

RESISTÊNCIA, FORMA DE PARTÍCULAS POR AIMS2 E CONDUTIVIDADE
HIDRÁULICA DE ROCHAS VISANDO LASTRO APÓS ATAQUE POR SULFATO DE
SÓDIO

RODOLPHO NASCIMENTO DE SOUZA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE– UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO – 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S729

Souza, Rodolpho Nascimento de.

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DA FORMA DE PARTÍCULAS POR AIMS2 E DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE LASTRO APÓS ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO / Rodolpho Nascimento de Souza. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.

125 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2023.

Orientador: Gustavo de Castro Xavier.

1. Condutividade Hidráulica. 2. Lastro Ferroviário. 3. Sulfato de Sódio. 4. Rochas. 5. EF-118. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

ESTUDO DA RESISTÊNCIA DA FORMA DE PARTÍCULAS POR AIMS2 E DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE LASTRO APÓS ATAQUE POR SULFATO DE
SÓDIO

RODOLPHO NASCIMENTO DE SOUZA

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro (UENF), como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Gustavo de Castro Xavier

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE– UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
SETEMBRO – 2023.

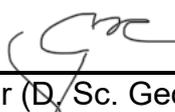
ESTUDO DA RESISTÊNCIA DA FORMA DE PARTÍCULAS POR AIMS2 E DA
CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE LASTRO APÓS ATAQUE POR SULFATO DE
SÓDIO

RODOLPHO NASCIMENTO DE SOUZA

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro (UENF), como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 01 de setembro de 2023.

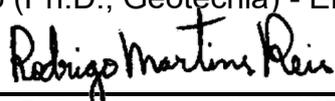
Comissão Examinadora:



Prof. Gustavo, de Castro Xavier (D.Sc. Geotecnia) – LECIV/ UENF (Orientador)



Prof. Rogério Pinto Ribeiro (Ph.D., Geotecnia) - EESC/USP (Membro externo)



Prof. Rodrigo Martins Reis (D.Sc. Geotecnia) – UENF (Membro interno)



Profa. Maria da Glória Alves (D.Sc. Geologia) – LECIV/UENF (Membro interno)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de finalizar mais uma etapa da minha vida acadêmica, me fortalecendo e capacitando a alcançar meus sonhos.

Aos meus pais Joelma Nascimento e Cosme Adriano pela força e todo incentivo que me ajudaram a finalizar essa pesquisa e sendo a base nos momentos mais desafiadores.

Aos amigos que nessa jornada foram apoio e sempre estiveram me incentivando e torcendo pelo meu sucesso e desenvolvimento. Aos amigos da UENF que de alguma forma colaboraram com este trabalho ao longo desses dois anos e em especial quero agradecer,

A Jheyce que ajudou de forma incansável no desenvolvimento desta pesquisa, apoiando e sendo meu ponto de apoio nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Ao Wanderson Viana por todo apoio viabilizando o sucesso dessa pesquisa e a finalização de mais uma importante etapa da minha vida.

Ao amigo e professor André, que muito contribuiu não somente para essa pesquisa, mas também para meu aprendizado.

Ao professor Gustavo de Castro Xavier que acreditou no meu potencial, orientação, amizade, dedicação que viabilizou meu aprendizado de forma a me evoluir como aluno e pesquisador e tornando possível a realização deste trabalho.

Agradeço de forma especial a professora Laura Motta e toda sua equipe da Geotecnia da Coppe/UFRJ pela disponibilidade e auxílio no uso do equipamento AIMS II.

A UENF pelo apoio financeiro durante toda pesquisa.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I- INTRODUÇÃO.....	18
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	18
1.2. OBJETIVO.....	19
1.3. JUSTIFICATIVA	20
1.4. ESCOPO DO TRABALHO	21
CAPÍTULO II- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	22
2.1. MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA.....	24
2.2. ESTRADA DE FERRO 118 - EF118.....	25
2.3. SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA.....	26
2.4. ROCHA BRITADA	27
2.5. INFLUENCIA DA LITOLOGIA DO AGREGADO NO LASTRO FERROVIÁRIO .	28
2.5.1. INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DO AGREGADO NO LASTRO FERROVIÁRIO.....	28
2.5.2. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS, SUA DESCRIÇÃO E INFLUÊNCIA. .	29
2.6. PROPRIEDADES E ESPECIFICAÇÕES DE AGREGADOS PARA LASTRO FERROVIÁRIO.....	30
2.7. ANÁLISE PETROGRAFICA.....	31
2.8. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO.....	33
2.9. GRANULOMETRIA EM AGREGADOS PARA LASTRO	35
2.10. PROPRIEDADES MECÂNICAS	36

2.11. MICRO DEVAL TEST (MD)	37
2.12. ABRASÃO LOS ANGELES	38
2.13. POINT LOAD TEST (PL)	39
2.14. PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS DAS PARTÍCULAS- AIMSII.....	40
2.15. INCRUSTAÇÃO DO LASTRO E A PERMEABILIDADE	42
2.16. ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO	44
CAPITULO III – METODOLOGIA	46
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	46
3.2. ESTUDO DE CASO.....	47
3.3. INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS DA REGIÃO	48
3.4. MATERIAIS E AMOSTRAGENS.....	50
3.5. CLIMA DA REGIÃO.....	51
3.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	52
3.7. PETROGRAFIA DE AGREGADOS	53
3.8. ÍNDICES FÍSICOS	54
3.9. POROSIMETRIA.....	55
3.10. GRANULOMETRIA	56
3.11. ENSAIOS MECÂNICOS DE AGREGADOS PARA LASTRO	58
3.12. MICRO DEVAL TEST	58
3.13. ABRASÃO LOS ANGELES.....	60
3.14. POINT LOAD TEST.....	61
3.15. AIMS II.....	64
3.16. PERMEABILIDADE	66
3.17. RESISTÊNCIA A INTEMPERES (RI).....	68
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS PARA LASTRO	70

4.2. PETROGRAFIA.....	70
4.3. ÍNDICES FÍSICOS	78
4.4. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO.....	82
4.5. GRANULOMETRIA	87
4.6. MICRO DEVAL TEST	88
4.7. LOS ANGELES	91
4.8. POINT LOAD	94
4.9. AIMS II	99
4.10. PERMEABILIDADE	105
4.11. RESISTENCIA A INTEMPÉRES (RI).....	109
4.12. CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS.....	111
CAPÍTULO V- CONCLUSÕES.....	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Análise Bibliométrica	23
Figura 2 - Composição Percentual das Cargas - 2020. Fonte: ANTT.gov.br. 2000...	24
Figura 3 –traçado da ferrovia F118. Fonte: Moraes, 2015.	25
Figura 4-via férrea. Fonte: ROSA, 2019	26
Figura 5-esquema das tensões nos grãos. Fonte: (PIRES, 2017).....	37
Figura 6- variação da condutividade hidráulica com a taxa de contaminação do lastro	43
Figura 7-Fluxograma do processo metodológico.	47
Figura 8- característica geológica estado do rio de janeiro	49
Figura 9- jazidas de extração das amostras. (a) Rocha 01, (b) Rocha 02 e (c) Rocha 03.....	50
Figura 10-Localização das rochas utilizadas neste estudo.	51
Figura 11-Equipamento utilizado na análise petrográfica.....	54
Figura 12-Porosímetro Autopore IV 9500 do Laboratório de Engenharia Civil da UENF.	56
Figura 13- ensaio de micro deval	59
Figura 14-abrasão Los Angeles - CETEM – ES	61
Figura 15-Point Load Test.....	62
Figura 16- Relação entre I_s50 e RCU (Al-Harathi, 2001).....	63
Figura 17- (a) momento do posicionamento das partículas na bandeja do equipamento, (b) partículas já posicionadas para análise, (c) tela inicial do software e início da análise.	65
Figura 18-lastro contaminado com permeâmetro.	67
Figura 19- Processo de Ataque Por Sulfato De Sódio	69
Figura 20- Petrografia da ROCHA 01.....	71
Figura 21- Petrografia ROCHA 02	72
Figura 22- Petrografia ROCHA 03	73
Figura 23-: Petrografia da ROCHA 01, após 60 ciclos de ataque por sulfato de sódio.	74
Figura 24-Petrografia da ROCHA 02, após 60 ciclos de ataque por sulfato de sódio.	76

Figura 25-Figura 22-Petrografia da ROCHA 03, após 60 ciclos de ataque por sulfato de sódio.....	77
Figura 26-síntese dos resultados do ensaio de índices físicos.....	79
Figura 27- síntese dos resultados do ensaio de índices físicos após ataque por sulfato de sódio;.....	81
Figura 28-Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio rochas intacta – (a) distribuição de diâmetro dos poros das rochas estudadas; (b) volume dos poros.....	83
Figura 29-Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio após ataque por sulfato de sodio– (a) distribuição de diâmetro dos poros das rochas estudadas; (b) volume dos poros.	85
Figura 30-Distribuição granulométrica do lastro limpo e colmatado com diferentes taxas de colmatação onde (a) ROCHA01, (b) ROCHA 02 e (c) ROCHA 03.....	88
Figura 31-síntese de resultados ensaio de Micro Deval Test (MD).	89
Figura 32-síntese de resultados ensaio de Micro Deval Test (MD).	91
Figura 33-Resumo dos resultados obtidos pelo ensaio de Abrasão Los Angeles comparados a petrografia intacta e ao limite estabelecido pela NBR 5564 (ABNT, 2021).....	92
Figura 34-Resumo dos resultados obtidos pelo ensaio de Abrasão Los Angeles comparados a petrografia e ao limite da NBR 5564 (2021) após ataque por sulfato de sódio.	93
Figura 35-Série estatística de Weibull Rocha intacta	94
Figura 36- Estimativa De Resistencia A Compressão Uniaxial Rocha Intacta.....	95
Figura 37-resultado do teste de carga pontual antes e após ataque por sulfato de sódio	96
Figura 38-Série estatística de Weibull após ataque por sulfato de sódio.....	97
Figura 39- Estimativa De Resistencia A Compressão Uniaxial Após Ataque Por Sulfato De Sódio.....	99
Figura 40-Gráficos das propriedades de forma incluindo marcações de limites de angularidade.....	101
Figura 41-Gráficos das propriedades de forma incluindo marcações de limites após ataque por sulfato de sódio - (a) esfericidade; (b) angularidade e (c) textura	104
Figura 42- variação da condutividade hidráulica com a taxa de colmatação do lastro ROCHA01, ROCHA 02 e ROCHA 03.	106

Figura 43 - variação da condutividade hidráulica com a taxa de colmatação do lastro ataque por sulfato de sódio ROCHA 01, ROCHA 02 e ROCHA 03.	108
Figura 44- fragmentação pós 60 ciclos - ROCHA 03.....	111
Figura 45-Correlação entre Los Angeles e Micro-Deval.	112
Figura 46-Correlação entre Point load e Micro-Deval.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Número de artigos encontrados na busca sistemática no ScienceDirect, Web of science e Scopus.	22
Tabela 2-Resumo de propriedades petrográficas que podem influenciar no lastro (WATTERS et al., 1987).	32
Tabela 3-Valores limites das propriedades obtidas por AIMSII. Fonte: Ibiapina <i>et al.</i> (2018).	41
Tabela 4- nível de incrustação do lastro de acordo com o índice de incrustação. Fonte: Seling e waters (1994)	42
Tabela 5-resultado de permeabilidade e de vazão de descarga para três níveis de incrustação de lastro	44
Tabela 6-Ensaio realizados.....	53
Tabela 7- Ensaio De Caracterização Mecânica	58
Tabela 8-procedimento de ensaio micro deval.....	59
Tabela 9-Procedimento para o ensaio de Abrasão de Los Angeles.....	60
Tabela 10-quantidade de partículas por fração Fonte: DNIT 432 – ME (2020) adaptado	64
Tabela 11- Características do teste de permeabilidade.....	67
Tabela 12- Síntese da análises petrográficas ROCHA01, ROCHA 02 E ROCHA 03.	73
Tabela 13- Síntese da análises petrograficas ROCHA 01, ROCHA02 E ROCHA03 após ataque.....	78
Tabela 14-valores médios de condutividade hidráulica para cada taxa de incrustação (0 a 40%) do lastro das Rochas ROCHA 01, ROCHA 03 e ROCHA 02 das rochas intactas	105
Tabela 15-valores de condutividade hidráulica para cada taxa de incrustação do lastro após ataque por sulfato de sódio das amostras Rocha ROCHA 01, ROCHA 03 e ROCHA 02.....	107
Tabela 16-Síntese dos resultados do ensaio de resistência a intempérie após ataque por sulfato de sódio.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<i>EF</i>	Estrada de ferro
<i>ANTF</i>	Associação Brasileira dos Transportes Ferroviários
<i>TU</i>	Tonelada útil
<i>ANTT</i>	Agência Nacional de Transportes Terrestres
<i>TKU</i>	Tonelada quilômetro útil
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>RFFSA</i>	Rede Ferroviária Federal
<i>DNIT</i>	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
<i>AREMA</i>	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
<i>PDI</i>	Processamento digital de imagens
<i>AIMS II</i>	Aggregate Imaging Measurement System
<i>cm</i>	Centímetro
<i>Mpa</i>	Megapascal
μm	Micrometro
<i>RJ</i>	Rio de Janeiro
<i>DNER</i>	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>COMPERJ</i>	Complexo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro
<i>ES</i>	Espírito Santo
<i>Kg</i>	Quilograma
<i>a</i>	Comprimento
<i>b</i>	Largura
<i>c</i>	Espessura
<i>cm</i>	Centímetro
ρa	Massa específica aparente
<i>Msec</i>	Massa da amostra seca

<i>Msat</i>	Massa da amostra saturada
<i>Msub</i>	Massa da amostra submersa
<i>η_a</i>	Porosidade aparente
<i>α_a</i>	Absorção de água
<i>CETEM</i>	Centro de Tecnologia Mineral
<i>mm</i>	Milímetro
<i>mi</i>	Massa inicial
<i>mf</i>	Massa final
<i>m</i>	Massa da amostra seca
<i>m1</i>	Massa do material retido na peneira 1,7mm
<i>Is</i>	Índice de carga pontual
<i>P</i>	Carga de falha
<i>De</i>	Diâmetro equivalente
<i>W</i>	menor largura da amostra
<i>D</i>	Distância entre os pontos de carga
<i>FC</i>	Fator de correção
<i>RCU</i>	Resistência a compressão uniaxial
<i>h</i>	Hora
<i>A</i>	Massa seca antes do ensaio
<i>B</i>	Massa seca após o ensaio
<i>Ri</i>	Resistência a intempérie
<i>Mi</i>	Massa inicial dos corpos de prova
<i>Mf</i>	Massa final dos corpos de prova

RESUMO

A partir da crescente necessidade de escoamento da produção em todo território nacional tem crescido a necessidade de expansão do modal ferroviário em todo Brasil e, conseqüentemente, a necessidade do avanço nas pesquisas voltadas para lastro para garantir a viabilidade de implantação e maior durabilidade. Com grande importância na estrutura da via, o lastro ferroviário tem como principal função o suporte e distribuição de cargas a partir da passagem dos veículos. Portanto a pesquisa está voltada a um estudo experimental apresentando as características de condutividade hidráulica e o comportamento de agregados verificando a durabilidade visando a utilização do lastro da EF-118. As amostras de rocha foram submetidas a ensaios físicos, mecânicos, ataque por sulfato de sódio e de permeabilidade. Foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas antes e após ataque por sulfato de sódio a partir da caracterização petrográfica de cada rocha, correlacionando os resultados da rocha intacta e após ataque em laboratório para a verificação da durabilidade do material. Justifica-se o ataque por sulfato de sódio pela proximidade de alguns trechos do traçado da EF -118 ao litoral e lençol freático próximo a superfície, o que pode trazer alteração ao material empregado no lastro ferroviário e prejuízos à via. A partir da petrografia foi possível classificar cada rocha como dois meta granitos (Rocha 01 e Rocha 02) e um gnaisse (Rocha 03). Assim foi verificado que as amostras com maior composição de minerais suscetíveis a degradação por sulfato de sódio, como a rocha 01 e rocha 03 frente a presença de maiores quantidades de minerais de baixa dureza e maior suscetibilidade ao intemperismo como verificado nas análises petrográficas de cada uma das amostras. Além disso as amostras Rochas 01 e 03 apresentaram maior variação ao desgaste após o ensaio de Micro Deval. A redução da massa causada pela abrasão foi de $8,50 \pm 1,5\%$ da Rocha 03 (intacta) para $11,04 \pm 0,5\%$ após ataque químico. Com o AIMS II, foi possível observar a maior tendência da Rocha 01 a redução da angularidade após o ataque por sulfato de sódio enquanto nas demais amostras, mantiveram-se suas características. O desenvolvimento do ensaio de granulometria e de condutividade hidráulica foi realizado levando em consideração as taxas de incrustação de 0%, 10%,

20% e 40% de pó de rocha. Desta forma foi possível analisar as diferenças na permeabilidade da camada antes e após ao ataque por sulfato de sódio, verificando a redução da condutividade hidráulica a partir do aumento da taxa de incrustação para as rochas intactas e aumento da permeabilidade do material. A rocha 02 (gnaisse) a partir das correlações se mostra como material mais indicado, mostrou diferença significativa em manter suas características mineralógicas praticamente inalteradas após 60 ciclos de sulfato de sódio que, correlacionado à taxa de condutividade hidráulica satisfatória.

PALAVRAS-CHAVE: Condutividade Hidráulica, Lastro Ferroviário, Sulfato de Sódio, Rochas, EF-118.

ABSTRACT

From the growing need to transport production throughout the national territory, the need to expand the railway modal throughout Brazil has grown, and consequently the need to advance in research focused on ballast to ensure the feasibility of implementation and greater durability. With great importance in the track structure, rail ballast has as its main function the support and distribution of loads from the passage of vehicles. Therefore, the research is focused on an experimental study presenting the characteristics of hydraulic conductivity and the behavior of aggregates, verifying the durability aiming at the use of the EF-118 ballast. The rock samples were submitted to physical, mechanical, sodium sulfate attack and permeability tests. The physical and mechanical properties were analyzed before and after attack by sodium sulfate from the petrographic characterization of each rock, correlating the results of the intact rock and after attack in the laboratory to verify the durability of the material. The attack by sodium sulfate is justified by the proximity of some stretches of the EF -118 route to the coast and the presence of the sulfated water table close to the ballast layer, which can bring degradation to the material used and damage to the track. From the petrography it was possible to classify each rock as two meta granite (Rock 01 and Rock 02) and gneiss (Rock 02). Thus, it was verified that the samples with a higher composition of minerals susceptible to weathering, such as rock 01 and rock 03, tend to have greater degradation after attack by sodium sulfate, since the presence of minerals susceptible to weathering is verified in their petrographs. In addition, Rochas 01 and 03 samples showed greater wear variation after the micro deval test. The mass reduction caused by abrasion was from $8.50 \pm 1.5\%$ of Rock 03 (intact) to $11.04 \pm 0.5\%$ after chemical attack. Through AIMS II, it was possible to observe the greater tendency of Rock 01 to reduce angularity after attack by sodium sulfate, while in the other samples its characteristics were maintained. The development of the granulometry and hydraulic conductivity test was carried out taking into account the clogging rates of 0%, 10%, 20% and 40% of rock dust. In this way, it was possible to analyze the differences in the permeability of the layer before and after the attack by sodium sulfate, verifying the reduction in hydraulic conductivity from the increase in the clogging rate for the intact rocks and the increase in the permeability of the material after attack by sodium sulfate. sodium. Rock 02 (gneisses) from the correlations shows itself as the most suitable material even with greater mass loss among the samples, it showed a

significant difference in the variation of the average percentage of wear, in addition to maintaining its mineralogical characteristics practically unchanged after 60 cycles of sodium sulfate that correlated with the satisfactory hydraulic conductivity rate indicate that Gn2 is the material indicated for the use of rail ballast for the EF-118.

KEYWORDS: Hydraulic Conductivity, Railway Ballast, Sodium Sulfate, Rocks, EF-118.

CAPÍTULO I- INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o aumento das demandas de escoamento da produção de material de alta densidade e o crescimento do agronegócio em todo território nacional, a previsão de crescimento da malha ferroviária brasileira é animadora resultando em grandes investimentos para os próximos anos nesse tipo de modal, que é considerado um dos mais eficientes e com grande capacidade logística.

Elementos como a superestrutura das vias e projetos de pavimentação ferroviária é cada vez mais importante no avanço das análises das transferências de tensões admissíveis do solo a fim de se nortear os cálculos para se avaliar a resistência do pavimento, destacando a singularidade de cada camada e suas características geomecânicas individuais (GOMES, 2015).

A via férrea pode ser dividida em dois grandes grupos diferentes, a superestrutura da via que se refere a parte superior da via que são os trilhos e os dormentes e a infraestrutura, que são os responsáveis por dissipar as tensões dos trilhos no solo natural, lastro, sub lastro e subleito. A utilização de material granular para a infraestrutura de via está cada vez mais difundida, isso pela fácil disponibilidade de insumo, por características duráveis e sua grande capacidade de permeabilidade, entretanto, é necessária uma faixa granulométrica a fim de se obter resiliência e absorção de energia, reduzido assim as tensões em camadas subjacentes (FERNAANDES, 2014).

Qualquer material exposto natureza está sujeita a ao envelhecimento e ao desgaste, isso pelas mudanças do clima e intempéries, portanto, a análise de parâmetros estruturais dos minerais a serem empregados se tornam relevantes para a presente pesquisa, frente a possibilidade de envelhecimento da sua forma e características físicas, o que pode trazer impactos econômicos e ao tempo de manutenção e de troca de material.

Portanto com a busca por bom desempenho dos agregados utilizados em lastro e eficiência de percolação hidráulica se torna cada vez mais necessário a investigação sistemática relacionado ao comportamento das partículas e capacidade drenante do material a ser empregado e trazer características acerca da litologia de rochas antes e depois do envelhecimento acelerado de laboratório por ataque químico usando

sulfato de sódio, simulando a ascensão do lençol freático e verificando, por meio de Processamento Digital de Imagem (PDI), a variação da forma das partículas de rochas para lastro no ensaio no Micro Deval por observar que as partículas mudam de forma, o que simula condições operacionais da via.

Desta forma o presente estudo dedica-se a analisar a redução da permeabilidade da camada de lastro, ocasionada pela presença de pó de rocha, resultado da fragmentação do lastro pela passagem da locomotiva e vagões, por meio de testes de laboratório, desenvolvendo relações entre as propriedades petrográficas das partículas de rocha e teste de permeâmetro de carga constante.

A petrografia e a capacidade de condutividade hidráulica antes e após o ensaio de ataque por sulfato de sódio importante pela a proximidade do traçado da estrada de ferro EF 118 com a região litorânea visto que a área de estudo é uma planície costeira plana baixa, ou seja, recarga através de fluxo 1-D na vertical para baixo pode ser perfeitamente aplicada (CORREIA *et. al.* 2021).

Desta forma verifica-se que o lençol freático da região em pontos específicos próximo ao traçado da estrada EF-118 se encontra bem próximo a superfície o que pode oferecer alterações as rochas empregadas no lastro ferroviário. A região é abastecida pelo aquífero livre e raso, níveis estáticos, por sua vez, apresentam variação entre 1,10 e 12,88 m, com média de 6,05 m (CORREIA *et. al.* 2021).

Os ensaios serão parâmetros importantes na investigação, demonstrando as principais mudanças e efeitos nas partículas geradas pelo intemperismo em rocha com potencial aplicação para lastro ferroviário da estrada de ferro EF -118.

1.2. OBJETIVO

O principal objetivo da linha de pesquisa pelo qual o presente trabalho está inserido é de se fornecer resultados físicos, mecânicos, de permeabilidade e de durabilidade das rochas regionais a fim de ser utilizado na execução do projeto da estrada de ferro EF-118. Neste contexto, este trabalho de geologia de engenharia está inserido na linha de pesquisa da caracterização geológica-geotécnica. Além de um estudo de caso, verificando resultados referente a permeabilidade frente a diferentes taxas de incrustação do lastro.

Já como objetivos específicos, o presente trabalho tem-se:

Propondo a analisar as propriedades de três matérias pétreas (dois Meta Granito e um Gnaisse) provenientes de pedreiras situadas na região norte do estado do rio de janeiro além da verificação da condutividade hidráulica de cada rocha antes e após ataque por sulfato de sódio indicando dentre os agregados analisados, o mais satisfatório quanto qualidade e durabilidade contribuindo assim para a formação de banco de dados dos materiais pétreos da região.

- Caracterização físico- mecânicas de rochas;
- Proceder ensaio de ataque por sulfato de sódio das três rochas analisadas no presente trabalho;
- Análise e Correlação dos resultados de análise petrográfica, físicos, mecânicos e variação de forma através ferramenta sistema de imagem de agregado (AIMSII) de cada rocha antes e após ataque por sulfato de sódio;
- Verificação da condutividade hidráulica do lastro para diferentes taxas de incrustação antes e após ataque por sulfato de sódio.

1.3. JUSTIFICATIVA

As demandas de transportes têm crescido cada vez mais nos dias atuais, com isso, investimentos em modais eficientes e seguros tem se tornado cada vez mais importantes, desta forma, os estudos na área de ferrovia tem sofrido avanços importantes acerca do lastro ferroviário, que tem grande importância a vida útil da via. Desta maneira tem se difundido cada vez mais a necessidade de trabalhos na área de geologia de engenharia a fim de trazer o máximo de informações possíveis acerca da partícula a ser empregada no lastro.

Como Remédio *et al.* (2018), Delgado (2012), Motta *et. al.* (2019) e Rosa *et. al.* (2019) utilizam ensaios de laboratório para a análise do comportamento do pavimento ferroviário e dos agregados a serem utilizados como lastro ferroviário, e que evidenciam o progressivo desgaste do material de lastro causado por fatores como: incrustação, precariedade da permeabilidade do material e tráfego.

Com o acúmulo de tráfego na via, a camada de lastro ferroviário tende a se degradar devido ao atrito e/ou quebra das partículas, o que resulta na redução das partículas o que resulta na incrustação por finos provenientes do contato entre os grãos, o que reduz a permeabilidade na camada o que pode comprometer o desempenho mecânico do material, por isso estudos sobre a degradação do material tem se mostrado tão importante para se compreender o comportamento mecânico do lastro (PIRES et. al., 2017).

A fragmentação dos agregados empregados no lastro ferroviário devido a degradação do lastro resulta em índices de vazios muito menores ao material inicialmente utilizado. Essa diminuição no índice de vazios do lastro ferroviário resulta na redução da condutividade hidráulica.

Com o intuito de se alongar a vida útil e durabilidade e se diminuir gastos com manutenções corretivas do lastro ferroviário, se faz necessário uma série de ensaios como de granulometria, processamento de imagem, análise mineralógica e ensaios mecânicos para a padronização do material a ser empregado de acordo com a NBR 5564 (2021).

Portanto é de importante relevância pesquisas voltadas para componentes ferroviários no Brasil, visto que o conhecimento científico para o avanço do modal ferroviário ainda conta com poucos trabalhos o que será demonstrado na bibliometria do capítulo 2.

1.4. ESCOPO DO TRABALHO

Esta dissertação é composta por 5 capítulos. O primeiro capítulo apresenta Tema, objetivos de trabalho. No Capítulo 2, é exposta a revisão bibliográfica e a bibliometria usando o Vosviewer, contendo tópicos relacionados ao tema principal discutido nesta pesquisa. Este capítulo apresenta o sistema ferroviário do país, algumas considerações sobre a estrutura da via permanente, principais elementos da via destacando a importância do lastro ferroviário, que é objeto de estudo neste trabalho, além dos ensaios a serem realizados que são apresentados aos quais as análises são recomendadas por norma. O Capítulo 3 traz a Descrição da EF-118 além de apresentar método usado para a obtenção dos resultados. O Capítulo 4 discute os resultados dos testes realizados. Já o capítulo 5 apresenta as conclusões tiradas da

pesquisa. No capítulo 6 é apresentada as referências bibliografia que foram mostradas como citações são destacadas ao final do trabalho.

CAPÍTULO II- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Para o desenvolvimento da pesquisa foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os principais assuntos analisados na pesquisa e algumas das principais bases de dados foram consultados. Uma busca sistemática foi realizada em três fontes de busca bibliográfica *online*, compreendendo as bases de dados *ScienceDirect* (<https://www.sciencedirect.com/>), *Web of Science* (<http://www.webofknowledge.ez81.periodicos.capes.gov.br>), e Scopus (<https://www-scopus.ez81.periodicos.capes.gov.br/>).

Se Tratam de bases de dados confiáveis com acesso controlado por assinaturas que abrangem citações para muitas e diferentes disciplinas acadêmicas que abrange diversas revistas com artigos científicos.

Para as buscas foram utilizadas as palavras chave *rock, sodium sulfate attack, ballast and hydraulic conductivity*, realizada no dia 18 de junho de 2023. As buscas foram realizadas somente nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos no ScienceDirect, Web of Science e Scopus.

Tabela 1-Número de artigos encontrados na busca sistemática no ScienceDirect, Web of science e Scopus.

Palavras-chave	ScienceDirect	Web of Science	Artigos no Scopus
<i>rock and sodium sulfate attack</i>	23	3	4
<i>ballast and hydraulic conductivity</i>	143	18	17

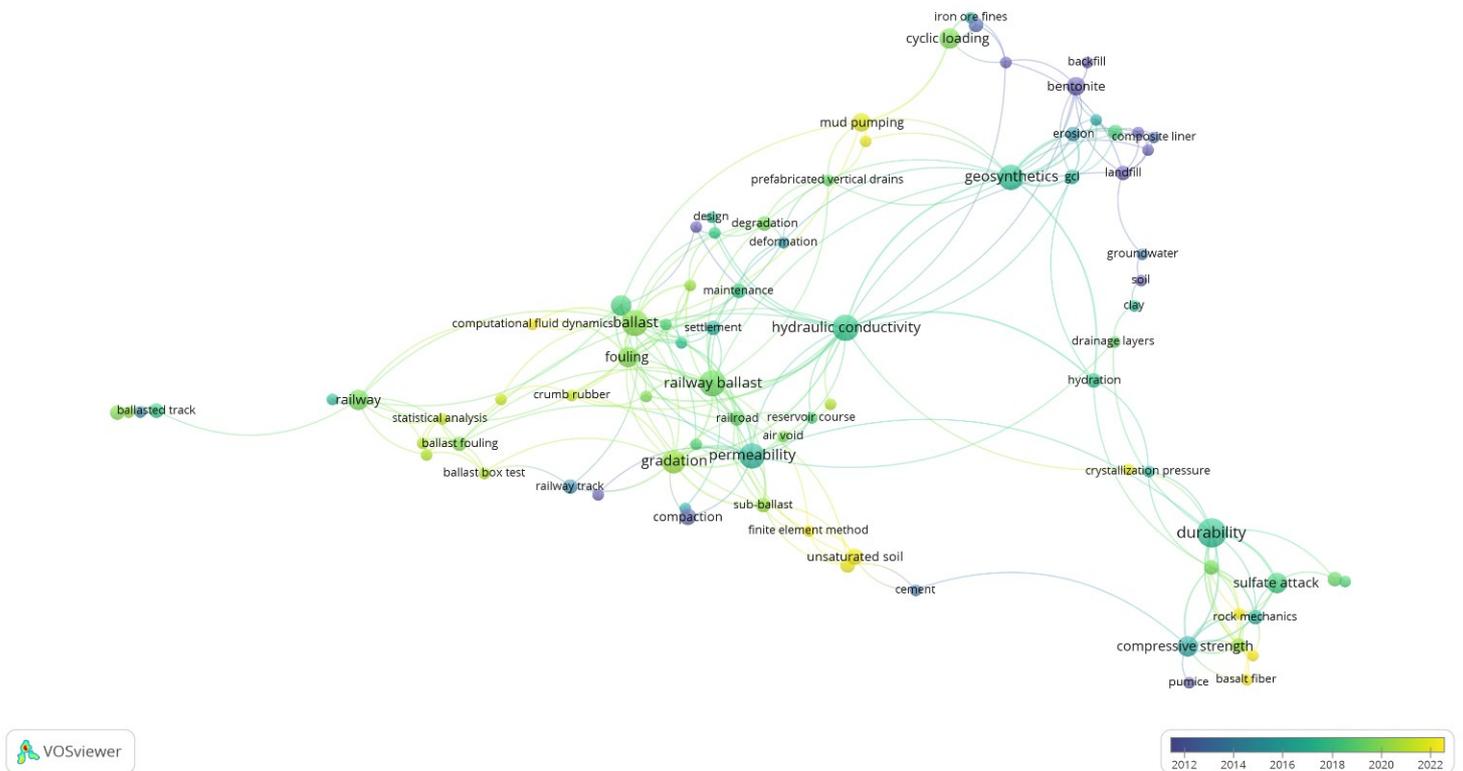


Figura 1- Análise Bibliométrica

Como observado na análise do gráfico de rede do VOSviewer, Figura 1, que a partir das palavras chaves utilizadas na análise, foi possível examinar as correlações dentre as demais palavras evidenciando-se a necessidade de novas pesquisas para o desenvolvimento dos assuntos tratados no presente trabalho.

Destaca-se correlações importantes entre as palavras buscadas e se destaca a correlação com a palavra durabilidade, evidenciando a importante relação com o termo, visto que o ataque por sulfato de sódio e a condutividade hidráulica, são fatores que impactam diretamente na durabilidade e qualidade da via.

Portanto se observa pouca concentração de artigos em degradação e por ataque por sulfato de sódio em lastro ferroviário, entre os 208 pesquisados nas bases de dados (Tabela 01). Isso demonstra que mais pesquisas devem ser realizadas visando estes temas.

2.1. MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA

No período entre os anos de 1982 e 1992, foi um período de redução drástica em investimentos federais o que justifica o fato da malha ferroviária atualmente não resistirem à grande demanda e tráfego crescente proposto para o transporte na atualidade.

A recuperação das vias tem sido discutida, e sendo cada vez mais atrelado a eficiência no transporte. Entre os anos de 1997 e 2005 as ferrovias voltaram a receber investimentos, que totalizou de 9,5 milhões, resultado do aumento de produtividade.

Segundo a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF), o modal só corresponde a 20,86% de todo o transporte de carga do país (ANTT, 2000).

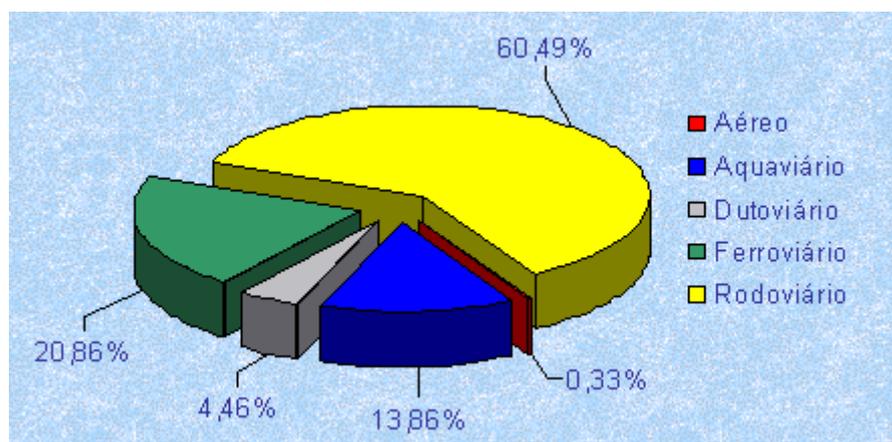


Figura 2 - Composição Percentual das Cargas - 2020. Fonte: ANTT.gov.br. 2000.

Em contrapartida O sistema ferroviário nacional é o maior da América Latina, em termos de carga transportada, atingindo 162,2 bilhões de tku (tonelada quilômetro útil), em 2001. Os dados operacionais e econômico-financeiros encontram-se disponíveis no SIADE - Sistema de Acompanhamento do Desempenho das Concessionárias de Serviços Públicos de Transporte Ferroviário.

Atualmente grande parte da malha ferroviária nacional se encontra sob gestão privada (PAIVA et. al.,2015). A extensão aproximada da malha ferroviária em todo território nacional é de aproximadamente 28.190 km algumas delas com padrões internacionais de qualidade que permite a integração multimodal (DNIT, 2015).

2.2. ESTRADA DE FERRO 118 - EF118

A estrada de ferro EF118 é um grande passo ao avanço econômico e desenvolvimento econômico para o Estado e para as regiões que serão interligadas, com o crescimento e aumento da atividade econômica dos principais portos do Brasil, surgiu a necessidade de implementação de um modal eficiente e com grande capacidade de carga e transportes de grandes volumes de minério.

Trata-se da Implementação de uma nova malha ferroviária para o transporte de material de alta densidade, que ligará Vitória x Rio de Janeiro. Em contrapartida à prorrogação da concessão da Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale, a empresa será a responsável pelo projeto executivo do ramal ferroviário.

Além do escoamento do minério de ferro, a nova malha ferroviária será de grande importância para o escoamento agrícola da região que, segundo estudos encomendados pelo governo do estado, mostrou que o porto do Açu, em São João da Barra, será importante para o escoamento da produção agrícola de uma bacia agrícola denominada pela Embrapa de centro-leste, que pega grandes regiões de Minas Gerais e de Goiás (Moraes, 2015).

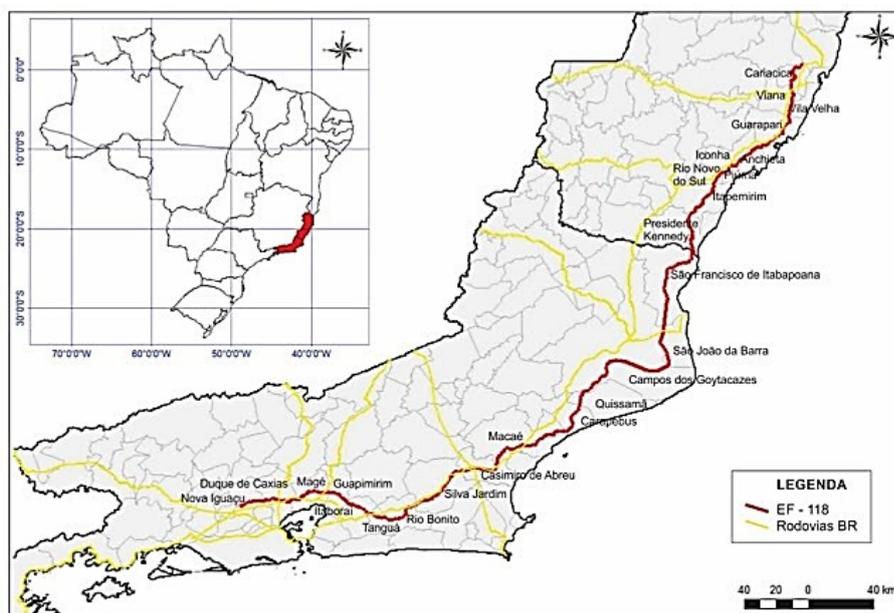


Figura 3 –traçado da ferrovia F118. Fonte: Moraes, 2015.

A estrada de ferro EF118 terá um traçado que totalizará 577,8 km, que contará com uma extensão de 100km no município de Campos, interligará ao total de sua implementação dois estados e vinte e cinco municípios, são eles: Cariacica, Viana, Vila Velha, Guarapari, Anchieta, Piúma, Iconha, Rio Novo do Sul, Cachoeiro de

Itapemirim, Presidente Kennedy, São Francisco de Itabapoana, São João da Barra, Campos dos Goytacazes, Quissamã, Carapebus, Macaé, Casimiro de Abreu, Silva Jardim, Rio Bonito, Tanguá, Itaboraí, Guapimirim, Magé, Duque de Caxias e Nova Iguaçu.

2.3. SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA

A superestrutura de uma via permanente é composta pelos trilhos, elementos de fixação dos trilhos, elementos de direcionamento de veículos, dormentes, lastro e sublastro, classificado como segmento da via permanente responsável por receber os impactos diretos da carga aplicada na via (GOMES, 2015).



Figura 4-via férrea. Fonte: ROSA (2019)

A função dos trilhos é guiar os veículos, transmitem e distribui a carga solicitada pela passagem das locomotivas e vagões aos dormentes e tem a função de distribuir as forças de aceleração e de frenagem, aplicado sobre ele aos demais elementos.

Já os elementos de fixação têm como principal objetivo manter a estrutura da linha fixa aos dormentes para a transmissões dos esforços aos dormentes além de apresentar resistência ao deslocamento longitudinal, e podem ser classificadas como fixações rígidas ou flexíveis.

O dormente tem como principais funções transmissão de cargas provenientes dos trilhos e oferecer estabilidade quanto aos deslocamentos principais que a via está sujeita, suporte ao trilho e amortecer possíveis vibrações durante o contato da passagem do veículo.

Os lastros ferroviários são uma camada não cimentada, apoiada sob base estável de solo, podem ser compostos por diversos tipos de materiais, tais como: terra, areia, cascalho, escória e pedra britada, a escolha dentre esses materiais é feita através da disponibilidade do material na região de implementação da via, entretanto, o material mais utilizado é a pedra britada, devido sua resistência e permeabilidade. (PIRES *et. al.*, 2017) descreve como principais funções:

- Oferecer sustentação aos dormentes de forma sólida e regular, para a distribuição uniforme das tensões a serem aplicadas na via;
- Drenagem satisfatória, evitando assim alagamento e submersão da via;
- Constituir suporte elástico da via;
- Evitar o crescimento de vegetação na via, o que pode oferecer perigo e aumentar os gastos com manutenção e limpeza;

2.4. ROCHA BRITADA

Por suas excelentes características favoráveis a utilização em vias permanentes a rocha britada é muito utilizada para lastro de ferrovias. Deve apresentar forma irregular, porém não lamelar, e alta angularidade, além de alta resistência a abrasão.

De acordo com Indraratna *et al.* (2011), inúmeras são as variedades de rochas que são utilizadas para lastro ferroviário como: gnaiss, quartzito, riolito, dolomito, basalto, granito, calcário. No território brasileiro de acordo com ABNT 5564 (2021) são aceitos como material de lastro granito, gnaiss, basalto, quartzito e o granito.

A facilidade de escoamento e a passagem de fluidos através dos seus canais vazios formados por poros interconectados desse tipo de material alcança níveis satisfatórios, sem a necessidade de grandes investimentos.

Se dá a expulsão de água através dos poros ou vazios da estrutura, sem trazer fatores de adensamento/consolidação altos, como em comparação a outros materiais por se tratar de um material granular.

A litologia é um dos muitos fatores que afetam o lastro quanto sua resistência e contra a carga de tráfego. Quanto maior a dureza e tenacidade da rocha-mãe, maior será a resistência a abrasão do lastro. No entanto, tais propriedades físicas associadas ao tipo de material da rocha-mãe não pode ser modificado. Por outro lado,

a forma do grão de lastro é um dos fatores-chave para o bom desempenho a abrasão e pode ser controlado no processo de produção do lastro (YANG XU, 2020).

Para a escolha de um tipo de material para lastro é necessário a análise de características, segundo a origem e litologia, que pode trazer desgastes e envelhecimento não desejados ao material, são eles:

- Satisfatório índice de tenacidade;
- Resistência ao desgaste;
- Satisfatória resistência a compressão;
- Boa resistência a fatores provenientes de intempéries;
- Fator de forma favorável a utilização.

Desta maneira, para a escolha de um lastro ferroviário adequado para a implantação de uma nova ferrovia, além da verificação das características segundo a sua origem e litologia, é necessário a verificação de características acerca da sua granulometria do material britado. Visto que partículas com grande diâmetro pode reduzir a estabilidade da plataforma e dificultar a socaria, entretanto, diâmetros muito reduzidos pode trazer redução na vida útil da camada e facilitar a colmatação do lastro.

2.5. INFLUENCIA DA LITOLOGIA DO AGREGADO NO LASTRO FERROVIÁRIO

2.5.1. INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DO AGREGADO NO LASTRO FERROVIÁRIO

Para se desenvolver e considerar as falhas no interior dos materiais a serem utilizados, a fratura de um material se inicia com a concentração de tensões nas extremidades de microfissuras pré-existentes em seu interior, que, ao atingir a resistência à tração do material, faz com que este resista menos do que o esperado. Destaca-se que partículas maiores apresentam maior incidência de falhas e possíveis fissuras prévias que apresentadas por partículas de granulometria menor, por esse tipo de análise constata-se que apresentam menor resistência (DUTRA, *et. al.*, 2020).

Para se observar o dano por impacto nas partículas de forma individual, se realiza ensaios em diferentes tipos de materiais. Entretanto é observado que materiais cristalinos tem a capacidade de fraturar e acumular suscetíveis danos de forma rápida. Já rochas que em sua composição são constituídas por vários minerais, como gnaisses, acumulam danos de forma mais branda e gradual, com deformação

inelástica antes de fraturar e o desenvolvimento de trincas após maior acúmulo de dano.

Para a consideração de falhas e descontinuidades se baseia em critérios experimentais, que são capazes de determinar se as fraturas irão se propagar ou diminuir pela aplicação de energia, desta forma é possível constatar se o material irá suportar a energia sem fraturar. (ATKINSON, 1987). No entanto, em partículas de rochas devido à grande heterogeneidade que pode existir, com presença de minerais com planos preferenciais em diferentes orientações e presença de falhas em diversas direções, há carência de dados quantitativos, limitando a aplicação desta teoria, muitas vezes, apenas a auxiliar na compreensão da fratura destes tipos de partículas.

2.5.2. PROPRIEDADES DOS AGREGADOS, SUA DESCRIÇÃO E INFLUÊNCIA.

As propriedades intrínsecas do agregado são características de origem do material, que pode ser como uma qualidade mineral de concepção da amostra ou uma patologia (plano de falha).

Ao se analisar esse tipo de material características particulares de cada material podem ser observadas como: o contato entre os minerais, cor dos minerais e a sua forma, que são determinantes na classificação do tipo de material e de como foi formada.

O comportamento mecânico de um material rochoso a ser empregado em um empreendimento é determinado por propriedades do material e suas características morfológicas, na maioria dos casos a característica do material é obtida por análise petrografia, para a observação dos minerais constituintes da rocha (ROSA, 2019).

O trabalho de Lindqvist *et al.* (2007), listou comportamentos próprios do material que influenciam diretamente no comportamento da rocha, como a mineralogia, tamanho dos grãos, forma dos grãos, porosidades e a orientação e distribuição espacial.

A mineralogia do material apresenta as características individuais do mineral formador da rocha, que influenciam diretamente nas propriedades da rocha, influenciando na sua dureza, resistência e no módulo de elasticidade.

A rocha tende a ser mais resistente em materiais que tem menores grãos minerais, portanto o tamanho dos grãos é um fator importante, de modo que rochas com distribuição de tamanhos menos uniformes apresentam maior resistência.

Quanto mais diferente o padrão de rocha for (forma do grão), no contato entre os grãos, maior resistência é alcançada.

A porosidade e a pré-existência de falhas, podem trazer ao material fraturas que são iniciadas a partir dos poros ou de falhas existentes no material, que tem ligação direta a quantidade e tamanho dos vazios existentes na estrutura da rocha.

Já a orientação e a distribuição de minerais como micas podem servir como plano para possíveis fraturas na rocha. Esse tipo de mineral pode passar por mudanças significativas e desenvolvimento de falhas importantes se exposto em ambientes como o da região de passagem da EF 118, que contém um lençol freático relativamente elevado, portanto é importante a análise da ascensão capilar da água subterrânea sulfatada, o que pode trazer alterações consideráveis ao material empregado no empreendimento por constituir-se de minerais suscetíveis a intempéries. Além disso, a região de Campos-RJ predomina os solos lateríticos com presença de caulinita (XAVIER, *et.al.* 2019) que são carregados pelo vento diariamente e sendo depositados sobre e entre as partículas de lastro o que dificultam a drenagem (PAIVA, *et. al.* 2015).

2.6. PROPRIEDADES E ESPECIFICAÇÕES DE AGREGADOS PARA LASTRO FERROVIÁRIO

Para que o material seja empregado na camada de lastro é necessário que a rocha escolhida esteja em conformidade com algumas especificações, ou seja, é necessário submeter o material a ensaios determinados por norma. De modo comparativo é apresentado na tabela 2 as características para agregados exigidas pela NBR 5564 (ABNT, 2021) e VALEC (2012) a serem aplicados em lastro ferroviário.

Tabela 1-Limites aceitáveis para as propriedades do lastro ferroviário

Propriedades	NBR 5564 (2021)	VALEC (2012)
Parâmetros		
Forma Das Partículas	cúbica	cubica
Massa Específica Aparente (Mínimo)	2,5 g/cm ³	2,4 g/cm ³
Absorção De Água (Máximo)	2%	1%
Porosidade Aparente (Máxima)	2%	1%
Resistência Ao Desgaste (Máxima)	30%	40%
Resistência Ao Choque (Máxima)	25%	20%

Resistência A Compressão (Mínima)	—	100 MPa
Resistência A Intempérie	10%	5%

Em relação as características mecânicas da camada de lastro são importantes destacar a interdependência, entre outras, de propriedades individuais da partícula do agregado constituinte com o tipo de rocha, a forma, os índices físicos, e a resistência ao envelhecimento.

Em relação a propriedade de envelhecimento ao intemperismo, ou seja, a resistência a intempérie, deve-se frisar que estudos são tão importantes quantos os físicos e mecânicos, visto que as rochas quando utilizadas como lastro ferroviário são sujeitas a ação do sol, das chuvas, vento, variação de temperatura e variação de umidade relativa do ar que pode alterar seus minerais. A NBR 5564 (ABNT, 2021) no que se diz a respeito à petrografia, cita que a camada de lastro deve ser constituída de materiais extraídos de rocha dura e são (FRASCÁ; YAMAMOTO, 2014).

2.7. ANÁLISE PETROGRAFICA

Indraratna et al (2011) através de sua análise e entendimento da gênese da rocha e possível a compreensão mais completa sobre o comportamento mecânico e químico do agregado. A petrografia é de grande importância para a obtenção de características do material e prevenindo problemas futuros.

Fatores que mais afetam as características físicas da rocha é a origem do material a causa de maior impacto na degradação do lastro. A composição e disposição dos minerais contribuem para a resistência física (compressão e tração) e as propriedades químicas das partículas (solidez). Amostras de diferentes origens apresentam no mesmo estado de tensão, diferentes condições de contorno, tenacidades distintas.

Com a análise petrografica também é possível a avaliação das partículas com relação a sua forma, visto que a textura e a estrutura dos minerais pode influenciar na mineralogia do material, o que pode ajudar a identificar materiais inapropriados (WATTERS, 1987).

Como verificado por ANASTASIO *et al.*, (2016) através de uma boa análise petrográfica e realizada por profissional experiente é possível constatar características

da rocha qualitativa e inferir o comportamento do material. Na tabela a seguir é apresentado uma relação entre os minerais e seus efeitos no lastro.

Tabela 2-Resumo de propriedades petrográficas que podem influenciar no lastro (WATTERS et al., 1987).

Propriedades da Rocha do Lastro	Principal efeito deletério
Mineralogia	
Elevada quantidade de materiais muito moles (ex: argila, mica, Clorito).	Rápida degradação física, finos de argila, finos ricos em mica
Rochas sedimentares argilosas (ex: Lamito, folhelho).	Rápida degradação física, finos de argila.
Rochas metamórficas ricas em mica (ex: ardósia, filito, xisto).	Rápida degradação física, finos de argila, finos ricos em mica.
Ígneos com feldspato deutericamente alterado	Rápida degradação física, finos de argila
Rico em sulfeto (cerca de 2% a 3%) (ex: pirita, pirrotita).	A oxidação do sulfeto resulta em condições ácidas que promovem corrosão química de outros minerais
Textura	
Má consolidação em rochas sedimentares e vulcanoclásticas.	Rápida degradação física por abrasão susceptibilidade ao congelamento e degelo.
Alta porosidade (cerca de 5%) em rochas sedimentares.	Degradação por congelamento e degelo e abrasão se os poros são grandes e abundantes.
Vesículas em rochas vulcânicas.	Degradação por congelamento e degelo e abrasão se os poros são grandes e abundantes.
Textura friável em rochas cristalinas.	Rápida degradação física por abrasão susceptibilidade ao congelamento e degelo.
Estrutural	
Juntas estreitas e espaçadas, planos de estratificação, foliação.	Rápida degradação física por abrasão, susceptibilidade ao congelamento e degelo, geração de formas de partículas inadequadas.
Forma da Partícula e Características da Superfície.	
Superfície das partículas lisas (muitas vezes devido a textura da rocha).	Baixa estabilidade mecânica
Forma de partículas imprópria.	Pobre estabilidade mecânica, fratura de carga, ou partículas alongadas ou tubulares.

O método de ensaio para a análise petrográfica de materiais pétreos é descrita pela norma NBR 15845 (ABNT, 2015) de modo a viabilizar a obtenção de informações de nível macroscópico e microscópico para a classificação de uma rocha.

Miskovsky *et. al.* (2004), conduziu um estudo utilizando análise de petrografia, que evidenciou a importância da análise petrográfica na correlação de dados tecnológicos de rochas. Foi estabelecido a correlações entre a composição mineral, textura e propriedades mecânicas do granito sueco, utilizando na pesquisa 17, onde

amostras cujo os resultados mostraram que, a medida que o feldspato aumenta reduz a resistência ao impacto.

Adomako *et. al.* (2021) realizaram um estudo para estabelecer relação entre a mineralogia, tamanho do grão, tamanho do cristal, forma do grão e porosidade das rochas e os testes de Los Angeles e Micro Deval. Descreveram que um alto teor de minérios como quartzo e feldspato são relevantes para a avaliação do comportamento das rochas. Quanto maior o teor de quartzo se aumenta a resistência aos testes de abrasão mencionados.

2.8. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

O ensaio tem como principal objetivo a obtenção de parâmetros de fluidos através da rocha determinado pelas dimensões do sistema poroso do material. De acordo com Gieshe (2006) a rede de poros tem importantes aplicações práticas na obtenção de parâmetros do material como: o transporte de poluentes, armazenamento de resíduos e capacidade do material armazenar hidrocarbonetos. Com a intrusão de mercúrio é registrado o volume de mercúrio e a pressão numa curva de intrusão. Após se atingir a pressão máxima a pressão diminui gradualmente e é obtido um perfil de extrusão. Com as curvas de intrusão e as curvas de extrusão não segue da mesma forma são formadas alças de histerese. E é a partir das alças de histerese que se pode calcular a cavidade dos poros do material para a relação da garganta.

A porosimetria por intrusão de mercúrio é um ensaio simples que tem como principal objetivo fornecer parâmetros da amostra de porosidade aberta com precisão, entretanto o ensaio fornece valores menores de porosidade total por não medir porosidade fechada. O método permite avaliar diâmetro dos poros e a intrusão total (FUSI *et. al.* 2013).

Para o uso do material rochoso, é de grande importância se conhecer as estruturas dos poros visto que pode afetar diretamente as propriedades das rochas trazendo grandes efeitos a utilização do material, como efeitos sobre modos de falhas e efeitos nas característica física e mecânica da rocha (HUDYMA *et. al.* 2006).

A porosimetria por intrusão de mercúrio é muito utilizada pois através deste ensaio se pode investigar anomalias no material poroso que apresenta raio de abertura menor que a do poro em si, denominada de poro-garganta normalmente

medindo 3nm e 500µm. É um ensaio relativamente econômico e tem a capacidade de fornecer informações das características dos poros abrangentes (ZHANG *et al.*, 2016).

Nos estudos de Zhang *et al.* (2016) realizou o ensaio de porosimetria basicamente com a utilização de amostras sedimentares de sete litotipos diferentes são elas: Mudstone, Arenito Argiloso, Silte, Arenito Fino, Arenito Médio, Arenito Grosso e Conglomerado a diferentes e elevadas profundidades. Foi caracterizado o tamanho dos poros dominantes das rochas e os diferentes diâmetros de gargantas de poros do material o que foi possível constatar a diferença na distribuição dos poros dos diferentes grupos litológicos. Chegou-se então aos parâmetros de cada material entre 30% e 40% para os diferentes tipos de Arenitos e cerca de 66% para o Silte a uma faixa aproximada de 0,01 – 0,05 µm.

Já nos ensaios de porimetria de Dias Filho *et al.* (2020) o tamanho dos poros do material foi analisando com a rocha sã e após ao envelhecimento acelerado, o que possibilitou constatar que o material intacto possuía quantidades significativas de microporos. A observação das características do material após o envelhecimento acelerado mostrou que os microporos identificados na rocha sã desapareceram e os poros maiores aumentaram ficando entre 45 µm e 170 µm. O processo de degradação do material resultou no aumento dos poros do material resultando no aumento da absorção de água.

Costa *et al.* (2021) obtiveram informações do tipo tamanho e distribuição dos poros no seu estudo de influência de altas temperaturas nas propriedades físicas e microestruturais de um gnaisse milonítico utilizando o porosímetro por intrusão de mercúrio. Como resultados, os autores obtiveram valores de diâmetro de poro maiores para as amostras tratadas termicamente.

Dias Filho *et al.* (2020) utilizaram a porosimetria em seus estudos de durabilidade do gnaisse ornamental para analisar a distribuição dos poros de amostras submetidas a processos de degradação acelerada em laboratório (70 dias), intemperismo local (5 anos) e rocha intacta. Foi explicado que os processos de degradação levaram a um aumento da porosidade e conseqüentemente, de absorção de água pelo material, através do aumento do tamanho dos poros.

2.9. GRANULOMETRIA EM AGREGADOS PARA LASTRO

De acordo com a norma brasileira para lastro ferroviário NBR 5564 (ABNT, 2021), o lastro é considerada uma camada de rocha britada constituída principalmente de grãos cúbicos. A norma estipula que a distribuição granulométrica da camada de lastro deve facilitar a percolação da água evitando o excesso de finos que diminui a permeabilidade da camada. Desta forma é estabelecido dois padrões de granulometria de partículas a serem empregados no lastro ferroviário, sendo os padrões A e B respectivamente na Tabela 2.

Visando a maior vida útil da camada de lastro e garantir a drenagem da água através da camada, a NBR 5564 (ABNT, 2021) descreve parâmetros importantes acerca da granulometria do material, ou seja, visto que a granulometrias grandes demais pode trazer a via instabilidade e granulometrias reduzidas pode reduzir a vida útil e dificultar a permeabilidade da via, visto a produção de finos que pode obstruir a drenagem da água através do lastro.

A granulometria para lastro deve estar entre as frações 12,5 e 63,5 mm em condição compactada e tendo vazios associados, a graduação é determinada com auxílio de peneiras de laboratório tendo malhas quadradas de diferentes espaçamentos (DNIT, 2015).Entretanto, ocorrem mudanças indesejadas mas inevitáveis nas partículas empregadas no lastro ferroviário com a passagem do veículos, processo de compactação e socaria, o que ocasiona ao material quebra das arestas ou até mesmo a divisão das partículas diminuindo assim a granulometria do material, que pode trazer prejuízos a utilização da via.

Tabela 2-Distribuição granulométrica do lastro padrão – NBR 5564 (ABNT, 2021)

tamanho da peneira de acordo com ABNT mm	Porcentagem de massa acumulada (%)	
	Padrão A	Padrão B
76,2	NÃO APLICAVEL	0 - 0
63,5	0 - 0	0- 10
50,8	0- 10	NÃO APLICAVEL
38	30-65	40-75
25,4	85-100	NÃO APLICAVEL
19	NÃO APLICAVEL	90-100
12,5	95-100	98 - 100

As partículas de lastro devem passar completamente pela peneira de 50,8 mm e permanecer na peneira de 12,5 mm. A norma NBR 5564 (ABNT, 2021), define dois tipos de faixas granulométricas para ferrovias, nas quais a faixa padrão A é recomendada para uso em ferrovias de uso geral e a faixa B para pátios de empresas e tráfego com menor demanda. Já a faixa padrão B é o que mais provavelmente permite os maiores fragmentos de lastro, resultando em interação acelerada do lastro Vizcarra (2015).

Indraratna *et. al.* (2011) concluiu que a medida que o número de ciclos de passagem dos trens aumenta, as partículas de lastro se degradam ainda mais e conseqüentemente constata-se gradualmente a diminuição do tamanho do agregado, mas, mesmo após milhões de ciclos de carregamentos 90% dos grãos permanecem dentro da faixa granulométrica inicialmente determinada entre 10-60mm.

2.10. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Durante o uso, o lastro tende a se deteriorar continuamente com o tempo e o uso. A prática de engenharia mostrou que o lastro sofre gradualmente a quebra de partículas e sofre degradação e desgaste da superfície sob carga dinâmica cíclica de longo prazo, o que causa deformações plásticas irreversíveis que ocorrem longitudinalmente desigualmente e podem afetar a segurança operacional do trem (BIAN *et al*, 2020).

Indraratna e Salim (2003) acreditam que existem vários fatores que afetam a degradação do lastro ferroviário, como amplitude, frequência e número de ciclos de carga, densidade, ângulo e a forma do grão. No entanto, o fator mais relevante para a quebra de materiais de lastro é a resistência à fratura de suas partículas.

A deformação está diretamente ligada ao desgaste da via. É a parcela que o material se deforma e não consegue recuperar o estado inicial após o carregamento. Ocorre devido ao deslocamento permanente nas camadas do lastro, e dependem diretamente da qualidade e do comportamento dos materiais granulares empregados na via.

Esses tipos de deslocamentos podem ocorrer em duas etapas, que é logo após da construção durante o período de socaria e a segunda é mais lenta e possui uma relação linear com o peso transportado na via, que causa o rearranjo das partículas quebra e rearranjo das partículas, como mostrado na Figura 5.

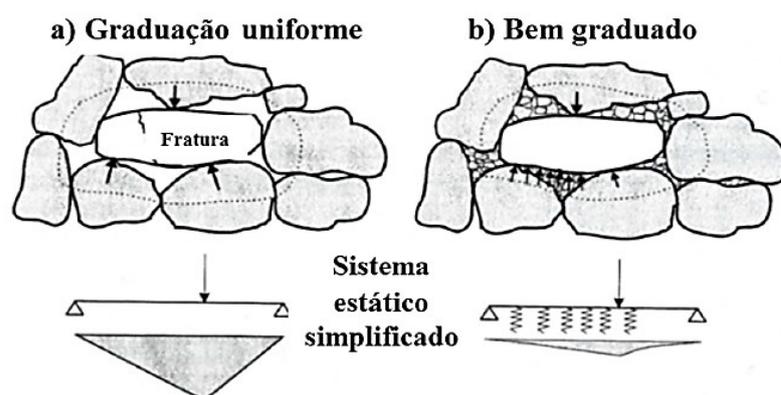


Figura 5-esquema das tensões nos grãos. Fonte: (PIRES, 2017).

Em decorrência disso, lastros não muito bem graduados, acabam passando pelo processo de quebra das partículas e com isso a incrustação dos seus vazios acarretando na necessidade de intervenções de manutenção.

Esse processo de quebra é o principal responsável pela mudança das características do lastro que, de acordo com Seling e Walters (1994), mais de 70% da incrustação de lastro é o resultado da quebra do lastro sob o carregamento e utilização.

Análises atuais indicam que a incrustação do lastro pode ser resultado de diversos fenômenos como: bombeamento de finos do sublastro, que também pode trazer por capilaridade água proveniente do lençol freático (PIRES, 2017).

Além das características naturais do material afetam a degradação do lastro, existem fatores que podem favorecer ou melhorar a resistência da infraestrutura das ferrovias, como o fator forma, que é um dos fatores-chave para o comportamento de abrasão e pode ser controlado no processo de produção de lastro.

2.11. MICRO DEVAL TEST (MD)

O Micro Deval tem o objetivo de medir a resistência à abrasão dos agregados, determinando o desgaste em ambiente desfavorável de hidratação, que representa condição mais próxima ao real de aplicação dos agregados (WU *et. al.*, 2018).

A definição do teste de resistência a abrasão do Micro Deval é realizada com a presença de água e utilização de esferas de aço para polimento das amostras e leva em consideração a norma D6928 (ASTM, 2017) definida como uma média entre a durabilidade do agregado e a resistência a abrasão do agregado mineral.

Para a realização do ensaio do MD, agregados são adicionados a um recipiente giratório de aço, e esferas de aço e água são adicionadas para interagirem entre si, durante um intervalo de tempo determinado por norma de 180 minutos, o coeficiente de perda de massa é calculada após o processo de polimento, que mostra a perda ocasionada pelo ensaio de Micro Deval. A obtenção de um valor maior do coeficiente significa que a amostra possui menor resistência à abrasão.

Santos *et al.* (2021) em seu estudo descreveu a evolução da degradação de três materiais rochosos foi avaliada de acordo com a NBR 5564 (ABNT, 2021) para lastro ferroviário, dois granitos e um Microgabro. Para obtenção das propriedades de resistência às intempéries, foram realizados dois testes: o uso de sulfato de sódio e o uso de etilenoglicol. Nesse processo, a resistência à abrasão e a durabilidade da rocha intacta em Micro Deval são quantificadas e degradadas por ciclagem com sulfato de sódio. Pode-se observar que a baixa degradação da rocha devido à alteração cíclica acelerada pode ser explicada pelo fato de que as tensões de tração e contração impostas pela cristalização e expansão do sal nos vazios da rocha não são suficientes para causar fragmentação significativa durante o Micro Deval test.

2.12. ABRASÃO LOS ANGELES

O ensaio de abrasão Los Angeles é um importante ensaio para a avaliação da resistência à redução da tenacidade ou tendência de quebra a quebra de agregados graúdos utilizado em todo o mundo (GUO *et. al.*, 2019).

É acrescentada as amostras para a realização do ensaio esferas como carga abrasiva e submetidas a 500 rotações. Após esse processo o material é retirado e lavado na peneira 1,7mm, o material retido é colocado na estufa a 110°C para a secagem completa por um período de 20 horas ARAUJO (2019).

Pires (2017) constatou que as amostras após a passagem pelo processo de abrasão Los Angeles, uma perda considerável de parte da uniformidade. A partir dos ensaios e observações visuais, diferentes modos de degradação são constatados. Foi possível observar tendência de perda de massa inicial e subsequente queda e taxa de arredondamento na forma dos grãos.

Quian *et. al.* (2017) conduziram estudos experimentais para caracterizar e quantificar mudanças na classificação e propriedades morfológicas dos agregados em

análise. Os testes foram realizados em amostras de lastro em calcário e granito para caracterizar as propriedades de forma e tamanho usando análises de imagens. Como resultado, os autores encontraram boas correlações entre as mudanças nas propriedades de forma e tamanho quantificadas por meio de análise de imagem. Como resultado, os autores encontraram boas correlações entre as mudanças nas propriedades de forma de acima de 9,5 mm e o número de revoluções do tambor, onde mudou as propriedades morfológicas junto com o tamanho das partículas durante o processo de degradação.

De acordo com os ensaios de Polinicola *et.al.* (2021) que utilizou o ensaio de Los Angeles nas amostras em análises que se trata de dois gnaisses e um granito com origens diferentes, onde as amostras RCG (Rocha de campos dos Goytacazes), RNI (Rocha de nova Iguaçu) e RCI (Rocha de Cachoeiro de Itapemirim) obtendo os resultados respectivos de cada amostra. As amostras RCG e RNI ficaram dentro do limite estabelecido pela norma NBR 5564 (2021), sendo que as amostras apresentaram os seguintes resultados para perda à abrasão, 29,01% e 17,57%, respectivamente. Isso se justifica devido a granulação dos minerais apresentarem uma petrografia com granulometria muito fina a média e a amostra RNI apresenta uma granulação fina, o que contribui para uma alta resistência a abrasão, conforme afirmado por Miskovsky *et al.* (2004).

A amostra RCI apresentou uma perda a abrasão de 49,5% ficando assim acima dos limites estabelecidos pela NBR 5564 (2014) de 30% e VALEC (2012) de 40%, para a perda à abrasão. A perda a abrasão elevada pode ser relacionada a granulação dos minerais, como observado através da petrografia que estabelece a granulação em grande parte média e grossa, indo de acordo com o estabelecido por Miskovsky *et al.* (2004), que correlaciona de forma direta o tamanho dos grãos com a resistência à abrasão, quanto maior a granulação, menor seria a resistência a abrasão.

2.13. POINT LOAD TEST (PL)

Para a caracterização da rocha intacta é utilizado a resistência a compressão uniaxial de cada uma das amostras, como apresentado nos estudos realizados por Koomishi (2021), que avaliou a resistência a compressão do agregado de lastro através da realização de teste de carga pontual. Esse parâmetro é necessário em várias aplicações como projeto de fundações suportada por rocha, é geralmente

determinada pelo carregamento axial de uma amostra de rocha inteira não confinada. A resistência à compressão uniaxial pode ser avaliada alternativamente pelo teste de carga pontual, que é um método mais simples e econômico (ELHAKIM, 2015).

O Point-Load Test é um ensaio de carga pontual adequado para determinação da resistência de materiais rochosos em amostras com formas irregulares. A estimativa de força pontual é dada através do (Is) (índice de resistência) (ASTM C 88).

Várias publicações na literatura discutem o uso do teste de carga de pontual para lastro ferroviário. Koomishi e Palassi (2016) fizeram uma contribuição importante quando investigaram a influência de propriedades como tamanho e forma na durabilidade das partículas de lastro ferroviário usando um teste de carga pontual de quatro tipos de rocha (basalto, mármore, dolomita e traquito). Os autores concluíram que o tamanho das partículas do lastro afeta o índice de carga de pontual, que é menor quanto maior a partícula.

A probabilidade Weibull também foi usada para melhorar a precisão dos resultados de partículas irregulares de lastro. Verificou-se que, para cada tipo de rocha, um aumento no tamanho do agregado resulta em uma diminuição na resistência das partículas. Desta forma foi possível verificar que o tamanho das partículas de lastro tem influência no índice de carga pontual.

2.14. PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS DAS PARTÍCULAS- AIMSII

A utilização do *sistema de caracterização por imagem de agregados* (AIMS II) importante para se analisar as propriedades das partículas como forma, angularidade e textura DNIT (2020).

O equipamento composto por hardware de aquisição de imagem, com bandeja circular onde são posicionadas as partículas para a rotação dentro do equipamento passando por uma câmera de alta resolução na qual se obtém imagens das partículas, que são analisadas por um software que oferece os valores para cada uma das propriedades Wang *et al.* (2015). O equipamento consegue caracterizar partículas de até 25,4mm.

A angularidade descreve as variações no contorno de uma partícula por meio do método do gradiente. Seu valor varia de 0 a 10.000, sendo os valores mais altos um indicativo de partículas mais angulares.

Já a textura é parâmetro que descreve a rugosidade das partículas dos agregados. Varia de 0 a 1000, sendo assim, quanto mais próximas do 0 mais polidas as partículas.

A esfericidade descreve a forma 3D de uma partícula e varia de 0 a 1. Quanto mais próximo do valor 1, mais próximas as suas três dimensões sendo a partícula considerada cúbica.

Os valores limites determinados para a classificação do material em cada propriedade é descrito por Ibiapina *et.al.* (2018) como representado na tabela 3.

Tabela 3-Valores limites das propriedades obtidas por AIMSII. Fonte: Ibiapina *et al.* (2018).

Propriedade	Valores Limites				
	<1260	1260-4080	4080-7180	>7180	
Angularidade	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	
	<0,5	0,5 -0,7	0,7-0,9	>0,9	
Esfericidade	Achatado / Alongado	Baixa Esfericidade	Esfericidade Moderada	Alta Esfericidade	
	<260	260-440	440-600	600-825	>825
Textura	Polido	Macio	Baixa Rugosidade	Rugosidade Moderada	Alta Rugosidade

De acordo com Rosa *et. al.* (2019), pode-se observar a proximidade nos valores da angularidade de rochas que passaram pelo mesmo processo de britagem, tanto analisando cada partícula separadamente, quanto para a média dos valores. A maioria das rochas apresenta uma tendência ao aumento da angularidade com a diminuição do tamanho da partícula, provavelmente ligado ao tipo de britador e ao material de alimentação. Para a análise da textura dos agregados há diferenças ligadas a litologia de cada uma das amostras de rocha analisadas, a maior textura do material está relacionada a presença de minerais com a graduação mais fina, indicando que a textura das rochas está ligada a estrutura mineralógica da rocha (ROSA, *et. al.* 2019). A forma dos agregados é analisada através de três índices, que são: de achatamento, índice de lamelaridade e de esfericidade.

Para avaliar a morfologia de agregados de rochas gnaisses Trotta *et.al.* (2021) utilizou o AIMS II antes e após o ensaio de Micro Deval e Los Angeles. Três parâmetros morfológicos (angularidade, arredondamento e textura), foram analisados separadamente para cada tipo de rocha e diferentes tamanhos de partícula. No ensaio foi possível verificar que o ensaio de degradação Los Angeles resultou em maior degradação mecânica e com maior diferença entre as partículas maiores. A

degradação de produzida pelo teste Micro-Deval aumentou a esfericidade das partículas e diminuiu a angularidade.

2.15. INCRUSTAÇÃO DO LASTRO E A PERMEABILIDADE

Com a abrasão devido a utilização da via, é gerado partículas finas provenientes da quebra do lastro, entretanto, os finos tendem a colmatar o lastro e reduzir o desempenho de drenagem do lastro, a infiltração das camadas próximas ao lastro é maior com a presença de água que tem como causa principal o bombeamento gerado pelo tráfego resultado da baixa permeabilidade. Esse fenômeno resulta na diminuição significativa do índice de vazios da camada de lastro, o material fino mais a presença de água, pode vir interferir negativamente no comportamento da via.

De acordo com Al-Qadi *et. al.* (2008) a maior forma de incrustação se dá através da quebra do lastro, além disso, os ensaios determinam que, após realizar trabalhos de manutenção da via por vinte vezes, o tamanho das partículas do lastro é reduzido consideravelmente. Como resultados da análise da influência da incrustação dos vazios na permeabilidade do lastro ferroviário, Seling e Waters (1994) analisaram o coeficiente de permeabilidade, relacionando o efeito do grau colmatação da camada em sua permeabilidade e elaboraram parâmetro de nível de incrustação do lastro de acordo com o índice de incrustação como representado na Tabela 4.

Seling e Waters (1994) propuseram o *fouling index* (F1), classificando tal incrustação em cinco níveis, como mostrado na Tabela 4, de limpo a altamente contaminado. O F1 é determinado pela soma dos percentuais passantes da peneira de 4,75mm (#4) e de 0,075 mm (#200).

Tabela 4- nível de incrustação do lastro de acordo com o índice de incrustação. Fonte: Seling e waters (1994)

Índice Incrustação	De	Nível De incrustação Do Lastro
F1 < 1		Lastro Limpo
1 F1 < 10		Lastro Razoavelmente Limpo
10 F1 < 20		Lastro Moderadamente Limpo
20 F1 < 40		Lastro Contaminado
F1 40		Lastro Altamente Contaminado

Conforme Paiva *et al.* (2015), após analisar a redução da permeabilidade da camada de lastro, comparando amostras de lastro limpo com amostras contaminadas com porcentagens volumétricas de 10%, 15%, 20%, 25% e 40% do solo. A condutividade hidráulica do lastro para diferentes taxas de incrustação também foi analisada.

De acordo com os testes de permeabilidade realizados por Paiva *et al.* (2015), os valores de condutividade hidráulica do lastro contaminado com solo são muito baixos em comparação com a condutividade hidráulica do lastro limpo e esses valores diminuem rapidamente com o aumento da taxa de incrustação. Esses resultados demonstram os problemas de escoamento da água causados pela incrustação do lastro pelo solo das camadas subjacentes. Em conclusão, atenção especial deve ser dada ao lastro contaminado, pois ele pode funcionar em níveis abaixo do esperado. Resultados semelhantes foram encontrados por Seling e Waters (1994).

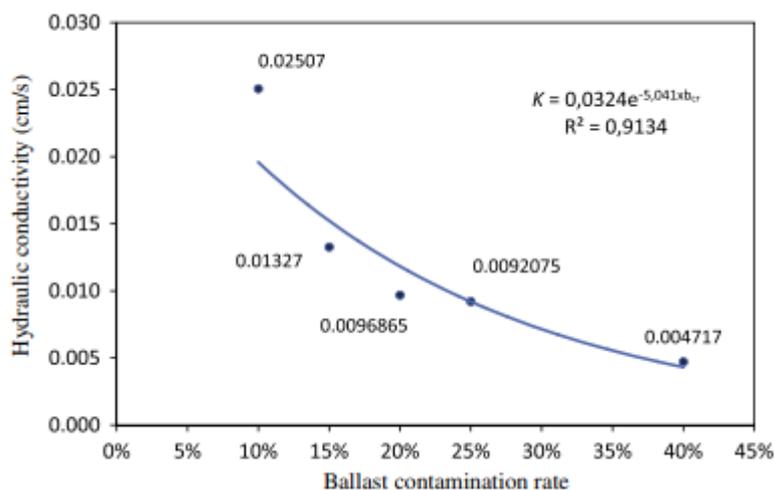


Figura 6- variação da condutividade hidráulica com a taxa de contaminação do lastro.

Fonte: Paiva *et al.* (2015)

Ao se analisar os resultados obtido a partir do ensaio de permeabilidade e condutividade hidráulica dos autores Paiva *et al.* (2015) e Ferreira *et al.* (2015) é possível constatar que com o aumento do índice de incrustação os valores de condutividade hidráulica (K) diminuem rapidamente. Esses resultados demonstram os problemas de escoamento de água causados pela incrustação da camada de lastro.

Tabela 5-resultado de permeabilidade e de vazão de descarga para três níveis de incrustação de lastro.

FI	CLASSIFICAÇÃO (FI)	ALTURA AMOSTRA	VOLUME MEDIDO (ML)	K (cm/s)	Q (m³/s)	Q/QC	CLASSIFICAÇÃO DA DRENAGEM
15	Moderadamente Limpo	17	90	0,00094	1,10E-06	0,09	MUITO DEFICIENTE
30	Contaminado Muito	16	70	0,00069	8,01E-07	0,07	
45	Contaminado	16	50	0,00049	5,69E-07	0,05	

Fonte: FERREIRA (2015).

Como desenvolvimento dos ensaios foi realizado a verificação dos resultados obtidos e os valores do coeficiente de permeabilidade possibilitando assim corroborar os dados a partir da sua ordem de grandeza. Foi verificado que além da redução da condutividade hidráulica os resultados obtidos são reduzidos em comparação com a condutividade hidráulica de lastro limpo, que é de cerca de $3,0E-1$ cm/s. Por exemplo, a condutividade hidráulica do lastro contaminado com 10% de pó de rocha, o que não requer manutenção e limpeza.

2.16. ATAQUE POR SULFATO DE SÓDIO

O ensaio de ataque por sulfato de sódio tem como objetivo analisar os efeitos provocados pelo ataque das rochas que traz alterações nas características do material, principalmente na porosidade a ser empregado no lastro ferroviário. Visto que a região de estudo se caracteriza como uma planície costeira baixa e os níveis estáticos do lençol freático da região com aflorações a profundidades de 1,10m a 12,88m, o que pode trazer alterações ao lastro frente a presença de sulfato de sódio (CORREIA et. al. 2021), podendo atingir a camada de lastro. Além disso, o alto índice pluviométrico da área são características importantes a serem consideradas como indicado por (ANA, 2019).

Os dados de chuva para o período de monitoramento do nível das águas subterrâneas foram obtidos a partir de três estações pluviométricas na área de estudo: Campos (latitude: -21,74; longitude: -41,33; altitude: 11m), Farol de São Tomé (latitude: -22, 02; longitude: -41,03; altitude: 8m) e São Francisco de Paula – Cacimbas (latitude: -21,28; longitude: -41,06). Os dados são registrados e disponibilizados no site da HidroWeb, do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (ANA, 219).

Os autores Menéndez e Petráňová (2016) apontaram em seus estudos que os sais presentes em todos ambientes, tanto naturais quanto artificiais e em todos os climas são os agentes do intemperismo mais perigoso. O intemperismo por meio do sal está ligado a cristalização durante a evaporação da água salgada na mudança de fase da água sulfatada para a fase sólida.

O ensaio de resistência a intempérie (ataque por sulfato de sódio) é desenvolvido por simular em laboratório condições que as rochas são sujeitadas quando utilizadas em lastro ferroviário. Isso acontece devido a tensão causada pelo sal no interior dos poros que pode gerar trincas e microfissuras ao material, segundo Frazão (2012).

Um dos principais danos causados pelo sulfato de sódio em materiais pétreos se dá quando se penetra nos poros sais o que pode produzir altas pressões internas, podendo causar fragilidades e trazendo falhas aos agregados. A força interna de expansão, derivada pela reidratação dos sais devido a reimersão, simula a expansão da água.

A utilização de soluções saturadas de sulfato de sódio em lastro é importante para a determinação da resistência a desintegração através da imersão repetida de material nesse tipo de solução, simulando condições reais em campo, onde o material está exposto a reações químicas de agentes presentes na composição do solo, sob o qual a estrutura está apoiada.

Santos *et. al.* (2021) executou o ensaio com a utilização de sulfato de sódio em granitos e diabásios para simular em escala laboratorial características resultantes do intemperismo nas rochas em situação desfavorável, desta forma foi obtido resultados importantes sobre a perda de massa causada pela ação do intemperismo com uma média de 0,53% e 0,47%, isso pode ser explicado pela tensão de tração e contração que são exercidos na rocha pela cristalização e a dilatação dos sais nos vazios.

CAPITULO III – METODOLOGIA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A metodologia utilizada para analisar de três litologias, dois Meta Granitos e um Gnaisse, está descrita nesse capítulo. Para a seleção do material dois critérios foram seguidos: rochas com possível utilização em lastro ferroviário de acordo com a norma NBR 5564 (ABNT, 2021) onde estão listados os critérios para a utilização de agregados para lastro ferroviário e a proximidade ao trecho da ferrovia EF-118, que é a base de estudo desse trabalho, desta forma, foram selecionadas pedreiras com localização ao norte do Estado do Rio de Janeiro próximo a diferentes pontos do traçado da ferrovia.

De início é apresentado as características das áreas de extração dos materiais a serem coletados e detalhes da coleta de amostras. Os ensaios que foram desenvolvidos incluíram ensaios de análise petrográfica, caracterização física, mecânica e ataque por sulfato de sódio de rochas britadas.

Na pesquisa os ensaios físicos e mecânicos foram realizados antes e após o processo de ataque por sulfato de sódio em laboratório. A verificação da variação das rochas se baseou na comparação dos resultados obtidos das chamadas rochas intactas, que são classificadas assim por não passar por nenhum processo de alterabilidade em laboratório e as amostras degradadas que foram submetidas a ataque por sulfato de sódio.

Segundo Frazão (2012), as características físicas, resistência à abrasão, e carga pontual à compressão pontual e de alteração. Estes testes estão incluídos no estudo experimental desenvolvido no presente trabalho. No fluxograma é apresentado o processo experimental da pesquisa apresentado na Figura 7.

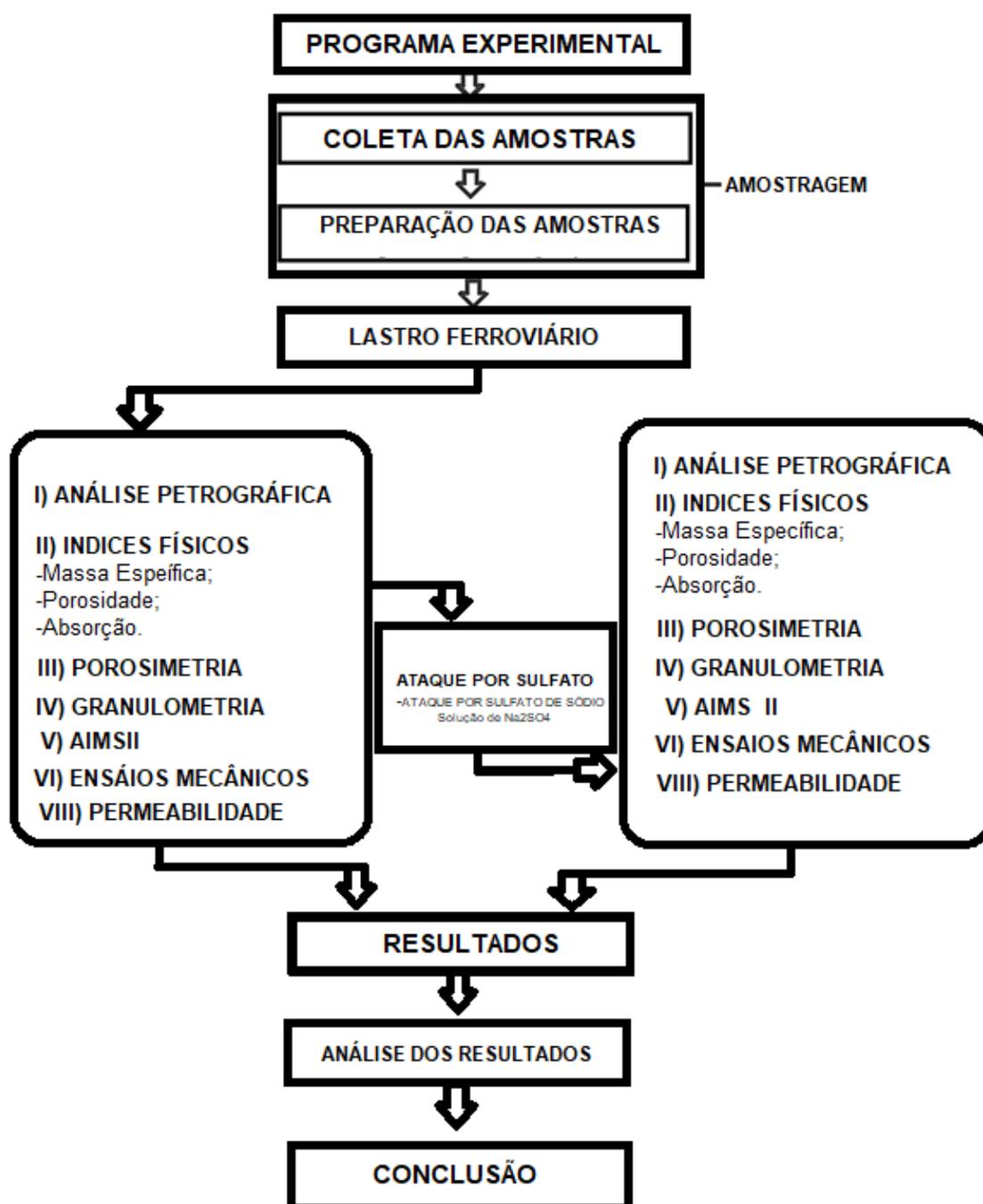


Figura 7-Fluxograma do processo metodológico.

NOTA: AIMS II: Sistema agregado de medição de imagem.

3.2. ESTUDO DE CASO

A estrada de ferro EF-118 também conhecida como ferrovia Vitória – Rio, que interligará três terminais portuários da região sudeste (Figura 2), o porto Central em

Presidente Kennedy (Espírito Santo), o Porto do Açú (situado no norte do estado do Rio de Janeiro), e o Complexo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro (COMPERJ), em Itaboraí. O projeto prevê um traçado de 577,8 km cortando 25 municípios, sendo 170 km no ES e 407 km no RJ (BRASIL, 2020).

Sua instalação requer análise e verificação de insumos e disponibilidade para implementação na região de implementação. A partir dos critérios indicados, foram selecionadas três pedreiras em atividade na região de passagem da EF-118, com diferentes folhas topográficas e de extração em diferentes pontos do traçado da ferrovia em estudo.

3.3. INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS DA REGIÃO

O programa de geologia do Brasil (PGB) realizado pelo Serviço Geológico Do Brasil (CPRM) realizou o levantamento geológico básico do país, caracterizando a geologia e os recursos minerais da região de extração das amostras analisadas no presente estudo ROCHA 01, ROCHA 02 e ROCHA 03.

A Folha Macaé que está localizada na abaixada litorânea do estado do Rio de Janeiro, tem sua porção localizada a noroeste mais especificamente a escarpa da serra mar denominada localmente como serra de Macaé, próximo ao ponto de extração das amostras ROCHA 02 e ROCHA 03. Ambas as amostras analisadas estão localizadas no terreno denominado terreno Cabo Frio, representado pelo Complexo Região dos Lagos, e o Terreno Oriental, representado pelos metassedimentos do Grupo São Fidélis e por rochas granitóides intrusivas e anatóicas. O Complexo Região dos Lagos é composto por rochas ortoderivadas, de origem plutônica, e metamorfizadas em grau forte, no limite das fácies anfíbolito alto e granulito (Serviço Geológico Do Brasil – CPRM 2012).

A ROCHA 01 com área de extração em Campos dos Goytacazes RJ no qual a geologia pode ser resumida basicamente em duas partes a de formação de rochas do embasamento cristalino (Pré-Cambrianas) e a formação da bacia sedimentar (Fanerozóico) que representa uma típica bacia de margem passiva e hoje é uma das mais importantes para a exploração de petróleo do Brasil.

Já as rochas de embasamento cristalino (Pré Cambriano) que ocorrem em Campos trata-se na sua maioria de gnaisses migmatitos, charnockitos e granitos. A

área de extração da amostra ROCHA 01 se encontra no Corpo Magmático Intrusivo, que se tratam de granitos do Itaóca e de Morro do Coco.

Com grande potencial de litológico a ROCHA 01 está localizada na Unidade Bela Joana com intrusões graníticas e com boas condições de exploração nos afloramentos rebaixados do maciço do Itaóca.

O presente trabalho conta com amostras coletadas em diferentes municípios do estado do Rio de Janeiro. Onde a ROCHA 01 localizada na Estrada Imboassica, s/n, Macaé RJ, ROCHA 02 com localização RJ-168, 519, córrego do ouro, Macaé RJ e ROCHA 03 com localização na Rodovia BR -101, km 84, Ibitioca, Campos dos Goytacazes RJ.

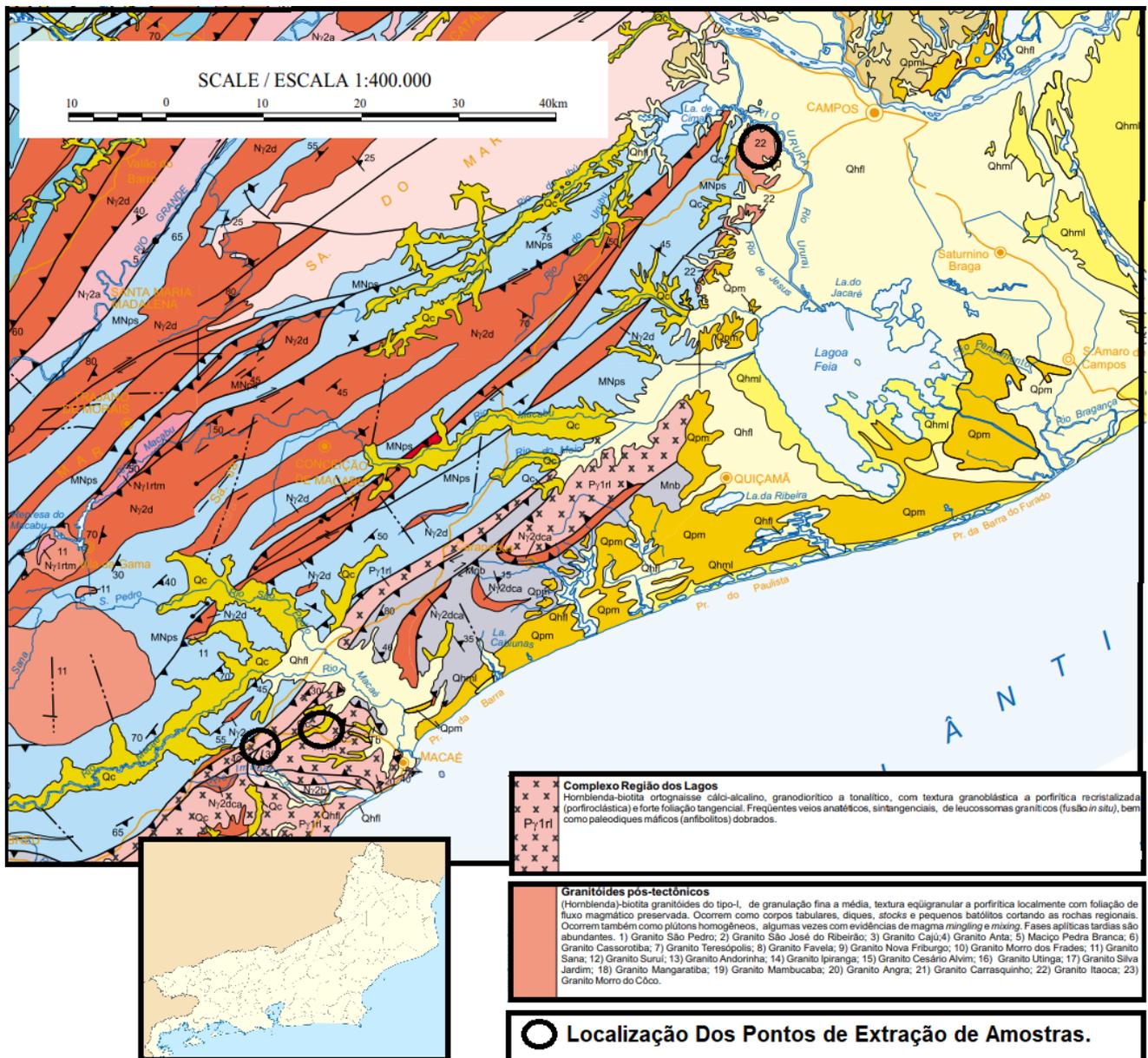


Figura 8- Mapa Geológico do Estado do rio de janeiro. Fonte: CPRM

3.4. MATERIAIS E AMOSTRAGENS

Para viabilizar logisticamente e tecnicamente o fornecimento de materiais para o lastro da EF-118, foram coletados para estudo amostras de rochas de pedreiras em funcionamento nos municípios de Macaé e Campos dos Goytacazes RJ ambas localizadas ao norte do estado do Rio de Janeiro devido à proximidade geográfica com o traçado da ferrovia. Cada pedra cedeu ao total aproximadamente 100 kg de material britado das granulometrias (0, 1, 2, 3 e 4) para o desenvolvimento da pesquisa. O material foi recolhido das pilhas operacionais próximas à jazida de extração como na Figura 9. A quantidade de material coletado foi determinada para garantir a realização dos ensaios propostos.

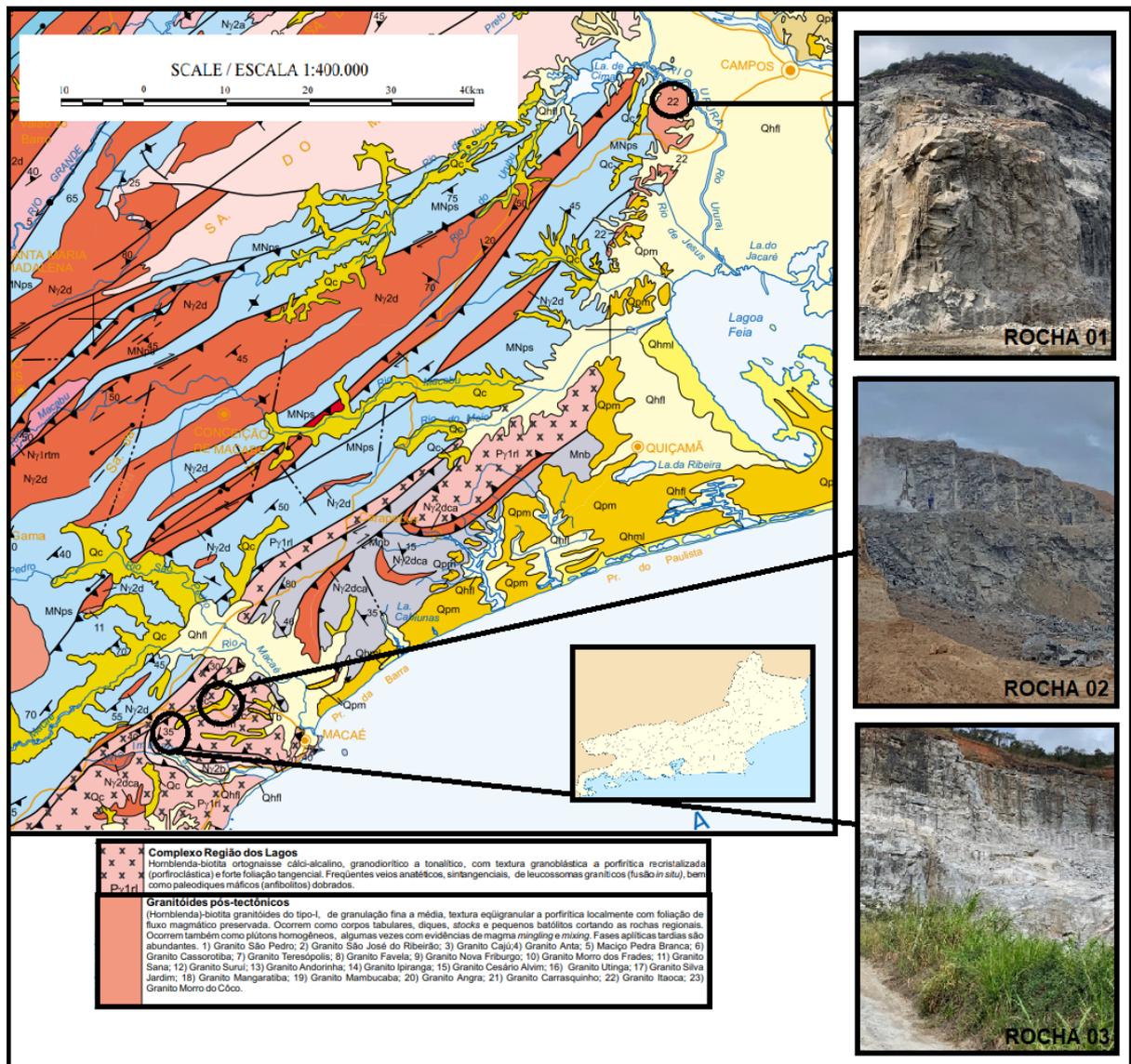


Figura 9- jazidas de extração das amostras. ROCHA01, ROCHA 02 e ROCHA 03.

A Figura 9 apresenta a localização das rochas utilizadas no presente estudo. Destaca-se que a amostra de ROCHA 01 localizada no município de Campos Dos Goytacazes está localizado sob a Unidade Bela Joana onde caracteriza-se uma região com decorrência de processos de degradação de relevo, nos quais enormes massas de gnaisses, charnockitos, migmatitos e em menores decorrências de granitos afloram em toda área de mapeada.

As amostras ROCHA 02 e ROCHA 03 estão localizadas no terreno denominado Complexo Lagos. Composta basicamente por rochas ortoderivadas, de origem plutônica, e metamorfizadas em grau forte, no limite das fácies anfibolito alto e granulito.

É uma região com atividade mineral razoavelmente desenvolvida visto a grande demanda da região em questão e facilidade de acesso e proximidade do centro consumidor. Na região existem vários tipos de rochas em exploração como ortognaisses. (MINAS ENERGIA, 2012).

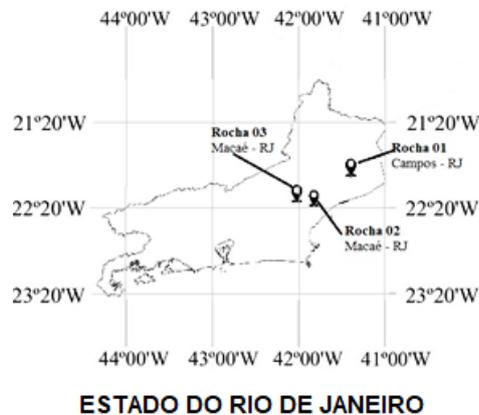


Figura 10-Localização das rochas utilizadas neste estudo.

3.5. CLIMA DA REGIÃO

O desenvolvimento da pesquisa se faz importante devido a área pela qual o traçado da EF-118 está localizado. De acordo com o EIA - Estudo de Impacto Ambiental do Distrito Industrial de São João da Barra (2011), o clima da região é quente e semi-úmido (de quatro a cinco meses secos), resultantes de fatores com de localização e topografia além de fatores como a massa de ar (Capucci *et. al.*, 2003). A região com clima característico tropical com temperatura média anual para o ano de

2021 de 23,9°C, com temperatura média do mês mais quente registrado no ano de 27°C em fevereiro, e de 21.2°C em julho, é a temperatura média mais baixa registrado na região segundo o (INMET, 2021).

Além da variação de altas temperaturas registradas na região, o índice pluviométrico tem grande relevância na concepção do lastro da EF 118, visto que a região tem grandes precipitações com variação do mês mais seco é junho e tem 24 mm de precipitação e de 202 mm o mês de Dezembro é o mês de maior precipitação. A diferença de precipitação para o mês mais seco é de 178 mm. A temperatura média pode sofrer uma variação de até cinco graus entre as estações ao longo do ano. Observa-se na região um total de chuvas da ordem de 1200 mm por ano, e a ocorrência de aproximadamente 130 dias de chuva por ano (Capucci *et. al.*, 2003).

A maior umidade relativa foi medida em dezembro de 2021 (79,07%), e menor em setembro de 2021 (70,77%). Em média, dezembro teve os dias mais chuvosos do mês (17,73 dias) e pelo contrário, o menor número de dias chuvosos medido em agosto (5,67 dias).

Entretanto, segundo os relatórios INMET (2021) a velocidade do vento da região tem variação média de 6,36 m/s para rajadas máximas na região em 2021 e a velocidade horária foi de 3,49 m/s, o que pode trazer maiores incrustações à plataforma, prejudicando assim a permeabilidade da via.

3.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para o desenvolvimento do trabalho são realizados ensaios de caracterização como descrito na norma brasileira 5564 (ABNT, 2021) que além de descrever o desenvolvimento dos ensaios, indica os valores máximos e mínimos a serem obtidos visando agregados para a utilização como lastro ferroviário como indicados na tabela a seguir.

Tabela 6-Ensaio realizados.

Ensaio	Norma técnica
Petrografia	NBR 15845 (ABNT, 2015)
Índices Físicos	NBR 5564 (ABNT, 2021)
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
Micro Deval	D6928 (ASTM, 2017) e NBR 5564 (ABNT, 2021)
Carga Pontual	D5731 (ASTM, 2008) e NBR 5564 (ABNT, 2021)
Ataque por Sulfato de Sódio	NBR 5564 (ABNT, 2021)

Além dos trabalhos especificados na Tabela 4, foram realizados ensaios não especificados na norma brasileira como: petrografia, AIMS II e Porosimetria por intrusão de mercúrio e permeabilidade que são fundamentais para a caracterização dos materiais que permitem análise mais completas acerca da durabilidade de cada rocha.

3.7. PETROGRAFIA DE AGREGADOS

A petrografia dos materiais rochosos é realizada considerando os parâmetros estabelecidos pelas normas NBR 15845 – parte 1 (ABNT, 2015). As amostras (ROCHA 01), (ROCHA 02) E (ROCHA 03), foram submetidas ao ensaio petrográfico antes e depois do envelhecimento para a obtenção completa de características da rocha.

Para a realização do ensaio as amostras passaram pelo processo de preparação, lavagem, secagem e seleção e encaminhadas para o centro de tecnologia mineral – núcleo regional do espírito santo – CETEM/ES, que está localizado na cidade de Cachoeiro de Itapemirim ES, para a verificação de importantes características do material como: estado de alteração dos minerais, natureza das amostras, morfologia, grau de microfissuramento, textura e coloração, antes e após o processo de ataque por sulfato de sódio. O equipamento utilizado na análise petrografica do material foi o Microscópio petrográfico de luz polarizada. Modelo: Axioskop 40 CARL ZEISS. Marca: ZEISS apresentado na Figura 10.



Figura 11-Equipamento utilizado na análise petrográfica.

O ensaio teve como objetivo principal estudar as propriedades das rochas coletadas do ponto de vista macro e microscópico. A realização da análise do material pétreo, se deu de forma anterior e posterior ao processo de degradação acelerado em laboratório por sulfato de sódio com número de ciclos de submersão e secagem de 60 ciclos com padrões parâmetros para a realização do ensaio determinados por norma NBR 5564 (ABNT, 2021).

3.8. ÍNDICES FÍSICOS

A determinação dos índices físicos do material para a determinação da massa específica aparente (Equação 1), porosidade aparente (Equação 2) a absorção de água (Equação 3) serão realizados de acordo com o anexo B da norma NBR 5564 (2021) e NBR 12766. Considerando que as amostras de rocha assim como descritas na (ISRM) estavam levemente intemperizadas, ou seja, pertenciam a classe II (ISRM), com a utilização de aproximadamente 10 amostras (ROCHA 01), (ROCHA 02) E (ROCHA 03) com 5 e 7 cm de diâmetro equivalente de qualquer geometria e submetê-los a procedimentos de saturação, secagem em estufa e pesagem de massa seca, saturada e submersa. O procedimento de saturação consistiu em colocar os corpos de prova em água destilada inicialmente a 1/3 de sua altura, após 4 horas até 2/3, e

após mais 4 horas, em completa submersão sendo deixados pelo tempo total de 48 horas.

Os ensaios para a determinação dos índices físicos foram realizados antes e depois do ensaio de envelhecimento acelerado em laboratório por ataque químico.

Foram realizados os ensaios nas rochas antes e depois do ensaio de envelhecimento com ataque químico e secagem em estufa, possibilitando constatar a variação dos índices físicos antes e após o envelhecimento acelerado em laboratório.

$$\rho a = \frac{Msec}{(Msat - Msub)} \quad (1)$$

$$\eta a = \frac{(Msat - Msec)}{(Msat - Msub)} \times 100 \quad (2)$$

$$\alpha a = \frac{(Msat - Msec)}{(Msec)} \times 100 \quad (3)$$

Onde (ρa) trata-se da Massa específica aparente (g) do agregado; ($Msec$) a Massa da amostra seca (g); ($Msat$) Massa da amostra saturada (g); ($Msub$) Massa da amostra submersa (g); (ηa) Porosidade aparente (%) e (αa) a Absorção de água (%).

3.9. POROSIMETRIA

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados através do equipamento porosímetro por intrusão automática de mercúrio, modelo IV 9500 Micromeritics Mercury porosimeter em amostras de aproximadamente 1cm (Figura 11).

Com o ensaio é possível a obtenção de parâmetros dos poros como: volume dos poros, área real da superfície do poro e a porosidade do material próxima a real. Os ensaios foram realizados nas amostras (ROCHA 01), (ROCHA 02) E (ROCHA 03) anterior e posterior ao envelhecimento acelerado em laboratório através de ataque químico.

A amostra foi colocada em um recipiente chamado de penetrômetro, a partir disso o material é pré evacuado e depois imersa em mercúrio. As técnicas de são baseadas na intrusão de mercúrio em estruturas porosas sob pressões rigidamente

controladas. A pressão é aumentada em incrementos sucessivos e para cada valor de pressão e o equilíbrio alcançado é registrado o volume de mercúrio permeado é registrado. Os dados determinam o volume dos poros do agregado dentro de uma determinada faixa de tamanho de acesso.



Figura 12-Porosímetro Autopore IV 9500 do Laboratório de Engenharia Civil da UENF.

3.10. GRANULOMETRIA

A distribuição granulométrica do lastro foi verificada de acordo com a ABNT NBR NM 248 estando de acordo com o determinado a partir da norma NBR 5564 (ABNT, 2021) que determina o lastro padrão na Tabela 2.

Tabela 2-Distribuição granulométrica do lastro padrão – NBR 5564 (ABNT, 2021)

tamanho da peneira de acordo com ABNT mm	Porcentagem de massa acumulada (%)	
	Padrão A	Padrão B
76,2	NÃO APLICAVEL	0 - 0
63,5	0 - 0	0- 10
50,8	0- 10	NÃO APLICAVEL
38	30-65	40-75
25,4	85-100	NÃO APLICAVEL
19	NÃO APLICAVEL	90-100
12,5	95-100	98 - 100

A granulometria e a taxa de incrustação são definidas levando-se em conta um maior número de peneiras contabilizando o material retido entre as malhas #38 mm e #12,5mm para os agregados graúdos. Além disso foi realizado o peneiramento do pó de rocha utilizado na verificação da permeabilidade do lastro, entre #6,7 mm e #0,075 mm. Foi realizado o peneiramento de cerca de 6kg de cada rocha para o desenvolvimento do ensaio.

Conforme o índice que é proposto pela *South-african railway spoornet* define que a incrustação do lastro deve ser avaliada levando em conta um maior numero de peneiras, como descrito na Equação 4. De acordo em esse índice, a limpeza deve ser realizada se FV for superior a 80%. As diferentes classificações de acordo com (FV) são avaliadas através das Equações descritas abaixo.

$$FV = (0,4 F19) + (0.3F6.7) + (0.2F1.18) + (0.1F0.15) \quad (4)$$

$$FV19 = \frac{(\%de\ material\ passante\ pela\ peneira\ 19mm) \times 100}{27} \quad (5)$$

$$FV6.7 = \frac{(\%de\ material\ passante\ pela\ peneira\ 6.7mm) \times 100}{18} \quad (6)$$

$$FV1.18 = \frac{(\%de\ material\ passante\ pela\ peneira\ 1.18mm) \times 100}{11.5} \quad (7)$$

$$FV0.15 = \frac{(\%de\ material\ passante\ pela\ peneira\ 0.15mm) \times 100}{27} \quad (8)$$

O ensaio de granulometria foi realizado a partir das amostras intactas e submetidas ao ensaio de ataque por sulfato de sódio. Todo material foi submetido ao ataque por sulfato e foi constatado a alteração do pó de rocha ocorreu diferença após a segunda casa decimal o que não interferiu diretamente na granulometria do material degradado por sulfato de sódio.

3.11. ENSAIOS MECÂNICOS DE AGREGADOS PARA LASTRO

As amostras (ROCHA 01), (ROCHA 02) E (ROCHA 03) foram submetidas aos ensaios de caracterização mecânica de acordo com as normas regulamentadoras de cada um dos ensaios a serem realizados, a fim de se obter parâmetros e resultados válidos, como na tabela abaixo. Os ensaios a serem realizados para a obtenção de características importantes antes e depois da degradação serão: Point Load Test, Micro Deval Test e o ensaio de abrasão Los Angeles.

Tabela 7- Ensaios De Caracterização Mecânica

Ensaio.	Norma técnica.
Agregado Graúdo Ensaio de Abrasão "Los Angeles"	NBR 5564(2021).
Standart Test Method For Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.	ASTM D5731 (2016).
Sandart Test Method For Determination for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasiom in the Micro-Deval Apparatus.	ASTM D 6928 (2017).

3.12. MICRO DEVAL TEST

O micro deval, consiste na análise do desgaste acelerado dos agregados quando submetidos a um ambiente de hidratação. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual Do Norte Fluminense – UENF que possui um dos únicos equipamentos do país.

O ensaio seguiu os padrões determinados na norma D6928 (ASTM, 17) com a utilização de amostras representativas do material analisado de $1500 \pm 5g$ de massa de faixa granulométrica para a execução do ensaio é de 9,5mm e 19mm sendo submetidas a rotações em um tambor com a presença de esferas de aço e a adição de 2 litros de água.

Na tabela abaixo é apresentado o procedimento para a realização do ensaio.

Tabela 8-procedimento de ensaio micro deval

micro deval	
massa de esferas (g)	5000
diâmetro das esferas (mm)	9,5
rotações (rpm)	100
tempo (h)	2

A perda é a quantidade de material que passa pela peneira de 1,18mm, expressa como porcentagem em massa da amostra original NBR 5564 (2021). A perda por abrasão (MD) é a propriedade do material correspondente a abrasão dos agregados graudos, em porcentagem, quantificada como perda de massa do agregado analisado conforme apresentado na Equação 9.

$$MD = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad (9)$$

Onde (MD) porcentagem de perda por abrasão do material por micro deval; (A) massa da amostra seca antes do ensaio e (B) massa da amostra retida na peneira 1,18mm após o ensaio.



Figura 13- ensaio de micro deval

Verifica-se que a partir dos menores resultados de perda por abrasão do material analisado refere-se a melhores valores de resistência ao desgaste.

3.13. ABRASÃO LOS ANGELES

O ensaio de abrasão Los Angeles, listado nos ensaios para lastro ferroviário da norma NBR 5564 (2021), tem a função da medição da degradação dos agregados minerais de granulometria padrão resultantes de uma combinação de várias ações, incluindo abrasão ou atrito, impacto e quebra em um tambor de aço rotativo contendo esferas de aço especificadas em norma Ge *et al.* (2018).

O Teste de Desgaste de Los Angeles foi realizado expondo materiais de rocha a condições reais da ferrovia (cargas cíclicas dinâmicas) que tipicamente degradam o lastro.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NM 51(ABNT, 2001) que determina que a amostra deve ser de granulometria entre 50,8 mm e 25,4mm (graduação F), as quais mais se aproximam da condição real dos agregados a serem utilizados no lastro ferroviário. Os procedimentos para a realização do ensaio estão listados na tabela a seguir.

Tabela 9-Procedimento para o ensaio de Abrasão de Los Angeles

Los Angeles	
Graduação	F
Porção de Teste (g)	10000 ± 75
Número de Esferas	12
Massa das Esferas (g)	5000±25
Rotações do Tambor	1000

A verificação da perda de massa por abrasão (LA) referente a cada amostra analisada se deu através da Equação 10, considerando a massa da amostra seca (m) e a massa da amostra seca retida na peneira 1,7 após o ensaio (m₁).

$$LA = \frac{(m - m_1)}{m} \times 100 \quad (10)$$

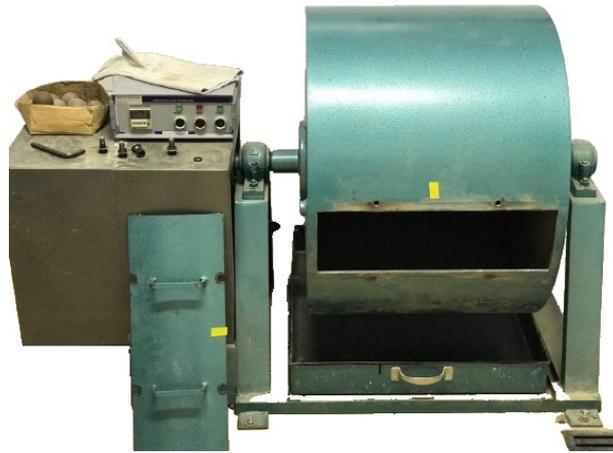


Figura 14-abrasão Los Angeles - CETEM – ES

Para o desenvolvimento do ensaio as amostras passaram pelo processo de preparação, lavagem, secagem e seleção e encaminhadas para o centro de tecnologia mineral – núcleo regional do espírito santo – CETEM/ES, que está localizado na cidade de Cachoeiro de Itapemirim ES.

3.14. POINT LOAD TEST

Neste trabalho foi utilizado o ensaio de teste de carga pontual para verificar a resistência a compressão uniaxial das rochas. A análise ocorre, pois, as amostras coletadas nas pilhas operacionais são irregulares e não representa o formato da amostra necessário para o teste de compressão uniaxial, o que inviabiliza a realização do ensaio.

Para a realização do ensaio de Point Load (Figura 12) são utilizados 20 fragmentos de rocha de cada amostra com diâmetros que varia entre 30 e 80 mm, sendo submetidos a uma carga pontual crescente por meio de um par de ponteiras cônicas até a ruptura por quebra do material. A carga de rompimento é registrada e utilizada para calcular o índice de resistência à carga de pontual (Equação 4) em conformidade com a D5731 (ASTM, 2008).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (11)$$

Em que se determina (I_s) – índice de carga pontual, (P) Carga de ruptura da amostra, e (D_e) o diâmetro equivalente.

$$D_e^2 = \frac{4WD}{\pi} \quad (12)$$

Em que (W) trata-se da menor largura da amostra e (D) a distância entre os pontos de carga.

O valor do índice de resistência à carga pontual para um diâmetro de 50 mm (I_{s50}) de acordo com a norma D5731 (ASTM, 2008) é obtido através da Equação 13.

$$I_{s50} = FC \times I_s \quad (13)$$

FC = Fator de correção.



Figura 15-Point Load Test – equipamento da UENF.

Os valores obtidos no ensaio Point Load Test apresentam variações principalmente quando se determina o desvio padrão e se compara com o outro conjunto de dados, ou seja, os desvios padrões das médias comparadas podem ser coincidentes, dificultando a análise. Diante deste contexto, se utiliza a estatística de weibull para verificar a probabilidade de falha de um conjunto de amostras.

Com a utilização da estatística de Weibull foi verificada a probabilidade de falha e de ruptura das rochas como representado na Equação 15. Que é caracterizado a probabilidade de falha de um agregado de lastro sob um nível de tensão aplicado de acordo com Koomishi (2021).

Verifica-se que quanto maior o valor do módulo “m” maior homogeneidade entre as amostras em análise. Para se calcular a função densidade de probabilidade de Weibull, é necessário estabelecer um estimador de probabilidade:

$$P = \frac{(i - 0,3)}{(N + 4)} \quad (14)$$

Onde (P) é a probabilidade de falha ou ruptura; (i) índice de ruptura em ordem crescente; (N) número total de amostras em cada grupo.

A partir deste estimador, calcula-se o módulo m de Weibull que é o coeficiente angular da Equação 15 abaixo:

$$WB = LN(LN\left(\frac{(1)}{(1 - P)}\right)) \quad (15)$$

Onde (WB) é weibull; (P) é a probabilidade de falha ou ruptura;

Nesse trabalho a metodologia de weibull foi empregada para descrever a resistência a fratura de rochas antes e depois do processo de envelhecimento de laboratório por ataque químico.

A partir dos resultados do point load (Is50) pode-se determinar a resistência à compressão (RCU) a partir da relação proposta por Al-harhi (2001). A solução para se obter os valores de compressão uniaxial através do point-load contou com as correlações de resistência a compressão uniaxial com Is50 a Figura 16 de diversas rochas estudadas por Al-Harhi (2001) como apresentado na Figura 16.

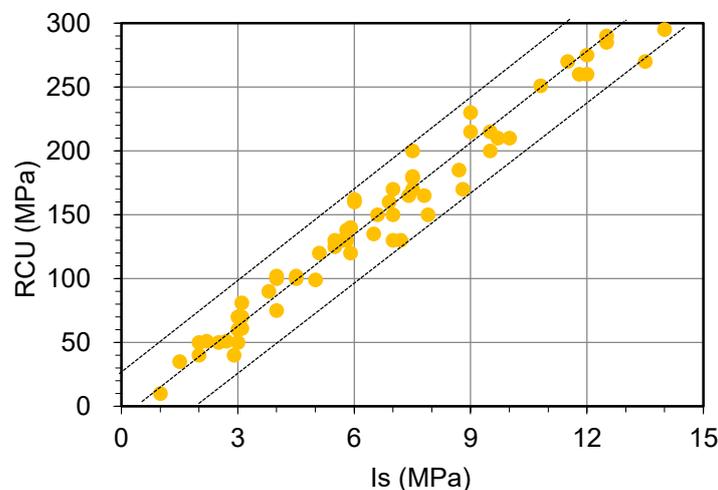


Figura 16- Relação entre Is50 e RCU (Al-Harhi, 2001).

3.15. AIMS II

O processamento digital de imagens (PDI) foi usado para analisar a forma, ângulo e textura das amostras de rochas representativas a serem utilizadas no lastro ferroviário. O instrumento utilizado para realizar esta técnica, AIMS (Aggregate Image Measurement System). O equipamento utilizado para realização da pesquisa foi do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ localizado no setor de pavimentos. O equipamento é basicamente composto por uma caixa com diferentes bandejas de diferentes granulometrias, câmera microscópica e dois tipos de iluminação.

Os testes foram realizados após a preparação das amostras como indicado pela norma DNIT 432 - ME (DNIT, 2020), foi realizada a análise de cinco frações de rochas consideradas graúdas ($\geq 4,75$ mm) de cada uma das amostras (rocha 01, rocha 02 e rocha 03). É indicado na Tabela 10 a quantidade de partículas de cada fração investigadas a partir da norma.

Tabela 10-quantidade de partículas por fração Fonte: DNIT 432 – ME (2020) adaptado

Tamanho	Quantidade de Partículas
25mm (1")	50
19mm (3/4")	50
12,5mm (1/2")	50
9,5mm (3/8")	50
4,75mm (#4)	50

A partir da granulometria do agregado, foi disposto na respectiva bandeja granular e inserida no interior do equipamento para a rotação e início do processamento de imagem como na Figura 17.

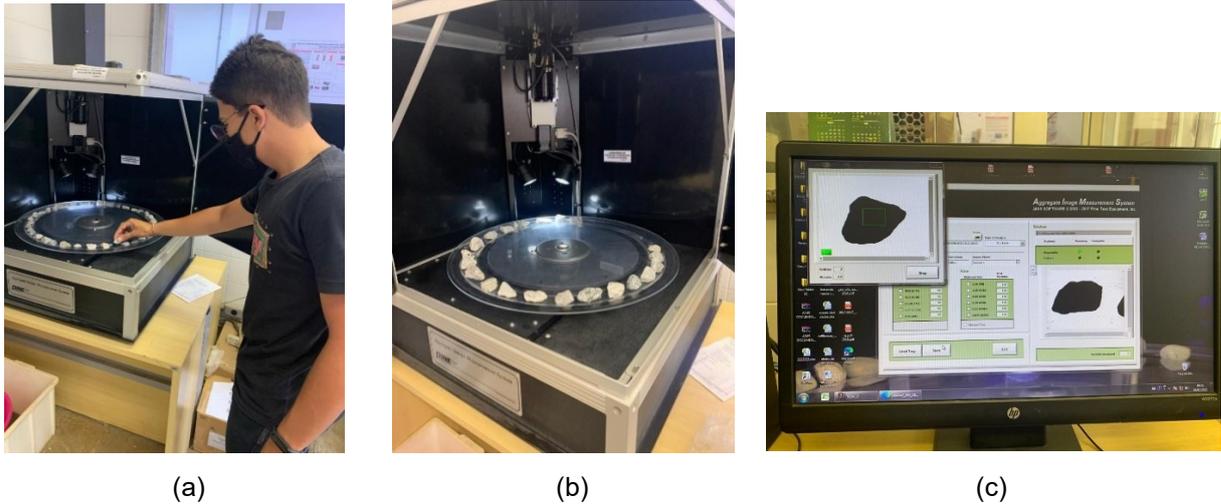


Figura 17- (a) momento do posicionamento das partículas na bandeja do equipamento, (b) partículas já posicionadas para análise, (c) tela inicial do software e início da análise.

Com o início do processamento acontece o processo de digitalização e processamentos de imagem. Após o ensaio são apresentados automaticamente por meio de planilhas do Microsoft Excel os resultados das análises.

✓ Esfericidade

O valor da esfericidade para agregados grãos pode variar de 0 a 1 sendo maior o quanto mais próximas as três dimensões, ou seja, cúbica. Na equação é apresentado a equação para a obtenção dos valores desta propriedade.

$$Esfericidade = 3 \sqrt{\frac{d_{Me} - dI}{d^2 Ma}} \quad (15)$$

Onde (d_{Me}) trata-se da Menor dimensão da partícula, (dI) a Dimensão intermediária da partícula e (dMa) a Maior dimensão da partícula.

✓ Angularidade

As características de angularidade dos materiais analisados é a quantificação das mudanças de direção ao longo do contorno da partícula após o processamento de imagem. Os valores referentes a angularidade podem variar entre 0 e 10.000. Na Equação 16 representada abaixo é apresentado a equação para a determinação da angularidade através do AIMS II a partir de sua classificação.

$$\text{Angularidade} = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} \theta - \theta_{i+3} \quad (16)$$

Onde (θ) trata-se do ângulo de orientação dos pontos de contorno Y é o valor do deslocamento expresso em mm, (n) número total de pontos e (i) i-ésimo ponto de contorno da partícula analisada.

✓ Textura

A verificação de características como textura e rugosidade das partículas analisadas é realizada através do parâmetro textura. Esse tipo de verificação é realizado em agregados graúdos e os valores de referência podem variar entre 0 a 1000, ou seja, o material mais polido tem valores próximos a 0. Na equação 17 é apresentado a equação de cálculo que classifica o material quanto a sua textura.

$$\text{Textura} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (17)$$

Onde (n) nível de decomposição da imagem analisada, (N) Número total de coeficientes em uma imagem detalhada; (D) Função de decomposição; (i) Direção da textura (1, 2 ou 3); (j) índice wavelet e (x, y) Definem a localização dos coeficientes no domínio transformado.

3.16. PERMEABILIDADE

Os testes de permeabilidade foram realizados utilizando um permeâmetro de carga constante com as seguintes dimensões: área de 188,60 cm², diâmetro do permeâmetro de 15,50 cm e carga hidráulica para a realização do ensaio de 105 cm para analisar amostras de lastro limpo e amostras contaminadas com 10%, 20% e 40% de pó de pedra em termos de volume para entender a variação da permeabilidade a Figura 18 mostra o lastro contaminado dentro do permeâmetro.

Para a realização do ensaio foi utilizado manta drenante no fundo do equipamento para evitar o entupimento do dreno por partícula fino durante o teste. Em uma segunda etapa foi inserido no permeâmetro o volume de material a ser ensaiado mais volume correspondente ao percentual previamente definido de pó de rocha (0%,

10%, 20% e 40%). Por fim a tampa foi colocada no equipamento e selada. A Figura 18 mostra o permeâmetro durante o teste.

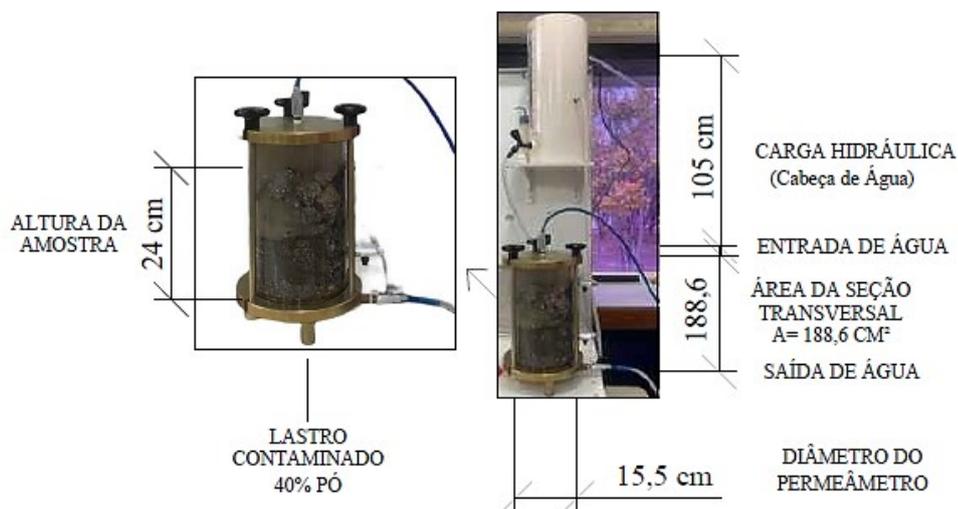


Figura 18-lastro contaminado com permeâmetro.

Os resultados do teste foram registrados após 24h de água circulando pela amostra. Foram realizadas duas repetições para cada amostra fazendo cinco medições em tempos diferentes e considerando a carga hidráulica de 105 cm e temperatura de 20°C. A Tabela 11 a seguir mostra características de cada teste.

O ensaio foi realizado antes e após o ataque por sulfato de sódio para a verificação da taxa de condutividade hidráulica do material, simulando piores condições de drenagem com partículas da própria rocha fragmentada pela ação do tráfego e pelo intemperismo local, ou seja, condição saturada.

Tabela 11- Características do teste de permeabilidade.

Número de Testes	Incrustação (%)	Índice de vazios rocha 1	Índice de vazios rocha 2	Índice de vazios rocha 3	Diâmetro do Permeâmetro (cm)	Área da Seção Transversal (cm ²)	Duração da Medição (h)	Altura da Amostra (cm)	Altura de Água (cm)
		(e)	(e)	(e)					
1	0	1,04	1,01	1,02	15,5	188,6	24	24	105
2	0	1,04	1,01	1,02	15,5	188,6	24	24	105
3	10	0,93	0,90	0,91	15,5	188,6	24	24	105
4	10	0,93	0,90	0,91	15,5	188,6	24	24	105
5	20	0,83	0,80	0,81	15,5	188,6	24	24	105
6	20	0,83	0,80	0,81	15,5	188,6	24	24	105
7	40	0,62	0,60	0,61	15,5	188,6	24	24	105
8	40	0,62	0,60	0,61	15,5	188,6	24	24	105
9	100	0,62	0,60	0,61	15,5	188,6	24	24	105
10	100	0,62	0,60	0,61	15,5	188,6	24	24	105

A condutividade hidráulica do lastro (K) no presente trabalho foi calculado usando a Equação 17.

$$K = \frac{VL}{Aht} \quad (18)$$

Onde (V) trata-se do volume do líquido coletado; (h) carga da água; (t) tempo de duração do teste; (A) trata-se da seção transversal do permeâmetro e (L) a altura da amostra.

Foram realizadas duas repetições para cada amostra fazendo cinco medições em tempos diferentes considerando as características para a realização do teste representado na Tabela 11. Para a realização do ensaio a amostra representativa de lastro ferroviário é saturada e realizado as medições, entretanto, o mesmo não permanece saturado, simulando assim condições de inundação, indesejável para a via lastrada.

A partir disso é possível a obtenção dos valores médios da condutividade hidráulica do material para cada taxa de incrustação. Após a obtenção dos resultados da condutividade hidráulica de cada uma das taxas de incrustação foi corroborado os resultados para a verificação da redução da condutividade hidráulica.

3.17. RESISTÊNCIA A INTEMPERES (RI)

As amostras Rocha 01, Rocha 02 e Rocha 03 foram submetidas ao período de imersão em solução de sulfato de sódio. Para a solução foi utilizado 750 g de sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) para cada litro de água destilada são suficientes para saturação a 22 °C NBR 5564 (ABNT, 2021). Foi utilizado essa concentração visto que se trata do limite de solubilidade desse produto químico, simulando as piores condições de águas sulfatadas em contato com o lastro.

O ensaio foi executado em um intervalo de tempo pré-definido estabelecido por norma NBR 5564 (ABNT, 2021), que determina: 18 horas de saturação em solução sulfatada e 4 horas de secagem em estufa a 100°C, sendo 15 minutos de resfriamento após estufa para evitar choques térmicos. Após a saturação das amostras o material passou pela secagem em estufa, a temperatura de 100°C, num período previamente determinada como recomendado na norma NBR 5564 (2021). Foram utilizados 60

ciclos de umidade e secagem. O material submetido ao ensaio foram as amostras analisadas e submetidas aos ensaios de petrográfica, ensaio de índices físicos, porosimetria de mercúrio, Micro-Deval, ensaio de carga pontual e permeabilidade. Na Figura 19 é indicado ilustrado a realização do ensaio.



Figura 19- Processo de Ataque Por Sulfato De Sódio

Ao final do ensaio foi realizado conforme NBR 5564 (ABNT,2021) a lavagem do material em solução de cloreto de bário e seco em estufa, para a garantia da finalização do processo de ataque químico.

Os resultados de resistência a intempérie (Equação 19) foram obtidos através das amostras dos índices físicos. Estas foram pesadas antes e depois do processo de ciclagem.

$$R_i = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (19)$$

Onde (R_i) trata-se da resistência a intempérie, (M_i) massa inicial dos corpos de prova (M_f) massa final dos corpos de prova.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS PARA LASTRO

O capítulo IV da presente pesquisa é voltado a apresentação e análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados. De início é apresentado os dados obtidos a partir da análise petrográfica das rochas. Em seguida os valores obtidos nos ensaios de índices físicos, ensaios mecânicos e de ataque por sulfato de sódio.

4.2. PETROGRAFIA

A realização do ensaio de petrografia foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 15485 (ABNT, 2015) com a utilização de amostragem de uma amostra de mão bruta de cada material coletada diretamente das pilhas de distribuição de cada jazida; foi realizada uma análise para cada uma das três amostras intactas e degradadas, ROCHA 01, ROCHA 02 E ROCHA 03.

A síntese das características mineralógicas e propriedades petrográficas estão relacionadas na tabela a seguir.

✓ Rocha Intacta

A ROCHA 01 classificada como meta granito, rocha metamórfica e classificada a partir de petrografia como meta granito, em termos de composição mineralógica, a ROCHA 01 é constituído por minerais comuns as rochas ígneas como: quartzo, feldspatos, biotita e muscovita e composta minerais acessórios constituintes de zircão e apatita, apresenta grãos que variam de faces definidas e indefinidas. A partir da estrutura do material foi possível observar que apresenta aspecto maciço e ausência de elementos lineares ou planares nítidos, indicando, via de regra, amplo domínio da recristalização sobre a deformação, predomínio do metamorfismo termal.

A presença de minerais félsicos se dá pela presença do quartzo, plagioclásio e muscovita, mais raro de ser encontrado, esses minerais são os responsáveis pela coloração branca e acinzentada e trazer o brilho vítreo e dureza alta ao material visto

que o material apresenta um total de 47% de minerais félsicos (feldspato); em contrapartida os minerais biotita (20%) e microclina (35%) são minerais com facilidade de se alterar o que pode influenciar de forma negativa o comportamento da rocha no processo de envelhecimento acelerado por sulfato de sódio, conforme indicado por Miskovsky *et al.* (2004) em suas pesquisas com materiais provenientes da região da Suécia.

No meta granito ROCHA 01 observa-se processo de sericitização já com algumas porções da rocha com a formação da sericita como mineral secundário (Figura 20). A Tabela 12 apresenta um resumo das propriedades petrográficas das rochas.

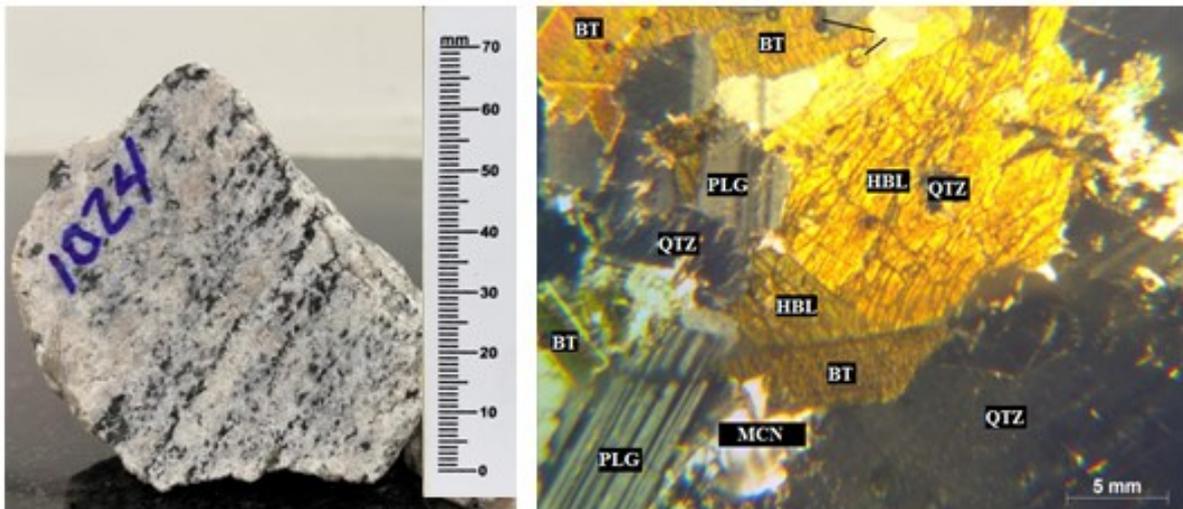


Figura 20- Petrografia da ROCHA 01

NOTA: Hbl- horblenda; Qtz- quartzo; Plg- plagioclásio; Bt- biotita, Msc- muscovita; Mcn: microclina; Mq: mirmequita, Mo: mineral opaco, Z: zircão, A: apatita.

Na análise petrográfica da ROCHA 02 de coloração cinza esbranquiçada, trata-se de uma rocha do tipo metamórfica e classificada como gnaiss pode ser considerada uma rocha de textura inequigranular, granolepidoblástica, com granulação variando de fina a média e grãos variando de hipidiomórficos (algumas faces bem definidas) a xenomórficos (sem faces definidas) e superfícies de contato irregular entre os grãos (Figura 21) ou granulação Fanerítica pois é constituída de cristais de minerais maiores que 0,5mm com granulação predominantemente media e fina o que indica que a rocha possui resistência a abrasão e ao impacto razoável, o que corrobora com Miskovsky *et al.* (2004).

Além de ser constituída por minerais Félsicos comuns as ígneas a amostra ROCHA 02 apresenta minerais monoclínicos, constituídos por mistura isomorfa de silicatos de cálcio, magnésio, ferro, alumínio e, por vezes, também de sódio, manganês ou titânio conhecida como Hornblenda (20%) apesar da composição, esse mineral apresenta a tenacidade quebradiça o que pode ser uma característica indesejada a utilização da rocha.

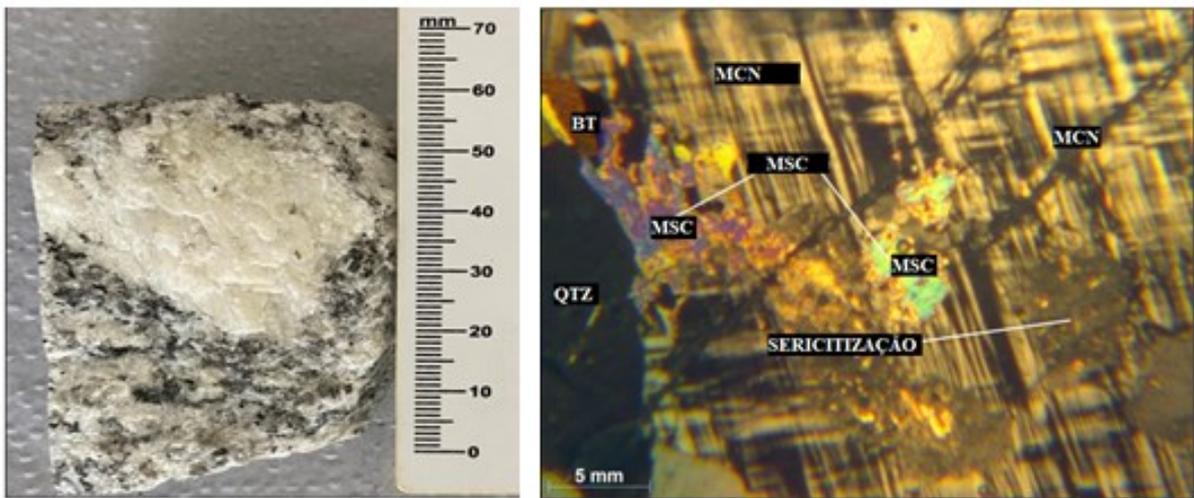


Figura 21- Petrografia ROCHA 02

NOTA: Hbl- hornblenda; Qtz- quartzo; Plg- plagioclásio; Bt- biotita, Msc- muscovita; Mcn: microclina; Mq: mirmequita, Mo: mineral opaco, Z: zircão, A: apatita.

A ROCHA 03 apresenta características mineralógicas diferentes das demais, assim com a ROCHA 01, a ROCHA 03 possui estrutura maciça, textura granoblástica, grau de microfissuramento moderado e fraco, grau de alteração pouco alterada e contatos irregulares entre os grãos além de apresentar granulação predominante média.

O meta granito ROCHA 03 possui minerais como quartzo, plagioclásio, microclínio, hornblenda, biotita, muscovita e mineral opaco. Com minerais acessórios de ambos os materiais se constituem de zircão e apatita, apresenta grãos que variam de faces definidas e indefinidas. É possível ainda observar na ROCHA 03 a presença de textura mirmequítica, onde se observa o intercrescimento de quartzo vermicular em plagioclásio, preferencialmente quando o último está em contato com um k-feldspato (microclínio), como ilustrado na Figura 22.

É possível observar que dentre os demais materiais é a que apresenta menor composição de minerais facilmente alteráveis (Plagioclásio ~ 15% e Biotita ~ 15%).

Entretanto, com um total de 30% podendo fazer com que o material seja suscetível ao intemperismo.

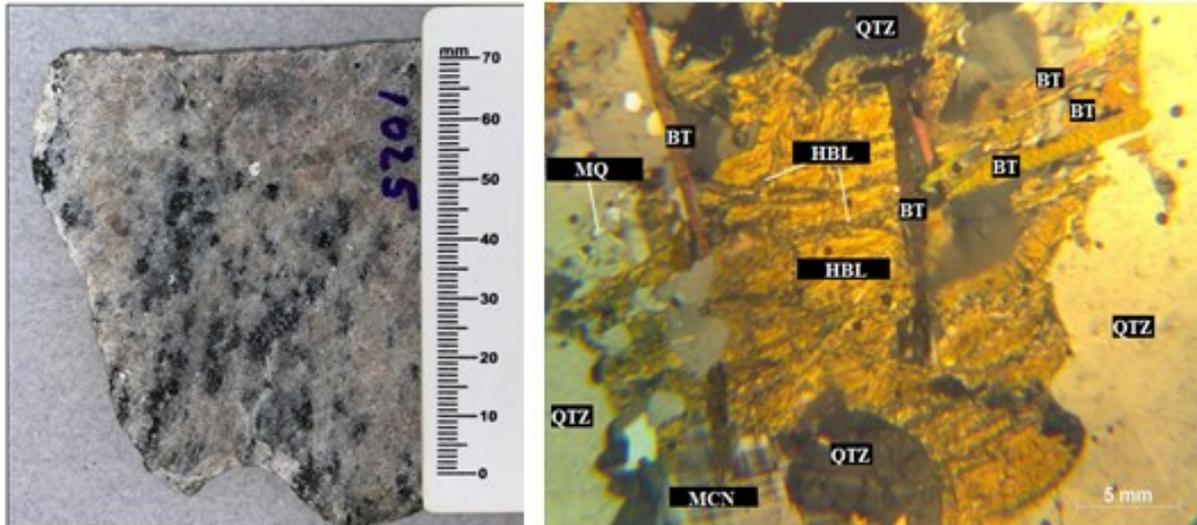


Figura 22- Petrografia ROCHA 03

NOTA: Hbl- hornblenda; Qtz- quartzo; Plg- plagioclásio; Bt- biotita, Msc- muscovita; Mcn: microclina; Mq: mirmequita, Mo: mineral opaco, Z: zircão, A: apatita.

Tabela 12- Síntese da análises petrográficas ROCHA01, ROCHA 02 E ROCHA 03.

Propriedades	Materiais			
	ROCHA 01	ROCHA 02	ROCHA 03	
Coloração	Branco acinzentado	Cinza esbranquiçado	Cinza rosado	
Granulação	Fina (5%), média (50%) grossa (45%)	Fina (20%) Média (80%)	Média (80%) Fina (20%)	
Textura	Granoblástica	Granolepidoblástica	Granoblástica	
Microfissuras	Moderado	Fraco	Fraco	
Alteração	Pouco alterado	Pouco alterado	Pouco alterado	
Classificação - Mineralogia (%)	Hbl	-	20	22
	Qtz	22	15	20
	Plg	15	17	15
	Bt	20	14	15
	Msc	5	30	5
	Mcn	35	-	20
	Mq	-	-	1
	Mo	1	1	1
	A	-	1	1
	Z	2	1	1

NOTA: Hbl- hornblenda; Qtz- quartzo; Plg- plagioclásio; Bt- biotita, Msc- muscovita; Mcn: microclina; Mq: mirmequita, Mo: mineral opaco, Z: zircão, A: apatita.

✓ Rocha degradada

Na presente seção é apresentado os resultados obtidos na petrografia das rochas analisadas após o ataque por sulfato de sódio. Após o processo foi verificado, a partir da realização do ensaio, devido a heterogeneidade do material foi possível verificar diferenças no teor de minerais constituintes das rochas ensaiadas, por se tratar de rochas metamórficas. Desta maneira se considera diferenças de minerais constituintes que pode trazer alterações após o ataque por sulfato de sódio. Verificou-se grandes porcentagens de minerais de menor dureza e alteráveis ao sulfato de sódio.

A partir do ataque por sulfato de sódio realizado nas amostras investigou-se por análise petrográfica macro e microscópica a alteração dos minerais (Figura 23, 24 e 25). Um resumo das propriedades petrográficas das rochas após processo de ataque por sulfato de sódio é apresentado na Tabela 13.

A seguir na Figura 23 é apresentado o resultado da análise petrográfica o meta granito (ROCHA 01) referente ao processo de ataque por sulfato de sódio.

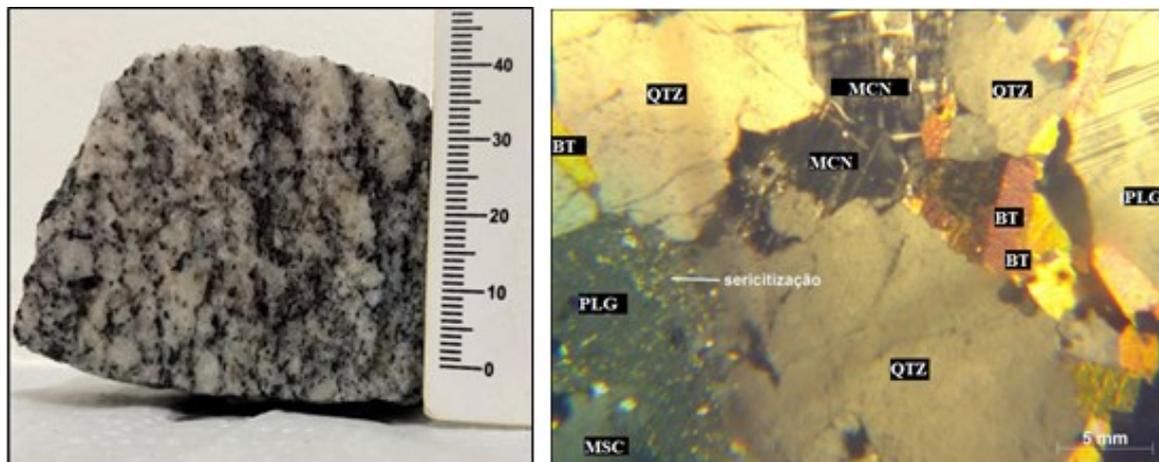


Figura 23-: Petrografia da ROCHA 01, após 60 ciclos de ataque por sulfato de sódio.

Na tabela 11 é apresentado a síntese de resultados obtidos na análise petrografia após ataque por sulfato de sódio. A Rocha apresenta textura granolepidoblástica e inequigranular variando de fina a grossa. Seus grãos possuem forma hipidiomórfica (algumas faces bem definidas) a xenomórfica (sem face definida). O bandamento gnáissico presente é marcado pela biotita nas porções máficas e félsicos de quartzo e feldspatos deste modo, é possível observar alterações

no teor de minerais após o processo de ataque como apresentando quartzo (20%), plagioclásio (18%), biotita (25%), muscovita (5%), microclina (30%). Sua mineralogia acessória conta com (1%) de minerais opacos e (1%) zircão.

Observa-se processo de sericitização (Figura 21). A composição mineralógica essencial é de quartzo, plagioclásio, microclina, muscovita, biotita. O quartzo é incolor, xenomórfico, de granulação média. O plagioclásio é incolor, xenomórfico, de granulação fina a média. A microclina está em grande proporção na rocha, com grãos hipidiomórficos a xenomórficos e granulação variando de média a grossa. É observada textura mirmequítica em que ocorre o intercrescimento de quartzo vermicular em plagioclásio, preferencialmente quando o último está em contato com um k-feldspato.

A muscovita é incolor, hipidiomórfica, de granulação fina e ocorre bem espaçada na rocha. A biotita possui pleocroísmo marrom-castanho, grãos hipidiomórficos e granulação fina a média. A biotita marca o bandamento máfico da rocha. Os minerais acessórios presentes são os minerais opacos e zircão. Os minerais opacos ocorrem xenomórficos e de granulação fina a média. O zircão possui granulação fina, birrefringência alta, grãos arredondados, halos escuros e estão inclusos na biotita

Pode-se observar que não houve mudança significativa nos minerais principais que compõem o meta granito ROCHA 01, apenas a queda de cerca de 1% de zircão, além disso os minerais encontrados no material após ciclagem não são resultado do após ataque por sulfato de sódio, não havendo alteração no grau de microfissuramento embora alguns cristais de quartzo mostrem-se comparativamente mais microfissurados (Figuras 20 e 23). A alteração na granulação passou a ser predominantemente média se comparada a rocha intacta.

A ROCHA 02 após ataque por sulfato de sódio apresentou petrografia semelhante a análise realizada a partir do material intacto, entretanto, o gnaiss ROCHA 02, após o ataque por sulfato de sódio, foi possível observar o aumento em torno de 10% de hornblenda tornando-se o mineral de maior influência mineralógica na rocha, sendo plausível considerar esta variação mais à heterogeneidade natural desta rocha. Constatou-se ainda o desprendimento dos minerais superficiais pelo processo de envelhecimento acelerado do mineral e/ou a sua transformação da hornblenda em muscovita por meio dos processos intempéricos.

Na Figura 24 pode-se verificar o resultado obtido na petrografia do material analisado após o processo de ataque por sulfato de sódio.

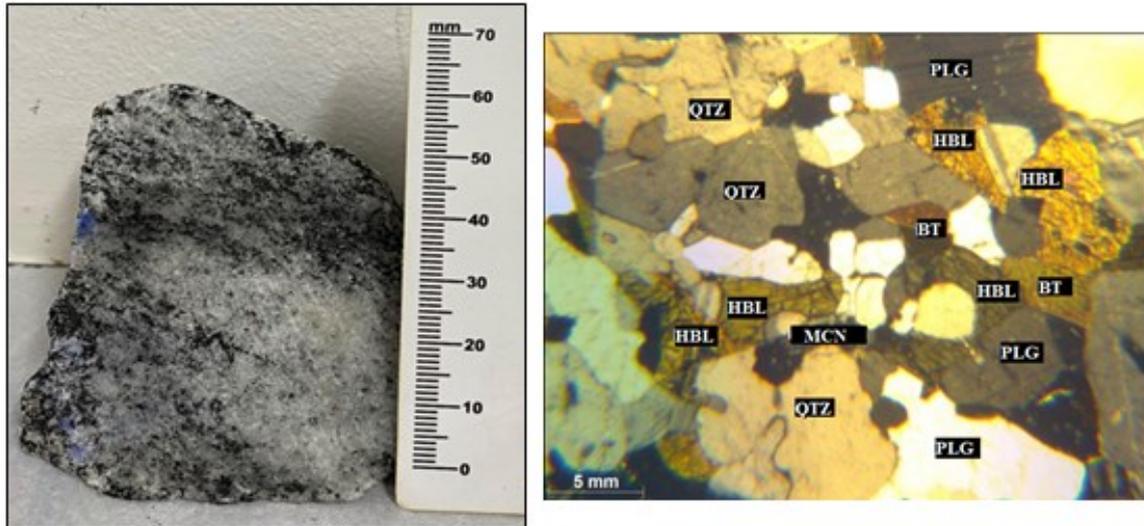


Figura 24-Petrografia da ROCHA 02, após 60 ciclos de ataque por sulfato de sódio.

Rocha metamórfica que apresenta textura granolepidoblástica e inequigranular variando de fina a média. Seus grãos possuem forma hipidiomórfica (algumas faces bem definidas) a xenomórfica (sem face definida). O bandamento gnáissico presente é dividido em máfico pelos minerais de biotita e hornblenda e félsicos de quartzo e feldspatos (Figura 22), os constituintes minerais principais são: (30%) hornblenda, quartzo (16%), plagioclásio (10%), biotita (25%), muscovita (2%), microclina (15%). Sua mineralogia acessória conta com (1%) de minerais opacos e (1%) zircão.

Os cristais de quartzo são incolores, de granulação variando de 0,5 a 2 mm, quanto a sua forma são hipidiomórficas a xenomórficas, apresentam hábito prismático e brilho vítreo. Os cristais de plagioclásio são xenomórficos, de granulação entre 0,5 e 3 mm, coloração acinzentada e apresentam brilho vítreo. A microclina possui grãos hipidiomórficos a xenomórficos, granulação 0,5 a 4 mm, coloração esbranquiçada. A hornblenda possui cor preta, xenomórfica, de granulação entre 2 e 4 mm. Os cristais de biotita são pretos, de granulação variando de 1 a 3 mm, com forma hipidiomórfica, com hábito lamelar e brilho vítreo. Há a presença de muscovita como mineral acessório que se apresenta incolor, hipidiomórfica e granulação menor que 1 mm.

Além disso é possível verificar que a ROCHA 02 apresenta variação no teor de minerais presentes e baixo grau de microfissuramento. Foi constatado também a partir da análise petrografia da amostra maior teor do mineral do mineral hornblenda e

biotita, esse aumento pode ser resultado da heterogeneidade da rocha no qual foi realizado as comparações entre as análises. Além disso, verificou-se a presença do mineral microclina o que pode indicar um possível desprendimento da matriz rochosa, após o ataque por sulfato de sódio, ou até mesmo a variabilidade geológica da rocha matriz.

Na Figura 25 verifica-se o resultado obtido na análise petrográfica da ROCHA 03 após ataque por sulfato de sódio.

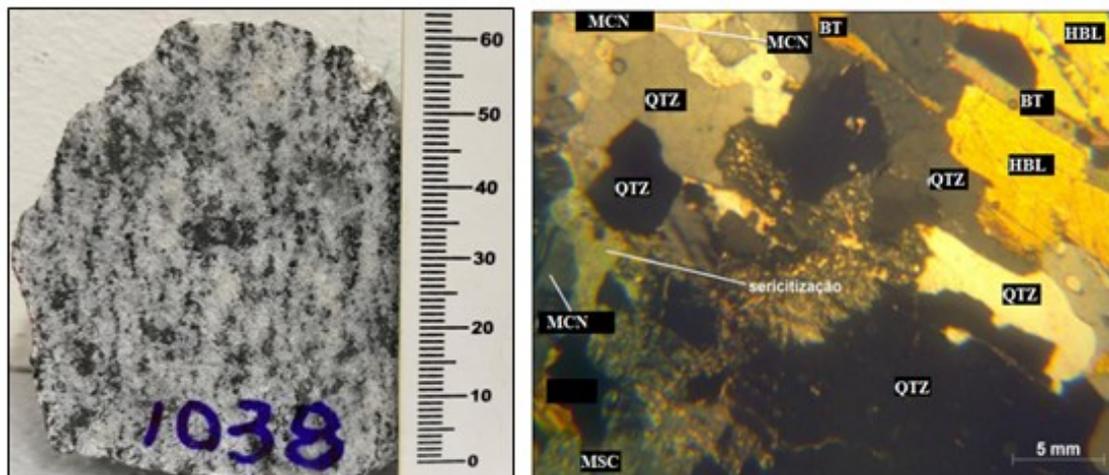


Figura 25-Petrografia da ROCHA 03, após 60 ciclos de ataque por sulfato de sódio.

Rocha metamórfica que apresenta textura granolepidoblástica e inequigranular variando de fina a média. Seus grãos possuem forma hipidiomórfica (algumas faces bem definidas) a xenomórfica (sem face definida). O bandamento gnáissico presente é dividido em máfico pelos minerais de biotita e hornblenda e félsicos de quartzo e feldspatos com composição mineral de: (30%) hornblenda, quartzo (11%), plagioclásio (10%), biotita (25%), muscovita (5%), microclina (15%). Sua mineralogia acessória conta com (1%) de minerais opacos, zircão, apatita e carbonato (1%).

Os cristais de quartzo são incolores, de granulação variando de 0,5 a 2 mm, quanto a sua forma são hipidiomórficas a xenomórficas, apresentam hábito prismático e brilho vítreo. Os cristais de plagioclásio são xenomórficos, de granulação entre 0,5 e 3 mm, coloração acinzentada e apresentam brilho vítreo. A microclina possui grãos hipidiomórficos a xenomórficos, granulação 0,5 a 4 mm, coloração esbranquiçada. A hornblenda possui cor preta, xenomórfica, de granulação entre 2 e 4 mm. A muscovita é incolor, hipidiomórfica e granulação menor que 1 mm. Os cristais de biotita são

pretos, de granulação variando de 1 a 3 mm, com forma hipidiomórfica, com hábito lamelar e brilho vítreo.

Tabela 13- Síntese da análises petrográficas ROCHA 01, ROCHA02 E ROCHA03 após ataque.

Propriedades	Materials			
	ROCHA 01	ROCHA 02	ROCHA 03	
Coloração	Cinza	Branco acinzentado	Cinza	
Granulação	Fina (10%), média (70%) grossa (20%)	Fina (30%) Média (70%)	Média (80%) Fina (20%)	
Textura	Granolepidoblástica	Granolepidoblástica	Granolepidoblástica	
Microfissuras	Moderado	Fraco	Fraco	
alteração	Pouco alterado	Pouco alterado	Pouco alterado	
Mineralogia (%)	Hbl	-	30	30
	Qtz	20	16	11
	Plg	18	10	10
	Bt	25	25	25
	Msc	5	2	5
	Mcn	30	15	15
	Mq	-	-	-
	Mo	1	1	1
	A	-	-	1
	Z	1	1	1
	C	-	-	1

NOTA: Hbl- horblenda; Qtz- quartzo; Plg- plagioclasio; Bt- biotita, Msc- muscovita; Mcn- microclina;
Mq- mirmequita, Mo- mineral opaco, Z- zircão, A- apatita, C- Carbonato.

4.3. ÍNDICES FÍSICOS

✓ Rocha intacta

A partir do ensaio de índices físicos foi possível a verificação dos resultados de massa específica, porosidade e absorção como indicado na Figura 26, foi realizado de acordo com o anexo b da NBR 5564 (ABNT, 2021) no qual foram utilizadas 10 amostras de aproximadamente 5cm que foram retiradas diretamente da pilha de amostragem de cada jazida. O ensaio seguiu em conformidade com o subitem 3.3.2 disposto na metodologia do presente trabalho.

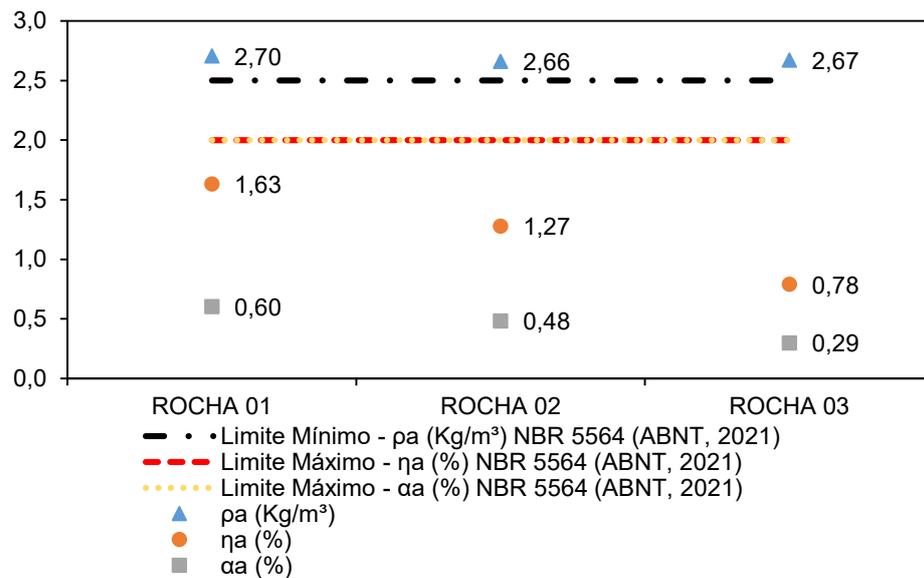


Figura 26-síntese dos resultados do ensaio de índices físicos.

NOTA: pa: massa específica aparente; ηa: porosidade aparente; αa: absorção de água; *valores que não atenderam aos limites normativos.

É possível observar na síntese dos resultados do ensaio de índices físicos dos materiais intactos a variação da massa específica aparente seca (pa) entre os diferentes litotipos dos materiais ensaiados. Pode-se destacar que as amostras ROCHA 01, ROCHA 02 e ROCHA 03 mesmo com a variação considerável obtiveram resultados que atendem a norma NBR 5564 (ABNT 2021) e VALEC (2012), que recomenda como valor mínimo para a massa específica aparente entre 2.500 e 2.400 g/cm³.

O gráfico comparativo de síntese dos resultados indica que as amostras apresentam valores satisfatórios de massa específica, que está diretamente relacionado ao grau de microfissuramento baixo na petrografia. ROCHA 01 e ROCHA 03 apresentam valores acima do mínimo NBR 5564 (ABNT, 2021) de massa específica de 2,70 g/cm³ (ROCHA 01), 2,66 g/cm³ (ROCHA 02) e 2,67 g/cm³ (ROCHA 03).

Com relação a porosidade (ηa) que a norma NBR 5564 (ABNT, 2021) determina 2% de limite máximo pode-se afirmar que todas as amostras se mantiveram no limite especificado, entretanto quando comparado ao limite estabelecido pela VALEC (2012), observa-se que apenas as amostras ROCHA 01 E ROCHA 02 atendem ao limite, possuindo limite maior que 1%.

No que diz respeito a absorção de água (α) é possível constatar que todas as rochas atendem aos limites estabelecidos pela norma NBR 5564 (ABNT, 2021) e VALEC (2012) que estabelece 2% e 1% respectivamente.

Comparando os resultados obtidos na análise de índices físicos pode verificar que a ROCHA 01 apresenta maior porosidade e maior absorção de água pode ser corroborado com a presença de microfissuras como já apresentado na Figura 18 e na Tabela 10. A massa específica dessa rocha pode estar correlacionada ao mineral com maior teor (35% microclina) e (22% quartzo) o que pode justificar a satisfatória massa específica do material com densidade de 2,63g/cm³ para a microclina e 2,65 g/cm³ para o quartzo (COSTA, *et. al.* 2012).

O gnaisse ROCHA 02 com granulação de média a fina e baixo microfissuramento apresentou nos resultados do ensaio massa específica de 2,66 g/cm³ o menor dentre as amostras analisadas, entretanto apresentou valores razoáveis de porosidade e absorção de água em comparação com as demais rochas. Verificando, corroborando os resultados obtidos através da petrografia da amostra antes e após o ataque por sulfato, observa-se maior fissuração dos minerais.

Em relação a ROCHA 03 verifica-se que a amostra apresentou os menores valores de porosidade e absorção de água. Em relação a porosimetria por intrusão de mercúrio a ROCHA 03 apresentou menores volumes de poros expressivos (item 4.2 em diante). Isso se dá pela granulação do material ser predominantemente média e fraco grau de microfissuramento o que diminui a possibilidade de fissuras intragranulares.

✓ Rocha degradada

Também foi realizado o ensaio de índices físicos após o ataque por sulfato de sódio no qual as amostras foram submetidas a 60 ciclos em solução por sulfato de sódio.

As três amostras de rochas mantiveram suas características de massa específica, porosidade e absorção de água dentro dos limites estabelecidos na NBR 5564 (ABNT, 2021) padrão após ataque por sulfato de sódio, entretanto, observa-se a variação média nos resultados de índices físicos após ataque apresentado na Figura 27.

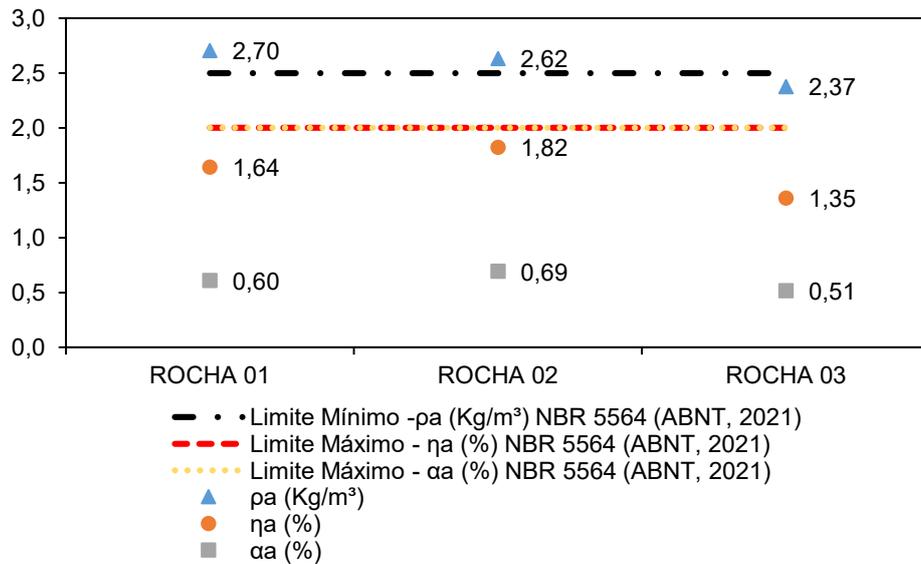


Figura 27- intese dos resultados do ensaio de índices físicos após ataque por sulfato de sódio;

NOTA: pa: massa específica aparente; ηa: porosidade aparente; αa: absorção de água;

Como indicado na Figura 25 as amostras apresentaram alterabilidade após ataque por sulfato de sódio (60 ciclos) pode-se constatar que a amostra ROCHA 03 apresentou maior taxa de perda percentual de densidade e massa específica após ataque por sulfato de sódio. o que pode ser justificado, pela heterogeneidade do material analisado, desta forma verificou-se um maior percentual de minerais de baixa dureza como: 35% , biotita e muscovita, minerais alteráveis ao ataque por sulfato de sódio, conforme indicado na Tabela 13 na petrografia do material após o ataque por sulfato de sódio o que corrobora para a constatação do aumento considerável dos índices de porosidade que passou de 0,78% para 1,35% e absorção de água que passou de 0,29% para 0,51% indicando que o material tem suscetibilidade ao intemperismo.

A amostra (ROCHA 01) apresentou grau de microfissuramento em petrografia moderado (razoável), massa específica de 2,70 g/cm³ acima do valor da norma NBR 5564 (2021) e VALEC (2012). Já a porosidade de 1,63% e com a média de diâmetro médio de poro variando de 5,47 μm para 5,80 μm após ataque por sulfato de sódio.

Os valores com relação a absorção de água (αa) todas as amostras atenderam as exigências estabelecidas pela norma NBR 5564 (2021) que é de 1,5 % e VALEC (2012) que delimita valores de 1%, os valores de absorção de água apresentaram valores variando entre 0,51% e 0,69%.

No que diz respeito a porosidade aparente duas (ROCHA 01 e ROCHA 02) dentre os três tipos de amostras apresentaram valores acima da norma NBR 5564 (2021) e VALEC (2012) que delimita uma máxima porosidade de 2% e 1%. Todas as amostras de rochas se mantiveram dentro do limite especificado. Em comparação com os limites da VALEC (2012) observa-se que todas as amostras apresentaram porosidade maior que 1% não atendendo ao requisito.

Verifica-se que todas as amostras apresentaram, após ataque por sulfato de sódio, índice de porosidade e absorção de água que atende as normas, entretanto a amostra ROCHA 03, apresenta índice de massa específica abaixo do recomendado pela NBR 5564 (ABNT,2021) ($2,37 \text{ g/cm}^3$) além da alterabilidade do material frente ao ataque químico.

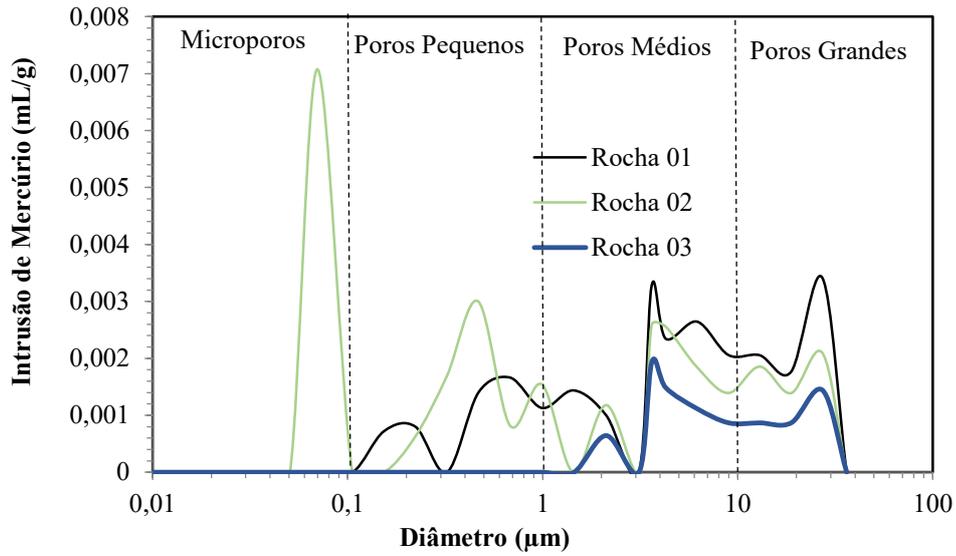
4.4. POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

A caracterização das rochas por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível corroborar os resultados obtidos a partir dos ensaios de índices físicos (porosidade aparente) das amostras e verificar características como diâmetro médio de poros e volume médio de intrusão de mercúrio nas amostras antes e após o ataque por sulfato de sódio.

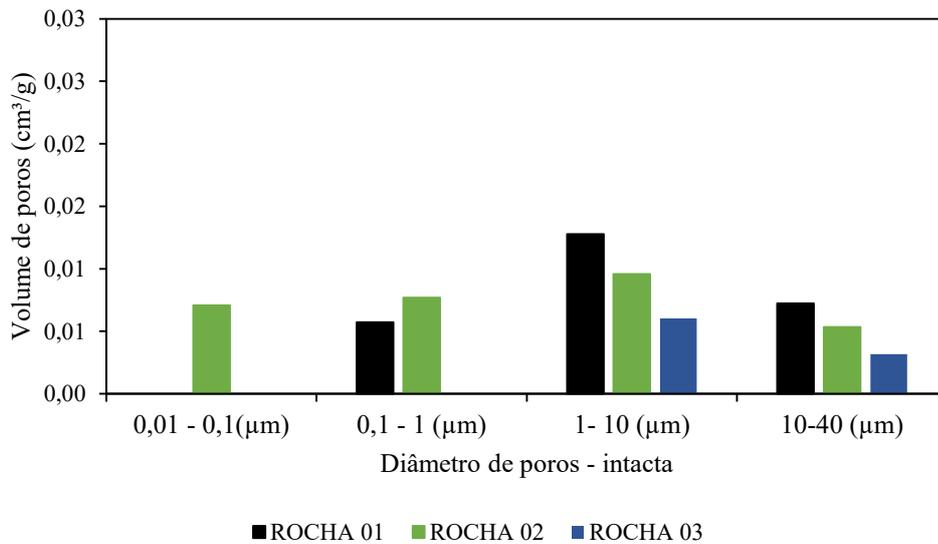
Todas as amostras apresentam variação percentuais importantes de porosidade a partir da intrusão de mercúrio.

✓ Rocha intacta

Ao observar os resultados sintetizados na Figura 28, verifica-se uma variação do diâmetro médio dos poros o que favorece o aparecimento de patologias como: fragmentação e perda da resistência do material o que pode prejudicar a utilização de forma eficiente e eficaz.



(a)



(b)

Figura 28-Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio rochas intacta – (a) distribuição de diâmetro dos poros das rochas estudadas; (b) volume dos poros.

A ROCHA 02 é a única dentre as amostras a apresentar quatro faixas de diâmetro de poros (microporos, poros pequenos, poros médios e poros grandes). A ROCHA 03 apresenta uma variação de poros médios a grandes. Em contrapartida a ROCHA 01 apresenta variação em três faixas de poros, entretanto com maior intrusão nos poros médios.

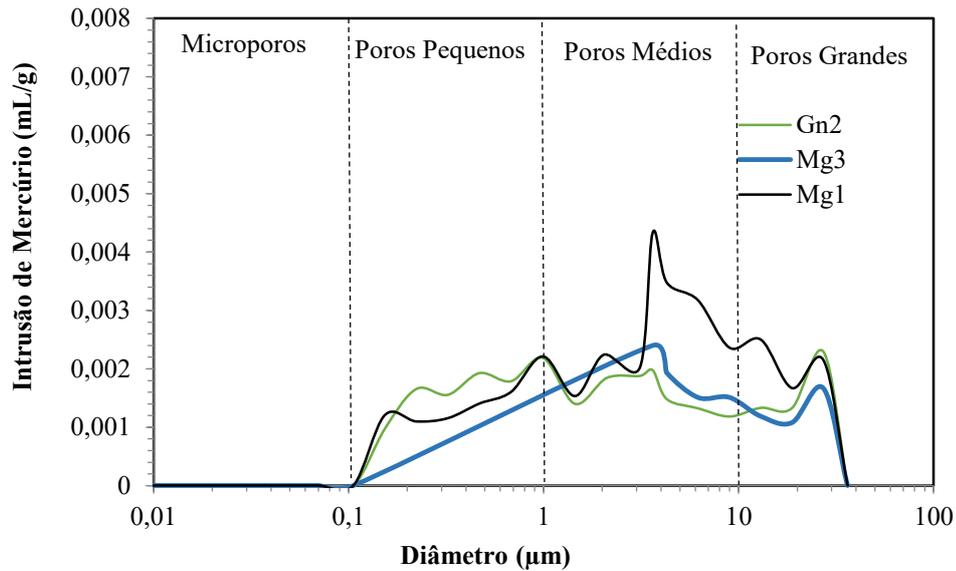
Entre as rochas estudadas a ROCHA 02 apresentou grande volume e maior porosidade de intrusão nos poros tal afirmação pode ser confirmada na Figura 28 b. Destaca-se que a porosidade da rocha pode se relacionar estritamente com a resistência da rocha. Já na ROCHA 03 verifica-se que apesar da rocha apresentar poros médios a grandes, possui menor porosidade, por não apresentar microporos e pequenos poros. O que corrobora com os resultados dos índices físicos (Figura 26) em que a rocha apresentou menor porosidade e absorção de água.

Com a análise de (%) de porosidade de cada amostra intacta, pode-se constatar que a amostra ROCHA 02 apresentou maior porosidade com 0,87% e diâmetro médio de poros de 1,07 μm , enquanto a amostra ROCHA 03 apresentou menor porosidade, dentre as amostras intactas, de 0,33 % e maior dimensão de poros com uma média de 6,09 μm o que é satisfatório visto que será menos suscetível a ação de intempéries frente a características de implementação.

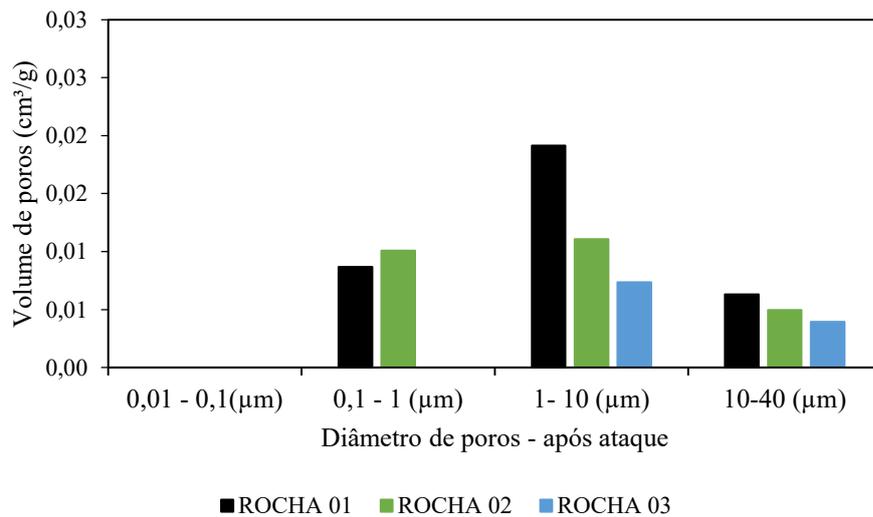
✓ Rocha degradada

Na Figura 29 é apresentado a comparação entre as rochas analisadas após o ensaio de ataque por sulfato de sódio.

Com o aumento do diâmetro médio dos poros do material é possível constatar de forma clara o aumento do volume total de intrusão por mL/g, conforme YU et. al. (2017) isso pode ocorrer devido ao aumento no número de fissuras na rocha e a possível cristalização de sulfato de sódio no interior dos poros da rocha, o que pode aumentar as tensões no interior dos poros da rocha.



(a)



(b)

Figura 29-Resultados da porosimetria por intrusão de mercúrio após ataque por sulfato de sodio– (a) distribuição de diâmetro dos poros das rochas estudadas; (b) volume dos poros.

Como indicado no gráfico acima, as amostras apresentaram variação na porosidade aparente por intrusão de mercúrio após ataque por sulfato de sódio isso devido as pressões internas nos poros causado pelo sulfato de sódio a minerais suscetíveis presentes nas rochas amostradas. Isso pois segundo Frazão (2008) o ensaio de ciclagem por sulfato de sódio é muito mais danoso a rocha visto que a resistência mecânica de uma rocha está ligada ao nível de porosidade que ela apresenta.

A amostra que mais apresentou aumento no percentual médio de porosidade foi a ROCHA 01, com valores 0,6665 % para 1,0426% com a média de diâmetro médio de poro variando de 5,4719 μm para 5,8019 μm , entretanto, não se pode afirmar que o envelhecimento acelerado por sulfato de sódio (ciclagem) é o único responsável pela alteração de poros das rochas, como notado por YU et. al. (2017).

A amostra ROCHA 02 também apresentou aumento na porosidade aparente por intrusão de mercúrio o que corrobora com os dados de absorção de água (α) obtido a partir dos ensaios de índices físicos que passou de 0,4813% intacto para 0,6925% após ataque por sulfato de sódio o que indica um aumento nos poros médios e na porosidade aparente que passou de 0,8761% para 0,9088 %, o aumento considerável no diâmetro dos poros se dá pela cristalização do sal no interior do poro da rocha aumentando as tensões geradas como ao comportamento indicado em estudos nas amostras realizada por YU et. al. (2017).

Em síntese a amostra ROCHA 03 foi a amostra que apresentou menor porcentagem de porosidade aparente dentre as amostras analisadas o que corrobora com a menor taxa de absorção de água (α) de 0,2957% intacta para 0,5161 % o que indica que a amostra tem a densidade favorável e diminuindo a susceptibilidade a intempéries mesmo apresentando em análise petrográfica uma soma de cerca de 30% de minerais passível ao intemperismo, como os estudos de YU et. al. (2017) que indicou que além da porosidade as características mineralógicas do material pode ter ligação direta com a porosidade do mesmo.

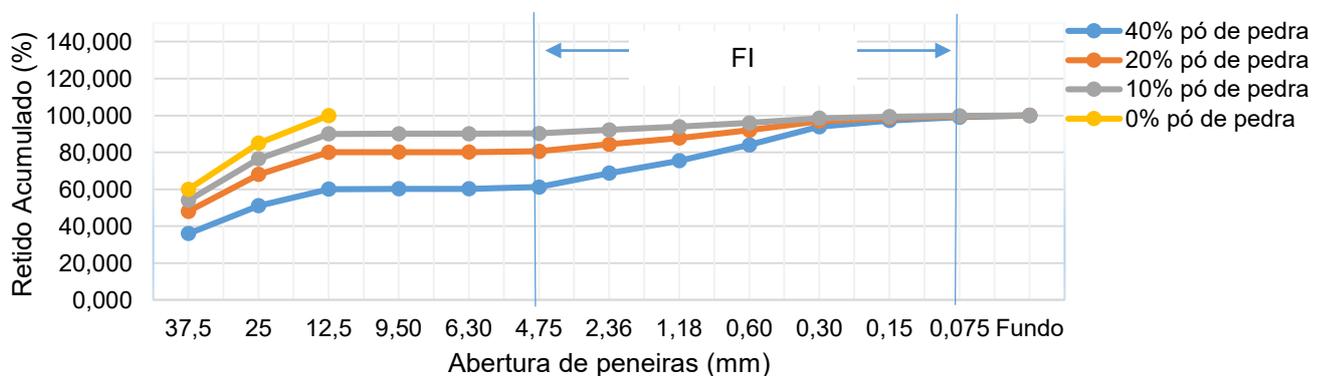
Comparando os ensaios de petrografia e o ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio, um dos fatores que podem ter influência na variação dos percentuais de porosidade das amostras é a presença de microfissuras em ambas (ROCHA 01, ROCHA 02 E ROCHA 03) que apesar de fraca pode tornar a rocha suscetível ao processo de degradação devido a intrusão de materiais externos nas fissuras.

Ressalta-se que a porosidade medida pela porosimetria é a aberta, ou seja, os poros fechados não são atingidos pela intrusão de mercúrio, logo, os resultados são sempre de poros abertos, o que pode facilitar o fluxo de água dependendo do tamanho de poros.

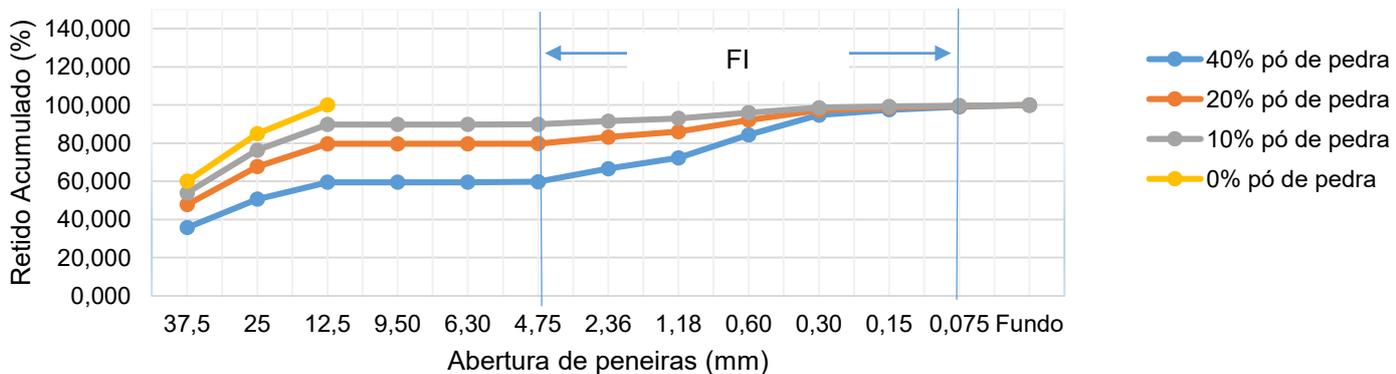
4.5. GRANULOMETRIA

A Figura 30 mostra a distribuição granulométrica do lastro limpo e com taxa de 10%, 20% e 40% de pó de rocha dos ROCHA 01 e ROCHA 03 e ROCHA02 que apresenta as porcentagens de material que passa em cada peneira. De acordo com o *Fouling Index* (FI) (Seling e Waters (1994)) define de acordo com a incrustação onde, o lastro limpo, 10% de incrustação é classificado como lastro moderadamente limpo, 20% classificado como incrustado e 40% é classificado como lastro altamente incrustado, indicando a limpeza obrigatória do lastro. As diferentes classificações são de acordo com o valor (F_1) (fouling index) e deve ser avaliada a partir do maior número de peneiras.

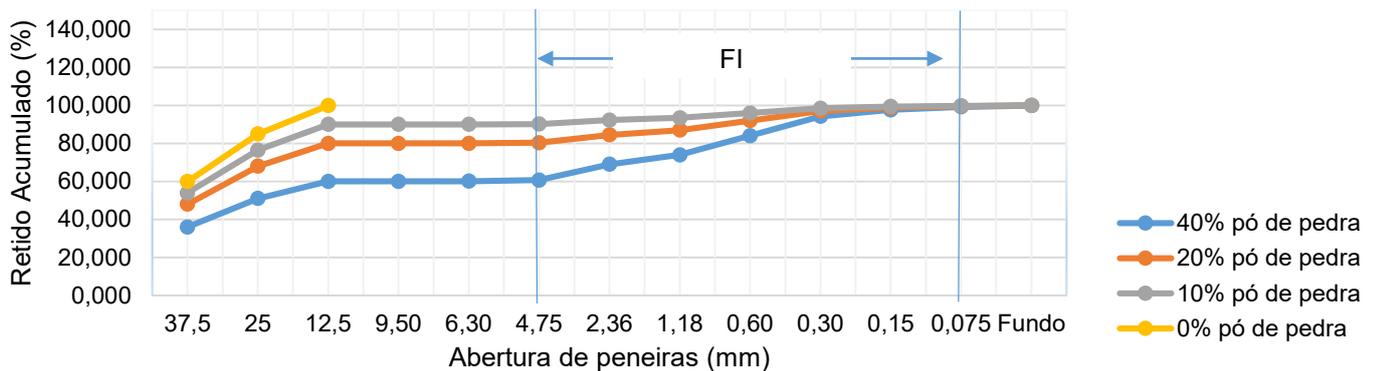
Na Figura 30, é representado a distribuição granulométrica das amostras ROCHA 01, ROCHA 02 e ROCHA 03 com diferentes taxas de incrustação (0%, 10%, 20% e 40%).



(a)



(b)



(c)

Figura 30-Distribuição granulométrica do lastro limpo e colmatado com diferentes taxas de colmatção onde (a) ROCHA01, (b) ROCHA 02 e (c) ROCHA 03.

Todo material foi submetido ao ataque por sulfato e foi constatado que houve alteração do pó de pedra apresentando diferença após na segunda casa decimal o que não interferiu diretamente na granulometria do material degradado por sulfato de sódio.

Vale ressaltar que apenas 1% do material passou na peneira de 0,075mm, mas, esse material fino pode provocar a incrustação do conjunto de partículas e até mesmo a colmatção, ou seja, entupimento da passagem de água.

4.6. MICRO DEVAL TEST

As características referentes a abrasão de cada material são consideradas relevantes, como verificado por, WU *et al.* (2018), para a caracterização do agregado para o emprego em lastro ferroviário.

Após a realização dos ensaios de Micro Deval Test (MD) utilizando o equipamento da UENF, em conformidade com o subitem 3.5.1 desta pesquisa. Neste item também são apresentados resultados referentes as rochas analisadas antes e após serem submetidas ao ensaio de ataque por sulfato de sódio.

✓ Rocha intacta

Para a verificação e cálculo da perda de massa por abrasão foi utilizada a Equação 9 e os resultados são apresentados na Figura 31, associados à quantidade

de minerais para cada rocha, facilitando o entendimento sobre a influência destes minerais nos resultados.

Baseando-se na síntese dos resultados do ensaio das rochas intactas, é possível observar a variação de resistência a brasão de cada tipo de rocha apresentado. A ROCHA 03 foi a amostra que apresentou menor índice de perda, o que pode ser explicado por sua mineralogia e características do material como indicado na Figura 17, além das características morfológicas das partículas a ROCHA 03 apresenta baixa porosidade 0,33% e baixo teor de absorção de água 0,29% o que corrobora para uma boa resistência a abrasão do material.

O ROCHA 02 apresentou maior índice de perda após o processo Micro Deval com 13,28%, isso pode ser explicado por sua composição ser composta majoritariamente por minerais de menor dureza e baixa massa específica, como: biotita, muscovita e plagioclásio. A amostra ROCHA 01 também apresentou perda considerável após a realização do ensaio, 9,73% que também pode ser explicado por sua característica mineralógica, destaca-se a presença de cerca de 35 % de microclima, também conhecido como feldspato alcalino de alta dureza com dureza entre 6,0 e 6,5 Mohs.

Na Figura 31 verifica-se a média de desgaste de cada uma das amostras de rocha e sua característica mineralógica.

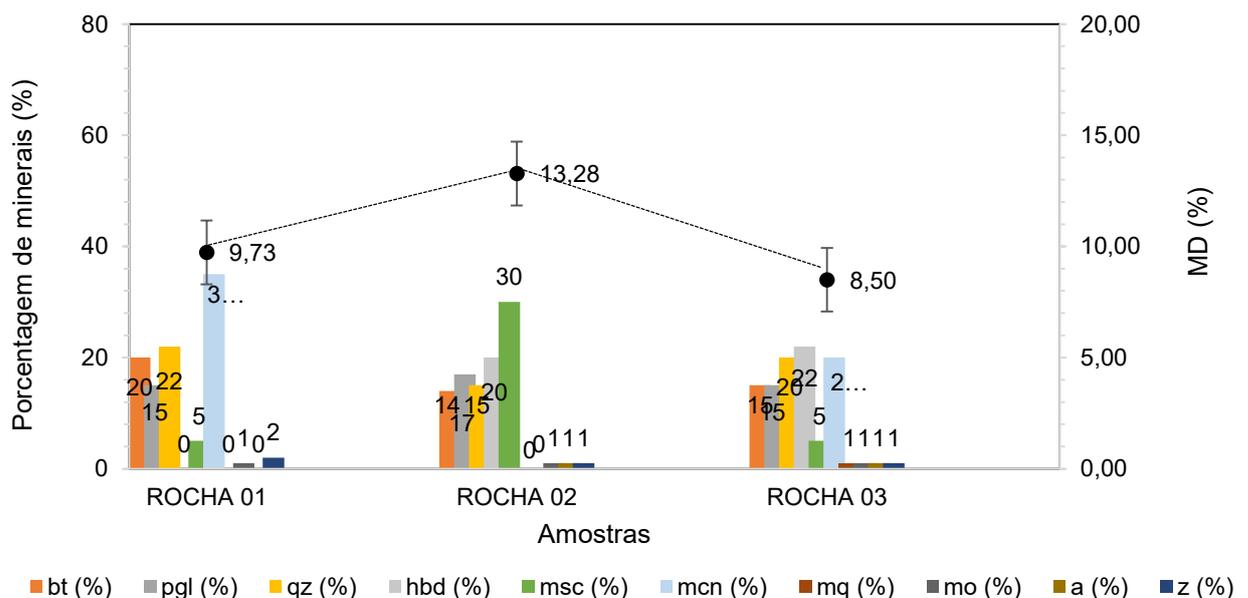


Figura 31-síntese de resultados ensaio de Micro Deval Test (MD).

Hbl: horblenda; Qtz: quartzo; Plg: plagioclásio; Bt: biotita, Msc: muscovita; Mcn: microclina; Mq: mirmequita, Mo: mineral opaco, Z: zircão, A: apatita, C: carbonato

Como Adomako et. al., 2021 um dos fatores que justifica a influência de forma positiva na resistência ao teste de desgaste é o teor de quartzo e feldspato presente na amostra visto que quanto maior a presença desse tipo de mineral melhor é a resistência do material.

Além da degradação das amostras foi possível observar mudanças de características como: textura e tamanho das partículas de cada amostra após o teste de Micro Deval.

✓ Rocha degradada

Após o ensaio de ataque por sulfato de sódio foi realizado o teste de Micro Deval para a verificação do efeito do ataque sob as amostras analisadas e conseqüentemente a correlação sob os minerais que compõem as rochas.

Nota-se que o ROCHA 03 foi a amostra com maior variação percentual média de desgaste ($8,5 \pm 1,5\%$ para $11,04 \pm 0,5\%$). Entretanto, continuou apresentando satisfatória resistência ao desgaste mecânico quando comparada com as outras rochas. A maior perda de massa justifica-se pelas fissuras na hornblenda (22%) e a presença de minerais secundários (alteração) nas fissuras (Figura 25) demonstrando poros médios e grandes (Figura 29).

O ROCHA 02 (Figura 31) apresentou maior valor médio de desgaste ($13,55 \pm 0,7\%$), porém, não houve diferença significativa para essa propriedade, pois os desvios padrões foram coincidentes para amostra intacta e após ataque químico. Na Figura 24 essa amostra havia mostrado menos fissuração após ataque químico, o que foi evidenciado na intrusão de mercúrio não havendo diferença significativa na amostra intacta e após ataque químico (Figura 29).

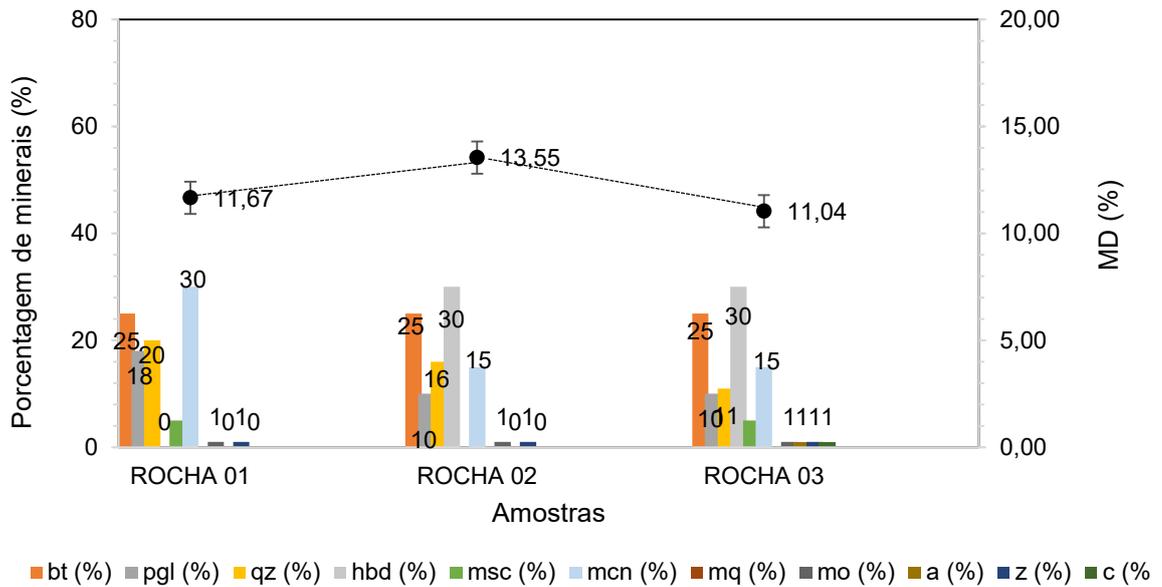


Figura 32-síntese de resultados ensaio de Micro Deval Test (MD).

Hbl: horblenda; Qtz: quartzo; Plg: plagioclásio; Bt: biotita, Msc: muscovita; Mcn: microclina; Mq: mirmequita, Mo: mineral opaco, Z: zircão, A: apatita, C: carbonato

4.7. LOS ANGELES

O resultado e a perda de massa individuais de cada amostra de rocha ensaiadas estão indicados na Figura 33 a seguir, foi apresentado os valores de perda de massa por abrasão dos agregados (gradação F); o ensaio foi executado em conformidade como estabelecido em norma NM51 (ABNT, 2001).

✓ Rocha intacta

Os resultados de abrasão los angeles indicam que entre os litotipos estudados apenas o meta granito (ROCHA 03) (LA= 28,23%) atendeu aos limites de perda por abrasão "LA" de 30% como determinado pela norma NBR 5564 (ABNT, 2021) e também VALEC (2012) COM 40%.

Já o meta granito (ROCHA 01) e gnaisses (ROCHA 02) como apresentado na Figura 33 que os maiores valores de perda por abrasão de (36,07%) seguido de (31,57%) respectivamente. Ambas as rochas apresentaram valores de abrasão acima dos limites estabelecidos pela norma regulamentadora brasileira, entretanto, apresentam valores abaixo dos estabelecidos pela VALEC (2012).

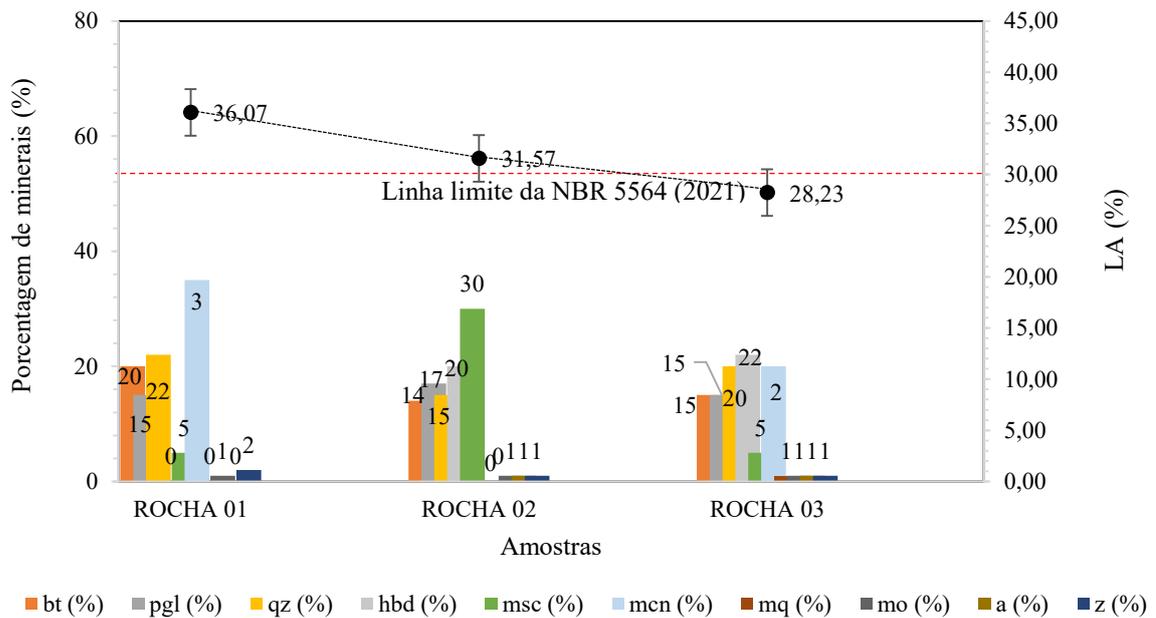


Figura 33-Resumo dos resultados obtidos pelo ensaio de Abrasão Los Angeles comparados a petrografia intacta e ao limite estabelecido pela NBR 5564 (ABNT, 2021).

Os valores obtidos de LA da ROCHA 03 pode se justificar devido a granulação dos materiais apresentado em petrografia na Figura 33, apresentando uma granulação de fina a média o que contribui para maior resistência a abrasão conforme Miskovsky et al. (2004) afirmou.

Dentre as rochas estudadas, o menor desempenho foi por parte da ROCHA 01, mesmo possuindo granulação muito próxima da ROCHA 03 indica que a composição mineralógica tem influência direta no comportamento das rochas perante a abrasão. Neste caso, verifica-se que teor de biotita, trouxe influência negativa na perda de massa da rocha, assim como, apesar de baixa ocorreu, a presença de microfissuras além disso características como granulação corrobora com o estabelecido por Miskovsky et al. (2004), que em seus estudos correlacionou de forma direta o tamanho dos grãos de minerais com a resistência, quanto maior a granulação menor seria a resistência a abrasão material.

Como verificado por Guo *et al.* (2022), que através de estudos de uma variedade de rochas, entre elas as rochas metamórficas, verificaram que os valores de abrasão variam de 22,6% e 36,3%. Desta forma os valores se encontram próximas as obtidas neste estudo para o mesmo tipo de rocha.

Analisando os resultados obtidos da porosimetria e trazendo correlação aos resultados das amostras, ROCHA 01 e ROCHA 02 apresentaram maiores porosidades com 0,66% e 0,87% respectivamente, menores massas específicas aparentes 2,70 Kg/m³ e 2,66 Kg/m³ respectivamente.

✓ Rocha Degradada

Após submeter o material ao ataque por sulfato de sódio, foi possível verificar o aumento da porcentagem da abrasão em ambas as rochas. Nota-se que todas as amostras apresentaram porcentagens acima dos limites determinados pela NBR 5534 (ABNT, 2021). Na Figura 32 é correlacionadas as características mineralógicas de cada material após ataque por sulfato de sódio e a respectiva abrasão de cada material submetido ao ensaio de abrasão.

Apesar da ROCHA 03 apresentar satisfatório índice de abrasão intacto, como apresentado na Figura 31, foi possível verificar aumento de aproximadamente 10,97%, que indica variabilidade na resistência do material, assim como a ROCHA 01 que passou de 36,07% para 51,70% desta forma ambas as rochas ficaram acima dos limites estabelecidos pela norma brasileira, porém apenas a ROCHA 01 acima do limite estabelecido pela VALEC (2012).

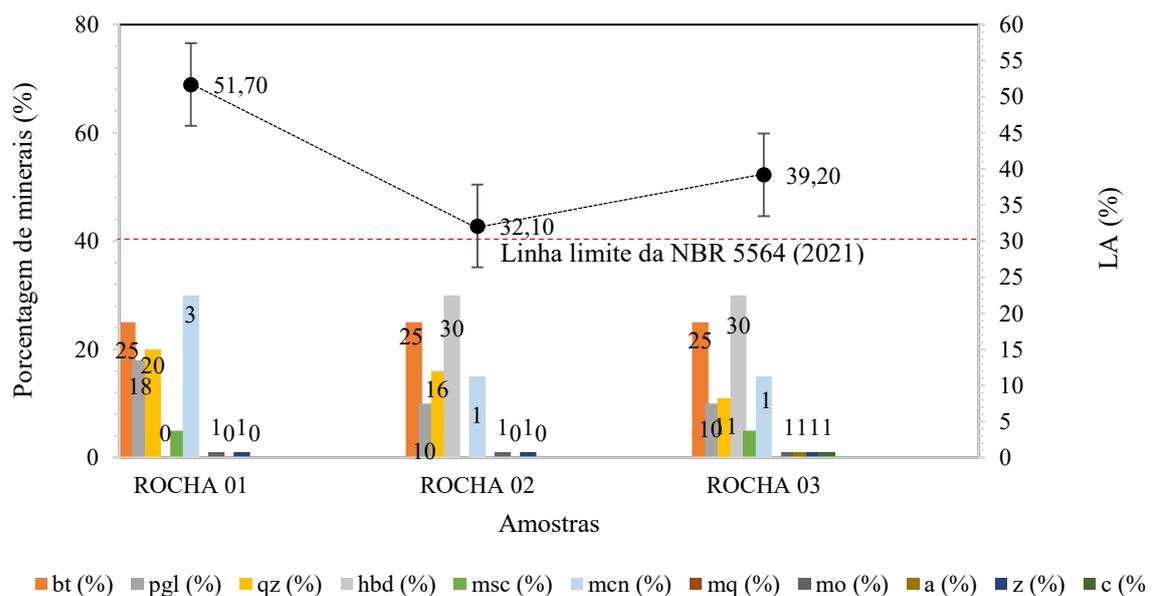


Figura 34-Resumo dos resultados obtidos pelo ensaio de Abrasão Los Angeles comparados a petrografia e ao limite da NBR 5564 (2021) após ataque por sulfato de sódio.

4.8. POINT LOAD

O desenvolvimento do ensaio foi realizado a partir das amostras de rochas intactas e como descrito no capítulo 3 e subitem 3.6.3, em conformidade com a norma ASTM D5731 (2008). Para desta forma determinar a variação da resistência de carga pontual das amostras.

✓ Rocha intacta

Ambas as amostras obtiveram índice de resistência (I_s50) para agregados irregulares, muito altas, referente a direção. Após a realização do ensaio verificou-se que os valores de I_s50 das rochas: ROCHA 01, ROCHA 02 e ROCHA 03 variaram entre 4,86 MPa a 6,41 MPa. Na Figura 35 é apresentado os resultados referentes a ruptura em ordem crescente conforme o modelo de Weibull.

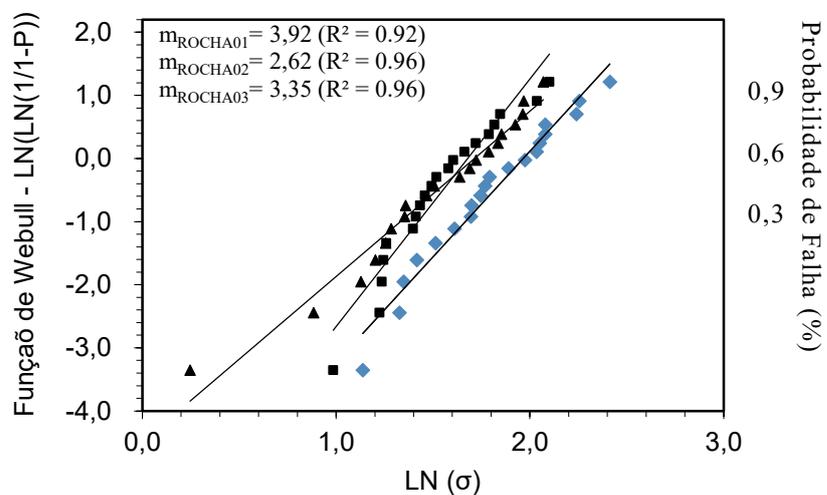


Figura 35-Série estatística de Weibull Rocha intacta

Desta forma, o resultado da estatística de Weibull apresenta que dentre as rochas a ROCHA 01 apresentou maior módulo “m” o que significa que o conjunto do material apresenta menor probabilidade de falha ou de ruptura com valor de m de 3,92 seguido da ROCHA 03 com m de 3,35 e ROCHA 02 com menor valor de m de 2,62.

Esses resultados estatísticos têm ligação direta com a graduação do material e características mineralógicas de cada uma delas.

Segundo Miskovsky et al. (2004) quanto menor a granulação apresentada na petrografia do material melhor é a resistência, corroborando assim com as melhores resistências das amostras ROCHA 02 e ROCHA 03.

Correlacionando os dados obtidos com o ensaio de Point Load Test e Porosimetria de cada material, pode-se constatar que amostras com menor porosidade aparente apresenta melhor desempenho no PLT assim como observado por Frazão (2012), além do tamanho dos poros existentes em cada amostra que determina a maior ou a menor intrusão de mercúrio no material.

As características encontradas de cada amostra nos índices físicos também corroboram com os encontrados a partir do ensaio de PLT visto que quanto maior a massa específica de cada material menor é a quantidade de poros, como observado na amostra ROCHA 02 com massa específica de 2,66 Kg/ m². Além de características petrográficas como a presença em maior escala de minerais mais densos como quartzo.

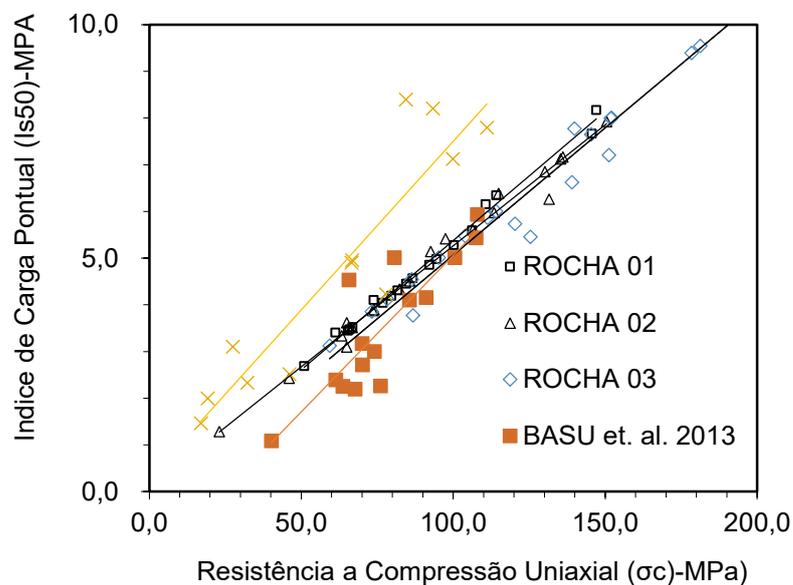


Figura 36- Estimativa De Resistencia A Compressão Uniaxial Rocha Intacta

✓ Rocha degradada

Os resultados obtidos de resistência de carga pontual de cada uma das rochas são apresentados na Figura 35. Como nas rochas intactas ambas as rochas apresentaram resistências muito altas. Entretanto, as rochas apresentaram variação diferente de resistência, que pode ser justificado pela heterogeneidade de cada uma das amostras e intemperismo sofrido de cada rocha além da presença de microfissuras. Após os 60 ciclos em sulfato de sódio a ROCHA 03 apresentou maior resistência.

Comparando as médias é possível verificar que apesar do decréscimo no índice de carga pontual nas médias de cada uma das amostras após ataque por sulfato de sódio, as amostras ROCHA 01 e ROCHA 02 mantiveram –se dentro do desvio padrão das rochas intactas. Olhando individualmente para cada rocha, os desvios não coincidem, ocorre de fato uma redução no índice. Já a amostra ROCHA 03 apesar de apresentar maior resistência dentre as amostras analisadas apresentou o maior incremento médio após ataque por sulfato de sódio.

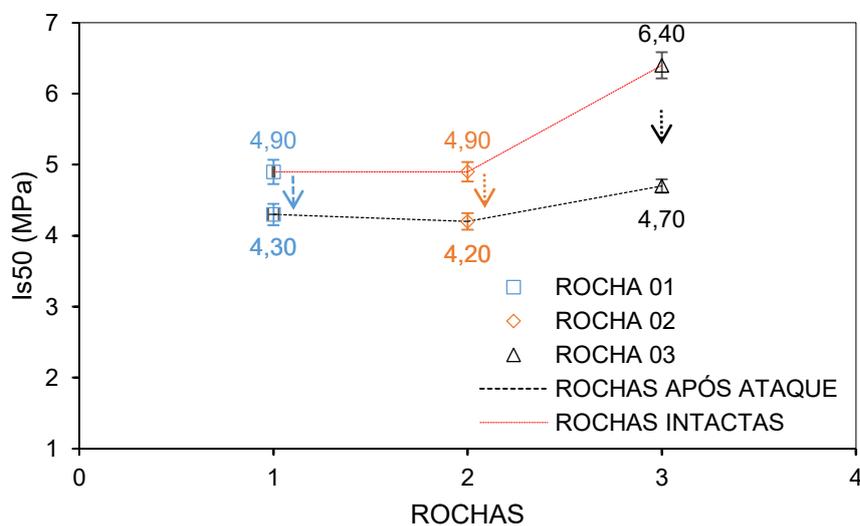


Figura 37-resultado do teste de carga pontual antes e após ataque por sulfato de sódio

Analisando a Figura 38, que indica a probabilidade de falha das amostras intactas, verifica-se que se mostram coincidentes. O que indica que para as amostras analisadas não houve mudanças significativas na resistência das rochas. Desta forma foi utilizado a estatística de weibull após ataque por sulfato de sódio para, neste caso,

determinar a probabilidade de falha do material após processo de ataque químico como indicado na Figura 35.

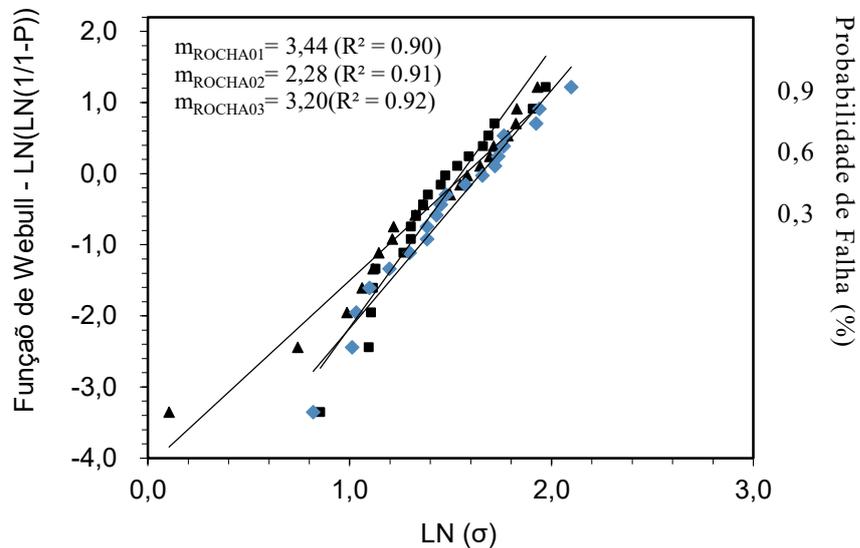


Figura 38-Série estatística de Weibull após ataque por sulfato de sódio

A partir dos resultados obtidos através da estatística de weibull antes e após ataque por sulfato de sódio, todas as rochas apresentaram decréscimo nos valores de módulo, que é possível constatar corroborando os resultados obtidos na Figura 35. Isso pode ter correlação com a presença de minerais suscetíveis ao intemperismo de cada uma das rochas analisadas na presente pesquisa.

A ROCHA 03 foi a amostra que apresentou maior módulo constatando sua maior homogeneidade conjunta em relação as demais isso corrobora com a Figuras 26 (b), entretanto, foi a rocha com maior variação de resistência pontual, apresentando os resultados de 6,41MPa, para rocha intacta, e 5,12MPa após ataque por sulfato de sódio. Esse tipo de alteração pode trazer mudanças e a desgaste do material empregado se utilizado no lastro ferroviário. A variação do material pode ser explicada devido ao aumento dos poros no material conforme indicado na Figura 27.

Já a amostra ROCHA 02 apesar de também apresentar índice de resistência para agregados (Is50) alta, tanto antes quanto após ataque por sulfato de sódio, foi a rocha que apresentou menor variação de modulo para a probabilidade de falha e ruptura.

É importante ressaltar que o processo de ataque por sulfato de sódio pode provocar ao material submetido, dilatação e contração nas amostras, que ocorre devido ao processo realizado em laboratório no qual submete o material a variação de temperatura através do processo de secagem e submersão em solução. Corroborando os resultados obtidos a partir dos poros acumulados é possível afirmar que na ROCHA 02 houve um refinamento de poros quando comparado ao seu estado intacto, já que não existe intrusão nos poros com faixa de 0,01 e 0,1 μm , nas demais faixas a intrusão se mantém com baixa alteração. O que indica que o efeito de contração teve maior efeito sobre a dilatação. Corroborando com a baixa variação de resistência do material.

Comparando paralelamente as grandezas obtidas a partir do ensaio das amostras de rochas após ataque por sulfato de sódio era esperado que a ROCHA 01 apresentasse comportamento inferior se comparado as demais amostras. Observando a petrografia do material (Tabela 10) é possível perceber que o material apresenta maiores índice de mineral suscetíveis ao intemperismo como biotita (20%) e plagioclásio (15%).

Desta maneira, verificando os valores de resistência a compressão uniaxial (RCU) indicados através do gráfico de Al-Harthi (2001) estão ligados de forma direta as médias de valores obtidos através da resistência a carga pontual (Is50).

Com relação a resistência estimada das rochas após ataque, corroborado as estimativas de resistência do material das três amostras e os resultados de estimativa de resistência obtidos pelos autores Basu *et. al*, 2013 e Merve *et. al*. 2020 é possível verificar na Figura 39 abaixo.

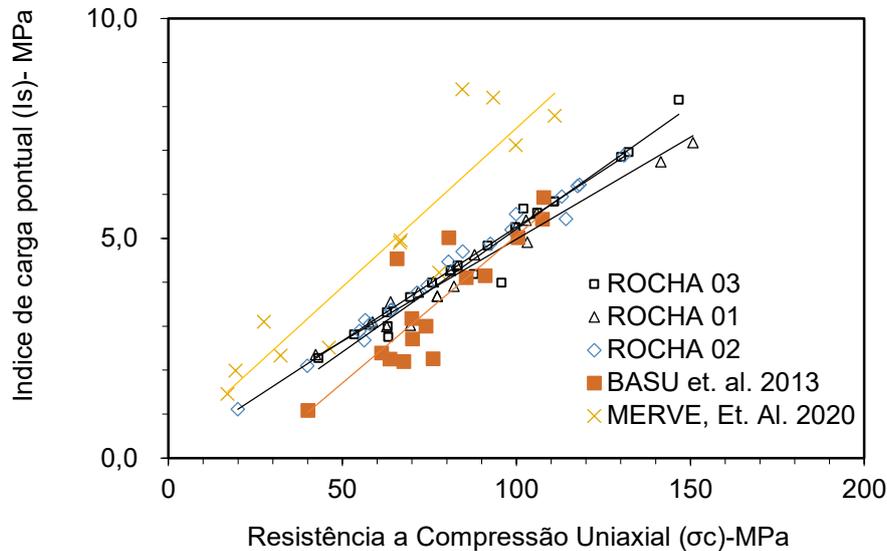


Figura 39- Estimativa De Resistencia A Compressão Uniaxial Após Ataque Por Sulfato De Sódio.

Os resultados dos ensaios de resistência pontual a compressão uniaxial é apresentada na tabela abaixo. Traçando um paralelo entre os resultados obtidos, é possível observar que após o ataque por sulfato de sódio as rochas apresentaram redução nos valores de RCU, corroborando com os demais resultados de resistência mecânica, onde as rochas também apresentam ainda baixa, redução na resistência a abrasão. Corroborando com a alteração do material frente ao processo de ataque.

Amostra	Classificação	Intacta		Degradada	
		Is50 (Mpa)	RCU	Is50 (Mpa)	RCU
ROCHA 01	meta granito	4,9	114	4,3	98
ROCHA 02	gnaisse	4,98	116	4,23	96
ROCHA 03	meta granito	6,42	149	4,7	103

4.9. AIMS II

A realização do ensaio se deu para a verificação de características dos agregados tais como: esfericidade, angularidade e textura. As partículas utilizadas para a realização do ensaio variou de 25 a 4,75mm e foram categorizadas segundo os limites propostos por Ibiapina *et al.*, (2018).

✓ Rocha Intacta

Os resultados obtidos no desenvolvimento do ensaio AIMS II mostraram distribuições cumulativas e valor médio característico de cada propriedade por meio de uma média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada amostra investigada. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado os parâmetros de referência para agregados graúdos considerando diversas frações de agregados.

De início foi realizada a análise com objetivo de comparação entre os valores médios de angularidade de diferentes tamanhos de partículas dos três materiais (ROCHA 01, ROCHA 02 E ROCHA 03).

Quanto angularidade, as amostras são tidas como subarredondadas concentrando a maior porcentagem de partículas entre os limites de 1260 a 4080, possuindo gnaisse e meta granito com uma variação entre 80% a 90% das partículas subarredondadas.

Como observado no gráfico abaixo, os resultados de angularidade dos três materiais pétreos examinados nessa pesquisa, se mantiveram próximos. As amostras ROCHA 02 E ROCHA 03 houve a tendência de aumento da angularidade com a diminuição do tamanho da partícula, é provável que tal característica tenha ligação com material de alimentação e britador utilizado. Com relação a litologia pode-se descartar tal influência na angularidade.

É possível a hipótese da angularidade dependa muito mais da granulometria do material ou etapas posteriores de peneiramento e transporte, que podem vir a trazer desgaste de agregados provenientes de rochas menos resistentes.

A amostra ROCHA 01 não apresentou tal tendência de angularidade se mantendo bem distribuído angularmente como indicado na Figura 40.

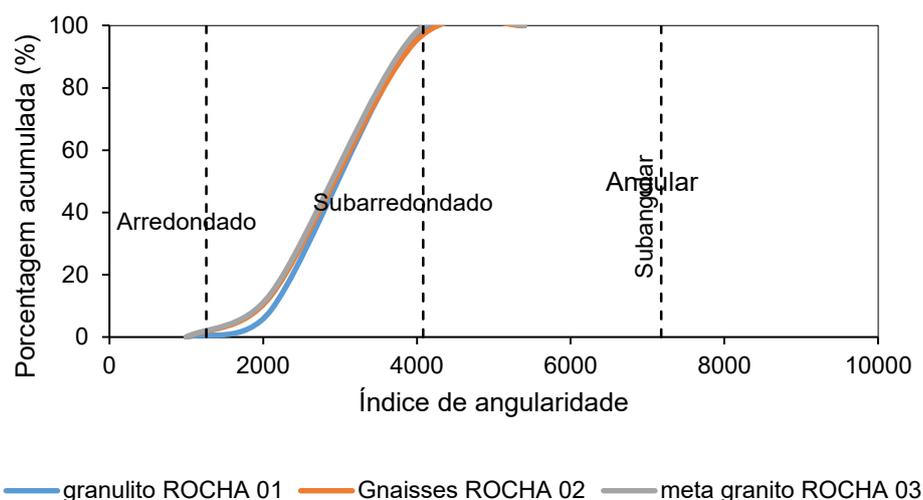
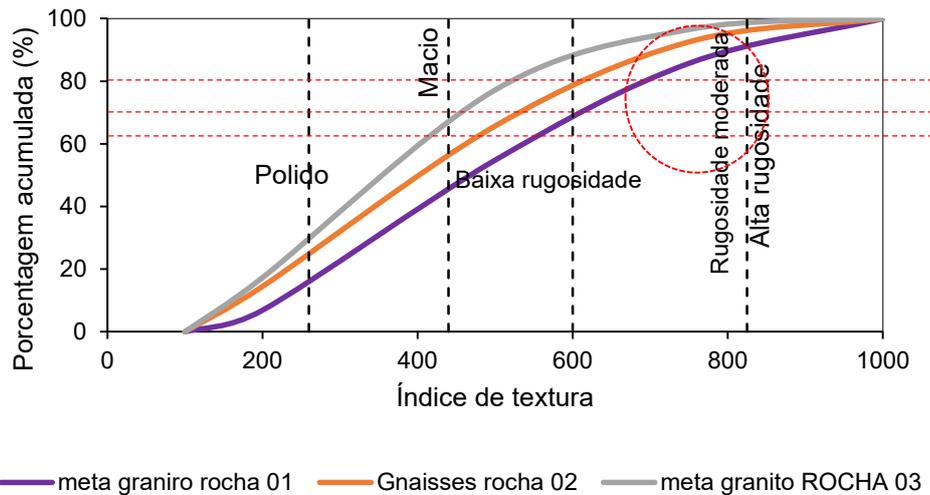


Figura 40-Gráficos das propriedades de forma incluindo marcações de limites de angularidade.

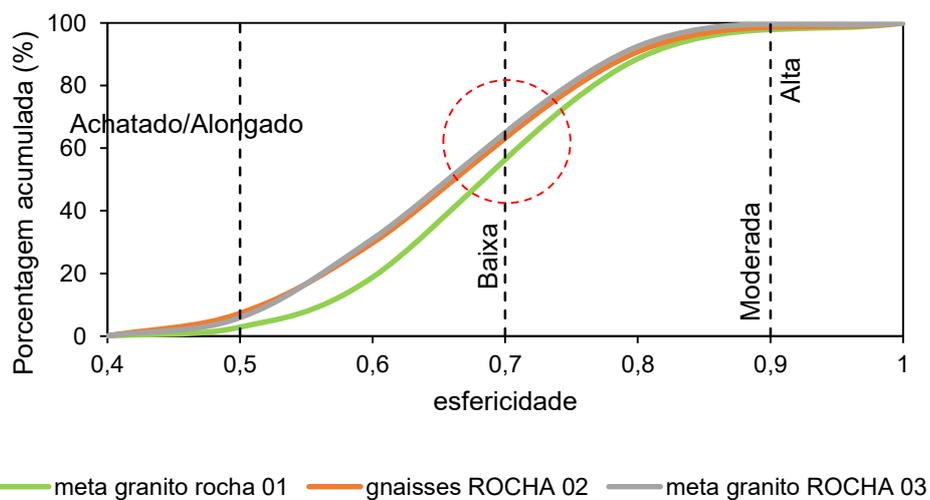
Em contrapartida, analisando a textura dos diferentes agregados britados, é possível se observar diferenças quando comparadas a diferentes litologias dos materiais ensaiados. Materiais com maiores texturas provavelmente está relacionado a presença de minerais com granulação mais fina, indicando que a textura do agregado está relacionada a estrutura mineralógica da rocha ROCHA *et. al.*, (2019).

As amostras ROCHA 02 e ROCHA 03 que apresentam maior média de textura 404,70 e 336,5 respectivamente classificando-as como textura macia, os materiais também apresentam a distribuição de textura por AIMS II, com 51,2% e 59,9% respectivamente o que indica sua textura como moderada, o que corrobora com (ROSA, 2019) que afirma que quanto maior a granulação do material maior será a textura. Em persistência válida ao comparar os materiais ROCHA 01 e ROCHA 03, o primeiro foi que apresentou maior textura em comparação ao segundo, uma vez que apresenta grãos maiores do que esse como se verifica através da petrografia.



Para verificar o quanto se assemelha a forma cúbica, as partículas dos três tipos de rocha foram analisadas quanto a sua esfericidade. Pode-se avaliar em relação à curva média obtida pelo ensaio e através da classificação apresentada neste estudo, que ambas como de baixa esfericidade possuindo em sua maioria, partículas entre os limites de 0,5 a 0,7.

Com base nas médias dos valores para os diferentes tamanhos de partículas, foi possível constatar que a amostra ROCHA 02 apresentou menor esfericidade, 0,50. Os resultados da análise de forma se correlacionando ao tamanho das partículas analisadas não indica tendência de que partículas menores serem mais alongadas e menos esféricas.

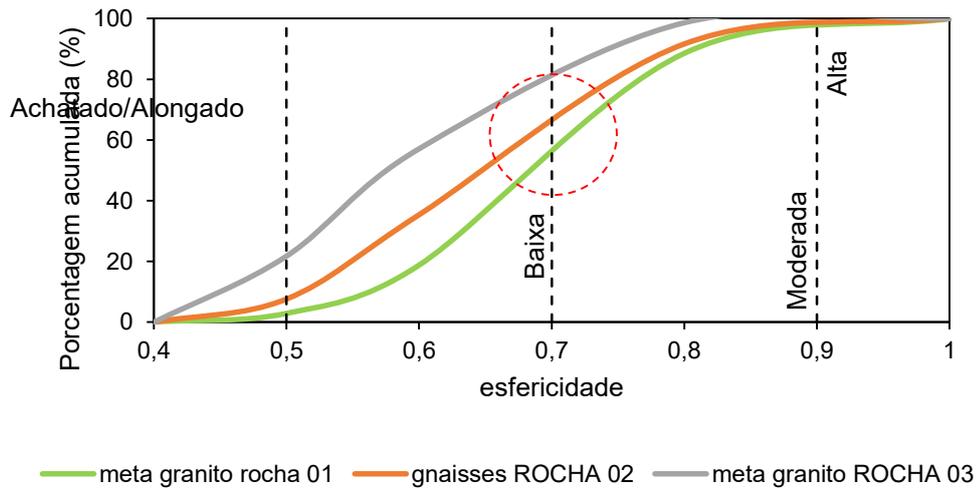


✓ Rocha degradada

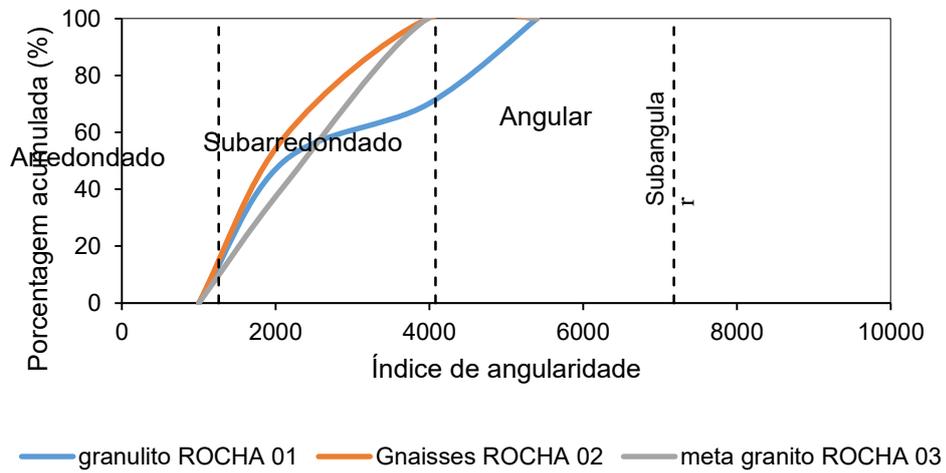
Após o ensaio de ataque por sulfato de sódio, foi possível avaliar alterações nas curvas médias das rochas analisadas. Entretanto, a classificação das características quanto a esfericidade de ambas as rochas se manteve com baixa esfericidade, possuindo em sua maioria partículas entre os limites de 0,5 e 0,7 (Figura 41 (a)). Desta forma verifica-se que após os 60 ciclos o material teve um aumento de partículas entre os limites, que pode ser explicado pelo desprendimento de partículas superficiais mudando características cúbicas das amostras analisadas.

Quanto a angularidade as amostras ROCHA 02 e ROCHA 03 mantem classificação como subarredondadas como verificado na Figura b, mantendo cerca de 90% e 95% das partículas entre os limites 1260 a 4080. Já a ROCHA 01 (meta granito) apresentou mudança considerável na curva média. Isso pode ser justificado corroborando com a petrografia da rocha como apresentado na Figura 21 e Tabela 11. A ROCHA 01 apresenta alto teor de biotita, e a presença de microfissuras em minerais duros que pode trazer ao material maior perda durante o processo de ataque por sulfato de sódio. Desta forma é a única rocha que apresenta uma porcentagem de 15% de grãos subangulares (Figura 41 (b)). sendo assim de acordo com (Adomako *et al.*,2021), o material empregado no lastro ferroviário pode trazer um menor intertravamento entre as partículas, resultado da redução da angularidade das rochas.

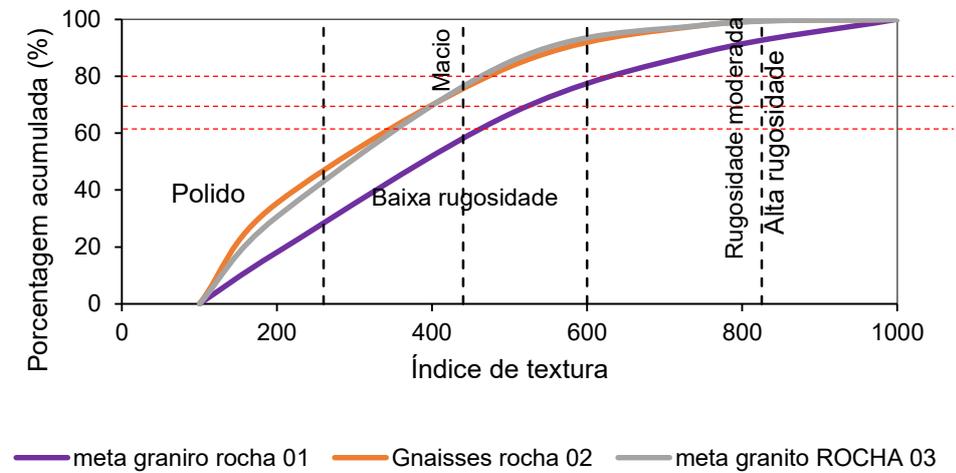
Já características com relação a textura das rochas analisadas verifica-se que a ROCHA 01 foi classificado como rugosidade moderada já as amostras ROCHA 02 e ROCHA 03 apresentou alteração passando para a baixa rugosidade como na Figura 41 (c). A classificação de ambas as rochas pode ser indicativo das mudanças na rugosidade do material analisado, porem analisando o resultado juntamente com a petrografia do material (Tabela 12) observa-se que as amostras ROCHA 02 e ROCHA 03 tem menor suscetibilidade a mudança de textura devido ao maior teor de minerais com resistência ao ataque por sulfato de sódio, favorecendo a resistência a intempérie do material a ser utilizado no emprego ao lastro ferroviário.



(a)



(b)



(c)

Figura 41-Gráficos das propriedades de forma incluindo marcações de limites após ataque por sulfato de sódio - (a) esfericidade; (b) angularidade e (c) textura

4.10. PERMEABILIDADE

Na Tabela 13 são apresentados a variação dos resultados do teste de permeabilidade de cada rocha. Constata-se que à medida que se aumenta a incrustação com pó da rocha, diminui-se a medida de fluxo de água no permeâmetro, logo, a condutividade hidráulica do material diminui como mostrado na Tabela 14.

Nos estudos de Paiva *et.al.* (2015) também se verificou que a condutividade hidráulica do lastro diminui rapidamente à medida que a taxa de incrustação com solo laterítico da região de estudo aumenta, como por exemplo, a condutividade do lastro contaminado com 10% é $2,5 \times 10^{-2}$ cm/s enquanto a condutividade hidráulica do lastro incrustado com 40% é de aproximadamente de $0,5 \times 10^{-2}$ cm/s.

Tabela 14-valores médios de condutividade hidráulica para cada taxa de incrustação (0 a 40%) do lastro das Rochas ROCHA 01, ROCHA 03 e ROCHA 02 das rochas intactas

Rocha	Taxa de incrustação do Lastro (%)	Condutividade Hidráulica (cm/s)
ROCHA 01	0	0,0389
	10	0,0367
	20	0,0353
	40	0,0276
	100	0,029
ROCHA 02	0	0,0393
	10	0,0330
	20	0,0320
	40	0,0217
	100	0,029
ROCHA 03	0	0,0389
	10	0,0341
	20	0,0320
	40	0,0237
	100	0,029

Os valores de condutividade hidráulica com a incrustação entre 0% ($\approx 4,0 \times 10^{-2}$ cm/s) e 20% são baixos se comparados a condutividade hidráulica do lastro com 40%. A maior condutividade hidráulica ocorreu na ROCHA 01, devido à presença de fissuras salientes diagonais na microclina (Figura 20). Os resultados da Figura 42 indicam a condutividade hidráulica variando a partir da incrustação.

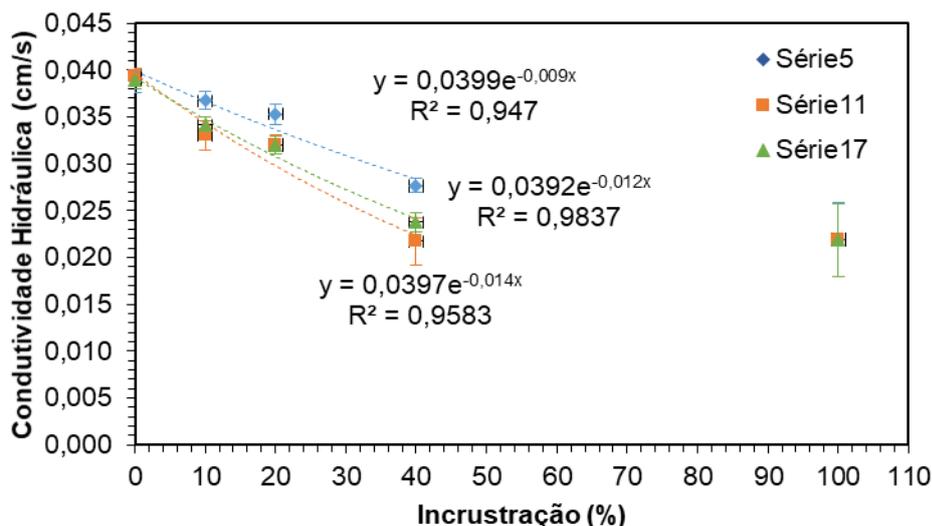


Figura 42- variação da condutividade hidráulica com a taxa de colmatação do lastro ROCHA01, ROCHA 02 e ROCHA 03.

Esses resultados demonstram os problemas de escoamento da água causados pela incrustação do lastro por pó de rocha nas camadas subjacentes, quando comparado a 0% de colmatação a até 40% de colmatação no lastro, quando este se fragmenta por efeito das cargas sobrejacentes e por intemperismo local. A Figura 42 mostra a variação da condutividade hidráulica com a colmatação do lastro intacto.

O material que passou pelo ensaio de ataque por sulfato de sódio também foi submetido ao ensaio de condutividade hidráulica para a verificação da variação da taxa de condutividade hidráulica como observado nos resultados representados na Tabela 15.

A partir das medições realizadas, é possível observar o aumento da condutividade hidráulica, indicado na Tabela 15, inclusive para 0% de colmatação com pó de rocha, com baixa mudança, quando comparadas as Figuras 42 e 43. Como as curvas granulométricas permaneceram as mesmas antes e após o ataque químico (Figura 30), pode-se afirmar que essa diferença foi influenciada pelas partículas do lastro (de 12,5 mm até 50 mm). Os indícios que ocorreria diferença entre a condutividade hidráulica já vinham sendo indicados na petrografia, porosimetria por intrusão de mercúrio (Figuras 28 e 29) e pela variação do desgaste no teste no Micro Deval associado a mineralogia de cada rocha avaliada (Figuras 31 e 32). Segundo Frazão (2008) o ensaio de ciclagem por sulfato de sódio é mais danoso a rocha visto que a resistência mecânica dela está ligada ao nível de porosidade que ela apresenta.

Por outro lado, a permeabilidade aumentou após o ataque químico para todas as rochas em até 40% de incrustação com pó de rocha, isso significa que, para essas condições específicas, o lastro possui capacidade drenante com até 10% de pó de rocha, com pouca diferença do lastro limpo, mesmo se houver ascensão capilar na infraestrutura ferroviária da água sulfatada atingindo o lastro.

Tabela 15-valores de condutividade hidráulica para cada taxa de incrustação do lastro após ataque por sulfato de sódio das amostras Rocha ROCHA 01, ROCHA 03 e ROCHA 02

Rocha	Taxa de incrustação do Lastro (%)	Condutividade Hidráulica (cm/s)
ROCHA 01	0	0,0404
	10	0,3715
	20	0,0361
	40	0,0311
	100	0,0040
ROCHA 02	0	0,0399
	10	0,0379
	20	0,0329
	40	0,0290
	100	0,0040
ROCHA 03	0	0,0396
	10	0,0343
	20	0,0331
	40	0,0261
	100	0,0040

O aumento da condutividade hidráulica do material aqui ocorrido (Figura 43), também foi indicado em estudos realizados por YU *et. al.* (2017), tendo relação direta com o aumento do diâmetro dos poros do material que é resultado da cristalização do sal no interior da rocha devido ao ataque químico, o que aumenta as tensões geradas.

A condutividade hidráulica do material após o processo de ataque por sulfato de sódio é verificada na Figura 43.

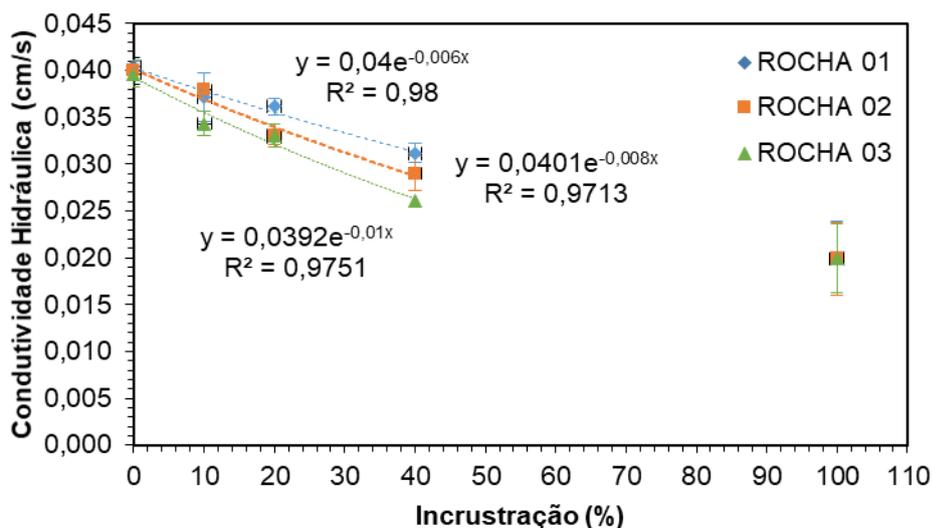


Figura 43 - variação da condutividade hidráulica com a taxa de colmatção do lastro ataque por sulfato de sódio ROCHA 01, ROCHA 02 e ROCHA 03.

Com os resultados obtidos foi verificar que a condutividade hidráulica antes e após ataque por sulfato de sódio, são baixos em comparação com a condutividade hidráulica do lastro limpo que é de 3×10^{-1} cm/s, um exemplo disso é a redução da condutividade hidráulica do lastro com 10% de incrustação, no qual não apresentaria urgência de limpeza e manutenção, é cerca de 1200 vezes inferior a condutividade hidráulica do lastro limpo, assim como verificado através dos ensaios realizados por (Paiva *et.al.* 2015).

A redução da condutividade hidráulica verificada no desenvolvimento dos ensaios pode demonstrar os problemas de fluxo de água causados pela incrustação do lastro pelo pó de rocha proveniente da socaria e passagem dos veículos. Nas Figuras 42 e 43 são apresentados a variação da condutividade hidráulica com o aumento da taxa de incrustação antes e após o ataque por sulfato de sódio.

Foi considerado uma variação exponencial para prever a condutividade hidráulica para as diferentes taxas de incrustação do lastro de cada uma das rochas analisadas no ensaio. Desta maneira verifica-se que o coeficiente de correlação R² variou ente 0,947 a 0,98 indicando um bom ajuste entre a equação e os dados obtidos.

Além disso, observando nas Figuras 42 e 43 que 100% de incrustação representa o limite de fragmentação possível após socaria e passagem de cargas sobre o lastro para as rochas ensaiadas, o que não se deve deixar ocorrer, pois a

substituição e limpeza do pó devem ser realizadas periodicamente. Aqui este ensaio serviu para demonstrar o limite da permeabilidade do pó de cada rocha.

No caso intacto, 40% de pó de rocha equivale a 100% de coeficiente de permeabilidade, visto os desvios serem coincidentes.

Ao passo que no caso degradado após ataque químico, o coeficiente de permeabilidade aumentou em todas as rochas, ou seja, significa que a porosidade aberta da rocha influenciou na variação deste coeficiente, principalmente porque o índice de vazios de cada variação de incrustação foi mantido, antes e após o ataque químico.

Isso significa que a água percolou pelos vazios e garganta de poros das rochas, de modo significativo, pois os desvios padrões de cada curva e comparando as curvas entre si, não são coincidentes na sua maioria. Como o ataque químico não mudou a granulometria do pó da rocha, a parcela de permeabilidade da água no pó da rocha no mesmo índice de vazios permanece a mesma, por isso, a influência dos poros nas rochas ensaiadas.

Lembrando que estes resultados apresentam as piores condições de saturação por ascensão capilar de águas sulfatadas. Logicamente que as águas sulfatadas da região não possuem sulfatos no limite da sua solubilização conforme indicado na ABNT 5564 (2021), porém, indica que pode haver interferências a ponto de serem significativas afetando a permeabilidade do lastro.

4.11. RESISTENCIA A INTEMPÉRES (RI)

Diante aos processos em laboratório para ensaios de alterabilidade, que retratam as solicitações e possíveis condições de degradação impostas nos materiais pétreos em serviço, se destaca o ensaio de ataque por sulfato de sódio (SS) no sentido de fornecer informações detalhadas acerca dos componentes mineralógicos em especial os de alteração e preenchimento dos poros.

As amostras não apresentaram diferenças texturais, desta forma foi possível observar perda de massa possivelmente proveniente de minerais mais superficiais a amostra, entretanto, todas inferiores ao valor máximo de 10% como recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2021).

Analisando a determinação da resistência a intempérie que foi realizada através das amostras utilizadas nos testes de índices físicos, observa-se que não houve

resultados muito significativos de perda de massa para os 60 ciclos em solução de sulfato de sódio anidro e secagem. Os resultados foram calculados a partir da Equação 19.

Tabela 16-Síntese dos resultados do ensaio de resistência a intempérie após ataque por sulfato de sódio.

Amostra	Ri (%)	Observações
ROCHA 01	1,35	Oxidação pouco pronunciada; fissuração e rachaduras evidentes, mas pouco pronunciadas, presença de lasqueamentos;
ROCHA 02	2,84	Oxidação superficial, Rachadura e/ou partição localizadas e pontuais. Frequentes e intensos lasqueamentos;
ROCHA 03	1,00	Oxidação pouco pronunciada; localmente lixiviação, alteração pouco evidente de minerais máficos e/ou opacos.

Nota 1: Legenda - Ri: resistência à intempérie por solução de sulfato

Após o processo de ataque por sulfato de sódio, foi realizada a avaliação qualitativa de forma visual de forma a identificar possíveis alterações na rocha. Desta maneira em todas as amostras foi possível verificar a oxidação superficial do material além de se constatar durante o processo o desprendimento de partículas rocha o que corrobora com as mudanças superficiais verificadas no material. Os autores Yu e Oguchi (2009) observaram satisfatória resistência em rochas ígneas com composição de quartzo, feldspato de potássio, biotita e plagioclásio após o processo de ataque por sulfato de sódio.

Foi possível observar em parte das amostras o início do processo de fragmentação das amostras, que se deu pelo processo de recristalização dos sais de sulfato de sódio que enquanto solução preencheram as fissuras e poros / vazios mais expressivos, o que pode resultar em maior tensão no interior do material facilitando assim o rompimento cíclico das amostras, conforme verificado em algumas das amostras ensaiadas. Na Figura 44 é possível observar a amostra ROCHA 03 pós 60 ciclos que apresenta rompimento total e considerável em uma das amostras.



Figura 44- fragmentação pós 60 ciclos - ROCHA 03

Há relação direta no processo de fragmentação com a capacidade de absorção de água de cada amostra, visto que quanto maior a absorção do material maior o processo de alterabilidade em materiais pétreos.

Existem alguns fatores como regime climático, lençol freático e fatores geológicos da área de implementação da ferrovia que influenciam diretamente nos resultados. Inferir - se que o grau de microfissuramento mineral, ainda fraco, pode ser o responsável pela resposta das amostras ao ataque por sulfato de sódio.

Ao longo do processo de ataque por sulfato de sódio, foi possível verificar que a amostra ROCHA 01 apresentou Oxidação superficial, Rachadura e/ou partição localizadas e pontuais. Frequentes e intensos lasqueamentos; o que mostra que o material apresenta susceptibilidade a solução sulfatada.

Entretanto, a perda de massa mais notória durante o processo após cada ciclagem caracterizada por um padrão previsto foi a amostra ROCHA 03; isso pela presença ainda que fraca as microfissuras, mais abertas e interconectadas, aliada a intensos lasqueamentos, contribuiram para perda de 2,84% em massa total; de modo que o material perdido pós processo de lavagem do material pôde ser observado com facilidade.

4.12. CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS

As correlações foram obtidas com base na verificação dos parâmetros de cada rocha ensaiada para a classificação de acordo com o R^2 de cada uma das amostras de rochas. Levando em consideração os estudos realizados por Hopkins (2016), a correlação se classifica a partir do R^2 , no qual: $R^2 < 0,1$ (muito baixa), $R^2 = 0,1 - 0,3$

(baixa), $R^2=0,3 - 0,5$ (moderada), $R^2=0,5 - 0,7$ (alta), $R^2=0,7 - 0,8$ (muito alta) e $R^2 =0,9 - 1$ (quase perfeita).

As correlações dos ensaios mecânicos foram utilizados os dados obtidos a partir dos ensaios de Micro Deval e Los Angeles. Os ensaios apesar de apresentarem parâmetros parecidos, tem diferenças que trazem importantes constatações acerca do material ensaiado, visto que o ensaio de abrasão Los Angeles é realizado em ambiente sem a presença de água enquanto o Micro Deval fornece resultados a partir de ambiente saturado. Na realização do ensaio de abrasão submetendo as amostras ao Micro Deval Trotta *et. al.* (2021) verificou o polimento das partículas enquanto no ensaio Los Angeles induz mais a fragmentação do material. Desta forma a diferença entre os ensaios estão nas esferas utilizadas e a distância de queda, visto a diferença de tamanho dos tambores de teste.

Baseando-se na Figura 43 e análise dos respectivos resultados obtidos nos ensaios, é possível observar que a partir dos maiores valores de perdas por abrasão Los Angeles, denota-se nos maiores valores de Micro Deval. Esse tipo de constatação corrobora na correspondência entre os respectivos ensaios mecânicos.

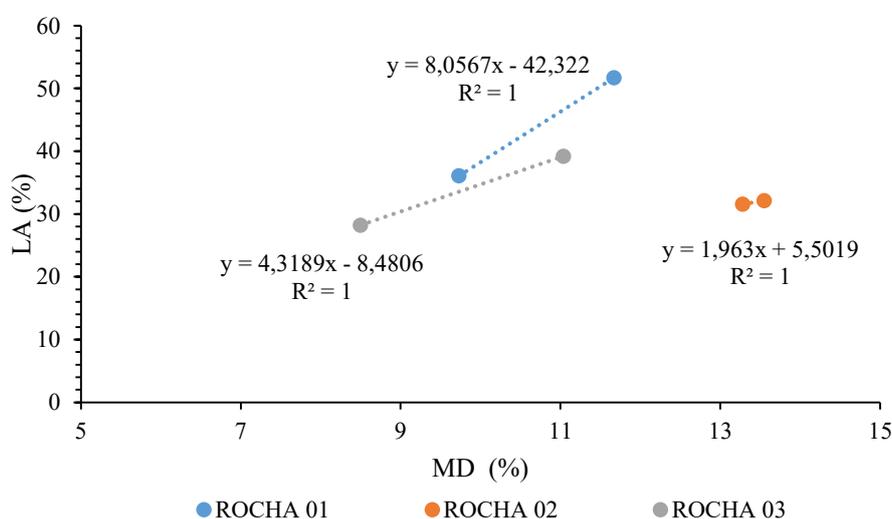


Figura 45-Correlação entre Los Angeles e Micro-Deval.

Esse tipo de correlação é relevante pela possibilidade de traçar uma perspectiva de comportamento de cada material mesmo após o ensaio de ataque por sulfato de sódio, facilitando assim a determinação e emprego do material mais indicado para o lastro ferroviário.

Com relação ao ensaio de carga pontual realizado, também é possível a determinação de correlações dos dados obtido em cada um dos ensaios que fornecem diferentes resultados e parâmetros. Isso acontece quando se observa a correlação entre os ensaios de Point Load e Micro Deval (Figura 44).

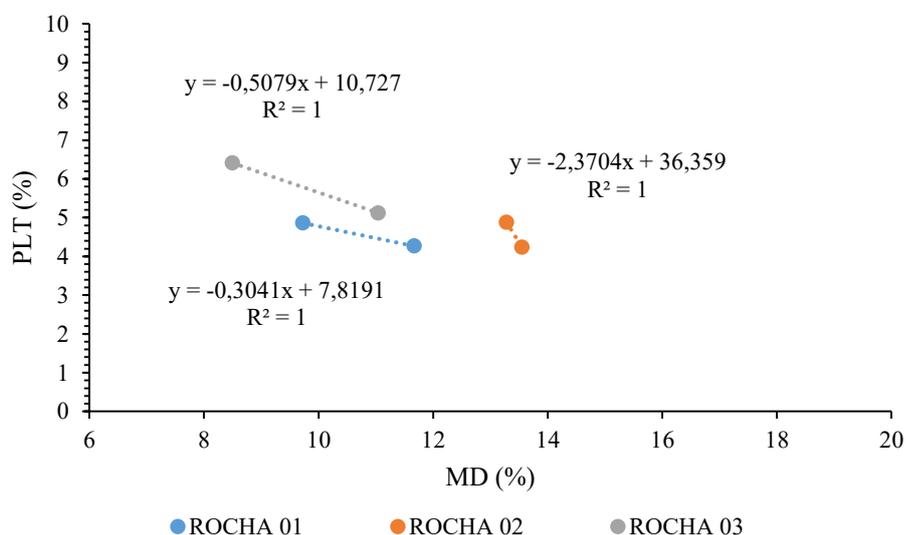


Figura 46-Correlação entre Point load e Micro-Deval.

Desta forma verifica-se a reta dos resultados obtidos, sendo possível verificar o coeficiente de correlação, que foi igual a 1. O R^2 de 1 é possível constatar a correspondência de resultados de ambas as rochas analisadas neste estudo mesmo os ensaios possuindo características distintas.

CAPÍTULO V- CONCLUSÕES

Este estudo de caso analisou o efeito da variação na condutividade hidráulica do lastro analisando três tipos de rocha, relacionando a petrografia com porosimetria e condutividade hidráulica antes e após o ataque por sulfato de sódio, a partir da colmatação por pó de rocha com diferentes valores de incrustação simulando o desgaste e abrasão das partículas por movimento de cargas, o que reduz a condutividade hidráulica.

A partir da análise mineralógica das amostras através da petrografia, verifica-se que todas as amostras de rochas, ROCHA01, ROCHA 02 e ROCHA 03, apresentam em sua composição biotita, mineral suscetível ao intemperismo, o que pode justificar a alterabilidade do material após ataque por sulfato de sódio. Na Mg1 foi possível notar que o quartzo se apresentou mais microfissurado e no ROCHA 03 houve mudanças na textura que passou de granoblástica para granolepidoblástica além do aumento da hornblenda que por característica trata-se de um mineral quebradiço. Em contrapartida, a ROCHA 02 apresenta características mineralógicas após ataque quase inalterado.

Na porosimetria por intrusão de mercúrio das rochas é possível verificar variação no tamanho dos poros antes e após o ataque por sulfato de sódio. No ROCHA 01 devido a microfissuração observado no quartzo á o aumento da intrusão nos poros pequenos e médios, em contrapartida, a ROCHA 02 não apresenta diferença significativa na intrusão após o ataque, visto que de fato à redução das microfissuras em comparação com a amostra intacta. Na ROCHA 03 verifica-se maior variação no tamanho dos poros, onde a faixa de poros variou de médios a grandes devido ao ataque por sulfato de sódio.

Corroborando os resultados obtidos a partir do ensaio de micro deval e petrografia das rochas, pode –se verificar que apesar dos ROCHA01 e ROCHA 03 apresentarem maior resistência ao desgaste mecânico, em contrapartida as amostras apresentam maior variação percentual que passou de (8,5% para 11,4% de desgaste) na amostra rocha 3 e (9,73% para 11,67% de desgaste) na amostra ROCHA 01 após ataque por sulfato de sódio. Em contrapartida o ROCHA 02 que apresentou desgaste de 13,28%, o maior dentre as amostras, apresenta a variação percentual média de desgaste do material sem diferenças significativas para essa propriedade. Isso pode

ter ligação direta com a mineralogia do material já que o ROCHA 02 se apresentou praticamente inalterada após o ataque por sulfato de sódio.

O ensaio de permeabilidade com as diferentes taxas de colmatação permitiu verificar que os valores de condutividade hidráulica diminuem com o aumento da taxa de colmatação do lastro antes e após o ataque por sulfato de sódio em ambas as amostras das rochas, ROCHA 01, ROCHA 2 E ROCHA 03. Houve o aumento da condutividade hidráulica ainda que baixo após o ataque por sulfato de sódio o que mantém a integridade do lastro em caso de utilização dos agregados. Pode-se destacar que apesar das diferentes características e comportamento frente ao ataque por sulfato de sódio das amostras ensaiadas, todas obtiveram valores satisfatórios para a condutividade hidráulica. Entretanto se ressalta a necessidade de limpeza do lastro a partir da taxa de incrustação de 20% e 40% que é classificado como lastro contaminado e altamente contaminado.

A ROCHA 02 destaca-se dentre as demais rochas por apresentar baixa variação percentual de desgaste e alterabilidade após ataque por sulfato de sódio o que viabiliza a utilização do material em lastro ferroviário visto que o material se mantém estável e com boa resistência.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento. Parte 1: Análise petrográfica. NBR 15845. Rio de Janeiro. 2015. 8p.

ABNT EB-655. Via férrea – Lastro-padrão. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 1991.

ABNT NBR 5564. Via férrea - Lastro Ferroviário - Requisitos e método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

AGUIAR, P. R. ; PAIVA, C. E. L. . Parametric Analysis of the Stability of Degraded Railroad Platforms. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 8, p. 11-18, 2014.

AIMS Operation Manual. AFA2A and AFA2C Aggregate Image Measurement System Operation Manual. Pine test equipment, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil.2013. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/projeto/index.html>. Acesso em: 23 nov. 2020.

ANASTASIO, Sara; FORTES, Ana Patricia Perez; KUZNETSOVA, Elena; DANIELSEN, Svein Willy. Relevant Petrological Properties and their Repercussions on the Final use of Aggregates. Energy Procedia, v. 97, p. 546-553, 2016. Doi: 10.1016/j.egypro.2016.10.073.

ANTT, O Modal Ferroviário na Matriz de Transportes, Agencia Nacional de Transporte Terrestre, Brasil 2000.

ARAUJO M. B., Estudo do Resíduo de Construção Civil para Uso em Drenagem Profunda, GEOCENTRO 2019, Brasilia / DF.

AREMA (2013) *Manual For Railway Engineering*, American Railway Engineering And Maintenance Of Way Association, Maryland, USA.

ASTM D5731-08 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications (2016).

ASTM D6928-17. Standard Test Method for Determination for Resistance of coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus (2017).

ATKINSON, B. K. Fracture mechanics of rock. Academic Press Inc. Harcourt Brace Jovanovich, 535 p., 1987.

BASU, A.; KAMRAN, M. Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength. *International Journal of Rock Mechanics And Mining Sciences*, v. 47, n. 5, p.823-828, 06/2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.04.006>.

BASU, A.; MISHRA, D. A.; ROYCHOWDHURY, K. Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, v. 72, n. 3-4, p. 457-475, 16/10. (2013). Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-013-0505-4>.

BROOKS, R. M., and M. CETIN. 2013. "Water susceptible properties of silt loam soil in sub grades in south west Pennsylvania." *Int. J. Modern Eng. Res.* 3 (2): 599–603.

CAPUCCI, E. Água Subterrânea na Baixada Campista. *Anais do I Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste*, 2003. Petrópolis, RJ. ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.

CAVALCANTI, H.P.; BESSA, I.S.; IBIAPINA, D.S., "Avaliação da degradação de propriedades de forma de agregados utilizando o processamento digital de imagens", et al. revista *Matéria*, v.25, n.1, 2020

CERQUEIRA, F.C., ALVES G.M., Análise Preliminar Da Qualidade Das Águas Do Aquífero Livre No Município De São João Da Barra, Rj, XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2003.

CORREIA, L. C. et al.. Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas, 2021.

COSTA, A. P. L.; NOGUEIRA NETO, J. A.; GALEMBECK, T. M. B. Petrografia e caracterização tecnológica dos gnaisses enderbíticos da porção norte do estado do Ceará com aplicação no setor de rochas ornamentais. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 38, n. 3, p.429-438, ago. 2008. Disponível em: <www.sbgeo.org.br>. Acesso em: 03/04/ 2019.

COSTA, M.L. 1996. Minerais, rochas e minérios – Riquezas minerais do Pará. Belém: Falângola, 309p.

COSTA, M.L.; RODRIGUES, S.F.S. 2012. Ciência dos minerais: mineralogia. Belém: GTR Gráfica e Editora, 80p.

CZINDER, B.; VÁSÁRHELYI, B.; TÖRÖK, Á. Long-term abrasion of rocks assessed by micro-Deval tests and estimation of the abrasion process of rock types based on strength parameters. Engineering Geology, v. 282, p. 105996, 03/2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.105996>.

DANA, J.D.; HURLBUT JR, C.S. 1974. Manual de Mineralogia. Tradução Rui Ribeiro Franco – Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S/A e EDUSP, 354p +.

DELGADO, B. G., GUIMARÃES A. C. R., MOTTA L. M. G.. Análise de um solo tropical do oeste do maranhão como material de sublastro para a estrada de ferro carajás. 2013. – revista pavimentação, ano VIII, julho 2013.

DIAS FILHO, J. L. E., XAVIER, G. C., MAIA, P. C. A. Durability of Ornamental Gneiss Stones from Pádua, Rio De Janeiro, Brazil. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, p. 04020176-04020186, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003244).

DNIT (2015) ISF-212. Efeito da granulometria no comportamento mecânico do lastro Ferroviário, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2015.

DNIT 432/2020. Agregados, determinação das propriedades de forma por meio de processamento digital de imagem (PDI), 2020.

DNIT –ISF-212, projeto de superestrutura da via permanente – lastro e sublastro, 2015.

DNIT-IE 179. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

DUTRA, L.R.; LEANDRO, R.P., Influence of aggregate degradation on the permeability of railway ballast. revista *Matéria*, v.25, n.4, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1177>.

EN – 14147-2003. Natural stone test methods - Determination of resistance to ageing by salt mist. Europäische Norm, 2003. 9 p.

EN-13450. Áridos para balasto de vías ferreas. Norma Europea, pp. 1–38, 2002.

ESVELD, C. Modern Railway Track. MRT Productions, 2ª ed, 740 p., 2001.

FELDMAN, F; nissen, D. (2002) Alternative testing method for the measure of ballast fouling: percentage void contamination. *Conference on railway engineering, RTSA, Wollongong*, p. 101-109.

FERNAADES, G. Efeito da granulometria no comportamento mecânico do lastro Ferroviário, COBRAMSEG, 2014.

FERREIRA G., COSTA L., Análise Experimental E Numérica Da Capacidade Drenante De Diferentes Lastros Ferroviários. Congresso nacional de pesquisa em transporte da ANPET. XXIX, 2015.

FRASCÁ, Maria Heloisa Barros de Oliveira; YAMAMOTO, Jorge Kazuo. Deterioração de Rochas Graníticas em Edificações e Monumentos – Investigação por Ensaios de Alteração Acelerada. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 4, n. 1, p. 23-32, 2014.

FUSI, N.; MARTINEZ-MARTINEZ, J. Mercury porosimetry as a tool for improving quality of micro-CT images in low porosity carbonate rocks. *Engineering Geology*, v. 166, p.272-282, 10/2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.002>.

GRIFFITH, A. A. *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. The Royal Society Publishing, Vol. 221, p. 163–198, 1920.

HICKS, R. G.; MONISMITH, C. L. “Factors influencing the resilient response of granular materials”. *Transportation Research Record*, Nº. 354, 1971.

HUDYMA, N., AVAR, B. B., KARAKOUZIAN, M., 2004. Compressive Strength and Failure Modes of Lithophysae-Rich Topopah Spring Tuff Specimens and Analog Models Containing Cavities. *Engineering Geology*, 73(1/2): 179–190. doi:10.1016/j.enggeo

IBIAPINA, Daniele Soares; BRANCO, Veronica Teixeira Franco Castelo; DIÓGENES, Lara Marques; GORETTI, Laura Maria; FREITAS, Silvia Maria de. Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil. *Transportes*, v. 26, n. 4, p. 116-128, 2018.

IMASAVA, F. J.; GOUVÊA, M. T.; XAVIER, C.; RODRIGUES, S. Uso do microcomputador nos cálculos do método estatístico de Weibull para a medida da resistência dos materiais frágeis. *Anais do 33º Congresso Brasileiro de Cerâmica da Associação Brasileira de Cerâmica*. p. 985-1000, 1989.

INDRARATNA, B., SALIM, W., “Deformation and Degradation Mechanics of Recycled Ballast Stabilised with Geosynthetics”, *Soils and Foundations*, v. 43, n. 4, pp. 35-46, Aug. 2003.

INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. In: *Advanced rail geotechnology ballasted track*. Taylor & Francis Group, London, UK, 2011.

ISRM, Suggested method for determining point load strength- ISRM Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test Method, *Int. J. Rock Mech. Min.Sci. &Geomech. Abstr.*, 22.,2, 51-60, 1985.

KLEIN, C.; DUTROW, B. 2012. *Manual de ciências dos minerais*. Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat – 23^a. Ed – Porto Alegre: Bookman, 706p.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. *Estudo de propriedade de tensões do comportamento mecânico de lastros ferroviários*. São Paulo. 171p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011.

KOOHMISHI, M.; PALASSI, M. Evaluation of the Strength of Railway Ballast Using Point Load Test for Various Size Fractions and Particle Shapes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 49, n. 7, p.2655-2664, 23/01/2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-016-0914-3>

KOOHMISHI, M.; PALASSI, M. Evaluation of the Strength of Railway Ballast Using Point Load Test for Various Size Fractions and Particle Shapes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 49, n. 7, p.2655-2664, 23/01/2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-016-0914-3>.

KRAUSKOPF, K. B. *Introdução à geoquímica II*. São Paulo: Polígono, 1972. 311p.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. “State of the Art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates”. *Journal of Transportation Engineering*. pp. 76–83, 2000.b.

LINDQVIST, J. E.; AKESSON, U.; MALAGA, K. "Microstructure and functional properties of rock materials". *Materials Characterization*, pp. 1183-1188, 2007.

MISKOVSKY, K.; DUARTE, M. T.; KOU, S. Q.; LINDQVIST, P. A. Influence of the Mineralogical Composition and Textural Properties on the Quality of Coarse Aggregates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 13, n. 2, p. 144-150, 1 abr. 2004. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1361/10599490418334>.

MORAES, R. Mais sobre o traçado da Ferrovia Vitória-Rio (EF-118) em SFI, SJB e Campos. 2015. Blog do Roberto Moraes. Disponível em: <http://www.robertomoraes.com.br/2015/07/mais-sobre-o-tracado-da-ferrovia.html>.

NBR 5564: Via Férrea – Lastro-Padrão - Requisitos e Métodos de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, (2021).

NBR NM 51: Agregados – Determinação da abrasão "Los Angeles" Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro. (2001). 6p.

PAIVA, CASSIO; FERREIRA, MATEUS ; FERREIRA, ADELINO . Ballast drainage in Brazilian railway infrastructures. *Construction & Building Materials*, v. 92, p. 58-63, 2015.

PIRES, J.; COSTA, R.; BERNUCCI, L.; MOTTA, R.; MOURA, E. Degradação do lastro ferroviário – principais aspectos e estudos de caso. *Transportes*, v. 25, n. 3, p. 62, 29/10/2017. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v25i3.1340>.

POLICOLA A. V., Durabilidade De Rochas Para Lastro Visando A Linha Férrea EF-118. UENF Dissertação de Mestrado. 2021.

PROFILLIDIS, V. *Railway Management and Engineering*. Ashgate Publishing Limited, 4ª ed, 2014.

RAYMOND, G.P., WILLIAMS, D.R. Repeated load triaxial tests on dolomite ballast. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104 (GT 7), 1978, pp. 1013–1029.

REMÉDIO, M. J. Caracterização Tecnológica De Agregados Para Uso Como Lastro De Trem De Alta Velocidade – Trecho Campinas/São Paulo. 2014. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2014.

REMÉDIO, M. J.; RIBEIRO, R. P.; CURTIS NETO, J. A. Correlações Entre Petrográfia e Propriedades Tecnológicas de Materiais Pétreos Visando Utilização Como lastro de Ferrovias. Geociências, São Paulo, v. 37, n. 3, p.669-681, 2018.

ROSA F. A., Efeito Da Granulometria E Da Litologia No Comportamento De Lastro Ferroviários Em Laboratório E Por Análise Computacional. COPPE / UFRJ Dissertação de mestrado. 2019.

SANTOS, R. S., RIBEIRO, R. P., PARAGUASSÚ, A. N., XAVIER, G. C. Railroad ballast of granites and basic rocks in tropical regions: relationships between petrography, physical-mechanical properties and alterability. Transportes, Rio de Janeiro, Vol.30, n.1, p. 333-354, (2021).

SELIG, E. T., WATERS, J. M. Track geotechnology and substructures Management. Thomas Telford Services Ltd, Londres, 1994. 446 pp.

Sinopse Geológica do Estado do Rio de Janeiro, na Escala 1:400.000, drm.rj.gov.br/index.php/areas-de-atuacao/43-cartasgeologicas/95cartageologicasinopse.html

TAVARES, F. G.; MORAES W. A.; FONSECA E. S., SOUSA T. N. R., “Análise utilizando a distribuição de Weibull com dois e com três parâmetros para Determinar a Resistência Mecânica a Flexão de Materiais Cerâmicos”. Unisanta Science and Technology, 2014, 16, December.

TAVARES, L. M.; NEVES, P. B. "Microstructure of quarry rocks and relationships to particle breakage and crushing". *International Journal of Mineral Processing*, pp. 28-41, 2008.

THAKUR, P. K.; VINOD, J. S.; INDRARATNA, B. "Effect of confining pressure and frequency on the deformation of ballast". *Géotechnique: International Journal of Soil Mechanics*, pp. 786-790, 2013.

TROTTA, Roberto Pasquale; BARROSO, Emílio Velloso; MOTTA, Laura Maria Goretti da. Migmatitic gneiss aggregates: compositional, mechanical, and morphological responses to innate heterogeneity. *Engineering Geology*, 283, p. 106002, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106002>

UGUR, I.; DEMIRDAG, S.; YAVUS, H. Effect of rock properties on the Los Angeles Abrasion and impact test characteristics of the aggregates. *Materials characterization*, 61, p. 90-96, 2010. Elsevier BV. Doi: 10.1016/j.matchar.2009.10.014.

VALEC 80-EM-033A-58-8006. Pedra britada para lastro. VALEC Engenharia, Construção e Ferrovias S.A. Brasília, DF, Brasil, 2012.

VIZCARRA, G. O. C. Efeito da Granulometria no Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário. 2015. 130 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, de Engenharia Civil da Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

WATTERS, B. R., KLASSEN, M. J., CLIFTON, A. W. Appendix: CP Rail specification for ballast. *Transportation Research Record, TRB*. 1131:59-63, 1987

WU, J.; HOU, Y.; WANG, L.; GUO, M.; MENG, L.; XIONG, H. Analysis of coarse aggregate performance based on the modified Micro Deval abrasion test. *International Journal of Pavement Research And Technology*, v. 11, n. 2, p. 185-194, 2018. Airiti Press, Inc. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.10.007>.

XAVIER, G. C.; AZEVEDO, A. R. G. ; ALEXANDRE, J.; MONTEIRO, S. N.; PEDROTI, L. G. Determination of Useful Life of Red Ceramic Parts. 2018. 04018381-1 - 04018381-13. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002590](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002590)

YANG XU, Wenying Yu, Luchao Qie, Hong Wang, Na Ning, Analysis of influence of ballast shape on abrasion resistance using discrete element method, *Construction and Building Materials*, 273, 2020

YU, C.; YAO, W.; XU, Y.; XIA, K.. A dynamic point-load test for quantifying rock dynamic strength parameters. *Review of Scientific Instruments*, v. 88, n. 11, p. 113901, nov. 2017. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4995609>.

ZHANG, N.; HE, M.; ZHANG, B.; QIAO, F.; SHENG, H.; HU, Q. Pore structure characteristics and permeability of deep sedimentary rocks determined by Mercury intrusion porosimetry. *Journal of Earth Science*, v. 27, n. 4, p. 670-676, 18 jun. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12583-016-0662-z>.

