do PSA com água.

Figura 2.7 - Reação do HPA em contato com a água



Pacheco (2020) explica que isso ocorre pela grande afinidade que têm pela água, absorvendo-a pelo mecanismo de osmose na tentativa de equilibrar a concentração de íons sódio dentro e fora do polímero. Em aplicações de engenharia, em sua maioria, os polímeros superabsorventes são poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas, ou poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados (FRIEDRICH, 2012 apud CUNHA E SANTOS, 2016). Os polímeros superabsorventes podem apresentar uma absorção de água de até 5000 vezes o seu próprio peso, mas, em soluções salinas diluídas, sua capacidade de absorção dos produtos comerciais é de aproximadamente 50 g/g (JENSEN E HANSEN, 2001).

2.3 FORMAÇÃO DOS COMPÓSITOS E CAMPANHA EXPERIMENTAL

O polímero HPA é adicionado na matriz de rejeito no seu estado puro e seco, e posteriormente é adicionada água de acordo com a umidade ótima obtida pelo ensaio de compactação. Nesta etapa do estudo, foram feitas dosagens de 1% e 3% de polímero em relação à massa de sólidos da matriz de rejeito. A adição do polímero tem como objetivo melhorar as propriedades da matriz de rejeito, como a capacidade de retenção de água e a resistência mecânica. A dosagem do polímero é um fator importante a ser considerado, pois uma dosagem muito baixa pode não ter o efeito desejado, enquanto

uma dosagem muito alta pode resultar em problemas de processamento e pode afetar negativamente as propriedades da matriz de rejeito.

O processo de moldagem de corpo de prova consiste em coletar uma amostra representativa do rejeito e do polímero, preparar a solução de compósito, preparar um molde e compactar o compósito em camadas sucessivas, utilizando um equipamento de compactação.

Foram moldados corpos de prova para rompimento em compressão simples com as características apresentadas na Tabela 2.1. O rejeito puro foi moldado no teor de umidade ótima (15%) e os compósitos no teor ótimo para 1% (28%). Avaliou-se também o comportamento do compósito no ramo úmido, com o teor de umidade de 35%, para simular as condições de recebimento do rejeito em campo após a saída do filtro prensa.

Tabela 2.1 – Compósitos moldados para ensaios de compressão simples

Amostra	Teor de umidade (%)	Teor de HPA (%)	Tempo de cura (dias)
RP_15W_7D	15	0	7
RP_15W_28D	15	0	28
CP_28W_1%HPA_7D	28	1	7
CP_28W_1%HPA_28D	28	1	28
CP_28W_3%HPA_7D	28	3	7
CP_28W_3%HPA_28D	28	3	28
CP_35W_1%HPA_7D	35	1	7
CP_35W_1%HPA_28D	35	1	28

O processo de moldagem dos corpos de prova consistiu-se, inicialmente, na realização dos cálculos através da massa específica encontrada no ensaio de compactação, para a preparação da quantidade correta de solo, água e polímero, de acordo com o volume do molde utilizado para as cápsulas. O molde possui 3,5 cm de diâmetro e 8,8 cm de altura, 9,62 cm² de área e 85,62 cm³ de volume.

Para a moldagem dos corpos de prova de compósito (CP), o solo destorroado no almofariz e em seguida misturado ao percentual de HPA indicado até que se torne uma mistura homogênea, conforme a Figura 2.8 e Figura 2.9 a seguir. Por fim, foi adicionado o percentual de água equivalente ao teor de umidade investigado – encontrados por meio dos ensaios de compactação para cada um dos compósitos – e feita a correta homogeneização e separação em 3 partes para levar o material ao equipamento de compactação estática, padronizando 7 golpes (giros) por camada.

Figura 2.8– Preparação do compósito para moldagem dos corpos de prova.

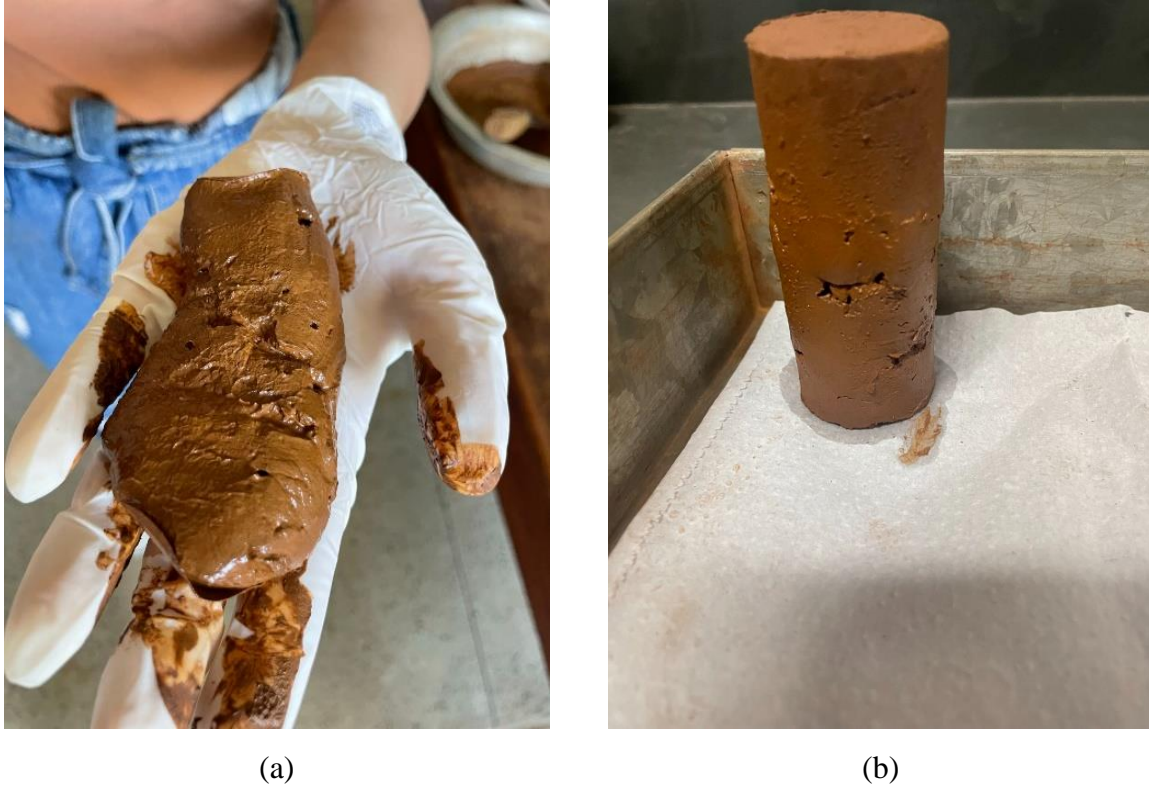


Figura 2.9 – Processo de compactação manual dos corpos de prova.



Para a moldagem dos corpos de prova de rejeito puro, inicialmente foi proposto que os ensaios de compressão simples fossem feitos todos no mesmo teor de umidade para que fosse possível comparar o comportamento da tensão x deformação do compósito e do rejeito puro sob o mesmo percentual de água. Entretanto, durante a moldagem dos corpos de prova com o rejeito puro, notou-se a impossibilidade de realizar a moldagem com 35% de água (ramo úmido) e com 28% de água (umidade ótima do compósito). A Figura 2.10 mostra os corpos de prova moldados com 35% e 28% de água, respectivamente.

Figura 2.10 – Corpos de prova de rejeito puro moldados com teores acima do ótimo: (a) 35%; (b) 28%.



À primeira vista, é possível notar que o corpo de prova moldado com 35% de água não possui consistência o suficiente para o ensaio de compressão simples, visto que, devido ao excesso de água, não foi possível compactar o RP. Já o corpo de prova com 28% de água foi possível de ser moldado e compactado, entretanto, ainda devido ao excesso de água, o corpo apresentou muitas fissuras e fragilidade após 7 dias de cura e, por isso, não foi possível realizar o rompimento à compressão simples com esses com essas umidades.

Sendo assim, foi realizada a moldagem dos corpos de prova de rejeito puro com o teor de umidade ótima do rejeito de 15,5%. Entende-se como viável essa análise, uma vez que no teor ótimo o rejeito puro deve apresentar a estrutura mais estável, e por consequência, maior resistência para ser comparada com o desempenho mecânico dos compósitos.

É importante salientar também que essa situação demonstrou a problemática enfrentada em campo pelas mineradoras, uma vez que com este teor de umidade o material não permite a compactação adequada. Por esta razão, existe a demanda de buscar soluções para secagem do material para disposição em empilhamentos a seco compactados.

2.4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental de ensaios geotécnicos realizada teve como objetivo a caracterização física e mecânica de um solo. Os ensaios realizados foram:

- Caracterização física, que envolveu a determinação das propriedades granulométricas, índice de plasticidade e densidade do solo;

Compactação Proctor normal, que consistiu em determinar a curva de compactação do solo para diferentes teores de umidade;

- Resistência à compressão simples, realizada em triplicata, que permitiu avaliar a capacidade do solo de suportar cargas verticais;
- Curva de retenção de água no solo, que permitiu determinar a quantidade de água retida pelo solo em diferentes potenciais matriciais; e
- Caracterização Mineralógica por meio de imageamento por MEV, que permitiu conhecer as características das partículas do rejeito puro e do compósito.

A realização desses ensaios permitiu obter informações importantes sobre as características do solo em estudo, fornecendo subsídios para a avaliação de sua estabilidade e potencial de uso em obras geotécnicas.

Os compósitos ensaiados serão analisados utilizando a metodologia de experimento “fatorial 2^k ”. Este método avalia o impacto dos fatores k na variável de resposta em dois níveis. Nem todos os fatores podem afetá-lo igualmente e alguns podem não ter nenhum efeito.

O número de pontos experimentais cresce geometricamente com uma razão de 2. O “fatorial 2^k ” é útil para pesquisas para investigar a fim de posteriormente restringir a investigação aos fatores mais relevantes, com várias replicações por ponto experimental (MONTGOMERY, 2017). Estudos como os de Bruschi (2020) e Alelvan (2022) utilizaram a metodologia experimental do fatorial 2^k para estudos similares de estabilização de rejeito, investigando variáveis como: tempo de cura, massa específica, teor de umidade e dosagem de estabilizante.

De acordo com Alelvan (2022), dentre as vantagens de se utilizar o experimento fatorial 2^k , pode ser destacado que trata-se de uma estimativa precisa e que requer menos tempo e recurso do que outros métodos. Além disso, as informações obtidas refletem a resposta de uma região experimental maior, já que cada efeito fatorial é calculado considerando todas as combinações possíveis dos níveis dos outros fatores.

Baseado nesta proposta, adotou-se para essa pesquisa:

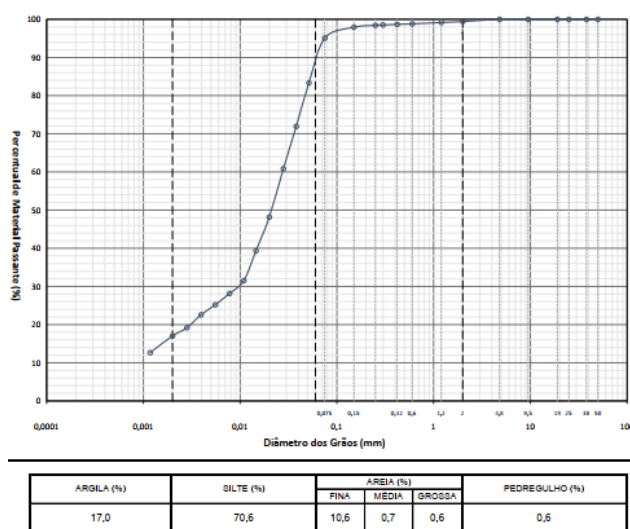
- Variáveis investigadas: teor de umidade ótima dos compósitos; teor de umidade ótima do rejeito puro.
- Variáveis fixas: tipo de rejeito; tipo de estabilizante; teores poliméricos (1% e 3%); tempo de cura (7 e 28 dias); taxa de deformação nos ensaios de compressão simples.
- Variável resposta: resistência a compressão simples (RCS).

3 ENSAIOS E RESULTADOS

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

A curva granulométrica obtida para o rejeito puro é apresentada na Figura 3.1. Observa-se a presença de 16,1% de argila, 75,1% de silte, 8,4% de areia e 0,5% de pedregulho. Desta forma, o rejeito foi classificado como silte argiloso com pouca areia.

Figura 3.1 - Curva granulométrica.



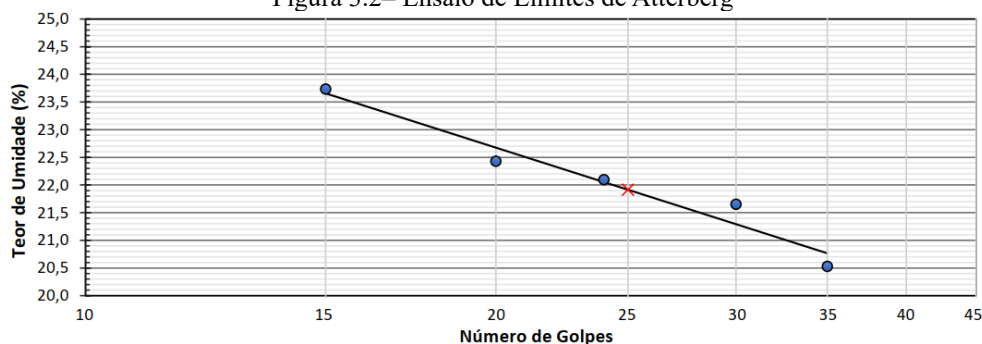
No ensaio de densidade real dos grãos, realizado apenas para o rejeito puro, a massa específica real dos grãos dos rejeitos de minério de ferro resultou em 3,348 g/cm³. Quanto ao teor de umidade, foi calculado os teores das amostras coletadas do filtro prensa 01, filtro prensa 02 e filtro prensa 03. Por sim, realizou-se um *blend* dos rejeitos coletados nos filtros e, assim, calculou-se média das umidades, conforme exposto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Teores de umidade por filtro prensa

FILTRO PRENSA	TEOR DE UMIDADE
01	21,7
02	24,0
03	23,10
MÉDIA	22,93

Sendo assim, teor de umidade natural médio da amostra virgem de rejeito de minério de ferro apresentado nos ensaios de laboratório foi de 22,93%. Por fim, os ensaios de limites de consistência (Atterberg) mostraram aos teores de umidade a partir dos quais há mudança de estado físico do rejeito, sendo estes relevantes para o entendimento do comportamento do material estudado.

Figura 3.2– Ensaio de Limites de Atterberg



Os resultados dos ensaios de limites de liquidez e limite de plasticidade e a determinação dos índices de plasticidade foram de 22%, 18% e 4%, respectivamente, para as amostras de rejeito puro, o que indica, de acordo com a classificação de SOWERS (1965), apresentada na , que o rejeito, com 4% de IP, aproximam-se do comportamento de um solo com grau de plasticidade ligeiramente plástico.

Tabela 3.2 – Grau de plasticidade do solo

IP (%)	DESCRIÇÃO
0 – 3	Não plástico
3 – 15	Ligeiramente plástico
15 – 30	Baixa plasticidade
> 30	Alta plasticidade

Fonte: SOWERS (1965).

3.2 COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL

O ensaio de compactação (Proctor Normal) foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 7182/1986 – Ensaio de Compactação. Através do ensaio obteve-se a densidade máxima do rejeito e do compósito para diferentes teores de umidade. Por meio deste ensaio definiu-se, também, o teor de umidade ótimo conforme a densidade máxima obtida.

O ensaio foi realizado para a amostra de rejeito puro e para as amostras de compósito com 1% e 3% de HPA. Os resultados são visíveis durante a realização do ensaio e podem ser confirmados por meio das curvas de compactação apresentadas na Figura 3.3, Figura 3.4 e Figura 3.5.

Figura 3.3– Curva de compactação – RP
Curva de Compactação

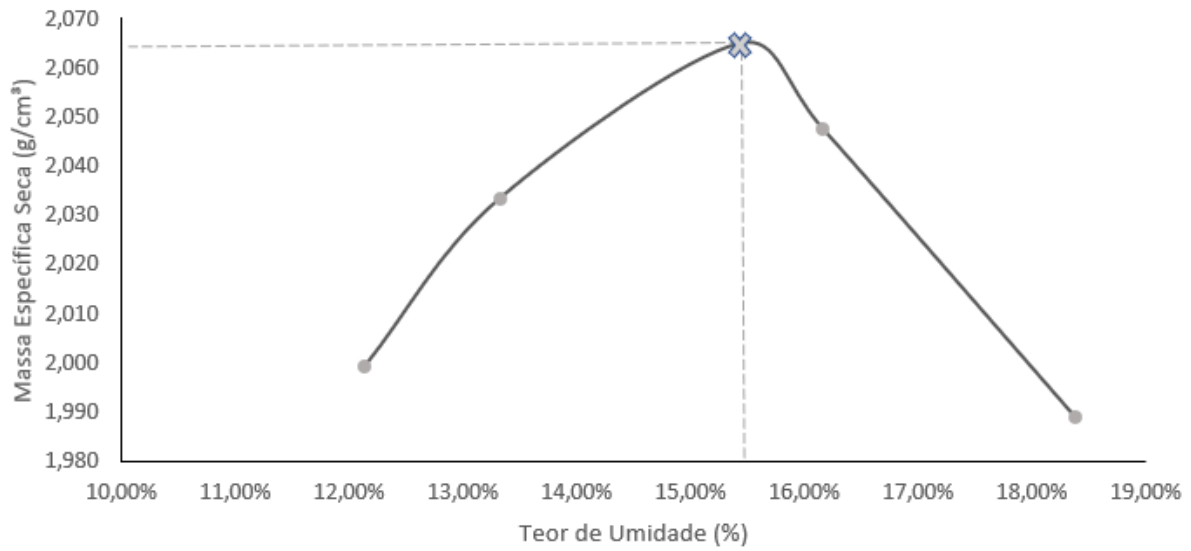


Figura 3.4– Curva de compactação – CP_1%_HPA

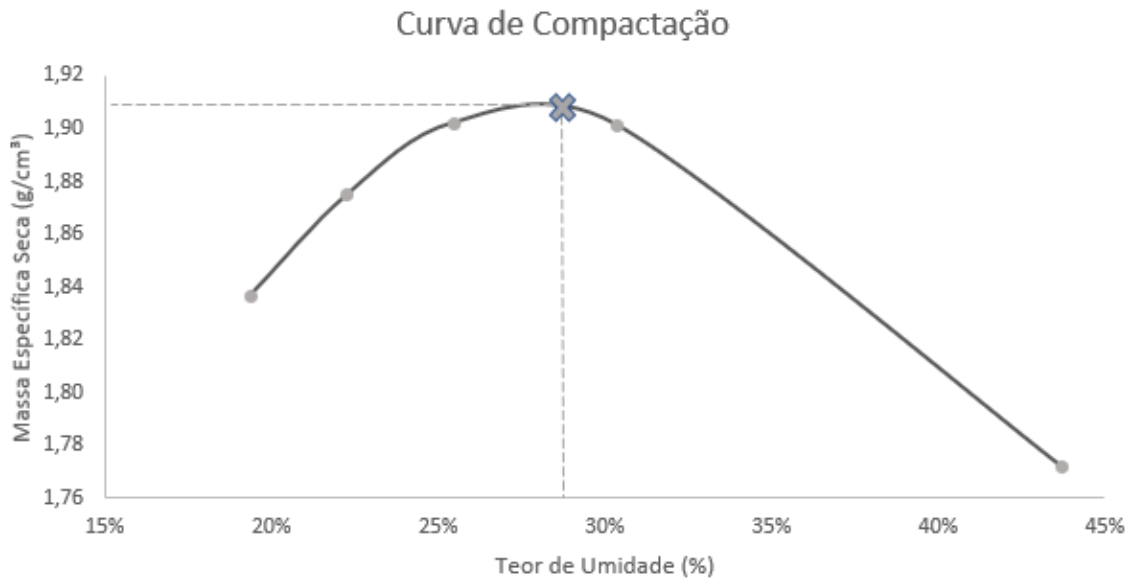
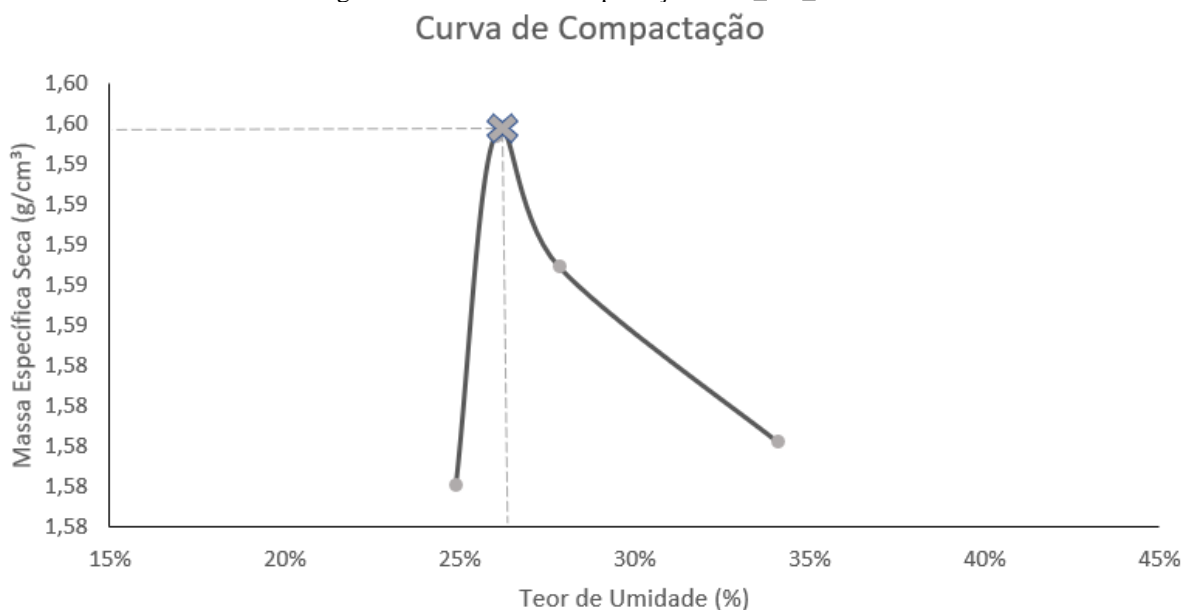


Figura 3.5 – Curva de compactação – CP_1%_HPA



Na Tabela 3.3 são apresentados os valores de teor de umidade e massa específica seca ótimos para os três ensaios realizados.

Tabela 3.3 – Resultados do ensaio de compactação

Amostra	Teor de umidade ótimo (%)	Massa específica seca ótima (g/cm³)
RP	15,5	2,065
CP 1%HPA	28,0	1,91
CP 3%HPA	26,0	1,60

Observa-se que houve alteração, tanto no teor de umidade ótimo, quanto na massa específica seca ótima. Essa alteração pode ser observada a medida em que se realiza o ensaio que, com o aumento do teor de polímero aglomerante, ocorre o aumento do teor de umidade ótimo e a diminuição da massa específica seca. Entende-se que existe uma relação entre a absorção da água pela ação do HPA com o aumento do teor de umidade ótimo.

Em contrapartida, observou-se, para a amostra com 3% de HPA, uma ligeira diminuição do teor de umidade ótimo em comparação com a amostra com 1% de HPA. Ainda assim, a massa específica seca ótima seguiu diminuindo, conforme observado anteriormente. A relação do teor de umidade para esse teor de polímero pode estar relacionada ao excesso de superabsorvente no compósito. O ensaio de compactação, especificamente para o RP_HPA3%, foi de difícil realização, visto que, a medida em que se adicionava água para atingir certo teor de umidade, o polímero agia de forma rápida, absorvendo essa água em partículas de hidrogel e deixando o compósito com um aspecto muito seco. Isso dificultou o ensaio no geral, pois foi necessário iniciar o primeiro ponto da compactação já com um percentual muito alto de água. Entende-se, então, que o teor de polímero de

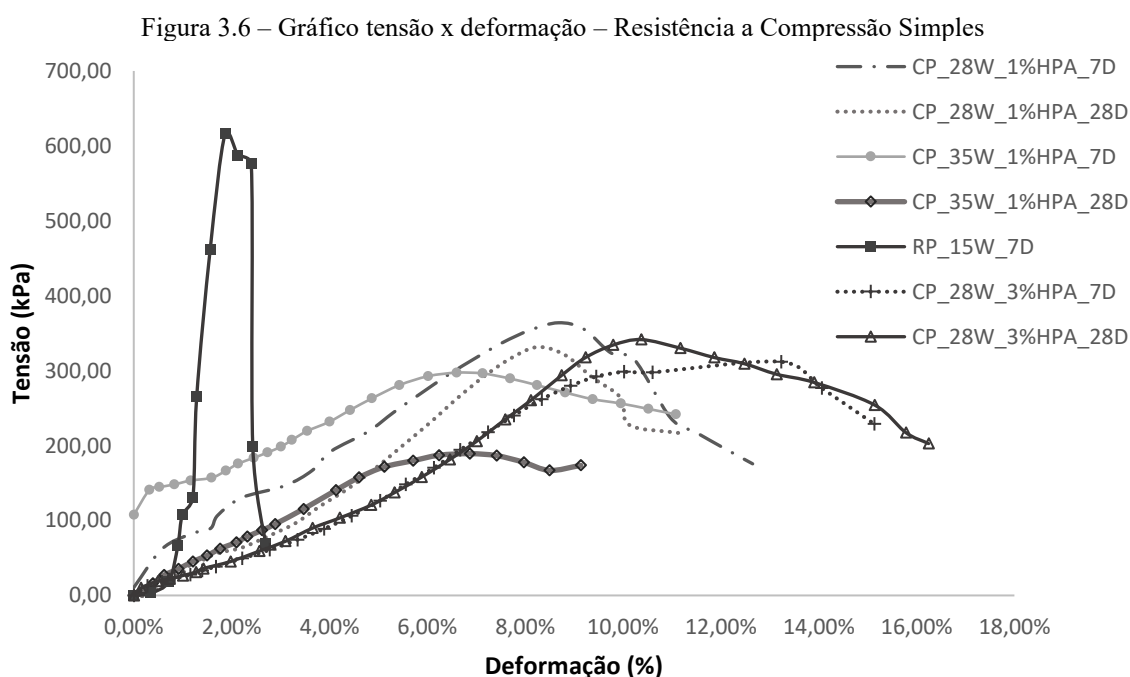
3% gerou essa superabsorção ágil no compósito.

De maneira geral, a ação do polímero superabsorvente no compósito rejeito + polímero provoca a sensação, a olho nu, de secagem do rejeito. Essa secagem forma hidrogéis e aumenta o índice de vazios da mistura, que pode explicar o comportamento de aumento no teor de umidade ótimo com a adição de polímero, uma vez que mostra que o material possui um tempo de hidratação, no qual absorve água até sua capacidade total e depois, no processo de dessorção, libera essa água para o rejeito, deixando vazios em seu interior, conforme ocorre nos ensaios em meio cimentícios feitos por Mönnig (2009).

3.3 COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de compressão simples foram conduzidos variando teores de umidade e de solução. Para o rejeito puro, foi utilizado o teor de umidade ótimo obtido em ensaio de compactação, sendo este 15,5%. Para os compósitos, foi utilizada a umidade ótima do RP_HPA_1%. Além disso, foi feito um ensaio com o teor acima da umidade ótima, sendo esse 35% de água.

A Figura 3.6 apresenta o gráfico tensão x deformação resumo dos resultados para todos os cenários analisados nos ensaios de resistência a compressão simples.

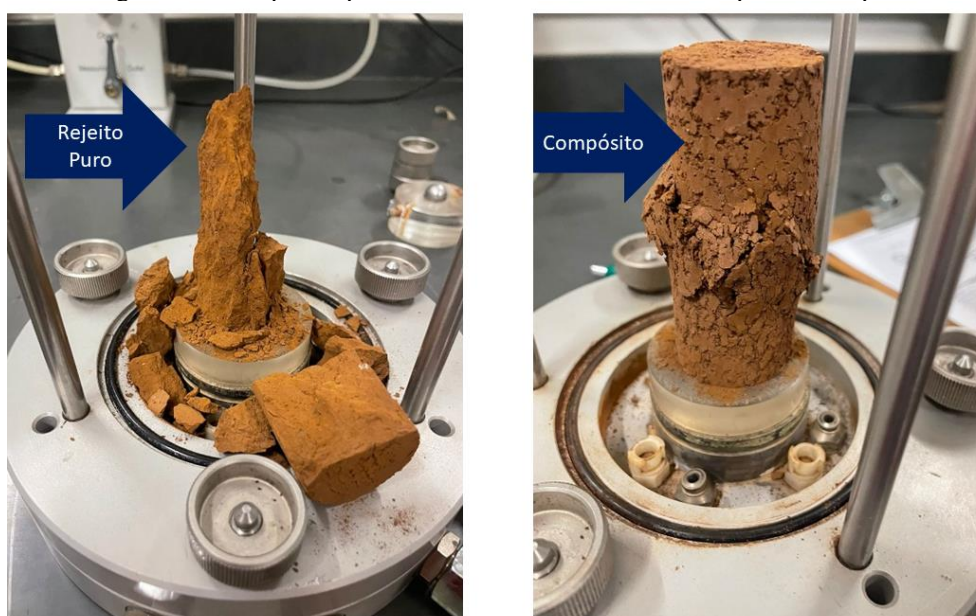


Observa-se, por meio da comparação das curvas tensão x deformação, um comportamento padrão de perda de resistência e ganho de deformabilidade com o aumento do teor de polímero nos compósitos. Além disso, pode-se notar que as amostras com excesso de água (teor de umidade de 35%) em sua composição não apresentaram um comportamento favorável aos compósitos, visto que a perda

de resistência é ainda mais significativa e o ganho de deformabilidade foi menor representativo do que nas demais amostras. Sendo assim, considera-se que a condição adequada para a resistência do compósito é no seu teor de umidade ótimo.

Pelos resultados, é possível constatar que o polímero não possui eficiência para ganho de resistência, entretanto, melhora as propriedades de deformabilidade, garantindo um comportamento elastoplástico para o polímero. Na curva do ensaio de rejeito puro, bem como durante o processo de compressão, foi possível observar o comportamento frágil do rejeito, característico do material. A medida em que se adiciona HPA, a trabalhabilidade do compósito melhora e, com isso, garante-se maiores capacidades de deformação. Além disso, diante das análises gráficas, não foi possível notar mudança de comportamento significativas diante do teor de polímero e tempo de cura. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os corpos de prova de rejeito puro e compósito após a ruptura do ensaio.

Figura 3.7 – Corpos de prova no ensaio de resistência a compressão simples



A Figura 3.7 mostra nitidamente a diferença dos corpos de prova de rejeito puro e de compósito e seu comportamento diante da compressão de carga. Conforme mencionado, o corpo de prova de rejeito puro tem comportamento notoriamente mais frágil e menor capacidade de deformação, uma vez que se rompe por inteiro diante da aplicação de carregamentos. Por outro lado, o corpo de prova do compósito, mesmo após o rompimento, não sofre deformações tão excessivas quanto o rejeito puro, o que demonstra a deformabilidade que o polímero confere ao rejeito. Além disso, é possível observar um aspecto mais poroso no compósito se comparado ao rejeito puro, devido ao aumento do índices de vazios conferido pelo aglomerante. Isso também explica a diminuição da resistência a compressão dos compósitos.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para avaliar a influência dos fatores (teor de polímero e tempo de cura) nas variáveis, foi feita uma análise estatística no software RStudio, baseada na metodologia de fatorial 2k, onde foram fixadas as variáveis de teor de solução e tempo de cura. Este método avalia o impacto dos fatores k na variável de resposta em dois níveis. Nem todos os fatores podem afetá-lo igualmente e alguns podem não ter nenhum efeito.

O número de pontos experimentais cresce geometricamente com uma razão de 2. O “fatorial 2k” é útil para pesquisas para investigar a fim de posteriormente restringir a investigação aos fatores mais relevantes, com várias replicações por ponto experimental (MONTGOMERY, 2017). Estudos como os de Bruschi (2020) e Alelvan (2022) utilizaram a metodologia experimental do fatorial 2k para estudos similares de estabilização de rejeito, investigando variáveis como: tempo de cura, massa específica, teor de umidade e dosagem de estabilizante.

De acordo com Alelvan (2022), dentre as vantagens de se utilizar o experimento fatorial 2k, pode ser destacado que trata-se de uma estimativa precisa e que requer menos tempo e recurso do que outros métodos. Além disso, as informações obtidas refletem a resposta de uma região experimental maior, já que cada efeito fatorial é calculado considerando todas as combinações possíveis dos níveis dos outros fatores.

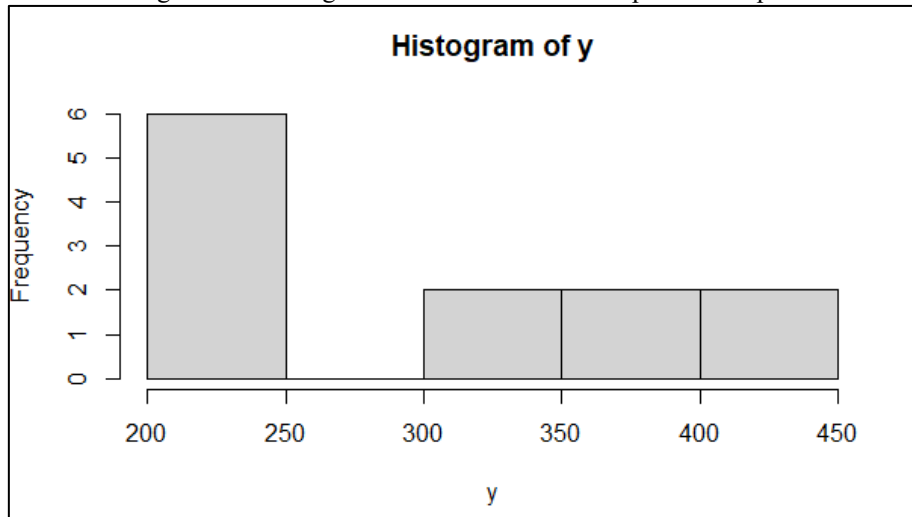
A análise estatística levou em conta a variação dos teores de HPA de 1% e 3% para os tempos de cura de 7 e 28 dias. Os tratamentos de dados utilizados na matriz de entrada estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados de compressão simples para tratamento estatístico

Tratamento	Teor de Polímero (%)	Tempo de Cura (dias)	Resistência a Compressão Simples (kPa)	Média
1	1	7	347,79	326,99
	1	7	229,90	
	1	7	403,29	
2	1	28	239,06	230,92
	1	28	229,71	
	1	28	224,00	
3	3	7	242,18	336,42
	3	7	365,87	
	3	7	401,21	
4	3	28	238,44	307,11
	3	28	358,60	
	3	28	324,30	

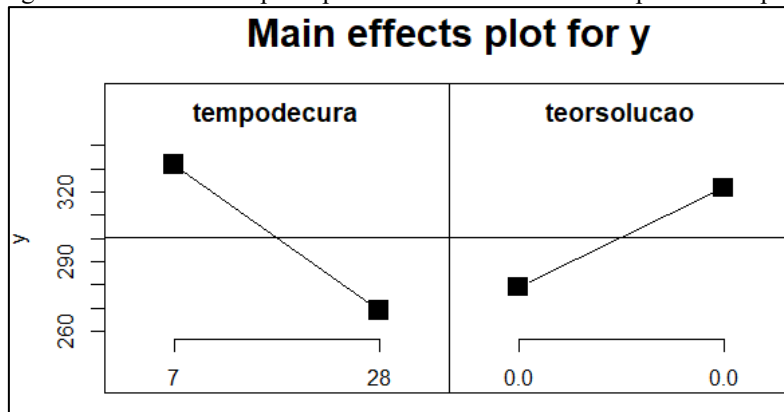
Os dados de resposta das análises estatísticas são apresentados nas figuras a seguir (Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10).

Figura 3.8– Histograma dos resultados de compressão simples



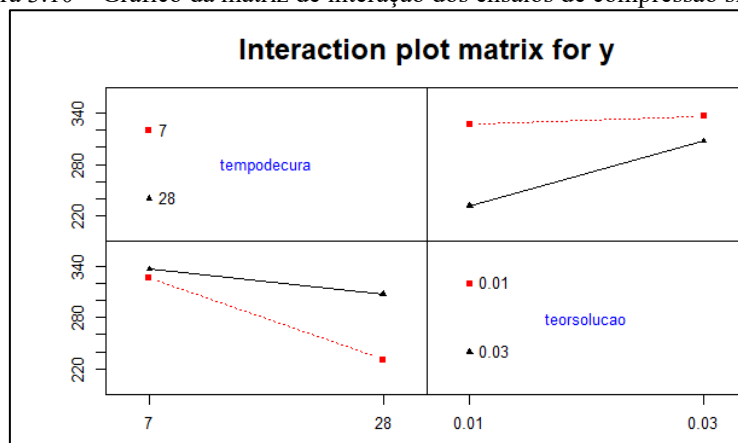
Fonte: Gráfico gerado no RStudio.

Figura 3.9– Gráfico dos principais efeitos do ensaio de compressão simples



Fonte: Gráfico gerado no RStudio.

Figura 3.10 – Gráfico da matriz de interação dos ensaios de compressão simples



Fonte: Gráfico gerado no RStudio.

As análises estatísticas mostraram que a matriz de resultados dos ensaios de resistência à compressão simples variando teor de polímero (1% e 3%) e tempo de cura (7 e 28 dias) não seguem uma distribuição normalizada. O resultado era esperado diante do comportamento dos ensaios

apresentados até então. A não normalização das funções estatísticas indicam, conforme já mencionado, que as variáveis utilizadas na análise não influenciam na variável resposta do ensaio de resistência a compressão simples. Ou seja, o teor de polímero e o tempo de cura não influenciam no ganho de resistência dos compósitos.

3.5 ENSAIO DE ADENSAMENTO

O ensaio de adensamento foi conduzido para o rejeito puro e para a amostra de CP_1%_HPA com 7 dias de cura. Na Figura 3.11 e Figura 3.12 são apresentadas as curvas que relacionam o índice de vazio e a tensão de adensamento, para as amostras RP e CP_1%_HPA.

Figura 3.11 - Relação índice de vazios e tensão de adensamento – RP.

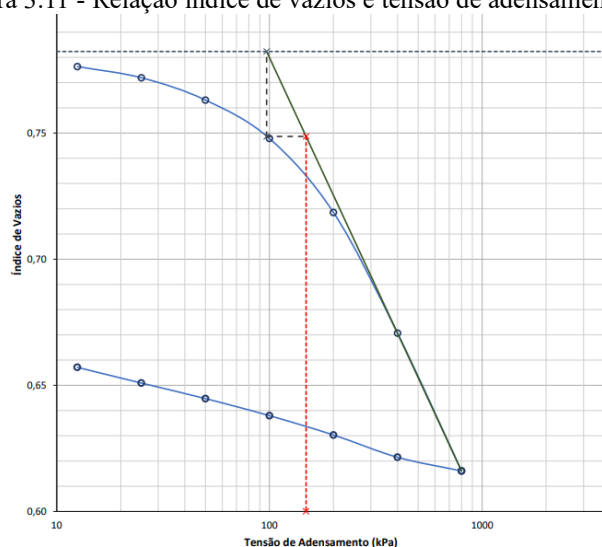
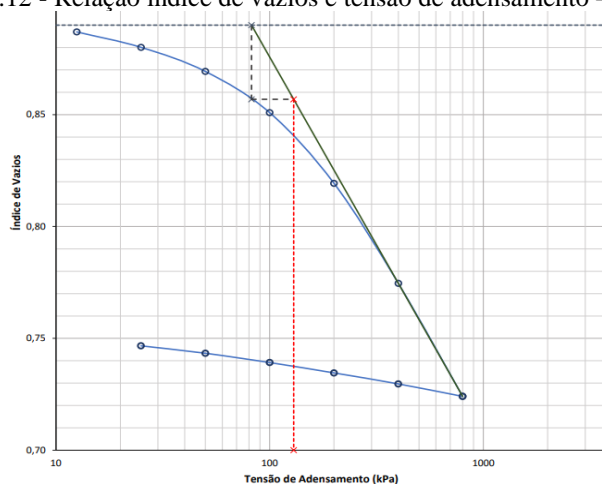


Figura 3.12 - Relação índice de vazios e tensão de adensamento – RP_HPA4



Os resultados dos ensaios de adensamento mostraram um aumento do índice de vazios na mistura com polímero. Essa informação, atrelada aos resultados dos ensaios de compactação, mostram que o material possui um tempo de hidratação, em que absorve a água até sua capacidade total e depois,

no processo de dessorção, libera essa água para o rejeito, deixando vazios em seu interior, conforme fora observado por Mönnig (2009) em seus estudos em meios cimentícios.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A caracterização mineralógica é um processo fundamental para o estudo de materiais geotécnicos, especialmente quando se trata de resíduos da mineração. Nesse contexto, foi realizada a caracterização mineralógica do rejeito de minério de ferro para estudar a utilização do polímero HPA aglomerante como técnica de estabilização e solidificação por meio de imageamento através de microscópios eletrônicos de varredura.

Os microscópios eletrônicos de varredura (MEV) possuem princípio de funcionamento baseado na emissão de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro e alta energia, explorando ponto a ponto a superfície da amostra a ser analisada, estando a mesma submetida ao vácuo.

O MEV proporciona informações da morfologia e identifica elementos químicos de uma amostra, sendo um dos instrumentos mais indicados para análises de características microestruturais de objetos sólidos. Outra vantagem desse ensaio, é a possibilidade de obtenção das características tridimensionais das amostras estudadas (DEDAVID et al. 2007).

Foram realizadas análises em microscópios eletrônicos para detalhamento da morfologia e disposição das partículas do rejeito virgem, tratado e da amostra de HPA pura. As amostras foram posicionadas nos cilindros e inseridas no microscópio a vácuo e as imagens visualizadas podem ser vistas da Figura 3.13 até Figura 3.18.

Figura 3.13 – MEV – Amostra RP - 50 μm

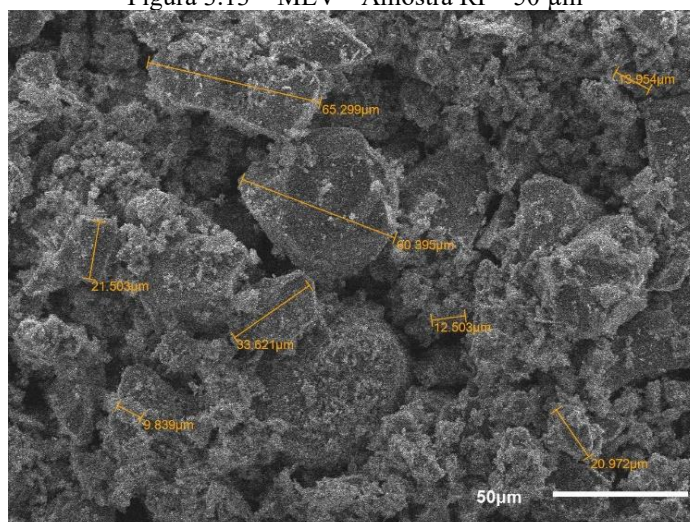


Figura 3.14 – MEV – Amostra HPA - 200 μm

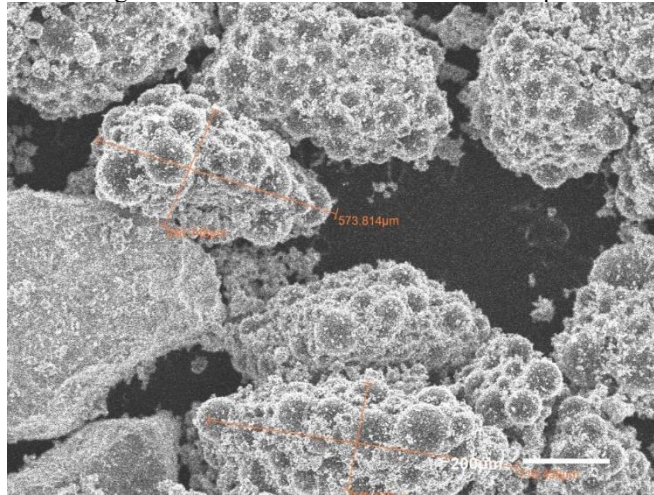


Figura 3.15 – MEV – RP HPA 1% - 50 μm

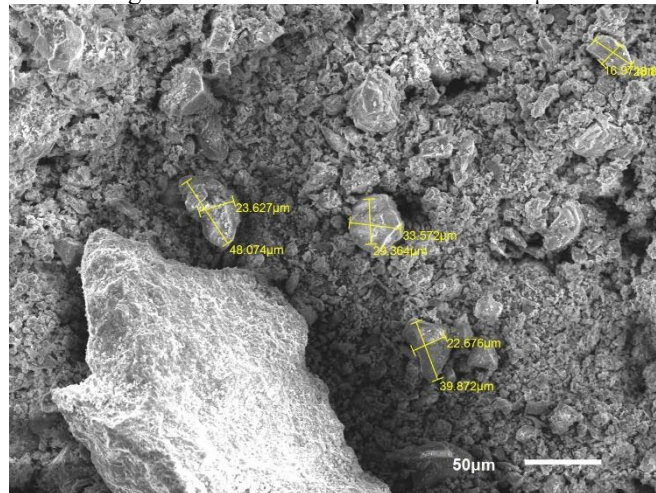


Figura 3.16 – MEV – RP HPA 1% - 200 μm

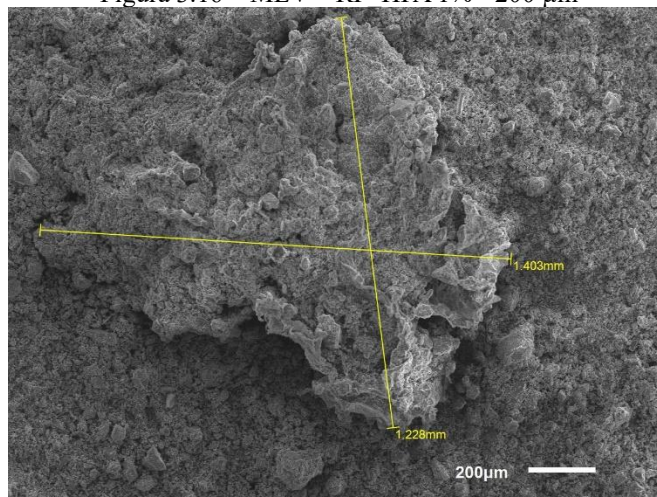


Figura 3.17 – MEV – RP HPA 3% - 50 μm

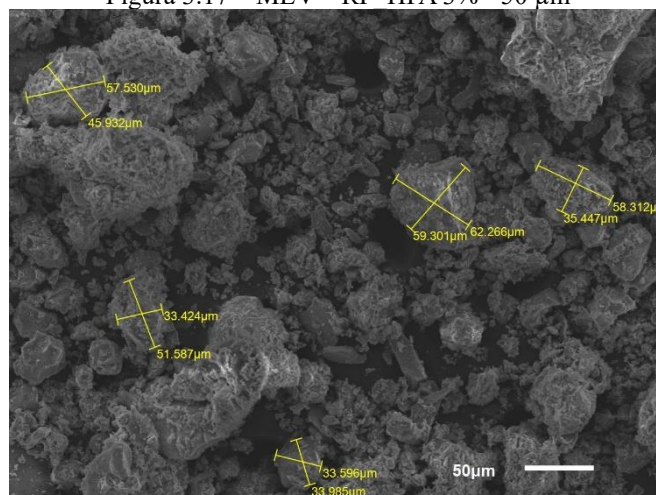
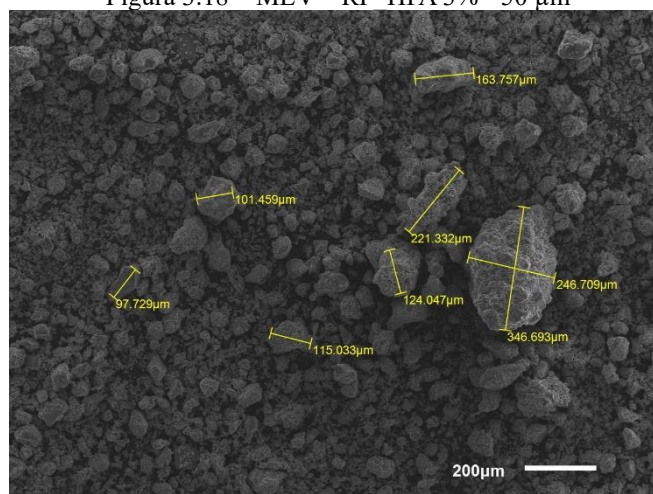


Figura 3.18 – MEV – RP HPA 3% - 50 μm



Observa-se, pelo imageamento, que as partículas do rejeito possuem estrutura laminares, que se dispõe segundo um plano horizontal e não tendem a se apresentar alta porosidade e esferas arredondadas. Esse comportamento indica que a espessura das partículas do rejeito de minério de ferro é pequena, o que é confirmado pela Figura 3.13, que mostra o tamanho das partículas considerando a escala de 50 μm .

À primeira vista, é possível notar que as partículas de HPA são consideravelmente maiores do que as partículas do rejeito estudado, mas, na verdade, podem ser aglomerações no HPA, que, conforme observado pelas curvas granulométricas, podem ter se aderido à fração fina do rejeito, formando partículas maiores. Ademais, a estrutura dos grãos se apresenta em textura botrioidal, com sua forma externa composta por vários elementos arredondados. Essa forma está relacionada ao crescimento do mineral a partir principalmente de soluções coloidais. Neste sentido, seria interessante realizar ensaios como de perda de massa por imersão, a fim de se analisar o comportamento das amostras tratadas quando em contato com a água.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliados os efeitos da estabilização química de um rejeito de minério de ferro utilizando um polímero superabsorvente, composto por 80% de poliacrilato de sódio e 20% de cinzas vulcânicas. A intenção era avaliar os efeitos da mistura quanto ao teor de polímero e tempo de cura. Para isso foram formados compósitos com 1% e 3% de polímero para tempos de cura de 7 e 28 dias.

O rejeito de minério de ferro estudado é proveniente da Mina Pau Branco e, atualmente, o rejeito sai do processo de filtro prensa com cerca de 22% teor de umidade, o que inviabiliza qualquer tipo de disposição sem passar por processos de estabilização ou secagem. Sendo assim, uma alternativa apresentada foi a “secagem” do rejeito com o polímero absorvente HPA (*High Performance Agglomerate*), que visa melhorar as capacidades de trabalhabilidade do rejeito para disposição.

Tendo em vista as necessidades apresentadas, foram feitos ensaios de laboratório, tanto com o rejeito puro quanto com os compósitos formados com os teores de polímero, para comparar os comportamentos do rejeito e compósito.

Os resultados de laboratório para o RP auxiliaram no entendimento do tipo de solo, demonstrando a viabilidade do estudo proposto. Com os ensaios de caracterização completa, obteve-se as seguintes conclusões:

- O ensaio de granulometria mostrou que o material é classificado como um silte argiloso com pouca areia. Sua consistência é fina e pegajosa devido à alta porção de silte e argila, o que dificulta a drenagem e compactação do material, além de sua alta capacidade de retenção de água, que pode afetar a estabilidade e resistência.
- Os ensaios de Limites de Atterberg, permitiram avaliar o RP por meio das suas propriedades de consistência, principalmente no tocante à granulometria e compressibilidade. Os resultados apresentaram valores de limites de liquidez e limite de plasticidade e índices de plasticidade foram de 22%, 18% e 4%, respectivamente, o que classifica o solo como não plástico. Este resultado, atrelado à composição granulométrica do RP mostram que o material pode ser moldado ou deformado em estado úmido, mas podem rachar ou retrair quando secos.

O ensaio de compactação na energia de proctor normal foi realizado para o rejeito puro e para os compósitos nos teores de 1% e 3%, com a finalidade de comparação e entendimento da ação do polímero superabsorvente na presença de água. Os resultados mostraram que, com a adição do HPA, a tendência do rejeito é se tornar um material visivelmente mais seco, exercendo a uma solicitação maior de água para atingir a umidade ótima de compactação. O mesmo ocorre com a massa específica seca que diminui com a adição de polímero.

Na caracterização mineralógica dos materiais de interesse, foram feitos ensaios MEV, com a finalidade de vislumbração das partículas, tanto do rejeito e compósito, quanto do HPA puro. À primeira vista, é possível notar que as partículas de HPA são consideravelmente maiores do que as partículas do rejeito estudado, mas, na verdade, podem ser aglomerações no HPA, que, conforme observado pelas curvas granulométricas, podem ter se aderido à fração fina do rejeito, formando partículas maiores. Ademais, a estrutura dos grãos se apresenta em textura botrioidal, com sua forma externa composta por vários elementos arredondados. Essa forma está relacionada ao crescimento do mineral a partir principalmente de soluções coloidais. Neste sentido, seria interessante realizar ensaios como de perda de massa por imersão, a fim de se analisar o comportamento das amostras tratadas quando em contato com a água.

Esses comportamentos nas curvas de compactação, tanto em relação ao teor de umidade ótimo quanto de massa específica seca, ocorrem pois o HPA é um polímero capaz de absorver e reter grandes porcentagens de água em relação à sua massa de solo. A estrutura química do HPA, em especial, forma ligações com moléculas de água que formam hidrogéis hidratados, que tratam-se do encapsulamento da água adicionada à mistura.

Para compreender o comportamento mecânico das amostras, foram feitos ensaios de resistência a compressão simples para o rejeito puro e compósitos. A finalidade inicial era verificar a possibilidade de ganho de resistência para possíveis aplicações de disposição do em pilha de rejeitos. A mudança dos comportamentos físicos dos compósitos, mostrando que eles possuem melhor trabalhabilidade do que o rejeito em condição pura, demonstra a possibilidade desse tipo de aplicação para o material. Entretanto, os resultados dos ensaios de resistência a compressão simples revelaram as seguintes conclusões:

- O rejeito puro apresentou comportamento frágil, visível tanto na curva tensão x deformação quanto diante da realização dos ensaios. As amostras romperam em um curto tempo, conjuntamente ao aparecimento rápido de trincas e ao esfarelamento do corpo de prova diante da aplicação de baixas tensões;
- Por outro lado, os compósitos apresentaram deformabilidades significativamente maiores. Enquanto os corpos de prova de rejeito puro romperam em 3 minutos de ensaio, os compósitos romperam em uma média de 25 minutos. Além disso, mesmo após o rompimento, o corpo de prova não se desfez por completo, mantendo sua estrutura ainda estável em alguns pontos. Em relação à deformação de ruptura, enquanto o RP apresentou valores na faixa de 2 a 3%, os compósitos apresentaram essa faixa em uma média de 15 a 18%, aumentando conforme a adição de HPA.
- Apesar de maior deformabilidade, os compósitos apresentaram valores de tensão de ruptura inferiores às amostras de RP. Essa tendência pode estar relacionada ao fato de que



no geral, os SAP, ao absorverem a água presente no rejeito, formando as partículas de hidrogel, suscitam na atenuação da coesão entre as partículas, que passam a ter menor capacidade de interligação.

Outras conclusões a respeito dos ensaios de resistência a compressão simples referem-se às análises de teor de solução e tempo de cura ótimo. Para determinar uma faixa de valores onde o material apresentou melhores comportamentos, foi feita uma análise estatística por uma linguagem programada através do software RStudio. Essa análise utilizou a metodologia experimental de fatorial 2k, onde foram fixadas as variáveis de teor de solução e tempo de cura.

As análises estatísticas mostraram que a matriz de resultados dos ensaios com essas variáveis não seguem uma distribuição normalizada. O resultado era esperado diante do comportamento dos ensaios apresentados até então. A não normalização das funções estatísticas indicam, conforme já mencionado, que as variáveis utilizadas na análise não são influência para o ensaio de resistência a compressão simples. Ou seja, o teor de polímero e o tempo de cura não influenciam no ganho de resistência dos compósitos.

Por fim, diante dos resultados obtidos durante a pesquisa, entende-se que o polímero superabsorvente com adição de cinzas vulcânicas (HPA) possui propriedades significativas para utilização em um rejeito de minério de ferro. Essas aplicações podem ser feitas, atreladas às dosagens e umidades adequada, em melhorias da estabilidade, controle de erosão, melhoria da compactação e redução de umidade após processo de filtro prensa. Todavia, vale ressaltar que os comportamentos podem variar dependendo das características do rejeito de minério de ferro empregado. Assim, é recomendável realizar estudos e testes para avaliar a viabilidade e os benefícios dos compósitos em cada caso.



REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 7181 (1984). Solo - Análise Granulométrica: Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, RJ-Brasil.
- ABNT NBR 7182:1986. (1986). Solo - Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, RJ-Brasil.
- ALMEIDA, F. C. R. New generation of high performance cementitious materials: application of SAP in PC-GGBS matrices. 2018. Tese de Doutorado. Glasgow Caledonian University.
- ALMEIDA, J., et al. (2020). Avaliação da substituição de altos teores de cimento portland por cinza de casca de arroz quando aplicados à pavimentação. *Holos Environment*, 20(4), 476–495.
- ALELVAN, G. M. (2022). Análise Mecânica e Microestrutural de Rejeito de Minério de Ouro Estabilizado com Solução Polimérica. Tese de Doutorado, Publicação G.DM - 162/22 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. *D 5298*: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. 2010. 6p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 6836. Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. 2002. 19p.
- ASSMANN, A. Physical Properties of Concrete Modified with superabsorbent polymers. Tese doutorado, Universidade de Stuttgart, Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental. Alemanha, 2013.
- BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; SANTOS, W.O.; FREIRE, F. G. C.; COSTA, F. G. B. Empirical models for estimating water retention curves in soil in Janaúba-MG, Brazil. *Idesia*. v. 30. 71-76 p. 2012.
- BERTOLINI, M. S. et al. Estabilização química de solos com polímeros superabsorventes. *Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 5, p. 999-1007, 2016.
- BRUSCHI, G. J. Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- CARNEIRO, A. A. (2020). Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno. Tese de Doutorado, Publicação G.DM- 162/20 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p.
- CASAGRANDE, M. D. T. Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações. PhD Thesis. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- CONSOLI, N. C., PRIETTO, P.D.M., ULBRICH, L.A. (1999) The behaviour of a fibre-reinforced cemented soil. *Ground Improvement*, 3, 21-30.



CONSOLI, N. C. et al. Use of Sustainable Binders in Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 06018023, 2019. a. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002571>

DEDAVID, B. A. et al. *Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostra*. Centro de Microscopia Eletrônica e Microanálise, PUCRS. Porto Alegre, 2007.

FRIEDRICH, S. Superabsorbent Polymers (SAP). In: RILEM TC 225-SAP. *Application of superabsorbent polymers in concrete construction*. London: Ed. Springer, 2012. Cap. 3.

FRIEDRICH, S. V. Superabsorbent polymers (SAP). In: MECHTCHERINE, V. *State of the art report of RILEM technical committee 225-SAP*. [S.l.]: RILEM, 2012. Cap. 3.

JENSEN, O.M. Water Absorption of Superabsorbent Polymers in a Cementitious Environment. In: *International RILEM Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering*, C. Leung and K.T. Wan, eds., RILEM Pro079, pp. 22-35, 2011.

JENSEN, O. M., & HANSEN, P. F. *Water-entrained cement-based materials I . Principles and theoretical background*, 2001. PP. 647-654.

KIATKAMJORNWONG, S. Superabsorbent polymers and superabsorbent polymer composites. In: *Science Asia*, v. 33 (Supplement 1), pp. 39-43, 2007.

KOERNER, Robert M. *Designing with geosynthetics*. Vol. 1. Xlibris Corporation, 2012.

LING, I.; LESHCHINSKY, D.; TATSUOKA, F. *Reinforced soil engineering: advances in research and practice*. Marcel Dekker Inc.; 2003.

LOTTERMOSER, Bernd; LOTTERMOSER, Bernd G. *Tailings. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*, p. 205-241, 2010.

MÖNNING, S. (2009). *Superabsorbing Additions In Concrete - Applications, Modelling and Comparison of Different Internal Water Sources*. Stuttgart: Doktor thesis, Fakultät Bauund Umweltingenieurwissenschaften der Universität, 168 p.

MUDD, Gavin M. The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. *Resources Policy*, v. 35, n. 2, p. 98-115, 2010.

PACHECO, Caroline Valadão. *Concreto aditivado com pseudoboemita e poliacrilato de sódio*. 2020. 95 f. Tese (Engenharia de Materiais e Nanotecnologia) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2020.

ROJAS, M.A., et al. Mecanismo de atuação dos polímeros superabsorventes na hidratação de materiais cimentícios. IBRACON – Congresso Brasileiro do Concreto. 2014.

SANTOS, Thyala Anarelli Cunha e. *Estudo da adição de polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência*. 2016. 145 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)—Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SOWERS, G.G. Consistency. In: BLACK, C.A. *Methods of soil analysis*. Madison, Amer. Soc. Agron. 1965. Cap. 31, p.391-9 (Agronomy, 9).



SILVA, F. A. et al. Utilização de resíduos industriais como aditivos na estabilização de solos. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2015.

SILVA, N.A.B.S. (2020). Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM339/20 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

SILVA, R. V.; BRITO, J. De; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 236, p. 117629, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>

SOTOMAYOR, J. M. G. (2018). Avaliação do comportamento mecânico drenado e não drenado de rejeitos de minério de ferro e de ouro reforçados com fibras de polipropileno. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 184 p.

TALIB, M. K. A.; NORIYUKI, Y. Highly organic soil stabilization by using sugarcane bagasse ssh (SCBA). *ISCEE*, [s. l.], v. 103, p. 1–8, 2017.