

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

***INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE UMIDADE DE  
COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ESTABILIZADO COM  
AGLOMERANTE POZOLÂNICO***

**Décio Collatto**

Porto Alegre  
2024

DÉCIO COLLATTO

***INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE UMIDADE DE  
COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ESTABILIZADO COM  
AGLOMERANTE POZOLÂNICO***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre  
2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Collatto, Decio  
Influência da variação de umidade de compactações nas  
propriedades mecânicas de rejeito de minério de ferro  
estabilizado com aglomerante pozolânico / Decio  
Collatto. -- 2024.  
144 f.  
Orientador: Nilo Cesar Consoli.

Coorientador: Andres Mauricio Lotero Caicedo.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2024.

1. Rejeito de minério de ferro. 2. Estabilização.  
3. Aglomerante pozolânico. 4. Empilhamento de  
Rejeitos. I. Consoli, Nilo Cesar, orient. II.  
Caicedo, Andres Mauricio Lotero, coorient. III.  
Título.

**DÉCIO COLLATTO**

***INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE UMIDADE DE  
COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO ESTABILIZADO COM  
AGLOMERANTE POZOLÂNICO***

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 31 de outubro de 2024

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Ph.D. Pela Concordia University, Canadá  
Orientador

Prof. Andres Mauricio Lotero Caicedo  
Dr. Pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Coorientador

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof<sup>a</sup>. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. João Paulo Sousa Silva (VALE S.A.)**

Dr. pela Universidade de Brasília

**Eng. Gustavo Marçal de Sousa (VALE S.A.)**

Dr. pela Universidade Federal de Ouro Preto

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e ao anjo guardião e espírito protetor, por iluminar meu caminho e oferecer paz, equilíbrio e conforto nesta jornada de evolução, principalmente durante os momentos de cansaço físico e mental.

Ao Professor orientador Dr. Nilo Cesar Consoli pelos ensinamentos, auxílios, orientações seguras, amizade e disponibilidade de pronto atendimento durante este período de doutoramento. Seu conhecimento e dedicação ao ensino e desenvolvimento de pesquisa são inspiradores.

Ao coorientador Dr. Andres Lotero pelo auxílio nas interpretações químicas e estrutura desta tese.

Aos colegas e amigos do LEGG, em especial ao Aziz Tebechrani Neto, Alexia Wagner, Maiki Mafessoli e Hugo Carlos Scheuermann Filho. que me ajudaram muito nos ensaios, análises e construção deste trabalho, meu muito obrigado.

Aos Professores do PPGEC pela oportunidade de enriquecer meus conhecimentos.

## RESUMO

COLLATTO, D. *Influência da variação de umidade de compactação nas propriedades mecânicas de rejeito de minério de ferro estabilizado com aglomerante pozolânico*. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A geração de rejeitos é inerente a atividade de mineração de ferro, pois o minério de ferro é extraído a partir de rochas com composição mineralógica variada, as quais não são inteiramente formadas por minerais ferrosos. Assim, o volume de rejeitos gerados é influenciado pela demanda global por minério de ferro e pelo grau de pureza das jazidas; ou seja, o esgotamento de reservas de alta qualidade implica aumento na geração de rejeitos. Tradicionalmente, esses têm sido armazenados em barragens, as quais foram recentemente proibidas no contexto brasileiro: a resolução da Agência Nacional de Mineração (ANM) nº13 de 2019 exige o descomissionamento de barragens desse tipo e a resolução nº 85/2021 da ANM estabelece regras para o reaproveitamento dos rejeitos de mineração. Esse cenário impeliu as companhias mineradoras brasileiras à busca por alternativas para disposição final e/ou reaproveitamento dos rejeitos. Dentre essas possibilidades destaca-se a disposição em pilhas; isto é, em estruturas formadas a partir da compactação mecânica de rejeitos filtrados em uma condição não saturada. Assim, o presente trabalho avaliou a estabilização de uma mistura de rejeito de minério de ferro (20% de rejeitos ultrafinos e 80% de rejeitos granulares) com a adição de 6% de um aglomerante pozolânico (50% de metacaulim e 50% de cal hidratada calcítica) sob distintas características de compactação em diferentes tempos de cura. Estudou-se a influência de 5 (cinco) teores de umidade (8, 10, 12, 14 e 16%), 2 (dois) pesos específicos aparente seco (19 e 20 kN/m<sup>3</sup>) e 4 (quatro) tempos de cura (7, 14, 28 e 90 dias) na resistência a compressão simples (RCS) e no módulo de cisalhamento inicial ( $G_0$ ) das misturas estabilizadas considerando-se um planejamento fatorial completo. Adicionalmente, foram realizados ensaios de compressão triaxial em amostras representativas para avaliar com maior profundidade a influência do teor de umidade na resposta mecânica do material. De maneira geral, todas as variáveis estudadas impactaram de maneira semelhante RCS e  $G_0$ , com destaque para a densidade e para o tempo de cura com ganhos de resistência ao longo do tempo de 1084% na densidade de compactação de 19 kN/m<sup>3</sup> e 870% na de 20 kN/m<sup>3</sup> entre 7 e 90 dias de cura. O teor de umidade, embora significativo, teve menor influência na resposta mecânica, incluindo os ensaios de compressão triaxial. Assim, mostrou-se que a adição de um aglomerante pozolânico é eficaz em promover a melhoria nas propriedades mecânicas do rejeito avaliado e confere certa resiliência, como demonstrado pela baixa influência do teor de umidade nas propriedades mecânicas avaliadas. Variar a umidade de 8% a 15% (e manter o grau de compactação) não afetou substancialmente a resposta mecânica das misturas cimentadas em relação a  $G_0$ , RCS e  $q_{máx}$ . Isso é essencial para condições de campo, onde o controle de umidade, antes e durante a compactação, é um processo complexo para conceber adequadamente uma pilha de rejeitos. Dessa forma, é uma alternativa viável para utilização prática em pilhas, já que as características de compactação são determinantes para o desempenho adequado dessas estruturas.

**Palavras-chave:** *rejeito; minério de ferro; estabilização; material pozolânico, empilhamento de rejeitos.*

## ABSTRACT

COLLATTO, D. **Influence of variation in compaction humidity on the mechanical properties of iron ore tailings stabilized with a pozzolanic binder.** 2024. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The generation of waste is inherent to the iron ore mining activity, as iron ore is extracted from rocks with varied mineralogical compositions, which are not entirely composed of iron minerals. Thus, the volume of waste generated is influenced by global demand for iron ore and the purity of the deposits; that is, the depletion of high-quality reserves leads to an increase in waste generation. Traditionally, these have been stored in dams, which were recently banned in the Brazilian context: the resolution of the National Mining Agency (ANM) No. 13 of 2019 mandates the decommissioning of such dams, and resolution No. 85/2021 of the ANM establishes rules for the reuse of mining waste. This scenario has driven Brazilian mining companies to seek alternatives for final disposal and/or reuse of waste. Among these possibilities, the disposal in piles stands out; that is, in structures formed from the mechanical compaction of filtered waste in a non-saturated condition. Thus, this study evaluated the stabilization of a mixture of iron ore waste (20% ultrafine waste and 80% granular waste) with the addition of 6% of a pozzolanic binder (50% metakaolin and 50% hydrated calcitic lime) under different compaction characteristics and various curing times. The influence of five moisture contents (8, 10, 12, 14, and 16%), two dry apparent specific weights (19 and 20 kN/m<sup>3</sup>), and four curing times (7, 14, 28, and 90 days) on the unconfined compressive strength (UCS) and the initial shear modulus ( $G_0$ ) of the stabilized mixtures was studied, considering a complete factorial planning. Additionally, triaxial compression tests were conducted on representative samples to further evaluate the influence of moisture content on the mechanical response of the material. In general, all studied variables similarly impacted UCS and  $G_0$ , particularly density and curing time, with resistance gains over time of 1084% in the density of 19 kN/m<sup>3</sup> and 870% in 20 kN/m<sup>3</sup> between 7 and 90 days of curing. The moisture content, although significant, had less influence on the mechanical response, including triaxial compression tests. Thus, it was shown that the addition of a pozzolanic binder is effective in promoting improvements in the mechanical properties of the evaluated waste and provides certain resilience, as demonstrated by the low influence of moisture content on the assessed mechanical properties. Varying the moisture from 8% to 15% (while maintaining the degree of compaction) did not substantially affect the mechanical response of the cemented mixtures concerning  $G_0$ , UCS, and  $q_{max}$ . This is essential for field conditions, where moisture control before and during compaction is a complex process for adequately designing a waste pile. Therefore, it is a viable alternative for practical use in piles, as the compaction characteristics are decisive for the proper performance of these structures.

Keywords: waste; iron ore; stabilization; pozzolanic material; waste piling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das principais substâncias metálicas em 2021 (ANM,2023). .....	14
Figura 2 - Traços utilizados na pesquisa (ADAPTADO JÚNIOR et al. 2011).....	28
Figura 3 - Resistências a compressão simples (ADAPTADO JÚNIOR et al. 2011) .....	29
Figura 4 - Variações do valor RCS de solos expansivos estabilizados com metacaulim. (ADAPTADO de AHMED; HANZA, 2015). .....	29
Figura 5 - Efeito da compactação e teor de umidade na estrutura do solo. (ADAPTADO de SEED et al., 1959). .....	34
Figura 6 - Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência versus deformação de uma caulinita. (ADAPTADO de SEED et al., 1959). .....	36
Figura 7 - Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência versus deformação de uma caulinita. (ADAPTADO de SEED et al., 1959). .....	37
Figura 8 - Efeito do teor de umidade de moldagem sobre a resistência à compressão simples de solo-cimento (FOPPA, 2005). .....	38
Figura 9 - Relação $q_u \times e_a$ tratada com 10% de cimento e teor de umidade de moldagem variado aos 28 dias de cura. (ADAPTADO de PAKBAZ; ALIPOUR, 2012). .....	38
Figura 10 - Gráficos de tensão x deformação axial e deformação volumétrica x axial (sem cura) com diferentes teores de umidade. (CONSOLI et al., 2001). .....	39
Figura 11 - Gráficos de tensão x deformação axial e deformação volumétrica x axial em corpos de prova curados em 28 dias com diferentes teores de umidade. (CONSOLI et al., 2001). ....	40
Figura 12 - Resultados de resistência a compressão não confinada para as três séries versus tempo de cura (BECKETT; CIANCIO, 2014). .....	41
Figura 13 - Fluxograma típico de tratamento de minério de ferro (ADAPTADO de LUZ e LINS, 2010). .....	42
Figura 14 - Processo produtivo de minério de ferro (Silva, 2022). .....	43
Figura 15 - Diferentes estados de consistência dos rejeitos (Clipes, 2000 apud SILVA, 2022). .....	48
Figura 16 - Método de empilhamento a seco proposto por CONSOLI et al. (2022). .....	49
Figura 17 - Concepção da variação da permeabilidade num depósito de rejeitos. (KELLY; BUSH, 1971 adaptado por SOARES, 2010). .....	55



Figura 18 - Variação da permeabilidade e anisotropia em função da distância do local da descarga, para praias de rejeitos bem segregados. (SODERBERG; BUSH, 1977 ADAPTADO SOARES, 2010). .....	55
Figura 19 - Curvas granulométricas obtidas através da NBR 7181 (2018).....	67
Figura 20 - Resultados da Compactação Proctor normal. ....	69
Figura 21 - Difratomia de raios-X do rejeito de minério de ferro (100% UF).....	71
Figura 22 - Difratomia de raios-X do rejeito de minério de ferro (100% GR). ....	71
Figura 23 - Difratomia de raios-X do rejeito de minério de ferro (80% GR/20% UF).....	72
Figura 24 - Curva granulométrica da cal calcítica hidratada.....	73
Figura 25 - Análise mineralógica (DRX) da cal calcítica hidratada.....	75
Figura 26 - Curva granulométrica do caulim.....	76
Figura 27 - Análise térmica gravimétrica do caulim. ....	77
Figura 28 - Análise mineralógica (DRX) do caulim. ....	78
Figura 29 - Curva granulométrica do Metacaulim. ....	79
Figura 30 - Análise mineralógica (DRX) do Metacaulim. ....	81
Figura 31 - Curva de compactação obtida com a variação de adição de metacaulim. ....	82
Figura 32 - Curvas de compactação sem adições e com adições nas energias normal e modificada. ....	84
Figura 33 - Molde tripartido para corpo de prova com $d = 50 \text{ mm}$ e $h = 100 \text{ mm}$ .....	88
Figura 34 - Equipamento de moldagem (macaco hidráulico 20 t) .....	88
Figura 35 - Aparelho para determinação do módulo cisalhante inicial.....	91
Figura 36 - Ruptura de corpo de prova com 28 dias. ....	92
Figura 37 - Equipamento “triaxial de altas tensões do LEGG” (MAFESSOLI, 2022).....	94
Figura 38 - Gráfico das curvas de umidade versus resistências a compressão simples para $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ .....	98
Figura 39 - Gráfico das curvas de umidade versus resistências a compressão simples para $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ .....	98
Figura 40 - Efeito das variáveis na resposta de RCS.....	100
Figura 41 - Gráfico de efeitos principais da RCS.....	101
Figura 42 - Gráfico das interações entre as variáveis para RCS. ....	101
Figura 43 - Gráfico da curva de umidade versus módulo de cisalhamento inicial para $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ .....	105

Figura 44 - Gráfico da curva de umidade versus módulo de cisalhamento inicial para $\gamma_d = 20,0$ kN/m <sup>3</sup> .....	105
Figura 45 - Efeito das variáveis na resposta de $G_0$ .....	108
Figura 46 - Gráfico de efeitos principais de $G_0$ .....	108
Figura 47 - Gráfico das interações entre as variáveis de $G_0$ .....	109
Figura 48 - Comportamento $q \times \varepsilon_a$ do rejeito cimentado (CID) aos 28 dias e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> e cura controlada em $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .....	113
Figura 49 - Comportamento $\varepsilon_v \times \varepsilon_a$ do rejeito cimentado (CID) aos 28 dias e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> e cura controlada em $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .....	113
Figura 50 - Comportamento $q/p' \times \varepsilon_a$ do rejeito cimentado (CID) aos 28 dias e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> e cura controlada em $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .....	115
Figura 51 - Comportamento $q \times \varepsilon_a$ do rejeito sem cimentação (CID) com densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> . ....	116
Figura 52 - Comportamento $\varepsilon_v \times \varepsilon_a$ do rejeito sem cimentação (CID) e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> . ....	116
Figura 53 - Comportamento $q/p' \times \varepsilon_a$ do rejeito sem cimentação (CID) e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> . ....	117
Figura 54 - Comportamento $q/p' \times \varepsilon_a$ do rejeito cimentado aos 28 dias e não cimentado (CID), com densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> .....	118
Figura 55 - Comportamento $\varepsilon_v \times \varepsilon_a$ do rejeito com e sem cimentação (CIU) e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> . ....	119
Figura 56 - Comportamento $q \times \varepsilon_a$ do rejeito com e sem cimentação (CID) com densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> e tensões de confinamento de 250 kPa, 500 kPa e 1000 kPa. ....	121
Figura 57 - Comportamento $\varepsilon_v \times \varepsilon_a$ do rejeito com e sem cimentação (CID) e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> e tensões de confinamento de 250 kPa, 500 kPa e 1000 kPa ....	122
Figura 58 - Envoltória de pico do rejeito sem cimentação e com cimentação na idade de 28 dias (CID) e densidade de moldagem de 19 kN/m <sup>3</sup> . ....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diagnóstico sobre geração de resíduos no Brasil (IPEA, 2012) .....	14
Tabela 2- Quantidade de cimento para diversos tipos de solos. (adaptado BELL, 1993).....	21
Tabela 3 - Requisitos químicos e físicos de acordo com a NBR 15894-1 (2010).....	27
Tabela 4 - Valores de coeficientes de permeabilidade típicos de solos sedimentares. (ADAPTADO de FERNANDES, 2016). .....	53
Tabela 5 - Valores de coeficientes de permeabilidade típicos de rejeitos minerais. (ADAPTADO de SARSBY, 2000). .....	54
Tabela 6 - Variação no ângulo de atrito e intercepto coesivo em rejeito de minério de ferro com e sem reforço de fibra (ADAPTADO de SOTOMAYOR, 2018). .....	59
Tabela 7 - Resumo dos ensaios triaxiais realizados. (ADAPTADO de MAFESSOLI, 2022). ..	60
Tabela 8 - Valores de ângulos de atrito de pico e intercepto coesivo em rejeitos de minério de ferro. ....	61
Tabela 9 - Composição química dos minerais normalmente encontrados em rejeitos da mineração de ferro, identificados por difração de raios-X. (ADAPTADO de MACHADO et al., 2003).....	62
Tabela 10 - Resultados semiquantitativos da fluorescência de raios-X (% em peso). (ADAPTADO de ANDRADE, 2014). .....	62
Tabela 11 - Composição mineral dos rejeitos analisados (% em peso). (ADAPTADO de ANDRADE, 2014). .....	62
Tabela 12 - Minerais identificados através da difração de raios-X (ADAPTADO WOLF, 2009). .....	63
Tabela 13 - Etapas do programa experimental .....	65
Tabela 14 - Frações granulométricas (%). .....	67
Tabela 15 - Peso específico dos grãos conforme NBR 6458 (2017). .....	68
Tabela 16 - Resultados da umidade ótima ( $\omega_{ot.}$ ) e peso específico aparente seco ( $\gamma_{máx.}$ ) das amostras. ....	69
Tabela 17 - Análise química por FRX e Perda ao fogo. ....	70
Tabela 18 - Ficha técnica fornecida pelo fabricante (2021). .....	72
Tabela 19 - Resultados acumulados e diâmetro médio – Cal hidratada. ....	73
Tabela 20 - Análise química por FRX da cal hidratada. ....	74
Tabela 21 - Característica técnica do lote fornecida pelo fabricante (2021). .....	75

Tabela 22 - Resultados acumulados e diâmetro médio - Caulim. ....	76
Tabela 23 - Análise química por FRX do Caulim. ....	76
Tabela 24 - Resultados acumulados e diâmetro médio - Metacaulim. ....	79
Tabela 25 - Análise química por FRX do Metacaulim. ....	79
Tabela 26 - Classificação de Metacaulim de baixa, média e alta reatividade (adaptado de GALLO, 2005). ....	80
Tabela 27 - Valores de pH obtidos através do método ICL. ....	83
Tabela 28 - Resumo dos resultados obtidos. ....	84
Tabela 29 - Umidade relativa das amostras de ultrafino no recebimento. ....	86
Tabela 30 - Detalhamento do Projeto Fatorial Generalizado. ....	87
Tabela 31- Dados parciais aleatorizados de moldagem dos corpos de prova. ....	89
Tabela 32 - Resistência a compressão simples moldados com $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ . ....	96
Tabela 33 - Resultados de resistência a compressão simples moldados com $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ . ....	97
Tabela 34 - Resumo das diferenças do crescimento de resistência entre idades e entre as densidades. ....	99
Tabela 35 - Resultado da análise de variância RCS. ....	100
Tabela 36 - Resultados de módulo de cisalhamento inicial moldados com $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ . ....	103
Tabela 37- Resultados de módulo de cisalhamento inicial moldados com $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ . ....	104
Tabela 38 - Resumo das diferenças/crescimento dos módulos entre idades e entre as densidades. ....	106
Tabela 39 - Resultado da análise de variância do $G_0$ . ....	107
Tabela 40- Identificação das amostras ensaiadas no triaxial. ....	111

## Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
1.3 OBJETIVO GERAL .....	17
1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	17
1.5 LIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	17
1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 ESTABILIZAÇÃO.....	19
2.1.1 Características do método solo-cimento .....	20
2.1.2 Reação pozolânica.....	23
2.1.3 Metacaulim .....	25
2.1.4 Cal.....	31
2.1.5 Influência do teor de umidade em solos compactados .....	34
2.2 produção de minério de ferro .....	41
2.2.1 Cominuição e classificação por tamanho.....	44
2.2.2 Concentração .....	44
2.2.3 Desaguamento .....	45
2.3 DISPOSIÇÃO .....	46
2.3.1 Empilhamento .....	47
2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS .....	50
2.4.1 Granulometria e densidade.....	51
2.4.2. Permeabilidade .....	53
2.4.3. Compressibilidade e adensamento .....	56
2.4.4. Resistência ao cisalhamento .....	57
2.4.5. Propriedades químicas e mineralógicas.....	61
2.4.6. Estabilização de rejeitos de mineração.....	64
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	65
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	65
3.1.1 Rejeito de minério de ferro.....	66
3.1.2 Cal Hidratada.....	72
3.1.3 Caulim.....	75
3.1.4 Metacaulim .....	78
3.1.5 Água.....	81

3.2 DEFINIÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	82
3.2.2 Determinação do teor de cal hidratada .....	83
3.2.3 Determinação do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e umidade ótima ( $\omega$ ) .....	84
3.2.4 Determinação dos teores de umidade.....	85
3.2.5 Projeto de Experimentos.....	86
3.2.6 Preparação dos corpos de prova para RCS e $G_0$ .....	87
3.2.7 Ensaio de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) e resistência a compressão simples (RCS).....	90
3.2.8 Ensaio de compressão triaxial.....	92
4 RESULTADOS .....	96
4.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES .....	96
4.1.1 Análise estatística da RCS.....	99
4.2 MÓDULO DE CISALHAMENTO INICIAL ( $G_0$ ) .....	103
4.2.1 Análise estatística do $G_0$ .....	107
4.3 ENSAIOS TRIAXIAIS CONSOLIDADOS e DRENADOS (CID) .....	111
4.3.1 Comportamento tensão-deformação - 28 dias.....	112
4.3.2 Resultados de corpos de prova com rejeito não estabilizado .....	115
4.3.3 Comparação entre os resultados cimentados e não cimentados.....	118
4.3.4 Envoltória de resistência .....	120
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
5.1 Conclusões.....	124
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	127
REFERÊNCIAS.....	128

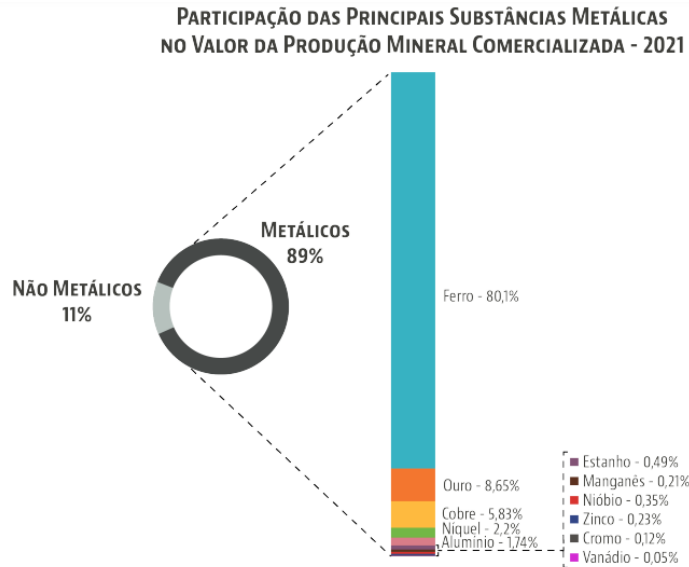
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A geração de resíduos é parte de qualquer processo produtivo, como a mineração de minério de ferro. Nos últimos anos, em função do aumento da demanda por esse insumo, houve grande aumento na atividade mineradora, com conseqüente incremento na quantidade de resíduos gerada. Arelado ao aumento da demanda está o escasseamento de jazidas de alta qualidade, o que também contribuiu para maior geração de resíduos.

A indústria mineral é a maior produtora mundial de descartes, produzindo cerca de 65 bilhões de toneladas/ano, dos quais 14 bilhões são constituídos majoritariamente por partículas finas, menores que 150 $\mu$ m (JONES; BOGER, 2012). No contexto brasileiro, particularmente no estado de Minas Gerais, o total de resíduos (inclusive estéril e rejeito) inventariados foi de 562,4 milhões de toneladas no ano de 2017. Desse total, 289,9 milhões de toneladas são de rejeito, 272,2 milhões de toneladas são de estéril e 242,2 mil toneladas são de resíduos (FEAM, 2018).

Em 2021, as substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 89% do valor total da produção mineral brasileira. Dentre essas substâncias, onze destacam-se por corresponderem a 99,97% do valor da produção da referida classe, quais sejam: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. O valor da produção dessas onze substâncias totalizou 312,9 bilhões de reais, com destaque para a expressiva participação do ferro nesse montante que corresponde a 80,1%, cuja produção de minério de ferro beneficiado atingiu 412,5 milhões de toneladas em 2021, sendo os principais Estados produtores o Pará e Minas Gerais conforme demonstra a Figura 1 (ANM, 2023).



*Figura 1 - Participação das principais substâncias metálicas em 2021 (ANM,2023).*

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) realizou em 2012 um diagnóstico com relação à geração de rejeitos na atividade de mineração. No primeiro cenário avaliou a geração de resíduos entre o período de 1996 e 2005 e demonstrou a quantidade gerada das 14 principais substâncias minerais, as quais são responsáveis por 90% da produção total de minerais no país. Num segundo cenário, estimou a geração de rejeitos para o período de 2010 a 2030. Os dados estão expostos na Tabela 1.

*Tabela 1 - Diagnóstico sobre geração de resíduos no Brasil (IPEA, 2012)*

Minério	Quantidade total de rejeitos (1000 t.)		Contribuição média de cada minério no total de rejeitos (%)	
	1996 – 2005	2010 – 2030	1996 – 2005	2010 - 2030
<b>Ferro</b>	<b>765.977</b>	<b>4.721.301</b>	<b>35,08</b>	<b>41,38</b>
Ouro	295.295	1.111.320	13,82	9,74
Titânio	276.224	1.018.668	12,55	8,93
Fosfato	244.456	1.128.198	11,33	9,89
Estanho	149.369	357.952	6,79	3,14
Zircônio	116.236	490.183	5,39	4,30
Calcário	89.398	341.045	4,29	2,99
Bauxita	69.783	493.925	3,16	4,33
Cobre	53.498	819.636	2,25	7,13
Nióbio	35.690	119.372	1,53	1,05
Níquel	35.076	673.380	1,61	5,59
Caulim	24.346	90.729	1,09	0,80
Manganês	12.064	36.071	0,54	0,32
Zinco	12.562	44.097	0,57	0,39
<b>Total</b>	<b>2.179.975</b>	<b>11.409.877</b>	<b>100</b>	<b>100</b>



Percebe-se que o minério de ferro é o principal gerador de rejeitos no país com 765,9 milhões de toneladas, correspondente a 35,08% do total gerado entre os anos de 1996 a 2005. Ainda, tem de produção estimada de 4,7 bilhões de toneladas, o que corresponderia a 41,38% no período de 2010 a 2030.

A disposição final e o gerenciamento desses rejeitos constituem tema cada vez mais importante na indústria mineradora. A maior parte da disposição de resíduos da mineração mundial se faz por barragens, cujos objetivos principal e secundário são a contenção do rejeito e o armazenamento de água para reuso na mina ou beneficiamento, respectivamente. Os impactos ambientais e os riscos associados às barragens de rejeitos e depósitos de estéril estão entre os mais significativos para a indústria da mineração. Numa visão mais ampla, os resíduos gerados na mineração, de modo geral, podem ser pilhas de minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos, solos, polpas de decantação de efluentes e finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento (IBRAM, 2016).

É de fundamental importância que o setor mineral tenha foco no reaproveitamento, reciclagem e reuso dos rejeitos gerados ao longo das cadeias produtivas. Tais aspectos são legalmente reforçados pelas Resoluções nº 85/2021 (versa sobre regras para o reaproveitamento de rejeitos de mineração) e nº 68/2021 (versa sobre o plano de fechamento de minas) da Agência Nacional de Mineração (ANM) e pelas leis 12.305/2010 (instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos) e 12.334/2010 (instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens).

Para seu reuso, reciclagem e/ou reaproveitamento, é necessário que a indústria da mineração disponha de dados científicos a respeito dos rejeitos, os quais comprovem a viabilidade para os devidos fins. Caso contrário, os dados são também relevantes aos processos de descarte. Nesse contexto, as pilhas de rejeito compactado têm ganhado relevância no cenário da mineração brasileira como alternativa à disposição em barragens. Um fator que impulsionou a necessidade de estudos na área foi a resolução ANM nº 13 de 2019, que exige o descomissionamento de barragens a montante até 25 de setembro de 2025 (para barragens com volume entre 12 e 30 milhões de m<sup>3</sup>) e até 25 de setembro de 2027 (para barragens com volumes superiores a 30 milhões de m<sup>3</sup>). Não obstante, o melhoramento das propriedades de resistência mecânica, rigidez, resistência a erosões, e durabilidade dos rejeitos é fundamental para o seu emprego com maior eficiência e segurança em qualquer tipo de estrutura.

A disposição por empilhamento é o método mais utilizado no descarte de materiais estéreis, porém seu uso é ainda incipiente para disposição dos rejeitos de minério de ferro, apesar da necessidade de alternativas para disposição dos rejeitos de modo a atender as novas regulamentações brasileiras. Logo, há necessidade de uso desse método para disposição dos rejeitos gerados no beneficiamento do minério de ferro.

No entanto, há certas questões que dificultam a utilização do empilhamento como método para disposição dos rejeitos como, por exemplo, o nível de heterogeneidade dos rejeitos gerados e a variação do teor de umidade do material recém-saído da planta de filtragem. Tais fatores podem impactar as características de compactação do material. Ainda, há uma carência de estudos a respeito da influência da variação dessas características para rejeitos de minério de ferro (e.g., teor de umidade e densidade) nas propriedades mecânicas do material. Nesse sentido, a mera utilização de correlações obtidas a partir de materiais geotécnicos tradicionais; isto é, solos naturais, pode aumentar o grau de incerteza no contexto de pilhas de rejeitos. Assim, faz-se necessário o estudo do comportamento do rejeito de minério de ferro considerando diferentes características de compactação, de modo a se ampliar o entendimento da influência de variáveis-chave no comportamento do rejeito compactado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No caso de disposição por empilhamento, os rejeitos de minério de ferro são afetados por diversos fatores, como a permeabilidade dos materiais, a taxa de empilhamento e a dissipação da poropressão. Quando a permeabilidade é reduzida e as taxas de empilhamento são elevadas, o excesso de poropressão positivo se dissipa lentamente, o que impacta negativamente na estabilidade da pilha. Uma das possibilidades de melhorar as características de estabilidade destes empilhamentos, são o uso de agentes cimentantes.

Nesse contexto, identifica-se uma lacuna na literatura geotécnica acerca da estabilização de rejeitos de minérios de ferro, principalmente quanto a influência da umidade dos rejeitos no momento da compactação. Portanto, este estudo procura fornecer uma visão geral do comportamento mecânico de uma mistura de rejeito de minério de ferro com a adição de um aglomerante pozolânico (metacaulim + cal hidratada), ressaltando a influência do teor de umidade no comportamento. Assim, formam-se as bases para possíveis diretrizes quanto ao reaproveitamento do rejeito de minério de ferro ou sua disposição em pilhas além da umidade ótima.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta tese é estudar a influência das características de compactação (i.e., teor de umidade e densidade) nas propriedades mecânicas (resistência a compressão simples, módulo cisalhante inicial e resistência ao cisalhamento) de um rejeito de minério de ferro estabilizado com aglomerante pozolânico (metacaulim e cal hidratada caulinítica).

### 1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO

A partir do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar o teor de melhor empacotamento e densidade de adição de cal hidratada e de metacaulim como aglomerante cimentante a serem utilizados nas misturas;
- b) Verificar a influência da adição do aglomerante pozolânico, do tempo de cura, da variação da umidade e densidade de moldagem no desempenho da resistência mecânica e rigidez do material, avaliar o efeito da cimentação, da variação de umidade de compactação na resistência e deformabilidade dos materiais através de ensaios triaxiais consolidados drenados e verificar o comportamento da envoltória de ruptura do material com e sem cimentação na umidade ótima e nas tensões de confinamento de 250, 500 e 1000 kPa.

### 1.5 LIMITAÇÃO DA PESQUISA

- c) Esta pesquisa se limitará à utilização dos seguintes materiais e na proporção única, definida no decorrer do trabalho:
- d) - Cal hidratada caulinítica adquirida de uma indústria do estado de Minas Gerais;
- e) - Metacaulim produzido em laboratório a partir da calcinação de caulim técnico adquirido de uma indústria do Estado de Minas Gerais;
- f) - A temperatura de calcinação metacaulim utilizada foi de 800°C a uma taxa de aquecimento padrão de 10°C/min. e um patamar de 4 horas;

- g) - O teor de adição de cal hidratada foi fixado em 3% sobre o peso do rejeito, a ser justificado no decorrer do trabalho;
- h) - O teor do metacaulim foi fixado em 3% sobre o peso do rejeito, a ser justificado no decorrer do trabalho;
- i) - A mistura utilizada de rejeito neste estudo foi de 80% de material granular ou de flotação (F) proveniente do processo de tratamento da indústria de minério e 20% de material ultrafino (U) removido antes do processo de flotação na classificação por hidrociclones.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese está estruturada em 6 capítulos, descritos a seguir.

- Capítulo 1 – Introdução da pesquisa que inclui a relevância, justificativa do estudo, objetivos gerais e específicos e as limitações.
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica sobre os conceitos pertinentes ao entendimento do tema abordado na tese.
- Capítulo 3 – Programa Experimental apresentando os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, demonstrando as propriedades físicas dos materiais estudados e ensaios utilizados para atingir os objetivos definidos.
- Capítulo 4 – Apresentação dos resultados e discussões obtidos nos ensaios descritos no capítulo anterior.
- Capítulo 5 – Apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ESTABILIZAÇÃO

A estabilização é um processo que visa melhorar a resistência do solo através da impermeabilização e ligação das partículas do solo (SHERWOOD, 1993). Bell (1993) cita que os objetivos de misturar aditivos com o solo são para melhorar a estabilidade volumétrica, as propriedades de resistência e tensão-deformação, a permeabilidade e a durabilidade. O desenvolvimento da alta resistência e rigidez é alcançado pela redução dos vazios internos, e a permeabilidade é alterada pela modificação do tamanho e distribuição dos poros.

Balkis e Macid (2019) descrevem que os objetivos mais importantes da estabilização do solo são para fornecer uma ou mais das seguintes características:

- Modificar os solos moles e a baixa resistividade;
- Aumentar a estabilidade do solo;
- Aumentar a resistência ao rolamento do solo tratado;
- Diminuir a permeabilidade;
- Reduzir a expansão e contração do solo;
- Reduzir a umidade;
- Reduzir a plasticidade;
- Prevenir a erosão;
- Reduzir a espessura de camadas do pavimento a construir;
- Criar estrutura para suportar as camadas de base;
- Reconstrução de pavimentos antigos utilizando materiais disponíveis;
- Preparação da área para facilitar a implementação das operações de construção;
- Reduzir poeira;
- Economizar energia;
- Acelerar a operação.

Todas estas características estão diretamente ligadas ao melhoramento das características físicas e mecânicas que esta metodologia proporciona ao solo tratado.

Através da estabilização do solo, os materiais podem ser estabilizados com materiais cimentícios (cimento, cal, cinza volante, betume ou uma combinação destes) promovendo uma maior resistência, menor permeabilidade e menor compressibilidade do que o solo natural (KELLER, 2011).

Para uma estabilização bem-sucedida, ensaios em laboratório seguidos de ensaios de campo podem ser necessários para determinar as propriedades ambientais e de engenharia. Embora os ensaios de laboratório possam produzir maior resistência do que o material correspondente do campo, ele ajuda a avaliar a eficácia dos materiais estabilizados no campo, além de auxiliar na escolha do ligante (EUROSOILSTAB, 2002). O método de estabilização química mais antigo e amplamente utilizado na geotecnia é o solo-cimento.

### 2.1.1 Características do método solo-cimento

O cimento é um dos principais aglomerantes utilizados para estabilização de solo desde a década de 1960. Sua reação não depende dos minerais do solo e sim da sua reação com a água que pode estar disponível em qualquer solo (MASUKA, 2013). As mudanças que ocorrem nas propriedades do solo são, até certo ponto, diretamente proporcionais a quantidade de cimento adicionada. Essa quantidade depende dos pré-requisitos do projeto, geralmente relacionados a aspectos como durabilidade e resistência à compressão não confinada. Por exemplo, uma resistência à compressão não confinada mínima de 2,8 MPa, após cura por 7 dias (25°C), tem sido um valor de referência. Na verdade, os teores de cimento recomendados geralmente variam de 3 a 16% (em relação ao peso seco do solo) e dependem do tipo de solo e propriedades necessárias (Tabela 2). Geralmente, à medida que o teor de argila de um solo aumenta, o mesmo acontece com a quantidade de cimento necessária (BELL, 1993).

*Tabela 2- Quantidade de cimento para diversos tipos de solos. (adaptado BELL, 1993)*

<b>Classificação do solo</b>	<b>Teores típicos de cimento* (%)</b>	<b>Teores típicos para testes de densidade/umidade**(%)</b>	<b>Teores típicos para testes de durabilidade***(%)</b>
GW, GP, GM, SW, SP, SM	3-5	5	3-5-7
GM, GP, SM, SP	5-8	6	4-6-8
GM, GC, SM, SC	5-9	7	5-7-9
SP	7-11	9	7-9-11
CL, ML	7-12	10	8-10-12
ML, MH, CH	8-13	10	8-10-12
CL, CH	9-15	12	10-12-14
MH, CH	10-16	13	10-12-14

\* Não inclui solos orgânicos ou de fraca reação. Além disso, cimento adicional pode ser necessário para condições de exposição severas, como proteção de taludes.

\*\* ASTM D 558 (1992) Método de Teste Padrão para Relações Umidade-Densidade de Misturas de Cimento-Solo, Sociedade Americana de Materiais de Teste, Filadélfia.

\*\*\* ASTM D 559 (1982) Métodos padrão para testes de umedecimento e secagem de misturas de cimento de solo compactado, American Society for Testing Materials, Filadélfia e ASTM D 506 (1982) Método Padrão para Testes de Congelamento e Descongelamento de Compactado Misturas de solo-cimento, American Society for Testing Materials, Filadélfia.

Bell (1993) comenta ainda que qualquer tipo de solo, com exceção de solos altamente orgânicos ou algumas argilas altamente plásticas, podem ser estabilizadas com cimento. Solos granulares são preferidos, uma vez que eles pulverizam e se misturam mais facilmente do que solos de grãos finos e assim resultam em solo-cimento mais econômico, pois requerem menos cimento. Tipicamente solos contendo entre 5 e 35% de finos produzem o material mais econômico. Como o tamanho do grão dos solos granulares é maior do que o do cimento, os grãos individuais são revestidos com pasta de cimento e ligados em seus pontos de contato.

Bell (1993) complementa que as propriedades desenvolvidas pelos solos estabilizados com cimento serão regidas pela quantidade de cimento adicionada, pelo método de aplicação e pela compacidade da mistura. Em geral, resistência, rigidez e durabilidade são proporcionais a quantidade de cimento.

O tipo de solo que está sendo tratado também influencia no desempenho do processo, pois a adição de cimento produz aumentos de densidade em solos compactados cauliniticos e argilosos ilíticos. Porém, isso não ocorre naqueles que contêm montmorilonita, já que nesses pode ocorrer pequenas reduções nas densidades de compactação devido aos seus minerais de argila expansivos (BELL, 1993).

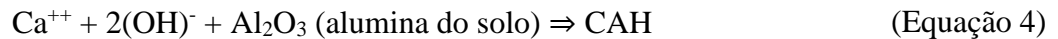
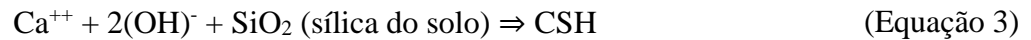
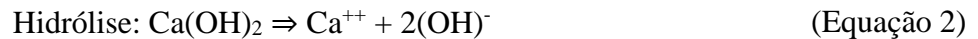
Herzog e Mitchel (1963) citam que as mudanças nas propriedades físicas dos solos como resultado da estabilização devem-se às reações entre os produtos químicos, os agregados e os componentes mineralógicos. O mecanismo pelo qual a resistência se desenvolve em misturas de solo-cimento, depende das cadeias ou aglomerações de cimento hidratado e dos grãos do solo que preenchem os vazios em um esqueleto tridimensional. Isso significa que o ganho de resistência ocorrerá se os minerais de argila estiverem presentes ou não. Handy (1958) enfatiza que o mecanismo de cimentação é em parte um fenômeno de superfície, e a alta área de superfície específica dos minerais de argila podem contribuir significativamente para o desenvolvimento de resistência em estabilização solo-cimento.

Além disso, os fatores que afetam as propriedades físicas do solo - cimento inclui tipo de solo, quantidade de cimento, grau de mistura, tempo de cura e a densidade da mistura compactada (ROAD RESEARCH LABORATORY, 1952; YODER, 1957). Distribuição de tamanho de partícula, mineralogia, forma de grão e distribuição de minerais de argila em relação ao silte e o tamanho das partículas de areia também são fatores importantes (GILLOT, 1968). Sulfatos, em uma concentração de cerca de 1% ou menos, e um teor de matéria orgânica de 1,0 pode ter um efeito prejudicial sobre a estabilização de solos com cimento onde, geralmente, resultará em uma densidade diminuída quando comparado ao natural solo (SHERWOOD, 1958; 1962).

Ibeiro (2016) descreve que o processo de endurecimento do solo-cimento ocorre através da formação de produtos da hidratação do cimento e pelos produtos de reações secundárias. Em solos granulares sem argila a ação cimentante se dá através dos produtos gerados na hidratação e hidrólise do cimento e o mecanismo é a cimentação dos grãos nos pontos de contato. Em solos predominantemente argilosos a ação cimentante principal se dá por reações secundárias.

As equações 1 e 2 apresentam as reações primárias de hidratação do cimento e as equações 3 e 4 apresentam as reações secundárias do solo-cimento (BERGADO, et al., 1996).





Conforme explicam Bhattacharja et al. (2003), o aumento da resistência de uma mistura é atribuído principalmente à formação dos silicatos hidratados de cálcio (CSH) através da hidratação do cimento. Sendo o hidróxido de cálcio um subproduto da reação de hidratação das fases de silicatos de cálcio do cimento, à medida que os íons  $\text{Ca}^{++}$  são liberados no fluido dos poros, eles estarão disponíveis para reagir com o solo argiloso circundante e formar novos produtos cimentantes (reações secundárias), se houver sílica ou alumina em estado amorfo (BERGADO, et al., 1996).

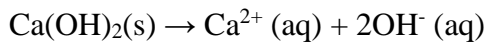
Há décadas, outros tipos de aglomerantes têm sido foco de pesquisas com intuito de promover alternativas mais sustentáveis ao cimento Portland. Nesse sentido, materiais pozolânicos como cinzas volantes, cinzas de casca de arroz e metacaulim têm sido utilizados em misturas de solo com cales hidratadas e/ou virgem e também estabilizações químicas através da álcali-ativação. Poucos são estudos, porém, que usaram ligantes alternativos para estabilização de rejeitos de minério de ferro.

### 2.1.2 Reação pozolânica

Entende-se por reação (ou atividade pozolânica) a capacidade que uma determinada pozolana tem de reagir com o hidróxido de cálcio e formar produtos de cimentação, como os silicatos de cálcio hidratado (MASSAZA, 1998). A atividade pozolânica é proporcional a quantidade de hidróxido de cálcio que uma pozolana é capaz de fixar.

Nesse sentido, as pozolanas são definidas como materiais que, apesar de não terem por si só propriedades aglomerantes hidráulicas, são capazes de se combinar com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e, em presença de água, formar compostos semelhantes aos originados na hidratação de constituintes do cimento Portland (NP 4220: 2010). São materiais sílico-aluminosos; isto é, constituídas essencialmente silício ( $\text{SiO}_2$ ), alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ) e ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Shi e Day (2000) consideram que a reação pozolânica é desencadeada pela hidrólise, que é um fenômeno químico envolvendo a quebra de ligação de uma molécula pela água. Nesse processo, a água tem sua molécula quebrada em íon de hidrogênio ( $H^+$ ) e íons hidroxila ( $OH^-$ ) do hidróxido de cálcio, de acordo com a seguinte reação:



As pozolanas, sendo constituídas fundamentalmente por matéria vítrea siliciosa ou aluminosa, são atacadas pelo ânion  $OH^-$  que dissocia os principais constituintes da pozolana ( $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ ), tornando-os eletricamente instáveis. Por sua vez, os óxidos vão reagir com o íon  $Ca^{2+}$  e com os grupos hidroxilo ( $OH^-$ ), formando os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, que possuem compostos com propriedades aglomerantes e resistentes.

De acordo com Massazza (1993) a reatividade de uma pozolana depende de fatores como composição química e mineralógica, tipo e teor das fases ativas na pozolana (i.e., as estruturas amorfas são mais reativas do que as cristalinas), área superficial (a reatividade tende a ser proporcional a área superficial), razão pozolana/cal, teor de umidade, condições de cura e presença de sulfatos. O mecanismo de reações pozolânicas envolve a liberação de íons hidroxila da cal, que elevam o pH da mistura a um valor suficientemente elevado, de modo que a sílica e a alumina da fração argila sejam dissolvidas, favorecendo a introdução de cargas negativas no sistema. Essas reações formam géis de silicatos e/ou aluminatos hidratados de cálcio, sendo que as reações não cessam enquanto houver disponibilidade de  $Ca(OH)_2$ , sílica e alumina no solo.

São reações de longo prazo que ocorrem entre os elementos minerais solubilizados dos solos, e a cal e é viável porque, em níveis de alcalinidade promovida pela cal ( $pH \geq 12,4$ ), os elementos sílica e alumina estarão mais facilmente disponibilizados para a solução do solo e conduz ao aumento da capacidade de resistência mecânica dos solos (SEGANTINI e ALCANTARA, 2010).

Ingles e Metcalf (1972) destacam que os géis de aluminossilicatos resultantes da reação, imediatamente cobrem e ligam as partículas de argila, bloqueando os vazios. Conforme esses autores, os géis são cristalizados lentamente e transformados em silicatos hidratados de cálcio e alumínio bem definidos, sendo que essas reações ocorrem em presença de água, que tem a função de carregar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila.

Ela se processa através da reatividade pozolânica definida como o índice de reação da pozolana com componentes de soluções alcalinas, principalmente hidróxido de cálcio ou outras contendo  $\text{Ca}^{2+}$  em temperaturas ambientes, resultando em silicatos hidratados com características similares aos produzidos na hidratação do cimento (CSH).

Essa reação com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) é representada na equação 5, onde o CSH é o silicato de cálcio hidratado.



O CSH não é um composto bem definido, podendo assumir variadas estequiometrias, dependendo da relação  $\text{CaO}/\text{Si}_2$  da mistura, do teor de água quimicamente combinada, da temperatura e pressão imposta durante a hidratação (TAYLOR, 1997). O CSH é o principal composto formado, mas também podem ser formados os aluminatos (CAH) e sílico-aluminatos (CASH) em função da composição química das pozolanas.

As argilas como a caulinita e os caulins possuem baixa atividade pozolânica em seu estado natural, porém são altamente reativas quando calcinadas a temperaturas entre 600 a 900°C. Quando submetida a calcinação ocorre a remoção dos íons hidroxila da sua estrutura cristalina, o que resulta na destruição do seu arranjo atômico formando assim um material amorfo com grande instabilidade termodinâmica chamada de metacaulim que é responsável pela atividade pozolânica (SILVA, 2010).

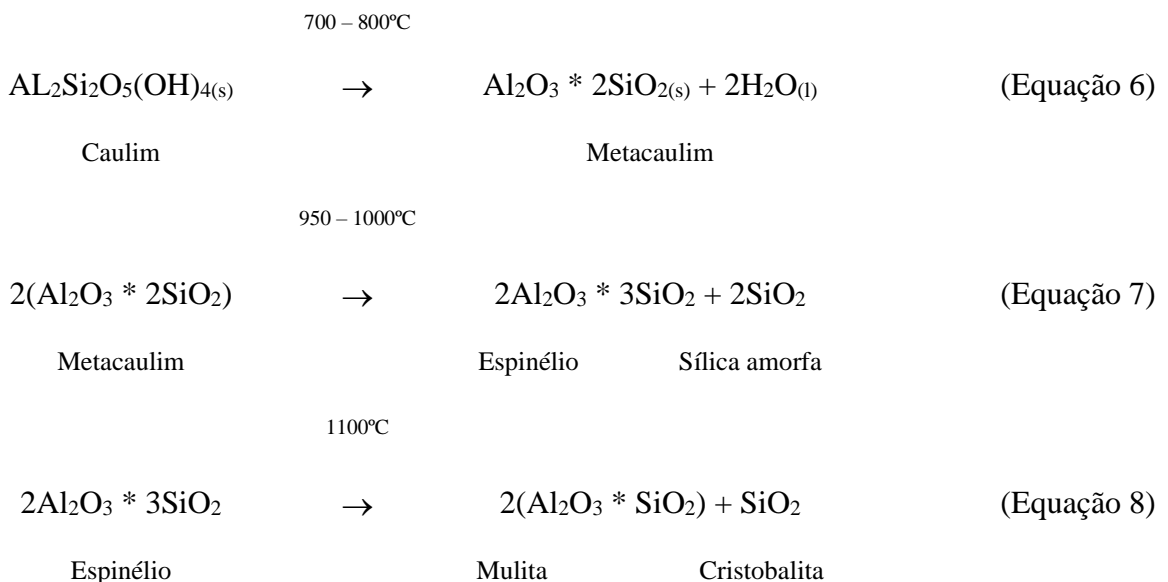
### 2.1.3 Metacaulim

O metacaulim é um material pozolânico produzido a partir da calcinação de argilas caulínicas. A transformação do caulim (composto principal das argilas caulínicas) em metacaulim é um processo endotérmico com a desidroxilação por tratamento térmico em temperaturas adequadas. Ocorre que as matérias primas, formadas principalmente por silicato de alumínio hidratado, perdem todos os íons de hidróxidos da sua estrutura cristalina através da ativação térmica (INOCENTE, 2020).

O caulim modifica sua estrutura para metacaulim composta principalmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina (amorfa), com elevada finura e reatividade. A influência da calcinação pode ser dividida em três aspectos: a temperatura ótima, o tempo de calcinação e o método utilizado na calcinação. Quanto à temperatura ótima, é consenso nas várias pesquisas relacionadas ao assunto que no caso de argilas caulínicas,

os valores ideais encontram-se entre 600 e 850°C (BRAGANÇA e BERGMANN, 2010; MEDINA, 2011; TEODORO, 2016; CAI et al., 2018).

Bragança e Bergmann (2010) relatam que no aquecimento da argila caulinita ocorre a liberação da água adsorvida a partir de 100°C e a decomposição das substâncias orgânicas, até cerca de 400°C. Aproximadamente a 550°C ocorre a primeira transformação importante, que é a desidroxilação da caulinita formando o metacaulim ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) (Equação 6), em uma reação endotérmica. O metacaulim se transforma em espinélio ( $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$ ), liberando a sílica amorfa entre 950 – 1100°C (Equação 7). Acima de 1100°C ocorre a formação por reação exotérmica da mulita [ $2(3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2) + 5\text{SiO}_2$ ] advinda do espinélio (Equação 8) que apresenta uma superfície específica menor e pouca ou praticamente nenhuma atividade pozolânica.



Devido a isso há a preocupação em restringir a temperatura máxima de calcinação justificada por pesquisadores em no máximo 850°C.

Com relação à pureza destas argilas a serem utilizadas na fabricação do metacaulim, estipula-se em 90% o teor mínimo de caulinita, para a produção de pozolanas altamente reativas (AMBROISE et al, 1994), bem como há necessidade posterior à produção do metacaulim de uma moagem para a obtenção de uma superfície específica entre 15000 a 25000 m<sup>2</sup>/kg para melhorar o desenvolvimento das propriedades pozolânicas (BRYKOV et al. 2015).

Já a alta atividade pozolânica do metacaulim está relacionada à química entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento na presença de água ou pela adição de cal hidratada em misturas. Segundo Zampieri (1989), as reações pozolânicas entre a metacaulinita e o hidróxido de cálcio são reações de dissolução e formação de novas fases, principalmente devido ao grande desequilíbrio físico-químico (desordenação atômica) oriundo do tratamento térmico que, ao entrar em contato com o meio fortemente alcalino das pastas hidratadas de cimento Portland ou da adição de cal hidratada, provoca a dissolução do silício e do alumínio na superfície de suas partículas. Posteriormente, essas reagem com o excesso de cálcio existente, cristalizando em aluminatos, silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratado.

Segundo Santos (1992), argilas com maiores teores de  $Al_2O_3$  resultam em um metacaulim com maior atividade pozolânica. Quanto aos requisitos químicos, a ASTM C618 (2003) cita que a soma de  $SiO_2$ , teor de  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  tem que ser  $\geq 70\%$  para classe F e,  $\geq 50\%$  para classe C para definir o material como pozolânico. No Brasil o uso do metacaulim em concretos é normatizado através das normas ABNT NBR 15894:2010 Partes 1, 2 e 3 onde apresentam os requisitos físico-químicos e métodos de ensaio destinados ao uso do metacaulim com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. A Tabela 3 apresenta os requisitos químicos e físicos exigidos pela norma ABNT NBR 15894:2010 Parte 1.

*Tabela 3 - Requisitos químicos e físicos de acordo com a NBR 15894-1 (2010)*

<b>Componentes</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite</b>
SiO <sub>2</sub>	%	$\geq 44,0$ e $\leq 65,0$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	$\geq 32,0$ e $\leq 46,0$
CaO + MgO	%	$\leq 1,5$
SO <sub>3</sub>	%	$\leq 1,0$
Na <sub>2</sub> O	%	$\leq 0,5$
Equivalente alcalino* em Na <sub>2</sub> O	%	$\leq 1,5$
Umidade	%	$\leq 2,0$
Perda ao Fogo	%	$\leq 4,0$
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 $\mu$ m	%	$\leq 10,0$
Área específica B.E.T.	m <sup>2</sup> /g	$\geq 15$
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	$\geq 105$

\*Equivalente alcalino em Na<sub>2</sub>O  $\rightarrow Na_2O_{eq} = 0,658 \% K_2O + \% Na_2O$

Segundo Guimarães (2002), a mistura constituída por solo e cal pode não atingir a resistência esperada, mesmo após um longo período de cura. Isso se dá principalmente quando o solo é

composto por partículas com maior tamanho de grãos, como siltes ou areias e, para que isso não ocorra, pode-se misturar junto ao solo-cal uma substância amorfa que possibilite a ocorrência de reações, agregando melhora na resistência e até mesmo em outras propriedades do solo.

De acordo com Dalla Rosa (2009), as reações pozolânicas, as quais proporcionam ganhos efetivos de resistências às misturas compactadas de solo e cal ou solo, cinza volante ou metacaulim e cal, são lentas, estendendo-se por anos e só iniciam certo tempo depois da compactação. O ganho de resistência só ocorre se houver pH suficientemente elevado para dissolução da sílica e da alumina dos argilominerais do solo e se a combinação delas com a cal derem origem a novos compostos cimentantes. Dessa forma, para a manutenção do pH elevado, como para a formação de aluminatos, silicatos e/ou alumino-silicatos de cálcio, é fundamental a participação da cal. Daí que para tempos de cura de 60 e 90 dias seja tão expressiva a dependência da resistência à compressão simples em relação ao teor desse estabilizante.

Júnior et al. (2011) em seu estudo, utilizaram misturas de pastas de metacaulim, cal hidratada e água em diferentes teores de substituição e analisaram a resistência a compressão não confinada nas idades de 3, 7 e 28 dias onde observaram que a maior resistência mecânica à compressão das pastas ocorreu com o traço de 50% de metacaulinita e 50% de cal hidratada. Ademais, as associações de metacaulinita e cal hidratada podem ser benéficas para se atingir resistências em pastas. A cal hidratada tem a propriedade de aumentar a resistência mecânica à compressão das pastas com metacaulinita. Porém, não é recomendado que sua quantidade seja superior a quantidade de metacaulinita, pois nesses casos a resistência mecânica da pasta passa a ser inferior às resistências máximas que podem ser atingidas conforme mostram as Figuras 2 e 3.

<b>Traço</b>	<b>Metacaulinita (g)</b>	<b>Cal (g)</b>	<b>Água (ml)</b>	<b>Massa Total (g)</b>
T40	720	480	840	2040
T45	660	540	840	2040
T50	600	600	840	2040
T55	540	660	840	2040
T60	480	720	840	2040

*Figura 2 - Traços utilizados na pesquisa (ADAPTADO JÚNIOR et al. 2011)*

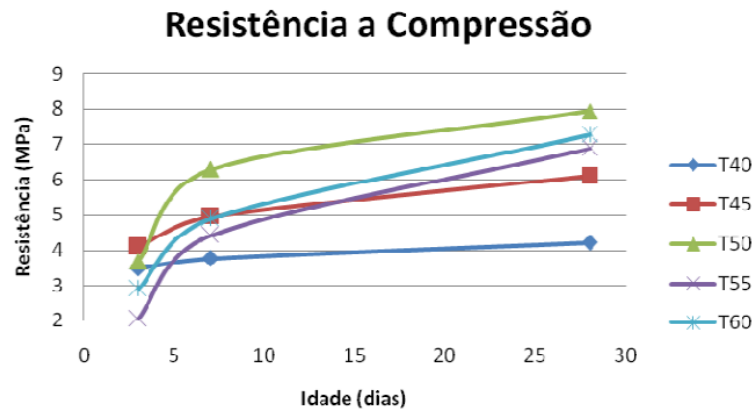


Figura 3 - Resistências a compressão simples (ADAPTADO JÚNIOR et al. 2011)

Ahmed e Hanza (2015), usaram misturas de metacaulim em solos expansivos com o objetivo de estabilizar tais solos que são comuns no Iraque. Realizaram ensaios em misturas de areia (15%) e bentonita (85%) e com teores de adição de metacaulim de 4, 6, 8, 10 e 12%. Os resultados dos testes de compressão não confinados (Figura 4) mostraram que a adição do metacaulim causa um incremento linear na resistência a compressão não confinada de 160,73 a 315,00 kPa para as amostras de 4 a 10% de adição, sendo que o de 10% obteve o melhor desempenho.

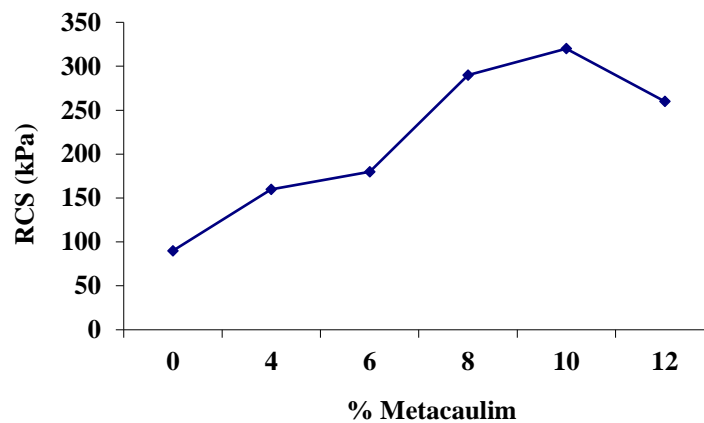


Figura 4 - Variações do valor RCS de solos expansivos estabilizados com metacaulim. (ADAPTADO de AHMED; HANZA, 2015).

A redução de resistência ocorrida na adição de 12% para 258,90 kPa pode ser devido ao excesso de Metacaulim introduzido no solo, formando assim ligações fracas entre o solo e os compostos de cimentação formados (AHMED; HANZA, 2015).

Na característica de expansibilidade, a adição de metacaulim fez com que as amostras passassem de um potencial de expansão muito alto para moderado e até mesmo muito baixo

devido ao efeito entre as reações pozolânicas e de troca catiônica entre o solo e a presença do metacaulim.

Os resultados do teste de expansão usando o método de volume constante mostram que a adição da adição de 10% de Metacaulim provoca uma redução de cerca de 87% da expansibilidade. A partir dos resultados do teste de consolidação, concluíram que os valores de compressão aumentam com a adição de metacaulim e conseqüentemente há uma redução linear no índice de vazios (AHMED; HANZA, 2015).

Sakr et. al. (2022) também estudaram a adição de metacaulim (5, 10, 15, 20 e 25%) em solo expansivo e obtiveram resultados similares onde a adição do metacaulim promoveu a redução significativa do potencial de expansão do solo tratado com metacaulim.

O metacaulim altera as propriedades do solo tratado de altamente plástico para um com baixa plasticidade devido à diminuição do limite de liquidez e ao aumento do limite de plasticidade promovendo uma diminuição no índice de plasticidade em cerca de 43% após o tratamento (SAKR et al. 2022).

As curvas de compactação obtidas para as misturas de diferentes valores de plasticidade tratadas com diferentes percentagens de metacaulim mostram que, até 15% de adição resulta em um ligeiro aumento no peso unitário seco máximo de cerca de 7% associado a uma diminuição do teor de umidade ideal do solo tratado para um valor semelhante ao do solo não tratado. Acima do teor de 15%, o peso unitário seco máximo começa a diminuir gradualmente acompanhado por um aumento no teor de umidade ideal confirmado também no estudo de Al-Khalili et al. (2021).

O aumento do peso unitário seco máximo do solo tratado com metacaulim de até 15% pode ser explicado pela diminuição do índice de vazios que o metacaulim promove. Além deste percentual os ensaios demonstram, que ocorre uma saturação de metacaulim que promove um efeito contrário, ou seja, volta a aumentar o índice de vazios e o teor ótimo de água no solo tratado.

O efeito do metacaulim na resistência ao cisalhamento do solo expansivo mostrou que até 10% há a um aumento de cerca de 12,2% nos valores da resistência ao cisalhamento do solo no estado não saturado. No entanto, em porcentagens mais altas, a resistência ao cisalhamento volta a diminuir para aproximadamente seu valor inicial antes da adição (SAKR et al. 2022).



Abdulkarim et al. (2022), estudaram o potencial do uso do metacaulim para melhorar as propriedades geotécnicas de solo laterítico obtido no Estado de Bauchi - Nigéria, destinado a ser utilizado como material de construção de estradas. Verificaram uma melhoria notável na resistência a compressão não confinado na concentração de 30% de metacaulim, com um valor médio de RCS de 604, 864 e 913 kPa em sete dias de cura nos esforços de compactação normal, intermediária e modificada, respectivamente.

Citam que, em geral, o valor de RCS curado em sete dias com 30% de metacaulim na mistura de solo laterítico compactado usando o esforço intermediário e modificado está dentro do intervalo de 750 – 1500 kPa atendendo a especificação técnica nigeriana para materiais de sub-base. Abaixo do teor de 30% de metacaulim as misturas não atendem as especificações.

Já valores mais altos de RCS foram registrados para todos os esforços de compactação aos 28 dias de cura. Isto é atribuído à reação pozolânica do metacaulim.

Foda et. al. (2022) estudaram a estabilização de areias finas com adição de metacaulim e bentonita em diferentes percentuais (0%, 1%, 2%, 5%, 10%, 15%, e 20%) para reduzir a erodibilidade deste material, pois a areia fina em dunas que se espalham pelo vento pode causar diversos danos para culturas agrícolas, edifícios e estradas em Gamasa no Egito.

Verificaram que a resistência à erosão aumentou significativamente quando a areia foi tratada com 1, 2, 5 e 10%, sendo 10% considerada a proporção ideal. Acima de 10% o melhoramento obtido foi considerado não significativo.

Os resultados do teste de cisalhamento direto também mostraram que a coesão em caso de mistura 10% Metacaulim para a areia fina aumenta de zero a 15,467 kPa. E por fim, os resultados do teste de condutividade hidráulica mostraram que a permeabilidade do solo misturada com 10% de metacaulim diminuiu em comparação com solo não tratado devido ao aumento da porcentagem de finos que bloqueiam os poros da areia.

#### 2.1.4 Cal

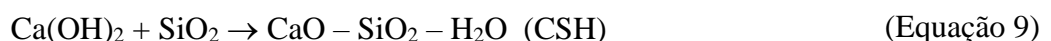
Um dos métodos de estabilização mais econômica na engenharia geotécnica. A estabilização de solo pela adição de cal pode ser realizada com cal hidratada de alto teor de cálcio, cal dolomítica monoidratada, cal virgem calcítica ou dolomítica e, os teores de adição usuais podem variar de 5 a 10% (BABU e POULOSE, 2018).

Em solos argilosos, a adição da cal resulta em ganho de resistência pelos processos de floculação e aglomeração (em curto prazo), além do possível efeito cimentante devido à reação pozolânica a longo prazo. Quando usada a cal virgem (ou cal viva), ela combina quimicamente com a água presente no solo e libera calor, promovendo uma redução (consumo e evaporação) da umidade do material facilitando, quando o solo estiver acima da umidade ótima necessária, a compactação.

A cal hidratada produzida por essas reações ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), reagirá subsequentemente com as partículas de argila. Essas reações posteriores lentas resultam em uma secagem adicional, porque reduzem a capacidade de retenção de umidade. Já se usar a cal hidratada ao invés da cal virgem, a secagem ocorre apenas através das mudanças químicas no solo que reduzem sua capacidade de retenção de água e aumenta a estabilidade do solo (BABU e POULOSE, 2018).

Após a mistura inicial, os íons cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) da cal hidratada adsorve-se à superfície das partículas de argila e deslocam a água e outros íons, tornando o solo friável e granulado. Nesta fase, a tendência do solo para expandir e/ou retrair reduz, assim como o índice de plasticidade do solo diminui drasticamente. O processo, chamado “floculação e aglomeração”, geralmente ocorre dentro de um algumas horas (BABU e POULOSE, 2018).

Dessa forma, a estabilização do solo ocorre quando quantidades adequadas de cal e água são adicionadas, e quando o pH do solo aumenta rapidamente para acima de 10,5, a sílica e a alumina são liberadas e reagem com cálcio da cal para formar hidratos de silicato de cálcio (CSH) e hidratos de aluminato de cálcio (CAH) (Equações 9 e 10).



CSA e CAH são produtos cimentícios semelhantes aos formados no cimento Portland, portanto eles formam uma matriz que resulta na resistência das camadas de solo estabilizadas com cal, alterando o solo de arenoso e granular para uma camada resistente e relativamente impermeável com capacidade de carga significativa. O processo começa dentro de horas após a mistura e pode continuar por anos. Essa matriz formada é permanente, durável e significativamente impermeável, produzindo uma camada estrutural que é forte e flexível.

Os métodos de dosagem clássicos existente para misturas solo-cal são:

- 1) Método de dosagem do pH por Eades e Grim (1966): consiste em adicionar cal suficiente ao solo até que a mistura atinja um pH de 12,4. O meio de pH alcalino solubiliza a sílica e a alumina das superfícies das argilas, deixando-as disponíveis para reagir com o cálcio livre ( $\text{Ca}^{++}$ ) fornecido pela cal. A reação não cessa enquanto houver disponibilidade de  $\text{Ca}^{++}$  e sílica no solo.
- 2) Método desenvolvido por Thompson (1970): compara a resistência à compressão simples (RCS) do solo natural com a da mistura solo+cal curada. Se o aumento de RCS for maior que 345 kPa, o solo é classificado como reativo à cal, caso o contrário, o solo é classificado como não reativo;
- 3) Método do ICL (Initial Consumption of Lime): proposto por Rogers et al. (1997), é uma variação do método do pH, onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor constante (máximo);
- 4) Método do Lime Fixation Point por HILT; DAVIDSON (1960): baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos de resistência.

Medeiros et al. (2019) cita em seu artigo que os métodos de dosagem têm como objetivo indicar a quantidade necessária do aditivo para promover as reações químicas características da estabilização com cal. No entanto, métodos distintos podem resultar em quantidades diferentes de cal. Nesse sentido, é importante destacar o estudo de Behak (2011), que avaliou a estabilização de um solo argiloso com adição de 3 e 5% de cal dolomítica para a utilização como base de pavimentos. A dosagem pelo método do pH resultou em um teor ótimo de cal de 4% e pelo método de Thompson, o teor ótimo foi de 3%.

No que se refere ao tipo de cal, Medeiros et al. (2019) cita a pesquisa desenvolvida por Lovato (2004), onde estudou a estabilização de um solo argiloso laterítico (classe A-6) com uma cal calcítica e outra dolomítica e constatou que a RCS aumentou linearmente para os teores de 3, 4 e 5% de cal, porém as misturas com cal calcítica alcançaram maiores valores de resistência que as misturas com cal dolomítica, devido a maior concentração de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) presente nesse tipo de cal.

Quanto as propriedades físicas e mecânicas, Guimarães (1971) apud Lopes Júnior (2011) afirma que, de modo geral, a cal afeta favoravelmente certas propriedades dos solos, o que se reflete em variações das seguintes características: granulometria, plasticidade, contração e retração,

umidade de campo, densidade, trabalhabilidade, desintegração e compactação, resistência e permeabilidade.

Outro fator que influencia nas características finais da mistura solo-cal é o tempo de cura. Lopes Júnior (2007) verificou que misturas de solo residual de arenito Botucatu com 25% de rocha basáltica pulverizada, tratadas com 3%, 5%, 7%, 9% e 11% de cal, curadas com 90 dias, apresentaram em média, resistências 50% superiores em relação às amostras com 28 dias de cura. Nota-se que a adição de cal em solos é comum como forma de melhorar as suas características físicas e mecânicas para uso na engenharia geotécnica, porém o seu uso para estabilização de rejeitos de minério de ferro ainda é escasso, necessitando de mais trabalhos para a caracterização deste material.

### 2.1.5 Influência do teor de umidade em solos compactados

Lambe (1958) indicou a influência do arranjo das partículas de argila para diferentes níveis de compactação e teores de umidade. Tais conceitos aplicam-se para explicar a influência das características de compactação na estrutura e, conseqüentemente, no comportamento mecânico do solo (SEED et al., 1959). A Figura 5 demonstra o arranjo das partículas de argila em um solo compactado, conforme ilustrado por Lambe (1958) e Seed et al. (1959),

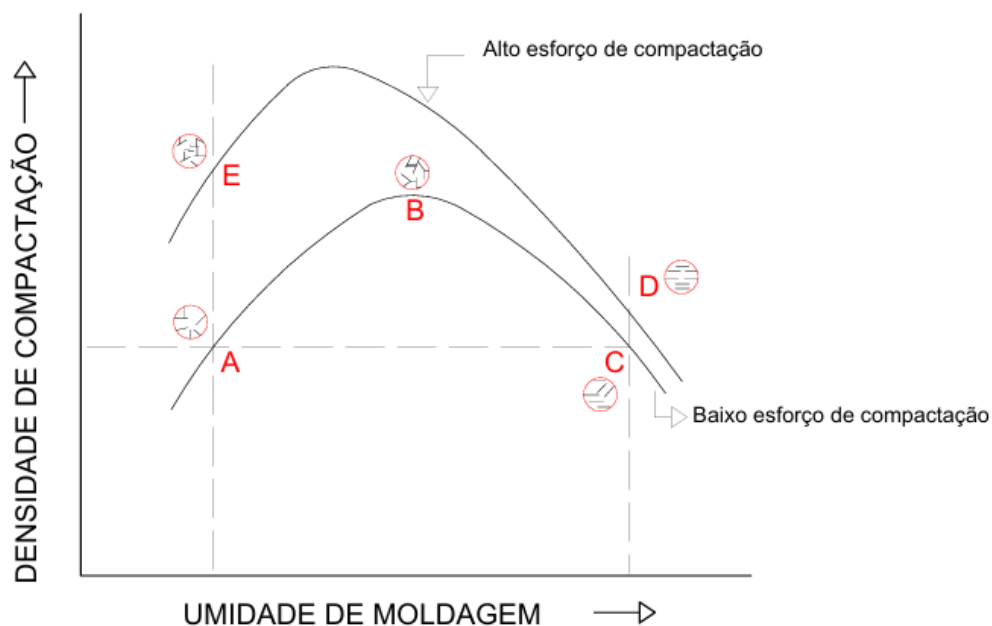


Figura 5 - Efeito da compactação e teor de umidade na estrutura do solo. (ADAPTADO de SEED et al., 1959).

As mudanças no arranjo em diferentes estágios da relação densidade-teor de umidade são explicadas da seguinte forma:

- No ponto A, a pequena quantidade de água presente resulta em uma alta concentração eletrolítica que impede o pleno desenvolvimento da dupla camada difusa de íons. A depressão da dupla camada leva a uma baixa repulsão entre as partículas, resultando numa tendência à floculação dos coloides e conseqüente baixo grau de orientação das partículas de argila no solo compactado. Este tipo de estrutura foi denominado de arranjo "*floculado*" de partículas de solo.
- Se o teor de água for aumentado até o ponto B, a concentração eletrolítica é reduzida, resultando na expansão da dupla camada, aumento da repulsão entre as partículas e baixo grau de floculação; isto é, um maior grau de orientação compacta das partículas.
- O incremento no teor de umidade até o ponto C aumenta esse efeito e resulta numa maior na orientação das partículas. O sistema de partículas paralelas neste ponto, foi denominado de sistema "*disperso*".

Em geral, pode-se afirmar que a compactação de um solo argiloso do estado seco ao ótimo tende a produzir um arranjo floculado de partículas, enquanto a compactação do mesmo solo do estado úmido ao ótimo tende a produzir um arranjo disperso de partículas (SEED et al., 1959).

A influência do teor de umidade nas propriedades das argilas também foi demonstrada por Lambe (1958) e Seed et al. (1959), tais como:

- Retração: amostras compactadas no ramo seco, retraem sensivelmente menos do que amostras compactadas no ramo úmido, fato que levou a sugestão de que a retração poderia, possivelmente, ser usado para determinar a orientação da partícula, ou seja, em amostras de argila caulínica compactadas em vários teores de água, verificou-se que tanto o grau de orientação das partículas como a retração axial aumentam à medida que o teor de água na compactação aumenta.
- Expansão: amostras compactadas no ramo seco do ótimo, exibem características de expansão mais altas e a teores de água mais elevados do que amostras da mesma densidade compactadas no ramo úmido. Esse acréscimo de expansão pode ser interpretado como uma manifestação de maior tendência de expansão nas estruturas floculadas do que das estruturas dispersas.

- Tensão-deformação: em amostras de caulinita compactadas em vários teores de água usando o mesmo esforço de compactação verificou-se que, à medida que o teor de água na compactação aumenta, há um aumento progressivo no grau de orientação das partículas; associada às mudanças na estrutura há também uma mudança progressiva na forma das relações tensão-deformação para as amostras determinadas por ensaios de compressão triaxial não consolidados - não drenados. As amostras mais flocladas têm curvas de tensão-deformação muito mais íngremes e desenvolvem suas resistências máximas em baixas deformações; as amostras mais dispersas têm curvas de tensão-deformação muito mais planas e continuam a aumentar em resistência mesmo em deformações muito altas (Figura 6).

Lambe (1958) destaca ainda que, em solos argilosos compactadas no ramo seco apresentam uma maior permeabilidade em relação ao ramo úmido. Ademais, argilas compactadas no ramo úmido tendem a ser mais compressíveis para baixos níveis de tensão.

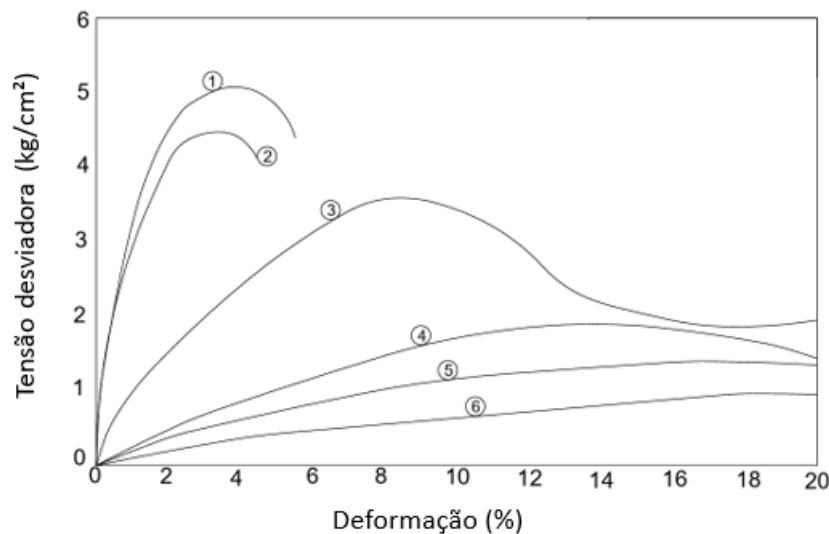


Figura 6 - Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência versus deformação de uma caulinita. (ADAPTADO de SEED et al., 1959).

No caso dessas amostras compactadas na mesma densidade demonstradas na Figura 7, sendo uma no ramo seco, produzindo uma estrutura floclada, e uma no ramo úmida para produzir uma estrutura mais dispersa e após sofrerem uma saturação em volume constante para manter suas estruturas originais, as relações tensão-deformação delas em testes de compressão triaxial não drenados produzirão novamente relações tensão-deformação marcadamente diferentes. A estrutura floclada produz uma curva tensão-deformação inicialmente acentuada, com apenas um ligeiro aumento na tensão sendo desenvolvido após cerca de 5% de deformação; entretanto,

a estrutura dispersa resulta em uma curva muito mais plana, com um aumento consistente na resistência à deformação até deformações de até 25%.

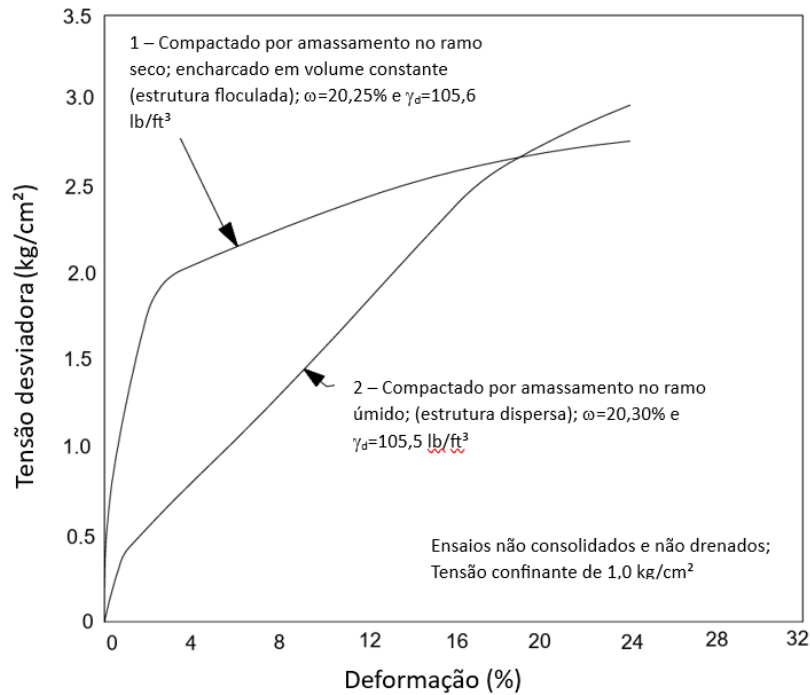


Figura 7 - Efeito do teor de umidade de moldagem na resistência versus deformação de uma caulinita. (ADAPTADO de SEED et al., 1959).

Contudo, esta teoria apresentada inicialmente por Lambe (1958) que foi baseada em solos argilosos, no caso de rejeitos de mineração que não possuem em sua composição argilominerais, o princípio da dupla camada difusa não é considerado válido e deve ser estudado e aprofundado.

Foppa (2005), estudou o efeito do teor de umidade (4 a 13,4%) em uma areia argilosa com aproximadamente 5% de argila e estabilizada com cimento Portland, fixando o valor do peso específico aparente seco em aproximadamente 19 kN/m<sup>3</sup> (densidade da curva de compactação na energia Proctor intermediária).

Verificou-se um aumento da resistência com o aumento do teor de umidade de moldagem empregado, mais significativamente entre os teores de 9 e 12% de cimento Portland, sendo as maiores resistências encontradas nos teores de umidade próximos ao teor de umidade ótimo (em torno de 10 %), independente do teor de cimento utilizado (Figura 8). Assim, embora a estrutura do solo tenha uma grande influência nas poropressões desenvolvidas nestas argilas compactadas, aparentemente tem pouco ou nenhum efeito nas características de resistência (em termos de tensões efetivas) da própria argila.

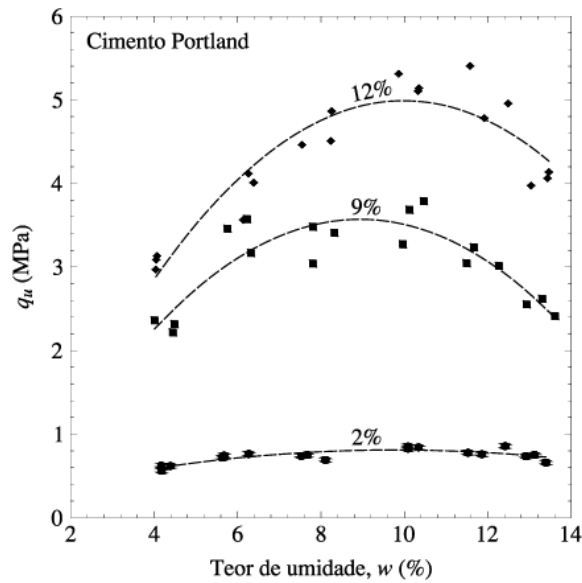


Figura 8 - Efeito do teor de umidade de moldagem sobre a resistência à compressão simples de solo-cimento (FOPPA, 2005).

Pakbaz e Alipour (2012) mostraram que mesmo com o menor teor de cimento de 4% há aumento da resistência e da rigidez. Quanto mais cimento e menores teores de umidade a amostra torna-se mais quebradiça. No teor de umidade inicial de 70%, o comportamento de todos os espécimes contendo cimento foram dúcteis. Na Figura 9 é apresentado um gráfico  $q_u \times \varepsilon_a$  em função do teor de cimento de 10% e dos teores de umidade de moldagem de 30, 48 e 70%, onde a maior resistência  $q_u$  é obtida no menor teor de umidade inicial durante a moldagem dos corpos de prova.

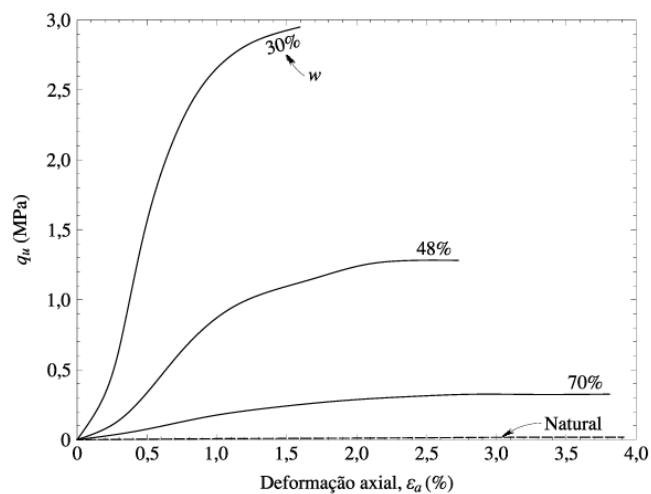


Figura 9 - Relação  $q_u \times \varepsilon_a$  tratada com 10% de cimento e teor de umidade de moldagem variado aos 28 dias de cura. (ADAPTADO de PAKBAZ; ALIPOUR, 2012).



Consoli et al, (2001), apresentam os resultados de um estudo experimental para investigar, através de ensaios triaxiais saturados e drenados, mudanças no comportamento de engenharia de uma mistura de cal de carbureto com cinza volante em um solo arenoso imediatamente após a mistura e compactação, que é quando ocorrem principalmente a carbonatação, troca de cátions e bases e flocculação-aglomeração. Foram realizados trabalhos para investigar tal comportamento após 28 dias de cura, quando reações químicas dependentes do tempo entre cal e argila/cinza volante ocorreram nas partículas, nomeadamente reações pozolânicas. Ao mesmo tempo, foram analisados a influência dos parâmetros de compactação (teor de umidade e peso unitário seco) no comportamento da mistura testando amostras moldadas na umidade ótima e, no ramo seco e no ramo úmido do teor da umidade ótima, usando a compactação Proctor Normal.

Sob o efeito das reações iniciais, a rigidez máxima ocorreu nos corpos de prova moldados no ramo seco do teor da umidade ótima, enquanto a resistência máxima ocorreu no teor de umidade ótima (Figura 10).

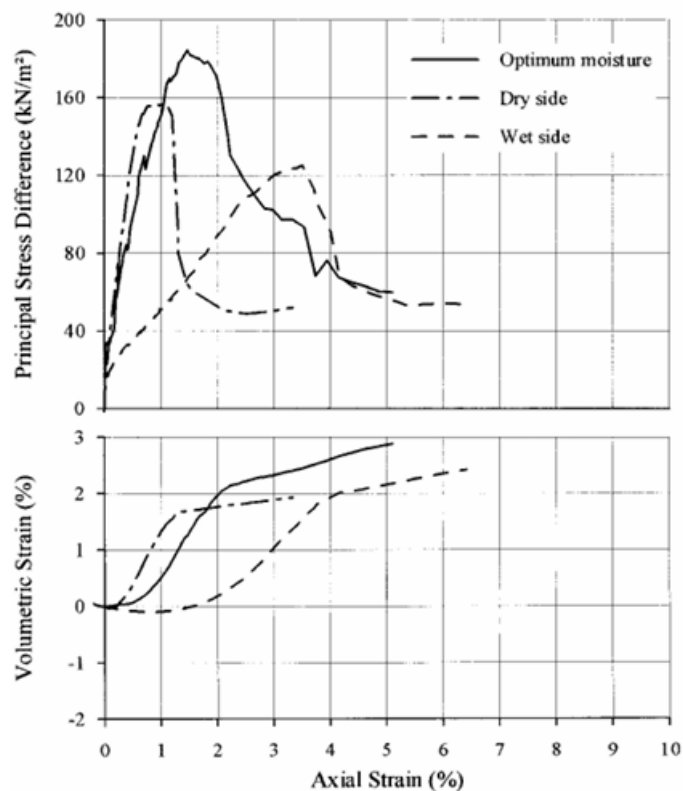
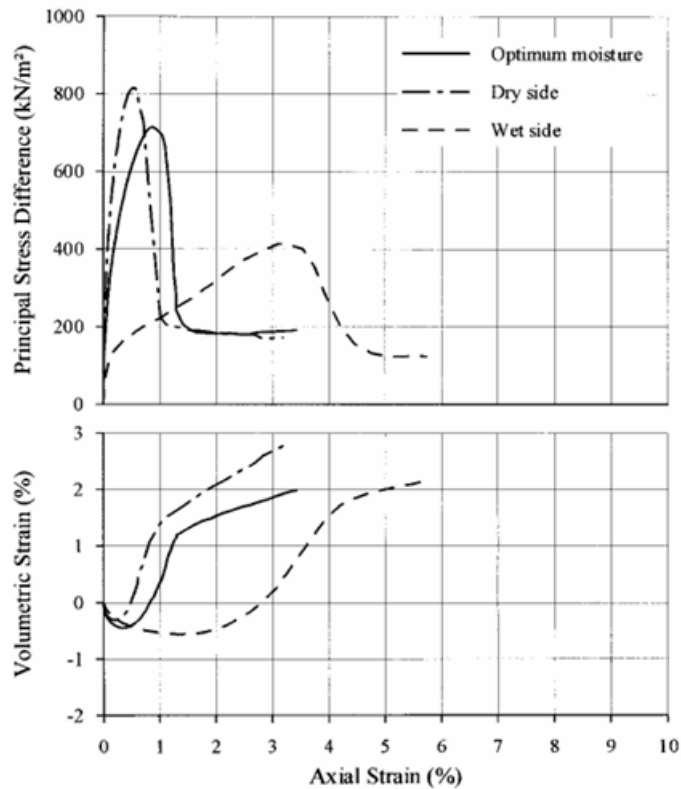


Figura 10 - Gráficos de tensão x deformação axial e deformação volumétrica x axial (sem cura) com diferentes teores de umidade. (CONSOLI et al., 2001).

Após 28 dias, as reações pozolânicas ampliaram a fragilidade e aumentaram ainda mais a resistência de pico no triaxial e sua rigidez. A resistência e a rigidez máxima ocorreram no ramo seco da umidade ótima (Figura 11).



*Figura 11 - Gráficos de tensão x deformação axial e deformação volumétrica x axial em corpos de prova curados em 28 dias com diferentes teores de umidade. (CONSOLI et al., 2001).*

Beckett e Ciancio (2014) estudaram o efeito do teor de água (10,4%, 12,4% e 14,4%) de compactação na resistência a compressão não confinada de um calcário triturado estabilizado com um teor de cimento Portland de 5% para diferentes períodos de cura (1, 3, 5, 7, 14 e 28 dias).

Os resultados obtidos mostram que os corpos de prova da série L (10,4%), moldados na densidade 18,07 kN/m<sup>3</sup> e com o menor valor de densidade em momento do teste, alcançou valores mais elevados de resistência a compressão simples não confinada, com uma maior taxa de ganho de resistência do que aqueles das séries O (12,4%) e H (14,4%) para todas as idades testadas (Figura 12).

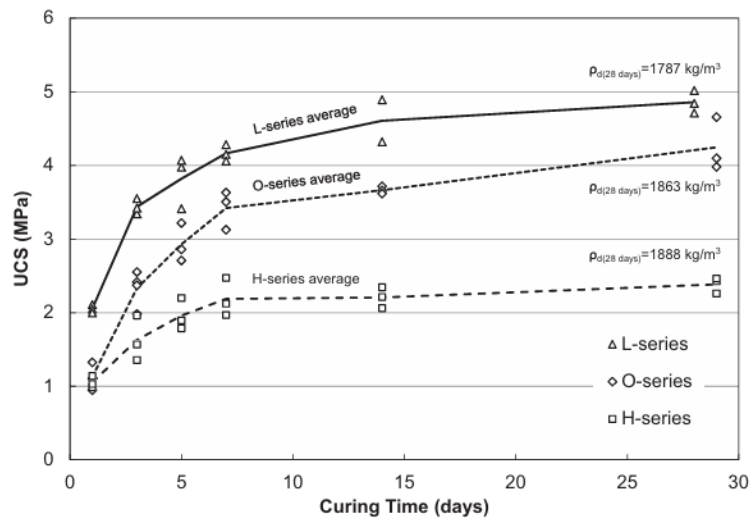


Figura 12 - Resultados de resistência a compressão não confinada para as três séries versus tempo de cura (BECKETT; CIANCIO, 2014).

Nos estudos apresentados em solos estabilizados com cimento Portland verifica-se a tendência de um maior e melhor desempenho das amostras no ramo seco com idades a partir de um dia de cura.

## 2.2 PRODUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre e entre todos os metais é o mais produzido e o que está mais presente em produtos comercializados. Inúmeros minerais têm ferro como componente essencial, mas somente os óxidos apresentam grandes concentrações. Os principais minerais que contêm ferro são: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita ( $\text{FeO}/\text{OH}$ ) e siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) (JESUS, 2022).

A produção de minério de ferro no Brasil se desenvolve em minas a céu aberto. A lavra é em bancadas com desmonte por explosivos, escavadeiras, carregamento em pás carregadeiras, transporte em caminhões fora-de-estrada e o seu beneficiamento consiste de britagem, peneiramento, lavagem, classificação, concentração e pelotização (QUARESMA, 2001)

Luz e Lins (2010) apresentam um fluxograma típico de tratamento de minérios (Figura 13), com recirculação de água. O minério bruto procedente da etapa de lavra de uma mina passa por diversas operações unitárias.

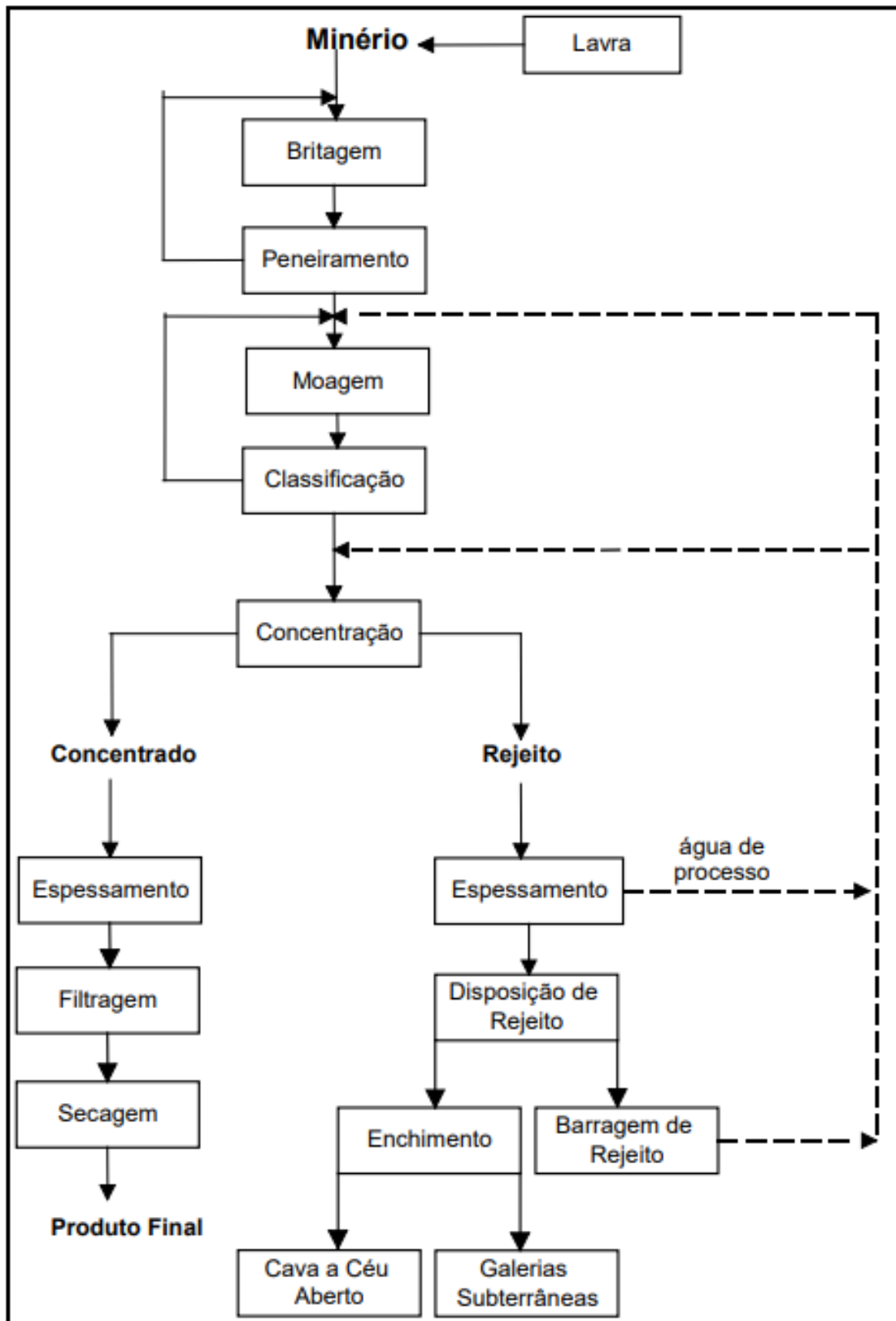


Figura 13 - Fluxograma típico de tratamento de minério de ferro (ADAPTADO de LUZ e LINS, 2010).

No beneficiamento de minério de ferro com flotação na etapa de Classificação com ciclones (Figura 14), costuma ser gerada um rejeito de granulometria mais fina, chamada de Lama ou rejeito ultrafino. Já na etapa de concentração é gerado o denominado Rejeito da Flotação ou Rejeito Granular.

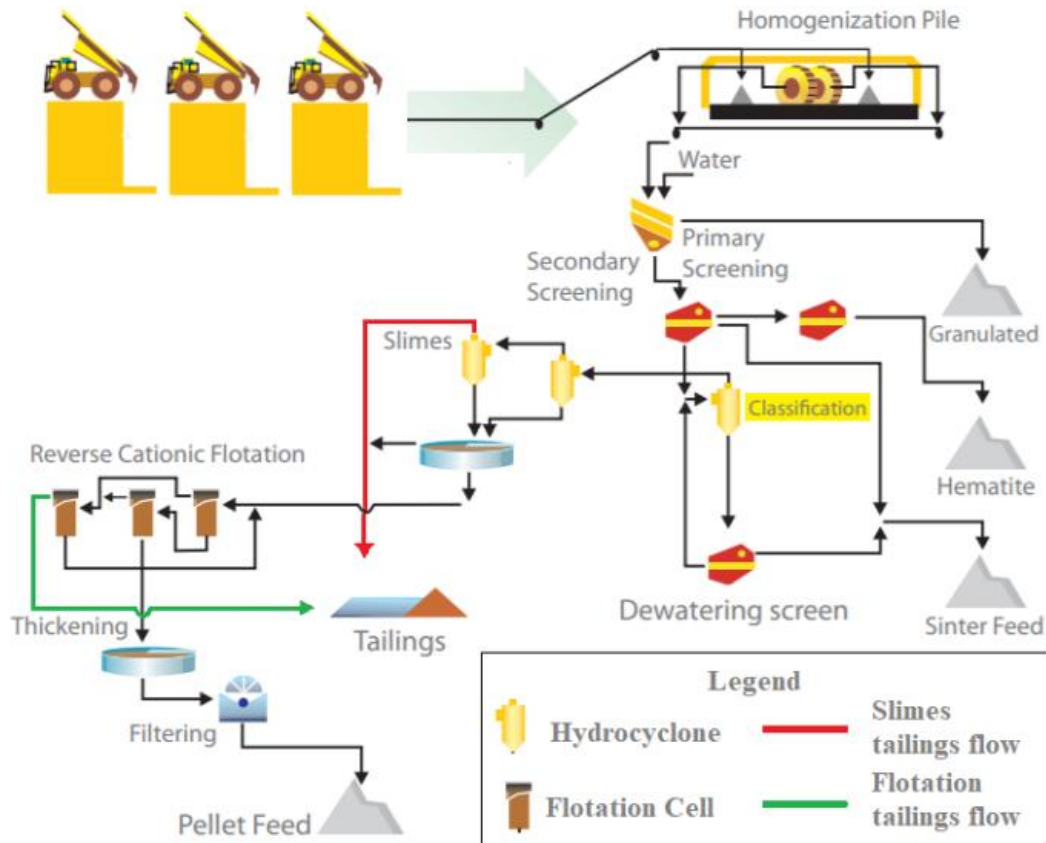


Figura 14 - Processo produtivo de minério de ferro (Silva, 2022).

No processo produtivo acima ilustrado, há os processos físicos que removem as impurezas segregadas por diferenças na densidade ou gravidade das partículas. Após a etapa de cominuição e peneiramento, o material fino, com granulometria abaixo de sinter feed (partículas de 0,15 a 6,3 mm), segue para a etapa de deslamagem para remoção dos materiais finos através de uma bateria de hidrociclones. Após essa etapa, as lamas são armazenadas nas estruturas de contenção de rejeitos. O material restante passa pelo processo de flotação catiônica reversa, separando o minério de grão fino (pellet feed); e os rejeitos da flotação também são armazenados nas estruturas de contenção de rejeitos (SILVA, 2022).

### 2.2.1 Cominuição e classificação por tamanho

Após a lavra do minério, a operação inicial usada no tratamento de minérios é a cominuição (fragmentação). O processo de cominuição é realizado com o objetivo de promover a liberação dos minerais, gerando partículas individualizadas, apropriadas para uso na etapa de concentração. A britagem é o primeiro estágio dessa etapa e atua na faixa granulométrica de tamanhos maiores (do metro ao centímetro) com uso de britadores de mandíbulas, de impacto, de rolo dentado, de rolo liso, etc. Operam geralmente a seco e em circuito aberto ou fechado e em conjunção com grelhas e peneiras vibratórias (ARAÚJO et al., 2006).

Em seguida, utiliza-se a moagem, segundo estágio do processo de cominuição e que atua na faixa granulométrica do centímetro ao micrômetro. São utilizados moinhos de meios revolventes, que são cilindros rotativos em que a fragmentação do minério é realizada no seu interior pela ação de corpos moedores tais como bolas, barras ou fragmentos do próprio minério. De um modo geral, esses equipamentos trabalham a úmido em circuito aberto ou fechado em conjunto com peneiras vibratórias, classificadores espirais e hidrociclones (PERES et al., 2007).

### 2.2.2 Concentração

Nessa etapa, ocorre a separação dos minerais valiosos (úteis) dos minerais de ganga (contaminantes) presentes no minério. Conforme a propriedade explorada, esses métodos dividem-se em gravíticos, elétricos, magnéticos, flotação, dentre outros (PERES et al., 2007).

A concentração por métodos gravíticos (ou densitários) explora diferenças de densidade, tamanho e forma dos minerais constituintes de um dado minério, separando-os por ação da força de gravidade ou por forças centrífugas (MORAIS et al., 2014). A propriedade utilizada na concentração/separação por métodos magnéticos é o diferente comportamento dos minerais sob a ação de um campo magnético, denominada susceptibilidade magnética. Os minerais são classificados em paramagnéticos, quando são atraídos por um campo magnético, e diamagnéticos, quando são repelidos. Há ainda minerais que são tão fortemente atraídos por um campo magnético que recebem a denominação de ferromagnéticos como a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). A separação por métodos magnéticos somente é superada pela flotação. (MORAIS et al. 2014).

O processo de concentração de minérios por flotação baseia-se em induzir diferenças no comportamento de umectação (molhabilidade) em partículas de certos minerais que se deseja

separar de outros, por meio da adição de agentes químicos com funções específicas. Numa máquina de flotação, equipamento que aera uma polpa previamente condicionada, separam-se minerais hidrofóbicos, coletados na espuma, dos minerais hidrofílicos, que afundam (AQUINO et al., 2004).

A técnica de flotação é o principal processo utilizado pela indústria mineral, tanto em quantidade de minérios processados quanto em diversidade de aplicações. Atualmente, estima-se que cerca de dois bilhões de toneladas de minérios no mundo são processados a cada ano por flotação (MORAIS et al. 2014).

### 2.2.3 Desaguamento

O processo de desaguamento tem como função retirar parte da água contida no concentrado e no rejeito gerado para obtenção de produtos de baixa umidade e para reuso da água no processo produtivo (FRANÇA E MASSARANI, 2018). Esses métodos de desaguamento utilizados podem promover formas finais de disposição, sendo elas o espessado, a pasta e o filtrado que, junto com a polpa, comumente usados para disposição em barragens, relacionam diretamente o teor de sólidos e a sua consistência.

A polpa de rejeitos pode ser desaguada de maneira direta ou em etapas fracionadas, em função da granulometria do rejeito. Comumente adota-se uma rota de processo para desaguar o rejeito fino (lama) e outra para desaguar o rejeito grosso (arenoso). Gorakhki e Bareither (2017) classificam o rejeito pelo teor de sólidos e umidade contida nele.

O rejeito espessado é o rejeito desaguado parcialmente por sedimentação, mas que apresentam ainda consistência de polpa com alto teor de sólidos (entre 45 a 70%) e ainda passível de bombeamento (umidade entre 50 e 100%). O rejeito em pasta é o rejeito espessado mediante incorporação de algum aditivo químico para aumentar sua densidade e alto teor de sólidos (entre 70 a 85% e umidade entre 26 a 50%).

O comportamento do material desaguado pode ainda ser otimizado, atingindo os níveis ótimos de umidade para compactação dos rejeitos mediante aplicação do processo de filtragem que promovem um rejeito com teor de sólidos entre 85 a 100% e umidade menor que 26%. Boccamino (2017) divide os rejeitos filtrados em filtrados a úmido, que são rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase saturada, não mais passível de bombeamento e os filtrados a

seco, que são rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento.

### 2.3 DISPOSIÇÃO

Existem diversas tecnologias de disposição de rejeitos de mineração onde eles podem ser dispostos: em minas subterrâneas; em cavas exauridas de minas; por empilhamento drenado; por empilhamento a seco (dry stacking); por disposição de rejeitos espessados ou em pasta; em barragens de contenção de rejeitos; por codisposição de rejeitos e estéreis; e por disposição compartilhada de rejeitos e estéreis. A seleção do método de disposição irá depender: da natureza do processo de mineração; das condições geológicas e topográficas da região; das propriedades mecânicas dos materiais; do poder de impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos e das condições climáticas da região (IBRAM, 2016).

A disposição de rejeitos em reservatórios criados por diques de contenção ou barragens é o método mais comumente usados. Estas barragens podem ser de solo natural ou construídos com os próprios rejeitos e neste caso, sendo classificadas como barragens de contenção alteadas com rejeitos. Já a disposição em pilhas é utilizada, em sua maioria, como depósitos de estéreis, apesar do surgimento nos últimos anos de diversas pesquisas voltadas para a adaptação deste método para uso como disposição final dos rejeitos que antes eram enviados para as barragens.

A necessidade da aplicação do método de empilhamento em rejeitos surgiu principalmente após os acidentes ocorridos com o rompimento da Barragem do Fundão em Mariana – Minas Gerais, em 2015, que resultou em 17 vítimas fatais e 2 desaparecidos lançando 34 milhões de metros cúbicos de lama ao meio ambiente e mais recentemente, em janeiro de 2019, o rompimento da Barragem I em Brumadinho (MG) que liberou 12 milhões de metros cúbicos para o sistema fluvial a jusante, além de causar a morte em 270 pessoas, pois demonstrou a fragilidade de um sistema utilizado pela maioria das mineradoras para disposição de seus rejeitos, pois são de simples execução e mais econômicos.

Carneiro e Fourie (2018) afirmam que a seleção do método de disposição de rejeito com melhor custo-benefício para um empreendimento requer que todos os custos (ambientais, sociais, econômicos e associados ao risco) sejam devidamente contabilizados. Dentro desse contexto, os métodos de disposição de rejeito a partir de técnicas de desaguamento vêm sendo aplicados em um número cada vez maior de empreendimentos ao redor do mundo.



Este estudo tratará somente da disposição por empilhamento, visto ser o método mais procurado pelas mineradoras depois dos acidentes ocorridos em barragens no Brasil e também devido as novas legislações existentes que restringem o uso de barragens.

### 2.3.1 Empilhamento

Os rejeitos gerados na mineração variam em função do tipo de minério processado e dos tratamentos adotados e dessa forma, também são encontradas variações nas suas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas.

Quando possuem granulometria fina ( $< 0,074$  mm), são denominados de lamas, e quando de granulometria grossa ( $> 0,074$  mm) são denominados rejeitos granulares. Eles são transportados para os locais de disposição em tubulações, por gravidade ou por bombeamento, e descartados em forma de pasta, a granel ou líquida (poupa de água com sólidos ou lama) (ESPÓSITO E DUARTE, 2010).

Alves (2020) cita que, o método de empilhamento é adequado somente a rejeitos que apresentem coeficiente de permeabilidade tal que permita um fluxo de drenagem estritamente gravitacional e subvertical no interior do aterro.

Pimenta (2011) cita que os principais objetivos do método por empilhamento são:

- Obter um maciço não saturável e estável;
- Obter maior densidade e, portanto, maior capacidade e vida útil;
- Obter menor potencial de dano em uma eventual ruptura;
- Obter maior facilidade para fechamento e recuperação ambiental;
- Aplicação segura do método com baixo risco de liquefação e de ruptura.

Para viabilizar o processo de empilhamento em rejeitos finos, é necessário que após o espessamento, este material passe por um processo de filtração.

A filtração acontece a partir da aplicação de uma força sobre as partículas através de um meio poroso e pode ser conseguida por meio de: gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Na filtração a vácuo, uma pressão negativa é aplicada abaixo do meio filtrante, enquanto, na filtração sob pressão, é aplicada uma pressão positiva na polpa, forçando-a a ir de encontro ao meio filtrante. Existem também processos de filtração que combinam vácuo e pressão

(filtragem hiperbárica) e outros que acontecem a partir da ação dos capilares de meios cerâmicos porosos combinados com a aplicação de vácuo (filtragem capilar) (GUIMARÃES, 2011).

Portanto, este método consiste em filtrar (com filtros industriais) a polpa previamente adensada e, em seguida, dispor em pilhas a torta produzida (em separado, em mistura ou em co-disposição com o estéril da mina). Além disso, a água filtrada pode ser reaproveitada como água de processo na usina, reduzindo os custos de consumo de água (GUIMARÃES, 2011; CACCIUTTOLO e VALENZUELA, 2022).

A Figura 15, apresenta uma ilustração dos rejeitos em diversos estados de consistência.

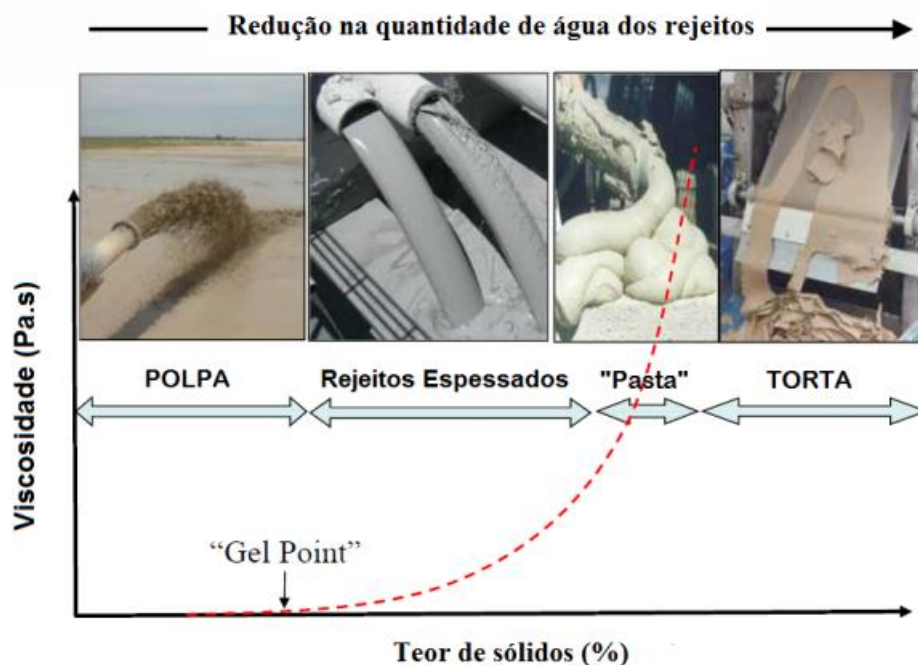


Figura 15 - Diferentes estados de consistência dos rejeitos (Clipes, 2000 apud SILVA, 2022).

Tessaroto (2015) cita algumas vantagens sobre a disposição em pilhas de rejeitos filtrados, tais como:

- Aumento na recuperação de água de rejeitos (~90%);
- Redução das áreas impactadas;
- Diminuição do risco de instabilidade física, pois são armazenados sob compactação;
- Possibilidade de formação de pilhas com mais de 100 metros de altura;

- Em caso de falha, provavelmente resultará em danos menores comparado com as barragens, pois não possui água livre;
- Após a compactação, forma-se uma camada impermeável, impedido a re-suspensão dos sólidos eliminando a necessidade de tratamento de efluentes originados pelas chuvas;
- Menor impacto ambiental e maior facilidade de obter licença ambiental, pois elimina bacias de disposição e barragens.

Guimarães et al. (2012) e Crystal et al. (2018) apontam que a filtragem de rejeitos é uma prática usual nas minerações localizadas em regiões de clima árido. A prática dessa técnica objetiva reduzir as perdas de água, devido à escassez desse elemento nessas regiões que também são marcadas pela alta evaporação, o que aumenta a possibilidade de que a pilha permaneça insaturada, favorecendo, assim, a estabilidade da mesma.

Guimarães (2011) cita em seu estudo que a umidade obtida da torta em processos de filtragens possibilita uma redução para teores entre 6 a 17%.

Uma das formas de otimizar a disposição por empilhamento dos rejeitos de minério de ferro (granulares e/ou ultrafinos) é promover estudos de estabilização química deste material.

Consoli et al. (2022) propõem a adição de cimento nos rejeitos para aumentar sua resistência e rigidez e demonstram esquematicamente o método de empilhamento a seco através da compactação por camadas conforme ilustra a Figura 16.

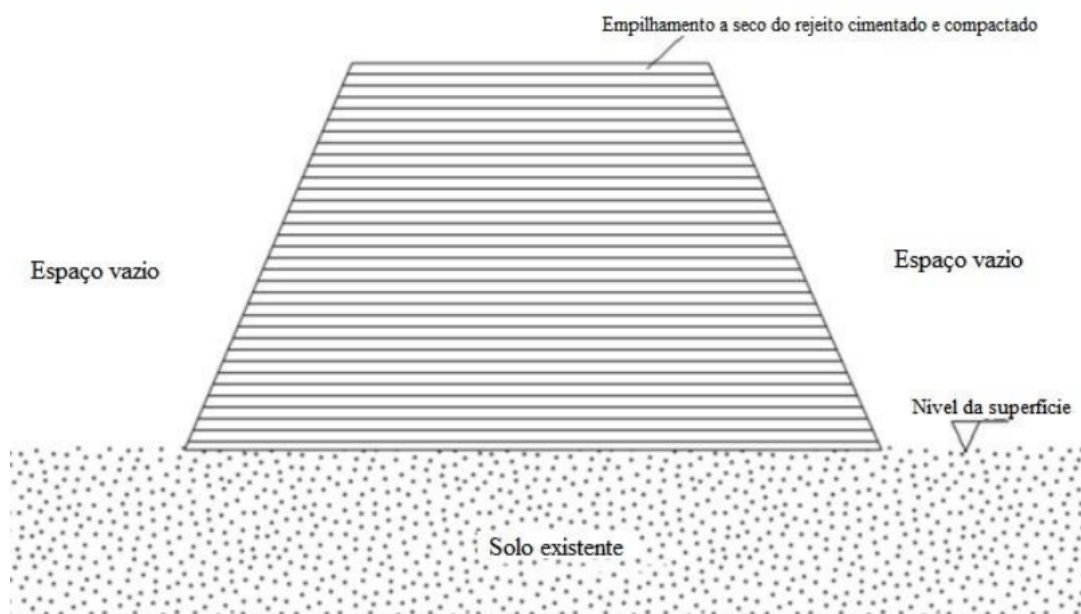


Figura 16 - Método de empilhamento a seco proposto por CONSOLI et al. (2022).

Um dos problemas principais deste método é o controle da umidade de compactação durante o processo, devido as variabilidades deste índice provenientes do processo de filtragem e também devido as áreas relativamente grandes do local da disposição das pilhas.

Fourie et al. (2022) diz que locais de clima úmido (como o Brasil) devem ter um bom planejamento da logística da compactação para evitar a saturação dos rejeitos filtrados após a sua colocação.

Além da adição de cimento, existem outras formas de estabilização química, conforme já descrito anteriormente. Este trabalho tem o objetivo de contribuir com dados técnicos sobre estabilização com uso de metacaulim e cal hidratada, promovendo uma reação pozolânica melhorando as características finais do material a ser empilhado.

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS

Soares (2010) define rejeitos como a fração do minério destituída de mineral útil ou de valor econômico, obtida por processo de beneficiamento mineral.

As propriedades físicas dos rejeitos, juntamente com suas substâncias químicas e propriedades mineralógicas devem ser conhecidas a fim de avaliar seu possível uso.

No caso dos rejeitos de minério de ferro, estes são frequentemente separados em frações finas, na faixa de tamanho de silte a areia fina, e em frações mais grossas, na faixa de tamanho de areia fina ao cascalho (MILLER; COLLINS, 1976).

Sua constituição é caracterizada pela presença de uma fração líquida e sólida, com concentração de 30% a 50% em peso (ARAÚJO, 2006).

As propriedades físicas dos rejeitos dependem de sua fonte e método de processamento. Em operações onde os rejeitos não são um resíduo produzido por separação por tamanho, eles são geralmente finamente divididos, tendo tamanhos de partícula na faixa de tamanho de partícula silte a argila (CLIFTON et al., 1980).

Silva (2022) informa que podem ser geradas até três categorias de resíduos nos processos produtivos de minério de ferro:

- Rejeitos mais finos, que são gerados na etapa de deslamagem – comumente designados por “lamas” ou ultrafinos.
- Rejeitos mais grossos, que são gerados na etapa de flotação – comumente designados por granulares ou de flotação.
- Rejeitos que contêm tanto a fração grosseira como as lamas – comumente designados por rejeitos totais.

Neste trabalho serão utilizados os rejeitos ultrafinos (UF) e o rejeito granular ou de flotação (GR).

Soares (2010) comenta que as principais características geotécnicas dos rejeitos que devem ser conhecidas são: limites de Atterberg; índice de vazios inicial; adensamento ou consolidação; compressibilidade e permeabilidade e que essas características geotécnicas são feitas com base na mecânica dos solos, onde pode-se determinar também a densidade, umidade e granulometria.

#### 2.4.1 Granulometria e densidade

Araújo (2006) comenta que os rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas). Quanto a composição granulométrica e consistência, geralmente os rejeitos de caráter granular são constituídos por areias finas a médias não plásticas, já as lamas são constituídas por siltes e argilas com alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade.

Gomes et al. (2011) em seu estudo de caracterização tecnológica em 17 amostras de finos de rejeito de minério de ferro, obteve uma distribuição granulométrica média, onde 8,21% das partículas estão retidas na peneira de 0,150 mm e 58,81% abaixo da 0,045 mm.

Vergara (2012) utilizou rejeitos obtidos no segundo descarte do beneficiamento de minério de ferro, que são rejeitos granulares de duas minerações do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Neste caso os rejeitos foram classificados como areia fina, sendo a primeira amostra uma areia bem graduada de classificação SUCS como SW e pela ABNT como areia média a fina e a segunda amostra uma areia fina mal graduada de classificação SUCS como SP e pela ABNT como areia com silte.

Hu et al. (2017) realizaram a caracterização física de quatros rejeitos, sendo eles: rejeitos finos e granulares de minério de ferro de Yuhezhai; e rejeitos finos e granulares de minério de cobre

de Bahuerachi. No caso do minério de ferro a densidade real dos rejeitos finos e granulares apresentaram valores de  $3,08 \text{ g/cm}^3$  e  $3,23 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente, consistentes com as dos rejeitos metálicos. Quanto aos testes dos limites de Atterberg e distribuição granulométrica, o rejeito granular foi classificado como areia siltosa (SM) e o fino como argila arenosa fina (CL) de acordo com a SUCS.

Santos e Ribeiro (2007) apresentaram resultados de ensaios em rejeitos de minério de ferro realizados em campo, onde: a densidade dos grãos variou entre  $2,95$  a  $3,14 \text{ g/cm}^3$ ; os índices de vazios máximos variaram  $0,88$  a  $1,00$ ; e o índice de vazios mínimo entre  $0,51$  a  $0,58$  em pontos de furos ao longo da praia de rejeitos.

Gomes (2017) em seu estudo com amostra proveniente de barragem de rejeitos de minério de ferro, obteve uma densidade relativa de  $3,04 \text{ g/cm}^3$  e sua área superficial específica in natura de  $3,713 \text{ m}^2/\text{g}$ . Através da análise granulométrica classificou o material como fino, com  $d_{90}$  de  $75 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $30\%$  inferior a  $38 \text{ }\mu\text{m}$  e  $5\%$  abaixo de  $10 \text{ }\mu\text{m}$ .

Sarsby (2000), cita que em rejeitos de minério de ferro arenosos a densidade específica é de  $3,0 \text{ g/cm}^3$  com índice de vazios de  $0,7$  e no lodo varia de  $3,1 \text{ g/cm}^3$  a  $3,3 \text{ g/cm}^3$  com índice de vazios de  $0,9$  a  $1,2$ .

Lara et al. (2018) em seu estudo, analisou o rejeito de flotação de minério de ferro e obteve uma densidade específica de  $2,98 \text{ g/cm}^3$  e na composição granulométrica um percentual de  $26,8\%$  equivalente a silte e  $73,2\%$  equivalente a areia, ou seja, possui  $40\%$  do material passante na peneira n°200 ( $0,075\text{mm}$ ) e  $100\%$  passante na peneira n°40 ( $0,42 \text{ mm}$ ).

No estudo realizado por Barati et al. (2020) de estabilização de rejeitos de minério de ferro com bentonita e cimento, 16 amostras de rejeitos secos depositados em área específica da mina Golgozar – Irã foram coletadas e ensaiadas onde o tamanho máximo de partícula encontrado foi de  $6,73 \text{ mm}$ , e o conteúdo fino (passante na peneira n° 200) variou entre  $20,8$  e  $30,9\%$  com uma densidade específica média de  $3,1 \text{ g/cm}^3$ .

Percebe-se que há dois métodos de disposição de rejeitos com características diferentes, principalmente na sua granulometria, pois quando depositado em barragens em forma de lodo o material tende a uma característica de siltes a argilas e quando depositados em um estado úmido ou semisseco tende a areias finas a médias.

### 2.4.2. Permeabilidade

Definida como a propriedade que representa a maior ou menor dificuldade com que a percolação de um fluido ocorre através dos vazios do solo, a permeabilidade é bastante útil no cálculo das vazões em barragens, na análise de recalques, nos estudos de estabilidade de taludes e estruturas de contenção e no rebaixamento do lençol freático (BOSZCZOWSKI et al., 2023).

A permeabilidade é, além de muito importante para a geotecnia, ao mesmo tempo muito variável, pois é influenciada pela granulometria, índice de vazios, estrutura, composição mineralógica e grau de saturação de um solo.

Fernandes (2016) cita que a granulometria é o fator mais relevante para a permeabilidade de um solo. Por essa razão, costuma-se classificar o tipo de solo de acordo com seu coeficiente de permeabilidade (Tabela 4), permitindo a classificação crítica dos resultados obtidos em laboratório.

*Tabela 4 - Valores de coeficientes de permeabilidade típicos de solos sedimentares. (ADAPTADO de FERNANDES, 2016).*

<b>Tipo de solo</b>	<b><math>k</math> (m/s)</b>	<b>Grau de permeabilidade</b>
Pedregulhos limpos	$>10^{-2}$	Alto
Areia grossa	$10^{-2}$ a $10^{-3}$	Alto
Areia média	$10^{-3}$ a $10^{-4}$	Médio
Areia fina	$10^{-4}$ a $10^{-5}$	Médio
Areia siltosa	$10^{-5}$ a $10^{-6}$	Baixo
Siltes	$10^{-6}$ a $10^{-8}$	Muito baixo
Argilas	$10^{-8}$ a $10^{-10}$	Muito baixo a praticamente impermeável

No caso de rejeitos de mineração, Vick (1983) cita que o coeficiente de permeabilidade pode variar de  $10^{-2}$  cm/s para rejeitos arenosos grosseiros a  $10^{-7}$  cm/s para lamas bem consolidadas.

Sarsby (2000) também cita que o coeficiente de permeabilidade dos rejeitos minerais pode variar amplamente devido à variabilidade de classificação e densidade in situ. A permeabilidade média dos rejeitos abrange cinco ou mais ordens de grandeza, de cerca de  $10^{-4}$  m/s para rejeitos de areia limpos e grosseiros a  $10^{-9}$  m/s para argilas bem consolidadas.

Na Tabela 5, são demonstrados valores típicos de permeabilidade em função da natureza do material e pesquisadores.

Tabela 5 - Valores de coeficientes de permeabilidade típicos de rejeitos minerais. (ADAPTADO de SARSBY, 2000).

Material	Pesquisadores	$K_v$ (m/s)	$K_h$ (m/s)
Arenosos	Mittal & Morgenstern (1975)	$2 \times 10^{-4}$ a $9 \times 10^{-6}$	-
	Genovis & Tecca (1993)	$4 \times 10^{-5}$ a $5 \times 10^{-6}$	-
	Vick (1983)	$10^{-4}$ a $10^{-9}$	-
Argilosos	Genovis & Tecca (1993)	$10^{-8}$ a $5 \times 10^{-9}$	-
	Routh (1984) - Argila da China	$5 \times 10^{-6}$ a $5 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-5}$ a $5 \times 10^{-5}$
	Routh (1984) - Tugstênio	$2 \times 10^{-7}$	$10^{-6}$
	Blight (1994)	$10^{-7}$ a $10^{-9}$	-

Santos e Ribeiro (2007) apresentaram resultados de ensaios de permeabilidade com permeâmetro de Ghelph em rejeitos de minério de ferro em campo, onde K variou de  $7,68 \times 10^{-3}$  cm/s a  $1,10 \times 10^{-2}$  cm/s com amostras que variaram o teor de ferro entre 13,88% a 21,64% e o índice de vazios entre 0,79 e 0,86.

Segundo Nierwinski (2019), a permeabilidade dos rejeitos reduzirá com o aumento de finos, plasticidade, método de disposição e profundidade no interior do depósito.

O método de disposição do rejeito também influencia a permeabilidade deste material pois o lançamento hidráulico em camadas faz com que ocorra anisotropia nos depósitos, ou seja, existe uma considerável variação entre os coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical. A relação entre o coeficiente de permeabilidade horizontal e vertical, ( $k_h/k_v$ ), varia entre 2 a 10 nas praias de areias uniformes e nas áreas de lamas submersas. Nas zonas de transição entre as praias e as lamas podem ocorrer maiores diferenças em função das camadas intercaladas de areia e lama. Em depósitos onde a disposição não é controlada, a relação  $k_h/k_v$  pode chegar a 100 ou mais. Além disso, a relação  $k_h/k_v$  tende a aumentar com a profundidade, pois os rejeitos consolidados tendem a apresentar redução dos seus índices de vazios e, por consequência, diminuição de  $k_v$  (Vick, 1983).

Segundo Soares, (2010), a concepção clássica da deposição das partículas e as permeabilidades esperadas estão exemplificadas na Figura 17, na qual se observam três zonas:

- a) Uma constituída por areias de alta permeabilidade, situada próxima ao ponto de descarga;
- b) Outra constituída por lamas, de baixa permeabilidade, situada distante do ponto de lançamento;



- c) Por último, aquela com permeabilidade intermediária situada entre estas duas primeiras.



Figura 17 - Concepção da variação da permeabilidade num depósito de rejeitos. (KELLY; BUSH, 1971 adaptado por SOARES, 2010).

A largura relativa de cada zona vai depender da proporção das areias e lamas, e da posição do lago de decantação em relação ao ponto de descarga.

A segregação que ocorre neste caso quando do lançamento vai influenciar diretamente os valores de permeabilidade. Na Figura 18, se observa esta variação em função da distância do ponto de descargados rejeitos no reservatório.

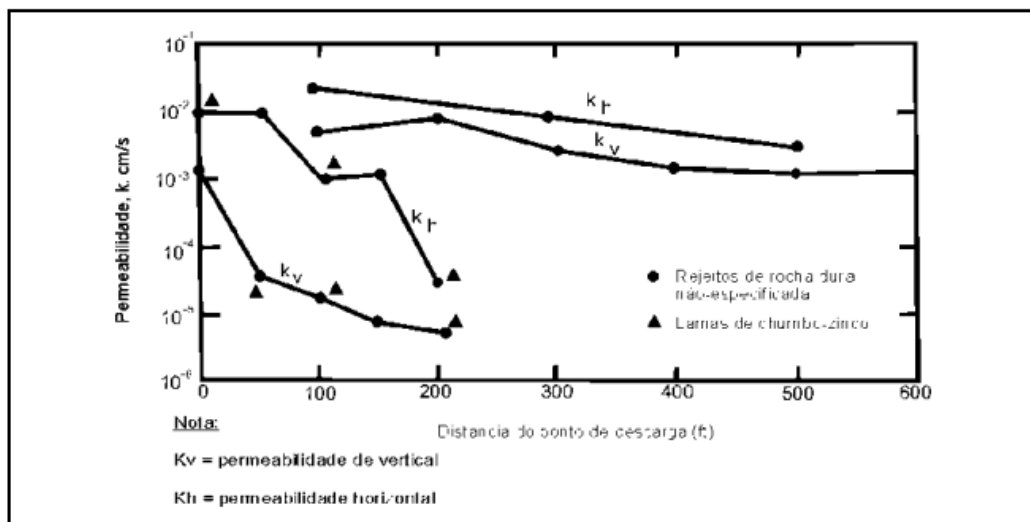


Figura 18 - Variação da permeabilidade e anisotropia em função da distância do local da descarga, para praias de rejeitos bem segregados. (SODERBERG; BUSH, 1977 ADAPTADO SOARES, 2010).

Nota-se também na Figura 18, que há uma variação da permeabilidade bastante significativa entre as direções horizontal ( $k_H$ ) e vertical ( $k_V$ ). Esta variação deve-se à natureza das camadas, além da segregação hidráulica que ocorre no processo de deposição, e a razão entre a permeabilidade horizontal e vertical situa-se, normalmente, entre 2 e 10 (SOARES, 2010).

### 2.4.3. Compressibilidade e adensamento

Terzaghi (1943) define compressibilidade como uma propriedade relacionada à redução do volume de um solo quando aplicada uma pressão (carga externa). Esse fenômeno pode ocorrer através de uma compactação (redução dos vazios no solo) ou por adensamento (drenagem da água existente nos vazios).

A taxa com que ocorre a compressão depende do tipo de solo, por exemplo: a mudança de volume em areias (solos não-coesivos) tende a ser imediata devido a sua alta permeabilidade. Em contrapartida, nas argilas (solos coesivos) a saída de água é lenta devido à baixa permeabilidade, portanto, as variações volumétricas (deformações/recalques) dependem do tempo, até que se conduza o solo a um novo estado de equilíbrio, sob as cargas aplicadas. Essas variações volumétricas que ocorrem em solos finos saturados, ao longo do tempo, constituem o processo de adensamento (GURGEL, 2018).

Dentre os parâmetros de compressibilidade que o engenheiro geotécnico necessita para a execução de projetos e o estudo do comportamento dos solos, destacam-se o índice de compressão  $C_c$ , e o coeficiente de adensamento  $C_v$ . A obtenção desses parâmetros se dá a partir da realização de ensaios de compressibilidade do solo.

No caso dos rejeitos de mineração, estes tendem a apresentar compressibilidade muito superior aos materiais naturais similares. Isto se deve ao método de disposição que gera materiais de baixa densidade, alta angularidade dos grãos e características de granulometria (NIERWINSKI, 2019).

Sarsby (2000), comenta que o  $C_v$  de rejeitos arenosos ocorre tão rapidamente que é difícil de medir, muito embora os dados disponíveis sugiram que varie entre  $3 \times 10^{-1}$  a  $10^2$   $\text{cm}^2/\text{s}$  para depósitos de areia e para rejeitos argilosos geralmente cerca de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ . Cita ainda que os valores típicos encontrados em rejeitos de mineração do parâmetro  $C_c$  varia numa faixa de 0,05 a 0,1 para rejeitos arenosos e 0,20 a 0,30 para os rejeitos de granulometria fina.

Araújo (2006) em seu estudo com rejeitos de minério de ferro encontrou valores de  $C_c$  que variam de 0,22 a 0,36 e  $C_v$  de 1 a  $6 \times 10^{-2}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ .

Hu et al. (2017), mencionaram em seus estudos os índices de vazios ( $e$ ) e valores de  $C_c$  de rejeitos finos ( $e=1,41$  e  $C_c=0,26$ ) e de rejeitos granulares ( $e=0,74$  e  $C_c=0,046$ ) de minério de ferro de Yuhezai.

#### 2.4.4. Resistência ao cisalhamento

A resistência do solo ao cisalhamento é determinada pelas características coesivas e friccionais entre as partículas do solo, sendo definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (Pinto, 2000).

A teoria apresentada por Terzaghi (1925) diz que sempre que o solo estiver numa condição saturada, a resistência ao cisalhamento dependerá da tensão média intergranular, ou seja, da tensão efetiva atuante. Nestas condições, a Equação 11 deverá ser expressa em termos efetivos ( $\phi$  e  $c'$ ).

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\phi \quad (\text{Equação 11})$$

Onde  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento correspondente à tensão normal ( $\sigma$ ) aplicada e  $c$  e  $\phi$  são a coesão e ângulo de atrito do material, respectivamente.

A coesão do solo é a força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente. A coesão real é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas silicatadas, bem como o resultado da atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas (MULLINS et al., 1990). A coesão aparente é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados, que tendem a aproximá-las entre si (SILVA E CARVALHO, 2007).

O ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) representa as características friccionais entre as partículas do solo, sendo definido como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. O ângulo de atrito interno do solo depende de fatores como grau de compactação, percentagem e tipo de argila, tamanho e forma dos grãos de areia do solo (PINTO, 2000).

Em solos de textura arenosa, a resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre as partículas, enquanto em solos argilosos ela depende não só do atrito entre partículas, como também da coesão do solo (LEBERT; HORN, 1991).

Os parâmetros de resistência podem ser determinados através de ensaios de laboratório (cisalhamento direto e triaxiais) ou por correlação com resultados de ensaios de campo.

Os ensaios triaxiais são os mais utilizados para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e de deformabilidade dos solos sob diferentes solicitações. Neste ensaio é possível garantir a saturação por processos de percolação por dióxido de carbono, percolação por água ou por elevação da contrapressão. Além disso, é possível simular em ensaios triaxiais diferentes condições de adensamento (hidrostático ou não), de drenagem (drenados ou não drenados) e de carregamento na fase de cisalhamento (por carregamento ou descarregamento axial ou radial) (BOSZCOWSKI et al., 2023).

Os ensaios triaxiais convencionais mais difundidos segundo Boszczowski et al. (2023) são:

- Ensaio de compressão triaxial não adensado e não drenado (UU – unconsolidated undrained) que é geralmente utilizado para avaliar a resistência não drenada em amostras que se encontram naturalmente na condição saturada. Os solos normalmente ensaiados nesta condição possuem baixa consistência e resistência, são em sua maioria solos argilosos de baixíssima permeabilidade.

- Ensaio de compressão triaxial adensado hidrostáticamente e não drenado (CIU CA – consolidated isotropic undrained) onde o corpo de prova é adensado de modo hidrostático, ou seja, após o período de dissipação do excesso de poropressão originado pelo confinamento, a tensão efetiva é a mesma em todas as direções. Na fase de cisalhamento, entretanto, a ruptura é realizada por aumento da tensão vertical sem permissão de drenagem, ou seja, com geração de poropressão, a qual é medida. Dessa forma, através da medida da variação de poropressão no cisalhamento, é possível definir a resistência em termos de tensão total e efetiva.

- Ensaio de compressão triaxial adensado hidrostáticamente e drenado (CID CA – consolidated isotropic drained) que consiste no adensamento hidrostático do corpo de prova seguido de uma fase de cisalhamento em que a drenagem é permitida até a ruptura. Em virtude da mobilização de tensões cisalhantes, ocorrem variações volumétricas no corpo de prova que são medidas, em geral, pelo dispositivo controlador da contrapressão. Como não se gera excesso de poropressão no cisalhamento, todos os parâmetros de resistências são obtidos em termos efetivos, ou seja, considerando o contato grão-grão do solo.

No caso de ensaios triaxiais realizados em rejeitos de mineração, Vick (1983) comenta que, embora os mesmos sejam depositados com um índice de vazios alto, é comum se encontrar altos valores de resistência ao cisalhamento, em função da alta angularidade dos grãos e

costumam apresentar ângulos de atrito efetivos da ordem de 3 a 5 graus a mais que os solos naturais para uma mesma densidade e nível de tensão.

Nierwinski (2019) cita que, de modo geral, os rejeitos são materiais não coesivos e tendem a apresentar intercepto coesivo igual a zero em ensaios de laboratório devidamente executados e interpretados. Os valores típicos de ângulo de atrito dos rejeitos de mineração estão na faixa de 30 a 37 graus.

O fator que mais afeta o ângulo de atrito é o nível de tensões e o aumento da densidade tem pouca influência neste parâmetro. Para a faixa de densidades encontradas em reservatórios de rejeitos, o ângulo de atrito tende a apresentar variações de no máximo 3 a 5 graus (VICK, 1983).

Sotomayor (2018) em seu estudo de avaliação do comportamento mecânico drenado e não drenado em rejeitos de minério de ferro com e sem reforço com fibra, mediante ensaios triaxiais sob tensões efetivas de confinamento de 50, 100, 200 e 400 kPa. encontrou os resultados descritos na Tabela 6.

*Tabela 6 - Variação no ângulo de atrito e intercepto coesivo em rejeito de minério de ferro com e sem reforço de fibra (ADAPTADO de SOTOMAYOR, 2018).*

Ensaio	$\phi$ (°) não reforçado	$\phi$ (°) reforçado	$c'$ (kPa) não reforçado	$c'$ (kPa) reforçado
Triaxial drenado	33,3	39,4	28,3	103,0
Triaxial não drenado	33,4	42,6	25,9	27,2
Crítico	33,8	-		

Os resultados mostram que o ângulo de atrito e intercepto coesivo obtidos com a adição de fibra aumentou em todos os casos os valores. Nota-se uma diferença desprezível entre os parâmetros sem o uso de fibras (não reforçados), em contraste, com a diferença entre os parâmetros reforçados.

Mafessoli (2022) em sua pesquisa determinou para as misturas de rejeito de minério de ferro com e sem adição de cimento Portland os valores dos parâmetros do ângulo de atrito efetivo,  $f$ , e o intercepto coesivo efetivo,  $c$  conforme demonstra a Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos ensaios triaxiais realizados. (ADAPTADO de MAFESSOLI, 2022).

Identificação do ensaio	Tensões de confinamento (kPa)	Adição de cimento (%)	$\phi$ pico	$c$ pico
Drenado	1000	0	35,12°	0
	2000			
	4000			
Drenado	200	2,5	38,11°	255,15
	400			
	800			
	1600			
Não Drenado	50	2,5	38,11°	255,15
	100			
	200			
	400			

Mafessoli (2022) comparou as envoltórias de ruptura do rejeito não-estabilizado com o estabilizado e foram constatadas variações no ângulo de atrito interno determinados para o material. O ângulo de atrito interno passou de 35,12° para 38,11°. O aumento de  $\phi$  já era esperado com a inserção de cimento Portland no rejeito, todavia, aumento esse, pouco significativo. Houve um aumento de aproximadamente 1,09 vezes, isso é, 8,51% em relação ao valor inicial sem cimento. Já os valores do interceptos coesivos efetivos calculados para as misturas (0 e 2,5% CP V), seguiram a tendência esperada para comportamento de um material cimentado, ou seja, com valores crescentes de  $c'$  com o aumento da cimentação entre as partículas. O intercepto coesivo efetivo variou de 0 para o solo não-cimentado até 0,26 MPa (em torno de 255,15 kPa), verificando o enorme aumento de  $c'$ .

Na Tabela 8 são apresenta mais alguns valores encontrados em referências bibliográficas dos ângulos de atrito de pico e intercepto coesivo em rejeitos de minério.

Tabela 8 - Valores de ângulos de atrito de pico e intercepto coesivo em rejeitos de minério de ferro.

Referência	$\gamma_a$ (kN/m <sup>3</sup> )	Adições	Tensões confinantes (kPa)	Método	Intercepto coesivo (kPa)	Ângulo de atrito de pico (°)
Presotti (2002)	19,0	0%	100, 200, 400	CD	3,55	41,64
Guerra (2019)	-	0%	100, 200, 400	CIU	0	38,0
Oliveira (2021)	19,4	0%	100, 200, 400, 800, 1600, 1900	CID/CIU	0	35,0
Chaves et. al. (2023)	19,6	0%	50, 100, 200	CD	0	43,0
		2,5% cimento			208	43,0
Farenzena et. al. (2024) <sup>1</sup>	19,0	0%	50, 100, 150	CIU	0	35,4
		1% AAC			4	35,4
		3% AAC			25	36,5
		5% AAC			44	36,9
Consoli et. al. (2023a)	19,3	0%	200, 400, 800, 1600	CD	0	35,0
Rissoli et. al. (2024)	20,1	0%	100, 300, 600	CIU	0	42,8
Consoli et. al. (2023b)	19,0	3% CPoz	50, 100, 200	CD	160	33,0
		3% CARI			32	44,0
		3% AAC			16	44,0
Wagner et al. (2024)	-	0%	50, 1000	CD	0	31,6 a 34,3
Tebechrani Neto (2024) <sup>1</sup>	18	0%	30, 60, 90, 300	CIU	17,3 a 24,3	31,2 a 35,1
		1% cimento			0	31,2 a 35,1

<sup>1</sup>Simple Shear

#### 2.4.5. Propriedades químicas e mineralógicas

Segundo Luz e Lins (2010) os minérios de ferro, predominantemente explorados no Brasil, são a hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), uns dos principais minerais de ferro, e o itabirito, formações ferríferas compostas de hematita e quartzo (sílica).

Gomes et al. (2011), que promoveu a caracterização dos finos de uma barragem de rejeito da mineração de ferro, foram encontrados teores médios de 48,08% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20,58% de SiO<sub>2</sub> e 3,16% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nestes rejeitos, sendo praticamente todo ferro proveniente da hematita.

Normalmente, os minerais associados aos rejeitos da mineração de ferro são caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo (WOLFF, 2009).

As fórmulas químicas e a composição destes minerais podem ser observadas, conforme Machado et al. (2003), na Tabela 9.

*Tabela 9 - Composição química dos minerais normalmente encontrados em rejeitos da mineração de ferro, identificados por difração de raios-X. (ADAPTADO de MACHADO et al., 2003).*

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Composição</b>
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Silicato de alumínio hidratado: 39,5% de $\text{Al}_2\text{O}_3$ 46,5% de $\text{SiO}_2$ 14,0% $\text{H}_2\text{O}$ .
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Hidróxido de alumínio: 65,4% de $\text{Al}_2\text{O}_3$ 34,6% de $\text{H}_2\text{O}$
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	Óxido de ferro hidratado: 90,0% de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 10,0% de $\text{H}_2\text{O}$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro: 70,0% de Fe 30,0% de O
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Óxido de ferro: 31,0% de FeO 69,0% de $\text{Fe}_2\text{O}_3$
Quartzo (Sílica)	$\text{SiO}_2$	Óxido de silício: 46,74 % de Si 53,26 % de O

Andrade (2014) em sua tese, analisou quatro amostras de barragens diferentes do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais e compostas, praticamente, por rejeitos advindos do beneficiamento do itabirito e hematita. Os resultados semiquantitativos dos compostos químicos obtidos por micro fluorescência de raios-X presentes nos rejeitos são demonstrados na Tabela 10.

*Tabela 10 - Resultados semiquantitativos da fluorescência de raios-X (% em peso). (ADAPTADO de ANDRADE, 2014).*

	<b>Teor de <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> (%)</b>	<b>Teor de <math>\text{SiO}_2</math> (%)</b>	<b>Teor de <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> (%)</b>	<b>Outros Óxidos (%)</b>
F1	49,4869	44,4764	5,4921	3,4458
F2	33,9238	59,9638	5,6312	0,4812
F3	36,2726	58,1332	5,0096	0,5846
F4	59,0450	36,1018	3,4458	1,4074

Pode-se verificar que a constituição básica dos rejeitos analisados é de óxidos de ferro, sílica e alumina.

Quanto à mineralogia, obteve através dos difratogramas dos rejeitos a identificação das fases minerais de cada uma das barragens e por meio da análise realizada no software Fullprof (2008), utilizando-se o método de Rietveld, foi obtida a quantificação das fases minerais para os rejeitos analisados de cada barragem sendo apresentado na Tabela 3.8 (Andrade, 2014).

*Tabela 11 - Composição mineral dos rejeitos analisados (% em peso). (ADAPTADO de ANDRADE, 2014).*

	<b>Caulinita (%)</b>	<b>Goethita (%)</b>	<b>Hematita (%)</b>	<b>Quartzo (%)</b>
F1	6,10	19,50	29,60	44,80
F2	2,80	13,50	35,50	48,20
F3	4,80	21,40	46,40	27,40
F4	5,50	18,80	40,25	35,45



Os resultados obtidos na difração de raios-X para a mineralogia apontam o mesmo perfil de óxidos encontrados na microfluorescência de raios-X, variando somente pela presença de moléculas de água na estrutura dos minerais.

Ambientes com drenagem deficiente, como pode ser o caso de uma barragem de rejeito, atua na hidratação da hematita, transformando-a em goethita, tal como observado por diferentes autores. (ANDRADE, 2014).

Desta forma, somando-se os percentuais de hematita e goethita se encontram valores bastante próximos aos de óxido de ferro encontrados na microfluorescência de raios-X (ANDRADE, 2014).

Wolf (2009) trabalhou com nove amostras de rejeitos de minérios de ferro de 7 unidades de beneficiamento de minério de ferro em seu estudo e os principais minerais encontrados são apresentados na Tabela 12.

*Tabela 12 - Minerais identificados através da difração de raios-X (ADAPTADO WOLF, 2009).*

<b>Amostra</b>	<b>Fases mineralógicas</b>
Brucutu	Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Goethita (FeO(OH)), Caulinita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> , Quartzo (SiO <sub>2</sub> ), Moscovita (KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> ), Gibbsita (Al(OH) <sub>3</sub> )
RH-CF	Hematita, Goethita, Magnetita (Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ), Caulinita, Quartzo, Talco (Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )
RIL-CF	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Gibbsita, Moscovita
Conceição	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Moscovita
Cauê	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Gibbsita, Moscovita
Fabrica Nova	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita, Moscovita
AL-RH	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita, Moscovita
AL-RI	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita, Moscovita
Carajás	Hematita, Goethita, Gibbsita

Na análise química realizada o percentual de Ferro foi o de maior impacto, variando de 44 a 64%, seguido do fósforo de 0,1 a 0,3%, alumínio de 1,0 a 3,0% e o manganês, com teores que vão desde 0,2% a 4,6% (WOLF, 2009).

Gomes et al. (2011) caracterizaram amostras obtidas em furos de sondagem de uma barragem de rejeitos de minério de ferro e identificaram por difração de raio X os seguintes minerais: hematita, martita, magnetita, goethita, quartzo, gibbsita e caulinita.

Na análise química realizada obtiveram um resultado médio de Fe, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, de 48,08%, 20,58 e 3,16% respectivamente.

Quanto a análise química dos rejeitos de minério de ferro brasileiros se observa que os principais compostos encontrados são Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>. (BEZERRA, 2017; PEDROSO, 2020; SILVA, 2022)

Quanto a mineralogia, os minerais de maior incidência são a hematita, o quartzo, goethita, caulinita e gibbsita. (BEZERRA, 2017; PEDROSO, 2020; SILVA, 2022).

#### 2.4.6. Estabilização de rejeitos de mineração

A grande maioria de pesquisas encontradas são relacionadas a estabilização de rejeitos de minério com cimento Portland, apresentando suas propriedades, características tecnológicas e comportamentos para uso na engenharia (Bastos et. al., 2016; Almada, 2021; Barati et. al., 2020; Bezerra, 2017; Consoli et. al., 2022; Mafessoli, 2022; Oliveira, 2013; Chaves et. al., 2023; Bruschi, 2023; Guedes et. al., 2024; Consoli et al., 2024; ...) e com uso de estabilização por álcali-ativação (Servi et. al., 2022; Saldanha et. al., 2023; Santos, 2021; Jaskulski, 2022; Oliveira, 2022; Farenzena et al., 2024;...).

Estudos de estabilização através de aglomerantes pozolânicos, são mais escassos onde pode-se citar os trabalhos de Jiang et. al., (2024) e Manjunatha e Sunil, (2013), o primeiro com uso de cal e cinza volante e o outro com o uso de cal, escoria de alto forno, escoria de metal duro, e cinza volante.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado o planejamento da pesquisa com a descrição e definição dos materiais utilizados, suas características, metodologias usadas para estabelecer os parâmetros de teores a serem empregados, métodos de ensaios e a sua análise estatística através de 6 (seis) etapas definidas conforme é demonstrado na Tabela 13.

*Tabela 13 - Etapas do programa experimental*

ETAPA	MATERIAIS	PROCEDIMENTOS
Etapa 1	Rejeito de minério de ferro Caulim Cal hidratada	Análise granulométrica Peso específico Limites de Atterberg Compactação Análise térmica Análise química Análise mineralógica
Etapa 2	Metacaulim	Sinterização Análise Granulométrica Área específica Análise química Análise mineralógica
Etapa 3	Rejeito de minério de ferro Metacaulim Cal hidratada	Compactação Análise do Ph
Etapa 4	rejeito + aglomerante pozolânico + água	Projeto de experimentos RCS $G_0$
Etapa 5	rejeito + aglomerante pozolânico + água	Ensaio Triaxial Drenado (CID)
Etapa 6	rejeito + aglomerante pozolânico + água	-

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais que irão compor as misturas de estudo desta pesquisa são:

- Rejeito de minério de ferro:

Granular (GR);

Ultrafino (UF);

- Material cimentante: Metacaulim e cal hidratada
- Água destilada.

As características de cada material serão descritas nas próximas seções.

### 3.1.1 Rejeito de minério de ferro

O rejeito de minério de ferro foi cedido por empresa localizada no Quadrilátero Ferrífero mineiro e coletado na mina de Brucutu, localizada na cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo, região localizada no centro-sul do estado de Minas Gerais, Brasil.

Como descrito no capítulo 3, o processamento do minério de ferro possui diversas etapas para a recuperação do ferro do material. Durante o beneficiamento, surgem duas frações do rejeito de minério de ferro, um recuperado antes do processo de flotação (rejeito ultrafino) e outro obtido após o processo de flotação (rejeito granular ou flotação). São esses os materiais que serão trabalhados neste estudo.

Ao longo dos anos, esses rejeitos normalmente eram depositados em barragens (especialmente o rejeito mais fino), porém neste trabalho, o objetivo é estudar suas características e comportamento geotécnico visando sua disposição em pilhas através de uma estabilização química melhorando suas características geotécnicas com resistência mecânica, rigidez e durabilidade.

Os rejeitos recebidos e preparados para este trabalho vieram em duas frações distintas, sendo uma denominada de flotação ou granular (GR) e a outra de ultrafino (UF).

O teor definido foi da proporção de 80% de material granular e 20% de material ultrafino, devido ao alto teor de umidade que sai do processamento do minério o material ultrafino (superior a 40% determinado nas amostras recebidas no LEGG) e, portanto, quanto maior o teor de ultrafino na mistura mais distante ficará o material da umidade ótima encontrada em ensaios para sua disposição e compactação nos empilhamentos de rejeitos nas mineradoras. Além disso, serão adicionados, neste material, o metacaulim e a cal hidratada (podendo variar de 1 a 5% de cada) que também são materiais finos que incorporarão a mistura com o intuito de colaborar na redução da umidade/plasticidade do material, além de fornecer características mecânicas para garantir o desempenho de estabilidade e durabilidade nos empilhamentos a serem realizados nas áreas das mineradoras.

Analisando nesse contexto, o material de ultrafino, com a adição do metacaulim e a cal hidratada, terá um teor de finos maior que os 20% proporcionado somente pelo rejeito de ultrafino.

As curvas granulométricas dos rejeitos foram determinadas conforme NBR 7181 (2018). Nela apresentam-se as curvas dos rejeitos, bem como a combinação entre 80% de rejeito granular e 20% de rejeito ultrafino, material que será investigado nesse trabalho. A Figura 19 apresenta as respectivas curvas obtidas e a Tabela 14 as porcentagens de areias, siltes e argilas presentes.

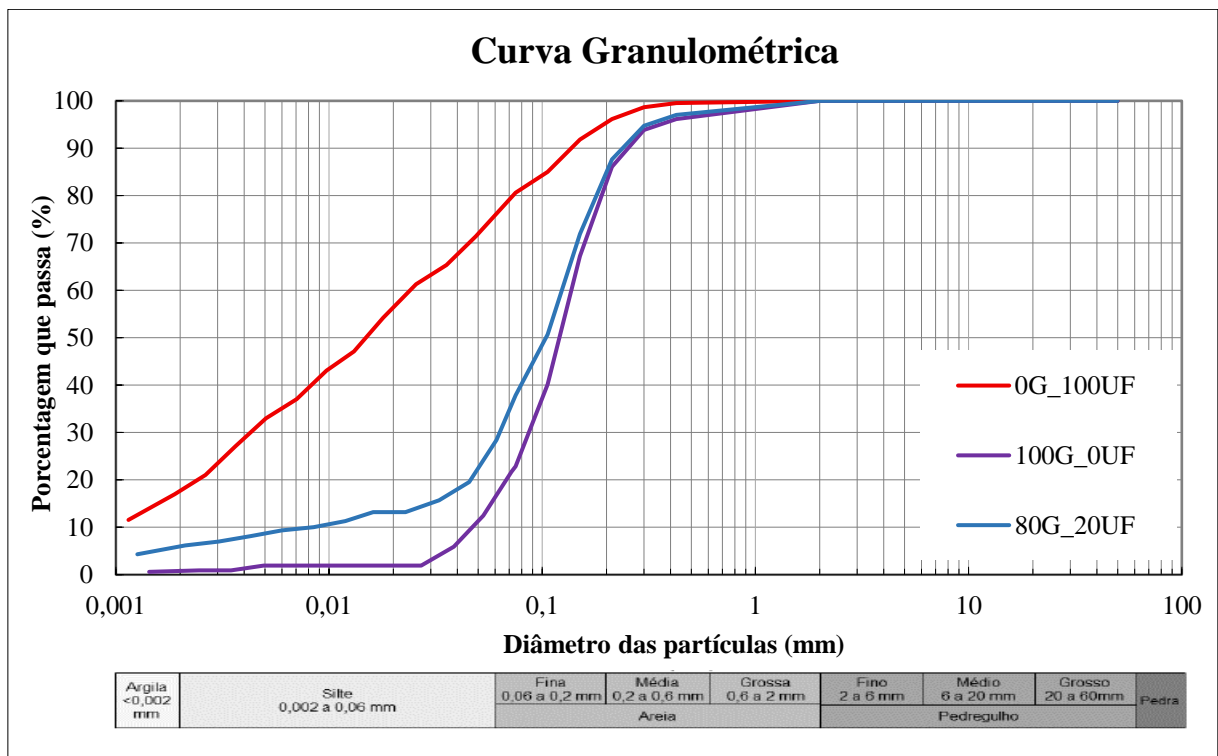


Figura 19 - Curvas granulométricas obtidas através da NBR 7181 (2018).

Tabela 14 - Frações granulométricas (%).

Classificação	Limites (µm)	Granular (GR)	Ultrafino (UF)	80%GR/ 20%UF
Areia Grossa	$600 \leq D \leq 2000$	3,40	0,42	2,64
Areia Média	$200 \leq D \leq 600$	14,14	4,24	12,75
Areia Fina	$60 \leq D \leq 200$	66,50	19,97	56,88
Silte	$2 \leq D \leq 60$	15,16	57,74	21,67
Argila	$D < 2$	0,79	17,63	6,05
Total		100,00	100,00	100,00

Pode-se observar que no material granular há um maior teor de areia fina e no rejeito ultrafino um maior teor de siltes.

Os resultados obtidos corroboram com os resultados apresentados por Araújo (2006), onde comenta que, geralmente, os rejeitos de caráter granular são constituídos por areias finas a médias não plásticas, já as lamas são constituídas por siltes e argilas com alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade e com Gomes et al. (2011), que obteve uma distribuição granulométrica média de ultrafinos, onde 58,81% das partículas estão retidas abaixo da peneira 45  $\mu\text{m}$ .

Campanha (2011) também descreve em seu estudo que cerca de 60 a 70% dos rejeitos produzidos no Quadrilátero ferrífero de Minas Gerais, apresentam granulometria de areia fina e média siltosas que são, geralmente, depositados com cerca de 30 a 40% de rejeitos finos com granulometria de siltes e argilas.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados do peso específico dos grãos obtidos para os rejeitos granular e ultrafino e para a mistura estudada.

*Tabela 15 - Peso específico dos grãos conforme NBR 6458 (2017).*

	<b>Granular (GR)</b>	<b>Ultrafino (UF)</b>	<b>80%GR/ 20%UF</b>
Peso específico dos grãos ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) - $\gamma_s$	2,717	3,402	2,917

Percebe-se que o peso específico real do rejeito ultrafino é maior que o do rejeito granular e isto é devido ao processamento do minério de ferro, pois é difícil extrair o ferro de materiais muito finos na fase de concentração e, como consequência, uma parcela razoável de ferro não é retirada e segue no rejeito do ultrafino.

Os limites de Atterberg foram determinados conforme as normas NBR 6459 (2017) e NBR 7180 (2016), resultando no limite de plasticidade (LP) e no limite de liquidez (LL) como não plástico (NP) para o rejeito granular e LP igual a 24,30% e LL igual a 30,86% resultando num índice de plasticidade de 6,56 para o rejeito ultrafino. Resultados semelhantes foram observados por Oliveira (2013), Lara et. al (2018), Silva (2022), Guedes (2024), Tebechrani Neto (2024). A mistura estudada (80%GR/20%UF;), apresenta comportamento similar ao rejeito granular, com baixa plasticidade.

Para determinar a umidade ( $\omega$ ) e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), foi realizado o ensaio de compactação Proctor segundo os preceitos da NBR 7182 (2020). Os ensaios foram realizados com energia de compactação normal no primeiro momento para análise dos resultados individuais do rejeito granular, ultrafino e da mistura de 80%GR/20%UF e são apresentadas as curvas obtidas na Figura 20.

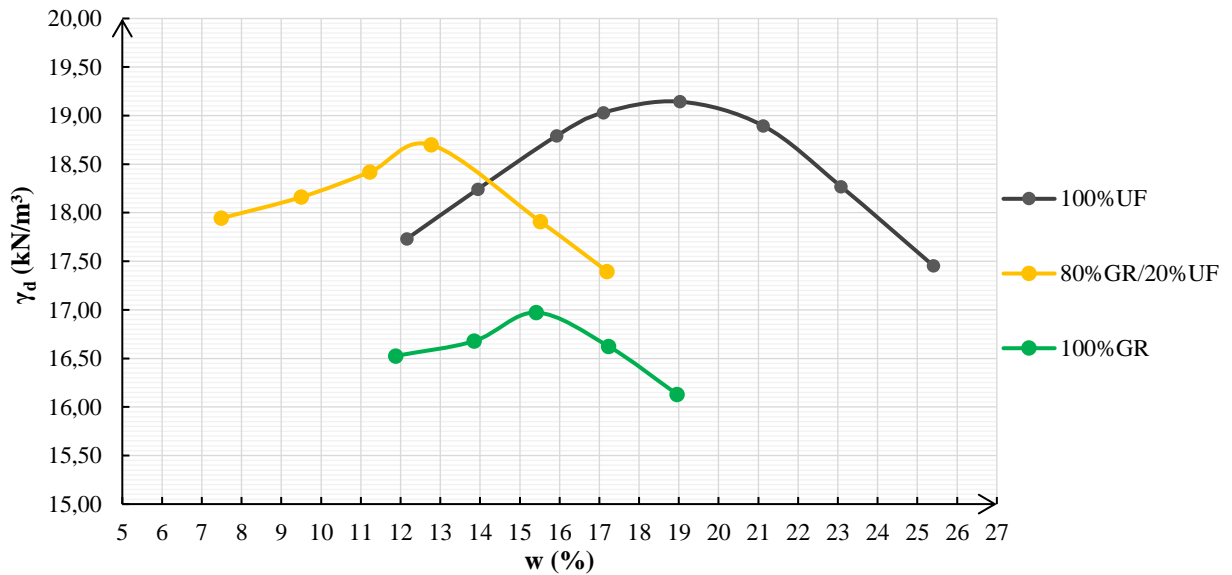


Figura 20 - Resultados da Compactação Proctor normal.

A Tabela 16 apresenta o resumo dos resultados de umidade e peso específico aparente seco obtidos.

Tabela 16 - Resultados da umidade ótima ( $\omega_{ot.}$ ) e peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) das amostras.

Amostra	$\omega_{ot.}$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m³)
100% GR	15,41	16,97
100% UF	19,03	19,14
80% GR/20% UF	12,77	18,70

Os resultados demonstram que a adição de 20% de rejeito ultrafino (mistura 80%GR/20%UF) permite atingir pesos específicos maiores do que o rejeito granular, devido a presença de partículas de minério de ferro presentes no ultrafino, além de apresentar uma menor umidade ótima (13%) em relação aos rejeitos puros (15% e 19%).

Para uma melhor compreensão para análise de desempenho foi realizado a umidade natural das amostras de rejeitos (granular e ultrafino) quando chegaram ao laboratório da UFRGS, para

determinar qual o teor eles possuem quando da separação no processamento do minério de ferro. No rejeito granular foi encontrada uma umidade média de 4,30% (determinado a partir da amostra encaminhada pela empresa mineradora) e o ultrafino com umidade média de 42,40% (também determinado a partir da amostra encaminhada pela mineradora). No caso do ultrafino, houve uma variabilidade muito grande nas amostras coletadas em diferentes sacos acondicionados, sendo encontrado teores variando de 35% a 60%.

Nesse sentido, a mistura 80%GR e 20%UF foi selecionada para estudo com o objetivo de incorporar o rejeito ultrafino (mais difícil de filtrar) na disposição em pilhas, sem que isso afete de maneira significativa as operações de compactação. Além disso, essa mistura já tem sido utilizada em pilhas experimentais, o que demonstra sua viabilidade prática.

Na continuidade da caracterização dos rejeitos foi realizado a determinação da composição química deles através da fluorescência de raio X (FRX) para as determinações dos teores de Fe, SiO<sub>2</sub>, P, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn, TiO<sub>2</sub>, CaO e MgO e a determinação de perda por calcinação foi realizada por análise termogravimétrica (PPC). A Tabela 17 apresenta a composição química do rejeito granular e ultrafino fornecida pela mineradora.

*Tabela 17 - Análise química por FRX e Perda ao fogo.*

Amostra	Análise Química (%)								
	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PPC
UF	43,27	22,21	0,184	6,57	2,056	0,149	0,024	0,170	5,82
GR	4,52	91,84	0,011	0,59	0,056	0,007	0,020	0,073	0,28

Observa-se na tabela o alto teor de ferro presente no rejeito ultrafino, confirmando o que já foi comentado anteriormente em relação à dificuldade de extração do ferro em materiais muito finos durante o processamento. Já no rejeito granular, há um maior teor de sílica e baixo teor de ferro, evidenciando o favorecimento da extração do ferro nestas granulometrias mais grosseiras.

A perda de massa por calcinação está relacionada a água adsorvida ou estrutural existente na amostra além de matéria orgânica que possa estar presente.

Os valores encontrados vão de encontro com os observados em Gomes et. al (2011), Guimarães (2011), Andrade (2014), Pedroso (2020), Silva (2022), Tebechrani Neto (2024).



A análise por difração de raios X (DRX) foi realizada em um difratômetro de raios X marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), operando a 40 kV e 30 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário.

A amostra em pó foi analisada no intervalo angular de 3 a  $75^\circ$ ,  $2\theta$  em passo de  $0.05^\circ/1s$  utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de  $1^\circ$  e 0.6 mm no detector.

Foi realizado a análise na proporção de 100% de ultrafino, 100% do flotação ou granular e na mistura de rejeitos na proporção de 80% de granular e 20% de ultrafino, visto que foi a proporção definida a ser estudada nesta tese. As Figuras 21, 22 e 23 ilustram os resultados obtidos das análises mineralógicas.

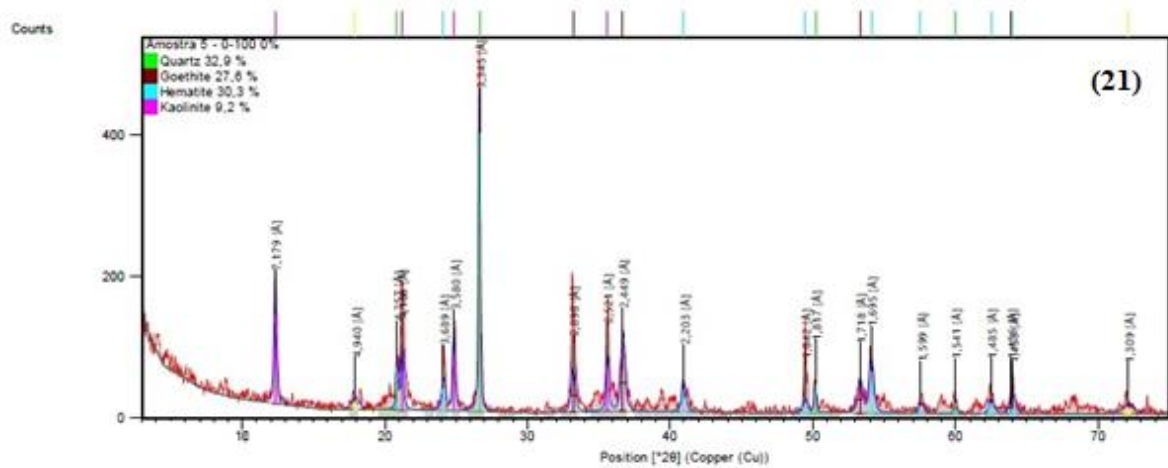


Figura 21 - Difratometria de raios-X do rejeito de minério de ferro (100% UF).

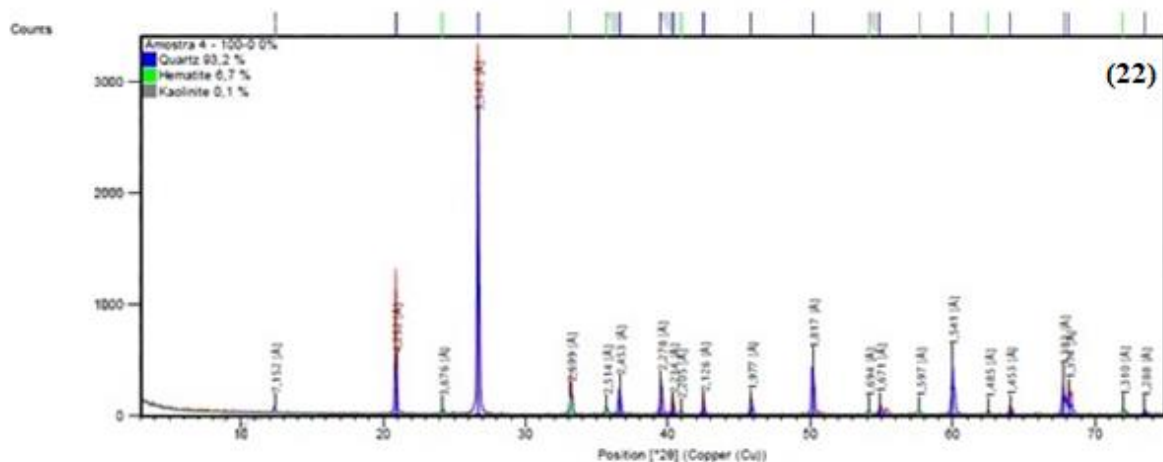


Figura 22 - Difratometria de raios-X do rejeito de minério de ferro (100% GR).

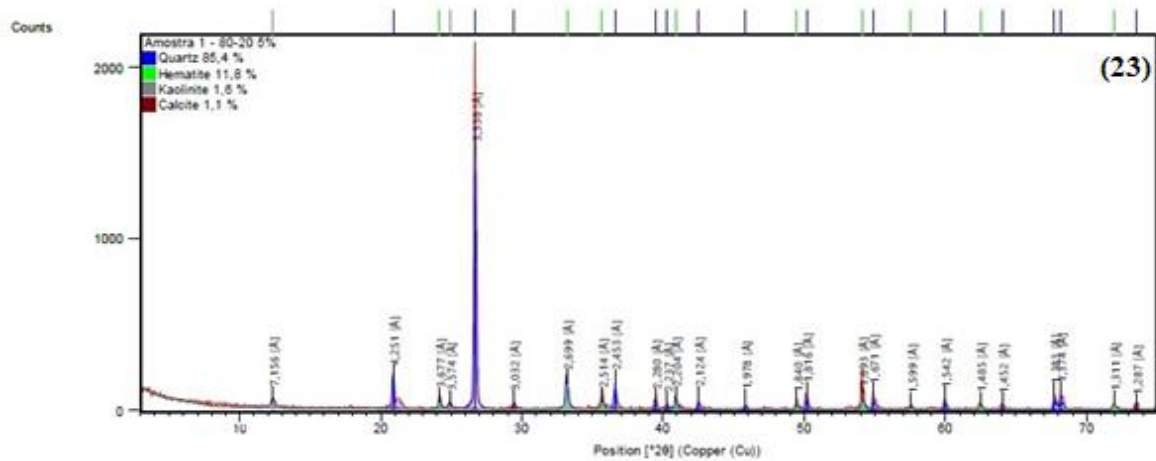


Figura 23 - Difratomia de raios-X do rejeito de minério de ferro (80%GR/20%UF).

Foram identificados picos de quartzo, hematita, caulinita, goethita e calcita o que corroboram com os estudos que foram citados no item 3.3.4 deste trabalho. A composição mineralógica apresenta uma coerência e compatibilidade com a composição química obtida conforme Tabela 17.

### 3.1.2 Cal Hidratada

A cal hidratada utilizada na pesquisa corresponde a uma cal calcítica comercial produzida e adquirida de uma indústria da região de Arcos do Estado de Minas Gerais. Corresponde a um hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) produzido a partir de um calcário calcítico com as seguintes características de garantia de qualidade química e física fornecida pelo fabricante e demonstrado na Tabela 18.

Tabela 18 - Ficha técnica fornecida pelo fabricante (2021).

Parâmetro	Unidade	Resultados	
		Mínimo	Máximo
CaO Total	%	65	
CaO Disponível	%	57	
MgO	%		2
SiO <sub>2</sub> + RI	%		2
Carbonato de cálcio	%		10
Granulometria	% Retido em 3mm		1,5
	% Retido em 1mm		8,5
Densidade	g/cm <sup>3</sup>		2,08

A distribuição granulométrica da cal hidratada foi realizada através do analisador de tamanho de partículas marca Cilas, modelo 1064, no modo líquido e na faixa de 0,04 a 500  $\mu\text{m}$ . A Figura 24 apresenta a curva granulométrica e a Tabela 19 os diâmetros médios respectivo da amostra.

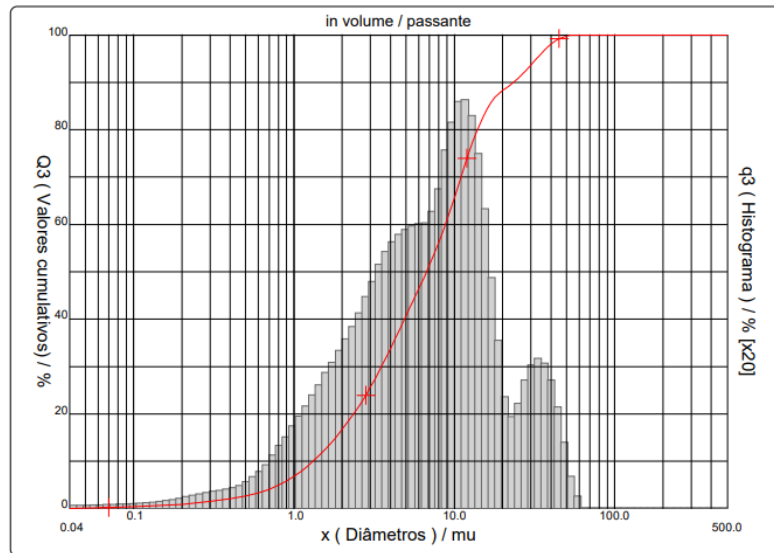


Figura 24 - Curva granulométrica da cal calcítica hidratada.

Tabela 19 - Resultados acumulados e diâmetro médio – Cal hidratada.

Resultados	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )
D <sub>10</sub>	1,32
D <sub>50</sub>	6,70
D <sub>90</sub>	23,46
Diâmetro médio	9,63

A área específica da cal hidratada foi determinada com o aparelho Marca Quantachrome, modelo Nova 1000e, operando com nitrogênio líquido e nitrogênio gasoso 5.0, onde se obteve o resultado de 11,115  $\text{m}^2/\text{g}$ .

A determinação da composição química foi realizada através da fluorescência de raio X (FRX) e o resultado é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Análise química por FRX da cal hidratada.

Óxidos	% em massa
CaO	71,088
MgO	0,819
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,498
SiO <sub>2</sub>	0,423
SO <sub>3</sub>	0,032
Cl	0,035
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,060
SrO	0,217
PPC	26,80

Segundo a NBR 7175 (2003) a quantidade de óxidos totais em uma cal hidratada deve ser maior ou igual a 90% para ser classificada como cal hidratada classe 1 que é, perante a norma, a cal de melhor qualidade. Para determinar se a cal usada neste trabalho atende esta exigência química se deve calcular o teor de óxidos totais através da Equação 12.

$$\% \text{ óxidos totais} = \frac{(\%CaO + \%MgO) \times 100}{100 - \%PPC} \quad (\text{Equação 12})$$

Calculando a partir dos resultados obtidos na composição química obtém-se o valor de 98,23%, portanto a cal utilizada tem um padrão de excelente qualidade em teor de óxidos. Também se pode comprovar que a cal é originária de calcário calcítico devido ao alto teor de CaO e baixíssimo teor de MgO.

A determinação da composição mineralógica foi realizada com o Difratorômetro de Raios-X (DRX) EMPYREAN da PanAlytical e o resultado obtido é apresentado na Figura 25.

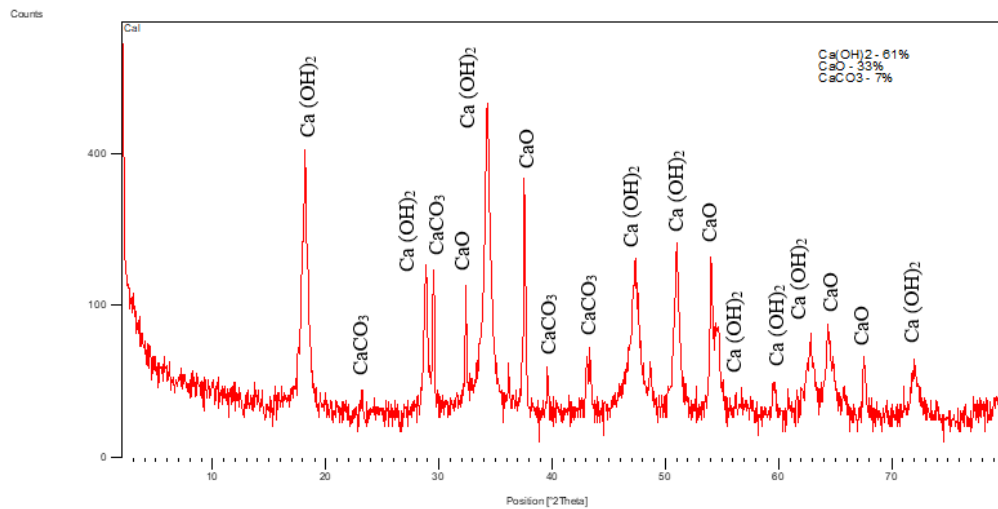


Figura 25 - Análise mineralógica (DRX) da cal calcítica hidratada.

Pode-se verificar o alto teor de óxidos de cálcio na amostra sem incidência visível de óxidos de magnésio, o que comprova a pureza e reatividade da cal hidratada calcítica. A composição mineralógica apresenta uma coerência e compatibilidade com a composição química obtida conforme Tabela 20.

### 3.1.3 Caulim

O caulim utilizado nessa pesquisa foi adquirido de empresa comercial da região de Belo Horizonte em Minas Gerais com as seguintes características informadas pelo fabricante conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Característica técnica do lote fornecida pelo fabricante (2021).

Propriedade	Especificado	Encontrado	Método
Aspecto do produto	Pó branco	Pó branco	Visual
Retenção # 500µm	Máx. 1,5%	0,60%	ASTM-C-110-94a
Densidade aparente	0,30 a 0,50 g/cm <sup>3</sup>	0,30 g/cm <sup>3</sup>	BS-1460-1967
Volume aparente	1,5 a 2,0 g/cm <sup>3</sup>	2,0 g/cm <sup>3</sup>	BS-1460-1967
Umidade	Máx. 2,0%	0,61%	ASTM-C-25-94a
Perda ao Fogo	Máx. 20%	13,59%	ASTM-D-1208-84

A distribuição granulométrica do caulim foi realizada através do analisador de tamanho de partículas marca Cilas, modelo 1064, no modo líquido e na faixa de 0,04 a 500 µm. A Figura 26 apresenta a curva granulométrica e a Tabela 22 os diâmetros médios respectivo da amostra.

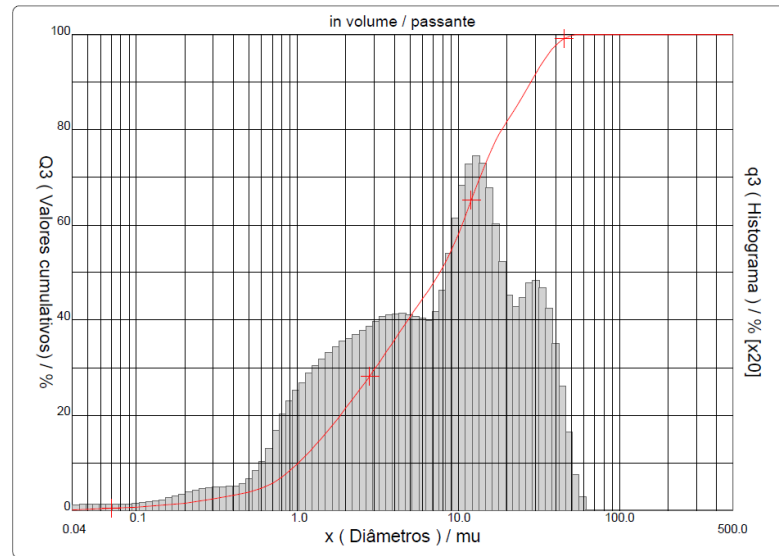


Figura 26 - Curva granulométrica do caulim.

Tabela 22 - Resultados acumulados e diâmetro médio - Caulim.

Resultados	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )
D <sub>10</sub>	1,01
D <sub>50</sub>	7,65
D <sub>90</sub>	28,14
Diâmetro médio	11,03

A área específica do caulim foi determinada com o aparelho Marca Quantachrome, modelo Nova 1000e, operando com nitrogênio líquido e nitrogênio gasoso 5.0, onde se obteve o resultado de 20,503 m<sup>2</sup>/g.

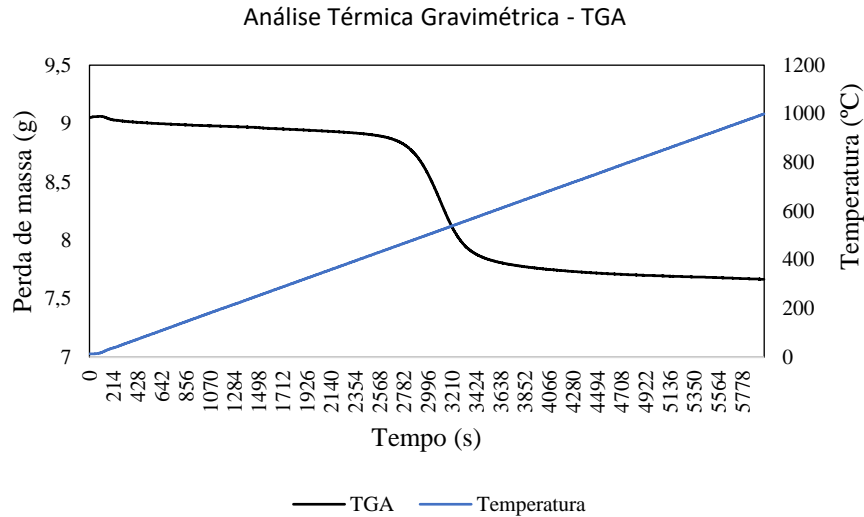
A determinação da composição química foi realizada através da fluorescência de raio X (FRX) e o resultado é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Análise química por FRX do Caulim.

Óxidos	% em massa
SiO <sub>2</sub>	57,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39,40
TiO <sub>2</sub>	0,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,96
K <sub>2</sub> O	0,24
Cl	0,035
MgO	0,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03

A perda de massa por calcinação foi determinada através do ensaio de análise térmica gravimétrica no Laboratório de Cerâmica da UFRGS com o equipamento de Marca Shimadzu,

modelo TGA-50 com uma taxa de aquecimento padrão de 10°C/min. conforme mostra a Figura 27.



*Figura 27 - Análise térmica gravimétrica do caulim.*

A perda total de massa da amostra foi de 15,29%, sendo maior que a informada pelo fabricante referente ao lote, porém menor do que é especificado e admitido que é de no máximo 20%.

As principais mudanças reveladas pelo TGA foram que as temperaturas abaixo de cerca de 200°C ocorre a liberação de água absorvida nos poros e nas superfícies, entre 200 e 450°C, a perda de massa é atribuída a combustão de matéria orgânica e ao processo de pré-desidratação, como resultado da reorganização na camada octaédrica na hidroxila (OH) da superfície da caulinita. Na faixa de temperatura de 450-650 °C, ocorre a desidroxilação da caulinita e início da formação de metacaulinita que pode ser formada até uma temperatura de 850°C que é a temperatura máxima recomendada para a produção do metacaulim.

A determinação da composição mineralógica foi realizada com o Difratorômetro de Raios-X (DRX) EMPYREAN da PanAlytical e o resultado obtido é apresentado na Figura 28.

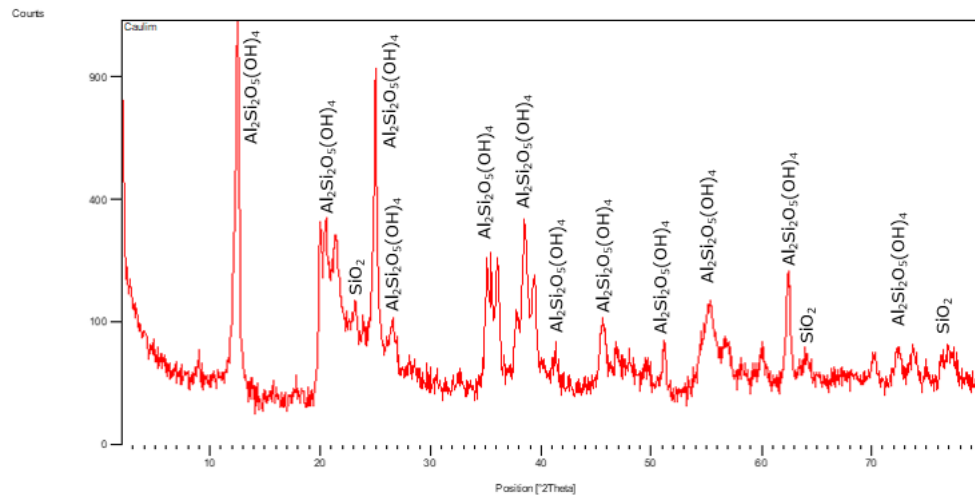


Figura 28 - Análise mineralógica (DRX) do caulim.

Pode-se verificar que o argilomineral caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) se sobressai em relação aos demais minerais (Quartzo). A composição mineralógica apresenta uma coerência e compatibilidade com a composição química obtida conforme Tabela 23.

### 3.1.4 Metacaulim

O metacaulim usado na pesquisa foi produzido em laboratório através da queima do caulim a uma temperatura de 800°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. e patamar de 120 minutos em mufla no Laboratório de Engenharia Geotécnica da UFRGS.

A distribuição granulométrica do caulim foi realizada através do analisador de tamanho de partículas marca Cilas, modelo 1064, no modo líquido e na faixa de 0,04 a 500 μm. A Figura 29 apresenta a curva granulométrica e a Tabela 24 os diâmetros médios respectivo da amostra.



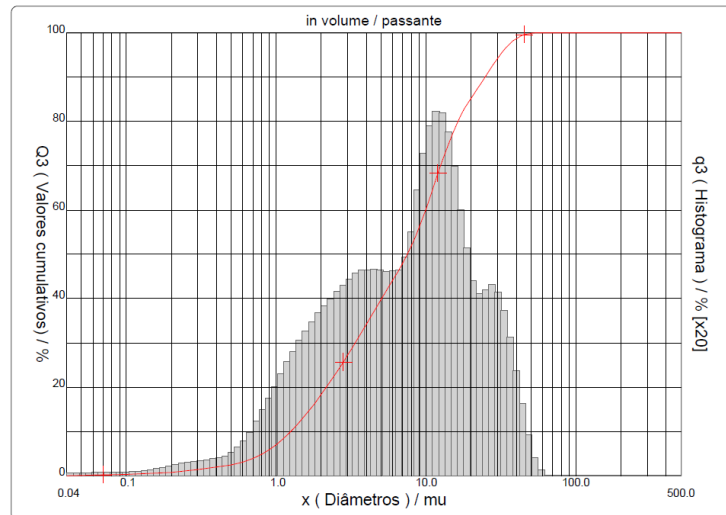


Figura 29 - Curva granulométrica do Metacaulim.

Tabela 24 - Resultados acumulados e diâmetro médio - Metacaulim.

Resultados	Diâmetro (µm)
D <sub>10</sub>	1,25
D <sub>50</sub>	7,50
D <sub>90</sub>	24,79
Diâmetro médio	10,24

A área específica da cal hidratada foi determinada com o aparelho Marca Quantachrome, modelo Nova 1000e, operando com nitrogênio líquido e nitrogênio gasoso 5.0, onde se obteve o resultado de 17,423 m<sup>2</sup>/g e a densidade obtida do metacaulim foi de 2,56 g/cm<sup>3</sup>.

A determinação da composição química foi realizada através da fluorescência de raio X (FRX) e o resultado é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Análise química por FRX do Metacaulim.

Óxidos	% em massa
SiO <sub>2</sub>	51,054
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45,237
CaO	0,088
TiO <sub>2</sub>	0,508
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,365
Cl	0,195
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,829
K <sub>2</sub> O	0,412
Na <sub>2</sub> O	N.D.
MgO	N.D.
SO <sub>3</sub>	N.D.
PPC	1,21

Segundo Gallo (2005) o metacaulim pode ser classificado de acordo com seu nível de reatividade, podendo ser de baixa, média ou alta reatividade conforme demonstrado na Tabela 26, proposta em sua dissertação de mestrado.

*Tabela 26 - Classificação de Metacaulim de baixa, média e alta reatividade (adaptado de GALLO, 2005).*

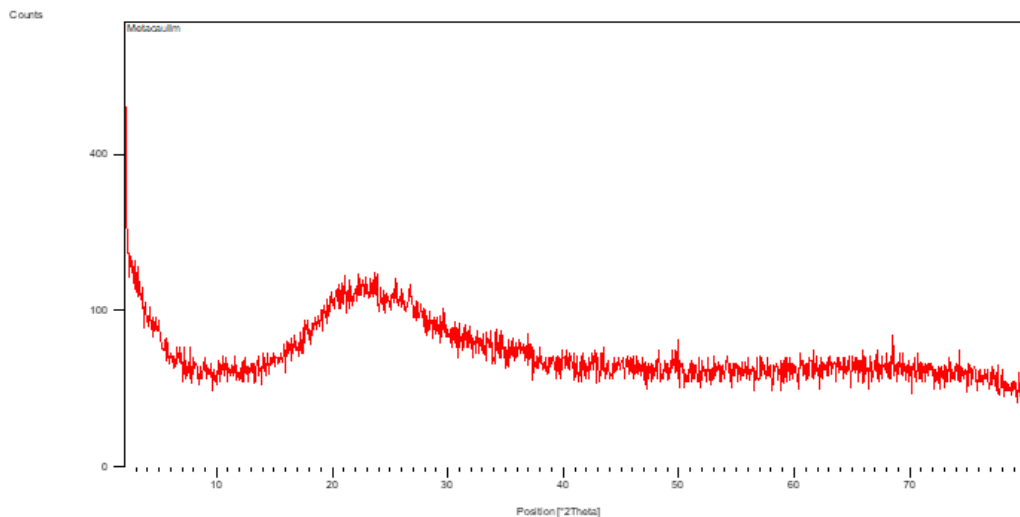
Item	Parâmetros	Unidade	Nível de Reatividade		
			Baixa	Média	Alta
1	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	> 70	> 80	> 90
2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	-	-	< 5
3	Na <sub>2</sub> O solúvel	%	< 0,1	< 0,1	< 0,1
4	K <sub>2</sub> O solúvel	%	< 0,5	< 0,5	< 0,1
5	TiO <sub>2</sub>	%	< 1,5	< 1,5	< 1,5
6	MgO	%	< 1,0	< 1,0	< 1,0
7	CaO	%	< 1,0	< 1,0	< 1,0
8	Outros compostos	%	< 0,5	< 0,5	< 0,1
9	Perda ao Fogo	%	< 10,0	< 7,0	< 4,0
10	Relação Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>	-			0,70 a 0,90
11	Atividade pozolânica com cal	MPa	> 6,0	> 10,0	> 14,0
12	Atividade pozolânica com cimento Portland	%	> 75	> 85	> 90

Gallo (2005) comenta ainda que, em termos de composição química teórica, o Metacaulim de Alta Reatividade possuiria apenas sílica e alumina, em percentual de 54,1% e 45,9% respectivamente.

Considerando a classificação acima o metacaulim produzido nesta pesquisa se enquadra na classificação de alta reatividade pois atende os itens em sua maioria (1 ao 3 e 5 ao 10), ficando não conforme somente no teor de K<sub>2</sub>O (item 4) que obteve um teor de 0,412 sendo maior que 0,1 sugerido por Gallo (2005).

Analisando os resultados obtidos nos ensaios realizados com os requisitos exigidos pela NBR 15894-1 (2010) (Tabela 3) o metacaulim produzido atende todas as exigências prescritas. Não foram realizados os ensaios de desempenho com cimento e a determinação da umidade neste trabalho.

A determinação da composição mineralógica foi realizada com o Difratorômetro de Raios-X (DRX) EMPYREAN da Panalytical e o resultado obtido é apresentado na Figura 30.



*Figura 30 - Análise mineralógica (DRX) do Metacaulim.*

No difratograma do metacaulim observa-se que este material é altamente amorfo, contendo ainda assim elementos cristalinos (quartzo e muscovita).

### 3.1.5 Água

A água utilizada nos ensaios de caracterização e moldagens dos corpos de prova foi a água destilada.

Água destilada é o estado puro da água, sem misturas com outras substâncias e microrganismos. A sua obtenção é feita através do processo da destilação e por estar na sua forma pura, ela é composta pela fórmula química  $H_2O$  (dois átomos de hidrogênio ligados a um átomo de oxigênio).

A água destilada é obtida através de um processo de purificação chamado destilação. Existem diversos métodos, mas basicamente, para haver o destilamento da água, esta precisa ser aquecida até que se inicie a vaporização ou ebulição da mesma. Depois, o vapor de água liberado precisa ser condensado, para que a água possa voltar a ser recolhida em forma líquida.

Após a sua vaporização e condensação, a água resultante está no estado destilado e livre de qualquer outra substância que possa ter sido misturada a ela originalmente.

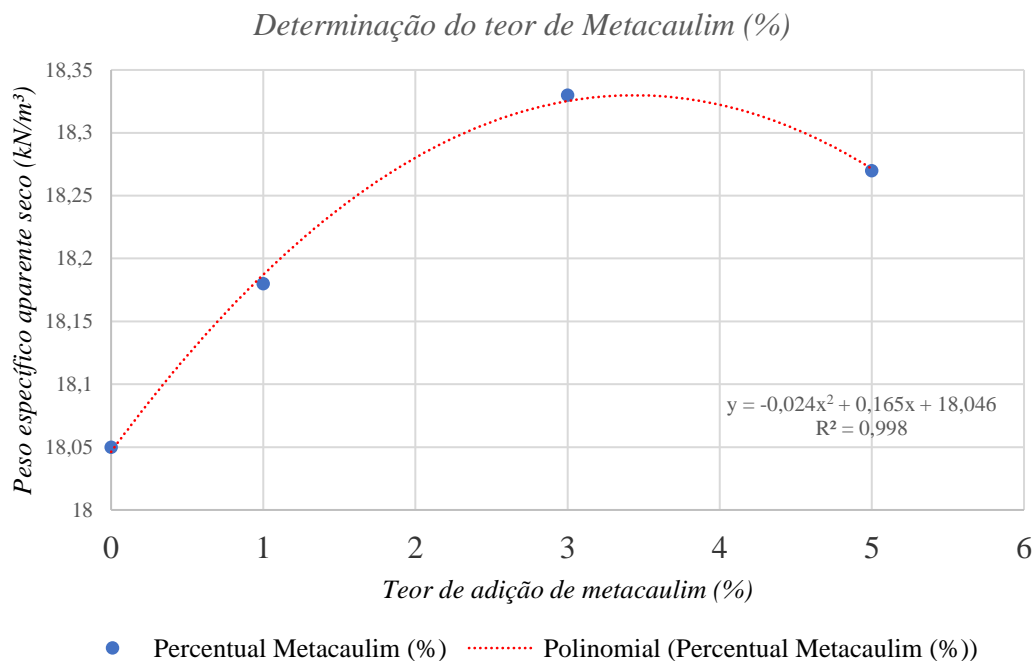
## 3.2 DEFINIÇÃO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Determinação do teor de metacaulim

Para análise e definição do percentual de adição de metacaulim neste trabalho, optou-se em realizar o ensaio de compactação de Proctor normal definindo um teor de umidade de compactação 2% acima da umidade ótima (15%) fixo e ensaiando amostras de rejeito com 1, 3 e 5% de adição de metacaulim.

O objetivo era analisar o maior peso específico aparente seco obtido com o desempenho das adições e na redução da exsudação da água de mistura que ocorre em teores acima da umidade ótima.

A Figura 31 apresenta a curva obtida das densidades aparentes das misturas ensaiadas.



*Figura 31 - Curva de compactação obtida com a variação de adição de metacaulim.*

É nítido o desempenho superior do teor de adição de 3% de metacaulim que além de obter o maior peso específico aparente seco de 18,33 kN/m³, e portanto, o melhor empacotamento dos grãos, também foi o ponto inicial do término do fenômeno de exsudação no material estudado com teor de umidade teórico de 15% e real obtido de 14,4%.

Dessa forma foi definido o teor ideal de 3% de adição de metacaulim na mistura de rejeitos para a continuidade do programa experimental.

### 3.2.2 Determinação do teor de cal hidratada

O estudo realizado para a determinação do teor de adição de cal foi através do Método do ICL (Initial Consumption of Lime), proposto por Rogers et al. (1997), que é uma variação do método do pH (ASTM-D 6276, 1999), onde o teor mínimo de cal é aquele onde o pH atinge um valor máximo constante.

Para o ensaio foi preparada amostras de rejeito de minério de ferro com adição de 3% de metacaulim e adicionado de 1 a 5% de cal hidratada e determinado o pH de cada mistura. Além da determinação do pH destas misturas foram determinados os valores de pH do metacaulim, da cal hidratada, do rejeito de minério de ferro com metacaulim e somente do rejeito de minério de ferro conforme demonstrado na Tabela 27.

*Tabela 27 - Valores de pH obtidos através do método ICL.*

<b>Componente</b>	<b>pH</b>
Rejeito de minério (80% GR/20% UF)	6,82
Metacaulim	6,03
Cal hidratada	12,56
Rejeito + 3% metacaulim	7,21
Rejeito + 3%M +1% cal	12,66
Rejeito + 3%M +2% cal	12,69
Rejeito + 3%M +3% cal	12,76
Rejeito + 3%M +4% cal	12,85
Rejeito + 3%M +5% cal	12,82

Analisando os resultados pelo método ICL, o teor ideal seria de 4%, porém nas bibliografias consultadas na revisão deste trabalho, encontrou-se citações de que não é recomendado que o teor de cal hidratada seja maior que o teor de adição do metacaulim utilizado, pois podem reduzir suas resistências mecânicas conforme demonstrado por Júnior et. al. (2011) em seu estudo. Já pelo método da pH (ASTM-D 6276, 99a), que determina o menor percentual de adição de cal como aquele que atinge um pH de 12,4, verifica-se o teor de 1% já atenderia este requisito.

Considerando estes dados e avaliando a possibilidade de fornecer à mistura um teor adequado para o favorecimento da reação pozolânica do metacaulim, decidiu-se em adotar o teor de 3% de adição da cal hidratada neste trabalho.

### 3.2.3 Determinação do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e umidade ótima ( $\omega$ )

Foram realizados ensaios de compactação Proctor com energia normal e modificada para obtenção dos seus respectivos  $\gamma_d$  e  $\omega$  com a mistura definida de 80% de rejeito granular, 20% de rejeito ultrafino, adição de 3% de metacaulim e de 3% de cal hidratada. A Figura 32 apresenta o as curvas obtidas.

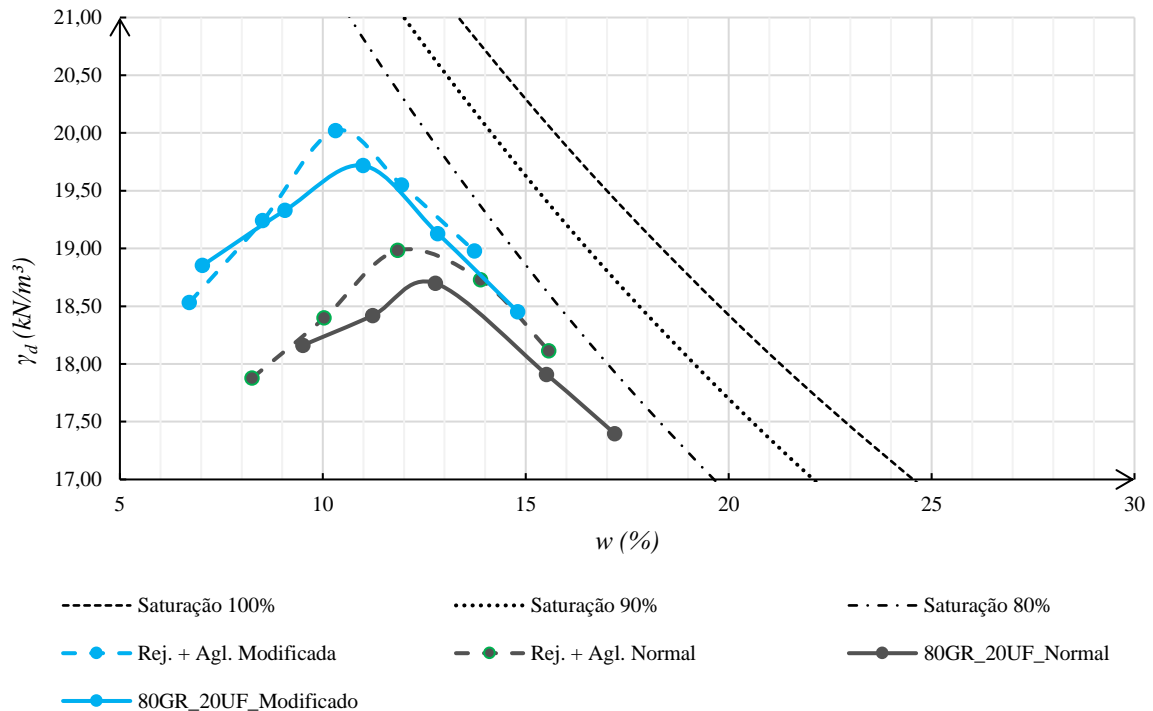


Figura 32 - Curvas de compactação sem adições e com adições nas energias normal e modificada.

Nota-se que quando adicionado o metacaulim e a cal na mistura, ocorre uma diminuição da umidade ótima além de um aumento no peso específico aparente seco do material devido ao melhor empacotamento dos grãos e conseqüentemente menor índice de vazios conforme mostra a Tabela 28.

Tabela 28 - Resumo dos resultados obtidos.

Identificação	$\gamma_d$ (kN/m³)	$\omega$ (%)
80%GR/20%UF - Normal	18,7	12,77
80%GR/20%UF - Modificado	19,7	10,99
Com aglomerante pozolânico - Normal	19,0	11,85
Com aglomerante pozolânico - Modificado	20,0	10,30

Através destes resultados foram definidos os pesos específicos aparentes secos que será utilizado como parâmetro para a execução de ensaios posteriores.

### 3.2.4 Determinação dos teores de umidade

A utilização de diferentes teores de umidade nos ensaios é devido a necessidade de conhecer a variação das características nas propriedades mecânicas do rejeito de minério de ferro estabilizado. Como descrito anteriormente, os rejeitos são obtidos no processamento do minério de ferro e o material ultrafino sai do processamento com umidade muito alta. A característica deste trabalho, além de científico, também tem a intenção de promover conhecimentos inerentes ao futuro processo prático no empilhamento do rejeito nas mineradoras. Portanto, sabe-se que ao misturar os rejeitos granular e ultrafino estes terão umidade superior à umidade ótima determinada no ensaio de Proctor.

Este material terá que ser trabalhado durante o processo de preparação da mistura estabilizada antes da sua disposição e compactação no empilhamento de forma a chegar próximo a umidade ótima.

Como pode ocorrer uma grande variação de umidade na geração dos rejeitos, principalmente do ultrafino, tem-se a intenção de simular uma variação da umidade ótima de  $\pm 4\%$  mantendo-se as densidades constantes, ou seja, será trabalhado, considerando 11,85% de umidade ótima, as umidades teóricas de ensaios nos valores de 8, 10, 12, 14 e 16%, para se observar qual a relevância da variação da umidade nas características mecânicas da mistura para tomadas de decisão no momento da compactação do material in loco.

Como exemplo destas variações de umidade pode-se demonstrar através da Tabela 29 os valores obtidos nas amostras de ultrafino que foram enviadas pela mineradora para o desenvolvimento desta pesquisa.

*Tabela 29 - Umidade relativa das amostras de ultrafino no recebimento.*

<b>Amostra</b>	<b>Umidade obtida (%)</b>
1	39,62
2	38,59
3	47,93
4	59,92
5	34,48
6	37,33
7	36,56
8	44,49
<b>Média</b>	<b>42,37</b>

### 3.2.5 Projeto de Experimentos

O planejamento da pesquisa é fundamental para otimizar a execução e análise do experimento proposto. Para isso o programa experimental divide as variáveis em dois grupos distintos: variáveis independentes e variáveis dependentes.

As variáveis independentes são aquelas controláveis e/ou constantes que podem causar efeitos sobre as variáveis dependentes, que são as variáveis de resposta obtidas no programa experimental.

As variáveis controláveis, são as que representam uma grandeza que está sendo manipulada na pesquisa e, neste trabalho, são:

- a) Peso específico aparente seco: serão utilizados o valor de 19,0 kN/m<sup>3</sup> e de 20,0 kN/m<sup>3</sup>;
- b) Teor de umidade ( $\omega$ ): serão utilizados 5 teores de umidade diferentes que foram definidos através da variação de até 4% para mais e para menos da umidade ótima. As umidades teóricas definidas foram 8, 10, 12, 14 e 16%;
- c) Tempo de cura (dias): será utilizado 4 idades diferentes para observar o ganho de resistência ao longo do tempo (7, 14, 28 e 90 dias).

As variáveis constantes são aquelas que não ocorre manipulação de sua grandeza que são:

- a) Teor de mistura de rejeitos: 80% de rejeito granular e 20% de rejeito ultrafino;
- b) Tipo e teor de cal hidratada: 3% de adição de cal hidratada calcítica;



- c) Tipo e teor de Metacaulim: 3% de adição de metacaulim produzido em laboratório;
- d) Temperatura de cura: ambiente.

As variáveis de resposta que representam a grandeza que depende da manipulação da variável independente e que são:

- a) Resistência a compressão simples ( $q_u$ ): obtido através de ensaio específico e expresso em MPa;
- b) Módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ): obtido através do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico e expresso em GPa;

Com as variáveis definidas e obtido os resultados dos ensaios parte-se para análise estatística. Neste caso, será utilizado um projeto fatorial, que são amplamente utilizados em pesquisas envolvendo diversos fatores e onde é necessário o estudo dos efeitos desses fatores em uma resposta (Montgomery, 2017).

Portanto, neste caso, será trabalhado um fatorial generalizado, pois tem-se 3 fatores com diferentes níveis e com repetição, conforme Tabela 30.

*Tabela 30 - Detalhamento do Projeto Fatorial Generalizado.*

Fatores	Quantidade de Níveis	Parâmetros
Umidade teórica (%)	5	8, 10, 12, 14, 16
Idade de ensaio (dias)	4	7, 14, 28, 90
Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	2	19,0 e 20,0

Portanto, serão confeccionados, inicialmente, 120 corpos de prova para ensaios de resistência a compressão simples (RCS) e módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ).

### 3.2.6 Preparação dos corpos de prova para RCS e $G_0$

A dimensão dos corpos de prova moldados foi de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura em molde tripartido de aço (Figura 33) em 3 camadas e compactado estaticamente por meio de macaco hidráulico (Figura 34). A moldagem foi realizada em 1 bloco aleatorizado que pode ser exemplificado conforme a Tabela 31.



Figura 33 - Molde tripartido para corpo de prova com  $d = 50 \text{ mm}$  e  $h = 100 \text{ mm}$ .



Figura 34 - Equipamento de moldagem (macaco hidráulico 20 t)

Tabela 31- Dados parciais aleatorizados de moldagem dos corpos de prova.

Sequência de moldagem	Nº corpo de prova	Bloco	Umidade	Idade	$\gamma_a$ (kN/m <sup>3</sup> )
85	2	1	8	28	19
82	7	1	8	7	20
84	15	1	8	14	20
83	25	1	8	14	19
86	31	1	8	28	20
87	33	1	8	90	19
81	37	1	8	7	19
88	38	1	8	90	20
90	5	1	10	7	20
94	12	1	10	28	20
89	17	1	10	7	19
93	18	1	10	28	19
92	21	1	10	14	20
95	24	1	10	90	19
96	27	1	10	90	20
91	40	1	10	14	19
100	3	1	12	14	20
101	4	1	12	28	19
98	10	1	12	7	20
104	22	1	12	90	20
99	23	1	12	14	19
103	30	1	12	90	19
102	35	1	12	28	20
97	36	1	12	7	19
108	1	1	14	14	20
105	6	1	14	7	19
111	16	1	14	90	19
106	20	1	14	7	20
110	26	1	14	28	20
109	32	1	14	28	19
112	34	1	14	90	20
107	39	1	14	14	19
115	8	1	16	14	19
120	9	1	16	90	20
113	11	1	16	7	19
116	13	1	16	14	20
114	14	1	16	7	20
118	19	1	16	28	20
119	28	1	16	90	19
117	29	1	16	28	19

Para Montgomery (2017), a aleatorização é um ponto fundamental ao uso dos métodos estatísticos em qualquer projeto experimental. Por aleatorização se quer dizer que tanto a alocação do material experimental quanto a ordem na qual são realizadas as corridas ou tentativas individuais do experimento são determinadas aleatoriamente. De um modo geral, os métodos estatísticos requerem que as observações (ou erros) sejam variáveis aleatórias independentemente distribuídas. Comumente a aleatorização torna esta hipótese válida.

Dessa forma mistura-se ou confunde-se os possíveis erros do processo com a aleatorização da ordem dos ensaios.

Após a moldagem todos os corpos de prova foram medidos, pesados e armazenados dentro de sacos plásticos (para evitar perda de umidade) para cura a temperatura ambiente.

### 3.2.7 Ensaios de módulo cisalhante inicial ( $G_0$ ) e resistência a compressão simples (RCS)

Como forma de obtenção das características mecânicas iniciais foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples em conformidade com a norma NBR 12025 (ABNT, 2012) e o módulo de cisalhamento inicial através do ensaio de velocidade de pulso-ultrassônico (UPV) conforme ASTM D 8295 (2019) nos corpos de prova moldados.

O ensaio UPV se realiza no dia anterior da data de ensaio de compressão simples, ou seja, nas idades de 6, 13, 27 e 89 dias. O instrumento utilizado foi o PunditLab(+) que mede os tempos de propagação de ondas cisalhantes pelos corpos de prova cilíndricos induzidas pela vibração de transdutores a uma frequência de 250 kHz, obtendo dessa forma o valor de  $t_s$ , conforme Figura 35.



Figura 35 - Aparelho para determinação do módulo cisalhante inicial

O valor do módulo cisalhante inicial é obtido através das Equações 13 e 14

$$V_s = \frac{d}{t_s} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde,

- $V_s$  é igual a velocidade da onda cisalhante;
- $d$  é igual a distância entre os transdutores (altura do corpo de prova);
- $t_s$  é igual à diferença entre o tempo das ondas enviadas e recebidas que se propagam pelo corpo de prova.

Com o resultado de  $V_s$ , pode-se determinar o valor de  $G_0$  através da Equação 4.3.

$$G_0 = \rho \times V_s^2 \quad (\text{Equação 14})$$

Onde,

- $\rho$  é a massa específica aparente do corpo de prova.

O ensaio de resistência a compressão foi realizado nos corpos de prova após sua saturação em água por 24 horas para reduzir ou eliminar qualquer efeito de sucção que possa ocorrer durante o ensaio de compressão simples, conforme demonstra Figura 36. Portanto, após o ensaio de UPV que é um ensaio não destrutivo, utilizou-se os mesmos corpos de prova para a imersão em água e posterior ruptura nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.



*Figura 36 - Ruptura de corpo de prova com 28 dias.*

O resultado da resistência a compressão simples é obtido através da Equação 15.

$$q_u = \frac{F}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)} \quad (\text{Equação 15})$$

onde,

- $q_u$  é igual a resistência a compressão simples em MPa;
- $F$  é a carga de ruptura em N;
- $D$  é o diâmetro do corpo de prova.

### 3.2.8 Ensaio de compressão triaxial

Os ensaios triaxiais são os mais versáteis e difundidos ensaios de laboratório para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e de deformabilidade dos solos, sob diferentes solicitações.

A importância da realização destes ensaios é porque, em sua grande maioria, a ruptura de materiais geotécnicos ocorre por cisalhamento. Portanto, é fundamental que o engenheiro geotécnico tenha conhecimento das propriedades como a resistência ao cisalhamento, a coesão

e o ângulo de atrito interno, para projetarem estruturas de fundações, contenções e barragens com segurança e eficácia.

Os ensaios triaxiais permitem a simulação de diferentes condições de tensão que o solo pode experimentar no campo. Isso inclui a aplicação de cargas axiais controladas e a aplicação de pressão de confinamento lateral, ajudando a entender o comportamento do solo em diferentes situações, como cargas estáticas, cargas cíclicas, variações de umidade e variações de pressão.

Neste ensaio é possível garantir a saturação por processos de percolação por dióxido de carbono, percolação de água ou por elevação da contrapressão. Além disso, é possível simular em ensaios triaxiais diferentes condições de adensamento (hidrostáticos ou não), de drenagem (drenados ou não drenados) e de carregamento na fase do cisalhamento (por carregamento ou descarregamento axial ou radial) (BOSZCZOWSKI et al., 2023).

O ensaio de compressão triaxial clássico, em maneira usual, consiste em aplicar ao corpo de prova, uma tensão confinante uniforme ( $\sigma_c = \bar{\sigma}_3 = \bar{\sigma}_2$ ) e uma tensão axial crescente ( $\bar{\sigma}_1$ ), até à ruptura. A tensão confinante será aplicada por intermédio de um fluido sob pressão, neste trabalho foi usado água, que por sua vez não entra em contato com o corpo de prova por ele estar protegido por uma membrana de látex.

A tensão axial efetiva ( $\bar{\sigma}_1$ ) resulta da aplicação (por meio de um êmbolo) no topo do corpo de prova da tensão:

$$q = \sigma_d = \bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_3$$

Conhecida como tensão desviadora; e da tensão confinante ( $\sigma_c = \bar{\sigma}_3$ ), isto é:

$$\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_3 + (\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)$$

Nessas condições de ensaio, as tensões  $\bar{\sigma}_1$  e  $\bar{\sigma}_3$  são as tensões principais efetivas, máxima e mínima, respectivamente, e cada tensão confinante corresponde à um círculo de Mohr cujo diâmetro é igual ao valor da tensão desviadora, ou seja,  $(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)$ .

O equipamento empregado para a realização dos ensaios triaxiais neste trabalho será o “triaxial de altas tensões do LEGG” (Figura 37), por possuir uma célula de carga de 20kN que permitirá os ensaios com os materiais cimentados dessa tese. As tensões de confinamento a serem usadas serão de 250, 500 e 1000 kPa.



*Figura 37 - Equipamento “triaxial de altas tensões do LEGG” (MAFESSOLI, 2022).*

Foi realizado o ensaio de compressão triaxial consolidado isotropicamente drenado (CID consolidated isotropically drained) onde o corpo de prova é consolidado de modo hidrostático, ou seja, após o período de dissipação do excesso de poropressão originado pelo confinamento, a tensão efetiva é a mesma em todas as direções. Na fase de cisalhamento, entretanto, a ruptura é realizada por aumento da tensão vertical com permissão de drenagem até sua ruptura. Em virtude da mobilização de tensões cisalhantes, ocorrem variações volumétricas no corpo de prova que são medidas durante o ensaio.

O ensaio triaxial consolidado drenado é essencial para entender o comportamento dos solos que têm tempo suficiente para drenar a água durante o carregamento, como é o caso em muitas situações geotécnicas, incluindo a construção de barragens, fundações de edifícios, e outras estruturas onde o solo se encontra em condições drenadas. Ele permite prever o comportamento do solo em situações de longo prazo, ajudando a garantir a estabilidade e segurança das obras civis.

Os corpos de prova cimentados foram moldados e curados submersos em água destilada por 28 dias em temperatura controlada de  $23\pm 1^\circ\text{C}$ . Foi determinado a idade de 28 dias para os ensaios



triaxiais, pois foi até essa idade que houve o maior incremento de resistência a compressão simples, conforme será demonstrado no Capítulo 5.

O objetivo deste ensaio é verificar a influência do teor de umidade de moldagem do material em ensaios triaxiais consolidado e drenado e para isso serão ensaiados corpos de prova cimentados com teores de umidade teóricos de 5, 8, 10, 12, 14 e 15% e com 4, 7, 9, 11, 13 e 15% nos corpos de prova não cimentados, todos com tensão de confinamento de 500 kPa.

A diferença de umidade entre os cimentados e não cimentados é devido a característica observada durante as moldagens dos corpos de prova onde os cimentados quando moldados com as umidades teóricas de 5, 8, 10, 12, 14 e 15%, no procedimento de determinação da umidade do material de moldagem se verificou uma redução em torno de 1% da água de mistura apresentando uma umidade inferior da teórica adicionada, o que não ocorre com o material não cimentado.

Como a umidade é determinada em estufa com temperatura de 60°C, esta “diferença” na umidade demonstra que os poros dos grãos do material cimentante usado (cal hidratada e metacaulim) que são muito mais finos que os grãos de rejeito absorveram parte da água de mistura confinando-as em seus microporos dos grãos e a temperatura de 60°C não fornece energia suficiente para a expulsão desta água adsorvida no material cimentante para a atmosfera, ocasionando esta diferença nos teores de umidade.

Serão ensaiados também as tensões de confinamento de 250 e 1000 kPa somente nas umidades ótimas dos materiais cimentado e não cimentado para a determinação do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo característico do material.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios de resistência a compressão simples (RCS) e o módulo de cisalhamento inicial ( $G_0$ ) nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias, bem como a análise estatística.

### 4.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

As médias dos resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão são apresentados nas Tabelas 32 e 33.

*Tabela 32 - Resistência a compressão simples moldados com  $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ .*

$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Idade (dias)	Umidade (%)	RCS Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	
19,0	7	7,04	0,415	0,037	9,04	
	7	9,00	0,375	0,007	1,84	*
	7	10,76	0,270	0,024	9,03	
	7	12,64	0,244	0,018	7,35	
	7	14,51	0,238	0,016	6,59	
	14	7,10	1,322	0,043	3,22	
	14	8,91	1,293	0,067	5,18	
	14	10,68	1,102	0,027	2,49	
	14	12,71	0,906	0,067	7,36	
	14	14,37	0,856	0,080	9,37	
	28	7,03	2,641	0,183	6,92	*
	28	8,95	2,868	0,249	8,67	
	28	10,78	3,199	0,115	3,60	
	28	12,72	2,646	0,105	3,98	
	28	14,72	2,539	0,006	0,22	*
	90	7,27	2,969	0,002	0,05	
	90	9,14	3,884	0,091	2,34	*
	90	10,89	3,707	0,213	5,75	*
	90	12,67	3,891	0,171	4,39	*
	90	14,81	2,862	0,136	4,74	*

\*Médias calculadas com 2 corpos de prova devido ao  $CV > 10\%$ .

Tabela 33 - Resultados de resistência a compressão simples moldados com  $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ .

$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Idade (dias)	Umidade (%)	RCS Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	
20,0	7	7,28	0,567	0,001	0,21	*
	7	9,07	0,459	0,011	2,37	
	7	10,80	0,436	0,021	4,84	*
	7	12,66	0,409	0,021	5,01	
	7	14,63	0,362	0,030	8,36	*
	14	7,20	1,446	0,106	7,33	
	14	9,10	1,345	0,083	6,13	
	14	11,19	1,228	0,073	5,97	*
	14	13,09	1,126	0,067	5,99	
	14	14,74	1,010	0,021	2,05	
	28	7,17	3,445	0,253	7,35	
	28	9,09	3,923	0,097	2,48	
	28	11,13	4,070	0,075	1,84	
	28	12,59	3,363	0,008	0,23	*
	28	14,68	2,718	0,091	3,35	
	90	7,18	4,025	0,346	8,60	*
	90	8,94	4,933	0,091	1,84	*
	90	10,85	4,954	0,368	7,44	*
90	12,76	3,982	0,022	0,56	*	
90	14,63	3,467	0,099	2,85	*	

\*Médias calculadas com 2 corpos de prova devido ao CV > 10%.

Percebe-se que nas idades de 7 e 14 dias nas duas densidades, as maiores resistências obtidas foram com o teor de umidade mais baixo, em torno de 7% e na idade de 28 e 90 dias, houve uma disposição das resistências na forma de uma curvatura polinomial de segunda ordem, onde o pico de resistência se localiza um pouco abaixo da umidade ótima em ambos os pesos específicos, ou seja, no ramo seco o que vem de encontro com o descrito no estado da arte.

Sabe-se que as reações pozolânicas, são reações significativamente mais lentas, e o ganho de resistência se dá a longo prazo, que neste caso foi visualizado a contribuição da cimentação a partir dos 28 dias, conforme demonstra a Figura 38 e 39.

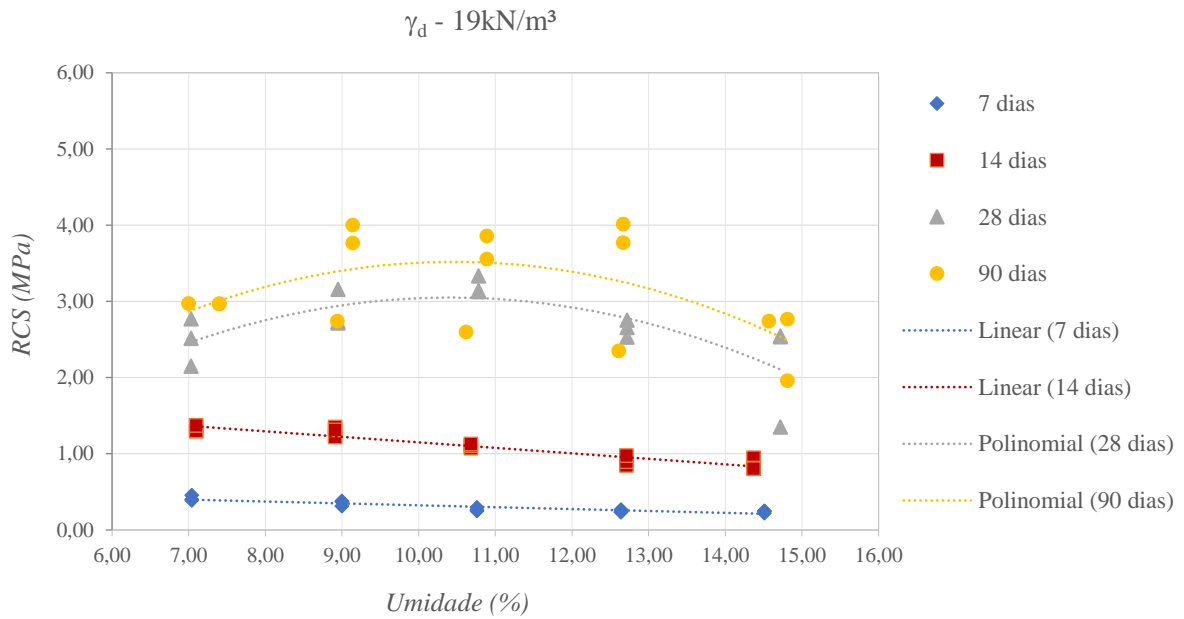


Figura 38 - Gráfico das curvas de umidade versus resistências a compressão simples para  $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ .

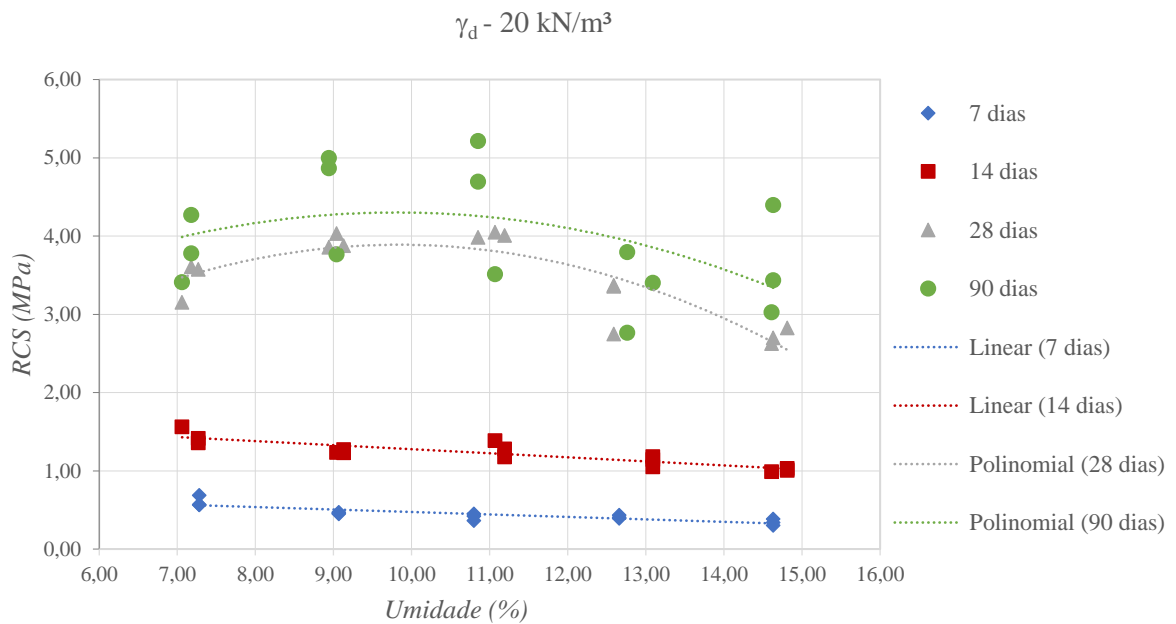


Figura 39 - Gráfico das curvas de umidade versus resistências a compressão simples para  $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ .

Percebe-se o comportamento relatado se deu tanto no  $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$  como no  $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ , sendo que neste último foram obtidos resultados maiores de resistência a compressão simples em todas as idades, visto que a redução da porosidade induz uma maior área de contato entre as partículas do solo, intensificando a mobilização do atrito e o efeito da cimentação, o que aumenta a resistência do material.

Foi realizada uma análise sobre as diferenças do crescimento pela média das resistências mecânicas entre as idades de ruptura e  $\gamma_d$  de moldagem conforme apresenta a Tabela 34.

*Tabela 34 - Resumo das diferenças do crescimento de resistência entre idades e o peso específico aparente seco.*

<b>Resistência entre idades de ruptura</b>		
$\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$	7 para 14 dias	260%
	14 para 28 dias	160%
	28 para 90 dias	25%
$\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$	7 para 90 dias	1084%
	7 para 14 dias	177%
	14 para 28 dias	186%
	28 para 90 dias	22%
	7 para 90 dias	870%
<b>Resistência entre <math>\gamma_d</math></b>		
	7 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>	47%
	14 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>	13%
	28 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>	26%
	90 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>	24%

É nítido o ganho de resistência ao longo do tempo de cura do material estabilizado com ganhos de 1084% comparando as idades de 7 com 90 dias no  $\gamma_d$  de 19,0 kN/m<sup>3</sup>. No  $\gamma_d$  de 20,0 kN/m<sup>3</sup> o ganho entre idades foi um pouco menor de 870%, mas ainda assim significativo. Para um mesmo tempo de cura, percebe-se que há um aumento médio de 27,5% das resistências com o aumento do peso específico aparente seco.

#### 4.1.1 Análise estatística da RCS

Através de um experimento fatorial completo realizado com o auxílio do programa *Minitab* foi possível avaliar quais variáveis tem maior efeito sobre os resultados de RCS.

O resultado obtido na análise de variância (Tabela 35) demonstra que os fatores controláveis (Tempo de cura, umidade e  $\gamma_d$ ) são significativos e tem influência na RCS a um nível de significância igual a 5%. Já nas interações de segunda ordem a única que não é significativa é a interação da umidade versus  $\gamma_d$ , ou seja, não possui influência na RCS. Na interação de terceira ordem o resultado não foi significativo.

Tabela 35 - Resultado da análise de variância RCS.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	39	228,734	5,8650	51,81	0,000
Linear	8	220,412	27,5515	243,38	0,000
Tempo de cura	3	207,084	69,0282	609,77	0,000
Umidade	4	6,570	1,6426	14,51	0,000
$\gamma_d$	1	6,757	6,7575	59,69	0,000
Interações de 2 fatores	19	7,707	0,4056	3,58	0,000
Tempo de cura*Umidade	12	4,116	0,3430	3,03	0,002
Tempo de cura* $\gamma_d$	3	3,220	1,0732	9,48	0,000
Umidade* $\gamma_d$	4	0,372	0,0929	0,82	0,516
Interações de 3 fatores	12	0,615	0,0513	0,45	0,936
Tempo de cura*Umidade* $\gamma_d$	12	0,615	0,0513	0,45	0,936
Erro	80	9,056	0,1132		
<b>Total</b>	<b>119</b>	<b>237,791</b>			

S(desvio padrão) = 0,336 MPa

$R^2 = 96,19\%$

O gráfico de Pareto mostra quais variáveis controláveis tem o maior efeito nas variáveis resposta e está representado na Figura 40.

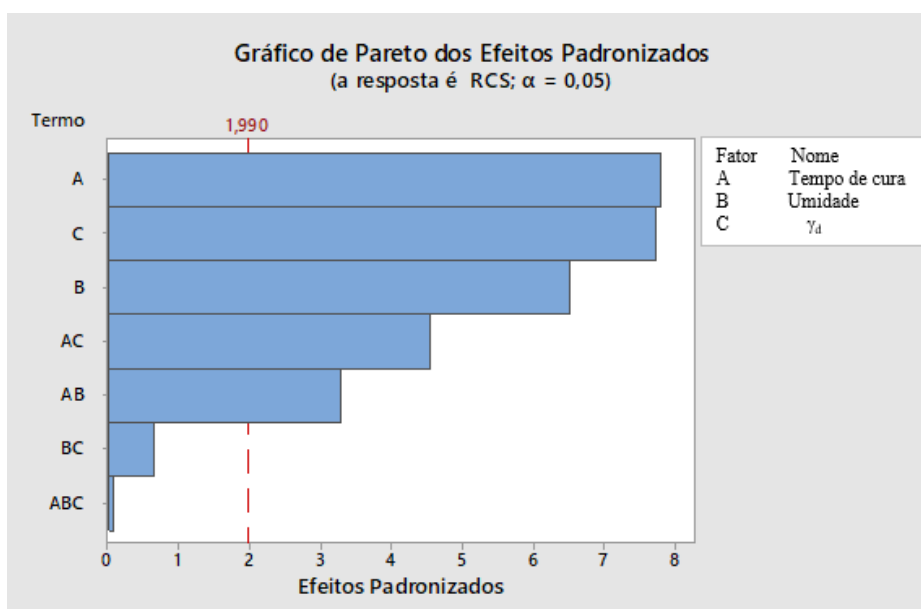


Figura 40 - Efeito das variáveis na resposta de RCS.

O gráfico de Pareto exhibe apenas o valor absoluto dos efeitos e nesse caso o fator de maior influência na RCS é o tempo de cura, seguido do  $\gamma_d$  e pela umidade respectivamente.

Para uma avaliação mais detalhada faz-se necessário a análise dos gráficos de efeitos principais e de interações conforme Figuras 41 e 42.

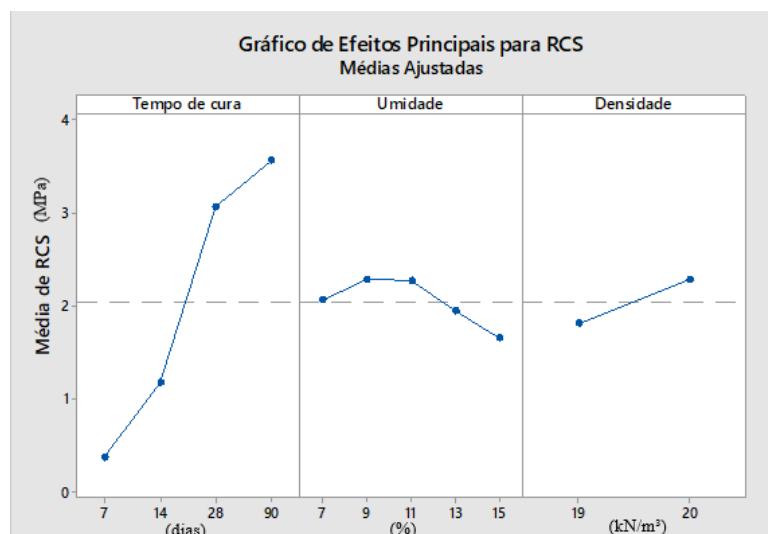


Figura 41 - Gráfico de efeitos principais da RCS.

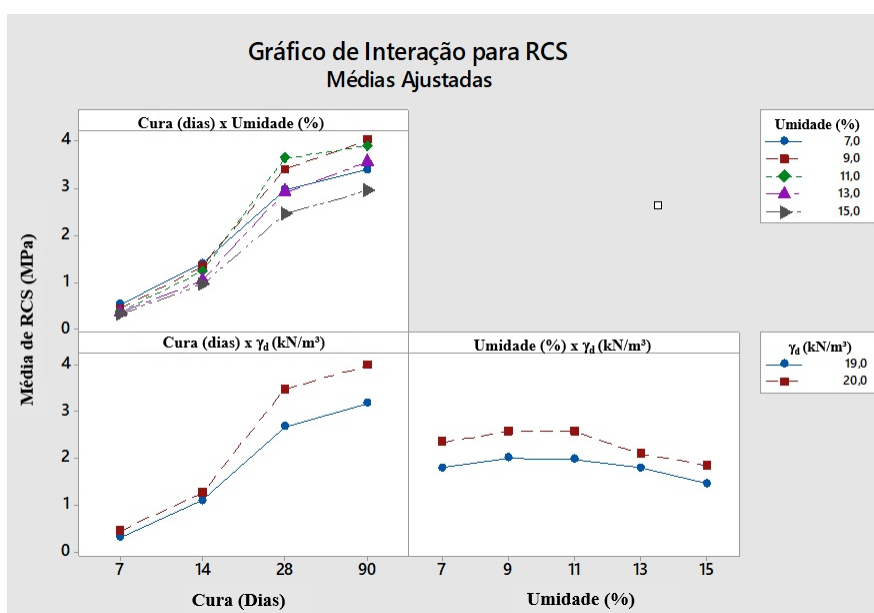


Figura 42 - Gráfico das interações entre as variáveis para RCS.

Na Figura 41, nota-se que o tempo de cura promove o crescimento da resistência e que o tempo de 90 dias é o mais significativo neste aumento de resistência, característicos de materiais pozolânicos, ou seja, a reação pozolânica é lenta, dessa forma as taxas de liberação de calor e desenvolvimento da resistência também é lenta. Então é esperado que materiais cimentados com pozolanas tenham desenvolvimento de resistência mecânica a longo prazo (CONSOLI et

al.; 2001; SEGANTINI e ALCÂNTARA, 2010; DALLA ROSA, 2009; LOPES JÚNIOR, 2011).

Já na umidade, demonstra-se que o acréscimo água na mistura promove um decréscimo na resistência mecânica. Isto vem de encontro com o que Lambe (1958) e Seed e Chen (1959) descrevem como comportamento característico de solos argilosos e também demonstrado por Consoli et al. (2001), Guedes (2024) e Tebechrani Neto (2024) em rejeitos de minério de ferro.

Este comportamento é apresentado pelo estudo de Yeo, Kim e Lee (2023), onde analisaram a compressibilidade e rigidez em pequenas deformações de misturas silte-hematita. As partículas menores de hematita ( $\phi < 10\mu\text{m}$ ) tendem a formar agregados com diâmetros maiores devido as forças de Van der Waals atuando entre elas. Portanto, no ramo seco espera-se a formação de agregados semelhantes ao que ocorre com a hematita no rejeito de minério de ferro estudado devido ao alto teor de minério de ferro no material mais fino e à baixa umidade. O aumento da umidade no material reduz a atração química e o potencial de formação de agregados, dessa forma os finos passam a interagir com as partículas grossas aumentando o intertravamento entre elas (ramo ótimo). No caso do ramo úmido, menor será o efeito das forças Van de Waals entre as partículas, afastando as partículas finas uma das outras tendendo a orientação horizontal da estrutura (dispersa) assim como apresentado por Lambe (1958) o que prejudica no empacotamento do material.

E por fim, quanto maior o  $\gamma_d$  do material maior a tendência de resistência mecânica final, também demonstrado por Lambe (1958) conforme Figura 5.

O gráfico de interação (Figura 42) apresenta o comportamento entre duas variáveis distintas e se verifica que o tempo de cura versus  $\gamma_d$  promove o acréscimo na RCS, ou seja, quanto maior o tempo de cura e  $\gamma_d$ , maior a RCS, pois neste caso, permite ao material um menor índice de vazios com o aumento do  $\gamma_d$  de moldagem e uma melhor cimentação entre os grãos com o aumento do tempo de cura decorrente da reação pozolânica constante do material cimentício. Já na interação de tempo de cura e umidade este promove um decréscimo na resistência mecânica na medida que se aumenta a umidade do material, ou seja, o comportamento de melhor desempenho do material está no ramo seco à umidade ótima o que é demonstrado também em Consoli et. al (2001) e Guedes (2024).



Guedes (2024) cita em seu trabalho que, esse comportamento seria um indicativo de maior eficiência da cimentação no ramo seco da curva de compactação do rejeito cimentado, onde a estrutura desenvolvida após a compactação permite melhor performance mecânica das pontes de cimentação.

E por fim, a interação entre a umidade e  $\gamma_d$  demonstra o decréscimo da resistência com o aumento da umidade em ambos  $\gamma_d$ , corroborando novamente a influência do aumento do teor de umidade na resistência mecânica do material.

## 4.2 MÓDULO DE CISALHAMENTO INICIAL ( $G_0$ )

Os resultados obtidos nos ensaios de velocidade de pulso ultrassônico são apresentados resumidamente conforme Tabela 36 e 37.

*Tabela 36 - Resultados de módulo de cisalhamento inicial moldados com  $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ .*

$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Idade (dias)	Umidade (%)	$G_0$ Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	
19,0	7	7,04	58,517	4,595	7,85	
	7	9,07	46,667	2,671	5,72	
	7	10,76	33,367	2,800	8,39	
	7	12,64	23,900	2,345	9,81	
	7	14,51	25,170	1,457	5,79	
	14	7,10	162,910	5,395	3,31	
	14	8,91	158,187	6,947	4,39	
	14	10,68	136,847	3,746	2,74	
	14	12,71	113,380	6,086	5,37	
	14	14,37	116,350	1,799	1,55	
	28	7,03	303,573	17,858	5,88	
	28	8,95	343,387	3,710	1,08	
	28	10,78	399,943	14,253	3,56	
	28	12,72	325,170	1,611	0,50	
	28	14,72	315,410	5,171	1,64	
	90	7,27	335,403	9,670	2,88	
	90	9,14	409,815	1,506	0,37	*
	90	10,89	407,520	13,393	3,29	*
	90	12,67	407,820	5,459	1,34	*
	90	14,81	374,485	25,661	6,85	*

\*Médias calculadas com 2 corpos de prova devido ao  $CV > 10\%$ .

Tabela 37– Resultados de módulo de cisalhamento inicial moldados com  $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ .

$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	Idade (dias)	Umidade (%)	$G_0$ Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)	
20,0	7	7,28	82,477	4,766	5,78	
	7	9,07	57,700	2,616	4,53	
	7	10,80	47,000	4,345	9,24	
	7	12,66	42,067	1,299	3,09	
	7	14,63	38,250	3,646	9,53	
	14	7,20	203,110	6,889	3,39	
	14	9,10	199,140	11,680	5,87	
	14	11,15	191,760	17,441	9,10	
	14	13,09	183,590	4,921	2,68	*
	14	14,74	171,863	4,676	2,72	
	28	7,17	392,630	2,913	0,74	*
	28	9,04	454,800	16,351	3,60	
	28	11,13	465,520	13,675	2,94	*
	28	12,59	445,960	8,618	1,93	
	28	14,68	430,810	7,405	1,72	
	90	7,14	395,411	21,532	5,45	
	90	8,98	458,480	39,223	8,55	
	90	10,85	473,910	12,910	2,72	*
	90	12,87	449,400	7,332	1,63	*
	90	14,63	438,750	36,650	8,35	*

\*Médias calculadas com 2 corpos de prova devido ao  $CV > 10\%$ .

Percebe-se que nas idades de 7 e 14 dias nos dois pesos específicos, os maiores valores obtidos foram com o teor de umidade mais baixo, em torno de 7%, repetindo o padrão que ocorreu nos ensaios de resistência a compressão simples. Na idade de 28 e 90 dias, houve uma disposição das resistências na forma de uma curvatura polinomial de segunda ordem, onde o pico de resistência se localiza um pouco abaixo da umidade ótima no  $\gamma_d$  de 19  $\text{kN/m}^3$ , ou seja, no ramo seco, o que vem de encontro com o descrito no estado da arte. No  $\gamma_d$  de 20  $\text{kN/m}^3$ , o comportamento foi diferente em relação ao pico máximo (próximo a umidade ótima) e ao incremento no módulo entre 28 e 90 dias. Houve uma maior dispersão nos resultados das réplicas e a curva referente ao módulo na idade de 90 dias, praticamente se sobrepôs à curva de 28 dias, demonstrando que não há ganhos significativos no módulo após os 28 dias de idade, como também pode-se verificar na Tabela 37. Neste  $\gamma_d$  o material além de ser mais compacto e ter um menor índice de vazios, a cimentação gerada pelo material pozolânico até os 28 dias, fez com que, no quesito de módulo de cisalhamento inicial, ele chegasse ao seu limite máximo de incremento de resistência (desempenho).

Sabe-se que as reações pozolânicas, são reações significativamente mais lentas, e o ganho de resistência se dá ao longo prazo, que neste caso foi melhor visualizado a partir dos 28 dias, conforme demonstra as Figuras 39 e 40.

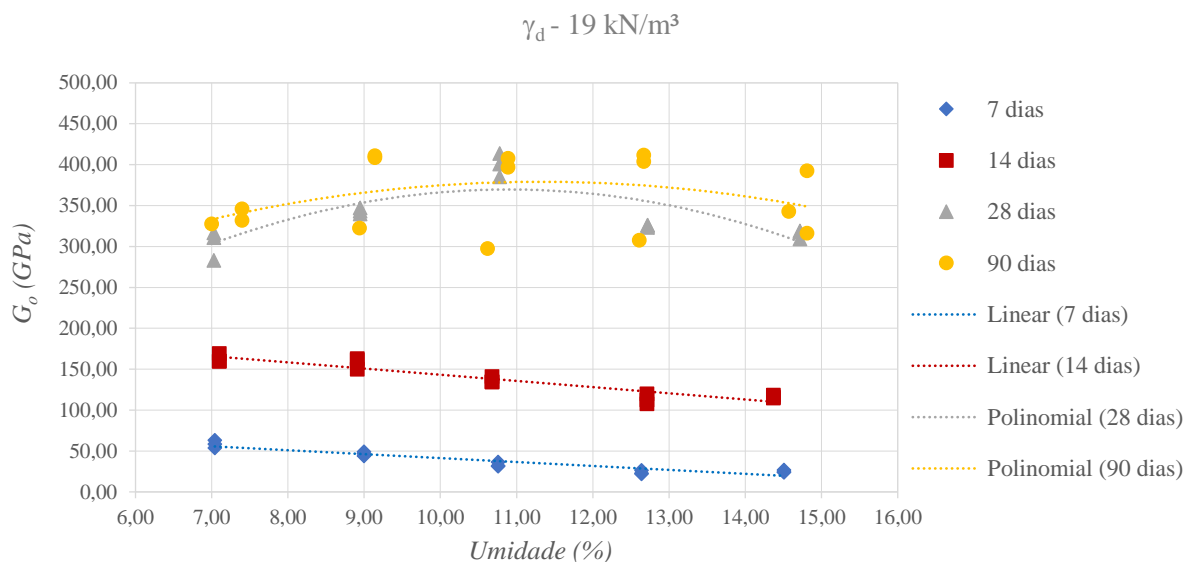


Figura 43 - Gráfico da curva de umidade versus módulo de cisalhamento inicial para  $\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$ .

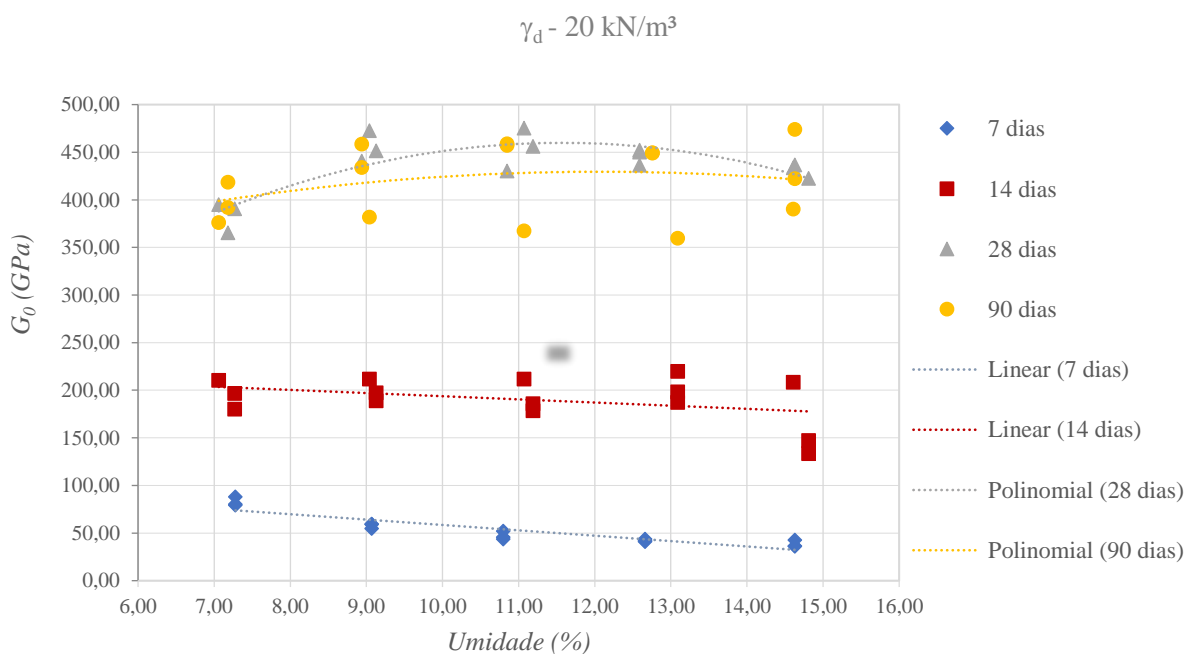


Figura 44 - Gráfico da curva de umidade versus módulo de cisalhamento inicial para  $\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$ .

Percebe-se o comportamento relatado nos dois  $\gamma_d$  de moldagem, sendo que no  $\gamma_d$  de  $20,0 \text{ kN/m}^3$  foram obtidos os maiores resultados de módulo de cisalhamento inicial em todas as idades,

porém o aumento de módulo de 28 dias para 90 dias foi praticamente nulo, mesmo assim ficando com um valor maior quando comparado à idade de 90 dias no  $\gamma_d$  de 19 kN/m<sup>3</sup>. Característico de material com menor índice de vazios o que fornece uma maior rigidez ao material.

Como descrito na resistência a compressão simples, o excesso de umidade (acima do teor ótimo) também influencia negativamente o módulo de cisalhamento inicial, devido a alteração da estrutura interna do material cimentado, corroborando com o observado por Consoli et.al. (2001), Bruschi (2023), Guedes (2024) e Tebechrani Neto (2024).

Foi realizada uma análise sobre as diferenças de crescimento dos módulos de cisalhamento inicial entre as idades e  $\gamma_d$  conforme apresenta a Tabela 38.

*Tabela 38 - Resumo das diferenças/crescimento dos módulos entre idades e entre o  $\gamma_d$*

<b>Módulos entre idades de ruptura</b>		
$\gamma_d = 19,0 \text{ kN/m}^3$	7 para 14 dias	293%
	14 para 28 dias	151%
	28 para 90 dias	15%
	7 para 90 dias	1073%
$\gamma_d = 20,0 \text{ kN/m}^3$	7 para 14 dias	277%
	14 para 28 dias	132%
	28 para 90 dias	1%
	7 para 90 dias	800%
<b>Módulos entre <math>\gamma_d</math></b>		
7 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>		45%
14 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>		40%
28 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>		30%
90 dias - 19 kN/m <sup>3</sup> para 20 kN/m <sup>3</sup>		15%

É nítido o aumento do desempenho ao longo do tempo do material estabilizado no módulo cisalhante inicial com ganhos de 1073% comparando as idades de 7 com 90 dias no  $\gamma_d$  de 19,0 kN/m<sup>3</sup>. No  $\gamma_d$  de 20,0 kN/m<sup>3</sup>, o ganho entre idades foi menor, de 800%, mas ainda assim significativo. Já comparando os módulos nas mesmas idades percebe-se que há um acréscimo no valor do módulo em média de aproximadamente 33% para o maior peso específico aparente seco de moldagem.

### 4.2.1 Análise estatística do $G_0$

Através de um experimento fatorial completo realizado com o auxílio do programa *Minitab* foi possível avaliar quais variáveis tem maior efeito sobre os resultados de  $G_0$ .

O resultado obtido na análise de variância (Tabela 39) demonstra que os fatores controláveis (tempo de cura, umidade e  $\gamma_d$ ) são significativos e tem influência na  $G_0$  com um nível de significância de 5%. Já nas interações de segunda ordem a única que não é significativa é a interação da umidade versus  $\gamma_d$ , ou seja, não possui influência em  $G_0$ . Na interação de terceira ordem o resultado não foi significativo.

*Tabela 39 - Resultado da análise de variância do  $G_0$ .*

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	39	2750373	70522	108,21	0,000
Linear	8	2690038	336255	515,96	0,000
Tempo de cura	3	2588469	862823	1323,94	0,000
Umidade	4	12336	3084	4,73	0,002
$\gamma_d$	1	89233	89233	136,92	0,000
Interações de 2 fatores	19	55011	2895	4,44	0,000
Tempo de cura*Umidade	12	28840	2403	3,69	0,000
Tempo de cura* $\gamma_d$	3	24279	8093	12,42	0,000
Umidade* $\gamma_d$	4	1892	473	0,73	0,577
Interações de 3 fatores	12	5324	444	0,68	0,765
Tempo de cura*Umidade* $\gamma_d$	12	5324	444	0,68	0,765
Erro	80	52137	652		
Total	119	2802509			

S (desvio padrão) = 25,529 GPa

$R^2 = 98,14\%$

O gráfico de Pareto mostra quais variáveis controláveis tem o maior efeito nas variáveis resposta e está representado na Figura 45.

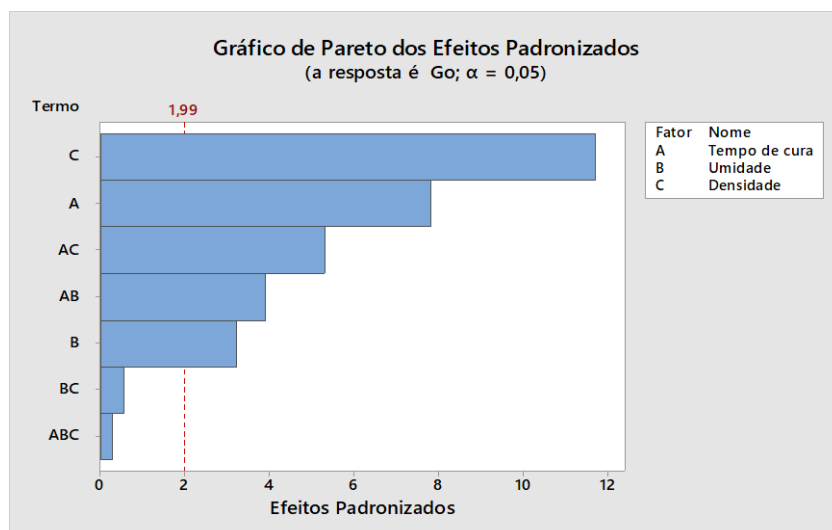


Figura 45 - Efeito das variáveis na resposta de  $G_0$ .

O gráfico de Pareto exibe apenas o valor absoluto dos efeitos e nesse caso o fator de maior influência na  $G_0$  é o  $\gamma_d$ , seguida do tempo de cura e pela interação do tempo de cura com o  $\gamma_d$  respectivamente. O peso específico aparente seco de moldagem tende a promover um menor volume de vazios na amostra e o tempo de cura do material favorece a uma redução do tamanho dos poros existentes através reação do aglomerante pozolânico (formação dos géis cimentantes) e com isso o material tende a ser mais rígido, o que é demonstrado pelos resultados obtidos.

Para uma avaliação mais detalhada faz-se necessário a análise dos gráficos de efeitos principais e de interações conforme Figuras 46 e 47.

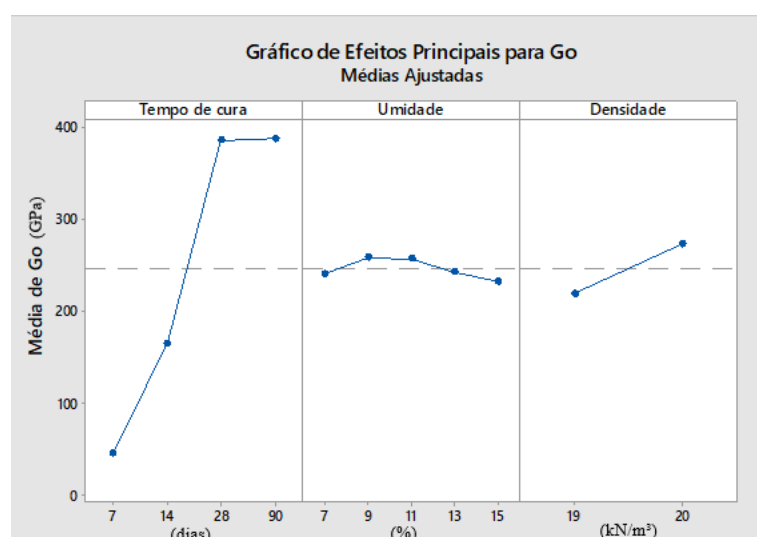


Figura 46 - Gráfico de efeitos principais de  $G_0$

Nota-se que o tempo de cura promove o crescimento do módulo de cisalhamento inicial e que o tempo de 28 dias é o mais significativo neste aumento, pois o acréscimo entre a idade de 28 dias e 90 dias é nula nesta propriedade, conforme já descrito e comentado anteriormente. Já na umidade, demonstra-se que o acréscimo de água na mistura promove um decréscimo no módulo de cisalhamento inicial. E por fim, quanto maior a densidade do material maior o módulo de cisalhamento inicial.

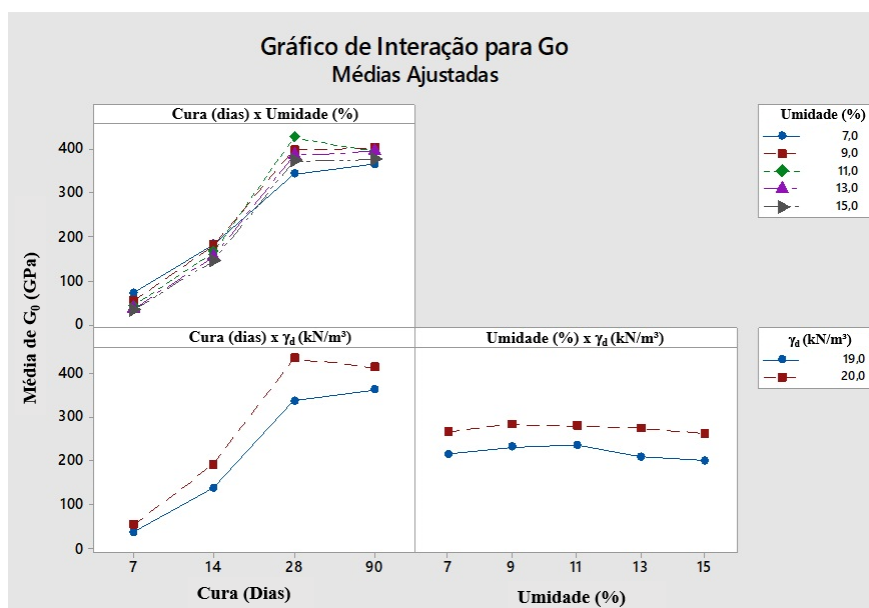


Figura 47 - Gráfico das interações entre as variáveis de  $G_0$ .

O gráfico de interação apresenta o comportamento entre duas variáveis distintas e neste caso, se verifica que o tempo de cura versus  $\gamma_d$  promove o acréscimo de  $G_0$  até a idade de 28 dias, se tornando constante após esta idade, confirmando o que foi descrito anteriormente correspondente a Figura 40. A interação de tempo de cura e umidade promove um decréscimo na resistência mecânica na medida que se aumenta a umidade do material, novamente corroborando com o que foi descrito no item 5.2. E por fim, a interação entre a umidade e  $\gamma_d$  demonstra que o  $G_0$  sofre uma influência quase nula neste quesito, ou seja, um resultado não significativo para esta interação num mesmo  $\gamma_d$ , porém há um acréscimo de  $G_0$  com o aumento do peso específico aparente seco.

Analisando os gráficos de interação de dados  $G_0$  e RCS (Figuras 42 e 47), eles retratam os efeitos positivos do período de cura, independente da  $\omega$  ou  $\gamma_d$ , na resistência e rigidez das misturas de rejeito com aglomerante pozzolânico. O desenvolvimento do  $G_0$  e RCS não foi uniforme durante os períodos de cura, sendo mais acentuado entre 14 e 28 dias e com uma

redução da taxa de desenvolvimento entre 28 e 90 dias, o que indica estabilização das reações pozolânico devido ao consumo dos reagentes disponíveis, ou seja, fixação da cal pelos aluminossilicatos do metacaulim (WANG et al., 2021). Mostram também a influência ligeiramente mais acentuada que a umidade exerce na RCS do que no  $G_0$ , onde se verifica que a resistência aumentou da umidade de 8% para 10%, permanecendo praticamente constante até 12% e depois decaindo com teores de umidade maiores. Uma vez que os graus de saturação foram elevados (maiores que 85%) devido ao procedimento de imersão, a sucção teve influência insignificante na resistência. Dessa forma, o efeito da umidade na RCS provavelmente está relacionado a estrutura do material (arranjo das partículas) formado na moldagem dos espécimes usando diferentes teores de umidade, o que também influencia como as ligações cimentícias se desenvolvem no interior do material (BRUAND e PROST, 1987; GUEDES, 2024).

De forma geral se observa que, em um nível de significância de 5%, todos os fatores individuais ( $\gamma_d$ ;  $\omega$ ; e tempo de cura) afetaram estatisticamente as respostas de rigidez e resistência das misturas de rejeito com aglomerante pozolânico, o que implica que alterar seus níveis dentro da faixa estudada influencia efetivamente o  $G_0$  e a RCS. As interações tempo de cura x umidade e tempo de cura x  $\gamma_d$  foram estatisticamente significativas para ambas as respostas, o que fisicamente indica que o desenvolvimento das reações pozolânicas, portanto da matriz cimentícia, é influenciada pelo teor de umidade e compactidade do meio, respectivamente.

Embora os principais fatores e suas interações tenham influenciado qualitativamente  $G_0$  e RCS de forma semelhante, quando se analise os gráficos de Pareto respectivos, o efeito quantitativo diferiu. A maior parte da resposta de rigidez de pequena deformação foi influenciada pela  $\gamma_d$ , tempo de cura, seguido pela interação do tempo de cura x  $\gamma_d$ , e na resposta de resistência foram tempo de cura,  $\gamma_d$  e umidade. Enquanto a umidade foi o terceiro fator mais influente em afetar a RCS, foi o quinto (e, último estatisticamente significativo) fator a influenciar a rigidez, sendo assim, verifica-se que a resistência é mais sensível às variações de umidade.

Apesar das diferenças observadas nos gráficos de Pareto, pode-se dizer que a umidade de compactação influencia as características de resistência a compressão simples e no módulo de cisalhamento inicial, onde o material quando compactado no ramo seco até a umidade ótima possui resultados mais favoráveis do que no ramo úmido em rejeitos de minério de ferro cimentados com material pozolânico, comportamento similar aos solos argilosos como descrito



por Lambe (1958) e Seed e Chen (1959) e também demonstrado por Consoli et.al. (2001), Bruschi (2023), Guedes (2024) e Tebecharini Neto (2024) em rejeitos de minério de ferro.

### 4.3 ENSAIOS TRIAXIAIS CONSOLIDADOS E DRENADOS (CID)

O estudo do comportamento cisalhante em ensaios triaxiais drenados realizados em corpos de prova de rejeito de minério de ferro sem cimentação e com cimentação (3% de metacaulim + 3% de cal hidratada), com variação de umidade e tensão confinante ( $\sigma'_3$ ) de 500 kPa, serão apresentados nesta seção, identificados conforme Tabela 40 abaixo. Estes ensaios tem o intuito de investigar melhor o efeito do teor de umidade de moldagem e a influência do ligante pozolânico na resposta mecânica do material na idade de 28 dias, pois foi o tempo de cura que obteve o maior incremento de resistência. Testes adicionais foram realizados em amostras cimentadas e não cimentadas sob  $\sigma'_3$  de 250 e 1000 kPa nas respectivas umidades ótimas para análise do ângulo de atrito e intercepto coesivo.

*Tabela 40- Identificação das amostras ensaiadas no triaxial.*

Identificação	Idade de ensaio (dias)	Aglomerante pozolânico (S ou N)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ teórica (%)	$\omega$ real (%)	Tensão confinante (kPa)	Índice de vazios inicial (%)
RJ_4%_500kPa	0	N	19	4	3,91	500	0,53
RJ_7%_500kPa	0	N	19	7	6,6	500	0,52
RJ_9%_500kPa	0	N	19	9	8,83	500	0,51
RJ_11%_500kPa	0	N	19	11	10,75	500	0,53
RJ_13%_250kPa	0	N	19	13	12,61	250	0,53
RJ_13%_500kPa	0	N	19	13	12,68	500	0,52
RJ_13%_1000kPa	0	N	19	13	12,40	1000	0,55
RJ_15%_500kPa	0	N	19	15	14,72	500	0,54
5%_19_500kPa	28	S	19	5	4,66	500	0,55
8%_19_500kPa	28	S	19	8	7,34	500	0,55
10%_19_500kPa	28	S	19	10	9,11	500	0,54
12%_19_250kPa	28	S	19	12	10,98	250	0,55
12%_19_500kPa	28	S	19	12	10,98	500	0,51
12%_19_1000kPa	28	S	19	12	11,08	1000	0,53
13%_19_500kPa	28	S	19	13	11,90	500	0,54
14%_19_500kPa	28	S	19	14	12,67	500	0,53
15%_19_500kPa	28	S	19	15	13,65	500	0,54

### 4.3.1 Comportamento tensão-deformação - 28 dias.

Como nos resultados da análise estatística se verificou que a interação de segunda ordem da “umidade x  $\gamma_d$ ” não foi significativo (RCS e  $G_0$ ), ou seja, resultados com comportamentos semelhantes entre os dois pesos específicos utilizados, optou-se em realizar estes ensaios somente com um peso específico aparente seco de moldagem de 19 kN/m<sup>3</sup>, pois seria a mais econômica a ser executada, considerando a aplicação em campo. As umidades para os ensaios foram delimitadas com o acréscimo de mais uma umidade no ramo seco (5%), para verificar o comportamento da influência da água na cimentação do material, visto que a reação pozolânica é por hidrólise, e limitando a umidade de 15% no ramo úmido, pois se verificou nos ensaios de RCS e  $G_0$  que na moldagem com 16% de umidade ocorreu exsudação excessiva do material. Portanto, nesta seção serão expostos os resultados referentes aos ensaios de compressão triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID), realizados em corpos de prova de rejeito de minério de ferro com aglomerante pozolânico para uma idade de cura de 28 dias e nas umidades teóricas de moldagem 5%, 8%, 10%, 12%, 13%, 14% e 15%. Nesta etapa o teor de aglomerante permaneceu de 3% de cal hidratada e 3% de metacaulim e a tensão efetiva empregada foi de 500kPa em todas as umidades ensaiadas, para se verificar a influência do teor de umidade nos resultados obtidos (Figuras 46 e 47). Foram moldados corpos de prova<sup>1</sup> com cura submersa em água destilada com temperatura controlada de 23±1° C para restringir uma possível influência da variação da temperatura ambiente no desempenho dos corpos de prova, visto que foram moldados e ensaiados no período do inverno.

A Figura 48 apresenta as curvas tensão-deformação axial obtidas nos corpos de prova cimentados com aglomerante pozolânico na tensão de confinamento de 500 kPa nas amostras identificadas na Tabela 40.

---

<sup>1</sup> Corpos de prova moldados em 16 de junho de 2023 e ensaiados a partir do dia 14 de julho de 2023.

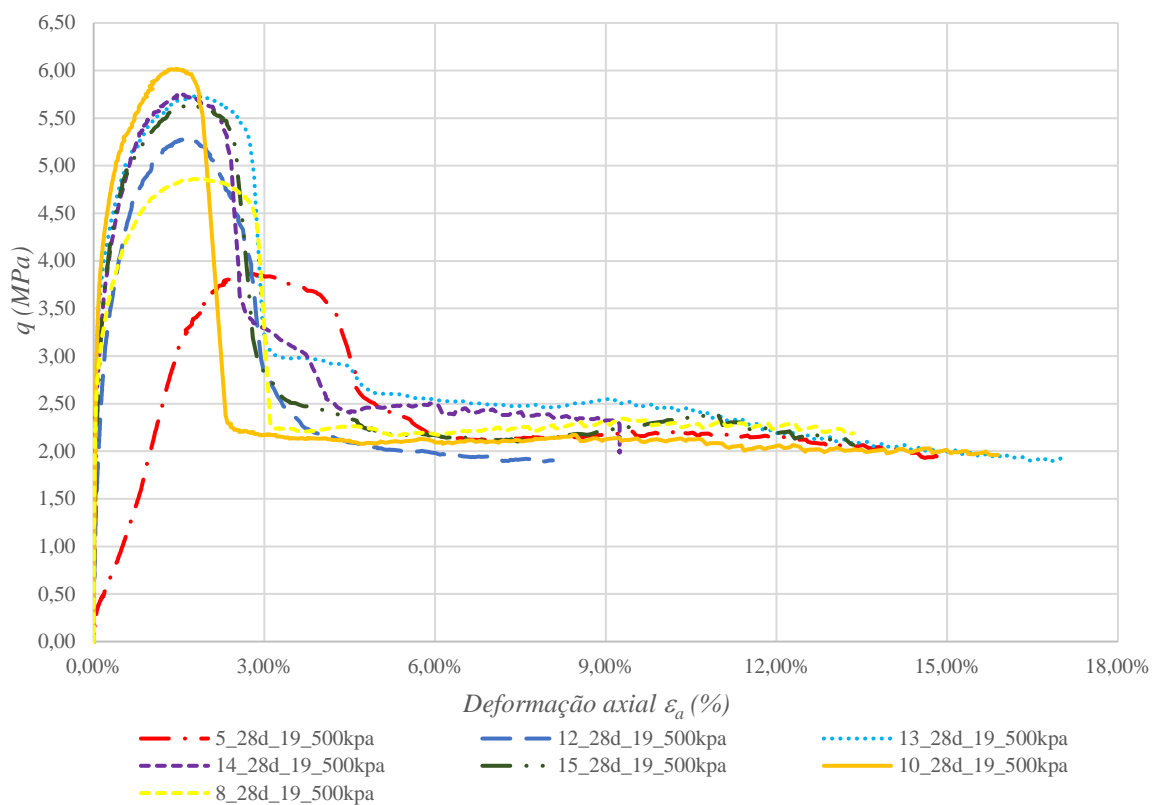


Figura 48 - Comportamento  $q \times \varepsilon_a$  do rejeito cimentado (CID) aos 28 dias e  $\gamma_d$  de moldagem de 19 kN/m<sup>3</sup> e cura controlada em 23±1°C.

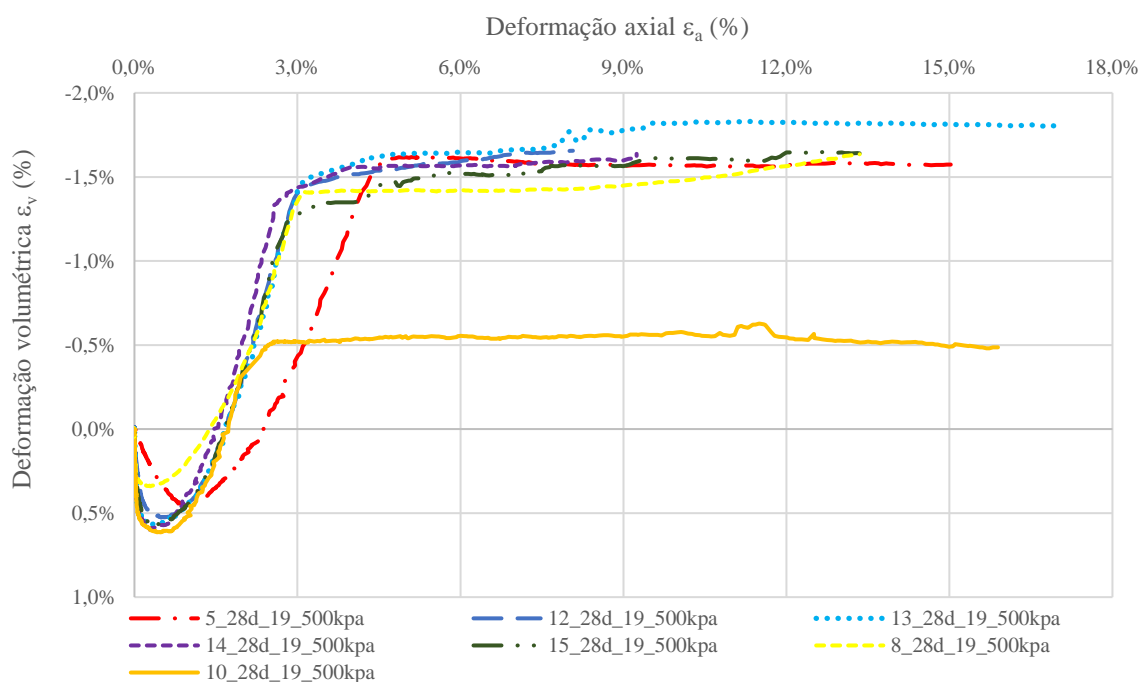


Figura 49 - Comportamento  $\varepsilon_v \times \varepsilon_a$  do rejeito cimentado (CID) aos 28 dias e  $\gamma_d$  de moldagem de 19 kN/m<sup>3</sup> e cura controlada em 23±1°C.

Independente do teor de umidade, todos os corpos de prova testados cimentados apresentaram uma resposta frágil, caracterizada por um pico de tensão desviatória definido ( $q_{max.}$ ), seguido por uma diminuição acentuada na tensão desviadora pós-pico e logo após com o nivelamento das curvas tensão-deformação axial, comportamento típico de materiais cimentados onde tem-se inicialmente uma parcela friccional atuante seguido pelo desempenho da parcela de cimentação que é mobilizado, amplamente referido em bibliografias.

Inicialmente, quando uma carga é aplicada a um solo ou material, a resistência ao movimento é proporcionada pela fricção entre as partículas. Essa resistência é chamada de "parcela friccional". A fricção é dependente da textura e da umidade do solo, além de outros fatores, como a pressão aplicada. À medida que a carga continua a ser aplicada, a parcela friccional pode se esgotar, e a cimentação começa a ser mobilizada. Isso significa que a resistência do material não é apenas devida à fricção, mas também à coesão proporcionada pela cimentação através da reação pozolânica, neste caso específico. Considerando que a umidade ótima de maior densidade aparente seca é 11,85% pelo Proctor Normal, verifica-se que o melhor desempenho (resistência de pico e rigidez) obtido no ensaio foi no ramo seco com teor de umidade teórica de 10% e real de ensaio de 9,11% e, portanto, em torno de 2% para o lado seco do teor ideal de umidade, conforme é citado por Consoli et. al. (2001). Porém abaixo desta umidade os demais corpos de prova do ramo seco (5% e 8%) não tiveram desempenhos satisfatórios e ficando inclusive inferiores aos do ramo úmido. Percebe-se que há um limite mínimo de umidade obrigatória que é necessária para promover as reações pozolânicas por hidrólise no material cimentado possibilitando assim o desenvolvimento dos géis cimentantes. Abaixo desta umidade, a solubilização ideal dos constituintes é impedida pela baixa quantidade de água adicionada, prejudicando desta forma a reação pozolânica.

Em relação à variação volumétrica, a Figura 49 apresenta o comportamento ao longo do cisalhamento para as diferentes condições de umidade. É possível observar que todas as amostras apresentam uma compressão inicial seguida de uma tendência dilatante muito próximas e quando a resistência cisalhante final é aproximada, a curva se nivela indicando uma tendência a deformação volumétrica constante. Porém, cabe salientar ainda que a dilatância do ponto 10% de umidade atingiu o ponto de constância mais abaixo dos demais resultados, o que pode estar relacionado com a localização das deformações no corpo de prova durante o cisalhamento desta amostra, característica de materiais densos.

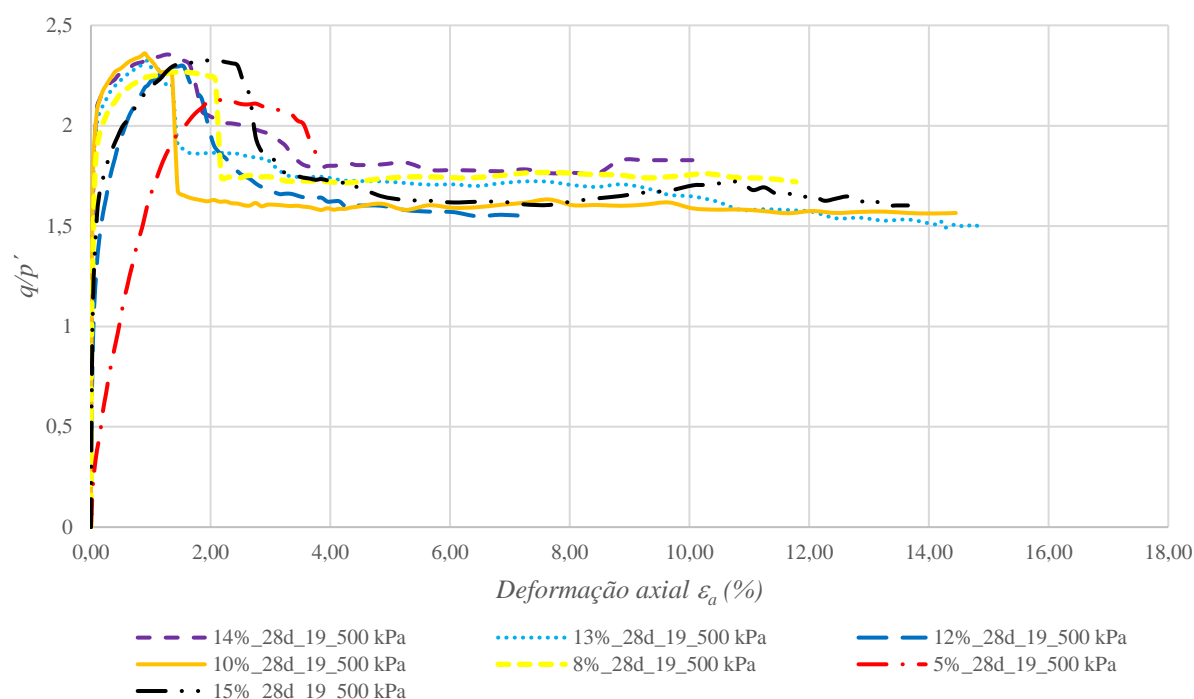


Figura 50 - Comportamento  $q/p'$  x  $\varepsilon_a$  do rejeito cimentado (CID) aos 28 dias e  $\gamma_d$  de moldagem de  $19 \text{ kN/m}^3$  e cura controlada em  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ .

Analisando o comportamento tensão-deformação normalizado ( $q/p'$  versus  $\varepsilon_a$ ) apresentado na Figura 50, verifica-se que a variação de resultado de pico entre as umidades reduz comparada ao gráfico da Figura 48, pois todos tendem a um valor de pico muito próximo. Somente o teor de 5% que possui um desempenho fora da tendência, e isso em decorrência do baixo teor de umidade adicionado que impediu, de forma ideal, a reação pozolânica no material. Dessa forma pode-se verificar que a variação de umidade de 8 a 15% não influenciou significativamente o desempenho do material no ensaio de triaxial, excetuando-se as umidades mais baixas do ramo seco que foram prejudicadas pela falta de umidade para desencadear as reações pozolânicas.

#### 4.3.2 Resultados de corpos de prova com rejeito não estabilizado

Nesta seção serão expostos os resultados referentes aos ensaios de compressão triaxiais drenados (CID), realizados em corpos de prova de rejeito de minério de ferro não estabilizado diferentes umidades teóricas de moldagem (4, 7, 9, 11, 13 e 15%). O peso específico aparente seco adotado foi de  $19 \text{ kN/m}^3$  e a tensão efetiva empregada foi de 500 kPa.

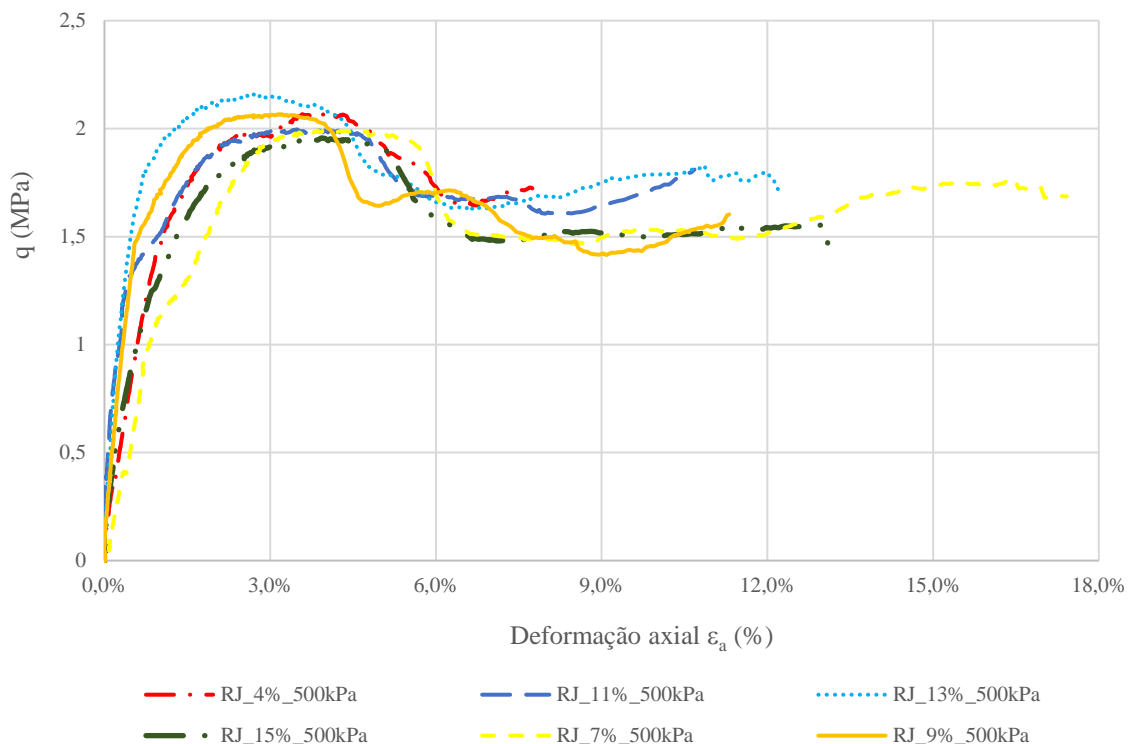


Figura 51 - Comportamento  $q \times \varepsilon_a$  do rejeito sem cimentação (CID) com  $\gamma_a$  de moldagem de  $19 \text{ kN/m}^3$ .

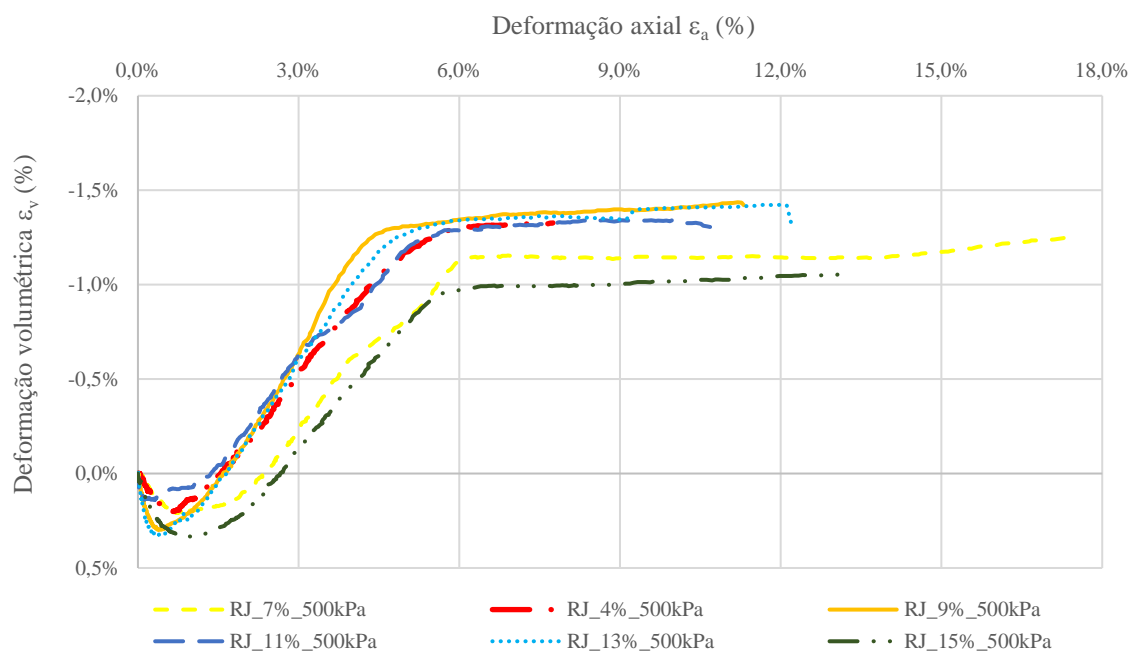


Figura 52 - Comportamento  $\varepsilon_v \times \varepsilon_a$  do rejeito sem cimentação (CID) e  $\gamma_a$  de moldagem de  $19 \text{ kN/m}^3$ .

Independente do teor de umidade, novamente, todos os corpos de prova testados não cimentados apresentaram uma resposta frágil, caracterizada por um pico de tensão desviatória

definido ( $q_{max.}$ ), seguido por uma queda na tensão desviadora pós-pico, menos acentuada do que no material cimentado e logo após com o nivelamento das curvas tensão-deformação axial. Considerando que a umidade ótima é 12,77% pelo Proctor Normal, verifica-se que o melhor desempenho (resistência de pico e rigidez) obtido no ensaio foi na umidade ótima com teor de umidade teórica de 13% e umidade real de 12,68% conforme demonstra a Figura 51.

A Figura 52 mostra o comportamento da deformação volumétrica-deformação axial para o rejeito sem cimentação. Verifica-se inicialmente uma tendência contrativa seguida de comportamento dilatante. O comportamento volumétrico é semelhante para todas as umidades investigadas, sendo possível notar um leve aumento nas deformações volumétricas para o ramo úmido.

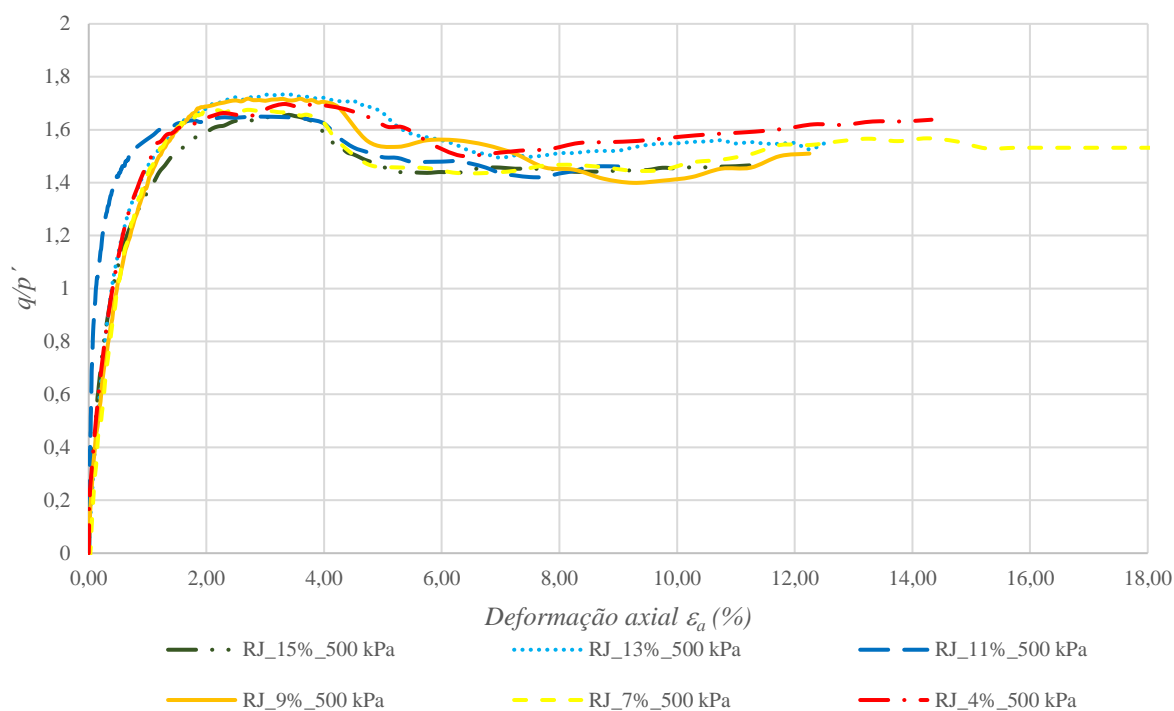


Figura 53 - Comportamento  $q/p' \times \varepsilon_a$  do rejeito sem cimentação (CID) e  $\gamma_d$  de moldagem de 19  $kN/m^3$ .

Analisando o comportamento tensão-deformação normalizado ( $q/p'$  versus  $\varepsilon_a$ ) apresentado na Figura 53, verifica-se que a variação de resultado de pico entre as umidades reduz comparada ao gráfico da Figura 51, pois todos tendem praticamente a um mesmo valor de pico. Dessa forma pode-se verificar que a variação de umidade de 4 a 15% não influenciou significativamente a resistência do material não cimentado

### 4.3.3 Comparação entre os resultados cimentados e não cimentados

As Figuras 54 e 55, demonstram plotados os resultados cimentados e não cimentados nas diversas umidades ensaiadas.

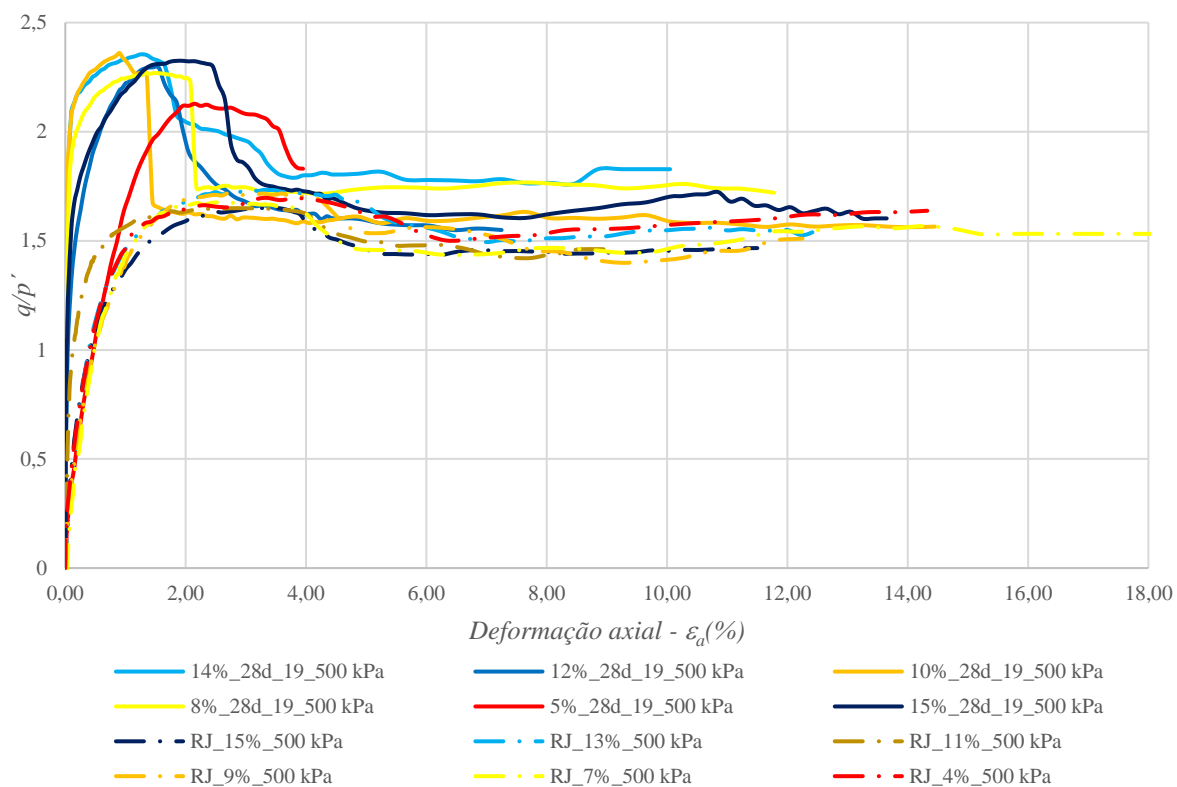


Figura 54 - Comportamento  $q/p' \times \varepsilon_a$  do rejeito cimentado aos 28 dias e não cimentado (CID), com  $\gamma_d$  de moldagem de  $19 \text{ kN/m}^3$ .



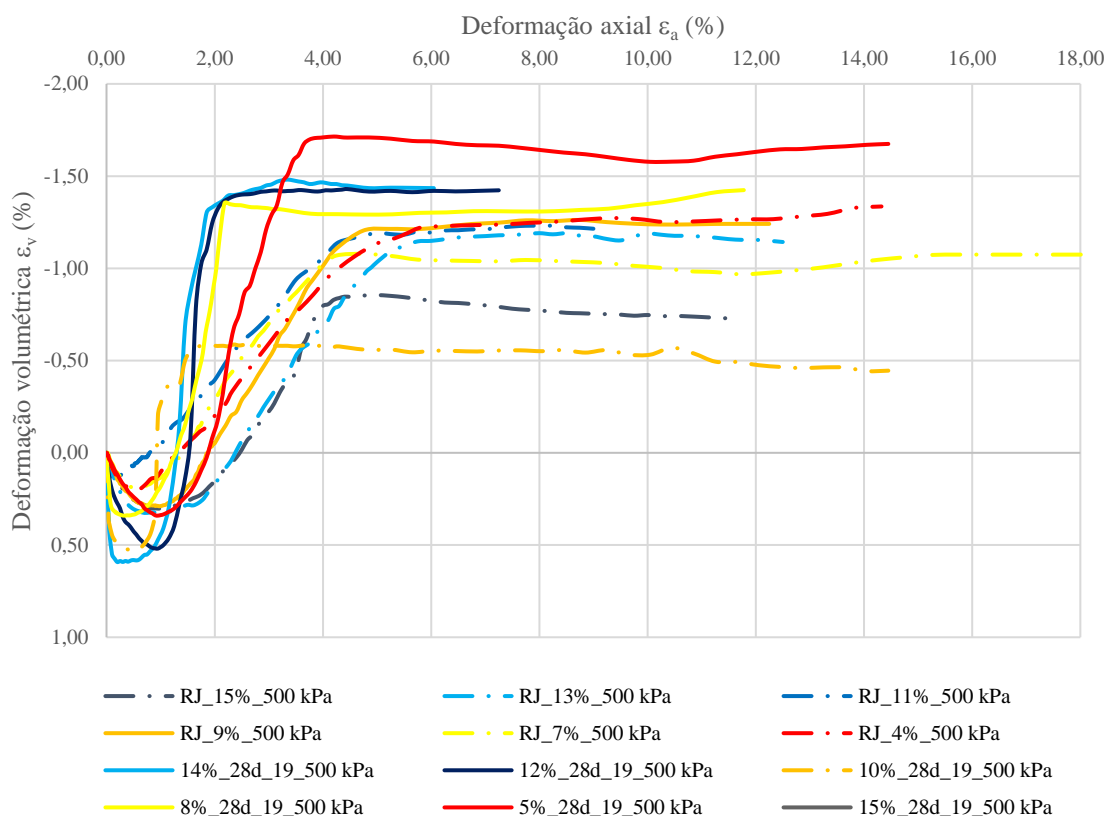


Figura 55 - Comportamento  $\varepsilon_v$  x  $\varepsilon_a$  do rejeito com e sem cimentação (CIU) e  $\gamma_d$  de moldagem de 19 kN/m<sup>3</sup>.

Pode-se perceber que, independentemente da umidade, todos os espécimes testados, cimentados ou não, apresentaram uma resposta frágil caracterizada por um pico de tensão desviadora definida ( $q_{max}$ ), acompanhado por contração inicial seguida por dilatação. No entanto, tais aspectos foram mais evidenciados entre as amostras cimentadas, pois elas exibiram o comportamento típico de solos cimentados artificialmente: resposta mais rígida, resistência aumentada (evidenciada pelos maiores valores de  $q_{max}$ ) e maiores taxas de dilatação após a quebra da cimentação (CLOUGH et al., 1981; LADE; TRADS, 2014). Todos os corpos de prova apresentaram localização de deformações, evidenciada pela formação de uma banda de cisalhamento quando o  $q_{max}$  foi atingido.

Considerando as amostras cimentadas, o corpo de prova moldado usando o menor teor de umidade ( $\omega = 5\%$ ), apresentou uma matriz cimentícia subdesenvolvida em comparação aos outros, conforme indicado pela resposta menos rígida e valor de  $q_{max}$  significativamente menor. O teor de umidade de 5% é provavelmente insuficiente para garantir a hidratação adequada para o desenvolvimento completo das reações de cimentação durante o período de cura de 28 dias (CONSOLI et al. 2007). No entanto, o teor de umidade teve uma influência

menor no  $q_{max}$ . para valores de  $\omega$  maiores que 5%, conforme pode-se verificar na Figura 46 ( $q_{max}$ . variando de 4,9 a 6,00 MPa). Além disso, a variação nos valores de  $q_{max}$  para  $\omega$  maior que 8% é pequena (5,30 a 6,00 MPa) no contexto de ensaios triaxiais, o que dificulta o estabelecimento de uma tendência  $q_{max}$ . x  $\omega$ . O mesmo se aplica à rigidez (até  $q_{max}$ .) e à dinâmica do comportamento de variação volumétrica, apesar do espécime  $\omega = 5\%$ , não há uma tendência definida entre rigidez e taxa de compressibilidade/dilatação e  $\omega$ . Para os espécimes não cimentados (Figura 49), a influência do teor de umidade da moldagem foi ainda menor. As curvas  $q$ - $\epsilon_a$  inicialmente se sobrepuseram, e os valores de  $q_{max}$ . variaram de 2,00 a 2.15 MPa. Considerando a mudança de volume, os espécimes moldados com maiores teores de umidade pareceram ligeiramente mais compressíveis, embora todos os dados sejam semelhantes.

E por fim, quando comparados os ensaios triaxiais do rejeito cimentado com o não cimentado nota-se claramente que os rejeitos cimentados possuem maior resistência e rigidez (Figura 54) e uma maior tendência dilatante no comportamento volumétrico (Figura 55).

#### 4.3.4 Envoltória de resistência

Realizada as análises da influência da umidade no comportamento tensão x deformação axial e no comportamento deformação volumétrica x deformação axial do material cimentado e não cimentado com tensão de confinamento de 500 kPa, foram executados ensaios triaxiais adicionais moldados nas umidades ótimas (13% sem cimentação e 12% cimentado) com tensões de confinamento complementares de 250 kPa e 1000 kPa para a determinação da envoltória de resistência dos materiais.

A Figura 56 e 57, apresentam os resultados de tensão x deformação axial e deformação volumétrica x deformação axial para as três tensões de confinamento.

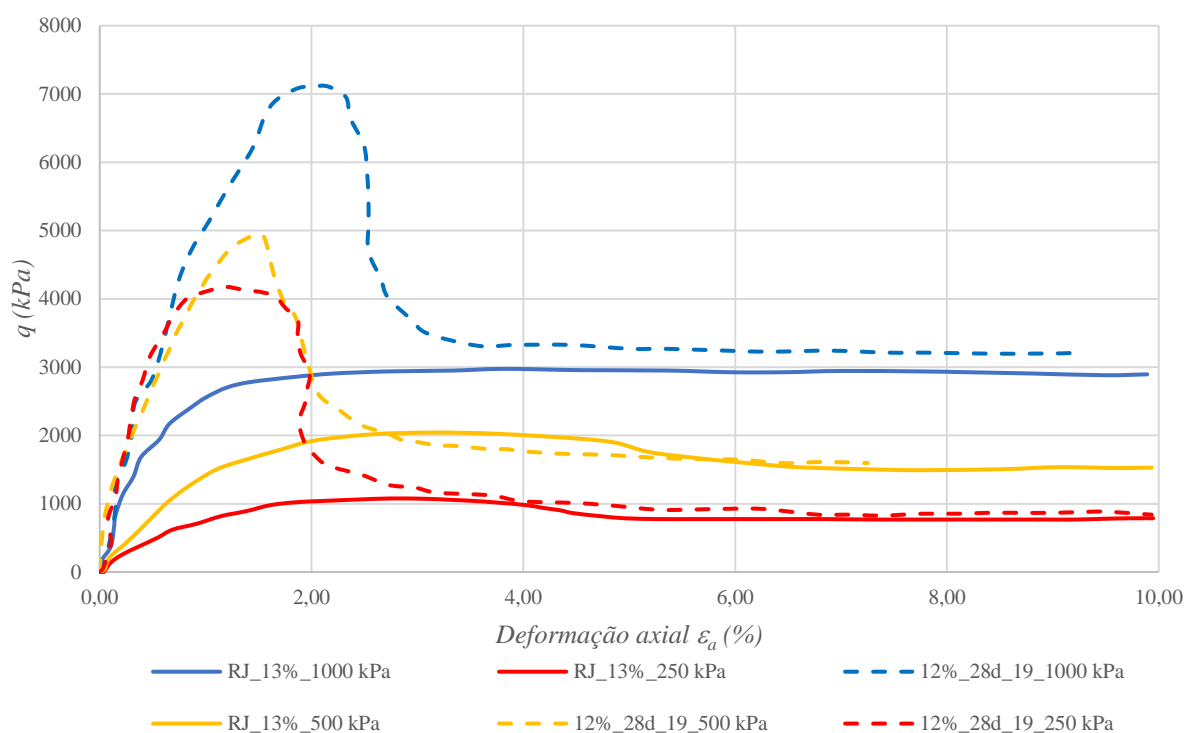


Figura 56 - Comportamento  $q \times \varepsilon_a$  do rejeito com e sem cimentação (CID) com  $\gamma_d$  de moldagem de  $19 \text{ kN/m}^3$  e tensões de confinamento de 250 kPa, 500 kPa e 1000 kPa.

Além da relação direta entre  $q_{max.}$ , compressibilidade e  $\sigma'_3$ , as Figuras 54 e 55 demonstram a influência do ligante pozolânico na resposta dos rejeitos de minério de ferro. Observa-se, pelas curvas de tensão x deformação axial, que para todos os ensaios a tensão desviadora na ruptura aumentou com o incremento da tensão de confinamento, sendo os espécimes cimentados os mais rígidos e resistentes, devido a maiores energias necessárias para quebrar a cimentação.

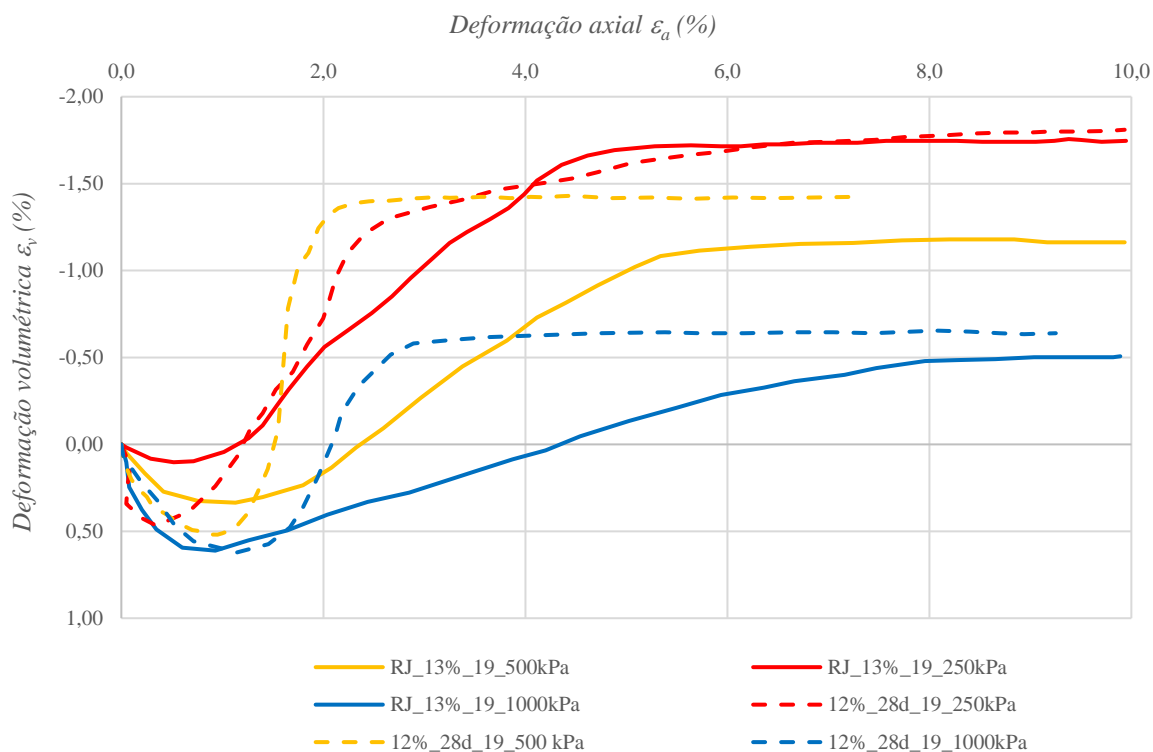


Figura 57 - Comportamento  $\varepsilon_v$  x  $\varepsilon_a$  do rejeito com e sem cimentação (CID) e  $\gamma_d$  de moldagem de  $19 \text{ kN/m}^3$  e tensões de confinamento de 250 kPa, 500 kPa e 1000 kPa

No comportamento deformação volumétrica x deformação axial, pode-se observar que as maiores deformações volumétricas compressivas ocorreram nas maiores tensões de confinamento e que o material cimentado apresenta maior tendência dilatante.

A partir das tensões desviadoras medidas na ruptura para cada tensão efetiva aplicada, pode-se traçar o círculo de Mohr que descreve o estado de tensão dos corpos de prova na sua ruptura. O Critério de ruptura de Mohr-Coulomb, pode ser obtido traçando uma linha tangente ao círculo de Mohr e passando pela origem, normalmente nos casos de materiais que não possuem plasticidade e coesão, que é o caso do rejeito de minério de ferro. Neste caso a inclinação do critério de ruptura é o próprio ângulo de atrito interno efetivo do solo.

Neste trabalho foi definido trabalhar somente no plano  $s' \times t$  para a obtenção do intercepto coesivo e do ângulo de atrito interno ( $c'$  e  $\phi'$ ).

A Figura 58 apresenta as envoltórias de resistência efetivas no espaço  $s' \times t$  para os ensaios triaxiais drenados com e sem cimentação nas tensões aplicadas de 250 kPa, 500 kPa e 1000 kPa.

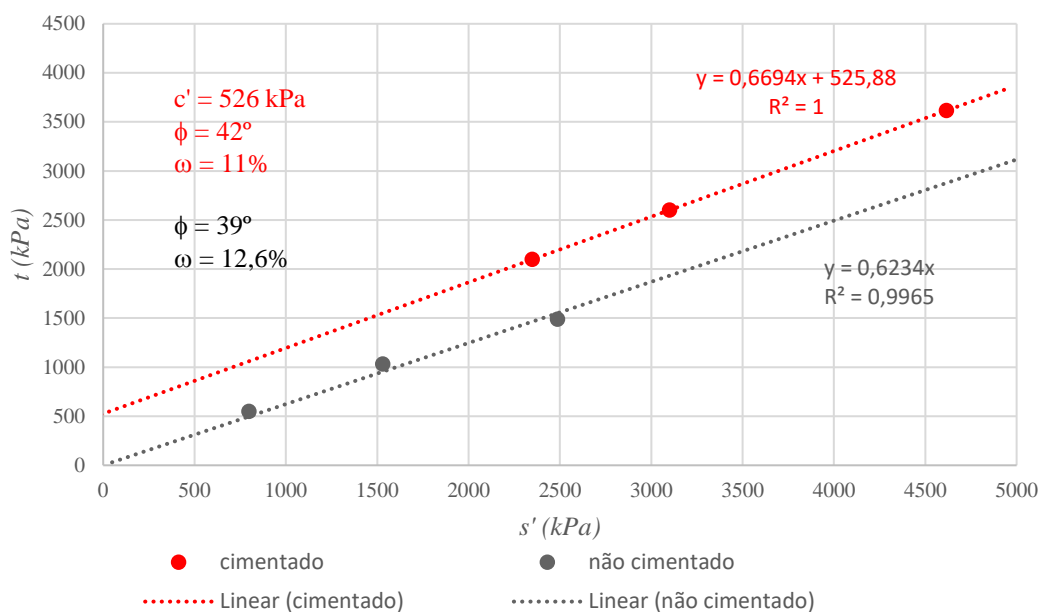


Figura 58 - Envoltória de pico do rejeito sem cimentação e com cimentação na idade de 28 dias (CID) e  $\gamma_a$  de moldagem de  $19 \text{ kN/m}^3$ .

Através dos pontos máximos obtidos é possível analisar as envoltórias de pico do material cimentado e sem cimentação. Percebe-se que com a adição do agente pozolânico houve um aumento do ângulo de atrito interno de  $39^\circ$  para  $42^\circ$  (aumento de 7,69%), como surgimento de um intercepto coesivo de 526 kPa para o material cimentado.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo geral estudar a influência da variação da umidade nas propriedades mecânicas (resistência a compressão simples, módulo cisalhante inicial e resistência ao cisalhamento) no rejeito de minério de ferro estabilizado com aglomerante pozolânico (metacaulim e cal hidratada caulinítica), contribuindo com o estado da arte sobre seu potencial de melhoramento para sua disposição em grandes pilhas de rejeitos compactados como alternativa de substituição de barragens de rejeitos, principalmente a montante. As conclusões acerca dos resultados são:

- A densidade e o período de cura influenciaram positivamente a rigidez e a resistência das misturas de rejeito de minério de ferro cimentado, indicando que os mecanismos dos quais dependem são afetados de forma semelhante por mudanças de  $\gamma_d$  e tempo de cura. O aumento da densidade de compactação aumenta o grau de intertravamento e a área de contato interparticular, o primeiro favorecendo principalmente a resistência e o segundo a rigidez.
- O material obteve ganhos significativos de  $G_0$  em ambas as densidades de compactação estudadas (19,0 e 20,0 kN/m<sup>3</sup>), com acréscimo de  $G_0$  entre 7 e 90 dias de 1073% na densidade de 19,0 kN/m<sup>3</sup> e de 800% na densidade de 20,0 kN/m<sup>3</sup>. A diferença de  $G_0$  média entre as densidades ficou em torno de 33% em favor da maior densidade.
- O material obteve ganhos significativos de RCS em ambas as densidades de compactação estudadas (19,0 e 20,0 kN/m<sup>3</sup>), onde se verificou ganhos na resistência a compressão simples de 1084% entre as idades de 7 e 90 dias na densidade 19,0 kN/m<sup>3</sup> e de 870% na densidade de 20,0 kN/m<sup>3</sup> e a diferença de resistência média entre as densidades ficou em torno de 27,5% a favor da maior densidade.
- A reação pozolânica gerada pela cal hidratada com o metacaulim na produção de géis cimentantes (CSH, CAH, CASH) depende do tempo de cura (TC), entre outros aspectos, como a temperatura de cura, superfície específica e composição química dos materiais, sendo 28 dias o que mais impactou em ganhos de resistência, pois

auxiliou no desenvolvimento dos produtos de cimentação que ligam as partículas incrementando sua adesão área de contato e rigidez.

O desenvolvimento de  $G_0$  e RCS não foi uniforme durante o período de cura, sendo mais acentuado entre 14 e 28 dias. Essa taxa de desenvolvimento diminuiu de 28 para 90 dias, indicando uma decadência (ou estabilidade) das reações pozolânicas devido ao consumo dos reagentes disponíveis.

- Em um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, todos os fatores individuais ( $\gamma_d$ ,  $\omega$  e tempo de cura) afetaram estatisticamente as respostas de rigidez e resistência das misturas de rejeito/ligante, o que implica que alterar seus níveis dentro da faixa estudada influencia efetivamente  $G_0$  e RCS. As interações  $TC*\omega$  e  $TC*\gamma_d$  foram estatisticamente significativas para ambas as respostas: fisicamente, elas indicam que o desenvolvimento das reações pozolânicas, portanto da matriz de cimento, é influenciado pelo teor de umidade e compactidade do meio, respectivamente. Em contraste, as interações  $\omega*\gamma_d$  e  $TC*\gamma_d*\omega$  estavam longe da significância estatística (valor de  $p \gg 0,05$ ),  $\omega*\gamma_d$  sinalizando que estrutura formada de 19 kN/m<sup>3</sup> e 20 kN/m<sup>3</sup> não diferiu substancialmente considerando os diferentes valores de  $\omega$ .

- Embora os principais fatores (e suas interações) tenham influenciado qualitativamente  $G_0$  e RCS de forma semelhante, o efeito quantitativo diferiu, conforme demonstrado nos gráficos de Pareto.  $\gamma_d$ , TC, seguido por  $CP*\gamma_d$ , influenciaram a maior parte da resposta de rigidez de pequena deformação e TC,  $\gamma_d$  e  $\omega$  afetaram a maior parte da resposta de resistência. Enquanto  $\omega$  foi o terceiro fator mais influente em afetar o RCS, foi o quinto (e último estatisticamente significativo) fator em influenciar a rigidez: a resistência é mais sensível às variações de  $\omega$ . Sendo que os graus de saturação foram elevados (maiores que 85%) devido ao procedimento de imersão antes dos ensaios, a sucção teve influência insignificante na resistência, assim, o efeito de  $\omega$  na RCS provavelmente está relacionado a estrutura interna formada, ou seja, arranjo de partículas, criado ao montar os espécimes usando diferentes valores de  $\omega$ , o que também influencia como as ligações do cimento se desenvolvem.

- Os ensaios de compressão triaxial consolidado drenado (CID) foram realizados para o aprofundamento do estudo do efeito da  $\omega$  e influência do agente cimentante na resposta mecânica do material e verificou-se que, independentemente da  $\omega$ , todos

os espécimes testados, cimentados ou não, apresentaram uma resposta frágil caracterizada por um pico de tensão desvio definido ( $q_{max}$ ), seguido por amolecimento da deformação pós-pico. Isso foi acompanhado por contração inicial seguida por dilatação. No entanto, tais aspectos foram mais evidenciados entre as amostras cimentadas, pois elas exibiram o comportamento típico de solos cimentados artificialmente: resposta mais rígida, resistência aumentada (evidenciada pelos maiores valores de  $q_{max}$ ) e maiores taxas de dilatação após a quebra da cimentação. Todos os corpos de prova apresentaram localização de deformação, evidenciada pela formação de uma banda de cisalhamento quando o  $q_{max}$  foi atingido.

- Considerando as amostras cimentadas, o corpo de prova moldado usando o menor teor de umidade ( $\omega = 5\%$ ) apresentou uma matriz de cimento subdesenvolvida em comparação aos outros, conforme indicado pela resposta menos rígida e valor de  $q_{max}$  significativamente menor. Um teor de umidade de 5% é provavelmente insuficiente para garantir a hidratação adequada para o desenvolvimento completo das reações de cimentação durante o período de cura de 28 dias.

- Embora foram apresentadas algumas diferenças nos dados  $G_0$  e RCS dos espécimes moldados com rejeito de minério de ferro com agente aglomerante pozolânico com  $\omega$  variando de 8% a 16%, como  $\omega$  era um fator estatisticamente significativo, tais diferenças foram menos importantes considerando os testes triaxiais. A influência das diferenças do arranjo estrutural das partículas interna do material, decorrentes da compactação em diferentes valores de  $\omega$  provavelmente diminuiu para condições totalmente saturadas e considerando o nível de confinamento aplicado. Além disso, os resultados triaxiais evidenciaram o aumento nas características de resistência (aumento de  $\phi' = 39^\circ$  para  $\phi' = 42^\circ$  e aparecimento de  $c' = 526$  kPa) trazidos pela adição do ligante.

- E por fim, os resultados da presente pesquisa chamaram a atenção para a resiliência do sistema de pilhas de rejeitos filtrados e compactados feito de rejeitos de minério de ferro misturados com o ligante à base de metacaulim e cal hidratada, principalmente ao considerar os dados de rigidez e resistência. Em outras palavras, variar a umidade de 8% a 15% (e manter o mesmo grau de compactação) não afetou substancialmente a resposta mecânica das misturas cimentadas em relação a  $G_0$ , RCS e  $q_{max}$ . Isso é essencial para condições de campo, onde o controle de umidade,



antes e durante a compactação, é um processo complexo para conceber adequadamente uma pilha de rejeitos. Assim, foi demonstrado que as características mecânicas permanecem dentro de uma faixa razoável (ou seja, não variam abruptamente) para variações de umidade na faixa de 8 a 15%. Este aspecto é desejável para situações práticas (em campo), onde a estrutura deve permanecer resiliente contra a variação de vários fatores, mesmo durante o estágio de construção da pilha seca.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a resposta do teste triaxial das misturas rejeito cimentado com aglomerante pozolânico em uma faixa de pressão mais abrangente, considerando também valores de teor de umidade adicionais no ramo seco e úmido.
- Investigar a influência de diferentes percentuais de aglomerante (abaixo e acima dos 3% utilizados de metacaulim e cal hidratada) acompanhada de investigação microestrutural (MEV e porosimetria por intrusão de mercúrio) para verificar e validar as diferenças estruturais de arranjo interno do material em decorrência da variação de umidade.
- Realizar estudos simulando o comportamento tensão-deformação em um estudo de caso.
- Estudar o comportamento do material com variação do peso específico aparente seco conforme ensaio de compactação.

## REFERÊNCIAS

- Abdulkarim, I. I., Umar, S. Y., Muhammed, A., & Yero, S. A. (30 de 06 de 2022). Effect of metakaolin on strength properties of lateritic soil intended. *Path of Science*, 8(ISSN 2413-9009 ), pp. 6001-6013. doi:10.22178/pos.82-11
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. (2023). *Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas - Ano Base 2021*. Coordenação técnica de Karina Andrade Medeiros. – Brasília: ANM, 2023. 23 p.; il. Ano Base 2021. Brasília: ANM.
- AHMED, M. D., & HAMZA, N. A. (2015.). Effect of metakaolin on the geotechnical properties of expansive soil. *Journal of Engineering*, 21, pp. 29-45.
- Al-Khalili, A. M., Ali, A. S., & Al-Taie, a. A. (2021). Effect of metakaolin and silica fume on the engineering properties of expansive soil. *2nd International Conference for Civil Engineering Science (ICCES 2021)*, (pp. 1-7). doi:10.1088/1742-6596/1895/1/012017
- ALMADA, B. S. (2021). *Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos*. Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais.
- ALVES, P. (2020). *Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens*. Minas Gerais: Dissertação (Mestrado), Programa de pós graduação em engenharia mineral da Universidade Federal de Ouro Preto.
- AMBROISE, J., MAXIMILIEN, S., & PERA, J. (1994.). Properties of metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials*, v. 1, n. 4, p.161-168.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1999). ASTM D 6276: Standart test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization. United States.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2003). ASTM C 618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *Annual Book of ASTM Standards. Vol.4, No.2*.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2019). ASTM D 8295: Standard test method for determination of shear wave velocity and initial shear modulus in soil specimens using bender elements. . Philadelphia.
- ANDRADE, L. C. (2014). *Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil*. Viçosa, MG: Tese (Doutorado).

- AQUINO, J., OLIVEIRA, M., & FERNANDES, M. (2004). *Flotação em coluna. Tratamento de minérios*. Rio de Janeiro: CETEM, 4 ed.
- ARAÚJO, A., PERES, A., & VIANA, P. (2006). *Teoria e prática do tratamento de minérios – flotação, o estado da arte no Brasil*. São Paulo: Signus.
- ARAÚJO, C. B. (2006). *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Programa de Pós-Graduação de Engenharia – UFRJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2017). *NBR 6459 Versão Corrigida: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2003). *NBR 7175: Cal Hidratada para argamassas – Requisitos*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2010). *NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2012). *NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2016). *NBR 6457 Versão Corrigida: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2016). *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2017). *NBR 6458 Versão Corrigida 2: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2018). *NBR 7181 Versão Corrigida 2: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2020). *NBR 7182 Versão Corrigida: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- BABU, N., & POULOSE, E. (Nov. de 2018). Effect of lime on soil properties: A review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Issue:11, Vol. 5, pp. 606-610.

- BALKIS, A. P. (2019). Effect of cement amount on CBR values of different soil. *European Journal of Science and Technology*, (16), pp. 809-815.
- BARATI, S., SHOURIJEH, P. T., SAMANI, N., & ASADI, S. (2020). Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: A case study on Golgohar mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 4151–4166. Fonte: <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01843-6>
- BASTOS, L., SILVA, G., MENDES, J., & PEIXOTO, R. (2016). Using iron ore tailings from tailing dams as road material. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Volume 28, Issue 10. Fonte: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001613](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001613)
- BECKETT, C., & CIANCIO, D. (2014). Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilised rammed earth materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 51, pp. 583-590, 2014.
- BEHAK, L. (2011). Performance of full-scale test section of low: Volume road with reinforcing base layer of soil-lime. *Transportation Research Record*, v. 2204, pp. 158-164.
- BELL, F. (1993). *Engineering treatment of Soils*. University of Natal, Durban, 1 st ed.: Published by E & FN Spon.
- BERGADO, D. T., ANDERSON, L. R., MUIRA, N., & BALASUBRAMANIAM, A. S. (1996). Soft ground improvement: In Lowland and Other Environments. *American Society of Civil Engineers*.
- BEZERRA, C. G. (2017). *Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento*. Dissertação (Mestrado); Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.
- BHATTACHARJA, S., BHATTY, J. I., & TODRES, H. A. (2003). Stabilization of clay soils by Portland cement or lime – A critical review of literature. *Portland Cement Association*, p. 60.
- BOCCAMINO, G. (2017). *Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeito desaguados de minério de ferro: Estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico*. Ouro Preto, MG: Dissertação (Mestrado); Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.
- Boszczowski, R. B. (2023). *Laboratório de mecânica dos solos – Ensaio Especiais*. São Paulo: Oficina de Textos.

- BRAGANÇA, S. R., & BERGMANN, C. P. (2010). *Materiais refratários e abrasivos*. (2 ed., Vol. 1). São Paulo: IBRACON - Materiais de Construção Civil e Princípios da Ciência e Engenharia de Materiais.
- BRASIL. (2010). Lei 12.305: Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para assuntos jurídicos.
- BRASIL. (2010). Lei 12.334. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais.
- BRUAND, A., & PROST, R. (1987). Effect of water content on the fabric of a soil material: An experimental approach. *Journal of Soil Science* 38, pp. 461–472. Fonte: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1987.tb02281.x>
- BRUSCHI, G. (2023). *Molding conditions effect on the geomechanical behavior of uncemented and cemented iron ore tailings under low and high confining stresses*. Porto Alegre, RS: Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BRYKOV, A. K. (2015). Hydration of Portland cement in the presence of highly reactive metakaolin. *Materials Sciences and Applications*. Vol. 6 - Ed. 5., pp. 391 – 400.
- CACCIUTTOLO, C., & VALENZUELA, F. (2022). Efficient use of water in tailings management: New technologies and environmental strategies for the future of mining. *Water*, v. 14, pp. 1-16.
- CAI, R. e. (2018). The early hydration of metakaolin blended cements by non-contact impedance measurement. *Cement and Concrete Composites*, v. 92, pp. 70-81.
- CAMPANHA, A. (2011). *Caracterização de minério de ferro para uso em pavimentação*. Viçosa, MG: Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa.
- CARNEIRO, A., & FOURIE, A. (2018). A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia. *Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics*, pp. 439-454.
- CHAVES, L., HEINECK, K., SCHEUERMANN, H., CHAVES, H., & al., e. (2023). Field and laboratory study of compacted filtered iron ore 1 tailings-Portland cement blends for dry stacking purposes. *ICE Geotechnical engineering*.
- CLIFTON, J. B. (1980). Use of waste materials and by-products in construction (Part I). *Resource Recovery and Conservation*, No. 5, pp. 139—160.

- CLOUGH, G., SITAR, N., & BACHUS, R. R. (1981). Cemented sands under static loading. *J Geotech Engrg Div 107*, pp. 799–817. Fonte: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001152>
- CONSOLI, N., CARVALHO, J., WAGNER, A., SCHEUERMANN FILHO, H., CARVALHO, I., CACCIARI, P., & SILVA, J. (2023a). Determination of critical state line (CSL) for silty-sandy iron ore tailings subjected to low-high confining pressures. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1–13.
- CONSOLI, N., FOPPA, D., FESTUGATO, L., & HEINECK, K. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133(2), pp. 197–205.
- CONSOLI, N., LOTERO, A., SCHEUERMANN FILHO, H., KHAJEH, A., DAASSI-GLI, C., VOGT, J., & SILVA, J. (2024). Effect of cement type on compacted iron ore tailings-binder response blends: A comparative study. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*.
- CONSOLI, N., PRIETTO, P., CARRARO, J., & HEINECK, K. (2001). Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 127(9), pp. 774–782.
- CONSOLI, N., SILVA, J., WAGNER, A., CARVALHO, J., BAUDET, B., COOP, M., . . . CACCIARI, P. (2023b). Critical state analysis of two compacted filtered iron ore tailings with different gradings and mineralogy at different stages of treatment. *Acta Geotechnica*,.
- CONSOLI, N., VOGT, J., SILVA, J., CHAVES, H., SCHEUERMANN FILHO, H., MOREIRA, E., & LOTERO, A. (2022). Behaviour of compacted filtered iron ore tailings– portland cement blends: new brazilian trend for tailings disposal by stacking. *Applied Sciences*, v. 12(836), pp. 1-18.
- CRYSTAL, C., CHORE, C., & EZAMA, I. (2018). Filter-pressed dry stacking: Design consideration based on practical experience. *Proceedings Tailings and Mine Waste*.
- DALLA ROSA, A. (2009). *Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal - (Mestrado em Engenharia)*. Porto Alegre, RS: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- EADES, J. G. (1966). Quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Board, National Research Council*, pp. 61-72.
- ESPÓSITO, T. J., & DUARTE, A. P. (2010). Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco. *Revista Escola de Minas*, v. 63, n. 2, pp. 393-398.

- EUROSOILSTAB . (2002). Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils: Design guide for soft soil stabilization. CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III).
- FARENZENA, H., & BRUSCHI, G. J. (2024). Iron ore tailings stabilization with alternative alkali-activated cement for dry stacking: mechanical and microstructural insights. *Can.Geotech. J.*61, pp. 649–667.
- FERNANDES, J. (2016). *Estudo da resistência e da deformabilidade de um perfil de solo laterítico não saturado a partir de ensaios triaxiais. Dissertação (Mestrado)*. Bauru, SP: Faculdade de Engenharia de Bauru. Universidade Estadual Paulista.
- FM5-410 - Hebib, S. and Farrell, E.R. (2012). *Soil stabilization for road and airfield. Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*. Stockholm: Balkema. Fonte: [www.itc.nl/~rossiter/Docs/FM5-410](http://www.itc.nl/~rossiter/Docs/FM5-410).
- FODA, T. e. (2022). Fine sand stabilization using metakaolin and bentonite. *Delta University Scientific Journal* 5, pp. 83 – 92.
- FOPPA, D. (2005). *Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. Dissertação (Mestrado)*. Porto Alegre, RS: Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FOURIE, A., VERDUGO, R., BJELKEVIK, A., TORRES-CRUZ, L., & ZNIDARCIC, D. (2022). Geotechnics of mine tailings: A 2022 State of the Art. *Australian Geomechanics Society*, pp. 121-183.
- FRANÇA, S. e. (2018). *Tratamento de minérios: Separação sólido-líquido*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia.
- Fundação Estadual Do Meio Ambiente. (2018). *Inventário de resíduos sólidos da mineração: ano base 2017*. Belo Horizonte: Feam.
- GALLO, G. (2005). *Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade. Dissertação (Mestrado)*. Minas Gerais: Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.
- GILLOT, J. (1968). Clay in engineering geology. *Elsevier Amsterdam*, p. 296.
- GOMES, A. C. (2017). *Estudo de aproveitamento de rejeitos de mineração. Dissertação (Mestrado)*. Minas Gerais: UFMG.
- GOMES, M. A., & PEREIRA, C. A. (2011). Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. *Rev. Esc. Minas [online]*. vol. 64. n.2, pp. 233-236.

- GORAKHKI, M., & BAREITHER, C. (2017). Unconfined compressive strength of synthetic and natural mine tailings amended with fly ash and cement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 143(7), 04017017.
- GUEDES, J., SILVANI, C., CARVALHO, J., WAGNER, A., SILVA, J., & CONSOLI, N. (2024). Mechanical behaviour of fibre-reinforced cemented iron ore tailings across the compaction curve. *Geotechnical and Geological Engineering*.
- GUERRA, F. (2019). Análise comparativa entre parâmetros de resistência obtidos por ensaios triaxiais e por correlação com N-SPT. *XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul - GEOSUL*.
- GUIMARÃES, J. E. (2002). *A cal: fundamentos e aplicações na Engenharia Civil*. São Paulo:: Pini.
- GUIMARÃES, N. (2011). *Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. Dissertação (Mestrado)*. Ouro Preto, MG: Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- GUIMARÃES, N. C., VALADAO, G. E., & PERES, A. (2012). Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. *Rem: Rev. Esc. Minas*, v. 65, n. 4, pp. 543-548.
- GURGEL, J. (2018). Compressibilidade e adensamento dos solos. Fonte: [https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/Marangon-Cap%  
Compressibilidade-e-Adensamento-2018-at%  
Compressibilidade-e-Adensamento-2018-at%  
Compressibilidade-e-Adensamento-2018-at%](https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/Marangon-Cap%c3%adtulo-03-Compressibilidade-e-Adensamento-2018-at%c3%a9-pag-90.pdf)
- HANDY, R. (1958). Cementation of soil minerals with portland cement. *Highw. Res. Board, Bull, 198*, pp. 55-64.
- HERZOG, A., & MITCHELL, J. K. (1963). Reactions accompanying stabilization of clay with cement. *Highway Research Record*, 36, pp. 146-171.
- HILT, G. H., & DAVIDSON, D. T. (1960). Lime Fixation in Clayey Soils. *Highway Research Board*, n.262, pp. 20-32.
- HU, L., WU, H., ZHANG, L., & ZHANG, P. &. (2017). Geotechnical properties of mine tailings. *Journal Materials in Civil Engineering*, 29 (2), pp. 1-10. doi:doi:.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736
- IBEIRO, L. S. (2016). *Estudo da distribuição dimensional de poros e da condutividade hidráulica de solos arenosos compactados e tratados com cal e cimento. Tese (Doutorado)*. Porto Alegre, RS: UFRGS, Escola de Engenharia, PPGECC.
- INGLES, O., & METCALF, J. ( 1972). *Soil stabilization – Principles and practice*. Sidney: Butterworths.



- INOCENTE, J. M. (2020). *Estudo da produção de metacaulim de alta reatividade em reator flash a partir de um caulim de elevada pureza. – Dissertação (Mestrado)*. Criciúma, SC: Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.
- Instituto Brasileiro De Mineração (IBRAM). (2016). *Gestão e manejo de rejeitos da mineração 1.ed.* Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM.
- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada Diagnósticos dos Resíduos Sólidos Urbanos. (2012). Relatório de pesquisa. Fonte: IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada Diagnósticos dos Resíduos Sólidos Urbanos. Relatório de pesquisa, disponível em: [http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos](http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos):  
[http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos](http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos)
- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Diagnósticos dos Resíduos Sólidos Urbanos. (2012). Relatório de pesquisa. Fonte: [http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)
- IPQ - NP 4220. (2010). *Pozolanas para betão, argamassas e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade*. Lisboa.
- JASKULSKI, F. M. (2022). *Análise do comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro submetido a ativação alcalina pelo método “One-Part”*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, RS: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- JESUS, C. (2008). Ferro/Aço. DNPM. Fonte: [https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3974](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3974)
- JIANG, X., LANGA, L., LIUA, S., MUA, F., WANGA, Y., ZHANG, Z., . . . LI, J. (2024). Stabilization of iron ore tailing with low-carbon lime/carbide slag-activated ground granulated blast-furnace slag and coal fly ash. *Construction and Building Materials*. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134946>
- JONES, H., & BOGER, D. V. (2012). Sustainability and waste management in the resource industries. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, pp. 10057–10065.
- JUNIOR, P. C. (2011). A Influência da adição de cal hidratada na resistência mecânica de pastas de metaculinita. *VII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar CESUMAR*.

- KELLER INC. (2011). *Improvement of weak soils by the deep soil mixing method*. Keller Bronchure. Fonte: <http://keller-foundations.co.uk/technique/deep-dry-soilmixing>
- LADE, P., & TRADS, N. (2014). The role of cementation in the behaviour of cemented soils. *Geotechnical Research* 1:111–132, pp. 111–132. Fonte: <https://doi.org/10.1680/gr.14.00011>
- LAMBE, T. (1958). The engineering behavior of compacted clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 84, pp. 1-35.
- LARA L. L. D., Q. B. (2018). *Estudo do comportamento de um solo com adição de rejeito de flotação de minério de ferro para utilização em camadas de pavimentos*. Gramado/RS: 32º ANPET – Congresso de pesquisa e ensino em transportes da ANPET.
- LEBERT, M. H. (1991). A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 19, pp. 275-256.
- LOPES JÚNIOR, L. (2007). *Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LOPES JÚNIOR, L. (2011). *Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal*. Tese (Doutorado). Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.
- LUZ, A. (2010). *Introdução ao tratamento de minérios*. 5ª edição. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia.
- MACHADO, F. (2003). Enciclopédia multimídia de minerais. [on-line]. Fonte: <https://museuhe.com.br>
- MAFESSOLI, M. (2022). *Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro Estabilizado com cimento Portland*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- MANJUNATHA, L., & SUNIL, B. (2013). Stabilization/solidification of iron mine tailings using cement, lime and fly ash. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 2321-7308.
- MASSAZZA, F. (1998). Pozzolana and pozzolanic cements. (P. C. Edition, Ed.) *Lea's chemistry of cement and concrete*, pp. MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: *Lea's chemistry of cement and concrete*. Edited by Peter C. Hewlett. Fourth Edition. 1998.

- MASUKA, G. P. (2013). Soil Stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review. *Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering, Luleå University of Technology*.
- MEDEIROS, A. A., SILVA, M. F., & FURLAN, A. P. (2019). Avaliação comparativa dos métodos de dosagem do pH e de Thompson para estabilização com cal de dois solos tropicais. *33º congresso de pesquisa e ensino em transporte da ANPET*, p. 2040 a 2051.
- MEDINA, E. A. (2011). *Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio - Dissertação (Mestrado)*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- MILLER, R., & COLLINS, R. (1976). Waste materials as potential replacements for highway aggregates. *National Cooperative Highway Resource Programme. Report No. 166. National Academy of Science*.
- MITCHELL, J. K. (1981). Soil improvement - State of the art. *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, pp. 509-565.
- MONTGOMERY, D. (2017). *Design and analysis of experiments*. New York: John Wiley and Sons.
- MORAIS, C., ALBUQUERQUE, R., & LADEIRA, A. (2014). Processos físicos e químicos utilizados na indústria mineral. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. N° 8*, pp. 9-17.
- MULLINS, C., MACLEOD, D., NORTHCOTE, K., TISDALL, J., & YOUNG, I. (1990). Hardsetting soils: Behavior, occurrence and management. *Adv. Soil Sci.*, 11, pp. 37-108.
- NAZARIKUMAR. (2012). Silica and Calcium effect on Geo-Technical Properties of Expansive soil Extracted from Rice Husk Ash and Lime. *International Conference on Environment Science and Engineering, Vol. 32*, pp. 119-123.
- NIERWINSKI, H. P. (2019). *Caracterização e Comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração. Tese (Doutorado)*. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- OLIVEIRA, A. (2021). *Análise tensão-deformação em uma pilha de rejeito filtrado de grandes dimensões. Dissertação (mestrado)*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil.
- OLIVEIRA, S. (2022). *Influência do estado de tensão na obtenção dos parâmetros de estado crítico de rejeitos filtrados de minério de ferro. Dissertação (Mestrado)*. Ouro Preto, MG: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto.

- OLIVEIRA, T. M. (2013). *Caracterização de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com adição de cimento com vistas à aplicação em estradas e aterros. Dissertação de mestrado*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa.
- PAKBAZ, M. S., & ALIPOUR, R. (2012). Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. *Applied Clay Science*, 67–68, pp. 1–4.
- PEDROSO, C. L. (2020). *Compósitos à base de rejeito do minério de ferro, resíduo de concreto, resíduos da produção de celulose e resíduo da produção da cal - Tese (Doutorado)*. Curitiba, PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- PERES, A., ARAUJO, A., EL-SHALL, H., ZHANG, P., & SCHLANZ, J. (2007). Froth flotation: A century of innovation. *Colorado: Flotation Plant Practice*, pp. 845-868.
- PIMENTA, J. (2011). The drained stacking of granular tailings: A disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass. *Proceedings Tailings and Mine Waste*, p. 11.
- PINTO, C. (2000). *Curso básico de mecânica dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos.
- PRESOTTI, E. (2002). *Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. Dissertação (Mestrado)*. Ouro Preto, MG: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- QUARESMA, L. (2001). *Ferro - Balanço mineral Brasileiro*. Fonte: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-ferro>
- RISSOLI, A., PEREIRA, G., MENDES, A., SCHEUERMANN FILHO, H., CARVALHO, J., WAGNER, A. C., . . . CONSOLI, N. (2024). Dry stacking of filtered iron ore tailings: Comparing onfield performance of two drying methods. *Geotech. Geol. Eng.* 42, pp. 2937–2948. Fonte: <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02689-x>
- ROAD RESEARCH LABORATORY. (1952). *Mechanics for road engineers*. London: H.M. Stationery Office.
- ROGERS, C. D., GLENDINNING, S., & ROFF, T. E. (1997). Lime modification of clay soils for construction expediency. *Geotechnical Engineering*, v.125, pp. 242-249.
- SAKR, M., & al., e. (2022). An experimental study on the effect of micrometakaolin on the strength and swelling characteristics of expansive soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. Fonte: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-544440/v1>
- SALDANHA, R., LOTERO, A., SCHEUERMANN FILHO, H. M., ARAÚJO, M., SILVA, J., & CONSOLI, N. (2022). Potential use of iron ore tailings for binder production: A life

- cycle assessment. *Construction and Building Materials*. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130008>
- SANTOS, A. G., & RIBEIRO, L. M. (2007). Condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. *Revista Escola de Minas*, 60 (3), pp. 465-470. doi:doi.org/10.1590/S0370-44672007000300005
- SANTOS, C. P. (2021). *Estabilização de rejeito de mineração de ouro por meio da álcali-ativação de cal de carbureto e cinza do bagaço de cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, RS: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- SANTOS, P. S. (1992). *Ciência e tecnologia de argilas. Segunda edição*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- SARSBY, R. (2000). *Enviromental geotechnics*. London: Thomas Telford Publishing.
- SEED, H., & CHAN, C. (1959). Structure and strength characteristics of compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 85(5), pp. 87-128.
- SEGATINI, M. G., & ALCANTARA, M. (2010). *Materiais de construção civil: Captítulo 27 – Solo-cimento e solo-cal* (2ª ed., Vol. 2). São Paulo: IBRACON,.
- SERVI, S., LOTERO, A., SILVA, J., BASTOS, C., & CONSOLI, N. (2022). Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking. *Construction and Building Materials*. Volume 349. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128770>
- SHERWOOD, P. (1958). Effect of sulphates on cement-stabilised clay. *Highw. Res. Board, Bull*, 198, pp. 45-54.
- SHERWOOD, P. (1962). The effect of soil organic matter on the setting of soil-cement mixtures. *Road Res. Lab., Tech.*, pp. 61-56.
- SHERWOOD, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. *Transport Research Laboratory*.
- SHI, C., & DAY, R. (2000). Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators – Part I. *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 91-98.
- SILVA, A., & CARVALHO, F. (2007). Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. *Física do solo - Rev. Bras. Ciênc. Solo* 31 (5), pp. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500003>.
- SILVA, J. P. (2022). *Comportamento mecânico de rejeitos de mineração e ferro sob ótica dos estados críticos*. Tese (Doutorado). Distrito Federal: Universidade de Brasília.

- SILVA, M. G. (2010). Cimentos Portland com adições minerais - Capítulo 25. Em *Materiais de Construção Civil* (2ª ed., Vol. 1, p. 791 a 824). IBRACON.
- SOARES, L. (2010). *Barragem de rejeitos*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia – COPM.
- SOTOMAYOR, J. M. (2018). *Avaliação do comportamento mecânico drenado e não drenado de rejeitos de minérios de ferro e de ouro reforçados com fibras de polipropileno*. Tese (doutorado). Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- TAYLOR, H. (1997). *Cement chemistry*. London: Thomas Telford Publishing, 2 nd edition.
- TEBECHRANI NETO, A. (2024). *Comportamento mecânico de rejeito de minério de ferro cimentado: efeito da granulometria e das condições de compactação*. Tese (Doutorado em Engenharia). Porto Alegre, RS: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- TEODORO, R. (2016). *Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade - Dissertação (Mestrado)*. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (EEC) , Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.
- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc.
- TERZAGHI, K., PECK, R. B., & MESRI, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice, Third Edition*. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc.
- TESSAROTTO, C. (2015). Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (dry stacking). *XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, p. 8.
- THOMPSON, M. R. (1970). Suggested method of mixture design procedure for lime-treated soils. *Special Technical Publication 479 – American Society for Testing and Materials*.
- VERGARA, J. E. (2012). *Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de ferro para utilização em filtros de barragens*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília.
- VICK, S. (1983). *Planning, design and analysis of tailings dams*. John Wiley & Sons, Inc.
- WAGNER, A. C., CARVALHO, J., SCHEUERMANN FILHO, H., & CONSOLI, N. (2024). Influence of grading in compacted tailings behaviour: towards resilient design. *Géotechnique*, pp. 1751-7656. Fonte: <https://doi.org/10.1680/jgeot.23.00475>

- WANG, T., I., R., G., & LUAN, Y. (2021). Experimental investigation of pozzolanic reaction and curing temperature-dependence of low-calcium fly ash in cement system and Ca-Si-Al element distribution of fly ash-blended cement paste. *Construction and Building Materials* 267. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121012>
- WOLFF, A. P. (2009). *Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. Dissertação (Mestrado)*. Ouro Preto. MG: Universidade Federal de Ouro Preto.
- YEO, J., KIM, S., & LEE, J. (2023). Compressibility and small strain stiffness characteristics of silt-hematite mixtures. *Engineering Geology*, v. 325.
- Yoder, E. (1957). Principles of soil stabilisation. *Proc. Ann. Purdue Road School*, 43rd, 92, 41 (3), pp. 95-106.
- ZAMPIERI, V. (1989). *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas. Dissertação (Mestrado)*. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

## APÊNDICE A – Resultados gerais de $q_u$ e $G_0$



Tabela A1: Resultados gerais de  $q_u$  e  $G_0$  para as misturas testadas

Identificação (w - $\gamma_d$ )	Idade de ensaio (dias)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (MPa)	$G_0$ (GPa)
8 - 19	7	7,04	18,73	0,4010	53,90
8 - 19	7	7,04	18,83	0,4573	63,09
8 - 19	7	7,04	18,52	0,3863	58,56
10 - 19	7	9,00	18,98	0,3796	49,19
10 - 19	7	9,00	18,84	0,3699	43,87
10 - 19	7	9,00	18,67	0,3119	46,94
12 - 19	7	10,76	18,79	0,2496	32,07
12 - 19	7	10,76	18,66	0,2624	31,45
12 - 19	7	10,76	18,83	0,2967	36,58
14 - 19	7	12,64	18,90	0,2349	23,01
14 - 19	7	12,64	18,71	0,2651	26,56
14 - 19	7	12,64	18,77	0,2331	22,13
16 - 19	7	14,51	18,52	0,2205	26,83
16 - 19	7	14,51	18,51	0,2495	24,58
16 - 19	7	14,51	18,74	0,2454	24,10
8 - 19	14	7,10	18,51	1,2963	159,81
8 - 19	14	7,10	18,68	1,2985	159,78
8 - 19	14	7,10	18,80	1,3712	169,14
10 - 19	14	8,91	18,96	1,2184	150,22
10 - 19	14	8,91	18,76	1,3481	162,98
10 - 19	14	8,91	18,98	1,3120	161,36
12 - 19	14	10,68	18,64	1,0730	134,97
12 - 19	14	10,68	18,64	1,1066	134,41
12 - 19	14	10,68	18,73	1,1275	141,16
14 - 19	14	12,71	18,70	0,8439	107,68
14 - 19	14	12,71	18,67	0,8969	112,67
14 - 19	14	12,71	18,68	0,9763	119,79
16 - 19	14	14,37	18,87	0,9480	118,34
16 - 19	14	14,37	18,76	0,8138	115,87
16 - 19	14	14,37	18,95	0,8049	114,84
8 - 19	28	7,03	18,74	2,1460	283,24
8 - 19	28	7,03	18,77	2,7699	310,77
8 - 19	28	7,03	18,78	2,5116	316,71
10 - 19	28	8,95	18,84	2,7340	339,67
10 - 19	28	8,95	18,69	2,7149	343,40
10 - 19	28	8,95	18,62	3,1550	347,09
12 - 19	28	10,78	19,11	3,1394	413,77
12 - 19	28	10,78	19,13	3,3317	385,30
12 - 19	28	10,78	19,08	3,1255	400,76
14 - 19	28	12,72	19,07	2,5292	325,93
14 - 19	28	12,72	18,74	2,6555	323,32
14 - 19	28	12,72	19,02	2,7538	326,26
16 - 19	28	14,72	18,77	2,5435	317,63
16 - 19	28	14,72	18,67	2,5355	319,10
16 - 19	28	14,72	18,62	1,3515	309,50
8 - 19	90	7,40	18,92	2,9691	346,28
8 - 19	90	7,40	18,92	2,9675	332,15
8 - 19	90	7,00	18,68	2,9706	327,78
10 - 19	90	9,14	18,95	4,0006	408,75
10 - 19	90	9,14	18,95	3,7671	410,88
10 - 19	90	8,94	18,86	2,7390	322,56
12 - 19	90	10,89	19,09	3,5559	416,99
12 - 19	90	10,89	18,98	3,8573	398,05
12 - 19	90	10,62	18,94	2,5988	297,57
14 - 19	90	12,67	19,05	4,0122	411,68
14 - 19	90	12,67	18,94	3,7706	403,96
14 - 19	90	12,61	18,98	2,3509	307,66
16 - 19	90	14,81	18,72	2,9577	356,34
16 - 19	90	14,81	18,62	2,7658	392,63
16 - 19	90	14,57	18,72	2,1408	292,87

Tabela A2: Resultados gerais de  $q_u$  e  $G_0$  para as misturas testadas

Identificação (w - $\gamma_d$ )	Idade de ensaio (dias)	w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$q_u$ (MPa)	$G_0$ (GPa)
7 - 20	7	7,28	19,55	0,6883	87,95
7 - 20	7	7,28	19,67	0,5659	79,24
7 - 20	7	7,28	19,70	0,5676	80,24
10 - 20	7	9,07	19,72	0,4579	58,99
10 - 20	7	9,07	19,92	0,4483	54,69
10 - 20	7	9,07	19,47	0,4700	59,42
12 - 20	7	10,80	19,58	0,3627	45,61
12 - 20	7	10,80	19,54	0,4513	51,87
12 - 20	7	10,80	19,69	0,4214	43,52
14 - 20	7	12,66	19,32	0,3927	40,83
14 - 20	7	12,66	19,45	0,4030	43,42
14 - 20	7	12,66	19,35	0,4322	41,95
16 - 20	7	14,63	19,18	0,3836	42,46
16 - 20	7	14,63	19,23	0,3408	36,17
16 - 20	7	14,63	19,08	0,3016	36,12
7 - 20	14	7,27	19,60	1,4140	202,44
7 - 20	14	7,27	19,65	1,3590	196,58
7 - 20	14	7,06	19,53	1,5637	210,31
10 - 20	14	9,13	19,47	1,2712	188,57
10 - 20	14	9,13	19,57	1,3296	197,17
10 - 20	14	9,04	19,61	1,4341	211,68
12 - 20	14	11,19	19,66	1,1765	178,15
12 - 20	14	11,19	19,47	1,2803	185,71
12 - 20	14	11,07	19,55	1,4867	211,42
14 - 20	14	13,09	19,35	1,1468	187,07
14 - 20	14	13,09	19,30	1,0507	180,11
14 - 20	14	13,09	19,44	1,1808	216,65
16 - 20	14	14,81	19,19	1,0313	177,18
16 - 20	14	14,81	19,08	1,0080	168,39
16 - 20	14	14,61	19,28	0,9901	170,02
7 - 20	28	7,27	19,66	3,5761	390,57
7 - 20	28	7,18	19,53	3,6064	365,08
7 - 20	28	7,06	19,66	3,1535	394,69
10 - 20	28	9,13	19,61	3,8780	451,34
10 - 20	28	8,94	19,62	3,8556	440,45
10 - 20	28	9,04	19,52	4,0343	472,60
12 - 20	28	11,19	19,59	4,0089	455,85
12 - 20	28	11,13	19,70	4,1533	430,11
12 - 20	28	11,07	19,63	4,0476	475,19
14 - 20	28	12,59	19,52	3,3580	451,91
14 - 20	28	12,59	19,31	3,3690	436,08
14 - 20	28	12,59	19,35	2,7469	449,90
16 - 20	28	14,81	19,08	2,8280	422,46
16 - 20	28	14,63	19,07	2,6994	436,57
16 - 20	28	14,61	19,31	2,6278	433,41
7 - 20	90	7,18	19,68	3,7799	391,90
7 - 20	90	7,18	19,79	4,2694	418,48
7 - 20	90	7,06	19,58	3,4110	375,85
10 - 20	90	8,94	19,60	4,8689	433,72
10 - 20	90	8,94	19,75	4,9976	458,48
10 - 20	90	9,04	19,62	3,7676	381,64
12 - 20	90	10,85	19,74	5,2146	438,75
12 - 20	90	10,85	19,72	4,6935	457,01
12 - 20	90	11,07	19,65	3,5139	367,15
14 - 20	90	12,76	19,36	3,9657	439,04
14 - 20	90	12,76	19,35	3,9973	449,41
14 - 20	90	13,09	19,38	3,2020	359,42
16 - 20	90	14,63	19,18	3,5364	401,86
16 - 20	90	14,63	19,29	3,3967	473,91
16 - 20	90	14,61	19,31	2,9279	350,03