

## **DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE BACKFILL DE REJEITO DE CARVÃO EM FASE DE CONSOLIDAÇÃO FINAL EM MINA SUBTERRÂNEA DE CARVÃO**

**Graziela Torres Rodrigues de Oliveira<sup>1</sup>**

**Marcio Zanuz<sup>2</sup>**

**Roberto Heemann<sup>3</sup>**

**Resumo:** A atividade de mineração de carvão no sul do Brasil desempenha um importante papel na sociedade, economia e meio ambiente. A deposição de rejeitos em superfície demanda significativo investimento de tempo e recursos financeiros em projetos e licenciamento ambiental. A ACP da Segurança Estrutural somou-se a este contexto, tendo na tecnologia de enchimento mineral ou “*backfill*” uma técnica capaz de garantir não só a estabilidade de longo prazo dos pilares, mas também a diminuição dos efeitos do enchimento pós-mina, especialmente para a redução do risco de ocorrência de potenciais surgências, durante a operação e após o seu fechamento. Objetivando contribuir com os aspectos acima e em consonância com o processo de Transição Energética Justa – TEJ, este trabalho avaliou a permeabilidade e o comportamento mecânico de amostras de *hydraulicfill* puro de rejeito de carvão em processo de consolidação final em uma mina subterrânea de carvão em Santa Catarina. Foi possível concluir que o *hydraulicfill* puro se comporta como isolante hídrico, contribuindo positivamente no contexto hidrogeológico pós-fechamento da mina. No aspecto estrutural, o confinamento dos pilares promovido pelo *hydraulicfill* puro promove a integridade do teto e dos pilares, atuando como reforço estrutural no curto, médio e longo prazos.

**Palavras-chave:** Backfill. Permeabilidade. Rejeito de carvão. Segurança estrutural.

### **1 INTRODUÇÃO**

A atividade de mineração de carvão no sul do Brasil desempenha um importante papel na sociedade, economia e meio ambiente, principalmente na geração de energia elétrica no Complexo Termoelétrica Jorge Lacerda (CTJL). Todavia essa mesma atividade gera uma significativa quantidade de resíduos sólidos ou subprodutos oriundos do processo de beneficiamento de carvão. Estes resíduos

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia de Minas, 2023. E-mail: graziela.torresrodrigues@gmail.com

<sup>2</sup> Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: marcio.zanuz@satc.edu.br

<sup>3</sup> Geólogo da Carbonífera Catarinense Ltda. E-mail: robertoheemann@carboniferacatarinense.com.br



sólidos são comumente armazenados em depósitos de rejeitos sólidos licenciados pelo Instituto de Meio Ambiente (IMA). Este tipo de deposição demanda a utilização de áreas em superfície, significativo investimento de tempo e recursos financeiros em projetos e licenciamento ambiental para atender as crescentes exigências ambientais, incluindo também o monitoramento após a deposição, além dos austeros controles operacionais.

Segundo o Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC) no ano de 2022 foram produzidas no estado do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul 11.528.892 toneladas de carvão bruto ou ROM (run-of-mine), totalizando 6.586.150 toneladas de carvão vendável. No estado de Santa Catarina foram 6.152.365 toneladas de carvão bruto, sendo 2.270.416 toneladas de carvão vendável, permitindo estimar que foram geradas aproximadamente 3.881.949 toneladas de rejeitos.

A sociedade e as empresas, em sinergia, têm dispendido esforços conjuntos junto as entidades de fiscalização e governos para alcançar uma maior sustentabilidade do setor industrial. Por essa razão as legislações e normas vem se tornando cada vez mais restritivas, demandando pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) de metodologias para que a cadeia produtiva do carvão fortaleça os pilares da sustentabilidade (social, ambiental e econômico) e se mantenha ativa, contribuindo para a economia e melhoria da qualidade de vida da sociedade.

Desde 2013, em Santa Catarina, a abertura ou ampliação de minas tem enfrentado um novo desafio, uma vez que há uma exigência legal de que sejam apresentadas garantias prévias (caução) para cobertura de eventuais danos estruturais e ambientais decorrentes da lavra de carvão em subsolo no âmbito ACP da Segurança Estrutural (nº 000022-79.2010.404.7204). Durante as discussões sobre as medidas para a redução desses danos, a tecnologia de enchimento mineral ou "*backfill*" despontou como uma técnica capaz de garantir não só a estabilidade de longo prazo dos pilares, mas também a diminuição dos efeitos do enchimento pós-mina, especialmente para a redução do risco de ocorrência de potenciais surgências, durante a operação e após o seu fechamento. Esta tecnologia foi utilizada de forma pioneira na região em 2002, na Mina Bonito-1, localizada no município de Lauro Müller-SC e de propriedade da Carbonífera Catarinense Ltda. (Heemann e Costa, 2008).



Em paralelo a esse debate, foi desencadeado, a partir de dezembro de 2020, um processo de discussão e planejamento de ações que visam a transformação da matriz energética primária em direção a uma economia de baixo carbono. A este processo deu-se o nome de Transição Energética Justa – TEJ (Lei Estadual nº 18.330 e a Lei Federal nº 14.299, ambas de 5 de janeiro de 2022).

Portanto, há um planejamento de ações ligadas ao setor carbonífero para viabilizar a Transição Energética Justa, dentre as quais a geração de energia elétrica a partir do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda (CTJL) até pelo menos 2040, o que demanda, por consequência, a manutenção, abertura e ampliação de minas de carvão, sob pena de não ocorrer geração energética prevista em contrato e fundamental para o estado de SC e também a almejada valorização dos recursos energéticos e minerais do Estado, como previsto na Lei Federal nº 14.299/2022.

Com todo esse cenário, uma das importantes ações que devem ser ampliadas e estudadas para alcançar os objetivos estratégicos do setor é a utilização do *backfill*. O enchimento mineral além de servir como suporte estrutural adicional a mina, evita que ocorra o decaimento de pilares preservando os seus fatores de segurança originais, permite armazenar o resíduo gerado no processo de beneficiamento de forma segura e sustentável, e também contribui para reduzir a geração de drenagem ácida de mina (DAM), atuar na recuperação de pilares e permitir o aumento da taxa de extração de minério.

Atualmente existe uma expressiva discussão em torno da segurança estrutural das minas subterrâneas de carvão, referente a longevidade dos pilares, originando o questionamento sobre o impacto do *backfill* (enchimento das galerias) na vida útil destes, e na permeabilidade do meio após consolidação.

Diante do exposto, este estudo busca avaliar a permeabilidade de amostras de *backfill* de rejeito de carvão em processo de consolidação final em minas subterrâneas de carvão em Santa Catarina, conforme a ABNT NBR 14545:2021 - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável e analisar o comportamento mecânico, através do ensaio de compressão uniaxial.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O carvão mineral é uma fonte de energia importante para a matriz energética brasileira e, em Santa Catarina, é uma das principais atividades econômicas da região sul do estado. O carvão é uma rocha combustível que contém mais de 50% em peso e mais 70% em volume de material carbonoso, incluindo a umidade intrínseca, fundamentalmente derivada de restos vegetais como matéria mineral associada (Thomas, 2002).

O *rank* ou a qualidade do carvão (determina a maturidade geológica deste mineral), alcançado pelo processo de carbonificação é definido por três fatores, sendo eles a temperatura, pressão e tempo. A partir da maior intensidade de temperatura e pressão a qual a camada de matéria vegetal for submetida, e quando maior for o tempo de duração desse processo, melhor será a qualidade ou poder energético do carvão (Thomas, 2002).

### 2.1 GEOLOGIA DO CARVÃO

A descrição da geologia regional utilizada neste trabalho é um resumo de diversos projetos de pesquisa exploratória desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil, à época Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM (Programa de Carvão Energético no Estado de Santa Catarina, 1982).

A geologia da porção norte da Bacia Carbonífera de Santa Catarina, especialmente, da região de Lauro Müller é constituída por uma sequência de rochas sedimentares gonduânicas Paleo-Mesosóicas encimadas ou intrudidas por rochas básicas a intermediárias, as quais compõem parte da borda leste da Bacia do Paraná, sendo essa sequência sobreposta por rochas graníticas proterozóicas vinculadas na estratigrafia à suíte Intrusiva Pedras Grandes e à Suíte Intrusiva Paulo Lopes de acordo com o mapa geológico de Santa Catarina (Krebs, 2004).

No âmbito da Camada Bonito de onde foram coletadas as amostras de rejeitos para os estudos desenvolvidos neste trabalho ocorrem, principalmente, rochas sedimentares pertencentes ao Grupo Guatá, Formação Rio Bonito (PRb) e Formação Palermo (Pp), verificando-se, também, soleiras e diques de diabásio do Grupo São Bento da Formação Serra Geral (Ksg) associados às zonas de falha-fratura (WILDNER et al, 2014).



A Formação Rio Bonito é a unidade estratigráfica que ocorre em maior extensão na área, sendo possível distinguir os intervalos litofaciológicos inferior e superior do Membro Siderópolis. O intervalo superior ocorre na porção centro sul com seus limites compartimentados por falhas normais em blocos afundados, enquanto o intervalo inferior no restante da área (CPRM, 2014).

## 2.2 MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA DE CARVÃO

No Brasil cerca de dois terços da produção de carvão é proveniente da mineração subterrânea. Atualmente, em Santa Catarina, quase todo carvão é produzido através da extração subterrânea.

A mineração a céu aberto é utilizada quando a camada de carvão está mais próxima da superfície, normalmente por volta de 30 metros ou menos, não havendo a necessidade da abertura do túnel, pois neste caso todo material da cobertura é removido para a extração do carvão. Em relação ao método subterrâneo, a mineração a céu aberto recupera quase 100% da camada de carvão (SIECESC, 2016).

As minas de subsolo são divididas em três tipos principais, sendo designadas como minas de encosta, minas em plano inclinado e minas em poço vertical. Elas recebem essa classificação de acordo com a forma de se alcançar a camada de carvão mineral a ser lavrado (BORTOT 2002).

A forma mais comum e utilizada de acesso à camada de carvão é por meio de plano inclinado. Essas aberturas são usadas para acesso de pessoal, materiais e equipamentos, circulação de ar e transporte do carvão produzido. A mineração subterrânea de carvão é comumente dividida em dois métodos: câmaras e pilares e *longwall* (SIECESC, 2016). Em Santa Catarina as minas subterrâneas de carvão são exploradas pelo método de câmaras e pilares.

## 2.3 BENEFICIAMENTO DO CARVÃO

O beneficiamento é o processo de preparação do carvão bruto para seu uso em diferentes aplicações. O objetivo do beneficiamento é remover as impurezas por métodos físicos ou químicos sem alterar a forma química dos minerais afim de melhorar a qualidade do carvão, ajustando a sua especificação para uso em usinas



termoelétricas, indústria siderúrgica, entre outros setores (SAMPAIO & TAVARES, 2005).

O beneficiamento do carvão também gera resíduos, como rejeitos e águas residuais, que podem ter impactos ambientais significativos, caso não sejam tratados adequadamente. Por isso, é importante que as empresas de mineração sigam boas práticas de gestão ambiental e adotem tecnologias de tratamento e disposição de resíduos eficientes e seguros (Souza, 2002).

Apesar dos avanços tecnológicos no beneficiamento mineral, empresas de mineração ainda enfrentam o desafio de melhorar o gerenciamento dos rejeitos. Além disso, a necessidade de se extrair minérios de menor teor e situados em uma maior profundidade resultou em aumento na geração de rejeitos e estéreis e volumes de água, sendo essas as maiores restrições ao desenvolvimento da mina em diversos locais (WATSON et al, 2010).

### **2.3.1 Rejeitos de carvão**

O rejeito pode ser classificado em três classes denominadas como R1, R2 e R3. A fração R1, conhecida como piritoso, é retirada em primeiro lugar, no processo de diferença de densidade em meio aquoso pulsante, no “JIG” dos lavadores e que contém a pirita constituída por sulfeto de ferro. Já os rejeitos R2, denominado xistoso e R3 betuminoso, são compostos de siltitos e aluminatos. Desde que separados dos rejeitos piritosos, os rejeitos R2 e R3 podem ser alocados apenas com a preocupação estética (BORTOT, 2002).

De acordo com o Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense elaborado pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM, 2001) e considerações conceituais entre rejeito (material em fim de vida) e resíduo (material passível de valorização) declaradas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Os rejeitos, podem ser classificados em três tipos: piritosos, xistoso, siltitos e arenitos, além dos finos de carvão. As frações e características de cada resíduo de carvão, varia de acordo com o processo de beneficiamento adotado por cada mineradora.

## 2.4 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE *BACKFILL*

O rejeito do processo de beneficiamento que é utilizado para o preenchimento de uma mina subterrânea já minerada ou em exploração é conhecido como *backfill*. Este processo resulta em benefícios estruturais, geomecânicos, circuito de ventilação e ambientais despertando muito interesse das minerações e órgãos de fiscalização como eficiente alternativa para a disposição de rejeitos finos e grossos resultantes do processo de beneficiamento do carvão mineral. (Vissoto, 2013).

A prática do *backfill* é amplamente difundida em diversos países ao redor do mundo. Na Polônia, África do Sul, Canadá, Estados Unidos, entre outros, essa técnica tem sido empregada há muitos anos. (SIECESC, 2009).

Conhecer o comportamento e as propriedades dos diferentes tipos de *backfill* é de extrema importância para sua aplicação. O material utilizado e o mecanismo de transporte classificam o *backfill* em três tipos, sendo eles: o *hydraulicfill*, *pastefill* e *rockfill* (Karas, 2009; Teixeira, 2018).

### 2.4.1 *Hydraulicfill*

*Hydraulicfill* ou enchimento hidráulico é uma técnica que transporta uma mistura de solo ou outros materiais para o subsolo através de um fluxo de água. O enchimento hidráulico também pode ser utilizado como suporte primário de maciço de longo prazo e para o controle da subsidência em minas que apresentam rochas resistentes, uma vez que este tende a fluir e preencher os vazios gerados, distribuindo as tensões (Gomes, 2016).

O *hydraulicfill* tem como principal composição o percentual de sólidos entre 50 – 70%. Segundo Heemann e Costa (2008), a densidade de polpa deve estar entre 65 – 70% de sólidos. A instalação de sistemas de drenagem e contenção devem ser avaliados, devido ao elevado percentual de água.

### 2.4.2 *Pastefill*

*Pastefill* conhecido como enchimento de pasta, usa uma mistura de rejeitos finos, água e materiais cimentantes para preencher os espaços vazios deixados pela



extração do minério em minas subterrâneas. Essa técnica surgiu devido a necessidade de se aumentar a coesão do preenchimento hidráulico (Karas,2009).

Segundo Gomes (2016) o *pastefill* apresenta maior teor de sólidos, variando de 78 – 87%, quando comparado ao hydraulicfill, pois a água da constituição serve para hidratar o material cimentante em percentual que varia de 3% a 5%, resultando em um material não drenante.

### **2.4.3 Rockfill**

*Rockfill* ou enchimento de enrocamento proporciona uma mistura de fragmentos de rocha de diferentes tamanhos agregados juntamente com rejeitos finos em sua composição, tornando este tipo de enchimento mais caros, já que há necessidade de maior quantidade de ligante a fim de se atingir a resistência desejada (Gomes, 2016).

O transporte para dentro da mina é realizado por carregadeiras, o que aumenta o custo quando comparado aos tipos anteriores, porém não necessita a construção de barricadas (Farias, 2019).

## **2.5 PERMEABILIDADE**

Segundo Caputo (1998), permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através de si mesmo, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade.

O coeficiente de permeabilidade de solos pode ser determinado por métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos compreendem as determinações experimentais em laboratório ou campo, já os métodos indiretos têm como base a temperatura, curva granulométrica, índice de vazios e o ensaio de adensamento, dentre os quais podemos citar a fórmula empírica de Hazen, Equação de Taylor e Equação de Casagrande (Borges, 2020).

O coeficiente de permeabilidade (ou condutividade hidráulica) é determinado considerando que o fluxo de água no solo se comporta conforme a Lei de Darcy, estabelecida em 1856 pelo engenheiro francês Henry Darcy. Segundo esta lei, a velocidade de percolação da água é diretamente proporcional ao gradiente



hidráulico, o qual é a relação da variação da carga na percolação pelo comprimento ao longo do qual a carga se dissipa, conforme a fórmula a seguir:

$$Q = Aki$$

Onde:

$Q$  = Vazão;

$A$  = Área do Permeâmetro;

$i = h/L$ : Gradiente Hidráulico;

$k$  = constante para cada solo, que recebe o nome de coeficiente de permeabilidade.

A determinação experimental do coeficiente de permeabilidade, em laboratório, pode utilizar o método do permeâmetro de carga constante (NBR 13292:2021) ou a carga variável (NBR 14545:2021). O permeâmetro de carga constante é mais comumente aplicado a solos arenosos e ocorre de maneira análoga ao experimento de Darcy, no qual é mantida a carga constante, durante um certo período de tempo e mede-se a quantidade de água que passa por um volume de solo de dimensões conhecidas. Já o método que emprega o permeâmetro de carga variável é geralmente aplicado em ensaios com solos finos de baixa permeabilidade, uma vez que a determinação do  $k$  pelo permeâmetro de carga constante tem baixa precisão (Pantoja, 2019).

A determinação experimental em campo, ou *in situ*, é realizada a partir do diferencial da carga aplicada e dos procedimentos de execução. Os ensaios de nível constante são o ensaio de infiltração e o ensaio de bombeamento, já os de nível variável são o ensaio de rebaixamento e o ensaio de recuperação. Esses procedimentos consistem na carga ou descarga d'água através de sondagens, poços ou cavas e na medição do tempo e da taxa de variação do nível d'água (Pantoja, 2019).

Segundo Karas (2009), a permeabilidade do material de enchimento é um parâmetro crítico no *backfill*, pois quanto maior a permeabilidade, mais facilmente a água sairá e mais rapidamente o material oferecerá resistência, sendo dependente do tamanho e arranjo dos grãos (portanto varia para os diferentes materiais), da temperatura (que determina a viscosidade da água) e do índice de vazios.

## 2.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

O comportamento mecânico do *backfill* pode ser testado em laboratório, sendo as características na compressão de confinamento determinadas através de ensaio de compressão uniaxial. A porosidade, classificação e conteúdo do material de composição são determinantes no comportamento de compressão unidimensional do *backfill* (Barbosa, 2011).

Segundo a ABNT NBR 12.770/2022 o ensaio de determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo de corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório avalia a resistência à compressão através do esforço vertical aplicado a amostra.

O resultado do ensaio de compressão varia de acordo com as características do material analisado: composição, textura e granulometria de cada tipo litológico presente.

## 2.7 ENSAIO GRANULOMÉTRICO POR PENEIRAMENTO COM SEDIMENTAÇÃO

O ensaio de granulometria por peneiramento separa a amostra de solo, areia, agregado ou outro material granular, de acordo com o tamanho das partículas. As frações da amostra são expressas em porcentagens de peso de cada faixa na massa total ensaiada. A análise granulométrica nos orienta sobre sua classificação e o comportamento do mesmo quanto a sua utilização. Através dos resultados do ensaio é construído a curva de distribuição granulométrica, fundamental para a classificação dos solos. A determinação da granulometria de um solo pode ser feita apenas por peneiramento ou por peneiramento e sedimentação, se necessário. A norma que estabelece o ensaio é a ABNT NBR 7181:2016 Versão Corrigida 2:2018 Solo – Análise granulométrica.

O peneiramento é empregado para partículas com dimensões das areias e pedregulhos (solos grossos com grãos maiores do que 75 micrometros), enquanto a sedimentação é usada nos solos mais finos. A combinação do ensaio granulométrico com a sedimentação permite a caracterização completa da amostra.

## 2.8 ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA

O ensaio de massa específica informa a densidade do solo em relação a quantidade de massa que ele contém. Esta informação é relevante na seleção de materiais para projeto, uma vez que materiais mais leves podem ser preferíveis em algumas aplicações, enquanto materiais mais densos podem ser necessários em outros. O ensaio de massa específica seguiu o procedimento PO-510 do LABSATC, baseado na metodologia DNER-ME 093/94 Determinação da densidade real.

## 2.9 ENSAIO DE UMIDADE TOTAL

A determinação da umidade do solo é padronizada pela norma NBR 6457/2016 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Para o ensaio de umidade total foi utilizado o método de estufa por ser um método simples e com precisão, com a determinação da massa da amostra no seu estado natural e a massa após completa secagem em estufa. Essa metodologia apresenta vantagem em relação às demais, porque apresenta resultados confiáveis, porém traz como inconveniente, o tempo excessivo para obtenção desse índice físico.

## 2.10 LIMITE DE ATTERBERG

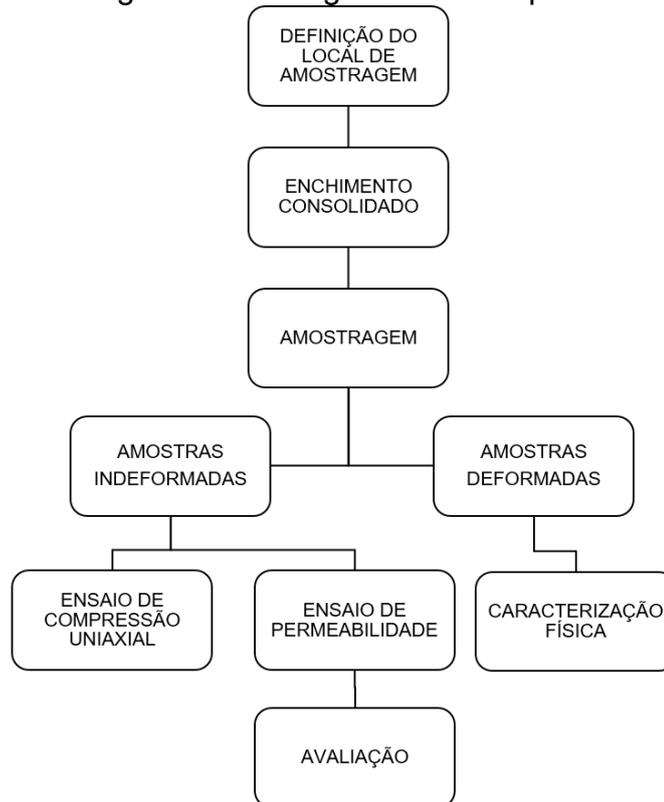
A distribuição granulométrica não permite a caracterização completa do comportamento dos solos, sob o ponto de vista da engenharia. A fração fina do solo tem uma importância muito grande nesse comportamento (Pinto, 2006).

O limite de liquidez (LL) é o valor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. Já o limite de plasticidade (LP) é o valor de umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido. A diferença entre o LL e o LP é definida como índice de plasticidade (IP).

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste tópico serão apresentados os materiais, procedimentos e equipamentos utilizados neste trabalho, bem como as técnicas de caracterização e análise realizadas nos corpos de prova das amostras de *backfill*, do tipo preenchimento hidráulico. A (Figura 1) apresenta o fluxograma das etapas do trabalho.

Figura 1 – Fluxograma das etapas.



Fonte: Do autor (2023)

As análises de permeabilidade, foram realizadas em amostras de *backfill* consolidado coletadas em uma mina subterrânea de carvão situada no município de Lauro Muller/SC. A (Figura 2) mostra o local onde foi depositado o enchimento hidráulico, executado no ano de 2009.

O painel foi preenchido até que a drenagem proveniente do preenchimento hidráulico apresentasse sólidos, resultante da não sedimentação das partículas da polpa, aproximadamente dois anos após o início do enchimento. A área foi isolada por barricadas construídas com argila, rejeito e alvenaria.

Figura 2 – Local do preenchimento hidráulico.



Fonte: Relatório Interno CCL (2023).

Na tabela 1 são apresentadas as características físicas da polpa e do painel onde o enchimento hidráulico foi depositado.

Tabela 1 – Características físicas da polpa e do painel de depósito do enchimento hidráulico.

Característica física, unidade	Valor
Cobertura, m	60
Largura de pilar, m	14
Largura de galeria, m	4
Altura total da camada, m	3,4
Sólidos da polpa, %	70
Granulometria da polpa, mm	Finos
Tubulação, mm	76,2
Vazão, m <sup>3</sup> /h	40
Tempo de operação, h	10
Potência das bombas, CV	15

Fonte: Karas (2009)

### 3.1 COLETA DAS AMOSTRA

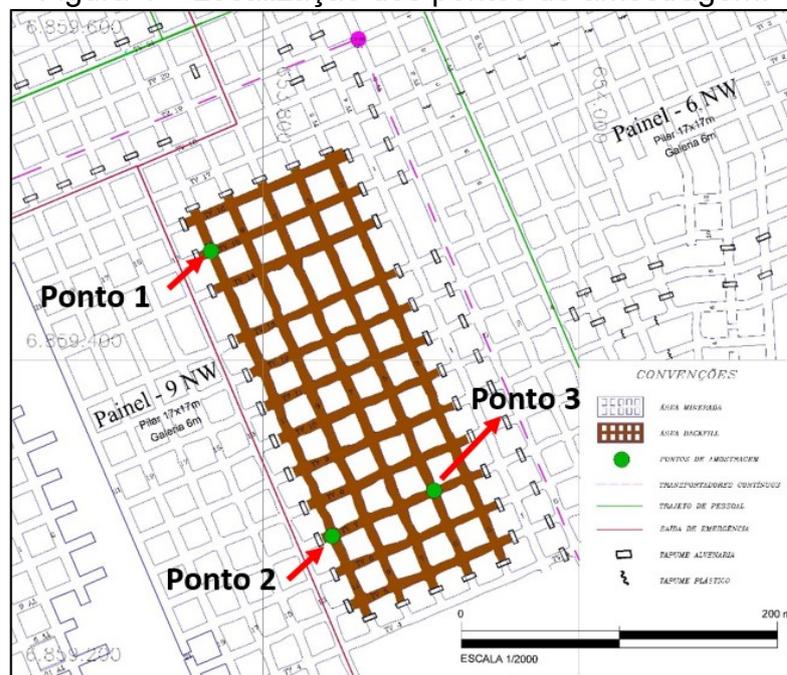
Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas (Figura 3) em uma mina de carvão da região de Lauro Muller no dia 31 de agosto de 2023 onde a deposição do material foi finalizada em abril de 2020. A localização dos pontos amostrados está identificada na (Figura 4), como Ponto 1, Ponto 2 e Ponto 3.

Figura 3 – Coleta das amostras indeformadas.



Fonte: Do Autor (2023).

Figura 4 – Localização dos pontos de amostragem.



Fonte: Adaptado relatório Interno CCL (2023).

Foram retiradas amostras nas galerias com enchimento de *hydraulicfill* consolidados no Painel – 9 NW. As amostragens foram realizadas conforme ABNT NBR NM 26 – Agregados, com a obtenção de amostras indeformadas, ou seja, amostra extraída com o mínimo de perturbação, procurando manter sua estrutura e condições de umidade e consistência naturais. As amostras foram retiradas de uma área homogênea, com trado *Uhland*, com uma cápsula cilíndrica de  $\varnothing 7$  cm e 7cm de altura, objetivando obter a maior representatividade neste modo. Dentre essas amostras, foram separadas para os ensaios de permeabilidade e ensaios de resistência de compressão uniaxial, todas identificadas. Após a coleta dos corpos de prova colocamos em sacos plásticos, de modo de preservar suas propriedades e características. Logo após a saída da mina armazenamos em caixas e em seguida



transportamos para o laboratório para dar continuidade ao processo. Para a caracterização física foram coletadas amostras deformadas nos Pontos 1, 2 e 3. Todas as coletas foram realizadas com o auxílio do técnico do LABSATC.

### 3.2 ENSAIOS

A avaliação da permeabilidade das amostras indeformadas de enchimento consolidado será baseada no resultado da determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, tendo como referência a ABNT NBR 14545:2021.

Os ensaios de granulometria foram realizados pelo LABSATC e seguiram a norma ABNT NBR 7181:2016 – Errata 2:2018 onde foi realizado ensaio de peneiramento e para a porção fina do material foi realizada a análise por sedimentação.

Para a análise da umidade total foi utilizado a norma ABNT NBR 6457/1986 através da secagem por estufa. O método de ensaio DNER 093/94, solos – determinação da densidade real foi utilizado pelo LABSATC para analisar a massa específica das mostras coletadas.

Os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de plasticidade seguiram as normas da ABNT NBR 6459:2017 e NBR 7180:2016 respectivamente.

Todos os ensaios foram realizados pelo LABSATC, exceto o ensaio de resistência a compressão uniaxial, o qual foi executado pelo IDT - Instituto de Engenharia e Tecnologia Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC o qual considerou norma ABNT NBR 12770:2022 como referência.

A Tabela 2 identifica os ensaios realizados e o local de coleta.

Tabela 2 – Identificação dos ensaios de cada ponto de coleta.

Ensaio	Nome da amostra		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Permeabilidade	Amostra danificada		
Permeabilidade	Backfill 02	Backfill 03	Backfill 04
Compressão	Amostra 1		Amostra 3
Compressão	Amostra 2		Amostra 4
Granulometria	Área de coleta 01	Área coleta 02	Área coleta 03
Massa específica	Área de coleta 01	Área coleta 02	Área coleta 03
Umidade total	Área de coleta 01	Área coleta 02	Área coleta 03
Limite de Liquidez	Área de coleta 01	Área coleta 02	Área coleta 04
Limite de Plasticidade	Área de coleta 01	Área coleta 02	Área coleta 04

Fonte: Do autor (2023).

### 3.2.1 Ensaios de permeabilidade

Todos os ensaios de permeabilidade de solos argilosos à carga variável foram realizados de acordo com os procedimentos interno do laboratório LABSATC PO-519 - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Após a coleta da amostra, ela é fixada no interior do permeâmetro, conforme (Figura 5). Com a tampa do permeâmetro vedada, conecta-se a mangueira na saída da tampa. Logo, abre-se a saída do reservatório deixando sair todo o ar da mangueira que é então, acoplada a entrada do permeâmetro.

Figura 5 – Ensaio de permeabilidade a carga variável.



Fonte: Do autor (2023).

Adicionou-se água ao permeâmetro conforme o procedimento. Com a proveta é coletado a água de saída da mangueira durante um tempo, este procedimento deve ser repetido até que a vazão se estabilize, percebida após se obter a média.

### 3.2.2 Ensaio resistência a compressão uniaxial

Na execução do ensaio a compressão, realizada no IDT, foi utilizada uma prensa hidráulica com sistema de pratos de aço para aplicação de carga e registro das deformações a que o corpo de prova foi submetido, o qual deve ser cilíndrico ou prismático, obedecendo a relação 2:1 entre a altura e o diâmetro (Figura 6). Porém, devida as condições do local de coleta, foi possível coletar uma amostra de Ø7cm com 7 cm de altura ficando assim com a proporção de 1:1.

Figura 6 – Ensaio resistência a compressão uniaxial.



Fonte: Do autor (2023).

A compressão foi aplicada paralelamente ao seu eixo longitudinal por meio de carga uniaxial que aumenta a uma taxa constante e sem choques.

Os corpos de prova não sofrem nenhum tipo de cura, já que a intensão foi ensaiar a amostra o mais próximo das condições as quais estão submetidos na mina de carvão. O ensaio foi realizado com velocidade de aproximadamente 2% da altura da amostra que resultou em 1,4mm/min. A NBR 12770 indica encerrar o ensaio quando ocorrer uma deformação na altura de 15%, ou ensaio chegar a 15 minutos ou a amostra romper. Para o referido estudo foi ensaiado até 21 minutos

aproximadamente para verificar a possibilidade de rompimento da amostra, porém, o rompimento não ocorreu em nenhuma amostra. Na amostra 4 o ensaio foi encerrado em 11 minutos, pois o sistema da prensa parou de aplicar a carga sem informar o motivo, porém, o ensaio foi considerado válido já que tinha ultrapassado a deformação de 15% (o ensaio foi encerrado com deformação de 22,49%).

### **3.2.3 Determinação da granulometria**

As partículas do solo podem ser separadas em dois grupos, grossas e finas. A proporção das partículas grossas é obtida através do peneiramento, que é feito para partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm.

Para a porção grossa da amostra ensaiada foi realizada granulometria com peneiramento por via úmida para não danificar a amostra. Montou-se o conjunto de peneiras para o ensaio e os torrões de solo foram esfregados e desagregados com água nas peneiras. Com o material retido na peneira de menor abertura também foi feita a mistura com água revolvendo a amostra para facilitar a passagem das partículas pela abertura. Procedeu-se desta forma até visivelmente perceber que a água arraste toda a fração passante. A massa da fração passante foi obtida através da relação entre as massas das frações retidas em cada peneira e a massa inicial. O cálculo do percentual acumulado se obtém somando o percentual retido em cada peneira às percentagens retidas nas peneiras de aberturas maiores.

Para partículas finas da amostra, menores que 0,075 mm, utiliza-se o método da sedimentação (Figura 7). É válido ressaltar que, na sedimentação, por se tratar de partículas finas, é importante que seja utilizado um agente defloculante. Por meio da sua ação, há a desagregação dos flocos que formam o solo, garantindo, assim, a determinação do diâmetro e da porcentagem de partículas isoladas.

Através da distribuição granulométrica, os resultados obtidos são expressos, graficamente, através de uma curva que pode ser representada por um gráfico. No eixo das ordenadas, é representada a porcentagem em peso do material que passa na peneira correspondente e, no eixo das abcissas, é representado o diâmetro das partículas em milímetros, em escala logarítmica.

Figura 7 – Ensaio de granulometria - sedimentação.



Fonte: Do autor (2023).

### 3.2.5 Limite de Atterberg

Só a distribuição granulométrica não caracteriza bem o comportamento dos solos sob o ponto de vista da engenharia (Pinto, 2006).

Os solos podem apresentar diferentes tipos de consistência a depender da quantidade de água que possuam sendo consistência sólida, semissólida, plástica ou a de um fluido denso. Existem valores de teor de umidade que separam um estado de outro, chamados limites de consistência. Estes limites são utilizados nos diversos sistemas de classificação do solo e refletem uma série de propriedades dos solos finos, como tipo do argilomineral, sua atividade, estrutura, superfície específica etc.

O teor de umidade que separa o estado plástico do estado líquido é chamado de limite de liquidez (LL). É o valor de umidade abaixo do qual o solo tem comportamento plástico.

A umidade que delimita o estado semissólido do plástico é conhecida como limite de plasticidade (LP).

### 3.2.5 Determinação da massa específica

Para realização deste ensaio podem ser utilizadas a norma ABNT NBR 6508:2017 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica ou a norma DNER – ME 093/94 – Densidade real dos solos. A diferença entre os procedimentos ditados por cada uma delas está no tamanho do

picnômetro utilizado no ensaio, quantidade de material e metodologia de retirada de ar da amostra.

O método de ensaio utilizado foi o DNER 093/94 Solos - Determinação da densidade real para determinar a massa específica das amostras deformadas coletadas nos Pontos 1, 2 e 3.

### 3.2.6 Umidade total

Para estabelecer a umidade das amostras coletadas foi realizado o ensaio de umidade total, o qual seguiu a norma ABNT NBR6457/1986, pois o processo de enchimento das galerias ocorreu com *hydraulicfill* (Figura 8).

No laboratório a amostra foi pesada e colocada na estufa com temperatura e tempo controlados. Depois de secas as amostras são pesadas novamente e determinado o teor de umidade. O teor de umidade dos solos é a razão entre a massa d'água contida no solo in loco, e a massa de grãos de solo seco em estufa, o resultado expresso em porcentagem.

Figura 8 – Determinação da umidade total.



Fonte: Do autor (2023).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão simples nas amostras estão apresentados na Tabela 3. Foram realizados dois ensaios para o Ponto 1 (Amostras 1 e 2) e dois ensaios para o Ponto 3 (Amostras 3 e 4). Não foi possível coletar amostra indeformada no ponto 2, para o ensaio de resistência a compressão uniaxial.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial.

Encerramento do ensaio NBR 12.770	Resistência (kPa)	Resistência (MPa)	Umidade da amostra (%)	Observações
<b>Ponto 1 - Amostra 1</b>				
Deformação 15%	24,3	0,0243	42,3	10,37mm deformação - 7 min e 24s
15 min	23,4	0,0234		21 mm deformação
Final ensaio	21,4	0,0214		30,1 mm deformação - 21min 30s
<b>Ponto 1 - Amostra 2</b>				
Deformação 15%	30,6	0,0306	43,4	10,30mm deformação - 7 min e 21s
15 min	25,5	0,0255		21 mm deformação
Final ensaio	23,9	0,0239		28,56 mm deformação - 20min 24s
<b>Ponto 3 - Amostra 3</b>				
Deformação 15%	123,2	0,1232	31,2	10,38mm deformação - 7 min e 25s
15 min	103,3	0,1033		21 mm deformação
Final ensaio	97,7	0,977		30,08 mm deformação - 21min 29s
<b>Ponto 3 - Amostra 4</b>				
Deformação 15%	103,3	0,1033	32,0	10,28mm deformação - 7 min e 20s
Final ensaio	103,9	0,1039		15,42 mm deformação - 11min 1s

Fonte: Do autor (2023).

É possível observar que os resultados encontrados são similares em cada ponto, indicando que as amostras foram coletas e armazenadas de forma a representar o local preenchido com *hydraulicfill*.

A média entre os resultados (deformação de 15%) das amostras 1 e 2 foi de 0,027Mpa e a média entre as amostras 3 e 4 foi de 0,1132Mpa. Os valores de resistência típicos, obtidos em ensaios laboratoriais e in situ, para as camadas de carvão Irapuá (5,27MPa), Barro Branco (7,12MPa) e camada Rio Bonito (6,50MPa) (ZORZI,1991). A análise dos resultados (Tabela 3) permite concluir que nenhuma das amostras alcançou a resistência à compressão uniaxial necessária para utilizar como suporte do teto das galerias mineradas com vistas a viabilizar a mineração dos pilares

de minas de subsolo, todavia as amostras não estão completamente consolidadas, conforme descrição prévia.

A curva granulométrica demonstrou que a granulometria das amostras dos pontos 1, 2 e 3 é bem uniforme, corroborando com os resultados de massa específica Tabela 4. Os resultados de umidade total apresentaram maior variação, o que já se esperava devido a diferença da consistência que era perceptível visualmente.

Tabela 4 – Resultados das análises granulométricas, massa específica, umidade total, permeabilidade, limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade.

Ensaio	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	
Granulometria	Argila	0%	0%	0%
	Silte	65,82%	69,84%	65,22%
	Areia Fina	32,51%	28,62%	34,62%
	Areia média	0,99%	0,92%	0,11%
	Areia Grossa	0,67%	0,63%	0,04%
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,057	2,147	2,211	
Umidade total (%) – (Média)	42,85		31,6	
Permeabilidade (cm/s)	7,70x10 <sup>-7</sup>	2,89x10 <sup>-6</sup>	7,79x10 <sup>-7</sup>	
Limite de Liquidez	39	40	39	
Limite de plasticidade	29	27	26	
Índice de Plasticidade	10	13	13	

Fonte: Do autor (2023).

Conforme o ensaio granulométrico a porcentagem passante na peneira #200 (0,075mm) é maior que 50% da amostra, caracterizando o material como solos finos, de acordo com a classificação do Sistema Unificado – SUCS, inicialmente proposta por Casagrande. O comportamento siltoso ou argiloso do solo, é definido pelo limite de Atterberg e a carta de plasticidade, portanto o material das amostras é classificado como silte de baixa compressibilidade.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem identificar que a metodologia de coleta e armazenamento das amostras indeformadas de *hydraulicfill* puro em fase final de consolidação objetivando a avaliação do coeficiente de permeabilidade e de resistência à compressão uniaxial, foram adequadas, considerando a pequena variabilidade dos resultados.

Quanto aos valores do ensaio de resistência à compressão uniaxial encontrados nas amostras indeformadas de *hydraulicfill* puro, indicam que este tipo de enchimento não é suficiente para utilização do preenchimento como reforço estrutural para aproveitamento de pilares, na atual fase de consolidação. Estudos complementares com ampliação do número de amostras em diferentes painéis, e em diferentes estágios de consolidação, viabilizarão a aplicação de técnicas estatísticas, e conseqüentemente conclusões mais fundamentadas sobre a viabilidade de uso do *hydraulicfill* puro como reforço estrutural.

Durante a coleta de amostras observou-se que o enchimento das galerias de carvão com *hydraulicfill* puro, sem adição de ligantes ou outro aditivo, proporciona o confinamento dos pilares na medida em que o material é sedimentado e depositado nas cavidades vazias (galerias), impedindo o deslocamento do teto e queda de laterais dos pilares e a conseqüente redução das sessões utilizadas no cálculo da resistência dos pilares. Desta maneira o enchimento com *hydraulicfill* atua como reforço estrutural no curto, médio e longo prazos por manter a integridade dos pilares e teto das galerias e por conseqüência na diminuição de um eventual e muito pouco provável evento de subsidência em superfície.

Conforme a sedimentação ocorre, a água do *hydraulicfill* é drenada. Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos nas amostras do enchimento mineral (“backfill”), chegaram à ordem de  $k=10^{-7}$  cm/s, mostram claramente o efeito como isolante hídrico que o *hydraulicfill* puro confere ao meio, o que influencia de forma positiva no contexto hidrogeológico pós-fechamento da mina, além da intrínseca menor disponibilidade de água nas galerias já preenchidas. A permeabilidade das amostras coletadas é menor que a permeabilidade da camada de carvão.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/2016 – Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459/2017 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180/2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181/2016 Versão Corrigida 2/2018 – Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770/2022 – Solo – Determinação da Resistência a compressão não confinada de solo coesivo** Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545:2021 - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AÇÃO CIVIL PÚBLICA – **Ministério Público Federal** - 000022-79.2010.404.7204 (2013).

BARBOSA, Karina Jorge. **Avaliação Geotécnica De Lavra Subterrânea Do Corpo Serrotinho Da Mina Cuiabá Através De Modelagem Numérica Tridimensional**. 2011. 201 f. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

BORGES, Caique Ferreira. **Análise de métodos indiretos para determinação do coeficiente de permeabilidade de solos arenosos**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso na Modalidade Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

BORTOT, Adhyles, **O Cadastro Técnico Multifinalitário Na Avaliação De Impactos E Na Gestão Ambiental**, 2002.

BRASIL. **Lei no 14.299, de 5 de janeiro de 2022. Institui so programa de transição energética justa (TEJ)**. Brasília. 2022.

BRASIL. **Lei no 18.330, de 5 de janeiro de 2022. Institui so programa de transição energética justa (TEJ)**. Brasília. 2022.

CAPUTO, H, P. **Mecânica dos solos e suas aplicações. Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. 1 v.



CETEM, C. de T. M. **Projeto conceitual para recuperação ambiental da bacia carbonífera sul catarinense.**

CPRM - Serviço Geológico Brasileiro - **Carvão Mineral** - Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Carvao-Mineral-2558.html>. Acesso em: 4 abril. 2023.

DNER-ME 093/94 Determinação da densidade real.

FARIAS, Eduardo Justi de. **Análise da viabilidade da redução dos impactos ambientais na mineração do carvão mineral por meio da aplicação do backfill.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019

GOMES, T. M. H. Estudo da estabilidade de portas de enchimento – Caso de estudo da mina da Somincor. Lisboa, 2016.

HEEMANN, Roberto; COSTA, José Carlos Franco Costa. Emprego da tecnologia de backfilling na gestão de resíduos sólidos da mineração de carvão. *In*: SOARES, Paulo Sérgio Moreira *et al* (ed.). **Carvão brasileiro: tecnologia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 57-73.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas, Ana Paula Moreira da Silva João Paulo Viana André Luís Brasil Cavalcante. Disponível em: [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP\\_Diagn%C3%B3stico\\_2012.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf) Acesso em: 11 abr. 2019.

KARAS, Rodrigo Luis. FLE / SIECESC - SINDICATO DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA - Relatório de atividades - Parcial 2009. [S. l.: s. n., 2009.] Disponível em: <http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Projeto11-Backfill.pdf> Acesso em: 04 mar. 2023.

KREBS, A. S. J.; GRAZIA, C. A.; AMARAL, J. E.; CASÉ, M. G.; BRANCO, P. de M.; OLIVEIRA, R. L.; SILVA, V. R., 1982. Programa Carvão Energético no Estado de Santa Catarina: Relatório Final. Porto Alegre: DNPM/CPRM, 5 v.

KREBS, A. S. J. Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC. 2004. 375 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PANTOJA, Ricardo Gabriel Brito. **Análise da fórmula empírica de Hazen para determinação do coeficiente de permeabilidade.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso na Modalidade Artigo Científico (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ª edição.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.



Relatório Interno CCI. [S. l.: s. n., 2023.]

SAMPAIO, Carlos Hoffmann; TAVARES, Luis Marcelo Marques. Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. 1ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, RS-Brasil, 2005.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA. Carvão mineral - Dados estatísticos Ano: 2021. [S. l.: s. n., 2021.] Disponível em:

[https://www.siecesc.com.br/pdf/dados\\_estatisticos\\_ano\\_2021.pdf](https://www.siecesc.com.br/pdf/dados_estatisticos_ano_2021.pdf). Acesso em: 03 mar. 2023.

SIECESC. Relatório Parcial de Atividades. 2009.

SIECESC. Relatório Interno de Atividades. 2016.

TEIXEIRA, Diego Costa. **BENEFÍCIOS COM A UTILIZAÇÃO DE REJEITOS EM ENCHIMENTO DE MINAS SUBTERRÂNEAS**: uma visão geotécnica e sustentável. 2018. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

THOMAS, Larry. **Coal geology**. England: John Wiley & Sons, 2002. ix, 384 p. ISBN 9780471485315.

VISSOTO, L. A. J. **Análise tridimensional de mina subterrânea com ênfase na interação entre maciço e preenchimento** – Caso de estudo: Mina Cuiabá. Brasília, 2013.

ZORZI, L. AGOSTINI, I. M. GONZATTI, C. **Metodologia para Dimensionamento de Pilares em Minas de Carvão do Sul de Santa Catarina**. CIENTEC – Boletim Técnico 23. Porto Alegre, julho 1991.

WATSON, A. H. *et al.* A comparison of alternative tailings disposal methods — the promises and realities. **Mine Waste 2021: Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste**, Perth, pp. 499 – 514, Jan. 2010. 2023.

WILDNER, V., et alii. Serviço Geológico do Brasil, CPRM. 2014. Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina. Ministério das Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar e me dar força para a realização deste sonho.

Aos meus pais, por me motivar a buscar sempre o melhor em minha vida, em especial a minha mãe (in memoriam), maior incentivadora desde o início.

Ao meu Esposo Paulo Henrique Guidi de Oliveira, pelo incentivo, apoio, paciência e amor dedicados todos os dias.

À minha filha Leticia Rodrigues de Oliveira, meu maior tesouro e motivação de lutar todos os dias.

À minha família, pelos valores transmitidos e a grande superação, os quais sempre orientarão a minha vida.

À minha amiga Denise Olimpio Ugioni Garcia, pelo apoio, dedicação e principalmente pelas palavras de incentivo que me ajudaram em muitos momentos.

A todos meus amigos e colegas, de forma direta e indireta me apoiaram nessa jornada.

Ao departamento de engenharia de Minas, em especial ao coordenador André Luiz Amorim Smaniotto.

Aos meus professores, em especial o meu orientador, Marcio Zanuz, pelo tempo disponível, dedicação e confiança para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Roberto Heemann, pela co-orientação no estudo realizado.

As empresas mineradoras que foram parceiras e permitiram visitas e coleta dos materiais para este estudo.

Ao Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIESESC) que contribuíram com os dados, realização dos ensaios, contatos e todo o apoio necessário do setor carbonífero, o meu muito obrigada.