



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**VICTOR PINHEIRO DA COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO DA LAVRA DE  
PEGMATITOS GRANÍTICOS GRANULOMETRICAMENTE  
REDUZIDOS**

Natal/RN

2018

**VICTOR PINHEIRO DA COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO DA LAVRA DE  
PEGMATITOS GRANÍTICOS GRANULOMETRICAMENTE  
REDUZIDOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

**Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França**

**Co-orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza**

Natal/RN

2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Costa, Victor Pinheiro da.

Caracterização geotécnica do resíduo da lavra de pegmatitos graníticos granulometricamente reduzidos / Victor Pinheiro da Costa. - Natal, 2018.

112 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

Coorientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza.

1. Engenharia civil - Dissertação. 2. Resíduo da mineração - Dissertação. 3. Pavimentação - Dissertação. 4. Feldspato - Dissertação. I. França, Fagner Alexandre Nunes de. II. Ingunza, Maria del Pilar Durante. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624:622

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO DA LAVRA DE  
PEGMATITOS GRANÍTICOS GRANULOMETRICAMENTE  
REDUZIDOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França – Orientador**

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza – Co-orientador**

---

**Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Examinador Interno (UFRN)**

---

**Prof. Dr. Alexandre da Costa Pereira – Examinador Externo (IFRN)**

**Natal, 30 de novembro de 2017.**

# **CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO RESÍDUO DA LAVRA DE PEGMATITOS GRANÍTICOS GRANULOMETRICAMENTE REDUZIDOS**

**Victor Pinheiro da costa**

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Co-orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza

## **RESUMO**

A atividade de mineração, como em qualquer processo de extração de recursos naturais, provoca impactos ao meio ambiente, seja no que diz respeito a alterações de áreas naturais por meio de sua exploração ou na geração de resíduos decorrentes principalmente de sua lavra e beneficiamento. Partindo do pressuposto que os recursos minerais são bens esgotáveis e que o setor da construção civil é responsável pelo consumo de até 50% de todos os recursos minerais explorados no planeta, é imprescindível que se desenvolvam técnicas de reaproveitamento de resíduos da mineração na construção civil para que ocorra a diminuição do uso de bens naturais e o acúmulo de resíduos, minimizando dessa forma os impactos causados ao meio ambiente. Neste trabalho, é apresentada uma proposta de destinação adequada aos resíduos oriundos da lavra do feldspato pegmatítico da região de Parelhas/RN por meio da sua inclusão em obras geotécnicas. Para tanto, submeteu-se o resíduo estéril do feldspato pegmatítico (REFP) a um processo de tratamento granulométrico, obtendo um material com 100% passante da peneira nº4 (4,8 mm). Posteriormente, o REFP foi submetido a ensaios de caracterização física, química, mineralógica e mecânica. Diante dos resultados foram caracterizados como areias siltosas não plásticas e bem graduada, com massa específica dos sólidos igual 2,66 g/cm<sup>3</sup> e granulometria não uniforme. Os resultados de difração de raios-X apontaram para um material com alto percentual de sílica (64,13%) e alumínio (15,08%), apresentando

baixo teor de álcalis totais (10,62%) e elevado teor de óxido de ferro (5,25%) em relação aos requisitos químicos para seu consumo nas indústrias de cerâmica e vidro. O mesmo foi designado como um material A-2-4 na classificação rodoviária (TRB - Transportation Research Board), tendo apresentado boa capacidade de suporte à penetração, e podendo ser utilizado quando compactado em energia modificada, em condições ótimas ( $\rho_{d.máx}$  e  $w_{ót}$ ), como elemento de base em pavimentos com parâmetro de tráfego N menor que  $5 \times 10^6$ . Entretanto notou-se uma perda de 50% da sua capacidade de suporte a penetração (ISC) para teores de umidade iguais a  $w_{ót} \pm 1$ , revelando a necessidade de um controle rigoroso quando aplicado em pavimentos. Quanto aos ensaios de cisalhamento direto, as amostras não inundadas apresentaram valores de coesão e ângulo de atrito nas tensões de pico variando entre 15 a 8 kPa e  $53^\circ$  a  $43^\circ$ , respectivamente, para as energias de compactação normal, intermediária e modificada e tensões normais de até 200 kPa. A inundação não provocou mudanças mensuráveis nos valores de resistência de pico, entretanto acarretou em menores valores de resistência a 5,00 mm de deslocamento horizontal da caixa do cisalhamento direto. O REFP se apresentou como um material de baixa compressibilidade, não demonstrando comportamento expansivo ou colapsivo ao ser inundado para os níveis de tensões aplicados nesta pesquisa. Os resultados expostos pelos ensaios de permeabilidade à carga variável para as amostras moldadas em condições ótimas nas energias de compactação normal, intermediária e modificada, demonstram que o resíduo é mediantemente permeável ( $1,28 \times 10^{-2}$  –  $1,56 \times 10^{-2}$  cm/s). O REFP apresentou 83% de atividade pozolânica, resultado que pode se apresentar satisfatório em argamassas, concretos, solo-cimento e solos melhorados. Tecnicamente, o resíduo apresentou propriedades que satisfazem seu uso em obras de terra e/ou misturas com elementos aglomerantes, entretanto são necessários maiores estudos para avaliar o custo energético necessário para seu beneficiamento granulométrico e as zonas de influência de seu local de extração para validar sua aplicabilidade nestes segmentos.

**Palavras-Chave:** Resíduo da mineração; pavimentação; feldspato.

# GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF THE MINING RESIDUE OF GRANITIC PEGMATITES GRANULOMETRICALLY REDUCED

**Victor Pinheiro da costa**

Adviser: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Co-adviser: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza

## ABSTRACT

Mining activity, as any process of extraction of natural resources, causes impacts to the environment, either in regard to changes in natural areas through their exploitation or in the generation of waste arising mainly from their mining and processing. Assuming that mineral resources are limited and that the construction industry is responsible for the consumption of up to 50% of all mineral resources exploited on the planet, it is imperative to develop techniques for the reuse of mining waste in construction since reducing the use of natural resources and the accumulation of waste would minimize the impacts caused to the environment. In this research it is proposed an adequate disposal of the residues from the pegmatitic feldspar of Parelhas / RN region by means of their inclusion in geotechnical works. For this, the sterile pegmatitic feldspar (REFP) was subjected to a granulometric treatment process, obtaining a material with 100% passing through the sieve *n.* 4 (4,8 mm). Subsequently, it was submitted to physical, chemical, mineralogical and mechanical characterization tests. It was characterized as non-plastic and well graded silty sand with a gravity weight equal to 2,66 g/cm<sup>3</sup> and non-uniform granulometry. The results of X-ray diffraction test showed a high percentage of silica (64,13%) and aluminum (15,08%), with a low content of total alkalis (10,62%) and a high content of iron oxide (5,25%) in relation to the chemical requirements for its use in the ceramic and glass industries. It was designated as an A-2-4 material by the TRB (Transportation Research Board) classification, which has excellent penetration support capability and can be used

when compressed under modified energy and optimal conditions ( $pd_{m\acute{a}x}$  e  $w_{\acute{o}t}$ ), as a base element in pavements with  $N < 5 \times 10^6$ . However, a loss of 50% of its penetration support capacity (ISC) was observed for moisture content equal to  $w_{\acute{o}t} \pm 1$ , revealing the need for a rigorous control when applied as pavements. Regarding the direct shear tests, the compacted samples showed cohesion values and friction angle at peak shear stress ranging from 15 to 8 kPa and 53 to 43 degrees respectively for the normal, intermediate and modified compaction efforts and normal stress up to 200 kPa. The inundated condition did not cause measurable changes in the values of the peak shear stress; however, it resulted in lower residual shear stress. The REFP was presented as a material of low compressibility, and it did not demonstrate expandable or collapsible behavior when inundated to the stress levels applied in this research. Permeability tests conducted with samples compacted under optimum conditions in the normal, intermediate and modified compaction efforts, demonstrated that the REFP is medium permeable ( $1,28 \times 10^{-2} - 1,56 \times 10^{-2}$  cm/s). REFP presented 83% of pozzolanic activity, a result that can be satisfactory in mortars, concretes, soil-cement and improved soils. Technically, the residue presented properties that satisfy its use in earthworks and/or mixtures with binder elements; however, further studies are necessary to evaluate the energy cost required for its granulometric processing and the influence areas of its location to validate its applicability in such segments.

**Keywords:** Mining residue; paving; feldspar .

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Carlos Baltazar da Costa e Wanda Lucia Pinheiro da Costa, não só pelo apoio incondicional, incentivo e amor, mas também pela educação que me proporcionaram e continuam a proporcionar.

Aos meus irmãos e demais familiares que por meio de sua presença, conselhos e palavras de estímulo puderam ser a força que me impulsionou para a realização desta etapa da minha vida.

Agradeço em especial, aos meus professores da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, que privilegiaram a transmissão do conhecimento e o desenvolvimento do pensamento crítico.

Agradeço especialmente aos Professores Dr. Fagner Alexandre Nunes de França, Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior, Dr. Osvaldo de Freitas Neto, Dr.<sup>a</sup> Maria del Pilar Durante Ingunza, que despertaram meu interesse pela Geotecnia, e por meio de seus incentivos, dedicação, disponibilidade, paciência e ensinamentos puderam me proporcionar a realização deste trabalho.

Agradeço, em particular, aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRN, que tanto contribuíram com discussões técnicas e estudos contínuos à cerca da geotecnia e das disciplinas ministradas na grade curricular.

Ao técnico de laboratório Anderson Dantas e aos demais voluntários do Laboratório de Mecânica dos Sólidos pelo apoio técnico e pela valiosa contribuição dos seus conhecimentos.

Agradeço, finalmente, a todos que me ajudaram, de maneira direta ou indireta. Muito obrigado!

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xix
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo Geral.....	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 Resíduos da mineração.....	4
2.2 Minério de Feldspato.....	7
2.2.1 Reservas brasileiras – localização e distribuição.....	8
2.2.2 Produção nacional e consumo aparente.....	9
2.2.3 Área de atuação – Mercado consumidor.....	11
2.3 Mineração do feldspato no Rio Grande do Norte.....	12
2.3.1 Reservas minerais de feldspato.....	12
2.3.2 Atividade mineral - lavra e beneficiamento.....	13
2.3.3 Produção.....	15
2.3.4 Resíduos da mineração do feldspato.....	16
2.4 Uso de resíduos da mineração em obras de engenharia.....	17
2.4.1 Incorporação de resíduos da mineração em obras geotécnicas.....	17
CAPÍTULO 3: MATERIAIS & METODOS.....	24
3.1 Obtenção, armazenamento e tratamento físico do resíduo (1ª Etapa).....	25
3.2 Caracterização do resíduo (2ª Etapa).....	26
3.2.1 Massa específica dos sólidos.....	27
3.2.2 Análise granulométrica conjunta.....	27

3.2.3 Limites de consistência (Atterberg) .....	27
3.2.4 Compactação .....	27
3.2.5 Permeabilidade.....	28
3.2.6 Caracterização química e mineralógica.....	29
3.2.6.1 Fluorescência de Raios-X (FRX) .....	29
3.2.6.2 Difração de Raios-X (DRX).....	30
3.2.7 Índice de Atividade Pozolânica (IAP).....	30
3.3 Caracterização mecânica para fins geotécnicos (3ª Etapa) .....	31
3.3.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC) .....	31
3.3.2 Ensaio de cisalhamento direto.....	31
3.3.3 Ensaio de Compressão Edométrica .....	32
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS &amp; DISCUSSÕES .....</b>	<b>35</b>
4.1 Caracterização química e mineralógica do resíduo.....	35
4.2 Caracterização física do resíduo .....	36
4.2.1 Massa específica dos sólidos .....	36
4.2.2 Limites de Atterberg .....	37
4.2.3 Granulometria Conjunta.....	37
4.2.4 Compactação .....	39
4.2.4.1 Resíduo sem reuso.....	39
4.2.4.2 Resíduo com reuso.....	40
4.3 Caracterização mecânica para fins geotécnicos .....	42
4.3.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC) .....	42
4.3.1.1 Resíduo sem reuso.....	42
4.3.1.2 Resíduo com reuso.....	43
4.3.1.2.1 Energia normal .....	43
4.3.1.2.2 Energia Intermediária .....	44
4.3.1.2.3 Energia Modificada .....	44

4.3.1.2.4 Análise geral.....	45
4.3.2 Cisalhamento Direto .....	47
4.3.2.1 Condição não inundada.....	48
4.3.2.1.1 Envoltória de ruptura para $\tau_{pico}$ .....	52
4.3.2.1.2 Envoltória de ruptura para $\tau_{5,0mm}$ .....	54
4.3.2.2 Condição inundada.....	56
4.3.2.2.1 Envoltória de ruptura para $\tau_{pico}$ .....	59
4.3.2.2.2 Envoltória de ruptura para $\tau_{5,0mm}$ .....	60
4.3.3 Análise geral.....	62
4.4 Compressão edométrica.....	65
4.5 Permeabilidade.....	67
4.6 Índice de atividade pozolânica (IAP) .....	69
CAPÍTULO 5: RESULTADOS & DISCUSSÕES.....	71
REFERÊNCIAS .....	75
ANEXOS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curvas granulométricas de rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Fonte: Pereira (2012). .....	6
Figura 2.2 – Províncias Pegmatíticas Nordestina, Oriental e Meridional. Fonte: Drummond (2009) .....	9
Figura 2.3 – Localização da Província Pegmatítica da Borborema. Fonte: Miranda (2012). .....	13
Figura 2.4 – Ilustração de uma lavra a céu aberto mecanizada. Fonte: Leonardo (2013). .....	14
Figura 2.5 – Armazenagem de amostras do pegmatito. (A) Material disposto em sacos. (B) Material disposto em pilhas na praça da mina. Fonte: Melo (2011). .....	15
Figura 2.6 – Central de Tratamento (moagem) em Parelhas/RN. Fonte: Grupo ARMIL Mineração do Nordeste - Casa Grande Mineração LTDA. ....	15
Figura 3.1 – Fragmentos do resíduo estéril do feldspato pegmatítico. Fonte: Autor .	25
Figura 3.2 – Amostras do REFP após tratamento granulométrico. Fonte: Autor .....	26
Figura 3.3 (a) curva tempo de compressão para típicos incrementos de carga em areias (Taylor, 1948); (b) Curva típica de tempo de compressão para teste de alto estresse (Roberts, 1964). Fonte: Lambe & Whitman (1969). .....	33
Figura 4.1 – Ensaio de DRX. ....	36
Figura 4.2 – Curva granulométrica do resíduo virgem e do reuso. ....	38
Figura 4.3 – Curvas de compactação do resíduo sem reuso. ....	39
Figura 4.4 – Curvas de compactação do resíduo com reuso. ....	40
Figura 4.5 – Resultados do índice suporte Califórnia. ....	46
Figura 4.6 – Gráficos das amostras compactadas na energia normal e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (A) $\tau \times \delta h$ (B) $\tau_{\sigma v} \times \delta h$ (C) $\delta v h_0 \times \delta h$ (D) e $x \delta h$ . ....	48
Figura 4.7 – Gráficos das amostras compactadas na energia intermediária e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (A) $\tau \times \delta h$ (B) $\tau_{\sigma v} \times \delta h$ (C) $\delta v h_0 \times \delta h$ (D) e $x \delta h$ . ....	49

Figura 4.8 – Gráficos das amostras compactadas na energia modificada e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (A) $\tau \times \delta h$ (B) $\tau_{\sigma v} \times \delta h$ (C) $\delta v_{h0} \times \delta h$ (D) e $\epsilon \times \delta h$ .....	50
Figura 4.9 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição não inundada – resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ).....	53
Figura 4.10 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição não inundada – resistência referente as tensões atuantes durante o deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa do cisalhamento direto. ....	55
Figura 4.11 – Gráfico $\tau \times \delta$ das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto com tensões de verticais de 200 KPa moldadas nas energias de compactação normal e modificada. ....	57
Figura 4.12 – Gráfico $\delta v_{h0} \times \delta$ das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto sob condição inundada com tensões verticais de 200 kPa. ....	58
Figura 4.13 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição inundada – resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ). ....	59
Figura 4.14 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição inundada – resistência referente as tensões atuantes durante o deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa do cisalhamento direto. ....	61
Figura 4.15 – Gráfico $\epsilon \times \log \sigma'$ das amostras submetidas ao ensaio de compressão edométrica sob condição não-inundada.....	65
Figura 4.16 – Gráfico $\epsilon \times \log \sigma'$ das amostras submetidas ao ensaio de compressão edométrica sob condição inundada.....	66
Figura 4.17 – Gráfico deformação versus tempo das amostras inundadas no estágio de 5 kPa. ....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais minérios e problemas gerados pela sua exploração. ....	5
Tabela 2.2 – Principais características do feldspato. ....	7
Tabela 2.3 - Principais elementos químicos do feldspato. ....	8
Tabela 2.4 – Estatísticas do feldspato – Brasil. ....	10
Tabela 2.5 – Principais reservas de feldspato no Rio Grande do Norte. ....	12
Tabela 2.6 – Estatísticas do feldspato- Brasil & RN. ....	16
Tabela 3.1 – Etapas da pesquisa e respectivos ensaios e normas. ....	24
Tabela 3.2 – Requisitos das camadas do pavimento. ....	31
Tabela 4.1 – Resultados da análise química. ....	35
Tabela 4.2 – Análise de textura dos resíduos. ....	38
Tabela 4.3 – Resultados da compactação do resíduo sem reuso na umidade ótima. .....	40
Tabela 4.4 – Resultados da compactação de amostras com reuso na umidade ótima. .....	41
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras sem reuso. ....	42
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso compactadas na energia normal. ....	43
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso compactadas na energia intermediária. ....	44
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso compactadas na energia modificada. ....	45
Tabela 4.9 – Valores médios das amostras com reuso moldadas na umidade ótima. .....	47
Tabela 4.10 – Dados dos gráficos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (Parte 01). ....	51
Tabela 4.11 – Dados dos gráficos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (Parte 02). ....	51
Tabela 4.12 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referentes à resistência de pico das amostras cisalhadas em condição não inundada. ....	53

Tabela 4.13 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referente a resistência em $\delta h = 5,0$ mm das amostras cisalhadas em condição não inundada. ....	55
Tabela 4.14 – Dados dos gráficos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição inundada .....	56
Tabela 4.15 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referentes à resistência de pico das amostras cisalhadas em condição inundada.....	60
Tabela 4.16 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referente a resistência em $\delta h = 5,0$ mm das amostras cisalhadas em condição inundada. ....	61
Tabela 4.17 – Dados do cisalhamento direto. ....	62
Tabela 4.18 – Dados do cisalhamento direto (reajustado). ....	63
Tabela 4.19 – Características de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão edométrica. ....	65
Tabela 4.20 – Resultados do ensaio de compressão edométrica.....	66
Tabela 4.21 – Dados e resultados para determinação do coeficiente de permeabilidade do REFP. ....	68
Tabela 4.22 – Requisitos químicos para os materiais pozolânicos. ....	69
Tabela 4.23 – Requisitos físicos para os materiais pozolânicos. ....	69
Tabela 4.24 – Resultados do ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica Para Revestimentos,  
Louças Sanitárias e Congêneres
- ASTM – American Society For Testing And Materials
- CBR – Califórnia Bearing Ratio
- CP – Corpo de prova
- DNER – Departamento nacional de Estradas de Rodagem
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- DRX – Difração de raios-X
- EGF – Escória granulada de fundição
- EUROFEL – European Association of Feldspar Producers
- FRX – Fluorescência de raios-X
- IAP – Índice de atividade pozolânica
- IG – Índice de Grupo
- IP – Índice de Plasticidade
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
- ISC – Índice de Suporte Califórnia
- LABEMAT – Laboratório de Engenharia de Materiais
- LL – Limite de Liquidez
- LP – Limite de Plasticidade
- NBR – Norma Brasileira Reguladora
- NP – Não-plástico
- PET – Polietileno tereftalato
- PPB – Província Pegmatítica da Borborema
- RCC – Resíduo de construção civil
- RCD – Resíduo de construção e demolição
- REFP – Resíduo estéril do feldspato pegmatítico
- RMF – Rejeito do minério de ferro

RPP – Resíduo de polimento de porcelanato

RSMF – Resíduos sólidos de minério de ferro (mineração e siderúrgica)

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

TRB – Transportation Research Board

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ab – Albita

Al – Alumínio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Alumina

An – Anortita

$a_v$  – Coeficiente de compressibilidade do solo

Ba – Bário

$c'$  – Coesão efetiva

$c^\circ$  – Coesão aparente

Ca – Cálcio

Cc – Coeficiente de curvatura

cm – Centímetros

Cu – Coeficiente de não uniformidade

D – Módulo oedométrico (confinado)

$D_{médio}$  – Diâmetro média do corpo de prova

$\Delta w_{máx}$  – Variação máxima do teor de umidade

$\delta_h$  – Deslocamento horizontal

$\delta_{h,pico}$  – Deslocamento horizontal durante as tensões de pico

$\frac{\delta_v}{h_0}$  – Deslocamento vertical relativo

$\delta_{v,pico}$  – Deslocamento vertical durante as tensões de pico

$\delta_{v,5,0mm}$  – Deslocamento vertical no deslocamento de 5,0 mm da caixa do cisalhamento direto

$e$  – Índice de vazios

$e_{inicial}$  – Índice de vazio inicial

$e_{mold}$  – Índice de vazio na moldagem do corpo de prova

$e_{pico}$  – Índice de vazio na tensão de pico do ensaio de cisalhamento direto

$e_{5,0mm}$  – Índice de vazio no deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa de cisalhamento direto

$E_{máx}$  – Expansão máxima registrada

$\phi'$  – Ângulo de atrito efetivo

$\phi'_{pico}$  – Ângulo de atrito efetivo na máxima tensão desviadora

$\phi'_{5,0\text{ mm}}$  – Ângulo de atrito efetivo no deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa de cisalhamento direto

$h_{\text{médio}}$  – Altura média do corpo de prova

$h_0$  – Altura inicial do corpo de prova

ISC<sub>médio</sub> – Valor médio dos resultados de Índice de Suporte Califórnia

$k$  – Coeficiente de permeabilidade

K – Potássio

$m_{cp}$  – massa do corpo de prova

$m_v$  – Coeficiente de variação volumétrica

Na – Sódio

Or – Ortoclásio/microclínio

$\rho_d$  – Massa específica aparente seca

$\rho_{d,\text{máx}}$  – Massa específica aparente seca máxima

Rpm – Rotação por minuto

Si – Silício

SiO<sub>2</sub> – Sílica

$S_r$  – Grau de saturação

$S_{r\text{final}}$  – Grau de saturação ao término do ensaio

$S_{r\text{final}}$  – Grau de saturação na umidade ótima

$S_{r\text{inicial}}$  – Grau de saturação no início do ensaio

$S_{r\text{pico}}$  – Grau de saturação na tensão de pico do ensaio de cisalhamento direto

$S_{r5,0\text{ mm}}$  – Grau de saturação no deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa de cisalhamento direto

$\sigma_v$  - Tensão vertical

$\tau_{\text{pico}}$  – Resistência ao cisalhamento referente à máxima tensão registrada

$\tau_{5,0\text{ mm}}$  – Resistência ao cisalhamento durante o deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa de cisalhamento direto

$w$  – Teor de umidade

$w_{\text{final}}$  – Teor de umidade ao término do ensaio

$w_{\text{médio}}$  – Teor de umidade médio

$w_{\text{mold}}$  – Teor de umidade na moldagem do corpo de prova

$w_{\text{ót}}$  – Umidade ótima

## CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

O desenvolvimento na formulação do processo de produção dos porcelanatos na década de 1920 reduziu o ciclo de queima de 30 a 50 horas para 60 a 70 minutos, possibilitando uma redução expressiva nos custos de produção, e conseqüentemente, ampliando as condições de concorrência com os outros tipos de revestimentos não-cerâmicos e rochas ornamentais. Contudo, tal procedimento resultou no crescimento do consumo do minério de feldspato, uma vez que integra cerca de 60% da composição da massa cerâmica. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, a produção mundial do minério de feldspato cresceu de 8,2 para 21,6 milhões de toneladas nos anos de 1988 a 2014. Atualmente o Brasil responde por aproximadamente 1,9% da produção mundial.

No Brasil, os pegmatitos graníticos constituem as principais fontes comerciais do minério de feldspato, que é utilizado principalmente nas indústrias de cerâmica e de vidro. Os pegmatitos são rochas ígneas compostas geralmente por 60-70% de feldspato, 25-30% de quartzo, 5-10% de moscovita e 1-2% de outros minerais (Oba & Ribeiro, 2006), de granulação geralmente grossa, muitas vezes exibindo cristais gigantes, permitindo fácil separação (Luz *et al.*, 2003).

Assim como toda exploração de recursos naturais, a atividade de mineração provoca impactos ao meio ambiente, seja no que diz respeito a alterações de áreas naturais por meio de sua exploração ou na geração de resíduos, decorrentes principalmente de sua lavra ou beneficiamento.

Partindo do pressuposto de que os recursos minerais são bens não renováveis, tendendo à escassez à medida que se desenvolve sua exploração, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e demais órgãos ambientais têm pressionado o setor público e privado para minimizar os impactos gerados ao longo da cadeia produtiva, o que leva indústrias e universidades a estudarem soluções para reaproveitamento dos resíduos (Araujo, 2016).

No setor da construção civil, o cenário crescente de geração de resíduos não é diferente, mas se torna ainda mais agravante quando se percebe que nesse setor há

o consumo de até 50% de todos os recursos minerais explorados no planeta (Carvalho, 2013). Dessa forma, a utilização de resíduos de mineração como matéria-prima para construção civil apresenta-se como uma alternativa viável, desde que obedecidos os padrões técnicos e ambientais da legislação, minimizando dessa forma os impactos ambientais decorrentes do descarte de resíduos e da exploração de recursos naturais.

Segundo Ingunza *et al.* (2014), as amostras coletadas de resíduos provenientes das lavras de feldspato pegmatítico da região de Parelhas/RN são de modo geral materiais inertes (Classe II-B) com alto percentual de sílica e alumínio e em menor proporção ferro, potássio e cálcio. Justifica-se, portanto, seu potencial uso na construção civil, uma vez que a elevada concentração de quartzo, material altamente resistente, quando preservadas suas características, pode conferir propriedades satisfatórias ao seu uso como matéria-prima.

Os métodos de exploração do pegmatito para obtenção do minério de feldspato dessa região, e do Nordeste como um todo, são caracterizados em sua grande maioria como uma atividade rudimentar sem emprego de técnicas de engenharia de minas. Sua lavra é feita por meios manuais, inicialmente a céu aberto, podendo evoluir para lavra em galerias subterrâneas, segundo procedimentos característicos da mineração artesanal. As técnicas de concentração do minério de feldspato utilizadas são bastante rudimentares e consistem apenas em uma catação manual na frente de lavra seguida de um tratamento granulométrico (moagem) nas usinas de beneficiamento (Luz *et al.*, 2003). O material que não é aproveitado, devido à presença de impurezas ou dificuldade de separação do mesmo com os materiais a ele associado, são descartados em forma de pilhas nas redondezas da praça da mina.

### **1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem por objetivo geral avaliar a possibilidade de aplicação do resíduo estéril proveniente da lavra do feldspato pegmatítico, o qual foi granulometricamente reduzido, para execução de aterros compactados.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos desta pesquisa são descritos a seguir.

- Caracterizar geotecnicamente o resíduo estéril do feldspato pegmatítico (REFP) através de ensaios de massa específica dos sólidos, granulometria conjunta, limites de Atterberg, compactação e ensaios de permeabilidade;
- Caracterizar química e mineralogicamente o REFP por meio de análises de fluorescência de Raios-X e difração de Raios-X;
- Analisar o comportamento mecânico do REFP com ensaios de cisalhamento direto e compressão edométrica e índice de suporte Califórnia, e a influência da presença de água em seus resultados;
- Avaliar o índice de atividade pozolânica do REFP com cimento.

## CAPÍTULO 2

# REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Resíduos da mineração

Os resíduos de mineração são subprodutos gerados pela atividade mineradora, compreendendo os estéreis e os rejeitos. Os resíduos estéreis são os materiais escavados (solo ou rocha) gerados pelas atividades de decapeamento da mina, que não são mineralizados (material sem valor econômico) e que ficam geralmente dispostos em pilhas. Os rejeitos são resíduos oriundos dos processos de beneficiamento a que são submetidas as substâncias minerais. Esses processos têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final, de modo a atender os requisitos exigidos pelo mercado (Silva *et al.*, 2011).

Em geral, os rejeitos são dispostos por via úmida através de barramentos construídos com ou sem a utilização dos próprios rejeitos (barragens de contenção) ou por via seca mediante as chamadas pilhas de rejeito que, ao contrário das barragens, não têm o objetivo de reter líquidos conjuntamente com a matéria sólida descartada. Em alguns casos, podem ser usados dispositivos especiais, como, por exemplo, os hidrociclones, para separação das frações grossa e fina dos rejeitos. Em outras situações, o processo de segregação natural das partículas do rejeito pode se tornar um fenômeno bastante complexo em face das diferentes densidades dos minerais presentes (Fernandes, 2005).

Em empreendimentos de mineração, a disposição de estéreis e dos rejeitos oriundos do processo produtivo exige um planejamento racional e criterioso, a partir do plano de lavra e das premissas de recuperação do minério, em virtude dos grandes volumes envolvidos. Segundo Foggiatto & Lima (2004), esse planejamento deve explicitar os métodos de controle de poluição, recomposição, recuperação e destino posterior da área explorada. Os planos de lavra e beneficiamento consideram os resíduos em termos de pesos e não de volumes, uma vez que não se conhece *a priori* suas características de compressibilidade, não se dispondo, portanto, da densidade

final dos mesmos. Assim, o plano de lavra não constitui, por si só, elemento de análise final para a estimativa da capacidade de estocagem dos resíduos (Fernandes, 2005).

Os impactos da mineração em áreas urbanas sobre o meio antrópico revestem-se de especial importância devido ao alto grau de ocupação urbana, que são agravados face à proximidade entre as áreas mineradas e as áreas habitadas. É o caso dos impactos visuais, resultantes dos altos volumes de rochas e solos movimentados e depositados. O desconforto ambiental pode ser sentido mesmo quando as emissões estiverem abaixo dos padrões ambientais estabelecidos. Os impactos causados sobre a saúde, por outro lado, dificilmente ocorrem quando estes limites são respeitados (Dias, 2001). Farias (2002) apresenta os principais problemas ambientais decorrentes da exploração de algumas substâncias minerais (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Principais minérios e problemas gerados pela sua exploração.

<b>Substância Mineral</b>	<b>Estado</b>	<b>Principais problemas</b>
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção; poluição de águas superficiais.
Ouro	PA	Utilização de mercúrio nas concentrações de ouro de forma inadequada; aumento da turbidez.
	MG	Rejeitos ricos em arsênio; aumento da turbidez.
	MT	Emissão de Mercúrio na queima da amálgama
Chumbo, zinco e prata	SP	Rejeitos ricos em arsênio.
Chumbo	BA	Rejeitos ricos em arsênio.
Zinco	RJ	Barragem de contenção de rejeito, de antiga metalurgia em péssimo estado de conservação.
Carvão	SC	Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida proveniente de antigos depósitos de rejeitos
Agregados para construção civil	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido à criação desordenada de áreas alagadas.
	SP	Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição da mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do terreno, acidentes nas rodovias causado pelo transporte
	RJ e SP	Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflitos com uso e ocupação do terreno.
Calcário	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico.
Gipsita	PE	Desmatamento da região do Araripe devido a utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita.
Cassiterita	RO e AM	Destruição de Florestas e leitos de rios

Fonte: Farias (2002) *apud* Dantas (2015).

Os resíduos sólidos da mineração são constituídos por partículas com composições granulométricas, mineralógicas e físico-químicas variadas e diretamente condicionadas às características da jazida e ao processo de exploração e beneficiamento. Assim, os resíduos de mineração podem variar de materiais granulares não plásticos até solos muito finos e de elevada plasticidade. No Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, por exemplo, temos uma distinção granulométrica significativa dos rejeitos do minério de ferro depositados nas barragens de contenção (Figura 2.1).

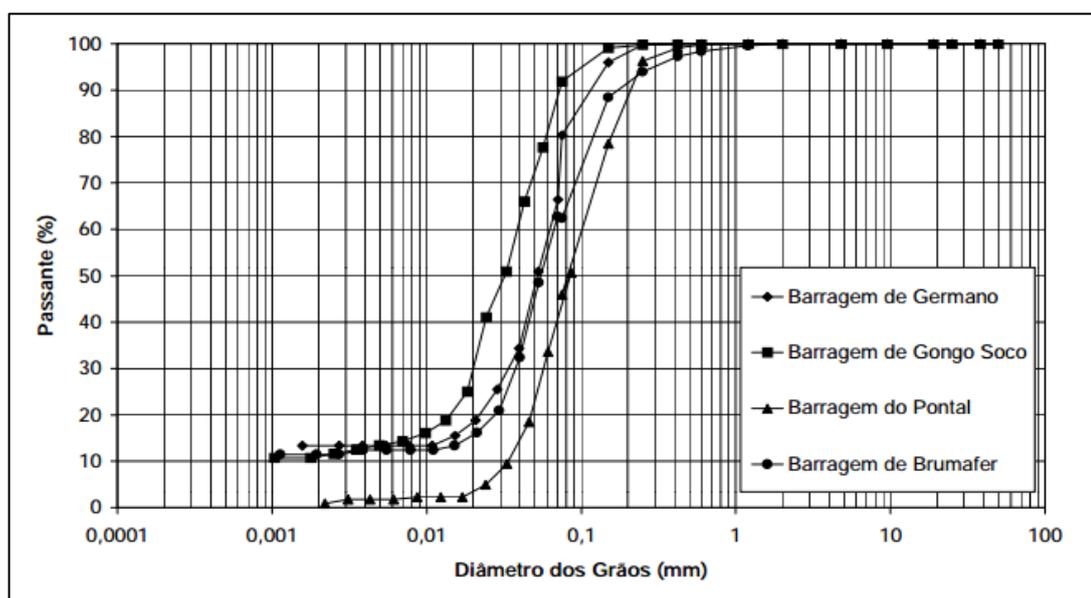


Figura 2.1 – Curvas granulométricas de rejeitos de minério de ferro da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Fonte: Pereira (2012).

A rigor, o conhecimento do resíduo de mineração como um material geotécnico é ainda bastante incipiente e a modelação dos problemas geotécnicos envolvendo esses materiais é tipicamente estabelecida a partir de uma generalização dos princípios clássicos da Mecânica dos Solos (Gomes & Albuquerque Filho, 2002). Rejeitos muitas vezes não se comportam necessariamente como solos e essa lacuna tecnológica representa uma profunda perda no domínio do conhecimento em projetos e construção de empreendimentos envolvendo resíduos de mineração.

A quantidade de resíduos gerada pela atividade depende do processo utilizado para extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície. Em geral, essa quantificação é de difícil obtenção, devido à complexidade e à diversidade das operações e tecnologias utilizadas nos processos de extração e de beneficiamento das substâncias

minerais. Além disso, as informações estão dispersas entre várias agências governamentais, tanto no âmbito federal quanto estadual. Não existe, por exemplo, um controle sistemático e em escala nacional sobre a quantidade de estéreis gerados pela atividade de mineração (Silva *et al.*, 2011).

Tal medição torna-se ainda mais complexa para feldspatos, uma vez que os dados relativos à sua produção no Brasil são imprecisos e de difícil obtenção, de forma que são estimados a partir de índices de consumo, que por sua vez são estimados através de coeficientes técnicos de produção das indústrias consumidoras (DNPM, 2001).

## 2.2 Minério de Feldspato

Os feldspatos designam um dos grupos de minerais mais abundantes na crosta terrestre (60%), estando suas maiores concentrações presentes em sua camada mais externa, a qual é rica em silício (Si) e alumínio (Al) (Lira & Neves, 2013). Além da grande frequência, esse grupo apresenta ampla distribuição geológica, estando presente em quaisquer rochas ígneas não ultramáficas, sendo comum também em algumas rochas sedimentares e na maioria de rochas metamórficas (Vlach, 2002).

O feldspato pertence ao grupo dos aluminossilicatos, contendo diferentes proporções de potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), e eventualmente, bário (Ba) em sua composição. Suas principais características são descritas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Principais características do feldspato.

Peso específico: 2,54 - 2,76 g/cm <sup>3</sup> ;
Cores: Branco, cinza e róseo;
Dureza: 6 - 6,5 (Escala Mohs);
Brilho: Não metálico e vítreo;
Habito: Cristal prismático ou compacto;
Sistema de cristalização: Monoclínico e triclínico;
Aspecto ótico: Translucido e transparente (menos frequente);
Clivagem: perfeita em duas direções formando ângulo de 90° ou próximo desse valor;
Composição química: (Na.K) Al Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Ca Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Ba Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .

Fonte: Lira & Neves (2013).

A classificação dos feldspatos ocorre essencialmente por meio de sua composição química, uma vez que suas propriedades físicas/estruturais são idênticas. Dessa forma, subdivide-se esse elemento em três grupos principais: alcalinos ou potássicos, calco-sódicos (plagioclásio) e os de bário, que se encontram em menor

proporção e frequência no meio ambiente. Esses, por sua vez, são classificados segundo as concentrações moleculares de seus principais elementos presentes (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Principais elementos químicos do feldspato.

<b>Grupo</b>	<b>Elementos químicos</b>	<b>Abreviação</b>	<b>Formula química</b>
Potássico	Ortoclásio/microclínio	Or	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
Plagioclásio	Albita	Ab	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
	Anortita	Na	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$

Fonte: Adaptado de Lira & Neves (2013) pelo autor.

### 2.2.1 Reservas brasileiras – localização e distribuição

Apesar de ser um dos materiais mais abundantes na crosta terrestre (60%), apenas um pequeno número de depósitos são apropriados para sua exploração. Esse pequeno número é devido à maioria dos feldspatos ocorrerem em rochas de média ou fina granulação ou, quando em forma separada, com contaminação de ferro, o que na maioria das vezes inviabiliza sua utilização industrial. Assim, os depósitos atualmente minerados são aqueles em que houve segregação natural do mineral e apresentam baixos índices de contaminação e mineralogia simples e homogênea (Coelho, 2009).

A classificação dos tipos de depósitos desse bem mineral é realizado por meio de uma mistura de conceitos mineralógicos e econômicos pelos quais passam a ser conhecidos comercialmente. De acordo com a Associação dos Produtores de Feldspato da Comunidade Europeia (Eurofel), os principais tipos de depósitos em exploração no mundo são as jazidas de nefelina-sienito, aplito, alaskito, granitos e pegmatito (Coelho, 2009).

Os pegmatitos são considerados a principal fonte de feldspato no mundo devido aos seus grandes cristais, pureza e abundância. São depósitos formados por rochas ígneas de granulação grosseira, com predominância de feldspato (60-70%) e quartzo (25-30%) e uma vasta gama de minerais secundários ou acessórios, muitos deles explorados economicamente (Saller, 1999 *apud* Coelho, 2009). No Brasil, seus depósitos encontram-se distribuídos em uma larga faixa que se estende do Nordeste ao Sul do país (Figura 2.2).

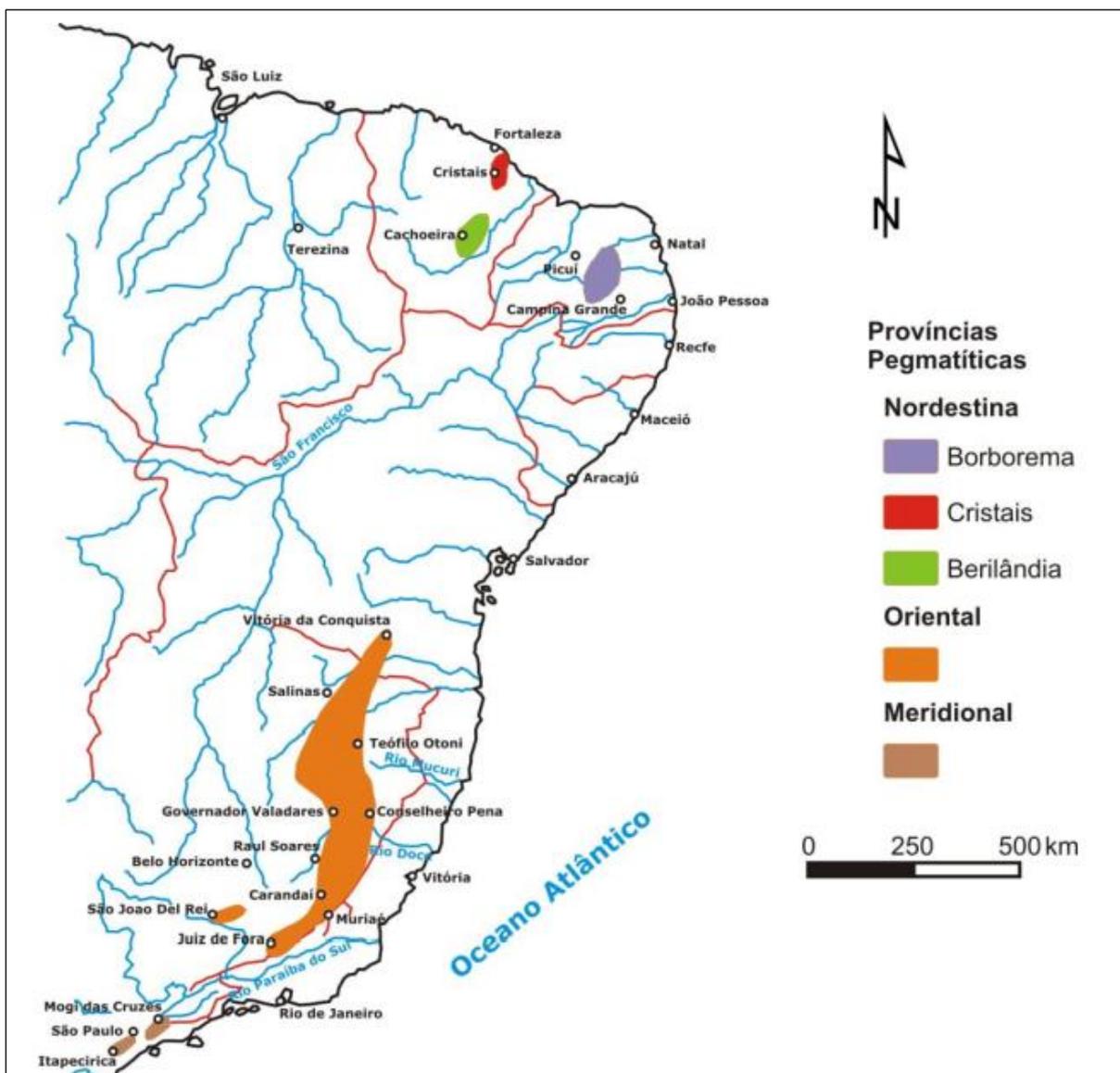


Figura 2.2 – Províncias Pegmatíticas Nordestina, Oriental e Meridional. Fonte: Drummond (2009)

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015), as reservas medidas de feldspato no Brasil totalizam cerca de 316 milhões de toneladas, que se encontram distribuídas entre os estados do Paraná (28,3%), Minas Gerais (13,3%), Paraíba (10,4%), Rio Grande do Norte (10,2%), Rio de Janeiro (10,2%), Bahia (8,9%), São Paulo (8,2%), Santa Catarina (6,2%) e Tocantins (4,3%).

### 2.2.2 Produção nacional e consumo aparente

Os dados de consumo a partir da produção oficial de feldspato são de difícil obtenção e bastante imprecisos. Essa defasagem ocorre em virtude do fato de que apenas se contabiliza o feldspato produzido de lavras regulares de pegmatito, não

orçando dessa forma: a atividade garimpeira; a produção dos rejeitos das minerações de gemas e pedras semipreciosas, entre outros; e a produção de feldspato a partir de outras rochas como granito e anortosito. Conseqüentemente, a produção brasileira torna-se muito maior do que a divulgada oficialmente (Coelho, 2009).

Segundo Bezerra *et al.*(1994), estima-se que atividade garimpeira corresponde a 30% da oficial, além disso, aproximadamente 86% do total produzido no Brasil é proveniente da lavra rudimentar, na qual são lavrados vários minerais (gemas, quartzo, berílio, minerais metálicos, entre outros) e só posteriormente é feita a coleta do feldspato no rejeito, fazendo com que parte dessa produção deixe de ser registrada.

Tal disparidade na medição realizada pelo DNPM e o real produzido e consumido, pode ser vista ao usar como base de informações o consumo de fundentes na indústria de revestimentos cerâmicos, a qual em 2007 foi estimada em aproximadamente 759.000 toneladas de rochas feldspáticas e feldspato (IPT, 2007 & ANFACER, 2009 *apud* Coelho, 2009), enquanto o calculado pelo DNPM fora de 160.682 toneladas (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Estatísticas do feldspato – Brasil.

Discriminação		Und.	2007 <sup>(3)</sup>	2008 <sup>(3)</sup>	2009 <sup>(3)</sup>	2010 <sup>(3)</sup>	2011 <sup>(3)</sup>	2012 <sup>(3)</sup>	2013 <sup>(3)</sup>	2014 <sup>(4)</sup>
Produção Nacional <sup>(1)</sup>	Bruta	(t)	182.168	142.863	160.760	363.251	416.008	328.001	421.039	496.894
	Beneficiada	(t)	166.089	121.952	115.264	276.448	333.352	247.152	294.357	417.771
Variação anual da Produção Nacional <sup>(1)</sup>	Bruta	(%)	-	-22%	13%	126%	15%	-21%	28%	18%
	Beneficiada	(%)	-	-27%	-5%	140%	21%	-26%	19%	42%
Consumo Aparente <sup>(2)</sup>	Beneficiada	(t)	160.682	116.833	112.907	271.235	327.706	243.671	294.068	414.276
Variação anual do Consumo Aparente <sup>(2)</sup>	Beneficiada	(%)	-	-27%	-3%	140%	21%	-26%	21%	41%

<sup>(1)</sup> Produção de empresas detentoras de concessões de lavra; <sup>(2)</sup> Produção + importação + exportação; <sup>(3)</sup> Dados revisados; <sup>(4)</sup> Dados preliminares.

Fonte: Sumário Mineral – DNPM (2010 - 2015), adaptado pelo autor (2017).

Além desses aspectos, a produção e consumo do feldspato são bastante aleatórios, apresentando aumentos repentinos e variações elevadas (ordem de  $\pm 20\%$ ) ao longo dos anos. As projeções existentes, realizadas por Coelho (2009) (Anexo 01 e 02) não satisfazem o cenário atual, uma vez que se encontram no mínimo 57% maior do que o esperado.

### 2.2.3 Área de atuação – Mercado consumidor

Os principais usos do feldspato encontram-se nas indústrias de cerâmica (revestimento e coloríficos) e vidro, que juntas consomem mais de 90% de todo mineral produzido. Na indústria cerâmica, o feldspato atua como constituinte não plástico que, além de desempenhar a função de fundente (diminuindo a temperatura de fusão), auxilia o corpo cerâmico a manter a sua forma após a queima (servindo de cimento para os constituintes plásticos da mistura), além de também fornecer sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Esse segmento é responsável pelo consumo de aproximadamente 70% da produção global do feldspato, utilizando preferencialmente do feldspato potássico devido a massa fundida do feldspato sódico ter menor viscosidade, sendo mais propenso ao desenvolvimento de peças empenadas ou deformadas (Coelho, 2009).

Na indústria vidreira, o feldspato além de atuar como fundente, é usado como fonte de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ), e sílica. O feldspato é responsável por 19% dos custos da produção de vidro e por cerca de 9% da participação no total de minerais usados (Coelho, 2009).

O feldspato também é usado como carga mineral e extensor, nas indústrias de tintas, plásticos, borrachas e abrasivos leves. Existem novos setores que apresentam consumo crescente, como as aplicações de tecnologia de painéis solares, cargas e cosméticos (Wan, 2008).

O crescimento no consumo de feldspato está dominado pelas indústrias de revestimento cerâmico e de coloríficos, visto que a indústria de vidro, em particular a de embalagem, tem apresentado um baixo crescimento, atribuído ao consumo de garrafas PET e latas metálicas, bem como ao aumento crescente da reciclagem de vidro. O aumento pela demanda de feldspato por parte das indústrias de revestimento cerâmico deve-se ao desenvolvimento do processo de produção dos porcelanatos, o qual reduziu o ciclo de queima de 30 a 50 horas para 60 a 70 minutos, por meio da incorporação de 60% de feldspato na composição da massa cerâmica (Luz *et al.*, 2008).

As indústrias vidreira e cerâmica exigem que a composição de porcelanas, esmaltes e vidrados tenham teores de álcalis superiores a 14% e teores de ferro abaixo de 0,08%. Na confecção de vidros incolores e cristais, demandam um teor de alumina acima de 18% e de ferro abaixo de 0,08% (Bezerra *et al.*, 1994).

## 2.3 Mineração do feldspato no Rio Grande do Norte

### 2.3.1 Reservas minerais de feldspato

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015) as reservas medidas (sem incluir a exploração garimpeira) de feldspato no Rio Grande do Norte equivalem a cerca de 32.232 toneladas, a qual corresponde a 10,2% das reservas nacionais. Essas encontram-se distribuídas nos municípios de Alexandria, Currais Novos, Equador, Parelhas, e Santana do Seridó (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Principais reservas de feldspato no Rio Grande do Norte.

Municípios	Reservas (t)			
	Medida	Indicada	Inferida	Lavrável
Alexandria	16.201.845	-	-	-
Currais Novos	3.571.201	200.000	200.000	-
Equador	850.701	222.559	-	768.413
Parelhas	10.832.688	3.932.514	198.876	4.028.023
Santana do Seridó	844.000	137.000	-	844.000
Total	32.300.435	4.492.073	398.876	5.640.436

Fonte: Adaptado do Anuário Mineral (2010) pelo autor.

Esses municípios, com exceção de Alexandria, situam-se imersos nos domínios da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), uma das sete principais zonas geológicas produtoras de feldspato. A PPB possui uma área de 10.000 km<sup>2</sup> e é delimitada pelas coordenadas 05°30' e 07°15' de latitude sul e 35°45' e 37°15' de longitude oeste (Silva *et al.*, 2010) (Figura 2.3).

Segundo Beurlen *et al.* (2008), a PPB possui, aproximadamente, 750 corpos mineralizados, que se apresentam de forma dispersa e descontínua ao longo do território. Devido a grande quantidade de corpos mineralizados e variedade de minerais raros encontrados, essa província é considerada a segunda maior província pegmatítica do Brasil (Castro & Jatobá, 2006), detendo cerca de 20,6% (65,1 milhões de toneladas) das reservas medidas de feldspato (DNPM, 2015).

Os pegmatitos dessa província caracterizam-se por serem corpos topograficamente salientes, devido ao núcleo de quartzo resistir à erosão, caracterizando a paisagem geológica, regionalmente, como forma de alto relevo (Correia Neves, 1981 apud Dwight, 2004).

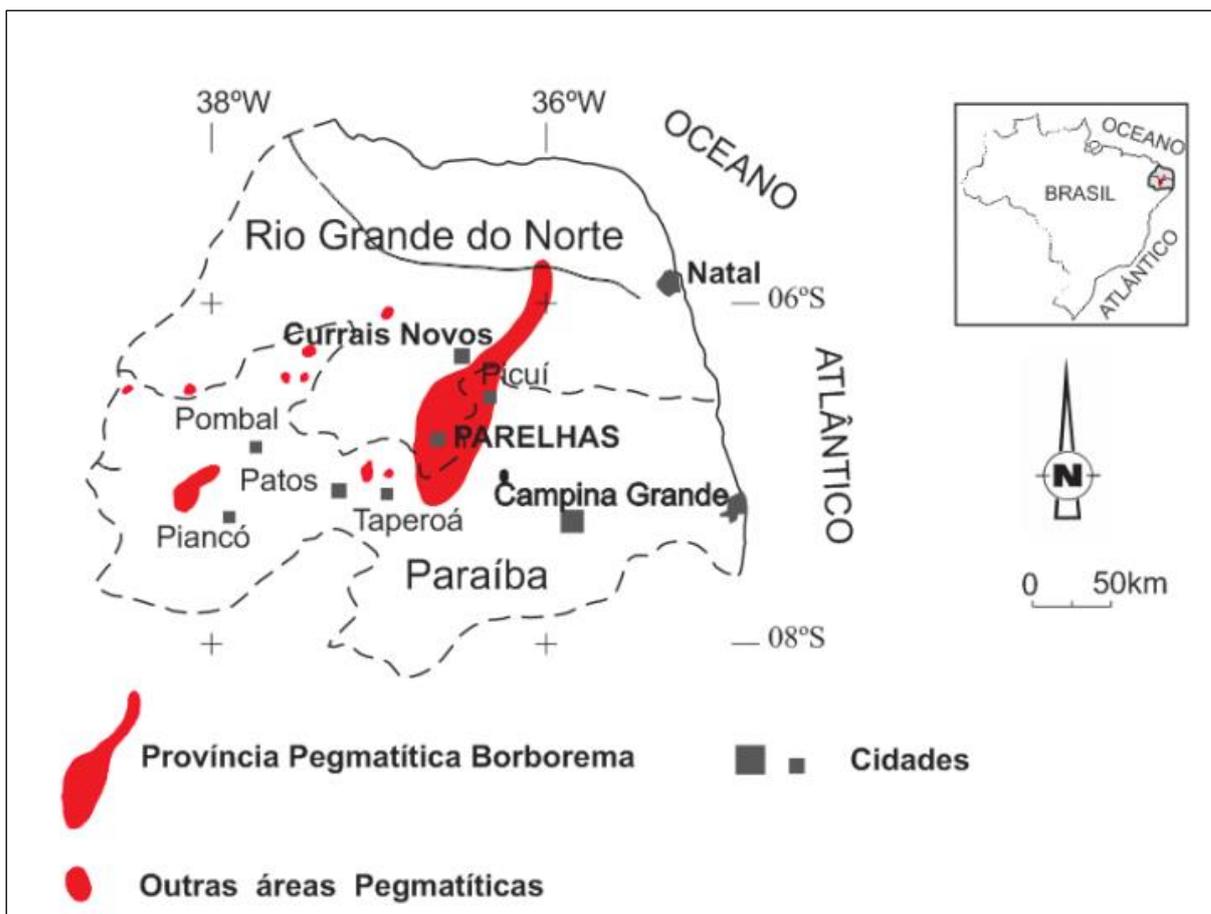


Figura 2.3 – Localização da Província Pegmatítica da Borborema. Fonte: Miranda (2012).

### 2.3.2 Atividade mineral - lavra e beneficiamento

Na maioria dos casos, o feldspato encontra-se associado a outros minerais e não possui a granulometria ideal para ser utilizado. Dessa forma, antes que seja direcionado para os setores industriais, faz-se necessário submetê-lo ao processo de lavra e beneficiamento.

As operações de lavra do feldspato em jazidas pegmatíticas no RN ocorrem, em sua grande maioria, manualmente, usando técnicas e equipamentos rudimentares (pás, picaretas, etc.), como é o caso da mineração artesanal e de pequena escala desenvolvida em garimpos descrita por Melo (2011). O motivo dessa ocorrência processa-se ao fato que os pegmatitos da PPB são, em sua maioria, corpos de pequenas dimensões, nem sempre justificando grandes investimentos. Logo, a maioria dos corpos são trabalhados por garimpeiros (Luz *et al.*, 2003 & Melo, 2011).

Outro método de obtenção do minério de feldspato é por meio de lavras à céu aberto mecanizadas, caracterizadas por utilizarem de técnicas de engenharia de minas. Nelas, o desmonte da rocha ocorre em bancadas de até 5 metros e com a utilização de perfuratrizes, marteletes, pás carregadeiras e caminhões (Figura 2.4). O uso de explosivos nem sempre é necessário, dependendo do estágio de alteração do minério.



Figura 2.4 – Ilustração de uma lavra a céu aberto mecanizada. Fonte: Leonardo (2013).

Assim como na atividade garimpeira, o processo de catação e redução do fragmento de feldspato ocorre manualmente, de forma que, ao término dessas etapas, o material extraído é empacotado ou depositado em forma de pilhas na praça da mina (Figura 2.5). Esses materiais são transportados por meio de caminhões até unidades de britagem, onde passam por um tratamento que contempla os processos de britagem, moagem, peneiramento e classificação granulométrica (Figura 2.6). O produto moído é vendido em malhas de 30 a 200 mesh, para os segmentos das indústrias de esmalte, massa sanitária, engobe, porcelanato e fundentes (vidro).

Na mineração do feldspato não há emprego de água nas operações de lavra. O seu uso restringe-se às minerações mais estruturadas na umidificação das vias não pavimentadas situadas no interior e nos acessos ao empreendimento para abatimento de partículas em suspensão.



Figura 2.5 – Armazenagem de amostras do pegmatito. (A) Material disposto em sacos. (B) Material disposto em pilhas na praça da mina. Fonte: Melo (2011).



Figura 2.6 – Central de Tratamento (moagem) em Parelhas/RN. Fonte: Grupo ARMIL Mineração do Nordeste - Casa Grande Mineração LTDA.

### 2.3.3 Produção

A produção das lavras regulares no RN totaliza em média cerca de 3,58% e 3,12% da produção Nacional bruta e beneficiada, respectivamente, nos últimos anos, conforme representado na Tabela 2.6 (DNPM, 2010 – 2015). Segundo Angelin *et al.* (2006), a produção informal (garimpo) de feldspato no Rio Grande do Norte nos últimos anos tem oscilado em torno de 2.000 a 3.000 toneladas por mês.

Ao comparar a produção desses dois segmentos, levando em consideração a manutenção da média produzida pela atividade garimpeira no RN (30.000 toneladas/ano), conclui-se que ela é cerca de duas vezes superior à média produzida pelas lavras regulares (14.500 toneladas/ano) no período de 2010 a 2014. Esse aspecto comprova, apesar de ser em menores proporções, por parte do Estado do

Rio Grande do Norte, a ocorrência da defasagem gritante entre o que é registrado e o que é realmente produzido, citado por Coelho (2009) e Bezerra *et al.*(1994).

Tabela 2.6 – Estatísticas do feldspato- Brasil & RN.

Discriminação		Unidade	2010 <sup>(2)</sup>	2011 <sup>(2)</sup>	2012 <sup>(2)</sup>	2013 <sup>(2)</sup>	2014 <sup>(3)</sup>	Total
Produção Nacional <sup>(1)</sup>	Bruta	(t)	363.251	416.008	328.001	421.039	496.894	2.025.193
	Beneficiada	(t)	276.448	333.352	247.152	294.357	417.771	1.569.080
Produção Estadual <sup>(1)</sup>	Bruta	(%)	2,1	4,2	1,8	6,2	3,1	3,58
	Beneficiada	(%)	2,3	3,7	1,7	4,3	3,2	3,12
Produção Estadual <sup>(1)</sup>	Bruta	(t)	7.628	17.472	5.904	26.104	15.404	72.512
	Beneficiada	(t)	6.358	12.334	4.202	12.657	13.369	48.920
(1) Produção de empresas detentoras de concessões de lavra; (2) dados revisados; (3) dados preliminares.								

Fonte: DNPM (2010 - 2015).

Em conformidade com o cenário nacional acerca da produção registrada do minério de feldspato citada por Coelho (2009), Tópico 2.1.2, também é possível visualizar variações elevadas e repentinas da produção do feldspato, entretanto estas acontecem bastante superiores a variação média nacional (ordem de  $\pm 20\%$ ).

### 2.3.4 Resíduos da mineração do feldspato

Os fragmentos graníticos com presença do minério de feldspato que não são aproveitados devido à presença de impurezas ou pela dificuldade de separação do minério aos demais materiais a ele associados são descartados em forma de pilhas nas redondezas da praça da mina, de forma a não atrapalhar as atividades produtivas da exploração dos minérios.

Segundo Ingunza *et al.* (2014), as amostras coletadas dos resíduos provenientes das lavras de feldspato pegmatítico da região de Parelhas/RN são de modo geral materiais inertes (Classe II-B) com alto percentual de sílica e alumínio e em menor proporção ferro, potássio e cálcio. A elevada concentração de quartzo, material altamente resistente, quando preservadas suas características, pode conferir propriedades satisfatórias ao uso deste resíduo como matéria-prima na construção civil.

Esses resíduos se apresentaram semelhantes quimicamente aos resíduos procedentes das frentes de lavra do feldspato pegmatítico da cidade de Currais Novos/RN estudados por Tavares *et al* (2010) (Anexo 03). A presença de óxido de ferro e o baixo teor de álcalis totais ( $K_2O + Na_2O$ ), apresentado por ambos, se mostra

em desacordo com os pré-requisitos estabelecidos pela indústria de cerâmica e vidro. A rejeição desse material no processo de obtenção do minério de feldspato acontece devido à indisponibilidade de técnicas de concentração mais elaboradas (flotação ou separação magnética) na região (Luz *et al.*, 2003).

Segundo o Grupo ARMIL Mineração do Nordeste, através da Casa Grande Mineração LTDA (2016), principal empresa beneficiadora (moagem) do minério de feldspato no Rio Grande do Norte (RN) e uma das 12 maiores do Brasil nesse segmento, e que se encontra situada nas circunvizinhanças da cidade de Parelhas/RN, a produção de resíduos proveniente da lavra alterna conforme as características da mina. Através de suas seis jazidas de pegmatito destinadas a exploração do minério de feldspato no RN, estima-se que em média sejam gerados 10% de resíduos estéreis em relação a sua produção bruta, a qual está estimada em 1.000 toneladas por mês.

## **2.4 Uso de resíduos da mineração em obras de engenharia**

A busca constante por um meio ambiente mais saudável vem acarretando uma procura por alternativas que visem a sua preservação, amenizando o impacto provocado pelas atividades extrativistas. Diversos projetos de pesquisas e obras geotécnicas já foram elaborados a fim de proporcionar uma mitigação dos efeitos causados pelo acúmulo dos resíduos de mineração no meio ambiente, buscando-se disponibilizar uma fonte alternativa de baixo custo que atendam aos pré-requisitos funcionais, estruturais, ambientais dos projetos/elementos de engenharia a serem construídos.

### **2.4.1 Incorporação de resíduos da mineração em obras geotécnicas**

Vários estudos foram realizados com os resíduos da mineração visando obter os parâmetros de resistência e suas correlações com outros parâmetros geotécnicos. Ribeiro (2000) analisou a correlação dos parâmetros de resistência do rejeito de minério de ferro com as características físicas e método de deposição desse material. Espósito (2000) e Lopes (2000) analisaram correlações entre as porosidades relativas e a resistência dos aterros construídos com rejeitos arenosos de minério de ferro baseados em avaliações de campo e ensaios de laboratório, mostrando que materiais mais grossos e conseqüentemente com maiores teores de ferro tendem a apresentar ângulos de atrito maiores, para uma mesma porosidade inicial. Espósito &

Assis (2002) e Gomes & Albuquerque Filho (2002) estudaram a quantificação do potencial de liquefação de diferentes tipos de rejeitos em função das características dos depósitos. Presotti (2002) investigou, por meio de ensaios de laboratório, as correlações entre teor de ferro, granulometria e porosidade, enfatizando a influência destes parâmetros no valor do ângulo de atrito do rejeito de minério de ferro. Santos (2004) estudou o comportamento do rejeito de minério de ferro em função da porcentagem de ferro e sílica, verificando as suas interferências nas variações das propriedades geotécnicas do mesmo.

Fernandes (2005) analisou o comportamento de geotécnico de solos finos e resíduos sólidos de minério de ferro (RSMF) proveniente da mineração e siderúrgica associados a geossintéticos visando sua aplicabilidade em pavimentos ferroviários. Para tanto foi elaborado e desenvolvido um vasto programa experimental que contemplou a caracterização geotécnica do solo fino e do RDMF associado a geossintéticos, a implementação e monitoramento de um trecho experimental sobre condições de tráfego similares às impostas na região, e realização de ensaios de campo para compreender o comportamento estrutural das misturas dos resíduos sólidos de minério de ferro. Os resultados indicaram que as misturas de RSMF com solos finos locais atendiam aos pré-requisitos técnicos de camadas nobres dos pavimentos ferroviários, apresentando um aumento do ISC e resiliência para misturas com até 50% RSMF. Os resultados obtidos nos ensaios de campo (frasco de areia, determinação de deflexões com a viga Benkelman, módulos dinâmicos, controle topográfico e determinação das deformações dinâmicas e residuais acumuladas) das misturas de minério de ferro associadas a geossintéticos, mostraram eficiência e viabilidade técnica de pavimentos ferroviários compatível com a de materiais normalmente utilizados. Além disso, por serem materiais encontrados na faixa da ferrovia ou dentro da área de influência dos empreendimentos mineradores e siderúrgicos, obteve-se significativa economia na distância média de transporte.

Alecrim e Fabbri (2005) estudaram as potencialidades do uso de rejeito granular da mineração de quartzito em camadas sub-base e base de pavimentos flexíveis. Utilizando diferentes dosagens entre solos lateríticos da região sudoeste de Minas Gerais com rejeito granular de quartzitos. Os pesquisadores comprovaram que a proporção de 60% de rejeito e 40% de solo apresentou o melhor desempenho relativo aos ensaios de Índice Suporte Califórnia e de módulo resiliente com

respectivos valores de 84% e de 700 Mpa. Posteriormente, Alecrim (2009) analisou o uso integral do rejeito da mineração de quartzito após a britagem, concluindo que, ao ser misturado com o solo laterítico da região, apresenta valores que indicavam bom comportamento quanto à resistência e deformabilidade, comparáveis aos materiais granulares e misturas solo-agregado convencionais.

Pissato & Soares (2005) estudaram a influência de adição de finos de pedra, com características arenosas, em solos argilosos aliado ao uso de cimento Portland. Com diferentes teores de dosagem, as composições foram submetidas a ensaios de resistência de compressão simples, apresentando ao final resultado superior a 2,1 MPa, valor recomendado pela NBR 12253 (ABNT, 1992). A quantidade acrescentada de finos de pedra levou a um aumento proporcional na resistência da mistura de solo-cimento final, apontando que, quanto maior for a quantidade de finos, menor o teor de cimento necessário para estabilização.

Souza *et al.* (2006) analisaram a interação mecânica, por meio de ensaios de cisalhamento direto, dos resíduos sólidos do minério de ferro (estéril e rejeito) com geossintéticos (geotêxtil não tecido de poliéster e geogrelha) como material de construção em obras de infraestruturas de rodovias e ferrovias. Os materiais estudados apresentaram comportamento típico de solos granulares sob cisalhamento ( $37,3^\circ < \phi < 43,7^\circ$  e  $0 < c < 20$  kPa) e dilatância típica de solos granulares de elevada compacidade. A interface solo-geossintéticos apresentaram perda em termos quantitativos do ângulo de atrito dos materiais estudados, entretanto apresentaram-se como uma alternativa em camadas de base em obras de superestruturas.

Luz *et al.* (2006) pesquisaram o uso de finos de pedreiras da região de Goiânia (GO) na estabilização de um solo regional. Os resíduos utilizados provêm da lavagem de finos de agregados de uma rocha micaxisto. As dimensões das partículas desses finos apresentam características de um solo silto-arenoso. Com dosagens que variaram de 0% a 100% e submetendo as composições a energias de compactação intermediária e modificada, constatou-se que para a energia intermediária, a composição que apresentou melhor resultado no acréscimo do valor do CBR foi a que recebeu adição de 20% de finos de pedra. Aplicando-se a energia modificada, o melhor resultado alcançado foi com a inclusão de 30% de finos ao solo. A pesquisa

também avaliou as alterações ocorridas na granulometria, na massa específica e nos limites de consistências das composições.

Batalione (2007) averiguou a utilização de rejeitos finos de jazidas de granito na estabilização de quatro solos lateríticos da região noroeste do estado de Goiás visando seu aproveitamento em obras de pavimentação. Para tanto, foi desenvolvida uma série de ensaios laboratoriais de caracterização físico, química, mineralógica e mecânica e instalados trechos pilotos para análise em campo do comportamento do rejeito agregado aos solos. As adições do rejeito nos solos naturais provocaram um aumento no teor de areia e silte e diminuição do teor de argila e plasticidade apresentado pelos solos naturais. Houve a manutenção e em alguns casos acréscimo nos valores de ISC das misturas realizadas com solo-rejeito em relação ao solo natural, de forma que poderiam ser utilizados como elemento de sub-base. Os valores dos módulos de resiliência dos solos naturais e das composições que receberam adição do rejeito não apresentaram diferenças apreciáveis ao ponto de alterar sua classificação resiliente. Em relação aos resultados de campo verificou-se que tanto as deformações como o coeficiente de rigidez da camada e o módulo de elasticidade do material não sofreram grandes alterações com a inclusão de 15% em volume de rejeito ao solo da camada de subleito e base, concluindo-se que este possui viabilidade técnica para ser utilizado em estruturas de um pavimento urbano com tráfego leve.

Castro (2008) constatou, ao avaliar a substituição parcial do solo pelo resíduo do beneficiamento do caulim, que a incorporação de 20% da mistura do resíduo grosso e fino de caulim no solo-cimento apresentava-se como alternativa para obras civis, uma vez que fora observado ganhos de cerca de 95% na resistência em comparação ao corpo de prova de referência. Além disso, constatou que houve um aumento de resistência considerável dos corpos de prova no 56º dia, decorrente da presença de materiais pozolânicos contidos na mistura

Silveira (2010) apresentou um estudo sobre a caracterização e avaliação das potencialidades de dois resíduos finos provenientes do beneficiamento das rochas micaxisto (pedreira Araguaia) e granito (pedreira Anhanguera) em camadas de pavimento. Foram realizados estudos de caracterização física, mecânica, química e mineralógica dos dois resíduos, do solo natural, das misturas preparadas com adições de 10, 15 e 20% em massa de cada um dos resíduos. Constatou-se que o peso

específico dos grãos da mistura ao se incluir porcentagens dos resíduos da pedreira Araguaia acarretava no aumento da densidade em relação ao solo natural, enquanto que para as amostras da pedreira Anhanguera apresentava uma diminuição. Foi observado por meio de ensaios de Mini-CBR, médias de 10,8 e 8,3% nos resíduos de micaxisto e granito respectivamente, enquanto o solo, moldado na energia intermediária, obteve CBR na ordem de 30%. A mistura de 15% em massa de ambos resíduos no solo resultou em valores inferiores ao solo puro, porém, que atendiam aos pré-requisitos de camadas de sub-base, sendo observado melhores resultados com amostras misturadas com micaxisto ( $CBR_{m\acute{a}x} = 26\%$ ). Concluiu-se que a utilização do resíduo nos teores citados mostra-se uma alternativa ambientalmente relevante para transformar um resíduo, em conjunto com um solo, em um material artificial com potencialidade de utilização em camadas de pavimentos rodoviários.

Bedin (2010) analisou o comportamento geomecânico de resíduos da mineração de ouro (não-ciclonados e *underflow*) e bauxita (lama vermelha e areia vermelha). Os resultados de condução hidráulica e compressibilidade dos materiais foram obtidos por meio ensaios oedométricos com estágios de carga e gradientes hidráulicos constantes. Além disso foram realizados ensaios de compressão triaxial com altos níveis de tensão de confinamento e distintas trajetórias de tensões para definição da linha de estado crítico e a identificação do comportamento desses materiais através de ensaios com elementos Bender. Constatou-se que: a) A lama-vermelha apresentava baixa capacidade drenante, ângulo de atrito ( $\phi'$ ) e coesão efetiva ( $c'$ ) iguais a  $36^\circ$  e 10 KPa além de baixo riscos de liquefação (baseado na teoria de estados críticos); b) A areia-vermelha apresentou-se como material com melhores condições drenantes e  $\phi'=32^\circ$  e  $c'=0$  e possíveis riscos de liquefação para baixas tensões de confinamento; c) Os resíduos da mineração apresentaram boa condição drenante, com valores de coesão efetiva igual a zero e  $\phi'$  variando entre  $31^\circ$  e  $30^\circ$ , foi identificado riscos de liquefação para baixos níveis de tensão de confinamento e quebra dos grãos para tensões superiores a 800 KPa.

Freire (2012) investigou o uso do resíduo do beneficiamento do itabirito (rocha composta essencialmente por sílica e ferro) como substituto de agregados naturais em blocos de pavimentação. Para tanto, foi projetada uma instalação piloto a fim averiguar a reprodução dos dados laboratoriais obtidos durante a pesquisa. Desses

ensaios, concluiu que os blocos de pavimentação utilizando o resíduo como agregado em escala piloto podem ser utilizados em calçadas e estacionamentos.

Santos (2012) estudou a utilização do rejeito de carvão na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição do agregado miúdo natural. Para tanto produziu-se um agregado miúdo reciclado (AMR) por meio do beneficiamento gravimétrico do rejeito bruto do carvão, visando a concentração dos minerais inertes e tratamento granulométrico do resíduo. Os resultados apontaram que os blocos produzidos com 25% e 50% de substituição não apresentaram diferença significativa em relação aos blocos de referência (0% de substituição), nem impactos negativos na resistência a abrasão ou absorção de água. Além disso não foi detectada drenagem ácida de minas devido à alta alcalinidade do cimento, de forma que, para as porcentagens mencionadas, a aplicação do AMR apresenta-se como fonte alternativa dos agregados miúdos naturais.

Martins & Santos (2012) estudaram o comportamento de misturas de resíduos do beneficiamento de feldspato e quartzo com adições de cimento, visando sua aplicação na pavimentação. Esse estudo apontou o resíduo como um material não perigoso e não inerte (Classe II-A), apresentando teores de alumínio, ferro, fluoreto e manganês acima dos permitidos em norma, fato este que podem levá-los a solubilizarem-se em água, contaminando os corpos hídricos. Foi detectado que o resíduo em seu estado natural apresenta valores de CBR e expansão melhores em seu ramo seco, em umidade 2% abaixo da umidade ótima. O CBR para esta umidade é, em média, 84% maior que o CBR para a umidade ótima. Ademais, evidenciou que, quando misturado com cimento, com teores de 2% a 4% abaixo da umidade ótima, a mistura apresentou valores de resistência à compressão simples, em média, 151% maior quando comparado ao material em seu estado natural.

Linhares (2014) e Gerab (2014) analisaram a incorporação do resíduo oriundo do beneficiamento da scheelita como elemento de pavimentação rodoviária. Linhares (2014) constatou que o rejeito poderia ser utilizado em camadas de sub-base quando compactado na energia intermediária e ao ser misturado com cimento (1%) atingia os pré-requisitos técnicos para elementos de base em rodovias de médio volume de tráfego (ISC = 60%). Gerab (2014) demonstrou a viabilidade técnica da utilização do resíduo grosso de scheelita em camadas de sub-base quando compactado em

energia modificada, podendo ser utilizada quando compactado nas demais energias em camadas menos nobres, como reforço de subleito e subleito.

Dantas (2015) analisou o comportamento geotécnico do rejeito de minério de ferro (RMF) estabilizado com solo granular proveniente do município de Macaíba/RN visando sua aplicação em pavimentos rodoviários. Para tanto, realizou ensaios de caracterização química, física, mecânica e mineralógica para cinco traços distintos. Constatou alto teores de minérios de ferro presentes no RMF acarretando em elevados valores de massa específica dos sólidos (3,40 a 2,51 g/cm<sup>3</sup>). Todas as amostras apresentaram-se fora das faixas granulométricas recomendadas para uso em camadas de base. As misturas com até 25% de MRF apresentaram aumento do ISC em relação ao solo local, podendo serem usados no máximo em camadas de sub-base.

## CAPÍTULO 3

**MATERIAIS & METODOS**

Neste capítulo serão abordados os procedimentos utilizados ao longo desta pesquisa, com vistas ao alcance dos objetivos propostos, incluindo os materiais utilizados e as normas técnicas consultadas.

A metodologia da pesquisa foi dividida em três etapas. A primeira parte consistiu na coleta do resíduo, transporte e tratamento granulométrico da amostra. A segunda etapa contempla a caracterização dos parâmetros físicos, químicos e mineralógicos dessa amostra haja vista sua utilização como elemento geotécnico. Na terceira etapa, foram desenvolvidos estudos quanto às propriedades mecânicas desse material. As etapas experimentais da pesquisa e seus respectivos ensaios e normas vigentes, são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Etapas da pesquisa e respectivos ensaios e normas.

<b>Etapa</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
1ª Etapa – Coleta, transporte e tratamento físico do resíduo	Coleta e preparação para ensaios de compactação e caracterização	DNER-PRO 257/99 DNER-PRO 120/97 NBR 6457/1986
2ª Etapa - caracterização física, química e mineralógica do resíduo	Massa específica dos sólidos	NBR 6508/1984 DNER-ME 093/094
	Granulometria Conjunta	NBR 7181/1984
	Limite de Liquidez	NBR 6459/1984
	Limite de Plasticidade	NBR 7180/1984
	Compactação	NBR 7182/1986
	Permeabilidade	NBR 14545:2000
	Fluorescência de Raios-X (FRX)	-
	Difração de Raios-X (DRX)	-
3ª Etapa - caracterização mecânica para fins geotécnicos	Índice de Atividade Pozolânica	NBR 5752/2014
	Califórnia Bearing Ratio (CBR)	NBR 9895/1987
	Cisalhamento Direto	ASTM D3080/1998
	Compressão Edométrica (adensamento unidirecional)	NBR 12007/1990 <sup>1</sup>
<sup>1</sup> Associada a ASTM D2435/D2435M e as indicações de Massad (2016).		

Fonte: Autor

### 3.1 Obtenção, armazenamento e tratamento físico do resíduo (1ª Etapa)

O resíduo analisado foi obtido em meio às pilhas de descarte da lavra do feldspato pegmatítico (resíduo estéril) dispostas nas imediações de uma das frentes de extração (jazida) localizada na circunvizinhança do município de Parelhas/RN. Esse município está inserido na Região Sudeste da Província Pegmatítica da Borborema (PPB) (Figura 2.3), que, por sua vez, se encontra imersa na unidade litoestratigráfica de Formação Equador e Seridó (Silva *et al.*, 2010). O município de Parelhas está localizado na mesorregião Central Potiguar e microrregião do Seridó Oriental, distante 246 km de Natal, capital estadual do Rio Grande do Norte.

O resíduo estéril do feldspato pegmatítico (REFP) se apresentava, segundo critérios granulométricos da NBR 6502/1995 (Rochas e solos), na forma transitória de pedra-de-mão e matacão, fragmentos de rochas com dimensões compreendida entre 60 a 200 mm e 200 a 1000 mm, respectivamente (Figura 3.1).

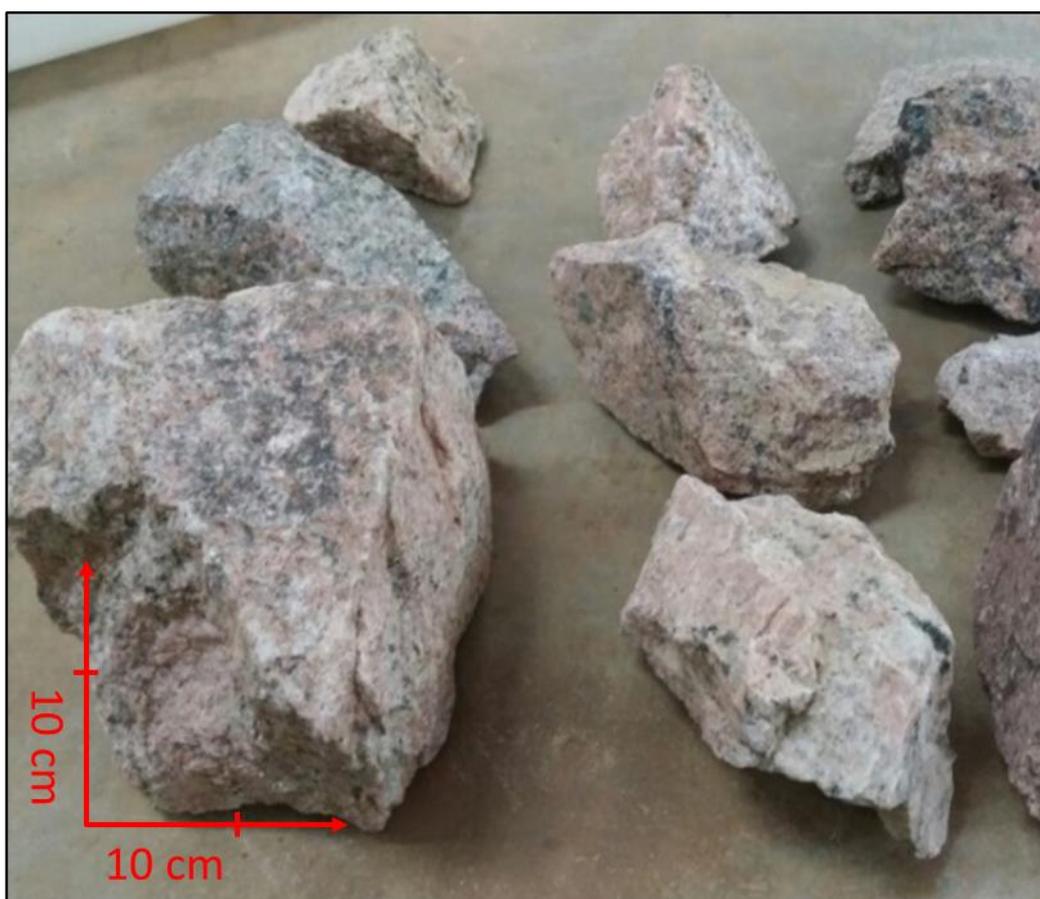


Figura 3.1 – Fragmentos do resíduo estéril do feldspato pegmatítico. Fonte: Autor

O REFP foi submetido a um processo de beneficiamento/tratamento granulométrico a fim de disponibilizar, em quantidade suficiente, um material granulometricamente semelhante aos materiais comumente utilizados em obras de terra. Tal processo deu-se inicialmente por meio da britagem manual do corpo rochoso, utilizando-se de marreta e martelo de geólogo, até que o resíduo atingisse granulometria igual ou inferior a um pedregulho fino ( $6,0 > \phi \geq 2,0$  mm).

Após esse tratamento, a amostra foi submetida a um regime de moagem na máquina Los Angeles no Laboratório de Materias de Construção Civil da UFRN, em frações de  $5.000 \pm 25$  gramas. Esse processo foi executado utilizando-se 12 esferas de aço ( $\phi \cong 47,6$  mm e  $M_{total} \cong 5.000$  g), com velocidade de 30 a 33 rpm durante 2 horas (mínimo de 3.600 rotações), de forma que ao término deste período de tempo, adquirisse um material 100% passante na peneira n° 4 (abertura de 4,8 mm). Posteriormente foi armazenado em bandejas, conforme demonstrado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Amostras do REFP após tratamento granulométrico. Fonte: Autor

### 3.2 Caracterização do resíduo (2ª Etapa)

A caracterização física, química e mineralógica do resíduo foi realizada por meio dos ensaios de determinação da massa específica dos sólidos, análise granulométrica conjunta, determinação dos limites de Atterberg, compactação do solo, fluorescência de Raios-X e difração de Raios-X. Além disso, foi examinada a potencialidade do uso do resíduo em conjunto com cimento por meio do parâmetro IAP (índice de atividade pozolânica).

### 3.2.1 Massa específica dos sólidos

O ensaio de determinação da Massa Específica dos Sólidos foi executado de acordo com os procedimentos determinados pela NBR 6508 (ABNT, 1984) e pela DNER-ME 093/094.

### 3.2.2 Análise granulométrica conjunta

A análise granulométrica do REFP foi realizada conforme procedimentos constantes na norma NBR 7181 (ABNT, 1984), inclusive no que concerne ao uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio) na etapa de sedimentação.

O resíduo estudado necessitou ser reutilizado ao longo da pesquisa, fato decorrente das limitações quanto à quantidade de material disponível. Dessa forma, perante tal condição, as amostras de REFP foram submetidos a análises granulométricas constantes até o término do processo experimental com a finalidade de identificar uma possível fragmentação dos grãos ao longo dos ensaios com presença de esforços mecânicos, como é o caso dos ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia, cisalhamento direto e compressão edométrica. Dessa forma, classificou-se o material utilizado em:

- a) **Resíduo sem reuso:** amostras de REFP que não sofreram qualquer solicitação mecânica que não fossem as realizadas no processo de tratamento granulométrico do resíduo e nos ensaios de caracterização previstos a serem realizados na 2ª etapa desta pesquisa.
- b) **Resíduo com reuso:** amostras de REFP que foram reutilizadas ao longo da pesquisa.

### 3.2.3 Limites de consistência (Atterberg)

Os ensaios para determinação dos limites de consistência (liquidez e plasticidade) foram regulamentados pela NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984).

### 3.2.4 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado seguindo-se as recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986) nas energias normal, intermediária e modificada. Todos os materiais sofreram o processo de secagem ao ar e houve reuso das amostras.

### 3.2.5 Permeabilidade

Apesar do material ser essencialmente granular, possuía mais de 10% de material passante na peneira 200 (0,075 mm), estando em desacordo com NBR 13292:1995 – “Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante”. Sendo assim, os ensaios de permeabilidade foram realizados com corpos de prova moldados na umidade ótima das energias de compactação normal, intermediária e modificada utilizando-se da NBR 14545:2000 – “Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável”. Além disso, foram utilizados os resultados dos ensaios de compressão edométrica para estimar a permeabilidade do resíduo.

A preparação das amostras e do permeâmetro foram realizadas, com ressalvas, de acordo com o método B da NBR 14545:2000, pois, ao invés de preencher/vedar os espaços entre o corpo de prova e as paredes do permeâmetro com betonita (argila plástica) conforme descrito em norma, foi utilizada parafina.

A aplicação da parafina foi realizada em camadas de 2 cm de altura e temperaturas entre 80 e 90°C (forma líquida). À medida que a mesma resfriava e apresentava certa viscosidade, realizavam-se furos em sua superfície com o intuito de evitar a retração da parafina e posterior passagem de água pela parede do permeâmetro. Após a parafina atingir a temperatura ambiente aplicava-se outra camada.

Tendo em vista que o REFP possui características de solos granulares, também foram utilizados os métodos empíricos propostos por Hazen (Equação 3.1), Kozeny-Carman utilizado por Singh & Mohanty (Equação 3.2), e Chapius (3.3) para estimar o coeficiente de permeabilidade do meio.

$$k = C \cdot D_{10}^2 \quad (3.1)$$

Onde:

$k$ : coeficiente de permeabilidade, cm/s;

$C$ : coeficiente de Hazen,  $50 < C < 200$ , sendo geralmente adotado igual a 100;

$D_{10}$ : diâmetro efetivo da curva granulométrica, cm.

$$e = \alpha + \beta \log(k) \quad (3.2)$$

Onde:

$$\alpha = 10\beta$$

$$\beta = 0,01 \cdot IP + \delta$$

$e$ : índice de vazios;

$k$ : coeficiente de permeabilidade, cm/s;

$IP$ : índice de plasticidade do solo;

$\delta$ : constante do solo, geralmente adotada como igual a 0,05.

$$k = 2,4622 \left( D_{10}^2 \frac{e^3}{1+e} \right)^{0,7825} \quad (3.3)$$

Onde:

$k$ : coeficiente de permeabilidade, cm/s;

$e$ : índice de vazios

$D_{10}$ : diâmetro efetivo da curva granulométrica, mm.

Toma-se nota que a equação proposta por Hazen (1911), deve ser usada somente para casos de areias limpas e uniformes, com pouca ou nenhuma quantidade de finos, sendo recomendado que coeficiente de uniformidade do solo ( $C_u$ ) seja menor que 5.

### 3.2.6 Caracterização química e mineralógica

Para realização desses ensaios, a amostra (1 kg) foi submetida a um processo de moagem, realizada durante 4 horas em um moinho de bolas, de forma que ao término do processo obteve-se uma amostra com 100% de passante na peneira com abertura de 0,075 mm. Tal prática teve como objetivo promover o aumento da área superficial dos minerais presentes na amostra, diminuindo os efeitos de interpolação destes e, conseqüentemente, melhorando as leituras químicas e mineralógicas presente no REFP. Após tal tratamento granulométrico, o material foi quarteado e submetido aos ensaios descritos a seguir.

#### 3.2.6.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A análise da composição química do REFP foi conduzida por meio de fluorescência de Raios-X, técnica que segundo Klein e Dutrow (2012) é fundamentada

na medida da intensidade dos Raios-X característicos gerados pelos elementos que compõem a amostra quando excitados. Seus resultados são expressos em termos de concentrações de óxidos mais estáveis dos elementos químicos ali presentes. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia de Materiais (LABEMAT) da UFRN em equipamento Shimadzu® EDX-720.

A análise por FRX é de fundamental importância para a classificação do material como pozolânico, visto que a NBR 12653 (2014) estabelece valores mínimos e máximos de certos compostos químicos. Essa norma também possibilita determinar por meio de cálculos estequiométricos, a composição mineralógica aproximada dos elementos identificados no ensaio de difração de Raios-X.

### **3.2.6.2 Difração de Raios-X (DRX)**

Para identificação das fases presentes no resíduo, foram realizadas análises mineralógicas por difração de Raios-X. As análises foram realizadas em amostras com granulometria inferior a 0,075 mm utilizando-se radiação de cobre, com tensão acelerada 30 kV e corrente de 30 mA, com varredura de  $2\theta$  de  $5^\circ$  a  $120^\circ$  e velocidade de  $1^\circ/\text{min}$ . O equipamento utilizado foi o Shimadzu® XRD – 7000, localizado no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais da UFRN.

### **3.2.7 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)**

Para determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) foi utilizado o método com cimento Portland, prescrito pela NBR 5752/2014. O ensaio foi conduzido no Laboratório de Materiais de Construção da UFRN, com a utilização do cimento CP II F-32 (cimento Portland composto com fíler), conforme a ABNT NBR 11578.

Para atender as recomendações do ensaio, foi necessário submeter a amostra do resíduo de feldspato ao processo de moagem, por meio de um moinho de bolas, seguido do peneiramento manual, de forma a obter ao final do processo, um material com passante superior a 80% na peneira de 0,045 mm, seco em estufa a  $(105 \pm 5^\circ\text{C})$  durante 24h conforme a ABNT NBR 8952 (ABNT, 1992) e 15894-3(ABNT, 2010).

Para a avaliação da perda ao fogo, dado necessário para classificação do material pozolânico, o resíduo moído após seco em estufa por 24 h em temperatura de  $110^\circ\text{C}$ , foi aquecido até  $1000^\circ\text{C}$  por 60 minutos conforme a norma NBR NM 18/2004.

### 3.3 Caracterização mecânica para fins geotécnicos (3ª Etapa)

Para análise do comportamento mecânico do REFP foram realizados três ensaios: i) Índice de Suporte Califórnia (ISC), ii) cisalhamento direto, e iii) compressão edométrica.

#### 3.3.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

A fim de determinar a capacidade de suporte e expansividade do resíduo, parâmetros relevantes ao dimensionamento do pavimento e que inferem diretamente na aceitabilidade do material na pavimentação (Tabela 3.2), submeteu-se o resíduo em ensaios de determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC), consolidado pela NBR 9895 (ABNT, 1987), em amostras compactadas nas energias normal, intermediária e modificada. As amostras foram moldadas nos teores de umidade equivalentes à umidade ótima e nos intervalos acima (+2%) e abaixo (-2%) deste ponto, conforme os dados adquiridos em suas respectivas curvas de compactação, obtidas anteriormente na fase de caracterização física do REFP com uso da norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

Após o término do ensaio, o material era recolhido e armazenado em bandejas para secagem até que atingisse o teor de umidade higroscópica natural ( $w \cong 0,1\%$ ), e reutilizados na pesquisa, seja para determinação dos demais pontos da curva de compactação a serem analisados ou em outros ensaios.

Tabela 3.2 – Requisitos das camadas do pavimento.

Camada	Expansão (%)	C.B.R (%), LL (%), IG e IP (%)
Subleito	$\leq 2$	C.B.R $\geq 2$
Reforço de subleito	$\leq 1$ (medida com sobrecarga de 10lb)	C.B.R Maior que Subleito
Sub-base	$\leq 1$ (medida com sobrecarga de 10lb)	C.B.R $\geq 20$ , IG=0
Base	$\leq 0,5$ (medida com sobrecarga de 10lb)	C.B.R $\geq 80$ , LL $\leq 25\%$ , IP $\leq 6\%$ C.B.R $\geq 80$ e Equivalente de areia $> 30$ C.B.R $\geq 60$ , para $N \leq 5.10^6$

Fonte: DNIT (2006)

#### 3.3.2 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado seguindo os parâmetros técnicos da norma D3080 (ASTM, 1998). Foram moldados corpos de prova na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima, determinadas em seus respectivos

ensaios de compactação nas energias normal, intermediária e modificada, na caixa de cisalhamento direto com 59,90 mm de diâmetro e 31,00 mm de altura.

Nesta etapa experimental ocorreu o uso exclusivo de amostras de REFP com reuso. Conforme descrito no tópico 3.2.2, após o término do ensaio as mesmas eram separadas em bandejas distintas e submetidas a ensaios de granulometria conjunta para aferir a ocorrência ou não de uma possível fragmentação dos grãos na preparação ou execução do ensaio.

Os ensaios foram realizados em um único estágio de carregamento, aplicando-se tensões verticais iguais a 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, o que correspondia a uma série, que por sua vez era repetida a fim de proporcionar melhores estimativas.

A fim de garantir uma condição drenada do carregamento e poucas variações na curva tensão deformação, os ensaios foram realizados na condição inundada e não-inundada com velocidade de deslocamento igual 0,05 mm/min, velocidade inferior ao aconselhado por Lambe & Whitman (1969) para solos arenosos.

Para condição inundada, os corpos de prova foram moldados e imersos em água logo após aplicação da tensão normal. A realização do ensaio iniciava-se após o período de 24h da inundação do corpo de prova. Na condição não-inundada as amostras eram moldadas e rompidas após o aparente término das deformações verticais causadas pelo carregamento vertical aplicado no corpo de prova. Apesar de bastante variável, o tempo para iniciar o ensaio de cisalhamento direto nas amostras não-inundadas ocorreu no intervalo de tempo igual a  $24 \geq T > 3$  (horas).

### **3.3.3 Ensaio de Compressão Edométrica**

Como a norma NBR 12007:1990 "Solo - Ensaio de adensamento unidimensional" foi cancelada no ano de 2015 e não houve substituição até o presente momento, utilizaram-se como fundamentação para realização do ensaio, além da norma acima já citada, a ASTM D2435/D2435M e as indicações de Massad (2016).

As amostras foram compactadas no próprio anel metálico rígido, com dimensões de 19,65 mm de altura e 71,40 mm de diâmetro, na umidade ótima e a massa específica seca máxima determinadas pelo ensaio de compacta o para as energias normal, intermediária e modificada.

Os estágios de carregamento foram realizados com tensões iniciais de 5 kPa, sendo posteriormente incrementada com cargas suficientes para que seu valor fosse duplicado, até atingir valor de 640 kPa. O intervalo de tempo de cada carregamento foi de 30 minutos, tempo determinado como suficiente para estabilização das deformações haja visto que o resíduo apresentava comportamento de um solo arenoso (Figura 3.3a), e que os níveis de tensões aplicados eram muito baixos para causarem o faturamento das partículas (Figura 3.3b).

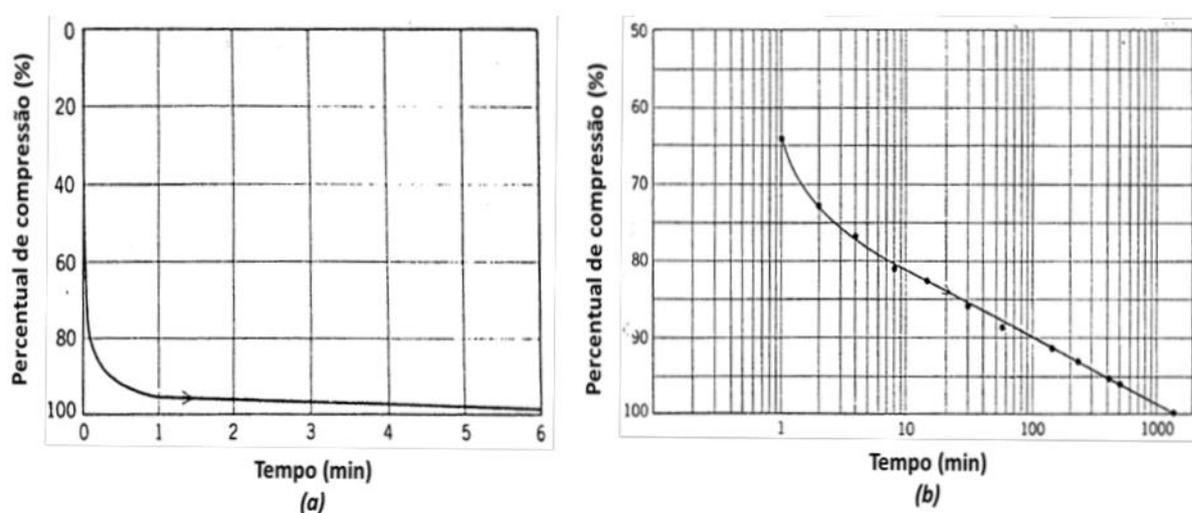


Figura 3.3 (a) curva tempo de compressão para típicos incrementos de carga em areias (Taylor, 1948); (b) Curva típica de tempo de compressão para teste de alto estresse (Roberts, 1964). Fonte: Lambe & Whitman (1969).

Devido às dificuldades operacionais, o processo de descompressão do corpo de prova acontecia após 24h da aplicação do último estágio de carregamento (640 kPa). Ele é realizado de maneira similar, em intervalos de tempo de 30 minutos e descarregamentos correspondente à metade da tensão atuante, tendo seu término em 20 kPa ou 10 kPa.

Para os ensaios realizados na condição inundada, a imersão do corpo de prova ocorreu após aplicação da carga de assentamento, a qual corresponde ao término do primeiro estágio de carregamento (5kPa). Antes da retomada da aplicação dos estágios subsequentes aguardava-se um período mínimo de 24 horas para aumentar a homogeneidade do teor de umidade do corpo de prova.

É importante ressaltar que apesar da norma mencionar que a inundação (verificação da expansividade do solo) deva ocorrer sob aplicação de um

carregamento de 10 kPa, ela restringe-se a corpos de prova indeformados e não moldados. Sendo assim, elegeu-se por inundar as amostras a 5 kPa, pois quanto menor a carga, mais crítico será o estágio em relação à expansão (condição mais desfavorável possível).

Nesta etapa experimental ocorreu o uso exclusivo de amostras de REFP com reuso. Após o término do ensaio as mesmas eram separadas em bandejas distintas e submetidas a ensaios de granulometria conjunta para aferir a ocorrência ou não de uma possível fragmentação dos grãos na preparação ou execução do ensaio.

## CAPÍTULO 4

**RESULTADOS & DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados pertinentes à caracterização química, física, mineralógica e mecânica do resíduo estéril do feldspato pegmatítico (REFP) coletado em uma das frentes de extração que circunvizinham o município de Parelhas/RN, a qual está localizado na mesorregião Central Potiguar e microrregião do Seridó oriental, distante 246 km de Natal, capital estadual. Salienta-se que o resíduo foi submetido a um processo de tratamento granulométrico, conforme descrito no item 3.1, visando sua aplicação como elemento geotécnico em obras de terra.

**4.1 Caracterização química e mineralógica do resíduo**

A análise química do REFP realizada por meio de ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), aponta o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) como principal óxido presente (64,13%), seguido de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com 15,08%, correspondendo a quase 80% do total de óxidos presentes na amostra estudada (Tabela 4.1). Os óxidos restantes (20,79%) são distribuídos em outros elementos, destacando-se o óxido de potássio (7,76%), ferro III (5,24%), sódio (2,86%) e cálcio (2,32%).

Tabela 4.1 – Resultados da análise química.

Óxidos	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{Rb}_2\text{O}$	$\text{NbO}$	$\text{ZrO}_2$	$\text{SrO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{ZnO}$
%	64,13	15,08	7,76	5,24	2,86	2,32	0,65	0,60	0,51	0,29	0,27	0,16	0,10	0,05

Quimicamente, pode-se definir o resíduo como um material com alto percentual de sílica e alumínio. Destacam-se também os teores de ferro, de álcalis totais ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) e cálcio. A razão  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (2,71) indica que resíduo é provavelmente oriundo de jazidas de feldspato potássico (microclínio) com intercrescimento peritítico de albita.

Os minerais encontrados na identificação mineralógica (Figura 4.1) justificam a composição química, encontrando-se condizentes com composição mineralógica das rochas encaixantes de jazidas pegmatíticas onde o feldspato é objeto de lavra.

O baixo teor de álcalis total (10,62%) e elevado teor de óxido de ferro (5,24%) justifica o descarte do material, uma vez que a indústria vidreira e cerâmica exige que na composição de porcelanas, esmaltes e vidrados tenham teores de álcalis superiores a 14% e teores de ferro abaixo de 0,08% (Bezerra *et al.*, 1994), e que as empresas atuantes na região não dispõem de tecnologias de concentração (flotação ou separação magnética) do minério de feldspato, impossibilitando dessa forma seu consumo nesses segmentos industriais.

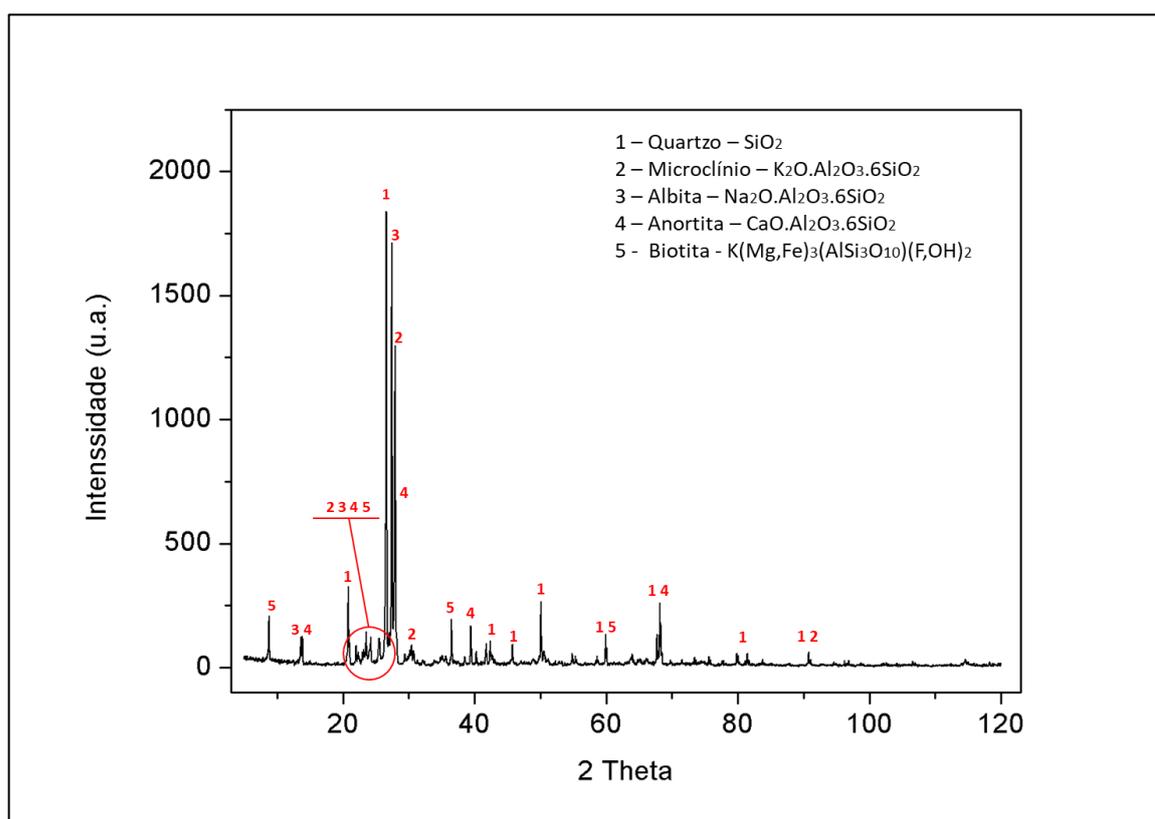


Figura 4.1 – Ensaio de DRX.

A elevada concentração de quartzo na amostra, revelado na forma de sílica (SiO<sub>2</sub>), é um fator positivo para determinar os possíveis usos do rejeito, pois a presença de quartzo – mineral altamente resistente, quando preservadas suas características – pode conferir propriedades satisfatórias ao seu uso como matéria-prima na Engenharia Civil.

## 4.2 Caracterização física do resíduo

### 4.2.1 Massa específica dos sólidos

O resíduo apresentou massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) igual a 2,66 g/cm<sup>3</sup>, o que está condizente com os valores de seus componentes mineralógicos: quartzo

(2,60 – 2,65 g/cm<sup>3</sup>), microclínio (2,53 – 2,63 g/cm<sup>3</sup>), albita (2,63 g/cm<sup>3</sup>), anortita (2,73 g/cm<sup>3</sup>) e biotita (2,7 – 3,5 g/cm<sup>3</sup>).

#### 4.2.2 Limites de Atterberg

O material não apresentou plasticidade, de forma que não foi possível realizar a moldagem de corpos cilíndricos de três milímetros de diâmetro conforme procedimentos estabelecidos pela NBR 7180 (1984). Assim, não foi necessário à realização do ensaio de limite de liquidez e, por consequência, a amostra foi caracterizada como um solo não plástico (NP), possuindo valores de IP (índice de plasticidade), LL (limite de liquidez) e LP (limite de plasticidade) iguais a zero.

#### 4.2.3 Granulometria Conjunta

A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas do resíduo sem reuso e com reuso. É possível perceber que os traçados indicados pela média das curvas granulométricas dos resíduos são coincidentes nas porções iniciais (1,2 a 25 mm) e finais (0,0015 a 0,075 mm) do gráfico, com diferença menor ou igual a 1,5%, referente ao valor percentual de material passante para um determinado diâmetro da partícula. Por outro lado, na faixa intermediária (0,15 a 0,60 mm) é verificada uma diferença média de 6%, valor que se amplia a até 14% ao comparar os limites (inferior e superior) da faixa de distribuição das curvas granulométricas analisadas. Deduz-se, perante o analisado, que a reutilização das amostras ao longo dos procedimentos experimentais dessa pesquisa pouco acrescentou no processo de fragmentação dos grãos.

O processo de fragmentação da amostra pode ser melhor visto na Tabela 4.2, a qual mostra, por meio da análise de textura, que a fragmentação dos grãos aconteceu em maiores proporções na faixa granulométrica da areia ( $0,06 \leq \emptyset < 2,0$ ), sendo observado um efeito cascata da fração grossa virar média e por seguinte na fração fina da areia, sendo observado um leve aumento nas frações granulométricas do silte e argila.

Foi detectado que a fragmentação dos grãos cessou em níveis mensuráveis, isto é, sem a ocorrência de alterações dos índices físicos relacionados a compactação do solo ( $\rho_d$  e  $w$ ), após a realização dos ensaios de compactação na energia modificada.

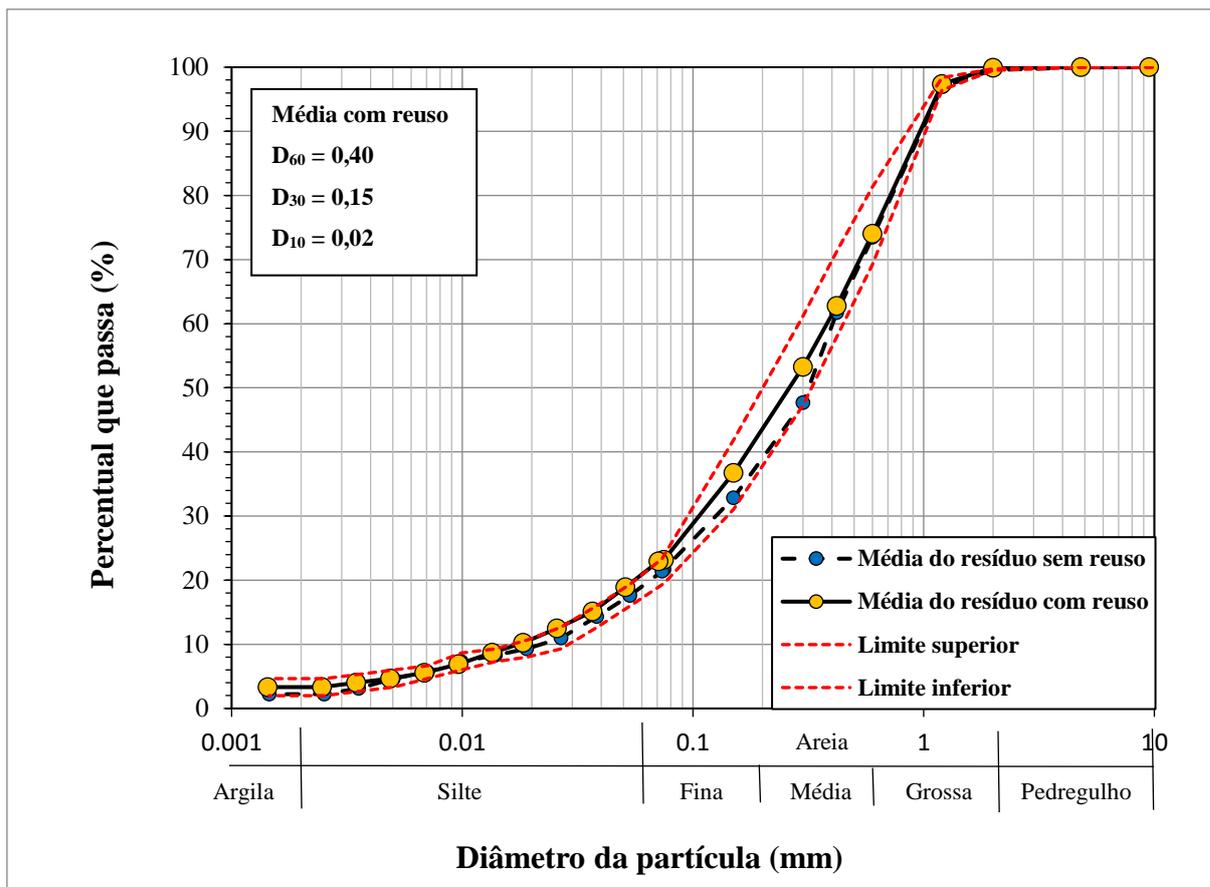


Figura 4.2 – Curva granulométrica do resíduo virgem e do reuso.

Tabela 4.2 – Análise de textura dos resíduos.

Análise de textura (NBR 6502/95)		Curva Granulométrica			
		Limite Inferior	Média sem reuso	Média com reuso	Limite Superior
Designação	Dequivalente (mm)	Porcentagem (%)			
Pedregulho	$60 \geq \emptyset > 2,0$	-	-	-	-
Areia	$2,0 \geq \emptyset > 0,06$	84,0	84,0	81,0	80,5
Grossa	$2,0 \geq \emptyset > 0,6$	30,5	27,5	25,0	18,5
Média	$0,6 \geq \emptyset > 0,2$	38,5	41,5	35,0	39,5
Fina	$0,2 \geq \emptyset \geq 0,06$	15,0	15,0	21,0	22,5
Silte	$0,06 \geq \emptyset > 0,002$	14,0	14,0	15,7	15,0
Argila	$0,002 \geq \emptyset$	2,0	2,0	3,3	4,5

A análise dos resultados revela que o material em estudo é composto essencialmente pela fração granulométrica da areia ( $\approx 80\%$ ), apresentando baixo teor da fração granulométrica da argila. Além disso, os traçados apresentados pela média das curvas granulométricas do resíduo, exibiram coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) nos valores 18,2 e 1,4 para as amostras em seu estado

inicial, e 21,1 e 2,9 para as amostras com reuso indicando um material não uniforme ( $C_u > 6$ ) e bem graduado ( $1 < C_c < 3$ ).

O material, independente do estado em que encontra (sem reuso ou com reuso), foi classificado segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM, 1990), como areia siltosa (SM). Quanto à classificação TRB (Transportation Research Board), mais empregada no reconhecimento de solos para construção de pavimentos rodoviários e recomendada pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (DNER, 1996), o material é designado como A-2-4, cujo materiais predominantes são areia e areia siltosa ou argilosa, e possui bom/excelente comportamento como subleito ( $IG = 0$ ).

## 4.2.4 Compactação

### 4.2.4.1 Resíduo sem reuso

Os resultados dos ensaios de compactação, para amostras sem reuso utilizando energias normal e modificada, além dos seus respectivos valores de massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ) e de teor de umidade ótimo ( $w_{ót}$ ) estão apresentados na Figura 4.3 e na Tabela 4.3.

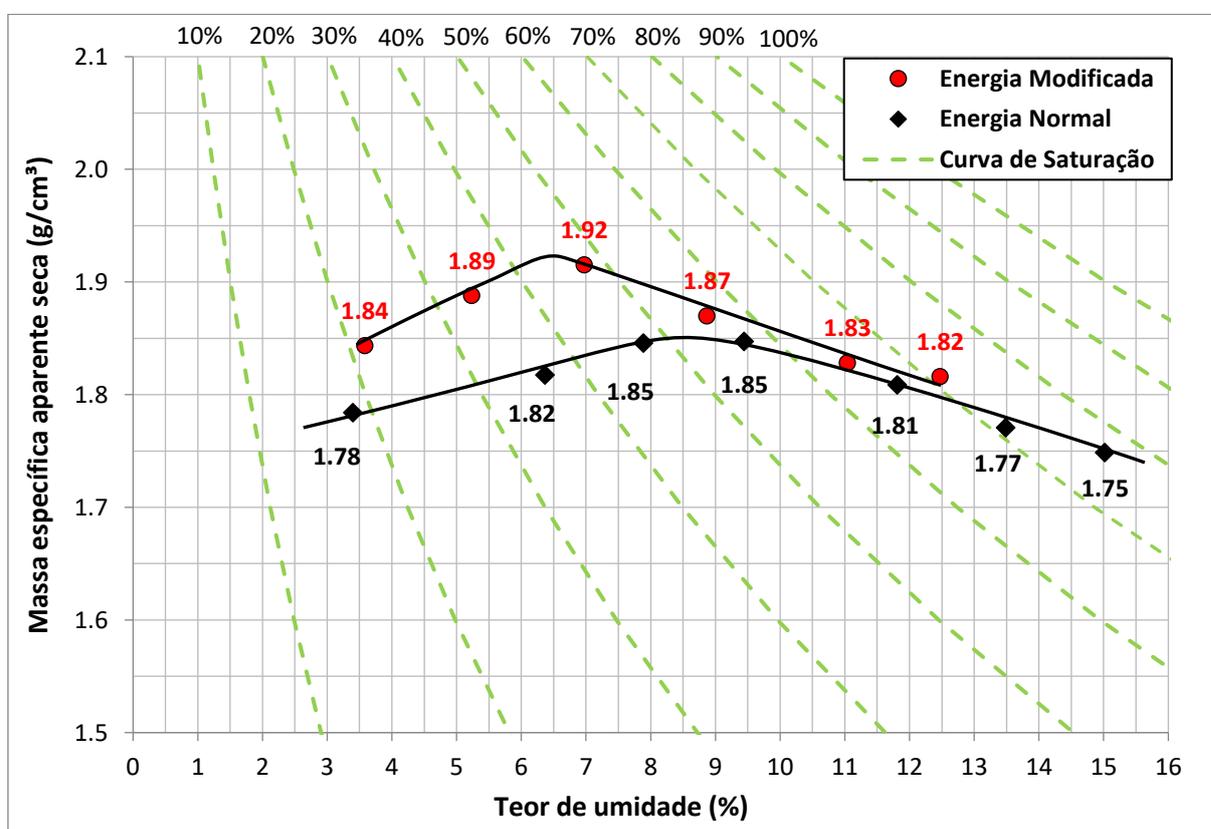


Figura 4.3 – Curvas de compactação do resíduo sem reuso.

Tabela 4.3 – Resultados da compactação do resíduo sem reuso na umidade ótima.

Energia	$\rho_{d.máx}$ (g/cm <sup>3</sup> )	w <sub>ót</sub> (%)	Sr <sub>ót</sub> (%)
Normal	1,85	8,73	53,0
Modificada	1,92	6,45	44,5

Não foi possível introduzir dados referentes a compactação do resíduo na energia intermediária, pois a amostra havia sido reutilizada para execução do ensaio. Além disso foi detectado que os valores da massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ) dos corpos de prova moldados na energia intermediária eram superiores aos resultados obtidos pelos corpos de prova moldados na energia modifica, configurando, dessa forma, uma possível fragmentação dos grãos, confirmada no item 4.2.3, por meio dos esforços mecânicos impostos ao REFP durante a execução do ensaio.

#### 4.2.4.2 Resíduo com reuso

Os resultados dos ensaios de compactação, para amostras com reuso utilizando as energias normal, intermediária e modificada, além dos seus respectivos valores de  $\rho_{d.máx}$  e w<sub>ót</sub> estão apresentados na Figura 4.4 e na Tabela 4.4.

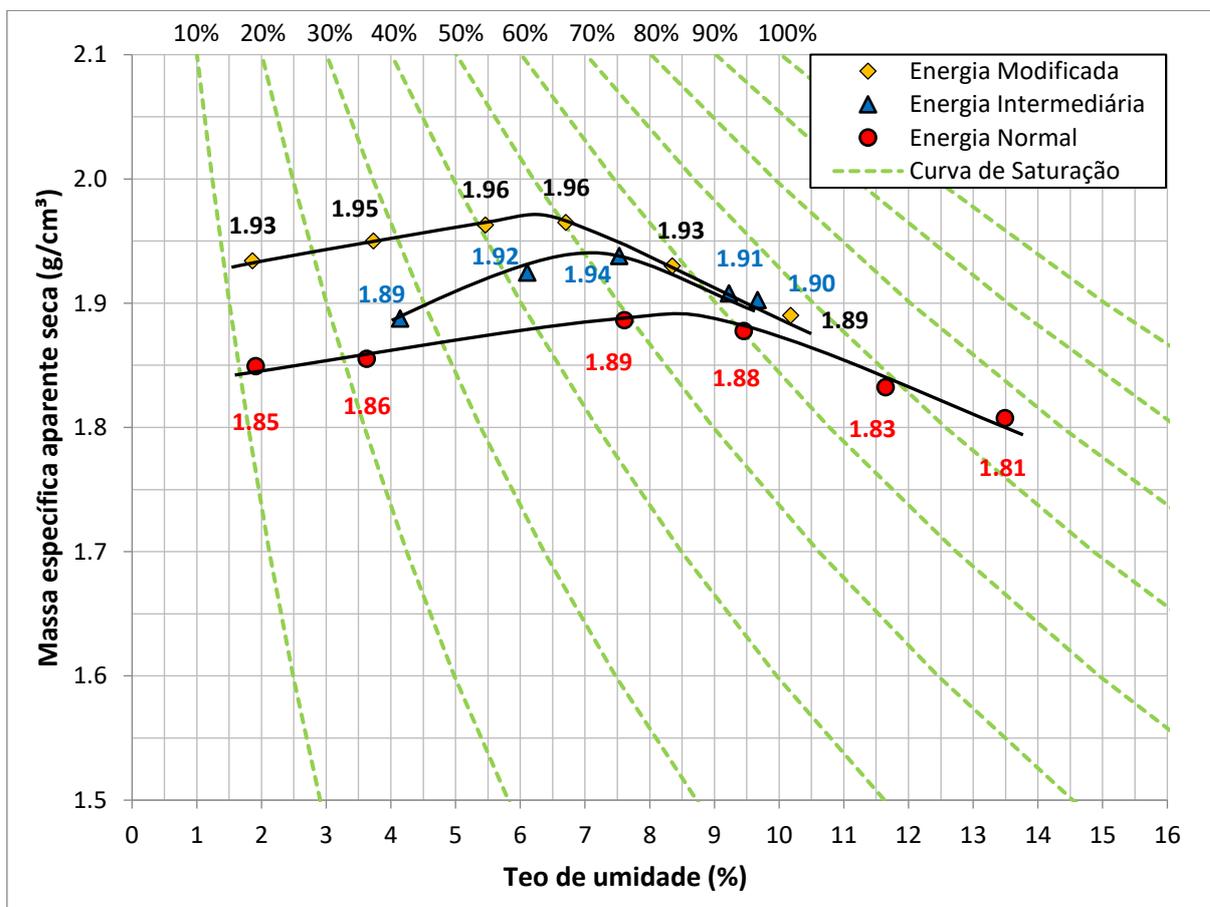


Figura 4.4 – Curvas de compactação do resíduo com reuso.

Tabela 4.4 – Resultados da compactação de amostras com reuso na umidade ótima.

<b>Energia</b>	<b><math>\rho_{d.m\acute{a}x}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>W<sub>ót</sub> (%)</b>	<b>Sr<sub>ót</sub> (%)</b>
Normal	1,89	8,40	54,9
Intermediária	1,94	7,15	51,2
Modificada	1,97	6,30	47,9

Para os corpos de prova compactados nas energias normal e modificada, a redução da massa específica seca ao se dirigir ao ramo úmido é cerca de duas vezes maior que no ramo seco. Esse aspecto é esperado uma vez que no ramo seco a água lubrifica as partículas e facilita o seu arranjo, ocorrendo, por esta razão, o acréscimo da massa específica aparente seca, enquanto no ramo úmido, a água amortiza a compactação e a amostra passa a ter mais água que sólidos, levando a um decréscimo da massa específica aparente seca (Das, 2012). Nas amostras moldadas na energia intermediária, as variações são praticamente simétricas para distâncias iguais da umidade ótima, em módulo.

Ao comparar com os resultados obtidos nas amostras sem reuso, observa-se que ocorreu um leve aumento da massa específica aparente seca máxima (0,04 g/cm<sup>3</sup>) e que as variações absolutas entre os teores de umidade ótimas foram quase insignificantes (0,33%). O formato em ambas as curvas de compactação assemelha-se ao apresentado por solos arenosos (Das, 2012 e Pinto, 2006).

Os valores de  $\rho_{d.m\acute{a}x}$  obtidos mostram-se próximos aos apresentados por materiais nobres utilizados na pavimentação (areias com pedregulho bem graduadas: 2,0 a 2,1 g/cm<sup>3</sup>; e solo arenoso laterítico fino: 1,9 g/cm<sup>3</sup>), resultado que serve como indicativo para conjecturar o possível bom desempenho do resíduo ao ser utilizado em pavimentação, pois materiais com massas específicas aparentes secas elevadas tendem a apresentar elevadas resistências, baixa compressibilidade e bom comportamento quando solicitados (Pinto, 2006 & DNIT, 2006).

Atenta-se que as curvas de compactação do REFP exibiram teores de umidade ótima inferiores aos valores típicos apresentados por areias com pedregulho bem graduadas (9 a 10%) e solos arenosos lateríticos finos (12 a 14%) (Das, 2012 e Pinto, 2006). Salienta-se que os baixos valores de grau de saturação apresentados pelo resíduo na  $w_{ót}$  pode vir a trazer, em condições não saturadas, consideráveis incrementos de resistência do material ao cisalhamento, devido ao aparecimento de tensões superficiais atrativas (pressão neutra negativa) oriundas de efeitos capilares

e de adsorção (sucção matricial) que são geradas nos meniscos capilares no contato entre as partículas sólidas (Fredlund *et al.*, 2012).

Para solos granulares ou arenosos, perfil apresentado pelo REFP após tratamento granulométrico descrito no item 3.1, a vibração é o processo mais indicado para compactação do solo, pois as partículas permanecem justapostas pelo atrito, e que havendo a vibração, com frequência e amplitude corretas, consegue-se o escorregamento e acomodação das partículas, ocasionando a diminuição do índice de vazios (DNIT, 2006). Esse aspecto alteraria o traçado da curva " $\rho_d \times w$ " e os valores de  $Sr_{ót}$ , incomum aos casos clássicos da Mecânica dos Solos apresentado por solos arenosos não coesivos. Recomenda-se, para estudos futuros, a realização de uma curva " $\rho_d \times w$ " e ensaios de CBR utilizando-se corpos de prova moldados com mesa vibratória utilizando como base o método descrito na norma MB-3388: "Solo – determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos", para amostras secas e úmidas.

A realização de uma verificação microscópica também contribuiria para o estudo, pois possibilitaria visualizar como ocorre a orientação e acomodação dos grãos nas duas condições de moldagem, propriedade que influi diretamente nos parâmetros físicos e mecânicos do solo.

### 4.3 Caracterização mecânica para fins geotécnicos

#### 4.3.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

##### 4.3.1.1 Resíduo sem reuso

Os resultados de ISC para amostras sem reuso em condições ótimas ( $\rho_{d,máx}$  e  $w_{ót}$ ) estão indicados na Tabela 4.5 e servirão exclusivamente como fator comparativo da influência da variação granulométrica nos resultados obtidos em amostras com reuso.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras sem reuso.

Dados obtidos	Energia normal	Energia modificada
$W_{moldagem}$ (%)	8,28	6,13
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,84	1,91
ISC (%)	18,40	64,57
$W_{final}$ (%)	14,26	11,54
Expansão (%)	0,00	0,00

### 4.3.1.2 Resíduo com reuso

As amostras com reuso foram analisadas, para cada energia de compactação, no intervalo de umidade igual a -2%, -1%, 0%, +1% e +2% em relação ao teor de umidade ótimo, tendo desvio desse ponto menor ou igual a 0,36%.

Os resultados serão abordados individualmente, para cada nível de energia de compactação, para posterior análise geral do comportamento do resíduo. Em seguida, serão comparados com os resultados apresentados pelas amostras sem reuso.

#### 4.3.1.2.1 Energia normal

Os resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso e compactadas na energia normal, estão indicados na Tabela 4.6. Observa-se, para essas condições de moldagem, que o resíduo apresenta expansão nula ( $E_{m\acute{a}x} = 0,01\%$ ) e que os valores ISC atendem os requisitos do DNIT (2006) para camadas de subleito e reforço de subleito, desde que o valor seja superior ao ISC do subleito. Em condições ótimas ( $\rho_{d,m\acute{a}x}$  e  $W_{\acute{o}t}$ ), o REFP pode ser utilizado como elemento de sub-base, entretanto tal prática não é recomendada ou requer rigoroso controle tecnológico da execução do aterro, visto que pequenos desvios da umidade ótima acarretam em valores de ISC inferior ao solicitado pelo manual de pavimentação do DNIT para este tipo de camada (DNIT, 2006).

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso compactadas na energia normal.

Dados obtidos	Amostras				
	N1	N2	N3	N4	N5
$W_{moldagem}$ (%)	6,45	7,39	8,50	9,86	10,49
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,88	1,88	1,89	1,87	1,85
ISC (%)	8,61	12,38	22,06	11,84	11,62
$W_{final}$ (%)	12,04	11,75	10,83	11,43	11,35
Expansão (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
$ISC_i^{(1)}/ISC_{\acute{o}timo}^{(2)}$	0,39	0,56	1,00	0,54	0,53

(1) ISC das amostras analisadas; (2) ISC da amostra moldada em condições de massa específica seca máxima ( $\rho_{d,m\acute{a}x}$ ) e umidade ótima ( $W_{\acute{o}t}$ ), sendo esta condição apresentada na amostra N3.

Ao comparar com o resultado coletado nas amostras sem reuso moldada na energia normal (ISC = 18,40%), nota-se que houve um leve acréscimo (3,66%) na capacidade de suporte do resíduo quando moldado em condições ótimas ( $\rho_{d,m\acute{a}x}$  e  $W_{\acute{o}t}$ ).

Esse aspecto está em conformidade com o aumento de  $\rho_d$  (0,05 g/cm<sup>3</sup>) e diminuição do teor de umidade apresentado pelas amostras com reuso.

#### 4.3.1.2.2 Energia Intermediária

Os resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso e compactadas na energia intermediária, estão indicados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso compactadas na energia intermediária.

Dados obtidos	Amostras					
	INT.1	INT.2	INT.3	INT.4	INT.5	INT.6
W <sub>moldagem</sub> (%)	5,39	6,40	7,25	7,28	8,35	9,22
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,91	1,93	1,94	1,95	1,93	1,90
ISC (%)	29,06	38,21	45,20	46,82	25,83	15,07
W <sub>final</sub> (%)	11,16	11,16	10,55	10,48	11,17	11,26
Expansão (%)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,03
ISC <sub>i</sub> <sup>(1)</sup> /ISC <sub>ótimo</sub> <sup>(2)</sup>	0,62	0,82	0,97	1,00	0,55	0,32

(1) ISC das amostras analisadas; (2) ISC da amostra moldada em condições de massa específica seca máxima ( $\rho_{d,máx}$ ) e umidade ótima ( $w_{ót}$ ), sendo esta condição apresentada na amostra INT.4.

Observa-se, para essas condições de moldagem, que o resíduo apresenta expansão praticamente nula ( $E_{máx} = 0,04\%$ ) e os valores ISC encontrados nesses ensaios atendem aos pré-requisitos do DNIT (2006) para camadas de subleito e reforço de subleito, desde que o valor seja superior ao ISC do subleito. Em condições ótimas ( $\rho_{d,máx}$  e  $w_{ót}$ ) o REFP pode ser utilizado como elemento de sub-base, pois apesar de apresentar acentuada perda de capacidade de suporte ao se distanciar da umidade ótima, o material ainda atende aos requisitos mecânicos ( $ISC \geq 20\%$ ) do DNIT para essa camada do pavimento.

#### 4.3.1.2.3 Energia Modificada

Os resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso e compactadas na energia modificada estão indicados na Tabela 4.8. Observa-se, para essas condições de moldagem, que o resíduo apresenta expansão praticamente nula ( $E_{máx} = 0,10\%$ ) e seus resultados de ISC atendem os requisitos do DNIT (2006) para camadas de subleito, reforço de subleito e sub-base.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de ISC para amostras com reuso compactadas na energia modificada.

Dados obtidos	Amostras				
	M1	M2	M3	M4	M5
$W_{moldagem}$ (%)	4,33	5,58	6,52	7,57	8,51
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,95	1,96	1,97	1,94	1,93
ISC (%)	34,55	39,28	64,57	45,74	20,13
$W_{final}$ (%)	11,31	11,40	11,18	11,26	11,36
Expansão (%)	0,05	0,00	0,02	0,10	0,00
$ISC_i^{(1)}/ISC_{ótimo}^{(2)}$	0,54	0,61	1,00	0,71	0,31

(1) ISC das amostras analisadas; (2) ISC da amostra moldada em condições de massa específica seca máxima ( $\rho_{d.máx}$ ) e umidade ótima ( $W_{ót}$ ), sendo esta condição apresentada na amostra M3.

Em condições ótimas ( $\rho_{d.máx}$  e  $W_{ót}$ ) o REFP pode ser utilizado como elemento de base contanto que o parâmetro de tráfego N (número de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto) seja menor que  $5 \times 10^6$ . Porém, isso não é recomendado, visto que pequenos desvios da umidade ótima acarreta em valores de ISC inferior ao solicitado pelo manual de pavimentação do DNIT para essa camada do pavimento, sendo necessário dessa forma um alto nível de controle tecnológico durante sua execução.

Ao comparar com o resultado coletado nas amostras sem reuso e moldada na energia modificada (ISC = 64,57%), observa-se que não houve alterações na capacidade de suporte do resíduo, apesar do aumento da massa específica aparente seca máxima, quando moldado em condições ótimas ( $\rho_{d.máx}$  e  $W_{ót}$ ).

#### 4.3.1.2.4 Análise geral

A Figura 4.5 apresenta de forma gráfica os resultados do ISC em função do teor de umidade das amostras com reuso compactadas nas energias normal, intermediária e modificada. Observa-se que as curvas do ISC se assemelham com suas respectivas curvas de compactação, apresentadas no item 4.2.4.2, exibindo um pico acentuado nos valores mais próximos da umidade ótima.

Observa-se que à medida que se eleva a energia de compactação, aumenta a variação de capacidade de suporte do solo, em valor numérico, ao se distanciar da umidade ótima. Tais perdas aparentam ser maiores no intervalo  $w_{ót} + 1\%$  (ramo úmido), condição condizente ao que foi visto no item 4.2.4.2, onde a razão  $\Delta\rho_{d.ramo\_úmido}/\Delta\rho_{d.ramo\_seco}$  é igual ou superior a 2. O único caso em que a diminuição

dos valores de ISC no intervalo  $W_{ót} \pm 2\%$  é maior no ramo seco, ocorre na amostra moldada em energia normal. Tal comportamento pode estar vinculado ao maior teor de umidade apresentado pela amostra ao término do ensaio.

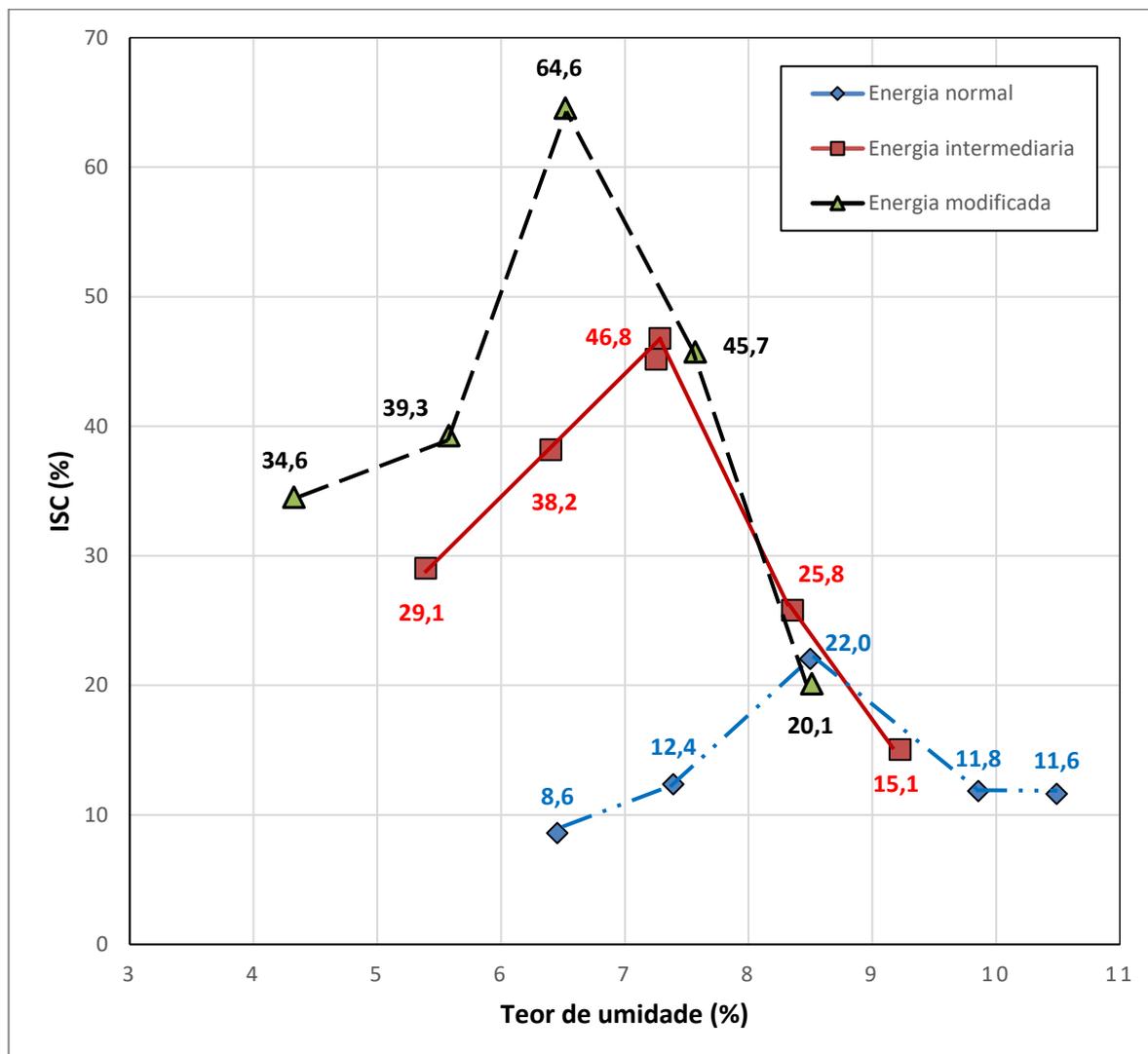


Figura 4.5 – Resultados do índice suporte Califórnia.

Os valores dos teores de umidade exibidos pelas amostras do REFP ao término do ensaio apresentam baixa variabilidade ( $w_{médio} = 11,25\%$  e  $|\Delta w_{máx}| = 0,80\%$ ). Além disso, não foi possível detectar uma relação direta entre a capacidade retenção de água e a permeabilidade do solo com as energias de compactação que lhe foram impostas. Apesar da pequena diferença, todas as amostras moldadas em condições ótimas ( $\rho_{d,máx}$  e  $W_{ót}$ ) apresentaram menores valores de teor de umidade após o término do ensaio que os demais pontos analisados.

O REFP não apresentou comportamento expansivo ( $E_{m\acute{a}x} < 0,1\%$ ) em nenhuma das energias de compactação aplicadas. Esse aspecto é esperado, visto não apresentar argilominerais expansivos em sua composição, atendendo dessa maneira, quanto a esse parâmetro, os requisitos de qualquer camada de pavimento.

Ao comparar os valores médios das amostras moldadas em condições ótimas ( $\rho_{d,m\acute{a}x}$  e  $W_{\acute{o}t}$ ) nas energias normal, intermediária e modificada, apresentados na Tabela 4.9, observa-se que à medida que se aumenta a energia de compactação a capacidade de suporte do REFP praticamente duplicou e triplicou, em comparação com as amostras compactadas na energia normal.

Tabela 4.9 – Valores médios das amostras com reuso moldadas na umidade ótima.

Dados obtidos	Unidade	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
ISC	%	22,06	46,01	64,57
$ISC_{Energia.i}/ISC_{Energia.Normal}$	-	1,00	2,09	2,93

#### 4.3.2 Cisalhamento Direto

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o ensaio de cisalhamento direto das amostras de REFP com reuso na condição inundada e não inundada. Os corpos de prova a serem analisados foram moldados em condições ótimas ( $\rho_{d,m\acute{a}x}$  e  $W_{\acute{o}t}$ ), conforme os resultados apresentados na Tabela 4.4 do item 4.2.4.2, para as energias de compactação normal, intermediária e modificada.

Foi adotado, como critério de ruptura do REFP, os pontos de máximo das curvas *tensão cisalhante x deslocamento horizontal*, designada, nesta dissertação, como resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ) e as tensões cisalhantes atuantes quando o deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ) é igual a 5,0 mm ( $\tau_{5,0\text{ mm}}$ ).

Partindo do pressuposto que não foi possível observar comportamento coesivo durante a execução do ensaio de LL e LP e que a análise química/mineralógica do REFP apontaram tratar-se de um material essencialmente composto por quartzo, com pequenas porcentagens de mica, feldspato e ferro em sua composição, ou seja, com ausência de argilominerálias. Foi atribuído, portanto, que o resíduo não possui coesão efetiva ( $c'$ ).

Vale destacar que a medida do índice de vazios ( $e$ ), e conseqüentemente, o Grau de saturação ( $S_r$ ) são falhas, pois desconsidera, mesmo que mínimas, as

variações de área da seção transversal do corpo de prova ao ser deslocado horizontalmente, levando apenas em contas as deformações verticais no decorrer do ensaio.

#### 4.3.2.1 Condição não inundada

As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os gráficos referentes ao comportamento do resíduo ao ser cisalhado na condição não inundada, sendo o resumo de seus principais dados demonstrados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

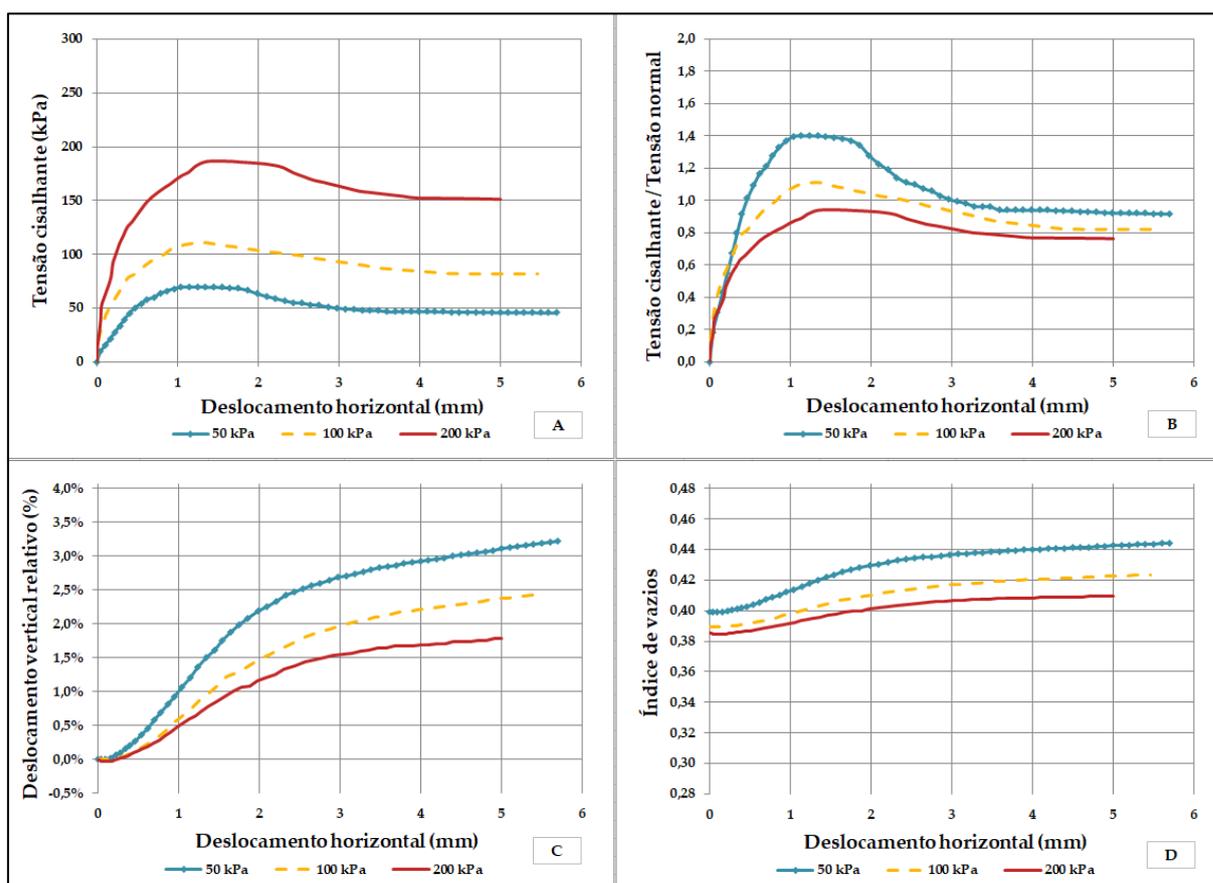


Figura 4.6 – Gráficos das amostras compactadas na energia normal e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (A)  $\tau \times \delta_h$  (B)  $\tau/\sigma_v \times \delta_h$

$$(C) \frac{\delta_v}{h_0} \times \delta_h \quad (D) e \times \delta_h.$$

Analisando os gráficos apresentados nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 percebe-se que o resíduo apresenta comportamento de areia densas, pois à medida que se aumenta a energia de compactação, os valores das tensões de pico ( $\tau_{pico}$ ) tendem a aumentar e ficarem mais acuminado. Isso é uma manifestação do fenômeno de dilatância, trabalho adicional necessário para expandir o solo denso sobre tensões confinantes,

superando desse modo o imbricamento entre as partículas, que é o trabalho necessário para movimentar a partícula ascendentemente quando se provoca um deslizamento lateral nas partículas (Lambe & Whitman, 1969).

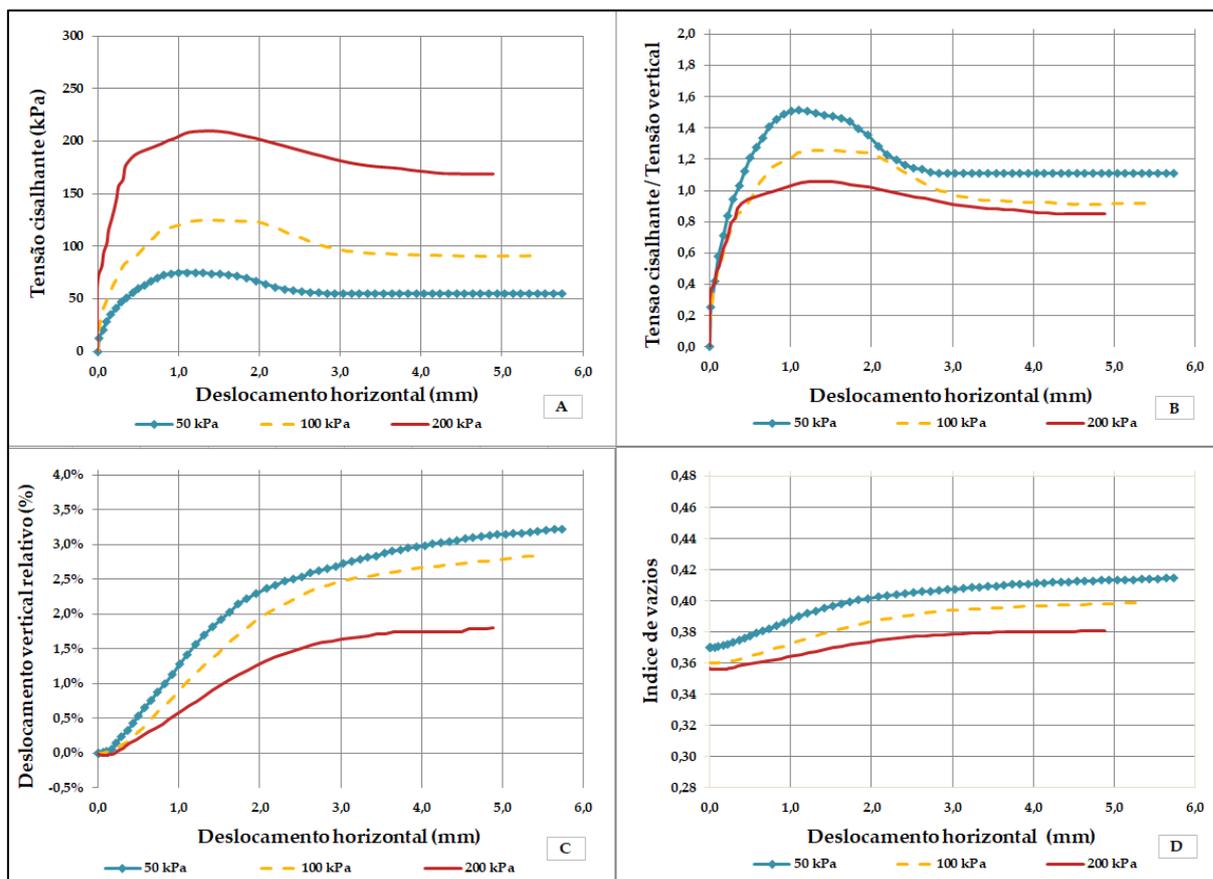


Figura 4.7 – Gráficos das amostras compactadas na energia intermediária e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (A)  $\tau \times \delta_h$

(B)  $\tau/\sigma_v \times \delta_h$  (C)  $\frac{\delta_v}{h_0} \times \delta_h$  (D)  $e \times \delta_h$ .

A expansão volumétrica, representada pelo deslocamento vertical relativo do corpo de prova ( $\frac{\delta_v}{h_0} > 0$ ) e/ou pela variação do índice de vazios ( $\Delta e > 0$ ) são graficamente lineares em relação ao deslocamento horizontal e mais expressivos até serem atingidos as tensões de pico ( $\tau_{pico}$ ). A variação desses índices físicos diminuem continuamente após  $\tau_{pico}$ , fato decorrente da diminuição do imbricamento entre as partículas sólidas e representado ao observar a trajetória ascendente das curvas dos gráficos  $\frac{\delta_v}{h_0} \times \delta_h$  e  $e \times \delta_h$ .

As amostras de REFP ao serem cisalhadas na condição não inundada apresentaram amolecimento (*work-softening*), isto é, ocorrência de tensões máximas

( $\tau_{pico}$ ) seguidas de um decréscimo que se encaminha para um valor constante, comportamento típico de solos densos (areias compactas e argilas sobre adensadas).

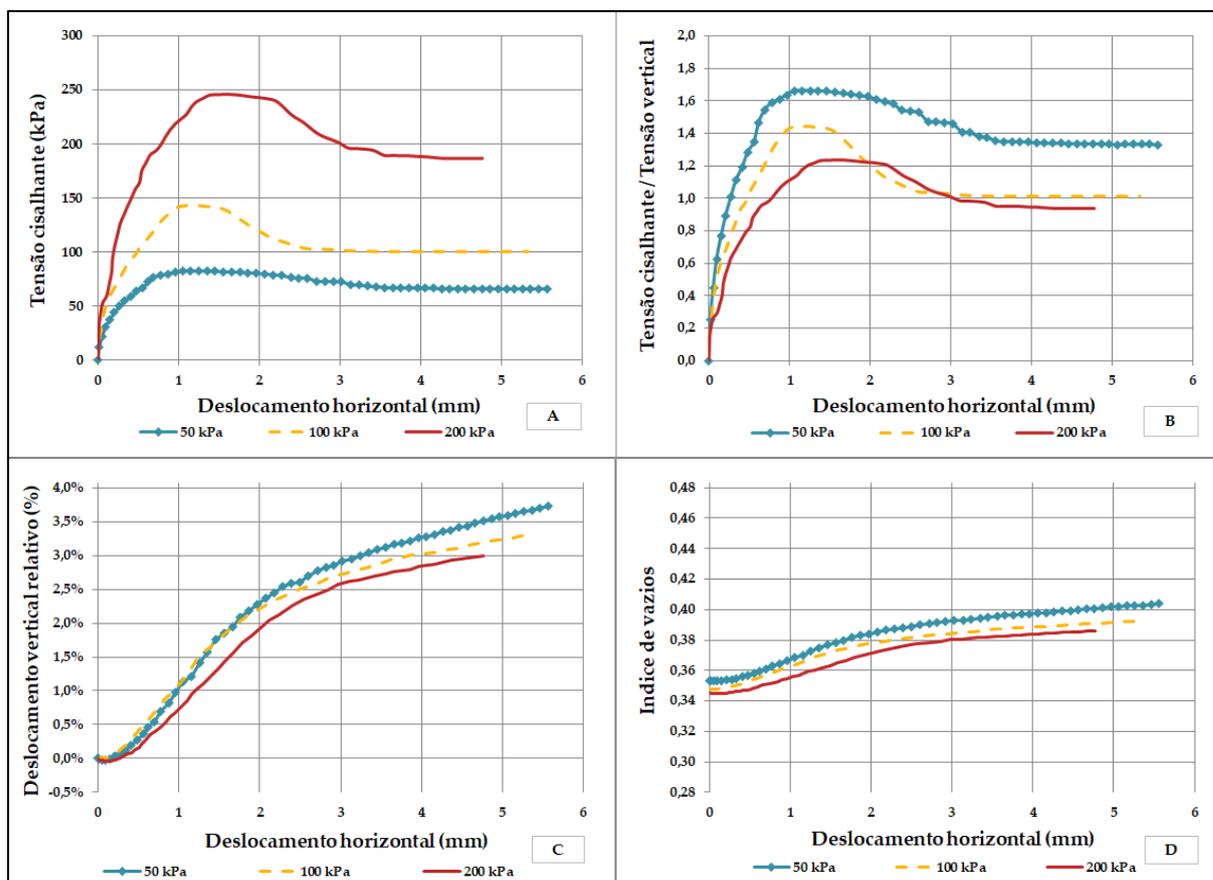


Figura 4.8 – Gráficos das amostras compactadas na energia modificada e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (A)  $\tau \times \delta_h$

(B)  $\tau/\sigma_v \times \delta_h$  (C)  $\frac{\delta_v}{h_0} \times \delta_h$  (D)  $e \times \delta_h$ .

Observou-se que as tensões cisalhantes máximas ocorreram em intervalos de deslocamentos horizontais ( $\delta_h$ ) no intervalo  $1,58 \text{ mm} \geq \delta_h \geq 1,11 \text{ mm}$  (Tabela 4.10), e que após estes pontos serem atingidos, a curva se encaminhava para um valor constante, em termos de tensões cisalhantes, para deslocamentos horizontais ( $\delta_h$ ) de aproximadamente cinco milímetros. Entretanto, esse valor constante não pode ser definido como residual ou último, pois ainda é observado incremento de deformações verticais ao cisalhar a amostra.

Para diferentes condições de compactidade e mesmo nível de tensões verticais, o resíduo atinge as tensões de pico em valores de deslocamento horizontal muito próximos, apresentando uma diferença máxima de 0,22 mm.

Foi observado que diferença  $\tau_{pico} - \tau_{5,0\text{ mm}}$  (Tabela 4.10) do resíduo tende a aumentar à medida que se eleva a tensão vertical ( $\sigma_v$ ). Este aspecto também é acompanhado, com ressalvas, ao incrementar a energia de compactação.

Tabela 4.10 – Dados dos gráficos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (Parte 01).

Energia	$\sigma_v$ (kPa)	$\tau_{pico}$ (kPa)	$\tau_{5,0\text{mm}}$ (kPa)	$\tau_{pico} - \tau_{5,0\text{mm}}$ (kPa)	$e_{mold}$	$e_{inicial}$	$e_{pico}$	$e_{5,0\text{mm}}$	$\delta_{h.pico}$ (mm)
Normal	50	70	46	24	0,41	0,40	0,42	0,44	1,14
	100	111	82	29	0,41	0,39	0,40	0,42	1,27
	200	187	152	36	0,41	0,39	0,40	0,42	1,47
Intermediária	50	75	55	20	0,37	0,37	0,39	0,42	1,11
	100	125	91	34	0,37	0,37	0,39	0,40	1,38
	200	210	169	41	0,37	0,36	0,37	0,38	1,42
Modificada	50	83	66	17	0,35	0,35	0,37	0,40	1,16
	100	143	101	43	0,35	0,35	0,37	0,39	1,16
	200	246	187	59	0,35	0,35	0,37	0,39	1,58

Onde:  $\sigma_v$  é a tensão vertical aplicada no cabeçote da caixa do cisalhamento direto;  $e_{inicial}$  é o índice de vazios após a consolidação das deformações decorrente da aplicação da tensão vertical;  $e_{pico}$  e  $e_{5,0\text{mm}}$  são os índices de vazios durante as tensões de pico e o deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa de cisalhamento direto, respectivamente;  $\delta_{h.pico}$  é o deslocamento horizontal durante as tensões de pico.

Tabela 4.11 – Dados dos gráficos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição não inundada (Parte 02).

Energia	$\sigma_v$ (kPa)	$\frac{\delta_{v.pico}}{h_0}$ (%)	$\frac{\delta_{v.5,0\text{mm}}}{h_0}$ (%)	$Sr_{inicial}$ (%)	$Sr_{pico}$ (%)	$Sr_{final}$ (%)	$W_{mold}$ (%)	$W_{final}$ (%)
Normal	50	1,29	3,11	55,08	52,84	49,67	8,57	8,26
	100	0,92	2,29	57,65	55,91	53,13	8,53	8,45
	200	0,85	1,78	58,15	56,42	54,65	8,53	8,42
Intermediária	50	1,42	3,15	50,87	48,34	45,58	7,21	7,13
	100	1,34	2,79	51,16	48,73	46,34	7,24	7,05
	200	0,90	1,80	51,96	50,24	48,63	7,18	6,97
Modificada	50	1,42	3,59	47,37	45,27	41,67	6,40	6,29
	100	1,33	3,24	47,05	45,75	41,80	6,34	6,15
	200	1,45	2,99	49,27	46,64	44,14	6,50	6,40

Onde:  $\frac{\delta_{v.pico}}{h_0}$  e  $\frac{\delta_{v.5,0\text{mm}}}{h_0}$  são os deslocamentos verticais normalizados pela altura inicial do corpo de prova durante as tensões de pico e no deslocamento de 5,0 mm da caixa do cisalhamento direto, respectivamente;  $Sr_{inicial}$ ,  $Sr_{pico}$  e  $Sr_{final}$  são o grau de saturação no início, na tensão de pico e após o término do ensaio, respectivamente.  $W_{mold}$  e  $W_{final}$  são o teor de umidade na moldagem do CP e ao término do ensaio. Obs:  $Sr_{pico}$  e  $Sr_{final}$  foram calculados considerando que seu teor de umidade era igual a  $W_{final}$ .

Os gráficos  $\left(\frac{\tau}{\sigma_v}\right) \times \delta_h$  mostram a tendência, para mesmas condições de moldagem, das curvas de convergirem ao mesmo ponto após ocorrer a ruptura da amostra. Portanto, nota-se que, independentemente da tensão vertical ( $\sigma_v$ ) atuante no material, o resíduo tende a uma mesma tensão após sua ruptura. Observa-se ainda que a curva referente à tensão vertical de 50 kPa possui o pico mais pronunciado dentre as demais curvas, haja vista que foi a condição cuja amostra alcançou o maior valor de tensão cisalhante em comparação as tensões normais a que ela estava sujeita. Esse é um comportamento típico de areias compactas.

Em concordância ao que é observado em areias compactas sujeitas a baixas tensões normais (Lambe & Whitman, 1969), o resíduo ao ser cisalhado tende inicialmente a se contrair ( $\frac{\delta_v}{h_0} < 0$ ) para pequenos deslocamentos horizontais, e após um dado momento começa a expandir. Além disso, à medida que se aumenta a energia de compactação, e conseqüentemente o entrosamento entre as partículas, maior é a tendência de evoluir as deformações verticais durante o cisalhamento para um mesmo nível de tensões verticais.

Não foi detectado, para os níveis de deslocamentos horizontais e tensões verticais impostas ao resíduo, um comportamento estável, em termos de variação volumétrica (representada por meio do índice de vazios e deformações verticais) no decorrer do cisalhamento, não sendo configurado dessa forma a ocorrência ou aproximação do estado crítico de tensões.

Como há de se observar na Tabela 4.11, os valores do grau de saturação inicial ( $S_{r.inicial}$ ) pouco variam em decorrência do acréscimo da tensão normal ( $\Delta S_{r\sigma} \leq 3\%$ ), o que esta de acordo com a baixa compressibilidade apresentada pelo resíduo ( $\Delta e_{moldagem-inicial} \leq 0,02$ ), para os níveis de carregamento impostos ( $\sigma_v \leq 200$  kPa) e as condições de moldagem do corpo de prova (energias normal, intermediária e modificada). Foram percebidas variações significativas do  $S_{r.inicial}$  à medida que se eleva a energia de compactação ( $\Delta S_{r_{Ec}} \leq 11\%$ ), comportamento congruente a pequena variação do índice de vazios em relação ao teor de umidade ótimo.

#### 4.3.2.1.1 Envoltória de ruptura para $\tau_{pico}$

A Figura 4.9 e a Tabela 4.12 mostram as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb e seus resultados, adquiridos a partir de uma linha de tendência linear dos

pontos referentes à resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ) do REFP obtidos nas séries de ensaios de cisalhamento direto na condição não inundada, nas três energias de compactação.

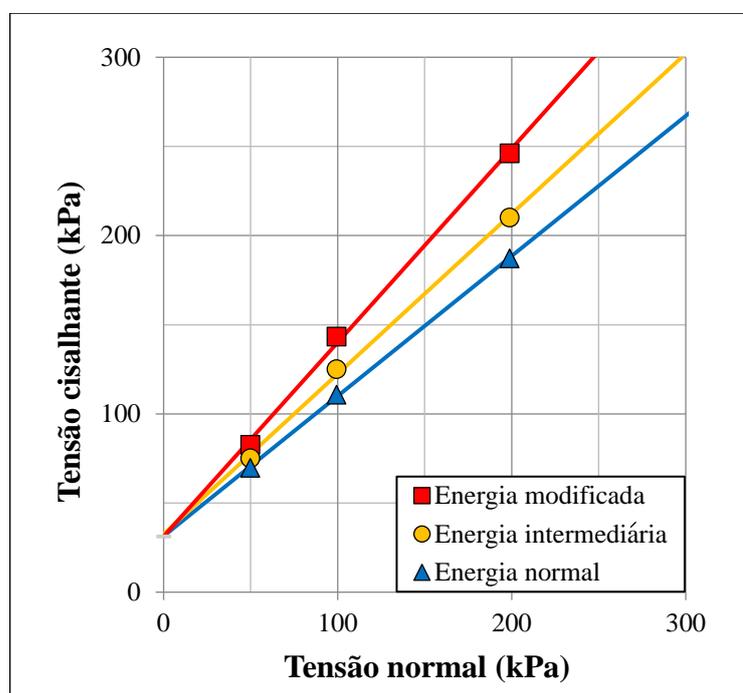


Figura 4.9 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição não inundada – resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ).

Tabela 4.12 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referentes à resistência de pico das amostras cisalhadas em condição não inundada.

Energia de compactação	Parâmetros		
	$c^{\circ}$ (kPa)	$\phi'(^{\circ})$	$R^2$
Normal	31,4	38,2	0,9997
Intermediária	32,6	41,9	0,9983
Modificada	31,3	47,4	0,9982

Os altos valores de coesão ( $c_{medio} = 31,8$  kPa), em relação aos solos arenosos não cimentados (Fredlund *et al.*, 2012), apresentados pelas amostras não indicam necessariamente que sejam decorrentes ao processo de cimentação e/ou presença de forças intrínsecas de atração entre suas partículas (coesão efetiva ou real). Essa coesão pode ser atribuída ao aparecimento de tensões superficiais atrativas (pressão neutra negativa) oriundas de efeitos capilares e de adsorção (sucção matricial) que são geradas nos meniscos capilares no contato entre as partículas sólidas. Esse incremento de resistência em solos não saturados, é conhecido como coesão aparente ( $c^{\circ}$ ) e desaparece com a saturação ou secagem total do solo.

Tendo em vista a ausência de argilominerías na composição do REFP, bem como a conservação de suas características granulométricas (tamanho das partículas), o acréscimo da pressão de água, e conseqüentemente a variabilidade da coesão aparente, é governada pelo grau de saturação ( $S_r$ ), sendo sua relação inversamente proporcional.

Os valores de sucção, representados na forma de coesão aparente ( $c^\circ$ ), se encontram superiores ao esperado para solos arenosos com grau de saturação entre 55% e 42% (Fredlund *et al*, 2012). Além disso, era aguardado que esses valores possuíssem variações mais expressivas ( $3 \leq \Delta c \leq 10 \text{ kPa}$ ), pois foi observado variações de até 13% no grau de saturação das amostras durante  $\tau_{pico}$ , entretanto  $\Delta c_{m\acute{a}x} = 1,3 \text{ kPa}$ .

Vale ressaltar que a medida do Grau de saturação ( $S_r$ ) é falha, pois desconsidera, mesmo que mínimas, as variações de área da sessão transversal do corpo de prova ao ser deslocado horizontalmente, levando apenas em contas as deformações verticais no decorrer do ensaio.

Os valores de ângulo de atrito referentes à resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ) do REFP se encontram semelhantes aos valores típicos de areias bem graduadas de grãos angulares ( $37^\circ$  a  $47^\circ$ ) apresentado por Das (2012) e Pinto (2006), e das areias densas bem graduadas ( $38$  a  $46^\circ$ ) (Hough, 1957 *apud* Lambe & Whitman, 1969), que por sua vez, está de acordo com perfil granulométrico apresentado pelo resíduo após o tratamento granulométrico descrito nesta pesquisa.

#### **4.3.2.1.2 Envoltória de ruptura para $\tau_{5,0mm}$**

A Figura 4.10 e a Tabela 4.13 mostram as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb e seus resultados, adquiridos a partir de uma linha de tendência linear dos pontos referentes as tensões cisalhantes atuantes em  $\delta_h = 5 \text{ mm}$  ( $\tau_{5,0mm}$ ), obtidos nas séries de ensaios de cisalhamento direto na condição não inundada, nas três energias de compactação.

Partindo da premissa que quanto menor o grau de saturação do solo maiores os efeitos de sucção e que, embora o processo de secagem da amostra, decorrente do tempo execução do ensaio, tenha sido ínfimo ( $\Delta w_{moldagem-final} \leq 0,3\%$ ), as variações volumétricas ( $\Delta e > 0$ ) que ocorreram no processo de cisalhamento

resultaram em valores menores do grau de saturação ( $\Delta S_{r_{inicial-final}} \leq 5\%$ ). Desse modo, era esperado que os resultados de coesão aparente obtidos por meio do ajuste gráfico das tensões atuantes em  $\delta_h = 5,0$  mm fossem superiores aos apresentados nos pontos de máximo das curvas tensão-deslocamento ( $\tau_{pico}$ ). Contudo, esse comportamento não foi observado.

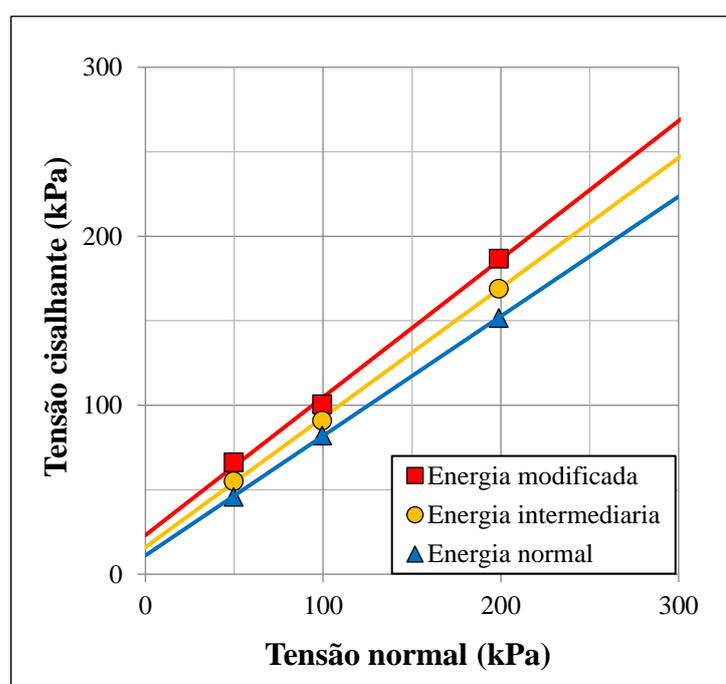


Figura 4.10 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição não inundada – resistência referente às tensões atuantes durante o deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa do cisalhamento direto.

Tabela 4.13 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referente a resistência em  $\delta_h = 5,0$  mm das amostras cisalhadas em condição não inundada.

Energia de compactação	Parâmetros		
	$c^\circ$ (kPa)	$\phi'(^{\circ})$	$R^2$
Normal	11,1	35,3	1,0000
Intermediária	16,0	37,5	0,9999
Modificada	23,1	39,3	0,9995

Apesar dos valores de sucção, representados na forma de coesão aparente ( $c^\circ$ ), estarem demasiadamente inferiores aos apresentados pelos pontos de  $\tau_{pico}$ , esses se encontram próximos ao esperado para solos arenosos com grau de saturação entre 55% e 42% ou teor de umidade 9% a 6% (Fredlund *et al*, 2012). Além

disso, a variação de seus valores ( $\Delta c \leq 12 \text{ kPa}$ ) está em concordância com a variação do grau de saturação ao término do ensaio ( $|\Delta S_{r,final}| \leq 12\%$ ).

Ademais, constata-se que os valores  $\phi'$  encontram-se superiores à resistência residual ( $\phi'_{cv}$ ) apresentado por areias quartzosas ( $35^\circ$  a  $30^\circ$ ) (Skempton, 1964 *apud* Lambe & Whitman, 1969) e por areias bem graduadas ( $34$  a  $30^\circ$ ) (Hough, 1957, *apud* Lambe & Whitman, 1969). Contudo, esse valor é esperado, uma vez que, não fora atingida a condição crítica ou de cisalhamento a volume constante, logo  $\phi'_{\delta = 5,0 \text{ mm}} > \phi'_{cv}$ .

#### 4.3.2.2 Condição inundada

Os anexos 04 A, B e C apresentam os gráficos referentes ao comportamento do resíduo ao ser cisalhado na condição inundada, com o resumo de seus principais dados demonstrados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Dados dos gráficos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição inundada

Energia	$\sigma_v$ (KPa)	$\tau_{pico}$ (KPa)	$\tau_{5,0mm}$ (Kpa)	$\tau_{pico} - \tau_{5,0mm}$ (KPa)	$e_{mold}$	$e_{inicial}$	$e_{pico}$	$e_{5,0mm}$	$\delta_{h,pico}$ (mm)	$\frac{\delta_{v,pico}}{h_0}$ (%)	$\frac{\delta_{v,5,0mm}}{h_0}$ (%)	$w_{mold}$ (%)
Normal	50	47	24	23	0,40	0,39	0,40	0,40	0,99	0,14	0,33	8,33
	100	84	41	42	0,40	0,38	0,39	0,39	0,95	0,15	0,40	8,01
	200	188	101	87	0,40	0,38	0,38	0,38	1,36	0,02	0,16	8,27
Intermediária	50	60	29	31	0,37	0,37	0,37	0,38	0,61	0,33	1,29	7,15
	100	109	50	59	0,37	0,36	0,36	0,37	0,79	0,37	0,86	7,15
	200	201	122	79	0,37	0,35	0,36	0,36	0,98	0,26	0,77	7,15
Modificada	50	72	40	33	0,35	0,35	0,36	0,36	0,92	1,02	1,43	6,15
	100	136	60	77	0,35	0,34	0,35	0,36	0,50	0,43	1,41	6,30
	200	249	154	95	0,35	0,34	0,35	0,36	0,96	0,77	1,57	6,30

Onde:  $\sigma_v$  é a tensão vertical aplicada no cabeçote da caixa do cisalhamento direto;  $e_{mold}$  e  $e_{inicial}$  são os índices de vazios na moldagem e após a consolidação das deformações decorrente da aplicação da tensão vertical, respectivamente;  $e_{pico}$  e  $e_{5,0mm}$  são os índices de vazios durante as tensões de pico e o deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa de cisalhamento direto, respectivamente;  $\delta_{h,pico}$  é o deslocamento horizontal durante as tensões de pico;  $\frac{\delta_{v,pico}}{h_0}$  e  $\frac{\delta_{v,5,0mm}}{h_0}$  são os deslocamentos verticais normalizados pela altura inicial do corpo de prova durante as tensões de pico e no deslocamento de 5,0 mm da caixa do cisalhamento direto, respectivamente;  $w_{mold}$  é o teor de umidade na moldagem do corpo de prova.

Ao confrontar esses dados, percebe-se, assim como nas amostras não inundadas, que à medida que se eleva a energia de compactação, os valores de  $\tau_{pico}$  do REFP tendem a aumentar. Entretanto, a curva é menos suave (Figura 4.11),

revelando, dessa forma, uma abrupta perda de resistência em relação a condição não-inundada após  $\tau_{pico}$ . Além disso, nota-se que as tensões atuantes em  $\delta_h = 5,0$  mm são nitidamente inferiores para uma mesma tensão vertical. Conseqüentemente a diferença entre  $\tau_{pico}$  e  $\tau_{5,0\text{ mm}}$  são bem maiores. Essa diferença, tende a aumentar à que se eleva a tensão vertical e/ou a energia de compactação.

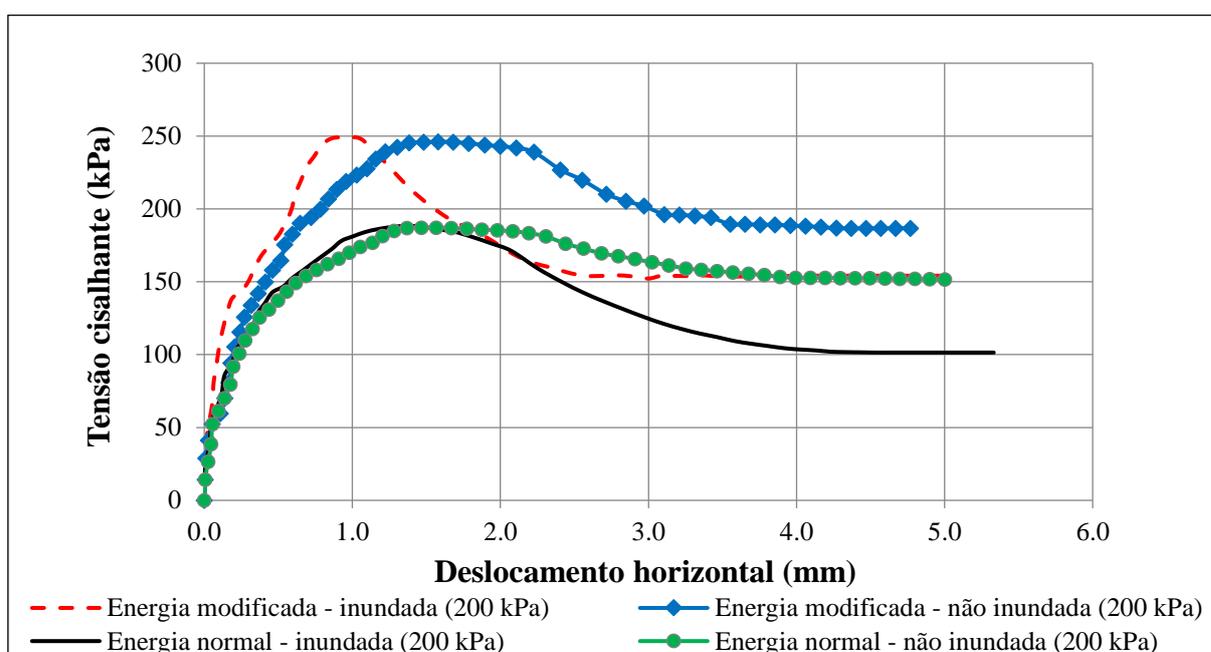


Figura 4.11 – Gráfico  $\tau \times \delta$  das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto com tensões de verticais de 200 KPa moldadas nas energias de compactação normal e modificada.

Foi observado, para mesmos valores de carregamentos verticais aplicados ao corpo de prova, que as tensões de pico nas amostras cisalhadas em condição inundada ( $\tau_{pico(i)}$ ) são aproximadamente iguais as tensões de pico nas amostras cisalhadas em condição não inundada ( $\tau_{pico(n.i)}$ ). Entretanto, o deslocamento horizontal para sua ocorrência ( $1,36\text{ mm} \geq \delta_{(i)} \geq 0,50\text{ mm}$ ) foi em média duas vezes menor ao que foi apresentado nas amostras cisalhadas em condição não inundada, revelando que o material passou a ficar menos dúctil.

Assim como nas amostras não inundadas, o resíduo ao ser cisalhado tende inicialmente a se contrair ( $\frac{\delta_v}{h_0} < 0$ ) para pequenos deslocamentos horizontais. Entretanto, essas deformações são em ordem três vezes maiores que o apresentado pelas amostras cisalhadas na condição não inundada. Após um dado momento começa a expandir (dilatância). Contudo, tais deformações são de baixa magnitude

em relação as amostras não inundadas e tem seu processo cessado rapidamente (Figura 4.12).

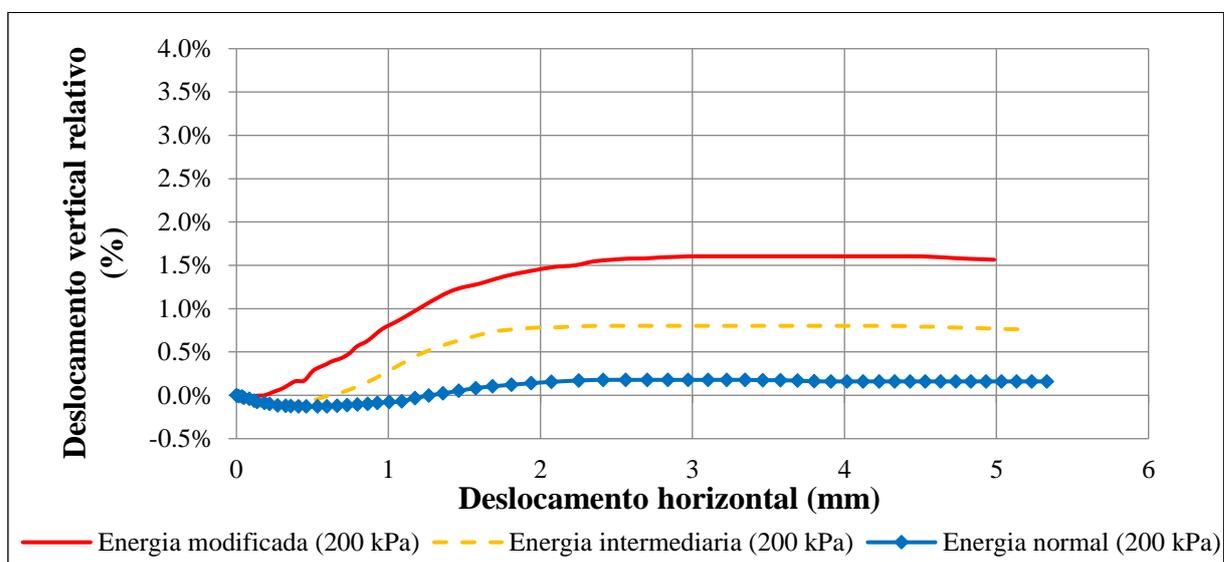


Figura 4.12 – Gráfico  $\frac{\delta_v}{h_0} \times \delta$  das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto sob condição inundada com tensões verticais de 200 kPa.

Foi observado comportamento estável em termos de deformações verticais e índice de vazios no decorrer do cisalhamento, configurando dessa forma, a possibilidade de ocorrência ou aproximação do estado crítico de tensões, haja vista que a área da sessão transversal é alterada ao longo do ensaio, logo  $\Delta V \neq 0$ .

Em conformidade com a literatura (Lambe & Whitman, 1969), o índice de vazios crítico ( $e_{crit}$ ) tende a diminuir à medida que se eleva as tensões de confinamento.

Segundo Fredlund *et al.* (2012) e Lambe & Whitman (1969), para uma areia densa romper no cisalhamento, o alto grau de interligações deve de alguma forma ser superado. Isso pode acontecer (a) cisalhando e fraturando as partículas ou (b) aumentando o volume. Para que isso seja imposto, é exigido mais energia, sendo assim, é necessário deslizar as partículas do solo sobre uma superfície plana. Se uma solo é livre para expandir, a parte menos resistente é a expansão, logo, o imbricamento será superado nesse caminho. Se um solo é impedido de expandir, a parte de menor resistência pode estar no fraturamento das partículas do solo.

Tendo em vista a possível ocorrência ou aproximação do estado crítico (cisalhamento a volume constante), o imbricamento pode estar sendo superado cisalhando e fraturando as partículas do solo. Esse fraturamento em conjunto com a

presença de água geraria uma abrupta perda de resistência em relação as amostras não inundadas após as tensões de pico.

Os gráficos  $\tau/\sigma_v \times \delta_h$  das amostras inundadas (Anexo 04) estão condizentes com o comportamento de areias compactas, nas quais, para mesmas condições de moldagem, quanto menor a tensão vertical ( $\sigma_v$ ) aplicada maior será a relação  $\tau/\sigma_v$ . Além disso, é observado que a tendência das curvas convergirem após  $\tau_{pico}$  é maior que o apresentado pelas amostras não inundadas. Esse fato deve ser ocasionado pela ausência dos efeitos capilares (sucção matricial) oriundos da não saturação do resíduo.

#### 4.3.2.2.1 Envoltória de ruptura para $\tau_{pico}$

A Figura 4.13 e a Tabela 4.15 mostram as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb e seus resultados, adquiridos a partir de uma linha de tendência linear dos pontos referentes à resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ) do REFP obtidos nas séries de ensaios de cisalhamento direto na condição inundada, nas três energias de compactação. Numa análise inicial é possível perceber que a resistência ao cisalhamento do REFP cresce proporcionalmente com o aumento da energia de compactação, e conseqüentemente do entrosamento entre as partículas, bem como com a tensão vertical.

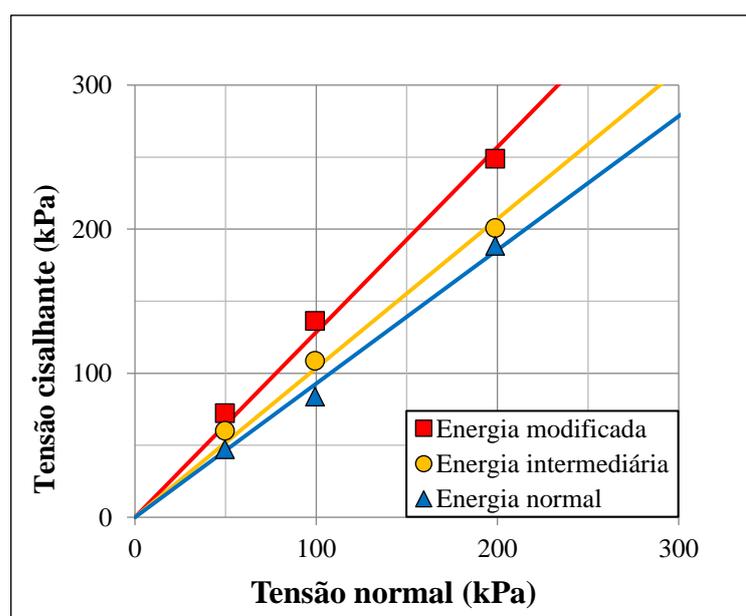


Figura 4.13 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição inundada – resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ).

Tabela 4.15 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referentes à resistência de pico das amostras cisalhadas em condição inundada.

Energia de compactação	Parâmetros		
	c° (KPa)	$\phi'$ (°)	R <sup>2</sup>
Normal	-	42,9	0,9916
Intermediária	-	46,0	0,9875
Modificada	-	52,1	0,9883

Os resultados apresentados evidenciam que intercepto de coesão é nulo. Esse comportamento é esperado, uma vez que o material em estudo apresenta características físicas e mineralógicas de areias essencialmente quartzosas, não apresentando comportamento coesivo em condição inundada. Os valores de ângulo de atrito referentes à  $\tau_{pico}$  do REFP considerando a coesão aparente ( $c^\circ$ ) igual a zero se encontram semelhantes aos valores típicos de fragmentos de rochas (40° – 55°) apresentados por Terzaghi & Peck (1967) e Leonards (1962).

#### 4.3.2.2 Envoltória de ruptura para $\tau_{5,0mm}$

A Figura 4.14 e a Tabela 4.16 mostram as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb e seus resultados, adquiridos a partir de uma linha de tendência linear dos pontos referentes as tensões atuantes em  $\delta_h = 5\text{ mm}$  ( $\tau_{5,0mm}$ ), obtidos nas séries de ensaios de cisalhamento direto na condição inundada, nas três energias de compactação.

Assim como foi demonstrado no traçado da envoltória de ruptura para  $\tau_{pico}$ , os resultados apresentados evidenciaram que o reajuste gráfico resultou em um intercepto de coesão nulo, parâmetro esperado, haja vista as características físicas e mineralógicas do REFP.

Tendo em vista o comportamento estável das deformações verticais ( $\frac{\delta_v}{h_0} = 0$ ) e das tensões cisalhantes ( $\Delta\tau = 0$ ) na faixa de deslocamentos horizontais acima de três milímetros, os valores do ângulo de atrito em  $\tau_{5,0mm}$  é aproximadamente igual angulo de atrito residual ( $\phi'_{residual}$ ) do REFP. Esses valores, por sua vez, encontram-se próximos dos valores típicos de resistência residual apresentado nas areias quartzosas (35 a 30°) (Skempton, 1964 *apud* Lambe & Whitman, 1969), bem como os valores de tensões de pico ( $\tau_{pico}$ ) exibidos nas areias siltosas fofas (33° a 27°) (Terzaghi & Peck, 1967 e Leonards, 1962). Esse aspecto é esperado haja vista que o

ângulo de atrito residual é aproximadamente igual ao ângulo de atrito durante a ocorrência de tensões de pico ( $\tau_{pico}$ ) para um mesmo material granular no estado fofo.

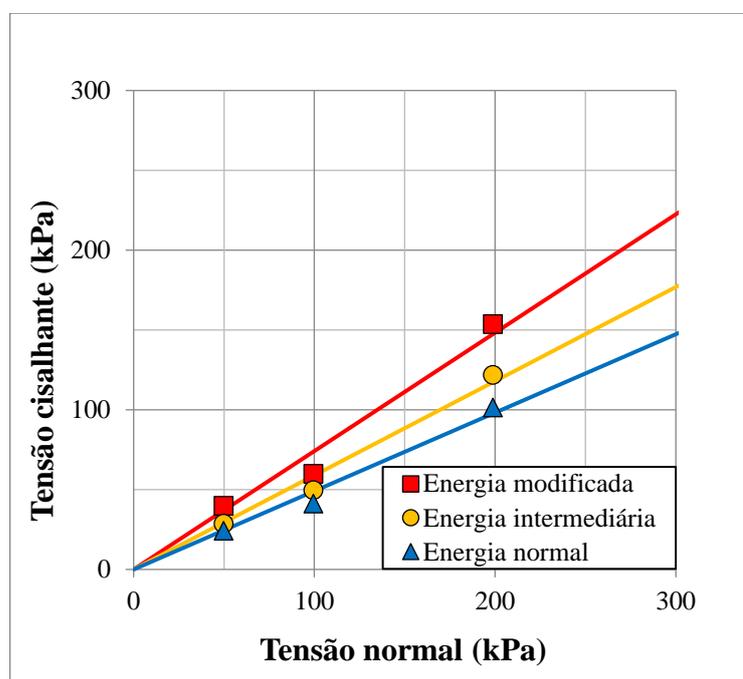


Figura 4.14 – Envoltórias de ruptura das amostras moldadas e ensaiadas na umidade ótima e em condição inundada – resistência referente as tensões atuantes durante o deslocamento horizontal de 5,0 mm da caixa do cisalhamento direto.

Tabela 4.16 – Dados da envoltória Mohr-Coulomb referente a resistência em  $\delta_h = 5,0$  mm das amostras cisalhadas em condição inundada.

Energia de compactação	Parâmetros		
	$c^\circ$ (KPa)	$\phi'$ ( $^\circ$ )	$R^2$
Normal	-	26,2	0,9979
Intermediária	-	30,5	0,9975
Modificada	-	36,6	0,9963

Ao analisar os resultados da Tabela 4.15 e 4.16, observa-se que a energia de compactação pouco influi na perda de resistência das amostras inundadas após ser alcançado as tensões cisalhantes máximas ou de pico, de modo que, para mesmas condições de moldagem (energia de compactação) a diferença entre o ângulo de atrito durante  $\tau_{pico}$  e o ângulo de atrito em  $\tau_{5,0mm}$  é praticamente constante ( $\Delta\phi'_{pico-5,0mm}(i) \cong 16 \pm 0,5$ ).

### 4.3.3 Análise geral

Haja vista as limitações do ensaio de cisalhamento direto quanto ao controle e mensuração das pressões neutras e que os valores apresentados representam também um ajuste gráfico da curva, chamado intercepto de coesão, o valor da coesão aparente bem como os ângulos de atrito podem se distinguir da realidade, sendo necessário realizar comparativos quanto aos resultados obtidos na condição inundada do corpo de prova.

Ao comparar os resultados das envoltórias de ruptura na condição inundada e não inundadas (Tabela 4.17) há de se perceber divergências quanto a literatura (Fredlund *et al.*, 2012; Das, 2012), listadas a seguir.

Tabela 4.17 – Dados do cisalhamento direto.

Energia de compactação	Condição	Parâmetros					
		$c_{pico}^{\circ}$ (kPa)	$\phi'_{pico}$ (°)	$Sr_{pico}$ (%)	$c_{5,0mm}^{\circ}$ (kPa)	$\phi'_{5,0mm}$ (°)	$Sr_{5,0mm}$ (%)
Normal	Inundada	-	42,9	100	-	26,2	100
Intermediária		-	46,0	100	-	30,5	100
Modificada		-	52,1	100	-	36,6	100
Normal	Não inundada	31,4	38,2	57,0	11,1	35,3	52,5
Intermediária		32,6	41,9	51,3	16,0	37,5	46,9
Modificada		31,3	47,4	47,9	23,1	39,3	42,5

Onde:  $\phi'_{pico}$  e  $\phi'_{5,0mm}$  são o ângulo de atrito do REFP durante  $\tau_{pico}$  e quando  $\delta_h = 5,0$  mm, respectivamente;  $c_{pico}^{\circ}$  e  $c_{5,0mm}^{\circ}$  são a coesão aparente do REFP durante  $\tau_{pico}$  e quando  $\delta_h = 5,0$  mm, respectivamente;  $Sr_{pico}$  e  $Sr_{5,0mm}$  são o grau de saturação do REFP durante  $\tau_{pico}$  e quando  $\delta_h = 5,0$  mm, respectivamente.

a) Em condições drenadas, a água pouco influi na resistência das areias, de modo que o ângulo de atrito para areias saturadas é praticamente igual ao de areias secas (menos de 1° ou 2° de diferença), pois a água não exerce efeito lubrificante no solo. A exceção desse caso ocorre quando os grãos se encontram muito irregulares e fissurados, nas quais a água reduz a resistência nas protuberâncias da partícula, afetando diretamente na resistência dos grãos (Pinto, 2006). Entretanto, como é observado, os resultados  $\phi'_{pico}$  na condição não inundada se encontram bastante abaixo dos ângulos de atrito na condição inundada.

b) Quanto menor o grau de saturação, maiores as forças atrativas nos meniscos capilares e conseqüentemente maior a coesão aparente. Assim, não se justifica a redução drástica da coesão aparente entre os pontos da curva referente as

$\tau_{pico}$  e  $\tau_{5,0mm}$ , pois além do grau de saturação ter reduzido ao longo do ensaio, suas variações foram de pequenas proporções ( $\Delta S r_{pico-5,0mm} \leq 5\%$ ).

Tais inconformidades demonstram que os resultados ( $\phi'_{pico}$  e  $c'$ ) obtidos por meio do ajuste gráfico da envoltória de ruptura mostraram-se pouco adequados para mensurar o ângulo de atrito e as pressões neutras atuantes. Assim, a fim de produzir dados mais consistentes quanto aos apresentados, foram adotadas as seguintes considerações tendo como base o que foi descrito anteriormente no subitem a) e b) deste tópico.

- I. Para mesma energia de compactação, o ângulo de atrito na condição inundada ( $\phi'_{(i)}$ ) deve ser menor ou igual ao ângulo de atrito na condição não inundada ( $\phi'_{(n.i)}$ ), e que esta diferença não pode ser superior a 2 graus. Foi admitido que  $\phi'_{(n.i)} = \phi'_{(i)} + 0,5^\circ$ .
- II. A coesão aparente durante  $\tau_{pico}$  ( $c^\circ_{pico}$ ) é menor ou igual a coesão aparente em  $\delta_h = 5,0$  mm ( $c^\circ_{5,0mm}$ ).

A partir dessas considerações obteve-se em conjunto com a análise comparativa dos resultados de sucção e ângulo de atrito apresentado por solos granulares essencialmente quartzosos com grau de saturação e teor de umidade variando entre 35% a 57% e 6% a 10%, respectivamente (Fredlund *et al.*, 2012), os seguintes resultados expressos na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Dados do cisalhamento direto (reajustado).

Energia de compactação	Condição	Parâmetros			
		$c^\circ_{pico}$ (kPa)	$\phi'_{pico}$ (°)	$c^\circ_{5,0mm}$ (kPa)	$\phi'_{5,0mm}$ (°)
Normal	Inundada	-	42,9	-	26,2
Intermediária		-	46,0	-	30,5
Modificada		-	52,1	-	36,6
Normal	Não inundada	8	43,4	11	35,3
Intermediária		12	46,5	16	37,5
Modificada		15	52,6	20	39,3

Onde:  $\phi'_{pico}$  e  $\phi'_{5,0mm}$  são o ângulo de atrito do REFP durante  $\tau_{pico}$  e quando  $\delta_h = 5,0$  mm, respectivamente;  $c^\circ_{pico}$  e  $c^\circ_{5,0mm}$  são a coesão aparente do REFP durante  $\tau_{pico}$  e quando  $\delta_h = 5,0$  mm, respectivamente.

A diferença considerável entre os valores do ângulo de atrito para deslocamentos horizontais iguais a 5 milímetros ( $\phi'_{5,0mm}$ ) pode ser decorrente do fato

de que na condição inundada o resíduo aproxima-se do estado crítico (cisalhamento a volume constante), podendo estar ausente, dessa forma, o fenômeno de dilatância observada em solos compactos. Conseqüentemente não existiria, ainda que de baixa magnitude, o trabalho adicional (parcela de resistência estrutural -  $\phi'_f$ ) para superar o imbricamento entre as partículas por meio de sua expansão.

Assim, nesse ponto ( $\delta_h = 5,0$  mm), a resistência das amostras inundadas dependem exclusivamente do esforço necessário para promover o deslizamento mineral-mineral ( $\phi'_u$ ) e o rolamento das partículas, umas sobre as outras. Enquanto que nas amostras não inundadas existe contribuição dessas três parcelas na resistência ao cisalhamento.

Além disso, conforme comentado no item 4.2.2.2, a ocorrência do estado crítico (cisalhamento a volume constante) promove o fraturamento das partículas do solo que, em conjunto com a presença de água gera uma redução da resistência nas protuberâncias da partícula, afetando diretamente a resistência dos grãos.

Tais condicionantes explicariam a diferença entre os ângulos de atrito obtidos para deslocamentos horizontais de 5,0 mm, pois solos mais compactos (menor índice de vazios) apresentam maior resistência para promover seu deslizamento e rolamento das partículas umas sobre as outras. Logo para mesmas condições de confinamento e moldagem, o ângulo de atrito na condição inundada ( $\phi'_{(i)}$ ) seria maior que o ângulo de atrito na condição não inundada ( $\phi'_{(n.i)}$ ), haja vista que neste ponto seu índice de vazios é menor que nas amostras não inundadas.

Contudo, tais condicionantes não foram possíveis de se confirmar, haja vista que a área da sessão transversal da caixa do cisalhamento direto é alterada ao longo do ensaio, de forma que a ocorrência do estado crítico não pôde ser comprovada. A ausência de ensaios de microscopia (MEV) para avaliar a presença de fraturas nos grãos impede uma conclusão mais precisa em relação a esse aspecto.

Além desses aspectos, vale salientar que o REFP contém mica (biotita) em sua composição mineralógica, material que apresenta perda de resistência ao interagir com água. Entretanto, sugerir que tal comportamento é oriundo do mesmo é pouco prudente, uma vez que não foi analisado seu percentual presente nas amostras estudadas e sua presença não explica a perda abrupta de resistência ao cisalhamento apenas após as tensões de pico.

Vale ressaltar que o resultado do ângulo de atrito de ensaios de cisalhamento direto é geralmente maior (por talvez 2°) que os valores obtidos no ensaio de compressão triaxial, especialmente para areias densas (Taylor, 1939 *apud* Lambe & Whitman, 1969).

#### 4.4 Compressão edométrica

Os dados referentes às condições de moldagem dos corpos de prova e à trajetória das curvas “índice de vazios versus log tensão vertical” para condição inundada e não inundada são expressos respectivamente na Tabela 4.19 e nas Figuras 4.15 e 4.16. Na Tabela 4.20 estão explicitados os resultados do ensaio de compressão edométrica ( $a_v$ ,  $m_v$ ,  $D$  e expansão).

Tabela 4.19 – Características de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão edométrica.

Índices físicos	Unidade	Condição não-inundada			Condição inundada		
		Normal	Intermediária	Modificada	Normal	Intermediária	Modificada
$h_{\text{médio}}$	cm	1,97	2,00	1,97	1,97	1,97	1,97
$D_{\text{médio}}$	cm	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14
$m_{\text{cp}}$	g	205,00	212,14	208,70	205,00	207,91	208,85
$w$	%	8,53	7,14	6,14	8,30	7,15	6,30
$\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	1,89	1,94	1,98	1,89	1,95	1,97
$e_{\text{inicial}}$	-	0,41	0,37	0,35	0,41	0,37	0,35

Onde:  $h_{\text{médio}}$  e  $D_{\text{médio}}$  são respectivamente a altura e o diâmetro médio do corpo de prova, e  $m_{\text{cp}}$  refere-se a massa da amostra moldada;

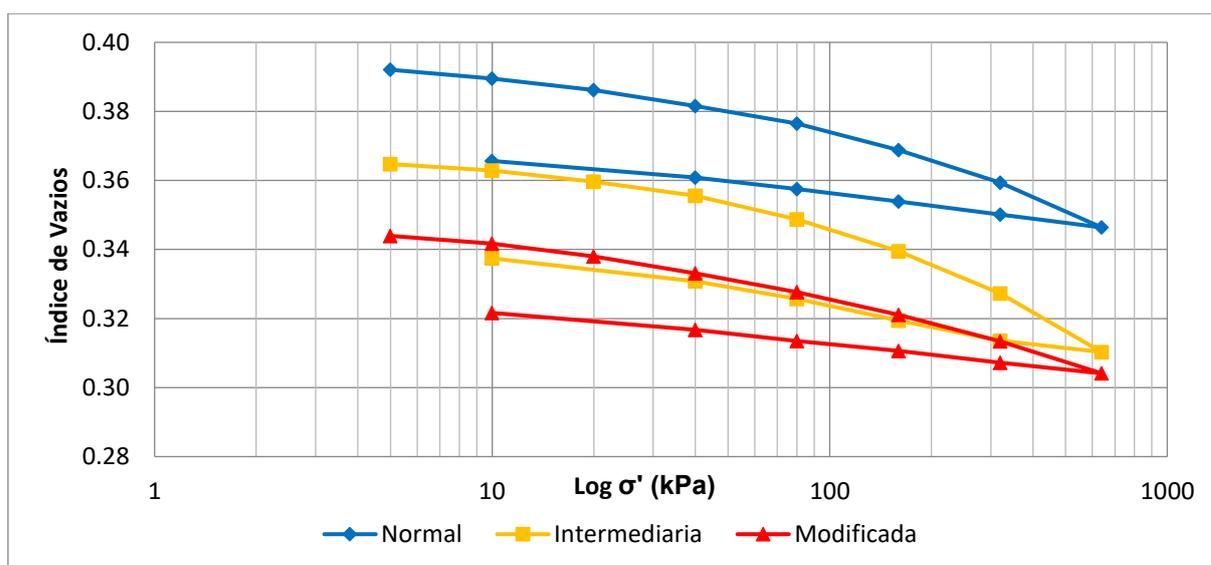


Figura 4.15 – Gráfico  $e \times \log \sigma'$  das amostras submetidas ao ensaio de compressão edométrica sob condição não-inundada.

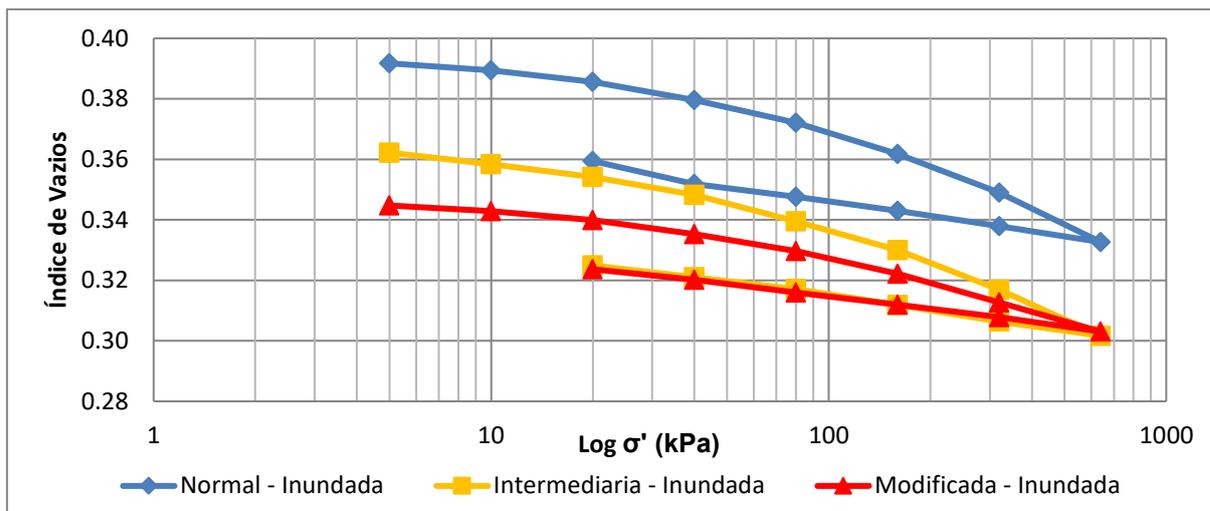


Figura 4.16 – Gráfico  $e \times \log \sigma'$  das amostras submetidas ao ensaio de compressão edométrica sob condição inundada.

Tabela 4.20 – Resultados do ensaio de compressão edométrica.

Condição	Energia	$a_v$ ( $\text{kPa}^{-1}$ )	$m_v$ ( $\text{kPa}^{-1}$ )	D (kPa)	Expansão (%)
não inundado	Normal	$9,8 \times 10^{-5}$	$6,9 \times 10^{-5}$	14441	-
	Intermediária	$9,2 \times 10^{-5}$	$6,7 \times 10^{-5}$	14921	
	Modificada	$6,7 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-5}$	20166	
inundado	Normal	$9,3 \times 10^{-5}$	$6,7 \times 10^{-5}$	15006	0,0
	Intermediária	$9,0 \times 10^{-5}$	$6,5 \times 10^{-5}$	15385	
	Modificada	$6,5 \times 10^{-5}$	$4,9 \times 10^{-5}$	20587	

Onde:  $a_v$  e  $m_v$  são respectivamente os coeficientes de compressibilidade e de variação volumétrica e D o módulo oedométrico (confinado) de 5 kPa a 640 kPa.

Constatou-se, por meio dos ensaios edométricos, que o resíduo possui, quanto à compressibilidade, comportamento típico de areias ou materiais granulares fabricados com quartzo e feldspato moído (Lambe & Whitman, 1969), de forma que, para os valores de tensões aplicado neste ensaio ( $\sigma'_{v,máx} = 640 \text{ kPa}$ ) não foram observadas variações expressivas do índice de vazios com o aumento de  $\log \sigma'_v$ . Conseqüentemente, não foi possível determinar a tensão de escoamento ( $\sigma'_{esc}$ ) do REFP, valor numérico que representa a tensão vertical a partir do qual as deformações volumétricas aumentam sensivelmente com o logaritmo de  $\sigma'_v$ , e que decorrem do fraturamento de suas partículas. Em vista de sua composição mineralógica e granulométrica é esperado que a pressão de escoamento gire em torno de valores superiores a 10 Mpa (Lambe & Whitman, 1969).

Percebe-se, para os níveis de tensões normalmente aplicados aos elementos das camadas de um pavimento ( $\sigma'_{pav} \ll \sigma'_{esc}$ ) que o REFP apresenta baixíssima compressibilidade de forma que as deformações provocadas pela aplicação de uma sobrecarga são desprezíveis e praticamente imediatas (Anexo 05).

Ao comparar a compressão volumétrica do resíduo em diferentes níveis de energia de compactação, nota-se que a compressibilidade do resíduo pouco varia com seu incremento. Além disso, percebeu-se que a presença da água pouco influi na variação volumétrica ( $\Delta e_{m\acute{a}x (n.i-i)} = 0,01$ ) (Anexo 06), de forma que, o resíduo não apresentou comportamento colapsível ou expansível ao ser inundado qualquer que fosse a energia de compactação aplicada na amostra (Figura 4.17)

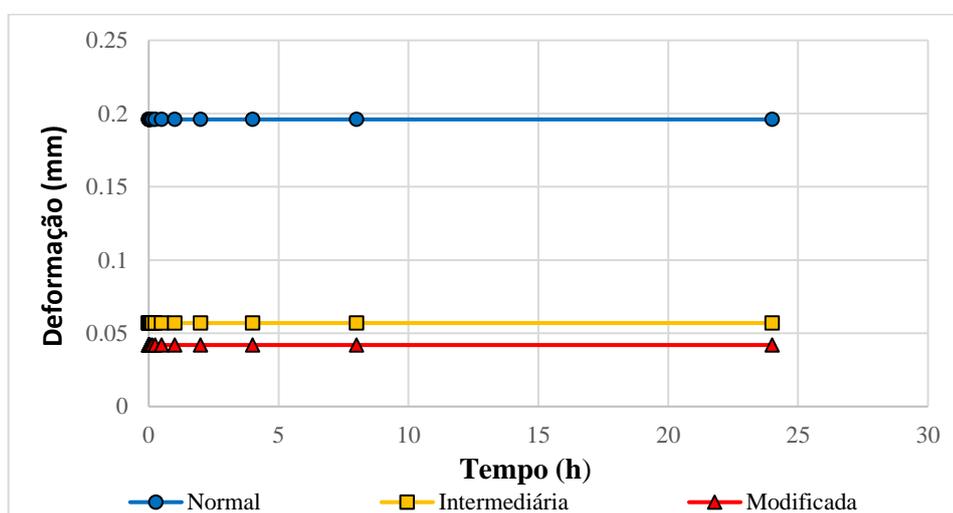


Figura 4.17 – Gráfico deformação versus tempo das amostras inundadas no estágio de 5 kPa.

Esse comportamento não colapsível está em conformidade com os resultados apresentados no cisalhamento direto, pois o fenômeno de colapso está intimamente associado a perda de resistência de pico ( $\tau_{pico}$ ) dos solos ao serem inundados, e essas se mantiveram praticamente iguais para mesmas condições de moldagem e execução do ensaio ( $E_c$  e  $\sigma_v$ ).

A ausência de expansividade está em concordância com a mineralogia apresentada pelo REFP, a qual não apresenta argilominerías expansivos.

#### 4.5 Permeabilidade

Os dados referentes às condições de moldagem dos corpos de prova e os resultados dos ensaios de permeabilidade com carga variável (NBR 14545:2000) bem

como os valores obtidos por meio do uso de métodos empíricos propostos por Hazen (1911), Kozeny-Carman utilizado por Singh & Mohanty (2000) e Chapius (2004) para estimar o coeficiente de permeabilidade de solos granulares são expressos na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Dados e resultados para determinação do coeficiente de permeabilidade do REFP.

Índices físicos	Unidade	Energia de compactação		
		Normal	Intermediária	Modificada
$h_{\text{médio}}$	cm	12,75	12,75	12,75
$D_{\text{médio}}$	cm	9,99	9,99	9,99
w	%	8,20	7,00	6,26
$\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	1,89	1,94	1,98
e	-	0,41	0,37	0,35
$D_{10}$ (médio)	cm	0,018		
IP	-	0		
k (14545:2000)	10 <sup>-2</sup> cm/s	1,56	1,39	1,28
k (Hazen)		3,24		
k (Singh & Mohanty)		1,58	0,25	0,10
k (Chapius)		1,59	1,27	1,13

Onde:  $H_{\text{médio}}$  e  $D_{\text{médio}}$  são respectivamente a altura e diâmetro médio do corpo de prova;  $D_{10}$  diâmetro efetivo da curva granulométrica do resíduo; e IP o índice de plasticidade do resíduo.

Os resultados expostos demonstram que o REFP apresenta, segundo os critérios de Terzaghi & Peck (1967) (Lambe & Whitman, 1969), coeficiente de permeabilidade (k) médio ( $10^{-1} > K > 10^{-3}$ , cm/s), típico de areias.

Dos métodos empíricos propostos para estimar a permeabilidade, o método de Chapius (2004) fora aquele que mais se aproximou, de modo geral, dos resultados obtidos por meio de ensaios experimentais.

A disparidade do método empírico proposto por Hazen (1911) com os resultados obtidos por meio de ensaios experimentais justifica-se pelo fato de a equação proposta dever ser usada somente para casos de areias limpas e uniformes ( $C_u < 5$ ). O REFP apresentou granulometria não uniforme ( $C_u = 18,2$ ).

Os valores apresentados pelo método de Kozeny-Carman, utilizado por Singh & Mohanty (2000), mostraram-se incompatíveis para índices de vazios menores que 0,41. Tal situação pode ser oriunda do fato de que sua constante “ $\delta$ ” é sugerida tanto como um valor constante como em função da porosidade, a qual é válida para uma faixa estreita de parâmetros geométricos de um meio poroso específico.

#### 4.6 Índice de atividade pozolânica (IAP)

Constatou-se por meio dos parâmetros químicos obtidos no ensaio de FRX (item 4.1) e perda ao fogo (0,10%), que o REFP atende aos requisitos químicos para materiais pozolânicos, descrito na Tabela 4.22, sendo classificado, segundo a NBR 12653 (2014), como material de Classe N. Entretanto, o REFP não atendeu os requisitos físicos (Tabela 4.23) de desempenho com cimento Portland aos 28 dias superior ou igual a 90% que a amostra controle. Dessa forma, conforme a Norma ABNT NBR 12653 (2014), o REFP não foi considerado como material pozolânico.

Tabela 4.22 – Requisitos químicos para os materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SiO <sub>3</sub>	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda de Fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25

(\*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014)

Tabela 4.23 – Requisitos físicos para os materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 μm	< 20%	< 20%	< 20%	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

(\*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014)

Contudo, os valores, apresentados na Tabela 4.24 não descartam completamente a consideração do REFP como material com atividade pozolânica. A norma anterior, de 1992 (ABNT NBR 12653), requisitava que o material em análise apresentasse índice de desempenho maior ou igual a 75% aos 28 dias. Além disso, segundo Mehta & Monteiro (2008) apud Melo (2012), o desenvolvimento da resistência de reações pozolânicas são lentas, chegando ao seu valor final aos 91 dias, diferentemente das pastas apenas com cimento, que obtêm 90 a 96% da sua resistência final aos 28 dias. Ademais, foi observado, quanto ao estado fresco da argamassa, que o uso de aditivo foi dispensado para a argamassa com resíduo, de forma que este apresentou um ganho de trabalhabilidade (+3% de consistência normal) em relação ao traço de referência (controle).

Tabela 4.24 – Resultados do ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica.

Tipo de argamassa	Identificação	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Média (MPa)	Desvio relativo (%)	IAP (%)	Consistência (mm)	
Controle	A1	34,6	34,0	1,94	83,4	195,33	
	A2	34,4		1,32			
	A3	32,8		3,26			
Com resíduo	B1	27,4	28,3	3,19		83,4	200,67
	B2	29,9		5,44			
	B3	27,5		2,83			
	B4	28,5		0,58			

Como foi observado em meio aos resultados da análise granulométrica (item 4.2.3), o material obtido após o processo de beneficiamento físico, apresenta quase metade de sua massa (40%) situada na faixa abaixo dos 150  $\mu\text{m}$ , possibilitando uma contribuição de efeito fíler. Isso pode vir, segundo Dal Molin (2011) apud Melo (2012), a melhorar algumas das propriedades de concretos e argamassas, como trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade e tendência de fissuração.

Esses resultados revelam um aspecto promissor na utilização desse material em conjunto com o cimento, podendo acarretar em maiores resistências mecânicas ou na redução da quantidade de aglomerantes presentes na mistura, em comparação com os materiais tradicionalmente utilizados na engenharia civil para produção de argamassas, concreto, solo melhorado e solo-cimento.

## CAPÍTULO 5

**RESULTADOS & DISCUSSÕES**

O presente estudo analisou o resíduo estéril do feldspato pegmatítico (REFP) oriundo de depósitos pegmatíticos situados no município de Parelhas/RN, em vista da sua aplicação em obras geotécnicas. Para tanto, submeteram-se as amostras do REFP ao processo de tratamento granulométrico (britagem e moagem) de forma que obtivesse um material com 100% passante na peneira N°4 (4,2 mm), seguido da análise quanto a aspectos químicos, físicos, mineralógicos e mecânicos. Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O REFP se configurou, após tratamento granulométrico, como uma areia siltosa não plástica (SM), com massa específica dos sólidos igual a  $2,66 \text{ g/cm}^3$ , aspecto condizente com os principais minerais que compõem os corpos pegmatíticos destinados a lavra de feldspato. O resíduo possui granulometria não uniforme ( $C_U = 18,2$ ) e é bem graduado ( $C_C = 1,4$ ). Foi designado quanto à classificação TRB (Transportation Research Board), como A-2-4.
- Quimicamente, pode-se definir o REFP como um material com alto percentual de sílica (64,13%) e alumínio (15,08%). Apresenta baixo teor de álcalis totais (10,62%) e elevado teor de óxido de ferro (5,25%) para minerais a serem utilizados como matéria-prima na indústria vítrea e cerâmica. Justificando desta forma seu descarte, uma vez que, estes se encontram em não conformidade com os requisitos exigidos pela indústria e não se dispõem de tecnologias de concentração do minério de feldspato na região.
- Minerologicamente, pode-se classificar o REFP como um material formado essencialmente por quartzo, com presença de feldspato potássico (microclínio) e calco-sódicos (albita e anortita), além de mica (biotita). A elevada concentração de quartzo na amostra, revelado na forma de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), é um fator positivo para determinar os possíveis usos do REFP, pois a presença de quartzo – mineral altamente resistente, quando preservadas suas características – pode conferir propriedades satisfatórias ao seu uso como

matéria-prima na Engenharia Civil. Entretanto, a presença de mica pode contribuir para perda de resistência quando inundado.

- Os valores de ISC atingidos pelo REFP em condições ótimas ( $\rho_{d.máx}$  e  $w_{ót}$ ), para as energias de compactação normal, intermediária e modificada foram iguais a 22%, 46% e 65%, respectivamente. Dessa forma, o REFP pode-se ser utilizado quando compactado na energia modificada, em condições ótimas ( $\rho_{d.máx}$  e  $w_{ót}$ ) como elemento de base de pavimentos quando o N (número de operações do eixo simples padrão durante o período de projeto) for menor que  $5 \times 10^6$ . Também pode ser usado em camadas de sub-base e reforço subleito para as energias de compactação intermediária e normal, respectivamente.
- O REFP possui alta taxa de perda de capacidade de suporte em relação ao desvio de umidade, apresentando um decréscimo de resistência na ordem de 50% para teores de umidade iguais a  $W_{ótimo} \pm 1$ , necessitando, dessa maneira, de um alto controle durante sua aplicação em pavimentos.
- Quanto a resistência ao cisalhamento para tensões de pico, as amostras moldadas em condições ótimas, apresentaram, em condições não inundadas, coesão variando entre 8 a 15 kPa e seu ângulo de atrito variando entre  $43^\circ$  e  $53^\circ$  para as energias de compactação normal, intermediária e modificada, com os valores de tensão vertical utilizados (50, 100 e 200 kPa). A inundação não provocou mudanças mensuráveis nos valores de resistência de pico, entretanto conduziu a menores valores de tensões residuais.
- O REFP apresentou-se como um material de baixa compressibilidade, de forma que as deformações provocadas pela aplicação de uma sobrecarga normalmente imposta aos elementos da camada de um pavimento são desprezíveis e imediatas. A presença de água pouco influenciou na variação volumétrica dos corpos de prova analisados ( $\Delta e_{máx (n.i-i)} = 0,01$ ), de forma que o resíduo não apresentou comportamento colapsível ou expansível ao ser inundado, qualquer que fosse a energia de compactação aplicada a amostra.
- Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade com carga variável para as amostras moldadas em condições ótimas ( $\rho_{d.máx}$  e  $w_{ót}$ ) nas energias de compactação normal, intermediária e modificada demonstram que o resíduo é medianamente permeável ( $1,28 - 1,56 \times 10^{-2}$  cm/s). Dos métodos empíricos

analisados, o método de Chapius (2004) mostrou-se como o mais adequado para estimar o coeficiente de permeabilidade do REFP.

- Apesar de satisfazer os requisitos químicos impostos pela NBR 12653 (2014), o REFP não atendeu aos requisitos físicos de desempenho com cimento aos 28 dias, de forma que não pôde ser considerado como um material pozolânico. Entretanto, o mesmo atingiu  $IAP_{\text{cimento}}$  igual 83%, relativamente próximo ao exigido (90%) de forma que seu uso pode se apresentar satisfatório em argamassas, concretos, solos melhorados e solo-cimento. Salienta-se que são necessárias maiores investigações sobre esse aspecto.

Conclui-se, que o REFP apresenta-se como uma fonte alternativa de matéria-prima para obras geotécnicas ou na construção civil, exibindo bom comportamento mecânico e manifestando potencial para misturas com cimento. Estudos posteriores para avaliar seu custo de produção e transporte, bem como suas zonas de influência, são imprescindíveis para avaliar sua aplicabilidade nesses setores, e conseqüentemente, reduzir os impactos ambientais decorrentes de seu descarte e da exploração de recursos naturais.

Recomenda-se também a realização de ensaios triaxiais a fim de sobrepor as limitações do ensaio de cisalhamento direto, tanto em relação a medição/controle da sucção, representados na forma de coesão aparente neste trabalho, quanto das deformações resultantes  $(\Delta V; e; \delta_v; \delta_h)$  do processo de cisalhamento. Conseqüentemente, poder-se-á verificar a influencia do grau de saturação da amostra, o qual foi calculado nesta pesquisa a partir da consideração do teor de umidade da amostra igual ao valor obtido ao término do ensaio.

Haja vista que o REFP exibiu aspecto de solos granulares não coesivos, e que sua curva de compactação, bem como os resultados de ISC apresentaram-se atípicos ao que visto na literatura clássica da mecânica dos solos, recomenda-se o uso de técnicas de vibração (mesa vibratória) para realização e retroanálise desses ensaios/resultados. Essa técnica é a mais indicada para compactação deste tipo de material, pois seu processo possibilita o escorregamento e acomodação das partículas, ocasionando a diminuição do índice de vazios (DNIT, 2006).

A realização de uma verificação microscópica também contribuiria para o estudo, pois possibilitaria visualizar como ocorre a orientação e acomodação dos

grãos nas duas condições de moldagem, propriedade que influi diretamente nos parâmetros físicos e mecânicos do solo. A estimativa do percentual de cada minério presente no REFP por meio do cálculo estequiométrico contribuiria para abordar a temática a cerca do efeito da mica (biotita) na resistência do material quando inundado.

## REFERÊNCIAS

ALECRIM, A.V. (2009). **Estudo do resíduo de quartzito foliado para o emprego em estruturas de pavimentos**. São Paulo, 2009. 168p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

ALECRIM, A.V.; FABBRI, G.T.P. (2005). **Utilização de rejeitos de quartzito em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis**. In: 36ª Reunião Anual de Pavimentação, 2005, Curitiba, - PR. 1-10p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D3080: **Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**. Pensilvânia, Estados Unidos; ASTM 1998.

ANGELIN, L.A.A.; NESI, J.R.; TORRES, H.H.F.; MEDEIROS, V.C.; SANTOS, C.A.; VEIGA JUNIOR, J.P.; MENDES, V.A.; OLIVEIRA, R.G.; SAMPAIO, M.A.F. & ARAUJO, R.V. (2006). **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte**. SIG - Sistema de Informações Geográficas.

ARAUJO, S.C.J.F.N. & COSTA, C.M.L. (2014). **Avaliação da resistência de misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato**. In: XIV Congresso Colombiano de Geotecnia & IV Congresso Suramericano de Ingenieros Jóvenes Geotécnicos, 15-18 nov., Bogotá, Colômbia. 6pp.

ARAUJO, S.C.J.F.N. & COSTA, C.M.L. (2015). **Avaliação do emprego de misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato para pavimentação**. In: XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15-18 nov., Buenos Aires, Argentina. 8pp.

ARAUJO, S.C.J.F.N. (2014). **Avaliação do emprego de resíduo de polimento de porcelanato em solo laterítico para pavimentação**. 15pp. Trabalho de Conclusão de Curso de bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ARAUJO, S.C.J.F.N. (2016). **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo**. 101pp. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Especificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação da finura por meio de peneira de 45 µm.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solo que passam da peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8952: Coleta e preparação de amostras de materiais pozolânicos - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo - Índice de Suporte Califórnia.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMATIZAÇÃO. **NBR NM 18: Cimento – Análise química - Determinação de perda ao fogo.** NM, 2004.

BATALIONE, G. (2007). **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM 158/ 07 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172 p.

BEDIN, J. (2010). **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BEURLIN, H.; DA SILVA, M.R.R.; THOMAS, R.; SOARES, D.R.; OLIVIER, P. (2008). **Nb-Ta-(Ti-Sn) oxide mineral chemistry as tracer of rare-element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, Northeastern Brazil**. *Mineralium Deposita*, v.43, p.207-228.

BEZERRA, M.S.; CARVALHO, V.G.D.; NESI, J.R. (1994). **Caracterização e mercado dos minerais de pegmatito da Província da Borborema**. Recife: CPRM. 49p. anexo, (Série Recursos Minerais, 5).

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação - 3. Ed.** Rio de Janeiro: 2006.

CARVALHO, E. V. **Utilização do resíduo da retífica de cerâmica de revestimento na produção de concreto para pavimento intertravado**. 2013. 161 pp. Dissertação (mestrado em Tecnologia e Inovação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2013.

CASTRO, C. & JATOBÁ, L. (2006). **Litosfera: Minerais, Rochas, Relevos**. 2ª ed. Recife: Edições Bagaço.

CASTRO, S.F. (2008). **Incorporação de resíduo de caulim em solo cimento para construções civis**. 112 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande, Campinha Grande.

CHAPIUS, R.P. (2004) **Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio**. *Canadian Geotechnical Journal* v 41, n 5, pp 787-795.

COELHO, J.M. (2009) **Perfil da cerâmica de revestimento RT 69**.

COELHO, J.M. (2009) **Perfil do Feldspato RT 45**.

DA SILVA, M.R.R. & DANTAS, J.R.A. (1997). **A Província Pegmatítica da Borborema-Seridó, Paraíba, e Rio Grande do Norte**. In: DNPM/CPRM (eds) *Principais Depósitos Minerais do Brasil*, 1, 1997, Brasília: DNPM, 19 ed., v. 4b.

DANTAS, A.A.N. (2015). **Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. 88pp. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. DNER-ME 093/094 – **Solos: determinação da densidade real.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. DNER-PRO 120/97 – **Coleta de amostras de agregados.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. DNER-PRO 257/99 – **Estudo e amostragem de rochas em pedreiras para fins rodoviários.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) – **Sumário Mineral 2010, V.30 – Feldspato.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) – **Sumário Mineral 2011, V.31 – Feldspato.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) – **Sumário Mineral 2012, V.32 – Feldspato.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) – **Sumário Mineral 2013, V.33 – Feldspato.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) – **Sumário Mineral 2014, V.34 – Feldspato.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) – **Sumário Mineral 2015, V.35 – Feldspato.**

DRUMMOND, N. F. **Ambientes geológicos e mudanças de cor no quartzo hialino.** 2009. 195p. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

DWIGHT, R.S. (2004) **Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gemológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

ESPÓSITO, T. J. & ASSIS, A P. (2002). **Liquefaction Potential of Tailings Dams proceeding.** International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, RJ, pp. 311-316

ESPÓSITO, T. J. (2000). **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF, 363 p.

EUROFEL - European Association of Feldspar Producers - <http://www.ima-europe.eu/about-industrial-minerals/industrial-minerals-ima-europe/feldspar>. Acessado em 23/02/2017.

FARIAS, C.B. (2012). **Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados.** 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

FARIAS, E.R. (2005) **A utilização de misturas de solo/cinza pesada na pavimentação – Análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental.** 107 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina.

FERNANDES, G. (2005). **Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-027A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 253p.

FREDLUND, D.G., H. RAHARDJO AND M.D. FREDLUND (2012). **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice.** John Wiley & Sons, Inc., New York, 926 p (ISBN 978-1-118-13359-0).

GERAB, A.T.F.S.C. (2014). **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias.** 106 pp. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GOMES, R.C. & ALBUQUERQUE FILHO, L.H. (2002). **Geotechnical analysis of eroded sediments in a exhausted pit mine using CPTU tests.** 4th International Congress on Environmental Geotechnics, 4th ICEG, Rio de Janeiro, RJ, 1: 323-328.

HAZEN, A. **Discussion on dams and sand foundations.** Transactions of ASCE, vol. 72, 1911.

INGUNZA, M.P.D.; GERAB, A.T.F.S.C.; MURILO, F. (2014) **Avaliação de rejeito de mineração de feldspato com vistas ao seu uso em construção civil.** In: XXXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Monterrey.

LAMBE, T. W & WHITMAN, R. V., (1969). **Soil Mechanics.** John Wiley & Sons, Inc., Sigapura, 553p (ISBN 0-471-51192-7).

LEONARDO, A. (2013) **Escavação e exploração de minas a céu aberto. Juiz de Fora.** 134 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de fora, Juiz de Fora.

LINHARES, A.S. (2014) **Aplicação do rejeito da scheelita em camadas granulares de pavimentos.** In: XVII Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, COBRAMSEG, 2014, Goiânia.

LIRA, H. L.; & NEVES, G.A. (2013) **Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos - REMAP, v.8.3, p.110-117.

LOPES, M.C. (2000). **Deposição hidráulica de rejeitos granulares e a influência nos seus parâmetros de resistência.** Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 158 p.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.; COELHO, J. M., 2008. **Feldspato**. In: Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. 2º ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 2008, p.467-486.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.; PIQUET, B.; COSTA, M.J., (2003): **Pegmatitos do Nordeste: Diagnóstico sobre o Aproveitamento Racional e Integrado**. V. 9, Série Rochas e Minerais Industriais, CETEM/MCT, pp.7–97.

LUZ, M.P, CASTRO, S.S., REZENDE, L.R., ARAÚJO, A.L.S, (2006). **Análise da viabilidade técnica da utilização de rejeito de pedra dosado ao solo com material de pavimentação**. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Curitiba, PR, 1: 1 – 5.

MARTINS, T.A. & SANTOS, A.A. (2012) **Caracterização física, química e mecânica de resíduo de beneficiamento de feldspato e quartzo, visando aplicação em pavimentos**. In: Curso de Engenharia Civil da UNESC.

MELO, M.C.S. (2012) **Estudo de argamassas adicionadas de cinza de algarroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.

MELO, R.O.F. (2011) **A mineração artesanal, e de pequena escala em pegmatitos e cerâmica no município de Parelhas, região do Seridó/Rio Grande do Norte**. Dissertação de Mestrado (PRODEMA – Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente), UFRN, Natal, 94p.

MIRANDA, MI. R, 2012. **Caracterização espectroscópica e alteração da cor por radiação gama e tratamentos térmicos de quartzo róseo-leitoso da Província Pegmatítica da Borborema**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2012.

OBA, C.A.I. & RIBEIRO, L.P.B. (2006). **Flotação dos Feldspatos**. In: Chaves, A.P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Flotação. 1ª ed. São Paulo, SP, Brasil: Signus Editora, v. 4, p331-349.

PEREIRA, K.L.A. (2012) **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 101 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

PINTO, C. S. **Curso basico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PISSATO, E., & SOARES, L., (2005). **Utilização de finos de pedra em misturas de solocimento: Correção granulométrica de um solo argiloso**. 2º Seminário de Uso de Fração fina da Britagem, SUFFIB, São Paulo, 1: 1 – 7.

PRESOTTI, E.S. (2002). **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG, 153 p.

RIBEIRO, L.F.M. (2000). **Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF, 235 p.

SANTOS, A.G. (2004). **Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica de um rejeito de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG, 195 p.

SANTOS, C.R. (2012) **Estudo da utilização de rejeitos de carvão na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. RS, 161p.

SILVA, A.P.M.; VIANA, J.P.; CAVALCANTE, A.L.B. (2011) **Caderno de Diagnóstico Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração**. (Relatório de pesquisa).

SILVA, S.M.P.; CRÓSTA, A.P.; FERREIRA, F.J.F.; BEURLIN, H.; SILVA, A.M.; SANTOS, L.F., (2010). **Espectrometria de raios gama de granitos pegmatíticos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Geofísica, 28(4), 673-690.

SILVEIRA, N.P.O.S. (2010) **Análise das propriedades físicas e mecânicas de dois resíduos finos de pedra para utilização em pavimentos rodoviários**. 161 f. Dissertação de mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília.

SINGH, P.; MOHANTY, K. K. **Permeability of spatially correlated porous media**. Chemical Engineering Science, v. 55, p. 5393–5403, 2000.

SOUZA, G.M.; ALMEIDA, M.M.; FERNANDES, G.; GOMES, R.C., 2006. **Determinação dos parâmetros de interação mecânica de interfaces de resíduos de mineração com geossintéticos**. In: 2º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos - Geo-Jovem, 2006, Nova Friburgo.

TAVARES M.; AVELINO K.; MEDEIROS P.; CARLOS E; & HARIMA E. (2010) **Aproveitamento do rejeito de pegmatito para indústria cerâmica**. V CONNEPI- Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e inovação. Maceió/AL, Brasil.

VLACH, S. R. F., 2002. **A classe dos tectossilicatos: Guia geral da teoria e exercício**. Revista do Instituto de Geociências – USP.

WAN, K. W., 2008. **Feldspar's fallow future**. Industrial Minerals, London, p. 52-59. Dec. 2008.

# ANEXOS

<b>Anos</b>	<b>Cenário Fragil (t)</b>	<b>Cenário Vigoroso (t)</b>	<b>Cenário Inovador (t)</b>
2008	187.269	189.455	191.276
2009	192.512	197.033	200.840
2010	197.903	204.914	210.882
2011	203.444	213.111	221.426
2012	209.140	221.635	232.498
2013	214.996	230.501	244.123
2014	221.016	239.721	256.329
2015	227.205	250.508	272.990
2016	232.885	261.781	290.734
2017	238.707	273.561	309.632
2018	244.674	285.871	329.758
2019	250.791	298.736	351.192
2020	255.807	313.672	379.288
2021	260.923	329.356	409.631
2022	266.142	345.824	442.401
2023	271.465	363.115	477.794
2024	276.894	381.271	516.017
2025	282.432	400.334	557.298
2026	288.080	420.351	601.882
2027	293.842	441.368	650.033
2028	299.719	463.437	702.035
2029	305.713	486.609	758.198
2030	311.827	510.939	818.854

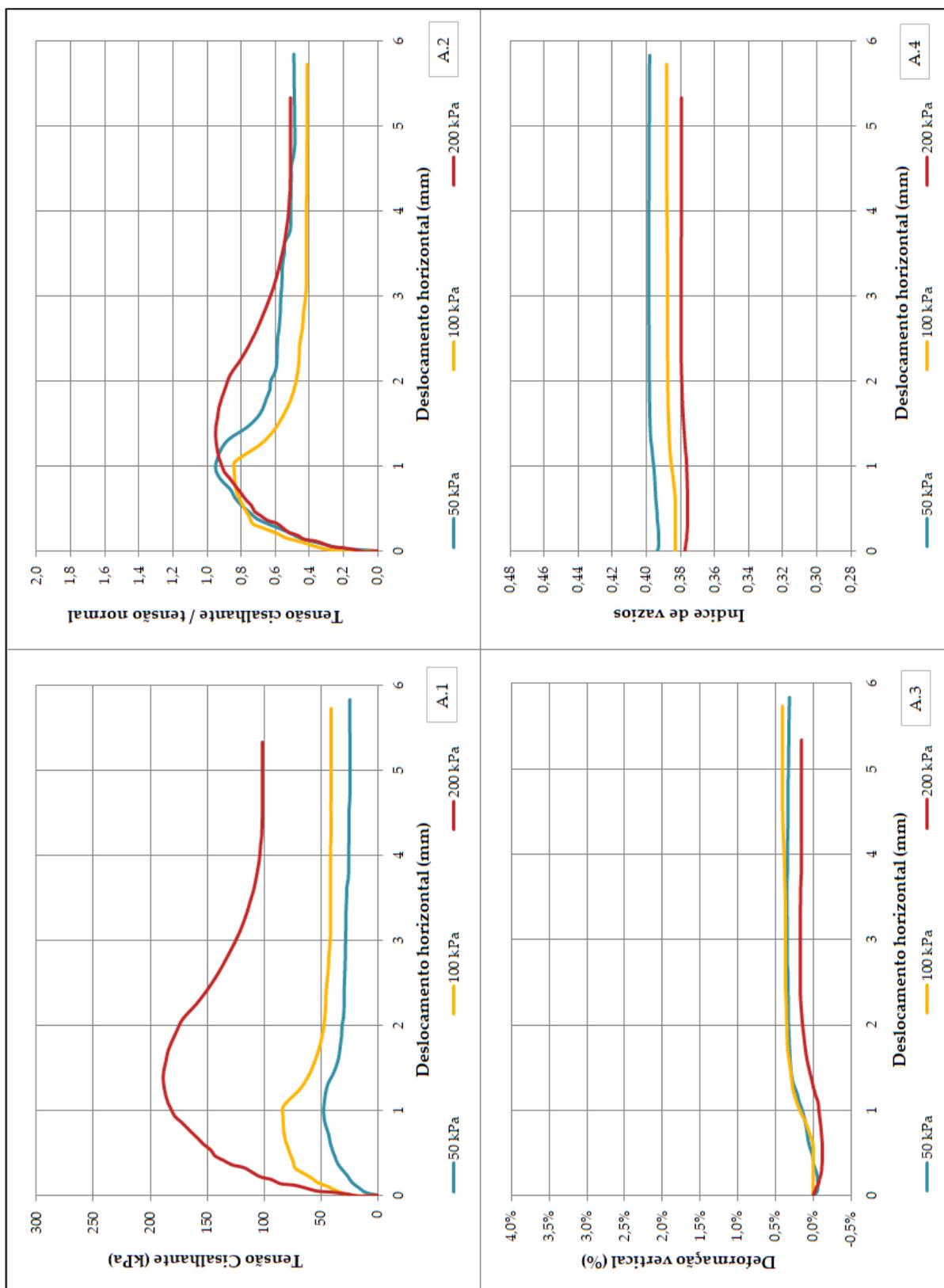
**Anexo 01 - Projeção da produção de feldspato no Brasil - 2008 a 2030. Fonte: Coelho (2009)**

<b>Anos</b>	<b>Cenário Fragil (t)</b>	<b>Cenário Vigoroso (t)</b>	<b>Cenário Inovador (t)</b>
2008	160.682	160.682	160.682
2009	169.520	169.520	169.520
2010	174.266	176.300	177.995
2011	179.146	183.352	186.895
2012	184.162	190.686	196.240
2013	189.318	198.314	206.052
2014	194.619	206.246	216.355
2015	200.068	215.527	230.418
2016	205.070	225.226	245.395
2017	210.197	235.361	261.345
2018	215.452	245.953	278.333
2019	220.838	257.021	296.425
2020	225.255	269.872	320.139
2021	229.760	283.365	345.750
2022	234.355	297.533	373.410
2023	239.042	312.410	403.282
2024	243.823	328.031	435.545
2025	248.699	344.432	470.389
2026	253.673	361.654	508.020
2027	258.747	379.736	548.661
2028	263.922	398.723	592.554
2029	269.200	418.659	639.958
2030	274.584	439.592	691.155

**Anexo 02 - Projeção do consumo de feldspato no Brasil - 2010 a 2030. Fonte:  
Coelho (2009)**

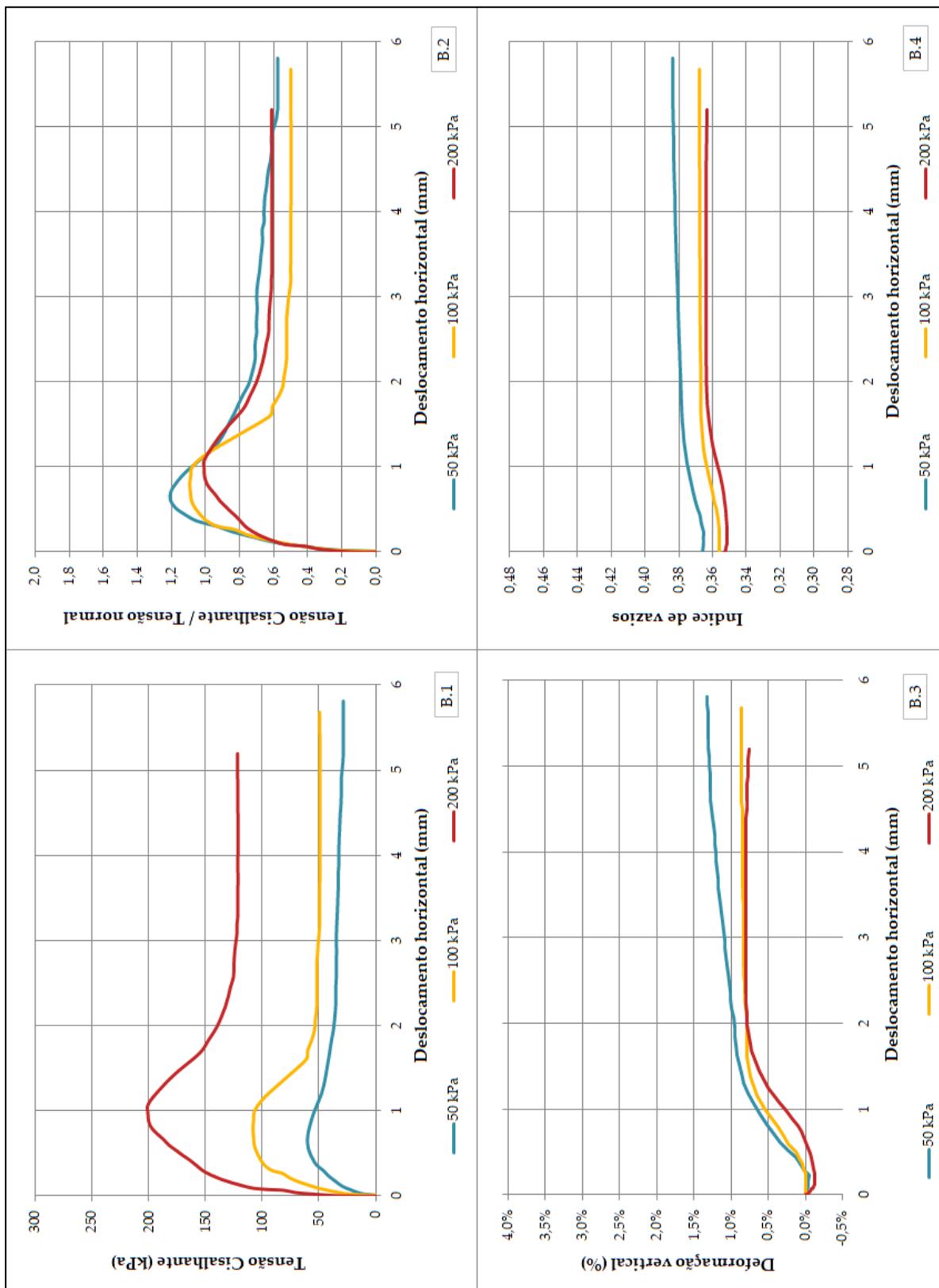
<b>Parelhas (a)</b>		<b>Currais Novos (b)</b>	
<b>Óxidos</b>	<b>%</b>	<b>Óxidos</b>	<b>%</b>
SiO <sub>2</sub>	60,12	SiO <sub>2</sub>	66,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,36	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,34	K <sub>2</sub> O	8,76
K <sub>2</sub> O	2,79	Na <sub>2</sub> O	2,66
CaO	1,69	TiO <sub>2</sub>	2,62
TiO <sub>2</sub>	0,5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9
SO <sub>3</sub>	0,22	MgO	0,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	TiO <sub>2</sub>	0,27
MnO	0,09	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14
ZrO <sub>2</sub>	0,02	SO <sub>3</sub>	0,09
SrO	0,01	MnO	0,08
Rb <sub>2</sub> O	0,01	Rb <sub>2</sub> O	0,07
-	-	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
-	-	CuO	0,03
-	-	YrO <sub>3</sub>	0,03
-	-	ZrO <sub>2</sub>	0,03
-	-	ZnO <sub>2</sub>	0,02
-	-	SrO	0,01
P.F.	0,08	P.F.	N.D

**Anexo 03 - Resultados da análise química do rejeito da lavra de feldspato oriundo de rochas pegmatíticas no RN. Fonte: (a) Ingunza *et al.* (2014); (b) Tavares *et al.* (2010).**



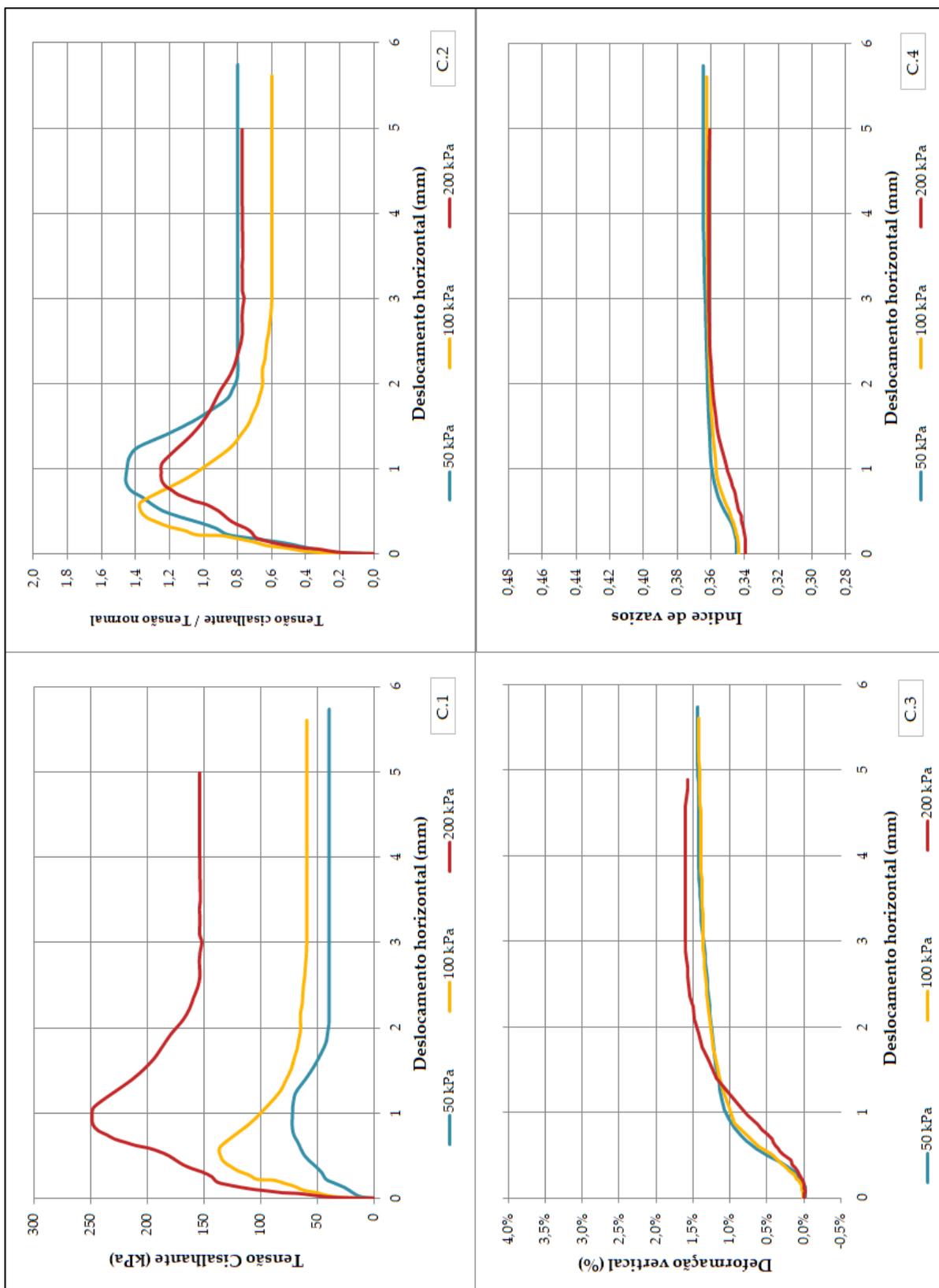
**Anexo 04 A – Gráficos das amostras compactadas na energia normal e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição inundada (A.1)  $\tau \times$**

**$\delta_h$  (A.2)  $\tau/\sigma_v \times \delta_h$  (A.3)  $\frac{\delta_v}{h_0} \times \delta_h$  (A.4) e  $\delta_h$ . Fonte: Autor.**

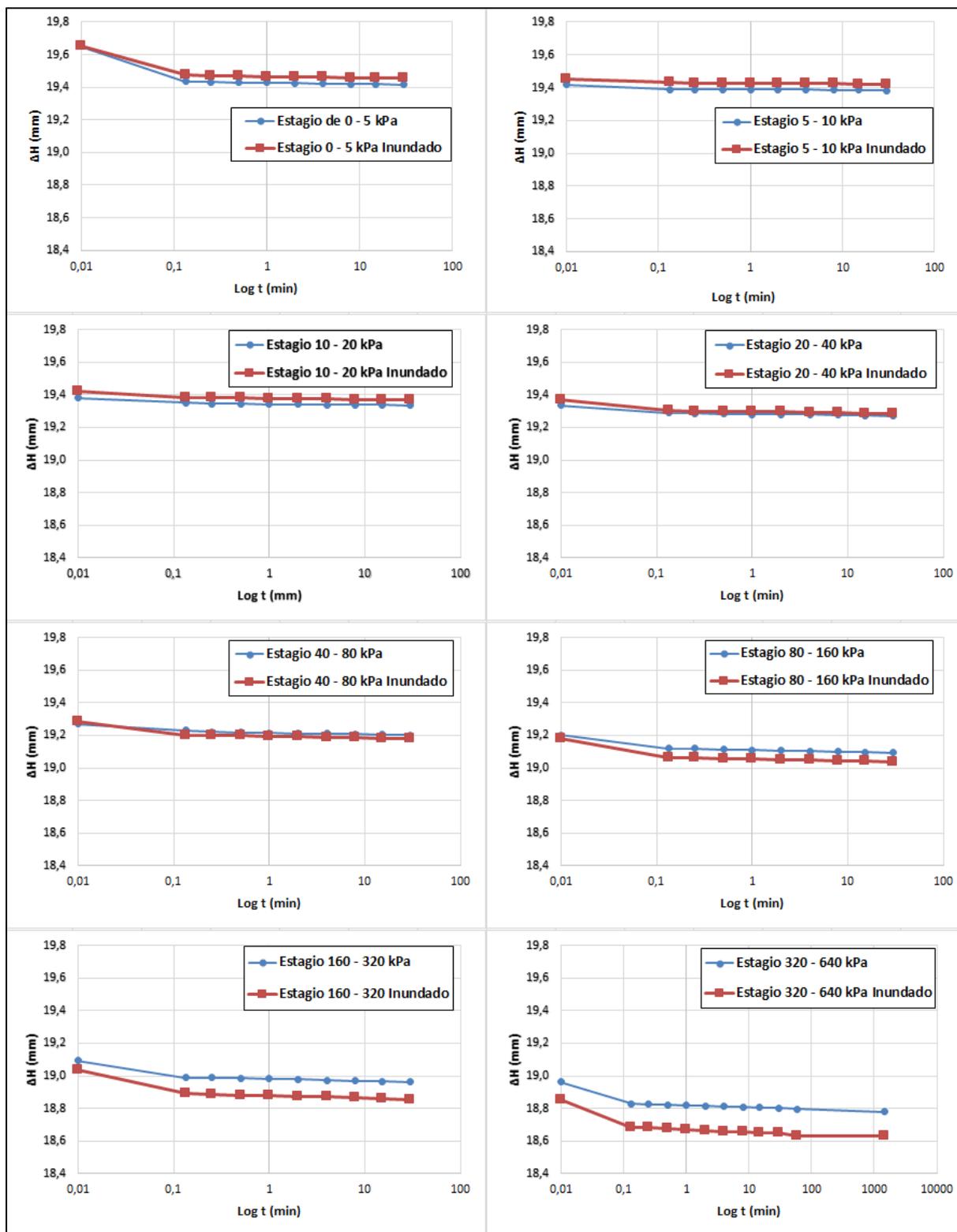


**Anexo 04 B – Gráficos das amostras compactadas na energia intermediária e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição inundada (B.1)  $\tau \times$**

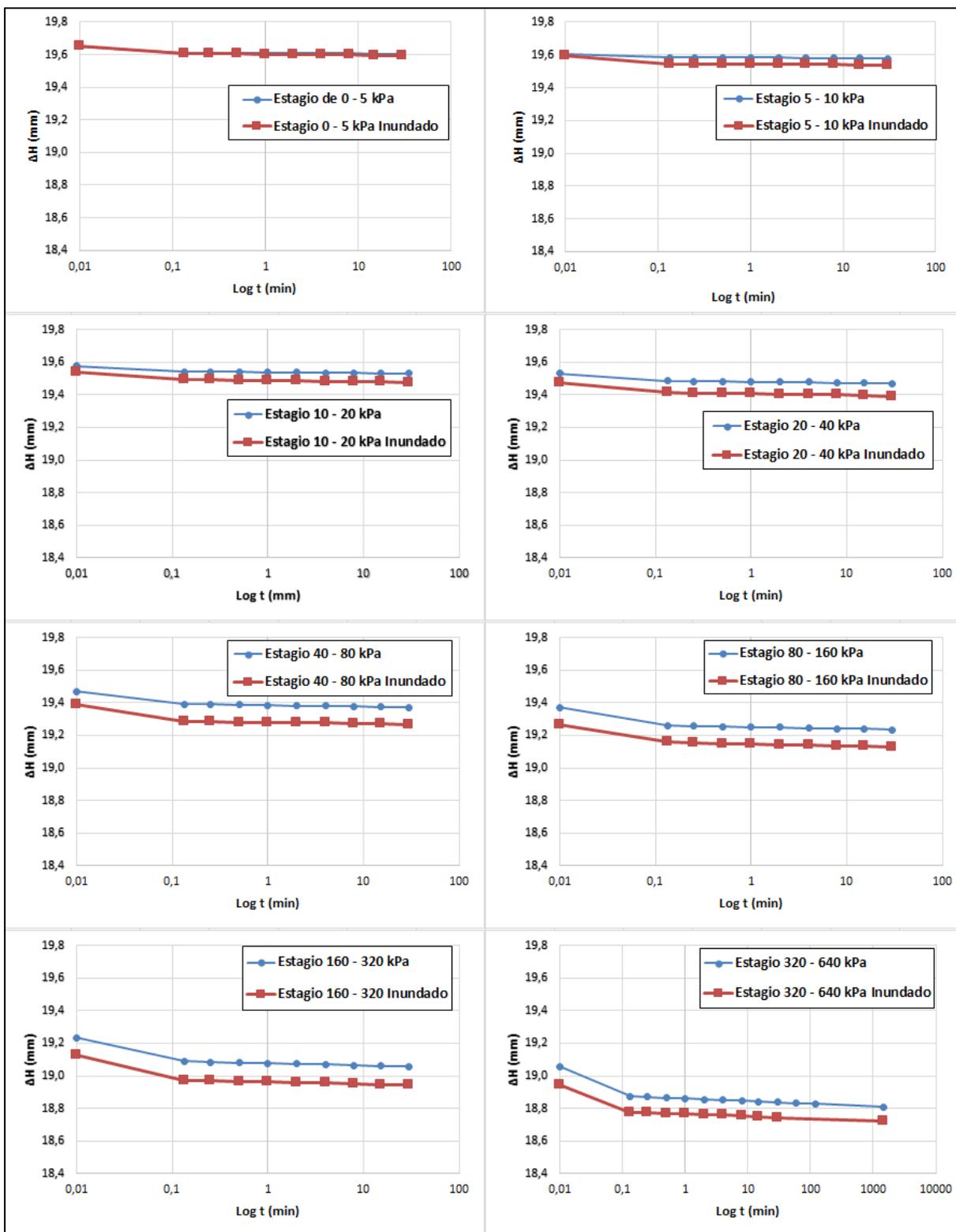
**$\delta_h$  (B.2)  $\tau/\sigma_v \times \delta_h$  (B.3)  $\frac{\delta_v}{h_0} \times \delta_h$  (B.4) e  $\delta_h$ . Fonte: Autor.**



**Anexo 04 C – Gráficos das amostras compactadas na energia modificada e submetidas ao ensaio de cisalhamento direto em condição inundada (C.1)  $\tau \times \delta_h$  (C.2)  $\tau/\sigma_v \times \delta_h$  (C.3)  $\frac{\delta_v}{h_0} \times \delta_h$  (A.4) e  $e \times \delta_h$ . Fonte: Autor.**

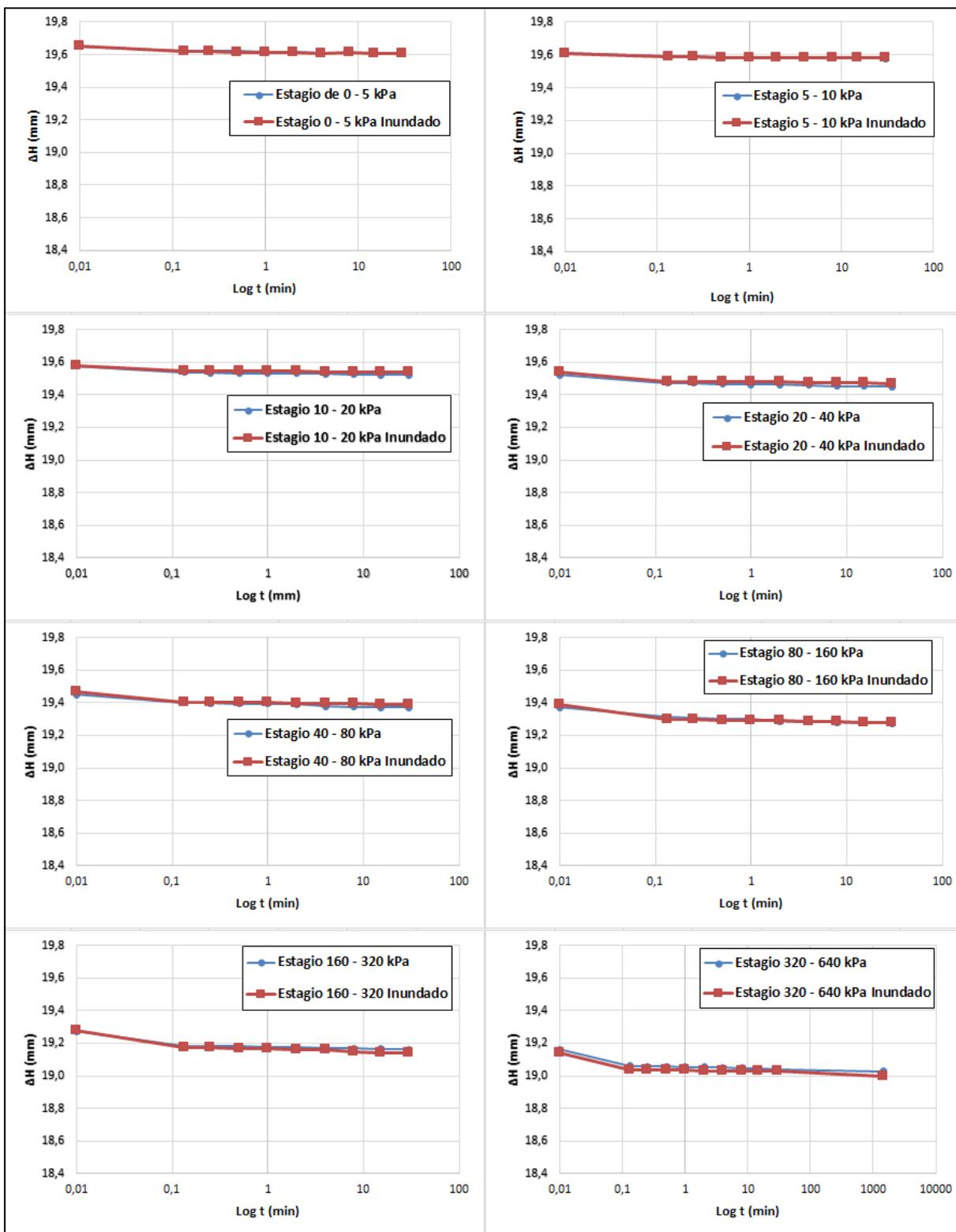


**Anexo 05 A – Gráficos  $\Delta H \times \log t$  dos estágios de carregamento no ensaio de compressão edométrica para amostras compactadas na energia normal. Fonte: Autor.**



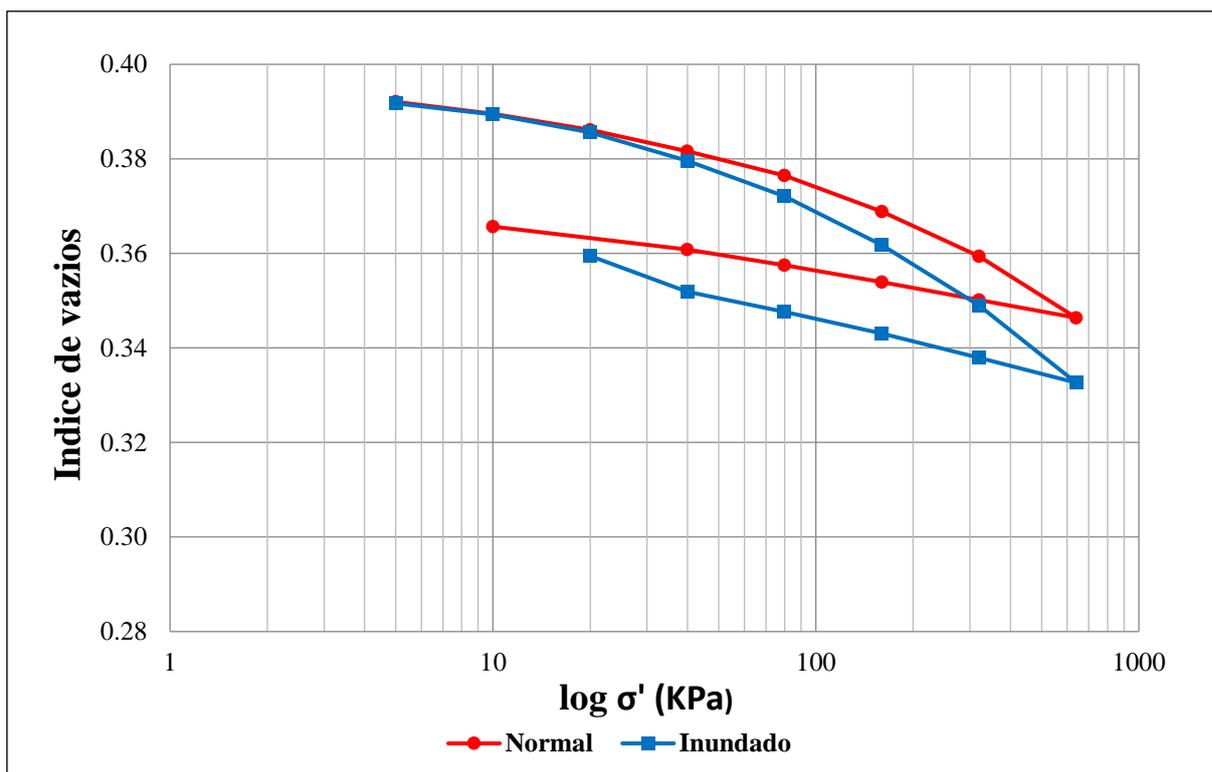
**Anexo 05 B – Gráficos  $\Delta H \times \log t$  dos estágios de carregamento no ensaio de compressão edométrica para amostras compactadas na energia intermediária.**

**Fonte: Autor.**

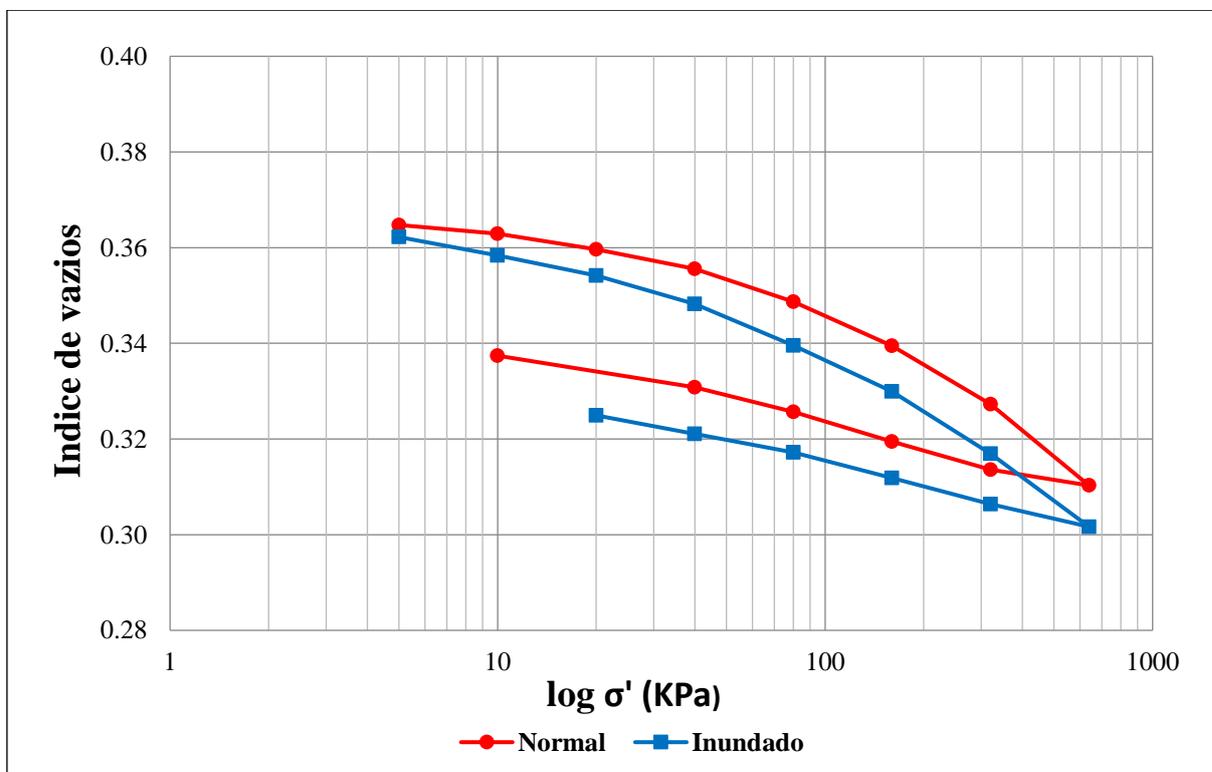


**Anexo 05 C – Gráficos  $\Delta H \times \log t$  dos estágios de carregamento no ensaio de compressão edométrica para amostras compactadas na energia Modificada.**

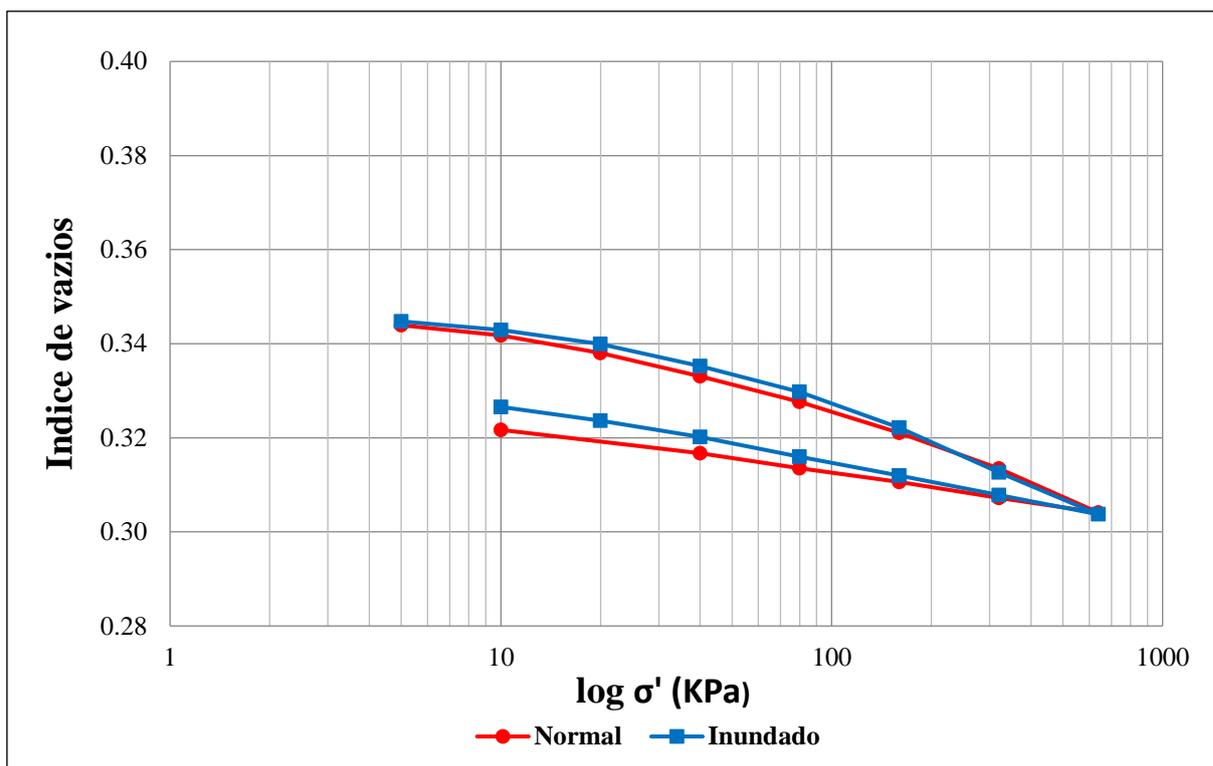
**Fonte: Autor.**



**Anexo 06 A – Gráficos  $e x \log \sigma'$  das amostras compactadas na energia normal e submetidas ao ensaio de compressão edométrica Fonte: Autor.**



**Anexo 06 B – Gráficos  $e x \log \sigma'$  das amostras compactadas na energia intermediária e submetidas ao ensaio de compressão edométrica Fonte: Autor.**



**Anexo 06 C – Gráficos  $e$  x  $\log \sigma'$  das amostras compactadas na energia modificada e submetidas ao ensaio de compressão edométrica Fonte: Autor.**