

## **ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE REJEITOS GROSSOS E FINOS DE CARVÃO COM VISTAS A DISPOSIÇÃO EM CÂMARAS DE MINAS DE SUBSOLO (BACKFILL)**

**Cesar Bussolo<sup>1</sup>**

**Márcio Zanuz<sup>2</sup>**

**Resumo:** O melhor aproveitamento das jazidas de carvão mineral do sul de Santa Catarina, operadas em subsolo, é de grande relevância principalmente pela questão econômica. A dificuldade de abertura de novas minas, principalmente por questões ambientais, é outro aspecto que define a importância do assunto. O emprego de rejeitos da mineração de carvão como preenchimento de galerias mineradas (Backfill) melhora o desempenho estrutural dos pilares, diminui significativamente os efeitos de subsidência em superfície e é uma alternativa à disposição superficial em depósitos. No presente estudo foram desenvolvidos traços de concreto com rejeitos de mineração de carvão, agregados miúdos e cimento, moldados corpos de prova e submetidos a ensaios de compressão uniaxial. Um dos resultados obtidos de resistência destas amostras atingiu o valor de 2,60Mpa demonstrando a pertinência de pesquisas futuras acerca do tema.

**Palavras-chave:** Backfill. Rejeitos de carvão. Subsidência.

### **1 INTRODUÇÃO**

A atividade de mineração de carvão faz parte da história da região sul de Santa Catarina, tanto pelo desenvolvimento econômico quanto pelos impactos ambientais. Nas primeiras décadas, havia poucos critérios técnicos para a atividade extrativa, inexistindo o cuidado com o meio ambiente. Os métodos de extração mais comuns empregados eram a lavra a céu aberto, em encosta, sendo que posteriormente a lavra passou a ocorrer também em subsolo.

Nesta última, até o final dos anos 80, utilizava-se o método de câmara e pilares com mineração em recuo (recuperação), onde eram lavrados parte dos pilares que davam sustentação à mina, causando assim o abatimento do teto e desencadeando processos de subsidência, muitas vezes com reflexos na superfície. Na década de 90, este método com recuperação de pilares foi proibido pelo DNPM

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia de Minas. E-mail: cebussolo@yahoo.com.br

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

(atual ANM) em Santa Catarina e deixou de ser utilizado pelos danos descritos. As minas de subsolo então passaram a adotar o método de câmaras e pilares sem recuperação dos pilares, ficando os mesmos com as dimensões com o quais haviam sido projetados, servindo como estrutura de sustentação da mina.

As características do carvão lavrado em subsolo dessa região demandavam o seu beneficiamento, principalmente em função do alto teor de cinzas, visando à liberação do minério dos estéreis e do rejeito. O processo mais empregado era a lavagem, que se utilizava dos recursos hídricos mais próximos ao pátio operacional ou área de extração. Os rejeitos resultantes desta operação eram então dispostos sem qualquer critério em superfície.

Hoje o cenário mostra-se diferente para a mineração de carvão. Legislações e normas técnicas e ambientais específicas estão vigentes, os métodos de lavra são mais eficientes e os empreendimentos mineiros de carvão estão sujeitos à criteriosa análise pelos órgãos de controle e pela sociedade. Dessa forma, a abertura de novas minas de carvão tem se mostrado muito mais complexa, levando as empresas a aperfeiçoar cada vez mais os métodos de lavra e o beneficiamento do minério. A disposição dos rejeitos passou a ter maior controle minimizando a poluição dos recursos hídricos e também atmosférica devido aos episódios de combustão espontânea.

Por ser classificado como um resíduo não perigoso, porém não inerte, o rejeito é disposto em um depósito impermeabilizado com argila compactada e recoberto com vegetação herbácea. Este método tem se mostrado eficiente, porém um dos pontos negativos desta técnica refere-se à responsabilidade do empreendedor pela manutenção de longo prazo do depósito, uma vez que o selamento empregado não pode ser rompido.

Outra metodologia de destinação destes rejeitos chama-se *backfill* onde os mesmos são transportados novamente para o subsolo por meio de bombeamento (pastefill) ou por correias (rockfill) para preenchimento das galerias. Apesar de mundialmente conhecido, não há um procedimento padronizado adotado pelas empresas carboníferas na região sul de Santa Catarina. A finalidade almejada por estas é a diminuição da quantidade de rejeitos em superfície e um reforço estrutural da mina para minimizar eventuais abatimentos do teto e redução e/ou impedimento

da diminuição da seção de pilares causado pela queda progressiva das laterais mantendo os fatores de segurança originais dos pilares.

Neste contexto, mostra-se pertinente o estudo da resistência mecânica de rejeitos de carvão com vistas à disposição em câmaras de minas de subsolo (backfill) para possibilitar a recuperação, ainda que parcial, dos pilares deixados em subsolo nas minas de carvão, sem que isto signifique em um aumento no risco de subsidência.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A mineração é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem estar e a melhoria da qualidade de vida dos presentes e futuras gerações, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime, desde que seja operada com responsabilidade social, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável (FARIAS, 2002).

Historicamente, a mineração foi vista essencialmente como uma atividade industrial incompatível com a proteção do meio ambiente. Mas, em anos recentes, as questões ambientais associadas à atividade mineira têm sido abordadas de maneira importante, ocupando uma posição significativa nos aspectos político, social e econômico (Singh 1988, citado por Gama e Torres, 2005).

A mineração limpa é um tipo de novo modo de produção sob a estratégia de desenvolvimento sustentável. Depois que a Conferência de Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas propôs a produção de mineração limpa em 1992, esse tipo de método de produção foi gradualmente expandido em muitos países e organizações no mundo (CHANG et al., 2014).

### **2.1 MINERAÇÃO DE CARVÃO**

O carvão mineral é um combustível fóssil, não renovável, e fornece 38,5% de toda a energia mundial sendo empregado em siderurgias (na redução do minério de ferro) em usinas termelétricas (aquecimento de caldeiras) e na indústria química (IEA, 2018). Segundo EPE (2021) o carvão corresponde a 5,6% matriz de energética do Brasil.

As reservas mundiais de carvão mineral são de: 847,5 bilhões de toneladas, quantidade suficiente para atender à produção atual por 130 anos. São 75 os países que possuem reservas significativas, sendo que Estados Unidos, Rússia e China detêm 60% do volume total (CPRM, 2014).

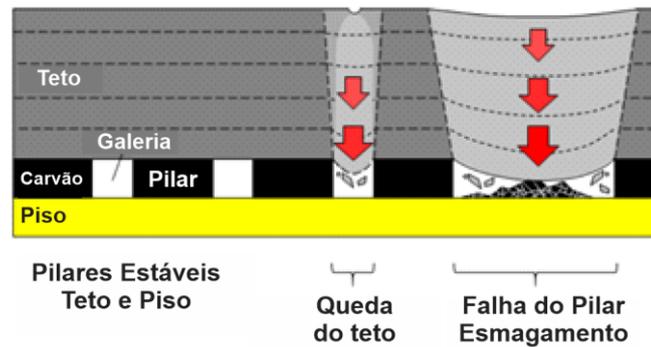
Segundo Citadini-Zanette (1999), o carvão pode ser extraído de suas jazidas através de lavra subterrânea ou lavra a céu aberto. Em Santa Catarina, a lavra subterrânea é utilizada quando a jazida de carvão se encontra em camadas mais profundas (mais de 30 m de profundidade).

O método de lavra por câmaras e pilares é comumente aplicado para mineração de carvão em subsolo. Neste, parte valiosa do corpo mineral é parcialmente extraída: porções maiores ou menores permanecem para a sustentação dos terrenos sobrejacentes e a garantia de construções superficiais, se for o caso (CURI, 2017).

Segundo Brady e Brown (2005), utilizar pilares de rocha como parte do suporte em uma mina faz com que uma parcela da reserva totalmente comprovada seja “esterilizada” temporária ou permanentemente, ou seja, parte do minério do depósito não poderá ser explorado devido à necessidade de se manter pilares para prover o suporte do maciço rochoso.

Um dos problemas induzidos pela exploração de minas de carvão é a possibilidade de ocorrência de subsidência mineira. Denomina-se subsidência mineira ao conjunto de fenômenos de movimentação descendente de camadas do subsolo, e da própria superfície do terreno, devido à tendência do mesmo em preencher os espaços vazios que são originados pela lavra subterrânea. A exploração mineira provoca diversos efeitos à superfície dos terrenos que se manifestam quer na área de exploração quer nas áreas vizinhas (Gomes, 2008).

Figura 1: Exemplo de subsidências.



Fonte: Adaptado de Galloway (2000).

Concomitantemente, de acordo com a qualidade do minério e o nível de beneficiamento aplicado ao carvão, surgem os rejeitos em maior ou menor quantidade, sendo estes transportados a um depósito podendo futuramente vir a ser reaproveitados (TSAI, 1982).

Os rejeitos são resultantes do beneficiamento aplicado às substâncias minerais de interesse, já os estéreis são gerados durante o processo de extração (ou lavra), constituindo-se de rochas para as quais não há nenhum valor ou interesse econômico, ficando a maioria dispostos em pilhas à superfície (IPEA, 2012).

Segundo Filho et al. (2013) o carvão mineral brasileiro contém altos teores de impurezas (pirita e minerais de rochas sedimentares). Assim, na maioria dos casos, são necessários métodos de concentração para alcançar os parâmetros de operação nas usinas termoelétricas a carvão no Brasil. Por exemplo, o complexo termoelétrico de Jorge Lacerda (SC) aceita produtos com até 43% de cinzas e 2,3% de enxofre para geração de energia. Atualmente, cerca de 60-70% do carvão "run-of-mine" (ROM) de Santa Catarina é disposto em depósitos como rejeitos.

Ainda, segundo Costa (2008), em termos ambientais, devido às baixas recuperações da camada total de carvão nas unidades de beneficiamento das empresas de Santa Catarina (podendo ser inferiores a 30%), há excesso de geração de rejeitos na região. O grande volume de rejeitos gerado demanda uma extensiva atividade de deposição de resíduos em superfície.

Segundo Koope e Costa (2008) no passado atividades de lavra a céu aberto em Santa Catarina, foram desenvolvidas sem nenhum planejamento, e sem observar os padrões de recuperação necessários para manter a qualidade do meio ambiente na área de influência das mineradoras. Ainda, muitas áreas foram

simplesmente abandonadas. Isto gerou diversos problemas, que incluíram a geração de DAM, impacto visual, erosão e liberação de gases para a atmosfera.

Neste contexto insta salientar a decisão da ACP da Segurança Estrutural nº 000022-79.2010.404.7204 (2013) que exigiu da Agência Nacional de Mineração (ANM) e do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA) a observância de critérios mais rígidos para o licenciamento e operação dos empreendimentos mineiros de carvão.

## 2.2 BACKFILL NA MINERAÇÃO

Na engenharia de minas, backfill refere-se a qualquer resíduo que é colocado nos vazios subterrâneos (stopes) para fins de descarte ou para realizar alguma função de suporte. O backfill utilizado apenas para preencher os vazios criados pela mineração precisam apenas ter força suficiente para evitar qualquer forma de remobilização por meio de liquefação, normalmente causada por carregamento dinâmico. No entanto, onde o backfill é aplicado como material de suporte, é necessária resistência suficiente para garantir a estabilidade durante a mineração (GRICE, 1998).

A utilização de backfill é comum em muitos países. A Polônia, África do Sul, Canadá, Estados Unidos, entre outros utilizam essa técnica há muitos anos (SIECESC, 2009).

Técnicas de mineração de carvão com uso de backfill são desenvolvidas na China para controlar estratos e subsidência de superfície, podendo efetivamente melhorar as taxas de recuperação e a segurança da mina (CHANG, et al., 2014).

Os estudos realizados por Chung (2002) demonstram que é possível utilizar, na composição do backfill, subprodutos do carvão mineral (cinzas provenientes da queima e rejeito fino ou grosso proveniente do beneficiamento de carvão). Estes estudos demonstram que a utilização da técnica de backfilling proporcionou o confinamento dos pilares de carvão e minimizou os deslocamentos verticais em superfície e subsolo, além de não existir registros de contaminação ambiental.

Ainda, de acordo com Meng Li et al (2020), a utilização de rejeitos de carvão e outros resíduos como material de backfill pode conciliar os objetivos de

enfrentar os problemas ambientais ao mesmo tempo em que se promove o controle de subsidências em minas subterrâneas de carvão, tornando o processo mais sustentável.

Kostecki e Spearing (2015) concluíram em seu estudo que um aumento de 10 a 40% na resistência do pilar e na capacidade de carga final pode ser esperado quando um preenchimento coesivo é usado entre 25 e 75% de preenchimento da altura lavrada, respectivamente.

No Brasil temos históricos da utilização dessa técnica nas minerações de fluorita (Santa Catarina), mineração de ouro (Goiás), mineração de potássio (Alagoas), mineração de cobre (Bahia) além da mineração de carvão (Santa Catarina). A crescente utilização da tecnologia de backfilling está correlacionada à necessidade de se minerar com normas mais rígidas, em relação a danos estruturais no solo, meio ambiente, além de uma taxa de extração de lavra maior. Tradicionalmente, backfill é uma técnica de sustentação passiva do maciço rochoso, usada principalmente no método de lavra *Cut-and-fill* (corte e enchimento). A utilização dessa técnica é crescente em outros métodos de lavra como, por exemplo, *Room and Pillar* (câmaras e pilares) e *Longwall* (SIECESC, 2009).

### **2.2.1 Tipos de Backfill**

Os tipos de backfill podem ser divididos em duas grandes categorias, cimentados ou não cimentados. O backfill cimentado geralmente inclui uma pequena dosagem de aglutinante pozolânico, como cimento, cinzas volantes, entre outros materiais para melhoria da resistência. Isso inclui preenchimentos do tipo: rocha cimentada, agregados cimentados, hidráulicos cimentados e de pasta. Os preenchimentos com agregados não cimentados podem ser na forma de preenchimentos hidráulicos, preenchimentos de rocha, preenchimentos de areia. Backfill não cimentados, como o nome sugere, não usam nenhum agente de ligação misturado com o material de enchimento. O comportamento mecânico e o desempenho de aterros não cimentados podem, portanto, ser estudados usando teorias da mecânica do solo. O backfill hidráulico não cimentado é o mais comum em todo o mundo (RANKINE et al., 2007).

No sul de Santa Catarina, Heemann e Costa (2008) realizaram experimentos utilizando preenchimento hidráulico de galerias de subsolo com o uso de pasta mineral, cimento e cinzas volantes (fly ash) dispostos por meio de tubulação. Estes realizaram rockfill e pastefill, ambos testando a matriz de finos e ensaios baixa permeabilidade.

### **3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo estão apresentados os materiais, procedimentos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento experimental deste trabalho assim como a caracterização dos materiais utilizados. Os experimentos foram desenvolvidos no laboratório da empresa Sul Brasileira de Mineração - SBM. A Figura 2 apresenta a sequência das etapas de processos realizados.

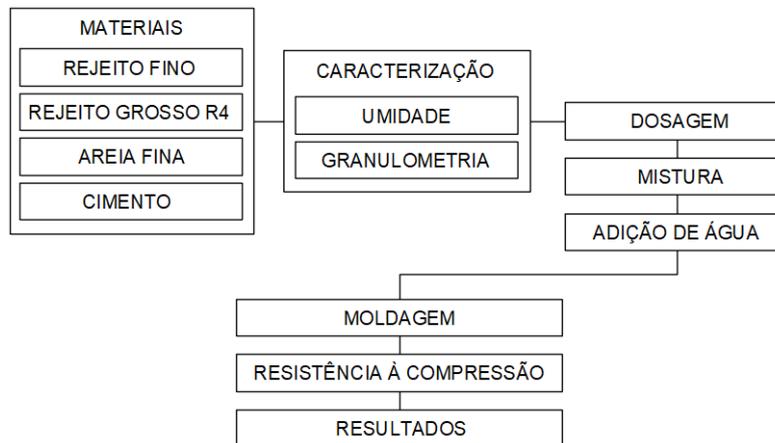
#### **3.1 MATERIAIS UTILIZADOS**

Foram utilizados os rejeitos grossos do tipo R4 resultantes do processo de beneficiamento de carvão da Mina Fontanella da Carbonífera Metropolitana, localizada na cidade de Treviso, Santa Catarina. Os rejeitos grossos são aqueles separados após o processo de britagem e o processo de meio denso. Possuem a designação de R4 por possuírem menor quantidade de enxofre em sua composição. Os rejeitos foram coletados seguindo os procedimentos padronizados da empresa, acondicionados em sacos impermeáveis e transportados até o laboratório citado. O rejeito fino foi obtido a partir do processo de beneficiamento da mina Cruz de Malta da Indústria Carbonífera Rio Deserto também localizada na cidade de Treviso. Ambos os rejeitos são provenientes da extração da camada Bonito.

Também foi utilizado neste trabalho, como agregado para composição do traço, areia fina, assim classificada conforme a ABNT NBR 7211:2005, oriunda da jazida Ilíbio e Silva de Treze de Maio/SC.

O aglomerante utilizado para o experimento foi o cimento CP-IV-32RS (resistente a sulfatos) adquirido diretamente do comércio local.

Figura 2: Sequência de atividades do estudo.



Fonte: Do autor (2022).

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A umidade das amostras foi determinada utilizando-se uma estufa com exaustão de ar forçada e mantendo a temperatura em 65°C para evitar a descaracterização do material com perda de voláteis. A Tabela 1 indica os valores obtidos após o ensaio realizado.

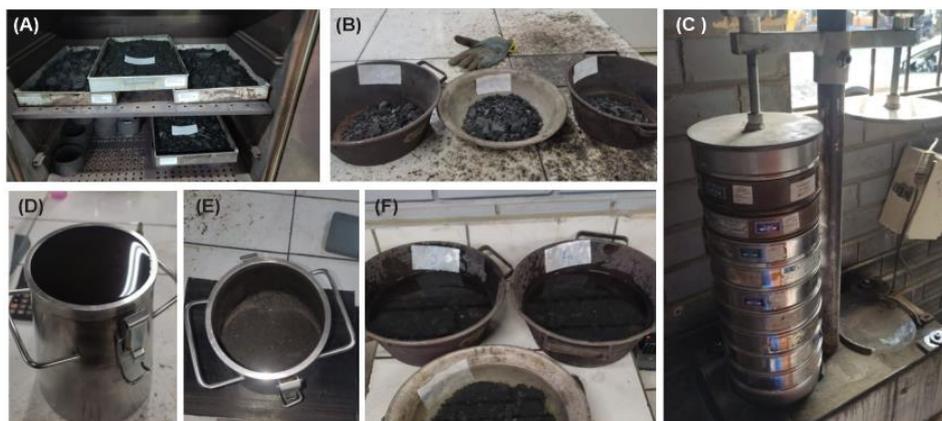
Tabela 1: Umidade dos rejeitos.

Umidade total (%)	
Rejeito Grosso R4	4,52
Rejeito Fino	56,43

Fonte: Do autor (2022).

Procedeu-se também a caracterização dos rejeitos à granulometria conforme a ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados - Determinação da composição granulométrica utilizando-se um conjunto de peneiras padronizadas em um aparelho agitador. Ao final do ensaio as parcelas retidas em cada peneira foram pesadas com objetivo de se identificar a porcentagem de cada fração granulométrica. A Figura 3 identifica os ensaios realizados.

Figura 3: Preparação e ensaios de caracterização dos rejeitos.



Fonte: Do autor (2022).

(A) Secagem; (B) Amostras secas; (C) Peneiramento; (D, E, F) Ensaio de densidade.

Com o resultado dos ensaios foi elaborada a tabela 2. Em comparação com a ABNT NBR 7211:2005 relativa a Agregados para concreto – Especificação – restou verificado que a distribuição granulométrica encontrada não enquadra a amostra como agregado miúdo nem graúdo dada a grande variação existente.

Tabela 2: Análise Granulométrica do Rejeito.

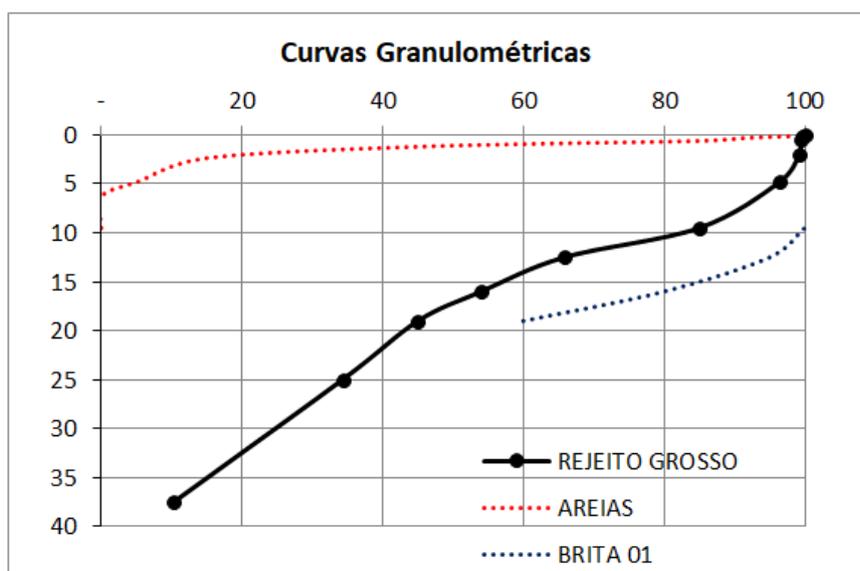
GRANULOMETRIA - REJEITO GROSSO R4				
	Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulado (%)	Passante (%)
BRITA 01	37,5	<b>10,30</b>	10,30	100
	25	<b>24,00</b>	34,30	89,7
	19	<b>10,70</b>	45,00	65,7
	16	<b>9,00</b>	54,00	55
	12,5	<b>11,80</b>	65,80	46
	9,5	<b>19,20</b>	85,00	34,2
	4,75	<b>11,50</b>	96,50	15
AREIAS	2	<b>2,70</b>	99,20	3,5
	0,425	<b>0,20</b>	99,40	0,8
	0,18	<b>0,20</b>	99,60	0,6
	0,075	<b>0,40</b>	100,00	0,4

Fonte: Do autor (2022).

O concreto produzido com agregados com curva granulométrica contínua proporciona uma maior trabalhabilidade e um menor consumo de cimento (IBRACON, 2007). Entretanto, apesar de a amostra apresentar essa condição

benéfica ao procedimento experimental, a distribuição se prolonga até a peneira de 37,5mm resultando em grãos muito grandes dificultando a trabalhabilidade e moldagem. O gráfico 1 ilustra a diferença descrita entre os materiais.

Gráfico 1: Comparativo entre a granulometria dos rejeitos em relação a areia e brita 01.



Fonte: Do autor (2022).

### 3.3 DOSAGEM

Finalizado o processo de caracterização das amostras, foram realizadas dosagens (traços) com distintos percentuais entre os materiais descritos, conforme a tabela 3. Estas foram desenvolvidas com volume suficiente para obtenção de conjuntos de 2 corpos de prova para cada traço: em conformidade com a NBR NM 33/1998 (Amostragem de Concreto Fresco), o volume da amostra possuía 1,5 vezes a quantidade necessária para a realização dos ensaios. Entretanto, a mesma norma versa que para ensaios de resistência à compressão, a amostra mínima deve ser de 30L, condição que não foi atendida pela quantidade insuficiente de rejeitos obtidos.

Tabela 3: Definição dos traços que serão aplicados.

Materiais	Amostras			
	01 e 02	03 e 04	05 e 06	07 e 08
Rejeito Grosso (%)	90	70	70	72
Areia Fina (%)	0	20	0	0
Areia Média (%)	0	0	20	0
Rejeito Fino - Lodo (%)	0	0	0	20
Cimento CP-IV-32RS (%)	10	10	10	8
Relação Água/cimento*	0,5	1	1	0,5

Fonte: Do autor (2021).

### 3.4 MISTURA

Neste ponto do estudo as dosagens propostas foram dispostas individualmente em uma caixa com volume de 20 litros com objetivo de homogeneizar os materiais adicionando-se água à composição. A quantidade de água a ser empregada (relação água/cimento) foi arbitrada com vistas à trabalhabilidade (fluidez) final da amostra e sua aplicação (pastefill ou rockfill): quanto maior a quantidade de água na composição, menor a resistência à compressão da composição. Inversamente, quanto menor a quantidade de água, melhores resultados a amostra tende a apresentar também para durabilidade (NBR 12655/2015). Estabeleceram-se duas quantidades de água para verificar a repercussão nas características descritas. Importante destacar que a NBR 12655/2015 descreve que o procedimento deve ocorrer em equipamento mecanizado (betoneira fixa ou caminhão betoneira). Conforme já relatado, a quantidade limitada de amostra de rejeito motivou a adoção da mistura manual dos componentes conforme pode ser visto na figura 4.

Figura 4: Mistura dos materiais.



Fonte: Do autor (2022).

### 3.5 MOLDAGEM

As amostras então foram dispostas e adensadas em moldes cilíndricos padronizados (10x20cm) de acordo com as orientações da ABNT NBR 5738:2015 (Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova) conforme figura 5.

Figura 5: Corpos de prova após a moldagem.



Fonte: Do autor (2022).

Durante as primeiras 24 horas após a moldagem, a cura foi garantida utilizando-se uma membrana plástica que cobriu a superfície do corpo de prova; após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e identificados conforme a figura 6. Os corpos de prova deveriam ser submetidos à cura úmida até o momento do ensaio, sendo acondicionados em solução saturada de hidróxido de cálcio a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ou em câmara úmida na mesma faixa de temperatura e umidade relativa do ar superior a 95%. Entretanto, por se tratar de traço com a utilização de rejeitos de carvão classificados como resíduos Classe II A (não inertes), com provável reação com a água, optou-se por realizar uma cura apenas em ambiente seco e ao abrigo da luz.

Figura 6: Corpos de prova após a desmoldagem.



Fonte: Do autor (2022).

### 3.6 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

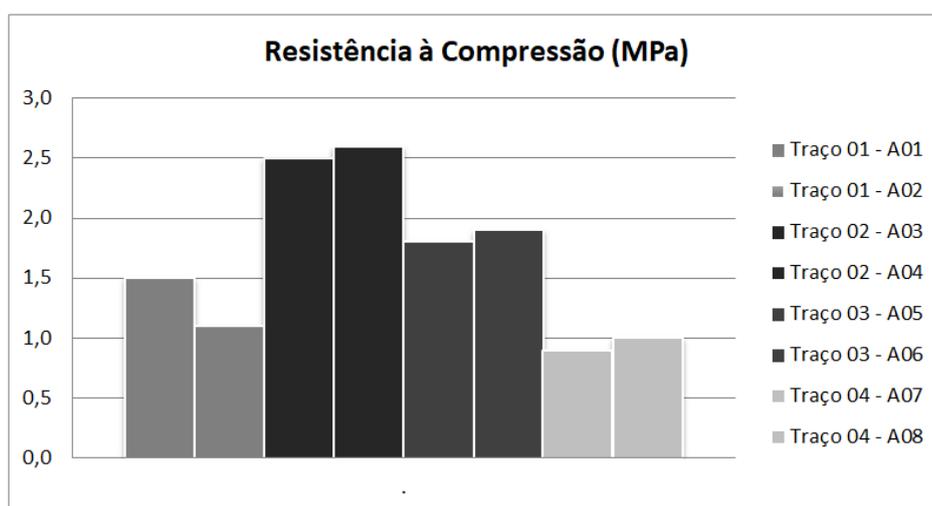
O ensaio mais comum para medir a resistência à compressão do concreto é o ensaio de compressão uniaxial. De acordo com Lima (2003) esta é medida através de corpos de prova, em ensaios destrutivos a fim de verificar a resistência do concreto, em idade de 28 dias ( $F_{ck}$ ). O  $F_{ck}$  é um valor estatístico onde estão 95% dos resultados experimentais, desta forma, se até 5% dos resultados forem inferiores, esse concreto poderá ser aceito.

Após o período de cura de 28 dias, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão em prensa hidráulica tendo como referência a ABNT 5739:2018. Os ensaios foram realizados no laboratório de Materiais de Construção do Iparque em Criciúma, Santa Catarina. A prensa utilizada neste ensaio utiliza sensores de pressão que fazem leituras de forma indireta da aplicação de carga no corpo de prova, já que o que se mede é a pressão no sistema hidráulico do equipamento. A prensa utiliza o sistema direto de medição através de células de carga de alto desempenho que ficam diretamente em contato com o corpo de prova. São também equipadas com PC e software que permite o comando, controle e monitoramento dos ensaios, exibição e impressão dos resultados, gráficos, armazenamento dos dados do ensaio.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial foram compilados no gráfico 2.

Gráfico 2: Resultados do ensaio de compressão uniaxial.



Fonte: Do autor (2022).

As amostras foram feitas em duplicata e os resultados de resistência mostraram-se similares entre os pares, com exceção do traço 01 onde ocorreu uma maior discrepância. Em relação aos valores extremos de resistência, o menor valor

obtido foi de 0,9MPa para a amostra 07 e o maior valor foi de 2,6MPa para amostra 04.

ZORZI, L. AGOSTINI, I. M. GONZATTI, C. (1991), após resultados obtidos em ensaios laboratoriais e in situ, sugerem valores de resistência para as camadas de carvão Irapuá (5,27MPa), Barro Branco (7,12MPa) e camada Bonito (6,50MPa).

Comparando os valores referenciados com os obtidos nos ensaios, verifica-se que a maior resistência obtida (2,60MPa) mostrou-se estar aquém da necessária para utilização dos rejeitos, com os traços propostos, como suporte do teto das galerias mineradas com vistas a viabilizar a mineração dos pilares das galerias de minas de subsolo. Entretanto, observa-se também que a simples aplicação de uma metodologia contemplando adição de agregados miúdos e cimento à composição do backfill, resultou em um acréscimo de 1,5 vezes na resistência mecânica da amostra em comparação com a amostra contendo somente rejeitos e cimento.

Como já descrito, a curva granulométrica da amostra de rejeitos grossos distribuiu-se por um conjunto muito grande de malhas no ensaio de peneiramento dificultando a moldagem e conseqüentemente impactando na resistência final dos corpos de prova. Uma possível solução para esta adversidade seria desenvolver outros experimentos estabelecendo-se um corte na granulometria dos rejeitos. Tal controle poderia melhorar o comportamento dos corpos de prova no ensaio de compressão axial, pois grãos maiores propiciam a ocorrência de vazios e por conseqüência diminuem a resistência da amostra. Em escala operacional, a adoção de uma peneira no final do processamento dos rejeitos na mina ou de um britador para diminuir o tamanho das partículas, poderia garantir a melhoria deste controle.

Outro ponto a ser destacado refere-se à diferença entre os resultados de resistência à compressão menores obtidos nas amostras exclusivamente compostas por rejeito grosso (01 e 02) em relação as que foram introduzidas parcelas de areia fina e média (03, 04, 05 e 06) pode ser constatado na figura 7; a utilização de agregados miúdos diminuiu a quantidade de vazios na amostra melhorando seu comportamento mecânico. Importante salientar que seria relevante a formulação de traços com utilização de agregados graúdo. Ainda sobre este mesmo ponto, para atendimento à norma NBR 12655/2015, seria fundamental que estudos futuros

contemplassem o uso de uma quantidade adequada de rejeitos para realização do ensaio utilizando um equipamento mecanizado (betoneira).

Figura 7: Corpos de prova com vazio aparentes.



Fonte: Do autor (2022).

A realização de ensaios utilizando a cura úmida em conformidade com a ABNT NBR 5738:2015 com submersão dos corpos de prova, para monitoramento da variação do pH, seria outro item que poderia ser aprofundado. Apesar de ter-se utilizado rejeitos grossos R4 no presente estudo, que possuem baixos teores de enxofre e sulfatos em relação a outros rejeitos de carvão (R1, R2 e R3), estes ainda possuem potencial para de redução do pH da água. A utilização de cimento (que possui caráter básico) na composição do concreto é um fator que pode contribuir para o aumento do pH da mistura. Ainda, seria pertinente a utilização de outros aglomerantes como a cal que possui normalmente uma pega mais lenta e retém água por mais tempo, diminuindo a retração e por consequência a fissuração do concreto. Conforme Cincotto et al. (1985) quando utilizado pequenas quantidades de cal há um aumento na resistência mecânica, ao adicionarmos maiores quantidades essa resistência diminui. Um equilíbrio na dosagem da cal auxilia no ganho de resistência e também melhora a aderência. Assim como o cimento, a cal é um material alcalino que possibilita o aumento do pH. Tais estudos ajudariam a compreender o comportamento destes rejeitos em subsolo no que tange a possibilidade de contaminação de aquíferos.

No tocante a relação água/cimento, como descrito, foi utilizado um valor alto (1,0) para os traços 02 e 03 considerando a fluidez necessária para disposição em subsolo. A redução deste parâmetro poderia melhorar a resistência das amostras. Ainda, poderia ser realizada a incorporação de aditivos plastificantes para melhoramento da trabalhabilidade sem a perda da resistência.

## **5 CONCLUSÕES**

A metodologia de disposição de rejeitos em superfície é uma alternativa que tem sido adotada como forma de atender a requisitos ambientais para operação da atividade de mineração de carvão no sul de Santa Catarina. Entretanto, verifica-se que em longo prazo, a ocupação de grandes áreas e sua manutenção perpétua tornam essa técnica onerosa.

A tecnologia de utilização de diferentes tipos de backfill já é difundida e aplicada em várias minas no mundo todo, inclusive no Brasil. De forma geral, sua utilização está intimamente ligada à necessidade de melhor aproveitamento da reserva mineral. Na região sul de Santa Catarina, o desafio difere de outras regiões porque também possui o viés ambiental uma vez que os rejeitos não são inertes.

Como visto os valores obtidos de resistência à compressão mostraram-se promissores. O refinamento dos ensaios, a adoção de um controle maior na granulometria dos rejeitos a utilização de outros tipos de traços, agregados e aglomerantes na composição da massa são algumas das sugestões para continuidade dos estudos. Importante também que, paralelamente, sejam realizadas avaliações técnico/econômicas quanto à operacionalidade do backfill, pois sua utilização como reforço estrutural para aproveitamento de pilares demandaria um planejamento de lavra diferente do que é realizado hoje pelas empresas carboníferas de Santa Catarina.

O preenchimento das câmaras melhora drasticamente o comportamento geomecânico dos pilares. Ao longo do tempo os pilares passam a apresentar um perfil cônico, grande fraturamento e baixa resistência. Cerca de 50% da área superior original do pilar é perdida, diminuindo sua capacidade de sustentação Conforme (SIECESC, 2009). A utilização da técnica de Backfill oportuniza o confinamento dos pilares colaborando para preservação da sua geometria e por

consequência na diminuição de eventos de subsidência em superfície. Importante também salientar que devido as menores taxas de extração (maiores coberturas) os potenciais efeitos de subsidência são muito menos relevantes e, somados ao Backfill, ainda menores.

O contínuo aprofundamento sobre a utilização de rejeitos como agregado na composição de concreto para aplicação como backfill em galerias mineradas mostra-se importante para o setor carbonífero e também para a sociedade. Para as empresas a implantação ou melhoria da sua utilização como método de disposição destes rejeitos, garantindo sua neutralidade, apresentaria uma nova forma de mineração, mais responsável ambientalmente em contraposição ao método de disposição em depósitos. Para a sociedade, essa alternativa diminuiria os impactos em superfície e também a possibilidade de herdar passivos ambientais em casos de abandono ou falência de empreendimentos mineiros.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: **Concreto – Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2018.

BRADY, B. H. G. & BROWN, E. T. **Rock Mechanics for Undergorund Mining**. 3. ed. United States of America: Springer Science, 2005.

CINCOTTO, M. A. et al. **Propriedades das argamassa de cimento:cal:areia**. In seminário sobre argamassas. São Paulo: Ibracon, 1985.

CITADINI-ZANETTE, V. **Recuperação de áreas degradadas na região carbonífera de Santa Catarina: aspectos sucessionais e interações interespecíficas**. In: Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas, 4., 2000, Blumenau (SC). Anais Blumenau (SC): SOBRADE, 2002. 1 CD-ROM.

CHANG, Q JIANHANG C, HUAQIANG Z, JIANBIAO B. **Implementation of Paste Backfill Mining Technology in Chinese Coal Mines**. 2014

CPRM - Serviço Geológico Brasileiro - **Carvão Mineral** - Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Carvao-Mineral-2558.html>. Acesso em: 20 abril. 2021.

CURI, A. **Lavra de minas**. São Paulo. Oficina de Textos, 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 02 de dezembro de 2022.

FARIAS, Carlos E. Gomes. **Mineração e meio ambiente: relatório preparado para o CGEE**. Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://www.cgEE.org.br>>. Acesso em: 20 abril 2021.

FILHO J. R. do A., SCHNEIDER, I. A. H., BRUM, I. A. S., de SAMPAIO, C. H., MILTZAREK, G., SCHNEIDER, C. **Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina**, Brasil, Setembro 2013.

GAMA, C. D. & TORRES, V. F. N. **Engenharia ambiental subterrânea e aplicações**. CETEM/CYTED, Rio de Janeiro, RJ, 2005, 550 p.

GOMES, S. M. (2008). **Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas "Caracterização Hidrogeológica e Hidrogeoquímica da Área Mineira de Germunde, Peirão"**. Instituto Superior Técnico, Lisboa. Disponível em: <https://www2.illinois.gov/dnr/mines/AML/Pages/Subsidence.aspx>. Acesso em: 19 de abril de 2021.

GRICE, A. **Underground Mining With Backfill. s.l.** : The 2° Annual Summit – Mine Tailings Disposal Systems, Brisbane , 1998.

HEEMANN, R. ; COSTA, J. C. F.. **O emprego da tecnologia de backfilling na gestão de resíduos sólidos da mineração de carvão**. In: CETEM - RJ. (Org.). **Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, IBRACON, 2007. Editor Geraldo Cechella Isaia.

KOPPE, J. C. & COSTA J. F. C. L. **A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina**. In: SOARES, P.S.M.; SANTOS, M.D.C.; POSSA, M.V. **Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008, p. 25-35.

R. RANKINE, M. PACHECO, N. SIVAKUGAN. **Underground Mining with Backfills**. 2007.

LIMA, F. B. **Produção e controle de qualidade do concreto**. Maceió, Brasil. Ed. Edufal. 2003

SIECESC. **Relatório Parcial de Atividades**. 2009.

TSAI S.C. **Fundamentals of Coal Beneficiation and Utilization**, volume 2 of Coal Science and Technology. Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.

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.

Meng Li, Jixiong Zhang, Ailing Li, Nan Zhou, **Reutilisation of coal gangue and fly ash as underground backfill materials for surface subsidence control**, **Journal of Cleaner Production**, Volume 254, 2020, 120113, ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120113>. (acesso em novembro de 2022).

T. Kostecki, A.J.S. Spearing, **Influence of backfill on coal pillar strength and floor bearing capacity in weak floor conditions in the Illinois Basin**, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Volume 76, 2015, Pages 55-67,

ISSN 1365-1609, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.11.011> (acesso em novembro de 2022).

Chugh, Y. P., et al. **Underground Placement of Coal Processing Waste and Coal Combustion By-Products Based Paste Backfill for Enhanced Mining Economics**. United States Department of Energy. 2002.

## 7 AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que foi quem possibilitou por diferentes meios que eu chegasse até aqui.

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

Aos meus professores, em especial o meu orientador, Marcio Zanuz, pela disponibilidade, conversas, experiências e conhecimentos repassados.

Às empresas Carbonífera Metropolitana SA., Indústria Carbonífera Rio Deserto e Sul Brasileira de Mineração, em especial aos engenheiros Luiz Antônio Zim Alexandre, Suelen Zanin Mafioletti, Felipe Medeiros Bertoncini e Daiane Zanette Biff pelo auxílio técnico, viabilização de materiais, procedimentos técnicos e gentileza no atendimento.

Aos meus colegas de classe em especial a Beatriz e ao Fábio sempre muito colaborativos nessa caminhada acadêmica e pessoal.

Aos meus colegas de trabalho em especial a Nadja Zim Alexandre sempre entusiasmada com os temas da engenharia de minas e acessível para elucidar minhas dúvidas com robustas informações técnicas e práticas.

À minha família, principalmente minha esposa Caroline que nestes quase 5 anos foi meu ponto de apoio, meu equilíbrio e suportou as minhas ausências com carinho e paciência.