

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Pablo Oliveira dos Passos Coelho

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS
COM REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO
MELHORADO COM CIMENTO**

Porto Alegre
Novembro de 2021

PABLO OLIVEIRA DOS PASSOS COELHO

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS
COM REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO
MELHORADO COM CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de
Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil

Orientador: Cesar Alberto Ruver

Porto Alegre
Novembro de 2021

PABLO OLIVEIRA DOS PASSOS COELHO

**MODELAGEM NUMÉRICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS COM
REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO MELHORADO COM
CIMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de novembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Cesar Alberto Ruver (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Lucas Festugato (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Eng. Sérgio Filipe Veloso Marques (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Me. Gustavo Dias Miguel (UFRGS)

Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Um dos desafios da indústria da mineração consiste na disposição adequada dos rejeitos gerados durante a etapa de beneficiamento. Os rejeitos de mineração são materiais que apresentam elevada diversidade de comportamento, decorrente da variabilidade natural das rochas e dos processos de extração, beneficiamento e armazenamento. Tal diversidade se traduz em elevação dos riscos. Uma das alternativas disponíveis para redução destes riscos consiste na estabilização com cimento. Portanto, deve-se estudar misturas rejeito-cimento a fim de se compreender o comportamento deste material. O presente trabalho tem por objetivo simular um ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID) em misturas rejeito-cimento Portland e validar análises numéricas realizadas. E também busca validar um método para a estimativa dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb. Foram realizados ensaios triaxiais com diferentes trajetórias de tensões, ensaios de resistência à compressão simples, ensaios de resistência à tração por compressão diametral e ensaios de adensamento unidimensional. Após a análise dos resultados, as análises numéricas foram validadas e a estimativa dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) apresentou resultados próximos dos obtidos através dos ensaios realizados.

Palavras-chave: Modelagem numérica de ensaios triaxiais; rejeitos de mineração; porosidade/cimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição granulométrica do rejeito.	4
Figura 2 – Curvas de compactação do material.	4
Figura 3 – Superfícies de escoamento do modelo Cap Plasticity no plano p-t (ABAQUS, 2011).	8
Figura 4 – Influência do parâmetro porosidade/teor de cimento na resistência à tração e à compressão.....	10
Figura 5 – Relação entre deformações tensão vertical e índice de vazios em misturas rejeito-cimento, obtida através do ensaio de adensamento unidimensional.	12
Figura 6 – Tensão desviadora-deformação axial para diferentes trajetórias de tensões em misturas rejeito-cimento.	12
Figura 7 – Relação entre deformações axial e volumétrica para diferentes trajetórias de tensões em misturas rejeito-cimento.	13
Figura 8 – Relação entre deformação axial e geração de excesso de poropressão em mistura rejeito-cimento.	13
Figura 9 – Pâmetros de resistência obtidos através do plano s'-t para misturas rejeito-cimento em diferentes trajetórias de tensões.....	14
Figura 10 – Relação entre o índice de vazios e o logaritmo natural da tensão média efetiva para uma mistura rejeito-cimento em ensaio de consolidação isotrópica.	15
Figura 11 – Tensão desviadora-deformação axial para ensaios triaxiais CID (ensaio realizado e modelos numéricos desenvolvidos) em misturas rejeito-cimento.	17
Figura 12 – Relação entre deformações axial e volumétrica para ensaios triaxiais CID (ensaio realizado e modelos numéricos desenvolvidos) em misturas rejeito-cimento.	17

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades físicas do solo.....	3
Quadro 2 – Propriedades físicas e mecânicas da mistura rejeito-cimento Portland para cada modelo desenvolvido.	16

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	2
2.1 – MATERIAIS E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	3
2.2 – DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE MOLDAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	5
2.3 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	5
2.4 – ENSAIOS DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL	6
2.5 – ENSAIOS TRIAXIAIS	6
2.6 – MODELAGEM NUMÉRICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS	7
3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
3.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	9
3.2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL	11
3.3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS	12
3.4 – RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS.....	15
4 – CONCLUSÕES.....	18
5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18

MODELAGEM NUMÉRICA DE ENSAIOS TRIAXIAIS COM REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO MELHORADO COM CIMENTO

NUMERICAL MODELING OF TRIAXIAL TESTS WITH IRON MINING TAILINGS IMPROVED WITH CEMENT

Pablo Oliveira dos Passos Coelho^a

^aUniversidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

RESUMO – Um dos desafios da indústria da mineração consiste na disposição adequada dos rejeitos gerados durante a etapa de beneficiamento. Os rejeitos de mineração são materiais que apresentam elevada diversidade de comportamento, decorrente da variabilidade natural das rochas e dos processos de extração, beneficiamento e armazenamento. Tal diversidade se traduz em elevação dos riscos. Uma das alternativas disponíveis para redução destes riscos consiste na estabilização com cimento. Portanto, deve-se estudar misturas rejeito-cimento a fim de se compreender o comportamento deste material. O presente trabalho tem por objetivo simular um ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID) em misturas rejeito-cimento Portland e validar análises numéricas realizadas. E também busca validar um método para a estimativa dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb. Foram realizados ensaios triaxiais com diferentes trajetórias de tensões, ensaios de resistência à compressão simples, ensaios de resistência à tração por compressão diametral e ensaios de adensamento unidimensional. Após a análise dos resultados, as análises numéricas foram validadas e a estimativa dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo) apresentou resultados próximos dos obtidos através dos ensaios realizados.

ABSTRACT – One of the challenges of the mining industry is the disposal of the tailings generated during the processing stage. Mining tailings are materials that present a high behavior diversity, resulting from the natural variability of the rocks and the storage process. Such diversity translates into increased risk. One of the available alternatives to reduce these risks is stabilization with cement. Therefore, tailing-cement mixtures must be studied to understand the behavior of this material. This article aims to simulate an isotropically drained consolidated triaxial test (CID) in tailings-cement mixtures and to validate the developed models. It also seeks to validate a method for estimating the Mohr-Coulomb strength parameters. Triaxial tests with different stress trajectories, simple compressive strength tests, tensile strength tests by diametrical compression, and one-dimensional compaction tests were carried out. After analyzing the results, the numerical analyzes were validated, and the estimation of the resistance parameters (friction angle and cohesive intercept) presented results close to those obtained through the tests performed.

Palavras Chave – Modelagem numérica de ensaios triaxiais, rejeitos de mineração, porosidade/cimento.

Keywords – Numerical modeling of triaxial tests, Mine tailings, Porosity/cement.

1 – INTRODUÇÃO

A importância da mineração na economia brasileira é evidenciada pela participação significativa no produto interno bruto (PIB), segundo o IBRAM (2020) o setor representa cerca de 4% do PIB.

E-mails: pablopasoscoelho@gmail.com

ORCID: orcid.org/0000-0002-4093-3935

Além disso, o minério de ferro corresponde a cerca de 70% das exportações deste setor (IBRAM, 2020). Dito isto, deve-se ressaltar que para que durante o beneficiamento ocorra a produção de rejeitos de mineração.

Os rejeitos são resíduos resultantes de beneficiamento, que consiste na utilização de processos físicos (britagem e moagem) e agentes químicos com finalidade de remover materiais associados sem valor econômico e de aumentar a qualidade e a pureza do produto. As propriedades físicas e químicas dos rejeitos apresentam elevada variabilidade, pois dependem de diversos fatores como a mineralogia das rochas extraídas e a granulometria do rejeito (Bedin, 2010).

Essa variabilidade contribui para a elevação dos riscos relacionados à barragens de rejeitos. Além disso, falhas na manutenção resultaram em acidentes com elevados impactos ambientais, como por exemplo no caso da barragem de rejeitos da mina do Fundão (Mariana/MG) em que foram despejados mais de 40 milhões de m³ de lama tóxica na maior bacia hidrográfica deste estado (Silva e Ribeiro, 2020). Para minimizar os riscos relacionados ao comportamento geomecânico dos rejeitos é possível realizar a estabilização química através da adição de cimento Portland (Gentil, 2020).

A estabilização química pode ser definida como a utilização de aditivo que resulta em melhorias nas propriedades físicas e mecânicas, como resistência, permeabilidade e deformabilidade, de tal forma que possibilite o uso do solo (França, 2003). Uma metodologia de dosagem para solos artificialmente cimentados foi apresentada por Consoli et al. (2007). Esta metodologia é capaz de prever o comportamento geomecânico de misturas solo-cimento Portland e é baseada na relação entre porosidade (η) e a quantidade volumétrica de agente cimentante (C_{iv}). Esta relação consiste na razão entre os dois fatores (η/C_{iv}). Além disso, Consoli e Nierwinski, *et al.* (2017) comprovaram que o parâmetro η/C_{iv} é adequado para a previsão do comportamento mecânico de misturas de rejeito de mineração e cimento Portland.

Ensaio triaxiais são amplamente utilizados para estudar o comportamento tensão-deformação de solos artificialmente cimentados. Entretanto, devido a variabilidade das propriedades dos rejeitos, a quantidade necessária de ensaios triaxiais pode se tornar inviável. Assim, a modelagem numérica de ensaios triaxiais surge como uma solução complementar que ajuda a compreender as propriedades do solo e auxilia na otimização dos ensaios triaxiais realizados no laboratório (Huang et al., 2011).

Neste trabalho, o modelo numérico de Drucker-Prager modificado (*cap plasticity*) foi utilizado pois é recomendado para simular a resposta constitutiva de geomateriais coesivos (Ho e Hsieh, 2013). Duas análises numéricas foram realizadas utilizando o modelo numérico *cap plasticity*. A primeira foi baseada em resultados obtidos de ensaios triaxiais realizados. A segunda análise numérica foi calibrada a partir de ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e adensamento unidimensional. O software utilizado nas simulações numéricas foi o ABAQUS (versão estudantil 2019).

Este estudo tem como objetivo simular um ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID) em misturas rejeito-cimento Portland e validar as análises numéricas realizadas. E também tem por objetivo validar o método proposto por Consoli (2014) para a estimativa dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb (ângulo de atrito e intercepto coesivo).

2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consiste em realizar os ensaios de caracterização para classificar o rejeito de mineração de ferro e estudar o comportamento geomecânico da mistura rejeito-cimento Portland através dos ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral, adensamento unidimensional e triaxiais.

2.1 – Materiais e ensaios de caracterização

O rejeito de mineração de ferro utilizado neste trabalho foi proveniente de uma planta de beneficiamento localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, centro sul do estado de Minas Gerais, Brasil. Antes da realização dos ensaios, o material foi seco e desterroado. Os ensaios de caracterização realizados foram: determinação da massa específica real dos grãos de acordo com a norma NBR 6458 (ABNT, 2016), determinação do limite de liquidez de acordo com a norma NBR 6459 (ABNT, 2016), determinação do limite de plasticidade de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 2016), análise granulométrica de acordo com a norma NBR 7180 (ABNT, 2016) e ensaio de compactação de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados no Quadro 1 e a Figura 1 apresenta a curva granulométrica do rejeito. A classificação do material foi realizada com base no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e seguiu as instruções da norma D 2487 (ASTM, 2017). Por apresentar mais de 50% de finos, a classificação SUCS seguiu os procedimentos para solos finos. E indicou que o rejeito é uma argila siltosa de baixa compressibilidade (CL).

Quadro 1 – Propriedades físicas do solo.

Propriedade	Valor
Massa específica real dos grãos (ρ_s), g/cm ³	3,18
Limite de plasticidade (LP), %	18
Limite de liquidez (LL), %	27
Limite de liquidez (LL), %	9
Areia média (0,425 mm < ϕ < 2,0 mm), %	0,43
Areia fina (0,075 mm < ϕ < 0,425 mm), %	17,45
Silte (0,002 mm < ϕ < 0,075 mm), %	69,84
Argila (ϕ < 0,002 mm), %	12,71
Classificação SUCS	CL

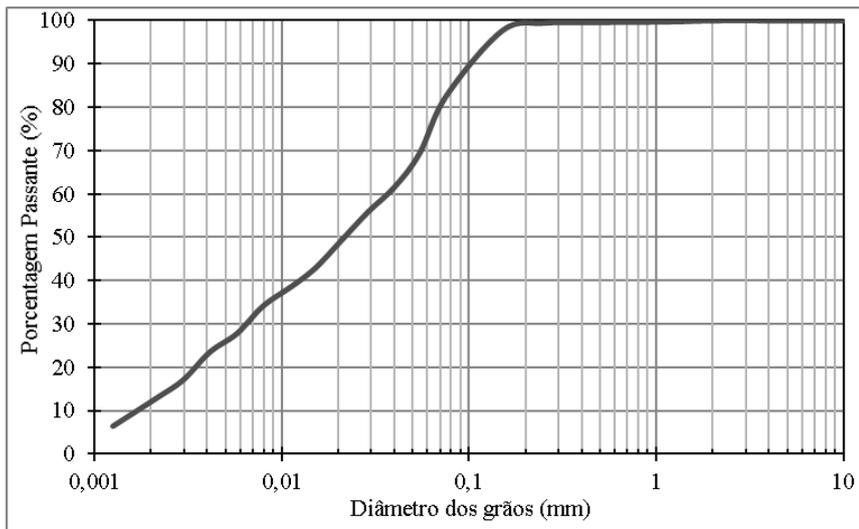


Fig. 1 – Distribuição granulométrica do rejeito.

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), nas energias normal e modificada. Para a energia normal, a umidade ótima obtida foi de 15,70% e o peso específico aparente seco máximo foi de 20,0 kN/m³. E para a energia modificada, foi obtida a umidade ótima de 11,30% e o peso específico aparente seco máximo de 22,3 kN/m³. A Figura 2 apresenta as curvas de compactação do rejeito.

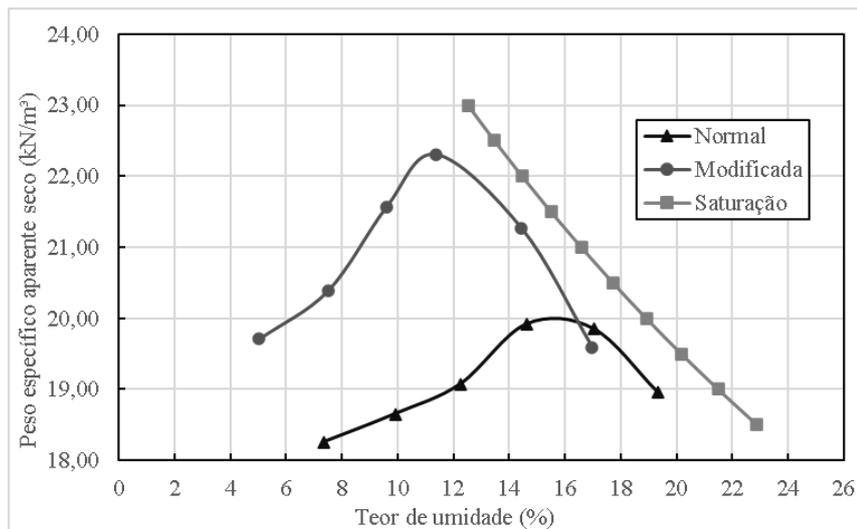


Fig. 2 – Curvas de compactação do material.

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V – ARI, que atende os requisitos da norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Este cimento Portland foi escolhido pois apresenta ganhos rápidos de resistência. Para a moldagem dos corpos de prova e para

a execução de todos os ensaios realizados foi utilizada água destilada, pois isto elimina o efeito gerado pela variabilidade da água da rede pública.

2.2 – Definição dos pontos de moldagem e moldagem dos corpos de prova

Os pontos de moldagem utilizados foram baseados na curva de compactação com energia modificada, entretanto devido às limitações físicas os valores de peso específico seco utilizados foram de 18, 19 e 20 kN/m³ e o teor de umidade utilizado foi de 11,3%. A partir de estudos sobre a estabilização química de rejeitos de mineração (Sun et al., 2011; Consoli et al., 2017a) foram definidos os teores de cimento Portland utilizados (3, 5 e 7%), tais valores foram calculados em relação a massa seca de rejeito.

Os corpos de prova foram moldados de acordo com as diretrizes da norma NBR 12024 (ABNT, 2012). Primeiramente, o rejeito de mineração foi seco em estufa à temperatura de 100±5°C, destorroado e apenas a parcela passante na peneira de 2,00 mm (MESH 10) foi utilizada. Após isto, o rejeito e o cimento Portland (CP V –ARI) foram pesados e misturados até que se formasse uma mistura homogênea. Por fim, foi adicionada uma porcentagem de água destilada (w=11,3%) em relação ao peso seco da mistura rejeito-cimento Portland e misturou-se até atingir a homogeneidade da mistura. E, três amostras de cada mistura foram levadas à estufa com temperatura de 100±5°C por 48 horas para medir o teor de umidade.

Para os ensaios de compressão simples, tração por compressão diametral e triaxiais foram moldados corpos de prova com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. A moldagem ocorreu de forma estática em três camadas. As interfaces entre cada camada foram escarificadas para que fosse garantida a adesão total entre uma camada e outra. Para os ensaios de adensamento foram moldados corpos de prova de 25 mm de altura e 71 mm de diâmetro. A moldagem ocorreu de forma estática com apenas uma camada. Após as moldagens dos corpos de prova, a massa, a altura e o diâmetro foram registrados.

O tempo de cura para todas as amostras foi de 3 dias. Nos ensaios para definição de resistência mecânica não confinada, as amostras foram armazenadas em embalagens plásticas (para evitar perda de umidade) por 2 dias e no terceiro dia foram imersas em água por 24 horas, com o objetivo de reduzir a sucção. A cura das amostras ocorreu em temperatura ambiente (23°C) e a umidade foi mantida em 11,3%, pois as amostras não estavam em contato com o ar do ambiente. Nos ensaios de adensamento as amostras foram armazenadas em embalagens plásticas por 3 dias. Em relação aos ensaios triaxiais, as amostras foram levadas ao equipamento após a moldagem, e a cura ocorreu durante as etapas de percolação, saturação e consolidação, de modo que o cisalhamento ocorresse após 3 dias de cura.

2.3 – Ensaios de resistência mecânica

Foram realizados ensaios de compressão simples e de tração por compressão diametral, tais ensaios seguiram as orientações das normas brasileiras NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7222 (ABNT, 2011), respectivamente. As amostras foram ensaiadas em uma prensa automática de velocidade constante (1,14 milímetro por minuto) e os valores de carga máxima foram registrados através de uma célula de carga com capacidade de 10 kN e resolução de 2,99x10⁻³ kN.

Para reduzir a variabilidade dos resultados, a resistência de cada mistura ensaiada foi calculada através da média de três amostras por dosagem para ambos os ensaios.

Estes ensaios foram realizados para se verificar a influência do teor de cimento Portland, do peso específico aparente seco (γ_d) e do índice porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}). Também será analisada a relação entre as equações obtidas para a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral. Esta relação permite, através do método descrito por Consoli (2014), estimar valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo.

2.4 – Ensaios de adensamento unidimensional

O ensaio de adensamento unidimensional consiste em carregar uma amostra axialmente enquanto se restringe as deformações radiais. Essa restrição radial ocorre devido a utilização de um anel metálico rígido. Assim, toda a deformação sofrida pela amostra será axial, portanto, é possível calcular a variação volumétrica da amostra a partir da deformação vertical.

As amostras ensaiadas apresentaram peso específico aparente seco de 19 kN/m³ e teor de umidade de 11,3%. Para avaliar a diferença do comportamento das amostras, foram moldadas duas amostras com teores diferentes de cimento (0 e 5%). O teor de cimento Portland foi calculado em relação a massa seca do rejeito. Essa dosagem (5% de teor de cimento) foi adotada pois representa o comportamento intermediário em relação às dosagens analisadas nos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral.

Os ensaios foram realizados conforme as diretrizes da norma NBR 16853 (ABNT, 2020). Para garantir a drenagem, foram colocadas pedras porosas e papel filtro nas faces inferior e superior das amostras. A aquisição dos dados de altura da amostra ocorreu de forma automatizada através da utilização de transdutores lineares (LVDT) com resolução de 1,53x10⁻³mm. E do software *LabView*. Os dados utilizados corresponderam às leituras com intervalo de tempo especificadas em norma. Os carregamentos adotados foram de: 10, 20, 40, 160 e 750 kPa. E o intervalo entre cada carregamento foi de 24 horas.

Após a realização dos ensaios, calculou-se a altura dos sólidos de cada amostra. A partir deste valor é possível calcular o índice de vazios ao final de cada carregamento (após o intervalo de 24 horas). Com a variação do índice de vazios foi traçada a curva de índice de vazios em função do logaritmo da pressão aplicada.

Para obtenção dos índices de deformabilidade, índice de compressão (C_c) e índice de expansão (C_s), foi utilizada a equação 1. Durante o carregamento se determina o C_c e na etapa de descarregamento se determina o C_s .

$$C_c, C_s = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (1)$$

Em que e representa o índice de vazios e σ representa a tensão vertical.

2.5 – Ensaios triaxiais

Foram realizados ensaios triaxiais com diferentes trajetórias de tensões. Os ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID) realizados seguiram as trajetórias de compressão axial e de p' constante. O ensaio consolidado isotropicamente não drenado (CIU) realizado seguiu a trajetória de compressão axial. Todas as amostras ensaiadas foram consolidadas até a tensão efetiva de 300 kPa. Os ensaios CID realizados seguiram as instruções da norma D7181 (ASTM, 2020) e o ensaio CIU seguiu as instruções da norma D4767 (ASTM, 2020).

As amostras ensaiadas apresentaram peso específico aparente seco de 19 kN/m³, teor de cimento Portland de 5% e teor de umidade de 11,3%. Essa dosagem foi adotada pois representa o comportamento intermediário em relação às dosagens analisadas nos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral.

Após a montagem dos ensaios, as amostras foram submetidas à percolação com CO₂ por 30 minutos. Em seguida, foram submetidas à percolação com água por 48 horas, sob uma tensão efetiva de 20 kPa. A etapa seguinte foi a saturação por 24 horas, sob uma tensão efetiva de 20 kPa. Ao final desta etapa foi medido o parâmetro B da poropressão. O parâmetro B de Skempton (1954) indica a saturação do corpo de prova, e o valor mínimo adotado foi de 0,9. A etapa seguinte foi a consolidação isotrópica até a tensão efetiva de 300 kPa. Por fim, as amostras foram cisalhadas a uma taxa de

deformações constante de 2 mm/h. A correção da área das amostras seguiu as recomendações propostas por La Rochelle et al. (1988).

2.6 – Modelagem numérica de ensaios triaxiais

Duas análises numéricas, pelo método de elementos finitos, foram realizadas para simular o ensaio triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID). A principal diferença entre as análises numéricas consiste nos dados de entrada. A primeira análise numérica utiliza parâmetros de resistência obtidos através dos três ensaios triaxiais realizados, enquanto a segunda utiliza os parâmetros estimados através do método proposto por Consoli (2014). Outra diferença consiste nos parâmetros de deformabilidade (λ e κ). A primeira análise numérica obteve estes parâmetros através do ensaio de consolidação isotrópica realizado, enquanto a segunda utilizou os valores estimados através do ensaio de adensamento unidimensional.

Segundo Ho e Hsieh (2013), o modelo constitutivo Drucker-Prager/*Cap model* é bem conhecido por sua utilização em aplicações na engenharia geotécnica. Além disso, este modelo busca simular a resposta coesiva de geomateriais, o que torna este método adequado para simular misturas rejeitamento. Portanto, este modelo foi utilizado através do modelo numérico *Cap Plasticity* presente no software ABAQUS.

A geometria das análises numéricas foi definida através de dois elementos axissimétricos quadrados do tipo CAX4P (quadrilátero axissimétrico de 4 nós, com deslocamento bilinear e pressão de poro bilinear). Com dimensões de 2,5 por 2,5 cm. As condições de contorno foram definidas em duas etapas. A primeira etapa consistiu na consolidação da amostra, logo apenas a tensão confinante atuava. A segunda etapa foi o cisalhamento, que ocorreu através de deslocamento controlado.

As condições de contorno consideradas foram a restrição do movimento horizontal no plano de simetria, restrição do movimento vertical na base inferior e valor da poropressão igual a 0 na superfície horizontal no topo. Nas superfícies vertical à direita e na horizontal no topo, foram aplicadas a pressão confinante de 300 kPa.

O comportamento elástico das análises numéricas foi descrito através do modelo elástico presente no ABAQUS. Durante o cisalhamento, o deslocamento vertical da superfície horizontal superior foi de 0,01 m (20% de deformação axial), e este deslocamento foi dividido em 100 intervalos com tempo de execução elevado (10000 segundos) para garantir a dissipação do excesso de poropressão gerado.

O modelo *Cap Plasticity* apresenta uma superfície de escoamento formada pela junção entre a superfície de ruptura linear de Drucker-Prager e uma superfície de escoamento denominada “*Cap*”. A Figura 3 apresenta as superfícies de escoamento no *Cap Plasticity*. Em relação às parcelas desta superfície, temos que a superfície de ruptura de Drucker-Prager é descrita pela equação 2.

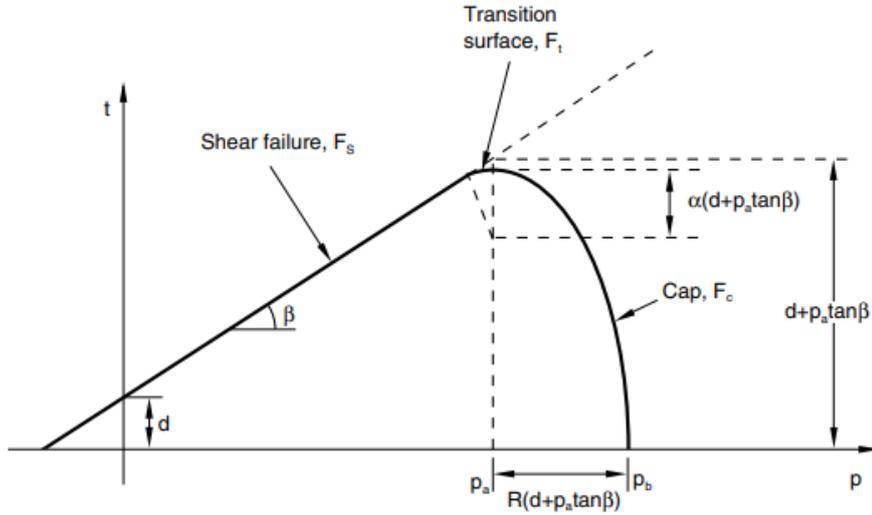


Fig. 3 – Superfícies de escoamento do modelo Cap Plasticity no plano p-t (ABAQUS, 2011).

$$F_s = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (2)$$

Em que β é o ângulo de atrito do solo e d é o intercepto coesivo no plano p-t. E t representa a tensão desviadora. Para as condições de deformação do ensaio triaxial, os parâmetros de Mohr-Coulomb (ϕ' e c') podem ser convertidos nos de Drucker-Prager pelas equações 3 e 4.

$$\tan \beta = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (3)$$

$$d = \frac{18c' \cos \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (4)$$

A superfície de escoamento “Cap” expande ou contrai em função da deformação volumétrica plástica. Segundo Helwany (2007), quando a tensão atuante causa o escoamento no “Cap”, ocorre deformação volumétrica plástica (contração), e o “Cap” se expande (enrijecimento). Porém, quando o escoamento ocorre na superfície de ruptura de Drucker-Prager, ocorre dilatação volumétrica plástica, e o “Cap” contrai. A superfície de escoamento do “Cap” é dada pela equação 5.

$$F_c = \sqrt{(p - p_a) + \left(\frac{Rt}{1 + \alpha - \alpha / \cos \beta}\right)^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (5)$$

Em que R (excentricidade do “Cap”) é um parâmetro do material que controla o formato do “Cap” e α é um número pequeno (geralmente entre 0,01 e 0,05) e é utilizado para definir a transição entre o “Cap” e a superfície de ruptura de Drucker-Prager. E t é a tensão desviadora descrita pela equação 6. A tensão média equivalente p é descrita pela equação 7. A tensão equivalente de Mises é dada pela equação 8. E o terceiro invariante de tensões r é dado pela equação 9. O parâmetro K ,

presente na equação que define t , é a taxa de fluxo da tensão e controla o formato da superfície de escoamento no plano π (ABAQUS (2011)).

$$t = \frac{1}{2}q \left[1 + \frac{1}{K} - \left(1 - \frac{1}{K} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (6)$$

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (7)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}} S : S \quad (8)$$

$$r = \left(\frac{9}{2} S : S \cdot S \right)^3 \quad (9)$$

A superfície de transição é dada pela equação 10. Em que p_a é um parâmetro que controla o comportamento de *hardening-softning* em função da deformação volumétrica plástica e é dado pela equação 11. O parâmetro p_b é a tensão média efetiva. Além disso, a função $p_b = p_b(\varepsilon_{vol}^{pl})$ descreve o comportamento de *hardening-softening*. A deformação volumétrica plástica pode ser calculada pela equação 12.

$$F_t = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left[t - \left(1 - \frac{\alpha}{\cos \beta} \right) (d + p_a \tan \beta) \right]^2} - \alpha(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (10)$$

$$p_a = \frac{p_b - Rd}{1 + R \tan \beta} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{vol}^{pl} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_0} = \frac{C_c - C_s}{2,3(1 + e_0)} \ln \frac{p'}{p'_0} \quad (12)$$

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 – Resultados dos ensaios de resistência mecânica

A relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) foi utilizada para analisar a variação da resistência à compressão e à tração por compressão diametral, assim como em estudos anteriores (Festugato et al., 2017; Baldovino et al. (2021)). A porosidade (η) pode ser calculada a partir do índice de vazios da mistura, que é função do peso específico aparente seco (γ_d). O teor volumétrico de cimento Portland (C_{iv}) pode ser calculado pela razão entre o volume de cimento Portland e o volume total do corpo de prova.

Devido ao fato de que a porosidade (η) exercer maior influência em relação ao teor volumétrico de cimento Portland (C_{iv}) na resistência mecânica. O teor volumétrico de cimento Portland (C_{iv}) deve ser corrigido por um expoente de ajuste B. Isto pode ser observado em estudos anteriores que indicam a utilização deste expoente B em misturas rejeito-cimento Portland (Consoli et al., 2017b; Baldovino et al., 2020). Deve-se adotar o expoente que melhor se adequa aos resultados de resistência mecânica. Portanto, o expoente B, que melhor se adequa aos resultados de q_u e q_t , é igual a 0,16.

As curvas de resistência à compressão simples (q_u) e resistência à tração por compressão diametral (q_t) em função do $(\eta/C_{iv}^{0,16})$ apresentam-se na Figura 4. Através destas curvas é possível perceber que o aumento no teor de cimento resulta em aumento na resistência mecânica. E que o aumento do peso específico aparente seco gera redução da porosidade e isto resulta em aumento da resistência mecânica.

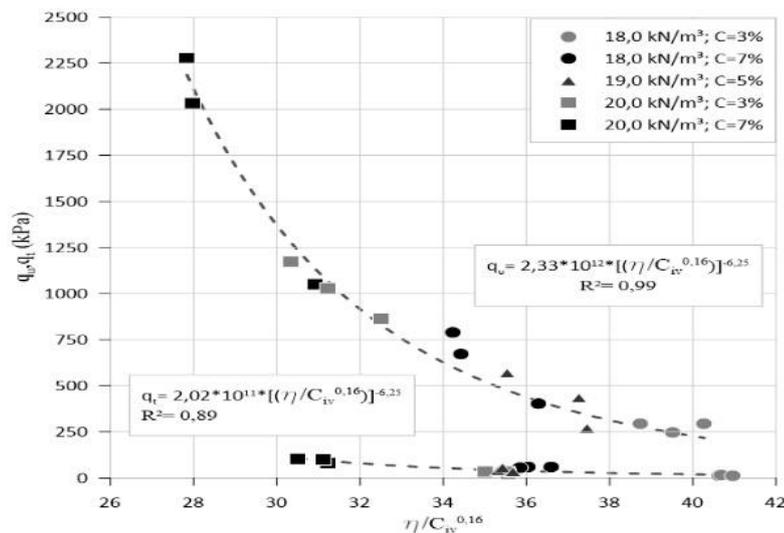


Fig. 4 – Influência do parâmetro porosidade/teor de cimento na resistência à tração e à compressão.

Ao se comparar as equações de ajuste da resistência à compressão simples (q_u) e da resistência à tração por compressão diametral (q_t) é possível obter uma relação empírica. Segundo Consoli (2014), esta relação pode ser descrita pelo fator ξ , que consiste na razão q_t/q_u . A equação 13 apresenta o cálculo deste fator para os resultados analisados. O valor calculado de ξ foi 0,09, isto está de acordo com o trabalhos apresentados por Festugato et al. (2017) que obteve 0,10 como valor de ξ para misturas areia-cimento e por Corte (2020) que obteve $\xi = 0,08$ em misturas areia-cimento Portland.

$$\xi = \frac{q_t}{q_u} = \frac{2,02 \times 10^{11} \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,16}} \right]^{-6,25}}{2,33 \times 10^{12} \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,16}} \right]^{-6,25}} = 0,09 \quad (13)$$

Segundo Diambra *et al.* (2018), a relação q_t/q_u é um parâmetro importante em solos granulares artificialmente cimentados pois permite a estimativa de q_t a partir de q_u ou vice-versa. Além disso, segundo Consoli (2014) é possível estimar o ângulo de atrito (ϕ') e a coesão (c') em solos arenosos artificialmente cimentados. As equações 14 e 15 apresentam o cálculo destes parâmetros de resistência.

A média das amostras com a mesma dosagem utilizada nos ensaios triaxiais (peso específico aparente seco de 19 kN/m³ e teor de cimento Portland de 5%) apresentou resistência a compressão simples (q_u) de 500 kPa, considerando este valor de q_u , foi obtido o valor de intercepto coesivo (c') de 113,77 kPa. E considerando o escalar de 0,09 foi obtido o valor de ângulo de atrito de 52,26°.

$$\phi' = \arcsen\left(\frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi}\right) = \arcsen\left(\frac{1 - 4(0,09)}{1 - 2(0,09)}\right) = 52,26^\circ \quad (14)$$

$$c' = \frac{q_u \left[1 - \left(\frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi}\right)\right]}{2 \cos \left[\arcsen\left(\frac{1 - 4\xi}{1 - 2\xi}\right)\right]} = \frac{q_u \left[1 - \left(\frac{1 - 4(0,09)}{1 - 2(0,09)}\right)\right]}{2 \cos \left[\arcsen\left(\frac{1 - 4(0,09)}{1 - 2(0,09)}\right)\right]} = 0,23q_u \quad (15)$$

3.2 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional

A Figura 5 apresenta a relação entre o índice de vazios e a tensão vertical. Pode-se perceber que a adição de cimento Portland tornou o rejeito menos deformável, isto está diretamente relacionado com a variação dos índices de deformabilidade, índice de compressão (C_c) e índice de expansão (C_s). Para a amostra com 5% de cimento Portland, foram obtidos $C_c=0,0192$ e $C_s=0,0082$. E para a amostra não cimentada (natural), foram obtidos $C_c=0,0588$ e $C_s=0,0240$.

Ao dividir os valores de C_c e C_s por 2,3 se obtém os valores de λ e de κ , respectivamente. Os valores obtidos para a amostra cimentada foram $\lambda=0,0084$ e $\kappa=0,0036$. Estes valores foram comparados com os obtidos no ensaio de consolidação isotrópica ($\lambda=0,0097$ e $\kappa=0,0025$) e pode-se perceber que ambos os ensaios forneceram valores bem próximos entre si. Porém, cabe ressaltar que o estado de tensões aplicado na amostra é diferente entre os ensaios.

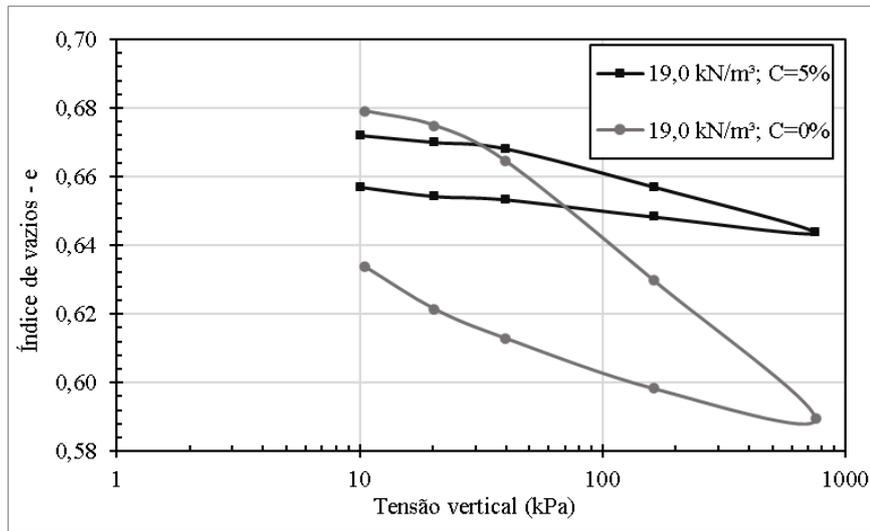


Fig. 5 – Relação entre deformações tensão vertical e índice de vazios em misturas rejeito-cimento, obtida através do ensaio de adensamento unidimensional.

3.3 – Resultados dos ensaios triaxiais

A Figura 6 apresenta o comportamento tensão desvio (q) - deformação axial (ϵ_a) dos ensaios triaxiais realizados em diferentes trajetórias de tensões. Em todos os ensaios as amostras apresentaram comportamento frágil, isto pode ser evidenciado pela presença de pico em baixas deformações.

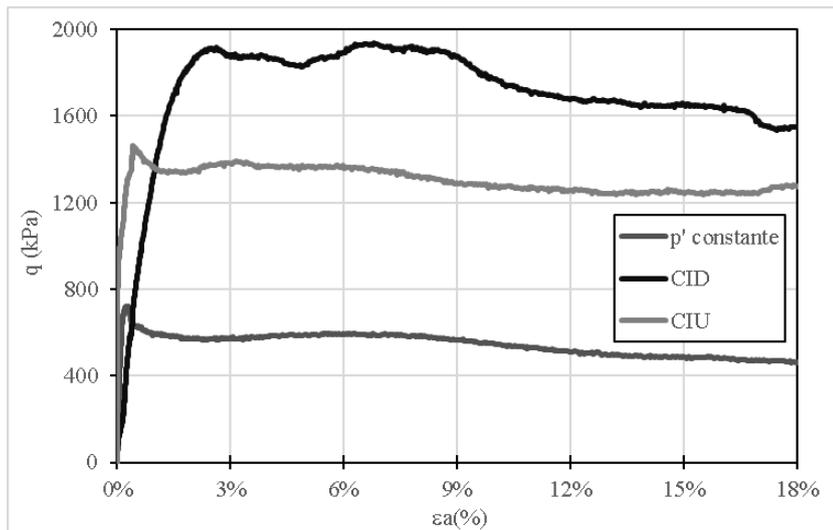


Fig. 6 – Tensão desviadora-deformação axial para diferentes trajetórias de tensões em misturas rejeito-cimento.

A Figura 7 apresenta a relação entre deformação axial (ϵ_a) e a deformação volumétrica para os ensaios drenados realizados. A amostra do ensaio CID de compressão axial apresentou um pico de

deformação volumétrica e após isso não ocorreu aumento significativo. Entretanto o ensaio p' constante apresentou uma variação elevada na deformação volumétrica.

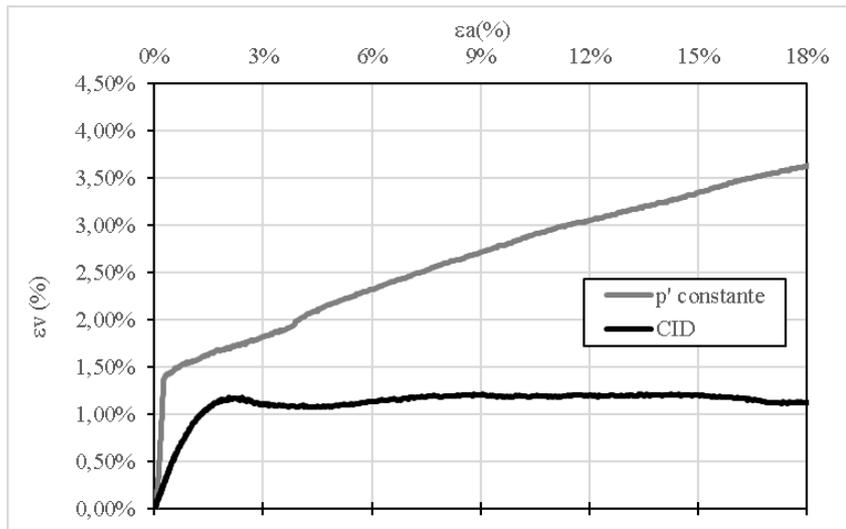


Fig. 7 – Relação entre deformações axial e volumétrica para diferentes trajetórias de tensões em misturas rejeito-cimento.

A Figura 8 apresenta a o excesso de poropressão gerado (Δu) com o aumento da deformação axial no ensaio consolidado isotropicamente não drenado (CIU). É possível perceber que a geração de excesso de poropressão apresentou valor máximo coincidente com o valor máximo de tensão desviadora (q). Após o pico, ocorreu redução do excesso de poropressão com o aumento da deformação axial.

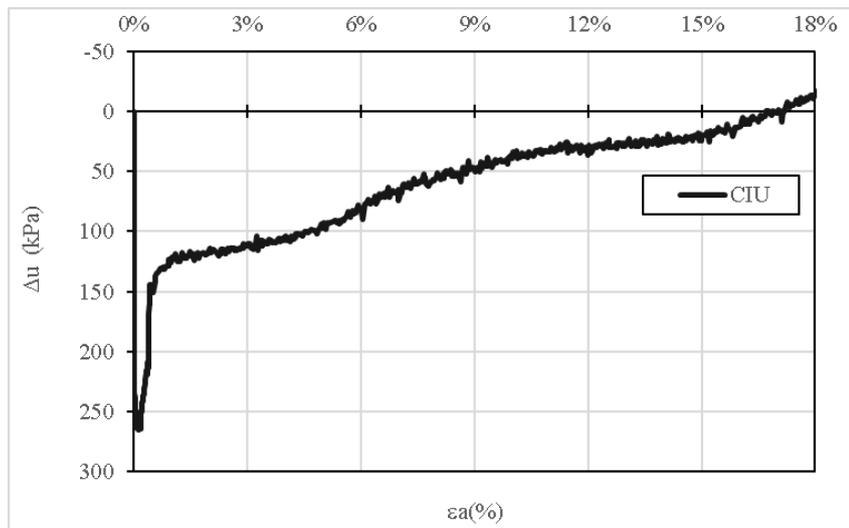


Fig. 8 – Relação entre deformação axial e geração de excesso de poropressão em mistura rejeito-cimento.

A Figura 9 apresenta os parâmetros de resistências das misturas rejeito-cimento em diferentes trajetórias de tensões considerando o caminho de tensões do MIT. Em que a tensão média efetiva [$s' = \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')$] foi plotada em relação a tensão desviadora [$t = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')$]. O ângulo de atrito obtido foi de $44,6^\circ$ e o intercepto coesivo foi de 126,8 kPa. O ensaio CIU apresentou um comportamento característico de materiais cimentados sob baixas tensões efetivas, isto ocorreu, pois, a geração de excesso de poropressão foi elevada o que resultou em tensões efetivas da ordem de 50 kPa.

Segundo Pinto (2006) para tensões inferiores à tensão de cedência, a envoltória de ruptura torna-se a curva de cedência. A tensão de cedência é definida como a tensão em que ocorre a redução brusca do índice de vazios devido à quebra das ligações resultantes da cimentação. Portanto, o comportamento da amostra no ensaio CIU foi majoritariamente influenciado pela coesão gerada pela cimentação enquanto nos outros ensaios a parcela friccional da resistência foi mais significativa.

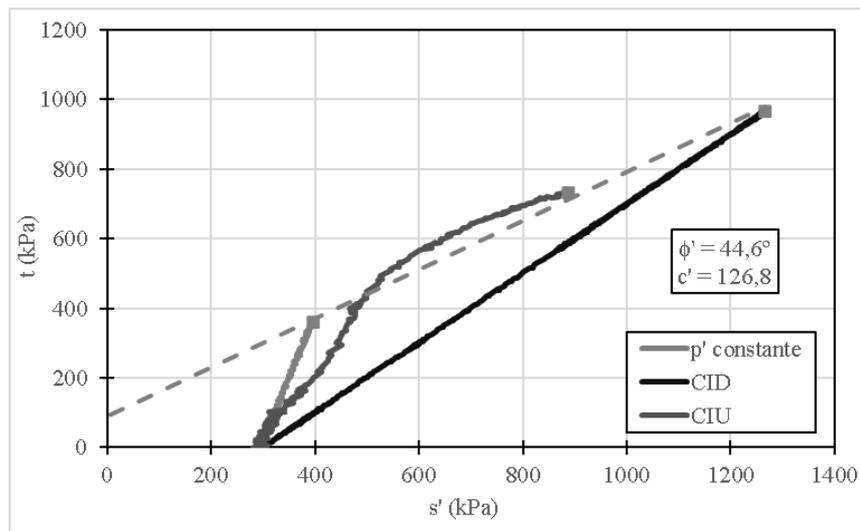


Fig. 9 – Parâmetros de resistência obtidos através do plano s' - t para misturas rejeito-cimento em diferentes trajetórias de tensões.

Para a realização da modelagem do ensaio CID foi realizado um ensaio de consolidação isotrópica com carregamento e descarregamento. A tensão média efetiva máxima utilizada foi de 500 kPa, este valor foi baseado na média dos valores de resistência a compressão simples das amostras com peso específico aparente seco de 19 kN/m^3 e teor de cimento Portland de 5%. A Figura 10 apresenta a relação entre o índice de vazios e o logaritmo natural da tensão média efetiva.

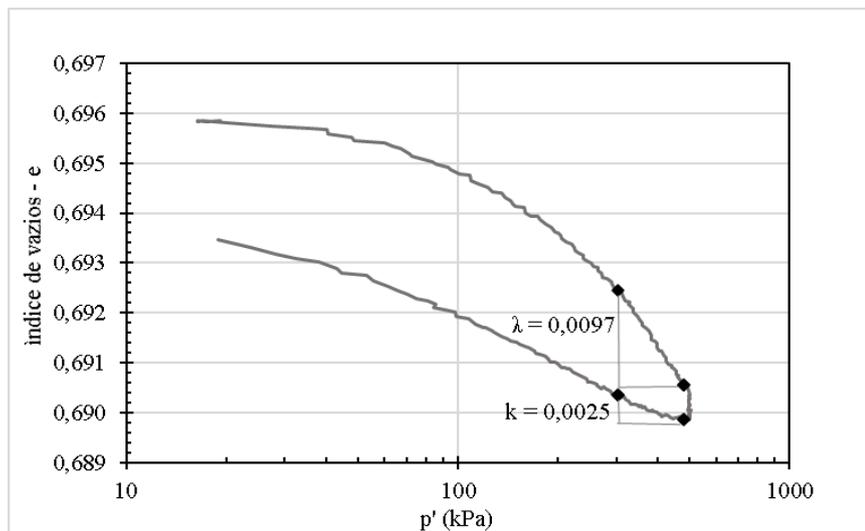


Fig. 10 – Relação entre o índice de vazios e o logaritmo natural da tensão média efetiva para uma mistura rejeito-cimento em ensaio de consolidação isotrópica.

3.4 – Resultados da modelagem numérica de ensaios triaxiais

Dois análises numéricas foram realizadas para simular o ensaio triaxial CID. Os parâmetros utilizados nas análises numéricas são apresentados na Quadro 2. O módulo de Young foi estimado a partir do ensaio CID de compressão axial (etapa de cisalhamento). O coeficiente de permeabilidade foi estimado de acordo com o encontrado por Menger (2018) para um solo fino cimentado. O valor do coeficiente de Poisson foi estimado em 0,3, valor de acordo com o encontrado na literatura para solo estabilizado com cimento. Os valores de R , α e K foram obtidos de forma iterativa, a iterações ocorreram até que a curva da análise numérica se adequasse a curva obtida no ensaio triaxial realizado.

A análise numérica 01 foi baseada nos ensaios triaxiais realizados (CID de compressão axial, CIU, p' constante e consolidação isotrópica). A análise numérica 02 foi baseada nos resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e adensamento unidimensional.

Quadro 2 – Propriedades físicas e mecânicas da mistura rejeito-cimento Portland para cada análise numérica realizada.

	Análise Numérica 1	Análise Numérica 2
Densidade (ton/m ³)	2,07	
Módulo de Young (MPa)	518	
Coeficiente de Poisson	0,3	
Índice de vazios	0,7	
Coeficiente de permeabilidade (m/s)	1,78 *10 ⁻⁸	
β (°)	61,34	65,03
d (kPa)	237,2	567,38
R	0,45	1,05
α	0,02	0,05
K	1	1
λ	0,0097	0,0084
κ	0,0025	0,0036

Para realizar a validação dos resultados obtidos na modelagem numérica, foram plotadas as curvas tensão desviadora (q) pela deformação axial (ϵ_a) das análises numéricas realizadas em comparação com o ensaio drenado isotropicamente (CID) de compressão axial realizado. Também foram plotadas as curvas de deformação volumétrica (ϵ_v) pela deformação axial (ϵ_a) para analisar o comportamento das análises numéricas realizadas.

A Figura 11 apresenta o comportamento tensão-deformação das análises numéricas e do ensaio realizados. Pode-se perceber que a análise numérica 01 (baseada nos ensaios triaxiais) convergiu com o ensaio realizado, e apresentou uma tensão de pico próxima do valor obtido no ensaio. Além disso, o comportamento de “Cap” foi coerente com o que ocorreu antes da ruptura. Logo, pode-se dizer que a análise numérica convergiu até cerca de 9% de deformação axial, após este nível de deformação o ensaio apresentou queda acentuada da tensão desviadora, o que não foi representado pela análise numérica.

A análise numérica 2 convergiu com o ensaio realizado pois apresentou valor máximo de tensão desviadora próximo do obtido no ensaio. Além disso, o valor da deformação axial quando ocorre a estabilização da tensão desviadora foi bem próximo do observado no pico do ensaio realizado.

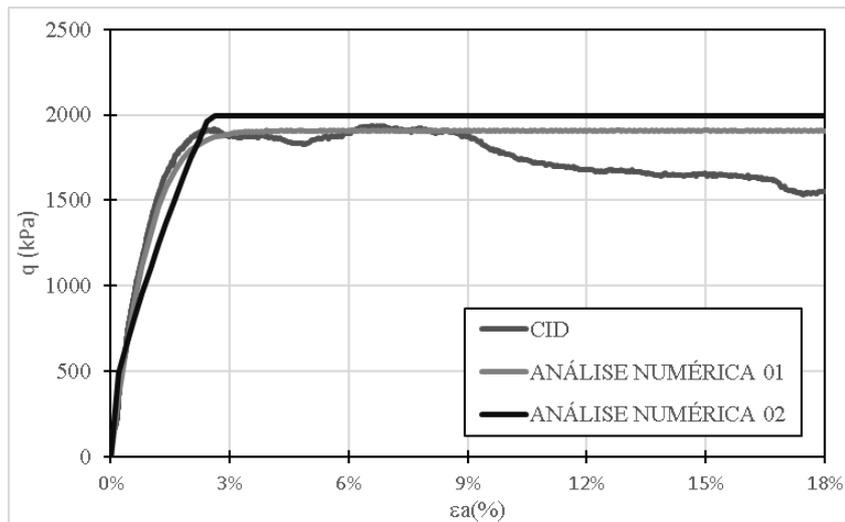


Fig. 11 – Tensão desviadora-deformação axial para ensaios triaxiais CID (ensaio realizado e análises numéricas realizadas) em misturas rejeito-cimento.

A Figura 12 apresenta a relação entre deformação axial e deformação volumétrica. Pode-se perceber que a análise numérica 01 (baseada nos ensaios triaxiais) apresentou comportamento convergente com o ensaio realizado, pois apresentou valor de pico próximo da deformação axial do ensaio realizado. Além disso, a diferença nos valores de deformação volumétrica foi baixa, esta diferença pode ser resultante de erros na leitura da variação volumétrica. Em relação à análise numérica 02, não ocorreu estabilização da deformação volumétrica. Também, deve ser ressaltado que até cerca de 3% de deformação axial o comportamento foi coerente com o ensaio realizado, após este ponto o aumento da deformação volumétrica apresentou uma tendência praticamente linear.

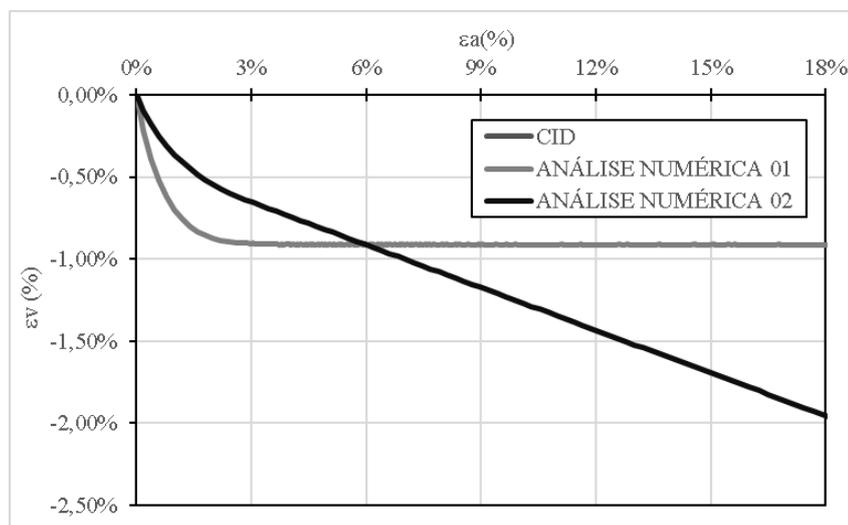


Fig. 12 – Relação entre deformações axial e volumétrica para ensaios triaxiais CID (ensaio realizado e análises numéricas realizadas) em misturas rejeito-cimento.

4 – CONCLUSÕES

A partir do que foi apresentado no programa experimental e nas análises dos resultados, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

- A partir dos ensaios de caracterização foi possível classificar o rejeito de mineração de ferro como uma argila siltosa de baixa compressibilidade (CL, na classificação SUCS).
- Os ensaios de resistência a compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral indicam que o aumento do teor de cimento Portland e que a redução da porosidade resulta em aumento da resistência mecânica.
- O índice $\eta/C_{iv}^{0,16}$ (porosidade/teor volumétrico de cimento Portland) conseguiu descrever todos os resultados de resistência à compressão simples e de tração por compressão diametral.
- O método proposto por Consoli (2014) apresentou estimativas próximas, em relação aos valores obtidos nos ensaios, para o ângulo de atrito e para o intercepto coesivo. O valor de ângulo de atrito estimado pelo método foi de $52,26^\circ$, enquanto o obtido através de ensaios triaxiais foi de $44,6^\circ$. E o valor de intercepto coesivo estimado pelo método foi de 113,77 kPa, enquanto o obtido através dos ensaios triaxiais foi de 126,8 kPa. Portanto, este método foi validado para a mistura rejeito-cimento Portland analisada.
- Os ensaios de adensamento unidimensional apresentaram a variação dos índices de compressibilidade do rejeito devido a influência da cimentação artificial. Além disso, os valores obtidos de C_c e C_s serviram para estimar os valores de λ e κ . Estas estimativas foram validadas através do ensaio de consolidação isotrópica com carregamento e descarregamento.
- Os ensaios triaxiais realizados apresentaram pico nas curvas tensão-deformação, o que é um comportamento típico de solos artificialmente cimentados. Além disso, as amostras apresentaram redução de volume durante o cisalhamento, o que foi validado pela geração de excesso de poropressão positiva.
- As análises numéricas realizadas representaram o comportamento tensão desvio (q) - deformação axial (ϵ_a) do ensaio triaxial CID. Porém, a análise numérica 01 (baseada nos ensaios triaxiais) apresentou resultados coerentes de deformação volumétrica em relação ao ensaio realizado. A análise numérica 02 apresentou resultados incoerentes de deformação volumétrica. Isto pode ser explicado pela equação que converte o intercepto coesivo (c') no parâmetro “ d ”, tal equação não parece ser adequada para valores elevados de intercepto coesivo (típicos de misturas solo-cimento).

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS (2011) *ABAQUS User's Manual*. Simulia, Providence, RI, USA.
- ABNT (2011). *NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 5 p.
- ABNT (2012). *NBR 12024 Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 10 p.
- ABNT (2016a). *NBR 6458 Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 14 p.
- ABNT (2016b). *NBR 6459 — Solo — Determinação do limite de liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 9 p.

- ABNT (2016c). *NBR 7181 — Solo - Análise granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 16 p.
- ABNT (2016d). *NBR 7180 — Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 7 p.
- ABNT (2016e). *NBR 7182 — Solo — Ensaio de compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 p.
- ABNT (2018a). *NBR 16697 — Cimento Portland - Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 16 p.
- ABNT (2018b). *NBR 5739 — Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 13 p.
- ABNT (2020). *NBR 16853 Solo — Ensaio de adensamento unidimensional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22 p.
- ASTM D2487 (2017). *Standard test method for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 10 p. doi:10.1520/D2487-17E01.
- ASTM D7181 (2020a). *Standard test method for consolidated drained triaxial compression test for soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 12 p. doi:10.1520/D7181-20.
- ASTM D4767 (2020b). *Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 14 p. doi:10.1520/D4767-11.1.6.1.
- Baldovino, Jair de Jesús Arrieta, Izzo, Jair dos Santos, Ronaldo Rose, L., e Lundgren, J. (2021). *Effects of freeze–thaw cycles and porosity/cement index on durability, strength and capillary rise of a stabilized silty soil under optimal compaction conditions*. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 39(1), pp. 481–498. doi:10.1007/s10706-020-01507-y.
- Baldovino, J. de J. A., Izzo, R. L. dos S., Teixeira, W., e Pereira, M. D. (2020). *Variáveis que influenciam na resistência à tração e à compressão simples de dois solos sedimentares estabilizados com cimento*. *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 25, nº 2. doi:10.1590/s1517-707620200002.1015.
- Bedin, J. (2010). *Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração*. Tese de doutorado. UFRGS. PPGEC/Porto Alegre. 205 p.
- Consoli, N. C. (2014). *A method proposed for the assessment of failure envelopes of cemented sandy soils*. *Engineering Geology*, vol. 169, pp. 61–68. doi:10.1016/j.enggeo.2013.11.016.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., e Heineck, K. S. (2007). *Key parameters for strength control of artificially cemented soils*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133(2), pp. 197–205. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2007)133:2(197).
- Consoli, N. C., Nierwinski, H. P., Peccin da Silva, A., e Sosnoski, J. (2017). *Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends*. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 45(2), pp. 98–102. doi:10.1016/j.geotextmem.2017.01.001.
- Consoli, N. C., Quiñónez, R. A., González, L. E., e López, R. A. (2017). *Influence of molding moisture content and porosity/cement index on stiffness, strength, and failure envelopes of artificially cemented fine-grained soils*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29(5), 04016277. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001819.

- Consoli, N. C., Rosa, D. A., Cruz, R. C., e Rosa, A. D. (2011). *Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil*. Engineering Geology, vol. 122(3–4), pp. 328–333. doi:10.1016/j.enggeo.2011.05.017.
- Corte, M. B. (2020). *Response of lightly cemented sand under multiaxial loading*. Tese de doutorado. UFRGS. PPGEC/Porto Alegre. 260 p.
- Diambra, A., Festugato, L., Ibraim, E., Peccin da Silva, A., e Consoli, N. C. (2018). *Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand*. Soils and Foundations, vol. 58(1), pp. 199–211. doi:10.1016/j.sandf.2017.11.011.
- Festugato, L., Menger, E., Benezra, F., Kipper, E. A., e Consoli, N. C. (2017). *Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 45(1), pp. 77–82. doi:10.1016/j.geotexmem.2016.09.001.
- França, F. C. (2003). *Estabilização química de solos para fins rodoviários : estudo de caso com o produto “RBI Grade 81”*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. 104 p.
- Gentil, G. A. (2020). *Avaliação da estabilização química de um rejeito de minério de ferro para aplicação em infraestrutura de pavimentos*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. 77 p.
- Ho, I. H., e Hsieh, C. C. (2013). *Numerical modeling for undrained shear strength of clays subjected to different plasticity indexes*. Journal of GeoEngineering, vol. 8(3), pp. 91–100. doi:10.6310/jog.2013.8(3).3.
- Huang, Y., Liu, K., Zhu, Y., Xie, X., e Yang, X. (2011). *Numerical simulation on laboratory triaxial test of composite soil with roots*. Advanced Materials Research, vol. 287–290, pp. 777–780. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.777.
- IBRAM (2020). *Informações sobre a economia mineral brasileira 2020 (ano base 2019)*. Instituto Brasileiro de Mineração. 1 ed. Brasília. 80 p.
- La Rochelle, P., Leroueil, S., Trak, B., Blais-Leroux, L., e Tavenas, F. (1988). *Observational approach to membrane and area corrections in triaxial tests*. Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, pp. 715-715–17. doi:10.1520/stp29110s.
- Menger, E. da S. (2018). *Comportamento hidráulico e resistência mecânica de um solo siltoso cimentado*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 82p.
- Pinto, C. de S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Silva, K. B. C., e Ribeiro, K. D. R. (2020). *Ruptura em barragens de rejeitos: uma abordagem sobre monitoramento e fiscalização*. Ignis, vol. 9, nº 3, pp. 17–34.
- Skempton, A. W. (1954). *The pore-pressure coefficients A and B*. Géotechnique, v. 4, n. 4, pp. 143–147. doi:10.1680/geot.1954.4.4.143.
- Sun, J. S., Dou, Y. M., Chen, Z. X., e Yang, C. F. (2011). *Experimental study on the performances of cement stabilized iron ore tailing gravel in highway application*. Applied Mechanics and Materials, vol. 97–98, pp. 425–428. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.97-98.425.