

**Luís Felipe Barreto de Oliveira**

**INFLUÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO DE SAL SOLÚVEL NA  
DEGRADAÇÃO DE PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DE  
GRANITÓIDE**

**Trabalho Final de Curso  
(Geologia)**

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2019



UFRJ

**Luís Felipe Barreto de Oliveira**

**INFLUÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS NA DEGRADAÇÃO DE  
PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DE GRANITÓIDE**

Trabalho Final de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador:

Emílio Velloso Barroso

Rio de Janeiro

Fevereiro 2019

Luís Felipe, Barreto de Oliveira

**Influência da cristalização de sal solúvel na  
degradação de propriedades petrofísicas de granitóide**  
/ Luís Felipe Barreto de Oliveira - - Rio de Janeiro: UFRJ /  
IGeo, 2019.

xiv, 58 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade  
Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,  
Departamento de Geologia, 2019.

Orientador: Emílio Velloso Barroso

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental –  
Trabalho de Conclusão de Curso. I. Emílio, Velloso  
Barroso. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III.  
Título.

Luís Felipe Barreto de Oliveira

INFLUÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO DE SAL SOLÚVEL NA DEGRADAÇÃO DE  
PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DE GRANITÓIDE

Trabalho Final de Curso de Graduação em  
Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
UFRJ, apresentado como requisito  
necessário para obtenção do grau de  
Geólogo.

Orientador:

Emílio Velloso Barroso

Aprovada em: 20.02.2019

Por:

---

Orientador: Dr. Emílio Velloso Barroso (UFRJ)

---

Dr. Helena Polivanov (UFRJ)

---

Amanda Menezes Ricardo (COPPETEC-LEMETRO)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2019

A minha mãe Mônica Barreto Arruda, pelo apoio em mais uma etapa concluída, dentre muitas que ainda virão.

## Agradecimentos

A minha família, pelo apoio, interesse e encorajamento constante, não apenas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, como também desde o meu ingresso na Universidade. Obrigado por estarem comigo em todos os momentos.

Ao meu primo e amigo Cláudio João, que abriu meus olhos para a Geologia como um todo e me introduziu ao universo das pesquisas acadêmicas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso, pelo auxílio, suporte e dedicação que permitiram o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também pelas conversas, dicas profissionais e, sobretudo, o compartilhamento do seu interesse e gosto pela área de pesquisa.

A Prof. Dra. Andrea Ferreira Borges, pelas orientações e sugestões sempre pertinentes e, em especial a Prof. Dra. Helena Polivanov, pelos conselhos, sugestões e por ter me apresentado à Geologia de Engenharia e Geotecnia.

A geóloga Amanda Menezes, pela ajuda bibliográfica fundamental, ajuda nos ensaios realizados, sugestões para melhorar a abordagem do tema e acompanhamento em todas as fases desse trabalho. Obrigado pela grande amizade e apoio, sou muito grato por ter tido a oportunidade de aprender mais contigo.

Ao geólogo João Paulo Porto Barros, pelas conversas, dicas e sugestões para elaboração do trabalho, além da amizade.

Aos funcionários do Laboratório de Física de Rocha do CENPES da Petrobras, Guilherme Vasquez, Guilherme Sollo, Júlio Justen, e Targore Ostape pela atenção e apoio na utilização do Velan na obtenção da velocidade de propagação de ondas das amostras.

Aos grandes amigos que presenciaram meu esforço desde as fases iniciais, sempre oferecendo alguma ajuda e procurando saber do andamento dos experimentos. Em especial meus amigos de graduação Adriel Filipe, Fabio Feler, Gabriel Eloy, Raphael Camelo e Olivia Souto. Também aos meus amigos do LEMETRO e PEDOLAB, em especial Natalia Fontes e Rian Porto, além daqueles que não atuam mais nos laboratórios (Marcio Leão, Marcelo Schwenck e Danielle Soares), mas que foram e são fundamentais para o meu crescimento profissional.

*“Um dia, quando olhar para trás, os anos de luta lhe parecerão os mais bonitos.” - Sigmund Freud (1856-1939).*

## Resumo

OLIVEIRA, Luís Felipe Barreto. **Influência da cristalização de sal solúvel na degradação de propriedades petrofísicas de granitóide**. 2019. xiv, 58 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Os materiais pétreos fazem parte do desenvolvimento de diversas civilizações, registrando sua interação com o meio em que vivem. As rochas possuem, até hoje, uma rica aplicabilidade, usadas como ornamentação, revestimento, acabamento bem como elementos estruturais em diversas obras de engenharia. Apesar da sua durabilidade, existem diversos fenômenos que causam a deterioração desses materiais, fato que vem aumentando os estudos para sua preservação. A cristalização de sais dentro das rochas representa um tipo de intemperismo bastante influente, especialmente em regiões marinhas e costeiras, gerando tensões internas que fissuram e fragmentam a rocha, comprometendo a sua estrutura. Dessa forma, esse estudo buscou entender e analisar os efeitos da cristalização de sais solúveis nos poros de um granitóide, utilizando ensaios de durabilidade. Para tal, foram realizados ensaios de ciclagem de imersão total em solução salina e de exposição à névoa salina, seguindo a norma ASTM B117/11. Para avaliar e quantificar os danos gerados nas amostras ensaiadas, foram calculados seus índices físicos (peso específico aparente, porosidade e índice de absorção) e suas velocidades de propagação de ondas transversais (VP). Os resultados concluíram que há aumento da porosidade, índice de absorção, além do desenvolvimento de anisotropia conforme o aumento dos ciclos dos experimentos, sobretudo nos corpos de prova expostos à névoa salina e posicionados na vertical (menor face voltada para cima), mostrando que em um período de tempo relativamente curto, os efeitos gerados são consideráveis para alterar as propriedades petrofísicas da rocha e, com isso, sua aplicabilidade, principalmente como material de construção.

Palavras-chave: cristalização de sal; geomecânica; ensaios de durabilidade.

*Abstract*

OLIVEIRA, Luís Felipe Barreto. **Salt crystallization influence on granitoid petrophysical properties damage**. 2019. xiv, 58 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The material stones are part of many civilizations development, recording its integration to environment. The rocks have a widespread applicability nowadays, used as ornamentation, aesthetic cover and structure elements in many engineering works. Despite of your resistance, there are many phenomena which damage these materials, thus increases studies about you preservation. Salt crystallization inside stones depicts a type of influential weathering, especially in coastal and marine zones, begetting internal tensions which cause material cracks and disruptions, affecting your structure. That way, the study seek understand and analyze the soluble salts crystallization effects in granitoids, using durability tests. In its turn, salt solution total immersion cyclic test and salt fog exposure cyclic test were performed, using the ASTM B117/11 normal. The physical indexes (bulk density, porosity and absorption index) and the transverse waves propagation velocity were calculated to evaluate and measure the damage. The results concluded porosity and absorption index increase and an anisotropy development, due to the cyclic tests increase, mainly happened in salt fog exposure samples, positioned in vertical (smaller face above), showing that in short period of time, the effects created are influent to damage the rock petrophysical properties and its applicability as building material.

Key-Words: salt crystallization; geomechanics; durability tests

## Lista de figuras

Figura 1 - Chafariz do Mestre Valentim localizado na Praça XV, Rio de Janeiro. Foto :Bruna Prado/Metro Rio. ....	16
Figura 2 - Vista do Parque do Flamengo, Rio de Janeiro. Foto: Claudia Girão, tirada em 2005. ....	17
Figura 3 - Esquema da percolação e tensões e fissuras geradas pela cristalização de sal em poros de uma rocha. ....	18
Figura 4 - Aspecto de revestimento em rocha, na orla do Estado de Recife. A fachada da construção exhibe eflorescências e manchas esbranquiçadas, causadas pela cristalização de sais trazidos por névoa salina ou maresia. (Frasca & Yamamoto, 2014). ....	19
Figura 5 - Métodos de análise de degradação, com destaque onde os experimentos realizados neste trabalho se inserem. Fonte: Lima (2006). ....	28
Figura 6 - Fluxograma demonstrando as etapas para a elaboração da pesquisa. ....	31
Figura 7 - Corpo de prova preparado em formato cilíndrico para as análises laboratoriais. ....	32
Figura 8 - A – Visão geral da balança utilizada; B – Amostra na balança para obtenção do peso saturado ( $M_{sat}$ ) e C – Detalhe da amostra posicionada na rede e submersa em balde com água, para obter o peso submerso ( $M_{sub}$ ). ....	34
Figura 9 - Amostras submersas em solução com NaCl e posicionadas conforme o número de ciclos pré-definidos. ....	36
Figura 10 - Câmara de névoa salina utilizada para o ensaio, com corpos de prova posicionados. ....	37
Figura 11 - A - Medição da condutividade das amostras submetidas à dessalinização, B - Amostras submersas em água destilada e condutivímetro portátil utilizado. ....	38
Figura 12 - - Simulação do movimento das partículas em relação à passagem de ondas tipo P e tipo S. Em destaque o padrão de ondas utilizadas (Fonte: USGS 2019). ....	40
Figura 13 - A - Equipamento pertencente ao CEMPES utilizado para a medição da velocidade de ondas P nos corpos de prova selecionados e B - Corpo de prova posicionado no equipamento, com destaque para os condutores pizeométricos (Cap). ....	41
Figura 14 - Lâmina delgada perpendicular mostrando plagioclásios alterados por processo de sericitização, a nicóis cruzados. ....	43
Figura 15 - Lâmina delgada perpendicular mostrando biotita com inclusões, bordas de reação e alterações, a nicóis cruzados. ....	43
Figura 16 - Lâmina delgada paralela mostrando exudações de sílica em cristal de microclina. ....	44
Figura 17 - Diagrama QAPF utilizado para a classificação moral de rochas plutônicas (modificando de Le Maitre <i>et al.</i> , 2002). ....	44
Figura 18 - A - Visão em lupa de cristais de plagioclásio com clivagem preenchida por sal e B - Locais de preenchimento por sal destacados (amostra submetida a 20 ciclos no ensaio de exposição à névoa salina). ....	45
Figura 19 – A Visão em lupa de eflorescências de sal e cristais com estrutura hopper na superfície da amostra e B - Padrão de estrutura hopper destacado (amostra submetida a 30 ciclos em ensaio de imersão em solução salina). ....	45
Figura 20 - Gráficos de condutividade elétrica x tempo. Amostras submetidas ao ensaio de imersão em solução salina. ....	46
Figura 21 - Gráficos de condutividade elétrica x tempo. Amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina - posição vertical. ....	47
Figura 22 - Gráficos de condutividade elétrica x tempo. Amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina - posição horizontal. ....	47

Figura 23 - Gráficos de porosidade normalizada x número de ciclos com a equação estabelecida pela linha de tendência. ....	49
Figura 24 - Gráficos de porosidade normalizada x número de ciclos, exceto 20 ciclos. Destaque para os valores de coeficiente de determinação encontrados. ....	50
Figura 25 - Gráfico circular mostrando o comportamento da velocidade de propagação na amostra sã e nas amostras submetidas à ciclagem no ensaio de imersão. ....	54
Figura 26 - Gráfico circular mostrando o comportamento da velocidade de propagação na amostra sã e em amostras cicladas em ensaio de exposição à nevoa salina - posição vertical. ....	55
Figura 27 - Gráfico circular mostrando o comportamento da velocidade de propagação na amostra sã e em amostras cicladas em ensaio de exposição á névoa salina - posição horizontal. ....	56
Figura 28 - Gráficos mostrando a evolução do índice de anisotropia de acordo com os ciclos realizados nos ensaios de durabilidade. ....	57

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Teores médios de sais na água do mar com salinidade normal (Mohriak <i>et al.</i> , 2008).....	23
Tabela 2 - Quantidade de ciclos para atingir porosidade limite e avançada para rochas ornamentais, segundo ensaios de durabilidade.....	51
Tabela 3 - Índices de absorção média medidos antes e depois das amostras submetidas ao ensaio de absorção em solução salina.....	51
Tabela 4 - Índices de absorção média medidos antes e depois das amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina (posição vertical).....	52
Tabela 5 - Índices de absorção média medidos antes e depois das amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina (posição horizontal). ....	52
Tabela 6 - Valores especificados pela norma ASTM e sugeridos no Brasil (Frazão & Farjallat, 1995).....	53

## Sumário

Agradecimentos .....	vi
Resumo .....	viii
<i>Abstract</i> .....	ix
Lista de figuras .....	x
Lista de Tabelas .....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos e justificativas .....	20
<b>2. INTEMPERISMO .....</b>	<b>21</b>
2.1 Ação e cristalização dos sais em solução.....	22
2.2 Intemperismo experimental.....	27
<b>3 MATERIAL &amp; MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1 Material .....	30
3.2 Métodos .....	30
3.1 Preparação dos corpos de prova .....	32
3.3 Propriedades petrofísicas.....	32
3.4 Ensaio de durabilidade acelerados .....	34
3.4.1 Imersão total em solução salina.....	35
3.4.2 Exposição à névoa salina.....	36
3.5 Dessalinização .....	38
3.6 Velocidade de propagação de ondas .....	40
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
4.1 Descrição mineralógica .....	42
4.2 Feições macroscópicas da cristalização de sais .....	45
4.3 Dessalinização .....	46

<b>4.4 Evolução das propriedades petrofísicas .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4.1 Porosidade .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4.2 Índice de absorção .....</b>	<b>51</b>
<b>4.5 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....</b>	<b>52</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>58</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As rochas, utilizadas como materiais de construção representam a capacidade de o homem transformar o habitat a seu favor. O papel dos elementos pétreos atua de forma multidisciplinar e abrange vários segmentos de áreas de estudo tais quais: história, engenharia civil e arquitetura.

Dessa forma, a geologia, como ciência exata, trona-se amplamente capaz de ser o ponto de interseção entre áreas que têm a rocha como um recurso natural comum de investigação.

Sob um ponto de vista histórico-cultural, as rochas estão entre os materiais naturais mais antigos utilizados pelos seres humanos. Devido a sua rica aplicabilidade, diversas civilizações ao longo da história empregaram esses materiais em construções como, por exemplo, pirâmides, castelos, palácios, fortes, templos, monumentos, barragens, revestimentos, entre outros (Maciel Filho, 1997). A construção de barragens, por exemplo, para utilização dos recursos hídricos, remonta há cerca de 5000 anos, conforme registros da barragem de Jawa na Jordânia (Watzko, 2007).

Muitas dessas construções e monumentos feitos a partir de materiais pétreos remetem à identidade das civilizações que as construíram, constituindo uma parte fundamental de sua história. Segundo Del Lama (2008), esses monumentos de caráter histórico são parte do patrimônio cultural de um povo ou uma nação, servindo como elo entre o presente e o passado. As construções históricas por utilizarem, na maioria das vezes, rochas que afloram na região onde foram construídas, funcionam como um retrato dos ambientes geológicos e dos fenômenos e processos naturais, pretéritos e atuais, que os originaram, o que foi definido por Brilha (2005) como geodiversidade (Figura 1).



**Figura 1 - Chafariz do Mestre Valentim localizado na Praça XV, Rio de Janeiro. Foto :Bruna Prado/Metro Rio.**

Considerando o aspecto exploratório das rochas em pedreiras, Costa *et al.* (2000) pontuam que, as rochas ornamentais e de revestimento, correspondem a tipos litológicos extraídos em blocos ou chapas, podendo ser submetidos a variados graus de modelamento ou beneficiamento, para então serem utilizadas como função estética ou de acabamento. O comportamento que uma rocha apresentará está intimamente relacionado com as suas propriedades, composição mineralógica, textura e estrutura. Estas características é que nortearão a resposta, satisfatória ou não, às solicitações químicas e mecânicas do meio ambiente (Frazão 2002).

Também há de se considerar o uso das rochas sob o ponto de vista da engenharia civil onde, segundo Maciel Filho (1997), principalmente em decorrência da durabilidade e resistência a longo prazo, tais materiais ainda continuam ocupando importante papel em construções da atualidade, como: estruturas de enrocamento, fundações superficiais, lastro de vias férreas, pavimentos, agregados para concreto, filtros, cantarias, entre outros.

No Brasil, por exemplo, esse uso ocorre com o predomínio de rochas ígneas e metamórficas, sobretudo granitos, mármore e gnaisses de modo geral, em razão de serem rochas detentoras de boas propriedades físicas e químicas (Neill & Smith, 1996). Na época da colonização, o uso da rocha era mais expressiva, utilizada em obras de fortificações, igrejas, casas senhoriais, fazendas e monumentos (Cavalcanti, 1951). Após o aparecimento das

construções metálicas e do concreto armado, respectivamente nos séculos XIX e XX, o uso desses materiais passou a se restringir a muros de arrimo, fundações pouco profundas, blocos para pavimentação, lastro de ferrovias, estruturas de enrocamento, além de uso estético e de revestimento (Petrucci, 1973) (Figura 2).



**Figura 2 - Vista do Parque do Flamengo, Rio de Janeiro. Foto: Claudia Girão, tirada em 2005.**

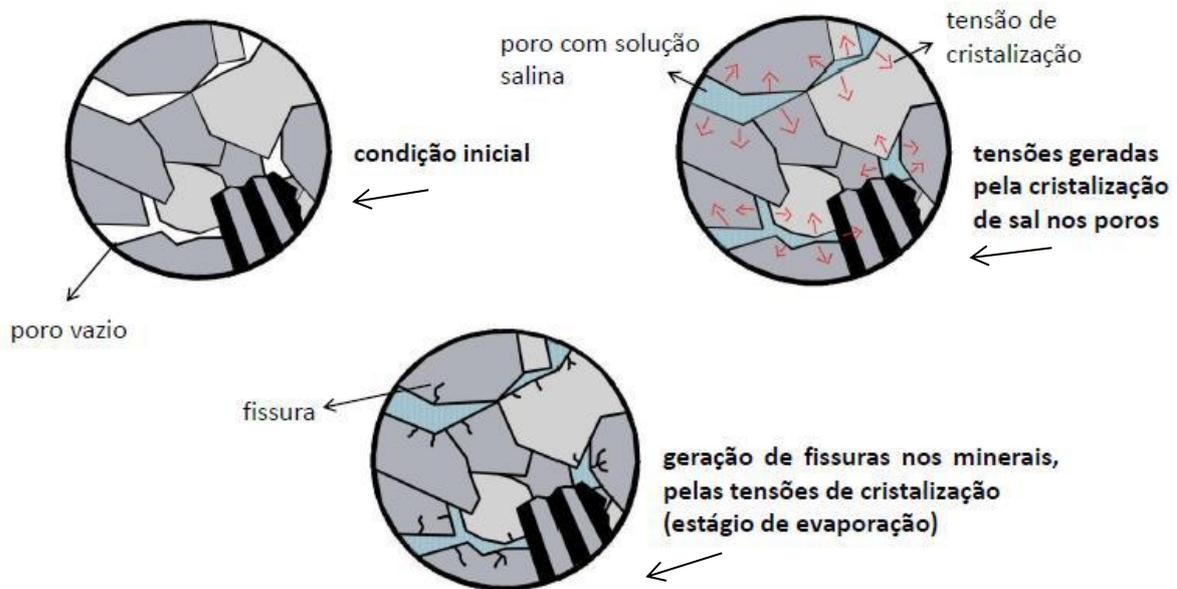
No que se refere ao uso em construções históricas locais, o Estado do Rio de Janeiro surge como um notável exemplo da utilização de rochas ornamentais, sobretudo na capital, devido à abundância e disponibilidade natural de tais rochas, como biotita-hornblenda gnaisse (conhecido como granito pádua), gnaisse facoidal e leptinito.

Apesar do uso costumeiro desses materiais, existem alguns contrapontos. De acordo com Franzoni (2018), tanto as pedras utilizadas em esculturas e arquitetura, quanto às rochas em seu local de origem, são expostas às formas de intemperismo inerentes ao ambiente, incluindo ações antrópicas, a que estão sujeitas, resultando em alterações na sua microestrutura, modificando suas propriedades físicas e mecânicas. As alterações das características das rochas influenciam, não apenas na perda de propriedades mecânicas, como também da estética, diminuindo seu valor econômico (Teixeira, 2009).

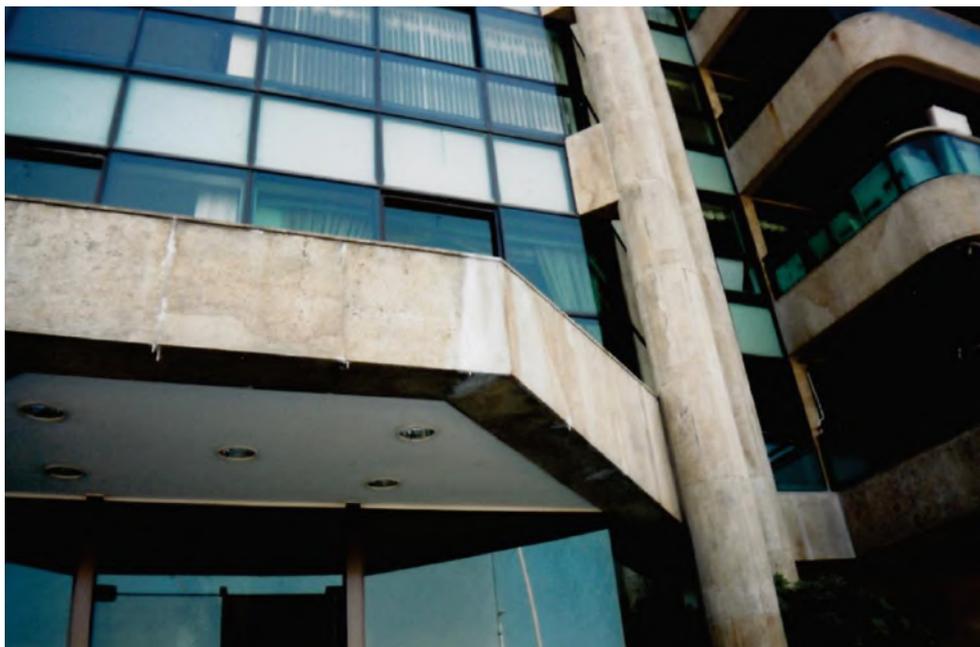
Dessa forma, a vida útil das rochas, no que tange a resistência quanto à ação do intemperismo vai depender de fatores intrínsecos, ou seja, aquelas inerentes à própria rocha, e extrínsecos, sendo aqueles associados ao ambiente de exposição da mesma (Grossi *et al.*, 1998).

Para Vicente *et al.* (1996), as características internas são: porosidade, presença de espécies mineralógicas solúveis como carbonatos e sulfatos, presença de minerais com estrutura e/ ou variável segundo o grau de umidade como, por exemplo, argilas expansivas, entre outros. Os autores ainda citam, dentre os fatores externos, a cristalização de sais na zona de intemperismo, sendo um processo relevante na destruição da textura de rochas primárias, levando-as a um elevado grau de deterioração (Vicente 1996).

O intemperismo por sal corresponde ao principal processo influente na erosão e degradação de construções. Bland & Rolls (1998), mencionaram esse fenômeno como uma das principais formas de degradação de rochas ornamentais em áreas urbanas. A água do mar, assim como qualquer outro fluido que contenha sais dissolvidos, pode penetrar em fissuras nas rochas, principalmente naquelas presentes em áreas costeiras e, a partir da evaporação da água dessa solução, ocorre o crescimento localizado de sais, gerando forças capazes de desencadear aberturas nas fissuras pré-existentes, além da geração de outras novas (Nichols, 2009) (Figuras 3 e 4).



**Figura 3 - Esquema da percolação e tensões e fissuras geradas pela cristalização de sal em poros de uma rocha.**



**Figura 4 - Aspecto de revestimento em rocha, na orla do Estado de Recife. A fachada da construção exhibe eflorescências e manchas esbranquiçadas, causadas pela cristalização de sais trazidos por névoa salina ou maresia. (Frasca & Yamamoto, 2014).**

Segundo Saboya Júnior (1993, p. 251, *apud* DIAS, 2001), a previsão do comportamento geotécnico de uma obra civil pressupõe a análise de suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade, propriedades que variam sensivelmente com o intemperismo. No caso de uma estrutura composta por enrocamento, o estudo da permeabilidade da mesma, pode ser considerado secundário em relação ao da resistência e deformabilidade. Porém, devido à variedade de tamanho dos blocos de rocha utilizados para a confecção desse tipo de barragem, a obtenção direta desses parâmetros é dificultada.

Como uma forma de melhorar a atuação dos processos intempéricos que atuam sobre rochas utilizadas como materiais de construção foram desenvolvidas teorias probabilísticas ou simulações técnicas-laboratoriais que são análogas aos processos naturais sofridos por uma rocha *in situ*. Dentre esses métodos experimentais, existem estudos de alteração ou envelhecimento acelerado como ciclos de umedecimento e secagem, cristalização de sais, entre outros. Essas técnicas buscam representar algumas situações em que frequentemente são observadas deteriorações em rochas quando expostas ao meio ambiente (Frasca & Yamamoto, 2014).

Nesse sentido, a investigação dos agentes de deterioração, bem como o desencadear de suas reações nas rochas utilizadas em obras civis, torna-se uma prática cada vez necessária fundamental para a escolha adequada desses elementos como material de construção, sobretudo quando se trata do intemperismo causado pela ação de sais.

## 1.1 Objetivos e justificativas

Além da relevância de sua paisagem natural, a cidade do Rio de Janeiro foi classificada como Patrimônio da Humanidade na categoria de Paisagem Cultural, o que envolve a natureza e construções humanas, portanto, o estudo da degradação dos prédios históricos cariocas possui especial interesse (Ricardo, 2015). Ao se tratar do patrimônio construído, muitas vezes a reposição dos constituintes pode vir a ser inviável, como apontou Gimenez (2018), mencionando urbanização, possíveis custos de reposição ou a dificuldade de obtenção dos materiais originalmente usados devido à exaustão das pedreiras.

Segundo Silva (2012), grande parte desses monumentos possuem degradações por cristalização de sais solúveis, destacando não apenas construções históricas, como também demais obras civis feitas com rochas, como barragens de enrocamento, sujeitas às alterações comprometedoras da estrutura, devido a esse tipo de intemperismo.

A partir disso, o presente trabalho propõe entender os mecanismos de alterabilidade e sua influência na degradação prolongada de rochas, através da caracterização das propriedades petrofísicas frente ao intemperismo físico causado pela cristalização de sais solúveis, utilizando ensaios de durabilidade acelerados imersão em solução salina e exposição à névoa salina, em uma rocha equivalente às utilizadas em construções históricas e demais obras civis, especificamente estruturas de enrocamento.

## 2. INTEMPERISMO

O intemperismo ou meteorização consiste em um conjunto de fenômenos naturais que ocorrem na superfície da crosta, onde há o contato com a atmosfera e parte da hidrosfera. Esses processos causam modificações de ordem química e física nas rochas aflorantes ou próximas à superfície, gerando produtos que estejam mais em equilíbrio com as condições físico-químicas vigentes, diferentes das que deram origem à maioria dessas rochas. (Ollier, 1969, 1975, Maciel Filho, 1997, Nichols, 2009). Seu conceito pode ser entendido e estudado segundo diversos pontos de vista, como por exemplo, o processo inicial para a sedimentação, formação de solos ou enriquecimento/empobrecimento de elementos.

A natureza e efetividade desses processos dependem principalmente de três grupos de variáveis, sendo: condições climáticas, como temperatura e pluviosidade; propriedades dos materiais, como composição, coesão, resistência entre outros; variáveis locais, como vegetação, vida animal e lençol freático (Suguio, 2003).

O intemperismo se divide em físico, especificamente relacionado a processos de desintegração e fragmentação, e em químico, no que compete aos processos que levam à decomposição da rocha. Segundo Toledo *et al.* (2000), quando a ação física ou bioquímica de organismos vivos ou da matéria orgânica proveniente de sua decomposição participa do processo, o intemperismo pode ser chamado de físico-biológico ou químico-biológico.

O intemperismo abordado no presente trabalho é, especificamente, do tipo físico, correspondendo ao desgaste das rochas por processos mecânicos. Algumas dessas forças se originam no interior dessas próprias rochas, enquanto são aplicadas externamente, conduzindo as mesmas à deformação e eventual colapso. Como produtos dessas alterações ocorrem à redução da granulometria e/ou aumento de superfície específica, excluindo alterações químicas e/ou mineralógicas (Suguio, 2003).

Os mais importantes agentes no processo de intemperismo físico são a ação do congelamento, que gera um aumento do volume da água que percola por entre as fissuras da rocha, exercendo tensões na mesma; a variação de temperatura, acarretando na expansão e contração de minerais, onde a diferença entre o coeficiente de dilatação deles gera o fraturamento da rocha; a cristalização de sal (Nichols, 2009), sendo este último abordado neste trabalho.

O intemperismo também possui uma abordagem que leva em conta a atividade antrópica. Atualmente, o ser humano pode ser considerado um agente intempérico relevante

nos processos de degradação de um modo geral. Segundo Frascá & Yamamoto (2014), a deterioração das rochas usadas em construções e monumentos, modernos ou históricos, está empiricamente relacionada à interação das características petrográficas, físicas e mecânicas com os agentes do meio ambiente e com os procedimentos realizados pelo homem ao longo do tempo, como fixação, limpeza e manutenção. Sendo assim, a atividade humana no meio ambiente funciona como um catalizador para o intemperismo.

Como mencionado por Silva (2012), o intemperismo "antropogênico" associado à poluição ambiental de áreas urbanas permitiu constatar forte influência sobre o estado de preservação das rochas, acarretando em alterações como crostas negras, crostas de sal, crostas orgânicas como líquens, incrustações em fluxo de carbonado de cálcio e estalactites, intensa desintegração granular e esferoidal entre outros.

## **2.1 Ação e cristalização dos sais em solução**

A cristalização de sais é amplamente reconhecida como uma causa de intemperismo de materiais porosos de construção, incluindo pedras, argamassa e até mesmo o concreto (Chanvillard & Scherer, 2006). Segundo a sua capacidade de atuação, o intemperismo devido ao crescimento e nucleação do sal é similar às demais formas de intemperismo físico, envolvendo desgaste e fragmentação dos materiais onde atua, porém a principal diferença é onde essa degradação ocorre mais rapidamente, sendo na porção mais inferior e externa da rocha (Charola 2000).

A suscetibilidade da rocha ao intemperismo por cristalização de sais solúveis decorre de uma complexa interação entre fatores como: o ambiente e suas condições físico-químicas (principalmente temperatura e umidade), o histórico de intemperismo na área, a disponibilidade de sal, além das propriedades estruturais e mineralógicas da rocha (Bland & Rolls, 1998). De acordo com Charola (2000), os sais podem se originar de diversas fontes como, por exemplo, poluição do ar, solo, aerossóis marinhos, tratamentos inadequados de rochas, interação de materiais utilizados nas construções, como por exemplo, cimentos com preparação inadequada.

O mar trata-se do maior provedor de sais na natureza, contendo cerca de 36.500 mg/l desses compostos em solução (3,65% em peso), sendo sobretudo constituídos por cloreto de sódio, ou seja, a salinidade da água do mar é tal que, ao se evaporar um litro de água do mar, sobra um resíduo pesando 36,5 g de vários sais, dos quais a maior parte (cerca de 97%) é cloreto de sódio (NaCl), conforme a Tabela 1 exemplifica. Especificamente quanto ao cloreto

de sódio, admite-se que parte dos íons formadores é oriunda do vulcanismo (Cl) enquanto que a outra advém do intemperismo de minerais constituintes de rochas ígneas e metamórficas (Na), sobretudo os pertencentes ao grupo dos feldspatos, solubilizados pela água oriunda das chuvas. O principal agente da atmosfera marinha corrosiva são os íons de cloro (Cl) (Mohriak *et al.*, 2008).

**Tabela 1 - Teores médios de sais na água do mar com salinidade normal (Mohriak *et al.*, 2008).**

Sais	Porcentagem em peso (%)
NaCl	78.3
MgCl <sub>2</sub>	9.21
MgSO <sub>4</sub>	6.53
CaCO <sub>4</sub>	3.84
KCl	2.11
CaCO <sub>3</sub>	0.33
MgBr <sub>2</sub>	0.25
SrSO <sub>4</sub>	0.05
NaF	0.01

A eficácia do intemperismo por sal depende, sobretudo, percolação da solução salina e formação dos cristais de sal no interior da rocha, sendo, portanto, intimamente relacionada às condições de porosidade e permeabilidade da mesma (Bland & Rolls, 1998). De acordo com Charola (2000), o sal consegue adentrar e se locomover em corpos porosos apenas quando se encontra em solução, portanto, entender a solubilidade de sais é essencial para compreender o intemperismo associado. A alteração causada irá depender da natureza do fluido e como o mesmo se movimenta por entre a rede porosa do material.

Benavente *et al.* (1999) observaram que a porosidade é imprescindível para determinação do tipo de degradação justamente por influenciar o deslocamento da solução. Nesse sentido, os autores propuseram subdivisões para os intervalos de porosidade nas rochas em três categorias, onde cada um deles possui uma movimentação de fluidos particular e, conseqüentemente, diferenças quanto ao comportamento do intemperismo sofrido. São os intervalos:

- Macroporosidade, englobando poros superiores a 2500 µm e mobilidade do fluido por forças gravitacionais;
- Mesoporosidade, incluindo poros com tamanho variando entre 0,1 a 2500 µm e movimentação de fluidos dada principalmente pela capilaridade;
- Microporosidade, com tamanhos de poros inferiores a 0,1 µm, sendo a mobilidade do fluido por meio de forças de absorção.

Os intervalos de micro e mesoporosidade, na prática, são os que mais sofrem os danos da cristalização dos sais. É importante destacar que a viscosidade da solução também constitui um fator determinante na taxa e mecanismos de transporte da solução salina, assim como na deposição do sal (Sawdy, 2008).

Outra característica importante para o entendimento da mobilidade consiste no potencial iônico, abordado por Mohriak *et al.* (2008) como a densidade da carga elétrica na superfície dos íons formadores do sal. Esse potencial é definido como a razão entre a carga de um cátion e seu raio iônico, sendo uma importante propriedade para caracterizar a força das ligações entre os compostos químicos. Segundo esses autores, os sais em geral possuem íons (Na, K, Cl) com potencial muito baixo, por terem carga elétrica pequena e grande raio iônico, resultando numa grande facilidade de dissolução dos compostos em água e também uma alta mobilidade dos íons no sistema cristalino da substância sólida, o que favorece a atuação do intemperismo.

Segundo Charola (2000), a solução consegue adentrar e se deslocar por entre os poros de um material sob a forma de líquido ou vapor, onde os mecanismos de percolação irão depender do estado físico em que se encontra esta solução. No estado líquido, o deslocamento ocorre por capilaridade e/ou infiltração. O primeiro corresponde à atração dada entre a água e o material capilar, gerando uma tensão interfacial entre ambos, assim como a tensão superficial, o último exige pressão hidrostática e depende da permeabilidade do material. A capilaridade e a infiltração são mecanismos que atuam na mesoporosidade e microporosidade, respectivamente. Os maiores danos ocorrem pela cristalização de sais nos microporos (Benavente *et al.*, 1999).

No estado gasoso, essa movimentação é tida por condensação e/ou ação higroscópica, também chamada higroscopicidade. A condensação pode ser diferenciada em condensação superficial e microcondensação (ou condensação capilar) em poros, ambas referentes à mudança de estado físico do vapor. De acordo com Charola (2000), soluções salinas concentradas possuem pressão de vapor mais baixa que a da água pura, apresentando uma maior tendência a se condensar para atingir o equilíbrio. Já a ação higroscopicidade consiste em diferentes processos de absorção da solução a partir do ar (Camuffo, 1998).

Compreender o movimento da água pelo material poroso é importante para analisar a dinâmica de cristalização dos sais. Segundo Sawdy (2008), o transporte de sais no estado líquido é do tipo iônico e em estado gasoso ocorre por advecção e difusão, sendo estes últimos mais rápidos que o primeiro. Se o movimento ocorre no estado líquido, ocorre o transporte de sais, se ocorre como vapor, esses sais podem ser retidos através da higroscopicidade. No

primeiro caso o mecanismo depende principalmente da capilaridade, enquanto que no segundo irá depender da difusão. A transição entre tais mecanismos define a umidade crítica do material poroso, sendo uma constante particular para cada material em questão e levando em conta seu tamanho e distribuição de poros (Snethlage and Wendler, 1997).

Os danos causados por sais em solução se devem, geralmente, à acumulação e mudança de fase próxima ou na superfície do objeto, entre camadas, como um processo de variação da umidade/hidratação, estando relacionado a variação de temperatura. O local de cristalização, se referindo também ao tamanho do poro, também diz respeito aos danos gerados. Em um sistema composto por uma conexão de poros, especialmente microporos e macroporos, essa mudança de fase e variação de umidade/hidratação associada é mais fácil ocorrer (Sawdy, 2008).

Em rochas com igual força mecânica, aquelas que possuem poros grandes (macroporos) separados entre si por microporos serão as mais suscetíveis ao intemperismo (Wellman & Wilson, 1995).

Como resultado do intemperismo em rocha, não apenas a porosidade absoluta, como também a efetiva sofre aumento. Isto ocorre devido à abertura de novas microfraturas e/ou fraturas já existentes, além da dissolução de frações mais solúveis da rocha (Franzoni, 2013). Em outras palavras, a permeabilidade também é um fator influente na degradação, em particular no intemperismo estudado, pois favorece a nucleação e crescimento dos cristais de sal.

Nas rochas destinadas à cantaria, o intemperismo dito salino geralmente tem início nas estações de seca. Esse momento climático é considerado o período crítico, pois é quando ocorre a cristalização dos sais em solução dentro dos poros do material (Kuchitsu *et al.*, 1999). Em se tratando de obras de engenharia, essa alteração ocorre conseqüente da flutuação do nível do mar a longo prazo, por ação das marés, estabelecendo períodos de imersão e emersão com posterior secagem.

Assim como Rodrigues-Navarro e Doehne (1999) pontuaram, a cristalização dos sais irá depender das propriedades físicas da solução salina, tais como a pressão do vapor d' água e suas tensões interfaciais com o sistema de poros da rocha. A etapa de cristalização do sal nos poros ocorre quando a água evapora e escapa do sistema ou então pode ser causado por variações térmicas, ocorrendo inicialmente nos poros maiores.

A superfície específica da rocha ou amostra também vai influenciar no intemperismo relacionado à cristalização de sais, devido à cinética da evaporação. Para um mesmo corpo de prova, de mesmo volume e dimensões diferentes, a face que apresenta uma direção bem

menor que as outras, irá se alterar mais rápido e de forma mais regular. Isto ocorre porque a evaporação acontece em um tempo menor (Silva, 2012).

A cristalização do sal pode ocorrer na superfície do material rochoso, formando as eflorescências; ou dentro dos capilares próximo à superfície da rocha, originando as subeflorescências, onde a ação mecânica de sais, nas fissuras, dá início ao trabalho destrutivo (Frasca & Yamamoto, 2014). Apesar da cristalização de sais ser capaz de trazer grandes danos às litologias em geral, é importante destacar que em alguns casos, como na eflorescência, a alteração do ponto de vista das propriedades petrofísicas, não é intensa, o que ocorre principalmente são danos de aspecto visual, comprometendo a estética de patrimônios construídos (Matsukura, *et al.*, 2004).

Levin (1982), buscando entender como a cristalização de sais ocorre de forma mais destrutiva (subeflorescência) em alguns casos do que em outros (eflorescência), propôs um modelo para entender esse mecanismo. Foi observado que a solução salina migra por entre os poros da rocha através da capilaridade e, quando a evaporação se inicia, seguida da saturação da rocha, ocorre a cristalização do sal. Dessa forma, em casos onde a solução é fornecida mais rapidamente que a taxa de evaporação, o sal tende a se precipitar fora dos poros, caracterizando a eflorescência, Já nos casos onde a solução salina é provida em uma taxa menor que a de evaporação, essa solução irá se evaporar e alcançar a condição de supersaturação, seguida da cristalização, dentro da rede de poros da rocha, caracterizando a subeflorescência.

De acordo com Silva (2012), a ocorrência da eflorescência e subeflorescência também vai depender da intensidade da variação de temperatura no corpo. Em casos onde essa variação é brusca, há uma tendência maior às cristalizações no interior, enquanto que variações mais lentas tendem a produzir cristalizações em porções mais superficiais da rocha.

A percolação e conseqüente cristalização do sal nos poros da rocha geram degradações mecânicas resultantes de pressões causadas por fenômenos de expansões dos minerais, por variações de temperatura ou hidratação, além da pressão de cristalização desses minerais na rede de poros, principal mecanismo para o intemperismo observado (Evans, 1970). A pressão de cristalização pode ser entendida como um conjunto de tensões exercidas nos grãos da rocha conseqüentes da nucleação e crescimento de cristais de sal em seus poros, contribuindo para sua deterioração e mudando notadamente sua distribuição espacial, em relação ao volume de sólido e volume de vazios (poros). Essa aplicação de força depende de fatores como a fase mineral, a temperatura e o grau de supersaturação (Benavente *et al.*, 1999).

Diferentes sais também afetam as rochas de maneiras e intensidades diferentes, além disso, a combinação entre eles também pode gerar danos maiores ou menores no material, isso se deve ao compartilhamento iônico dos compostos em solução. Caso haja íons em comum entre dois sais, a solubilidade de ambos irá aumentar, ao passo que o não compartilhamento iônico provoca a diminuição da solubilidade (Charola, 2000). A presença de mais de um sal em solução no sistema também pode resultar em uma queda da umidade relativa, favorecendo sua precipitação, além dos ciclos de cristalização/dissolução.

## **2.2 Intemperismo experimental**

O intemperismo e suas causas são bastante estudados e bem conhecidos por diversos pesquisadores, porém o conhecimento da atuação e a quantificação do efeito das degradações sobre as rochas, ainda é pouco expressivo. Conforme o avanço científico e técnico do ser humano, novos materiais e métodos de construção e restauração dos bens patrimoniais vêm sendo desenvolvidos (Smith, 1999).

Com o intuito de avaliar a durabilidade das rochas ao intemperismo, foram desenvolvidos diversos tipos de métodos de análise, dentre eles os ensaios laboratoriais, dos quais muitos são utilizados na geotecnia, simulando determinadas condições ambientais, geralmente por meio de ciclos determinados (Maciel Filho, 1997) (Figura 5).

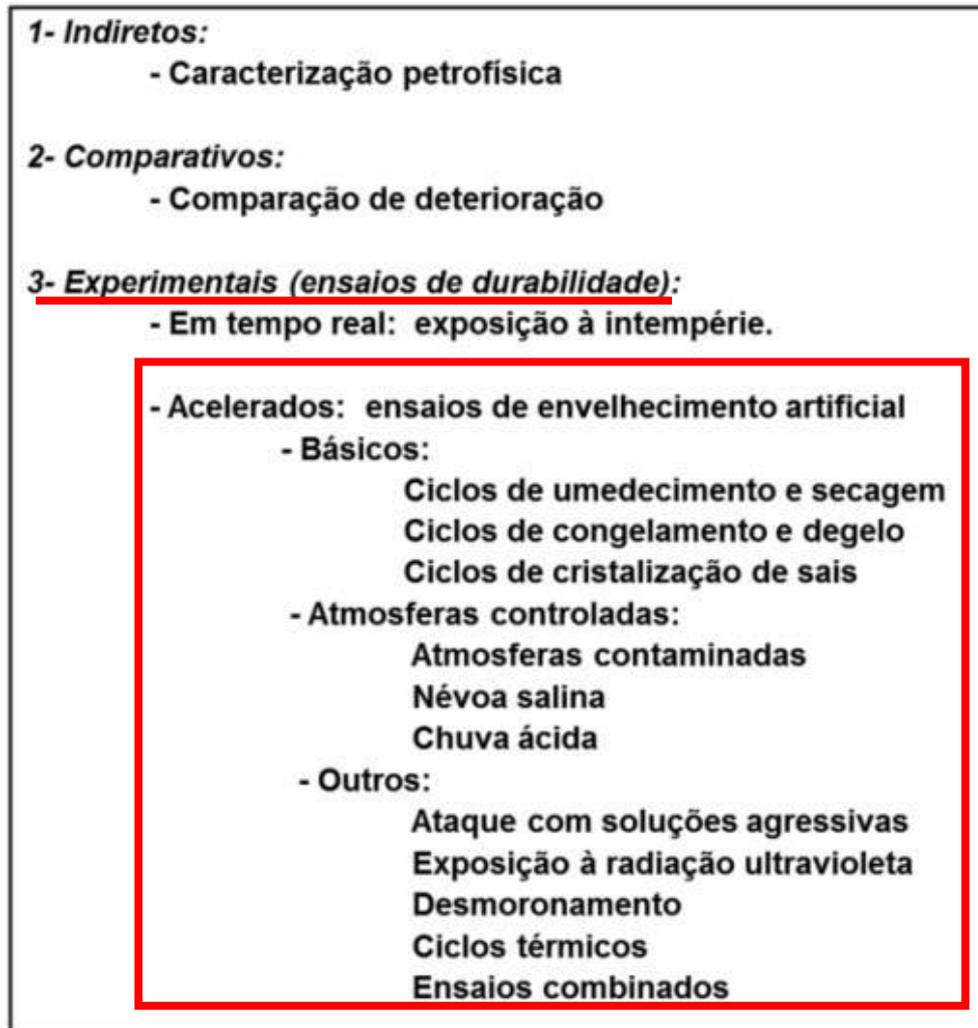


Figura 5 - Métodos de análise de degradação, com destaque onde os experimentos realizados neste trabalho se inserem. Fonte: Lima (2006).

Algumas dessas técnicas procuram acelerar o intemperismo de diversas maneiras como, por exemplo, pela dissolução por chuva ácida, por deformações, por deposição de poluentes atmosféricos e por ação de sais solúveis, para que seus efeitos sejam avaliados de forma mais imediata e levando em conta condições distintas do ambiente, como a variação de temperatura, pressão, umidade relativa, entre outros (Franzoni, 2013).

Em laboratório, as condições utilizadas para quantificar o intemperismo são fixas, o que facilita a avaliação dos resultados da degradação proposta, contudo, isso não acontece na natureza, uma vez que variáveis necessárias às alterações não se mantêm constantes. Segundo Andrade *et al.* (1999), a variação das condições climáticas naturais ocorre, principalmente devido a ciclos diurnos e sazonais de temperatura, diferindo das condições isotermas ou com variações controladas, tidas em ensaios experimentais.

As reações de alteração, incluindo o intemperismo, ocorrem de maneira espontânea devido às variações da energia livre de Gibbs, onde as taxas dessas reações são extremamente vagarosas em processos naturais (Kakizawa *et al.*, 2000). De acordo com Morais *et al.* (2003), o principal obstáculo ao estudar a alteração de rochas ornamentais é a dificuldade de se reproduzir, em escala de tempo reduzida, os efeitos da interação da rocha com o ambiente sem se afastar excessivamente das condições exógenas naturais. Em muitos casos, a diminuição do tempo para a observação dos fenômenos é compensada com a intensificação dos agentes bem como do processo causador das modificações no corpo analisado.

Por esta razão, os resultados desses experimentos devem ser entendidos apenas como indicadores para compreensão dos efeitos produzidos pelos agentes intempéricos que promovem a alterabilidade das rochas, permitindo recomendações sobre a maneira mais adequada de aplicação e manutenção.

### **3 MATERIAL & MÉTODOS**

#### **3.1 Material**

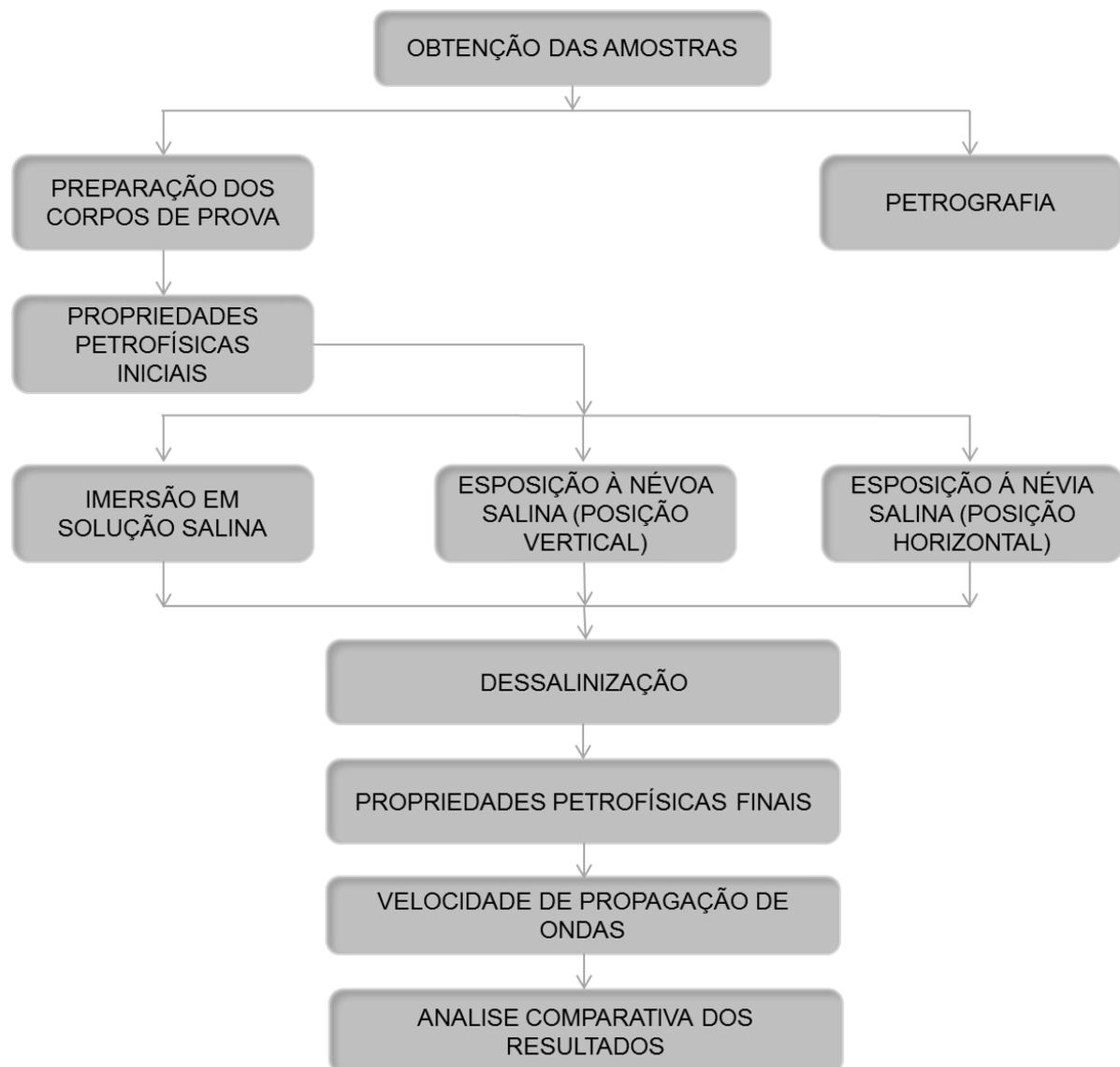
A rocha utilizada na pesquisa trata-se de um dos granitóides pós-tectônicos localizados nos arredores de Morro do Coco, distrito de Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro. Essas rochas ocorrem como batólitos circulares, diques e soleiras, cortando as rochas encaixantes da Província da Mantiqueira, província estrutural neoproterozóica desenvolvida durante a Orogênese Brasileira – Panafricana (880 a 480 Ma) (Silva *et al.*, 2000).

As amostras foram adquiridas em testemunhos de sondagem previamente existentes no LEMETRO-UFRJ. A profundidade de coleta no testemunho foi de 21,30 metros e, a princípio, deve salvaguardar as amostras de efeitos intempéricos intensos.

A escolha desse litotipo se justifica pelo fato de ser uma rocha considerada homogênea e isotrópica, pois o tamanho de suas heterogeneidades é muito menor que o tamanho do corpo (Alves *et al.*, 2017). Dessa forma, não deve haver efeitos significativos da textura nas propriedades mecânicas, o que tende a fornecer resultados globais de menor variação.

#### **3.2 Métodos**

O fluxograma abaixo (Figura 6) representa de maneira esquemática e ordenada os procedimentos metodológicos que foram realizados no estudo.



**Figura 6 - Fluxograma demonstrando as etapas para a elaboração da pesquisa.**

### 3.1 Preparação dos corpos de prova

Para a realização dos ensaios de ciclagem foram preparados um total de 52 amostras, todas cortadas em formato cilíndrico com diâmetro aproximado de 53cm e altura aproximada de 26cm (Figura 7). Esse formato foi proposto para realizar a medição da velocidade de propagação de ondas, além de possibilitar verificar a influência do ensaio de exposição à névoa salina nas diferentes faces dos corpos de prova.

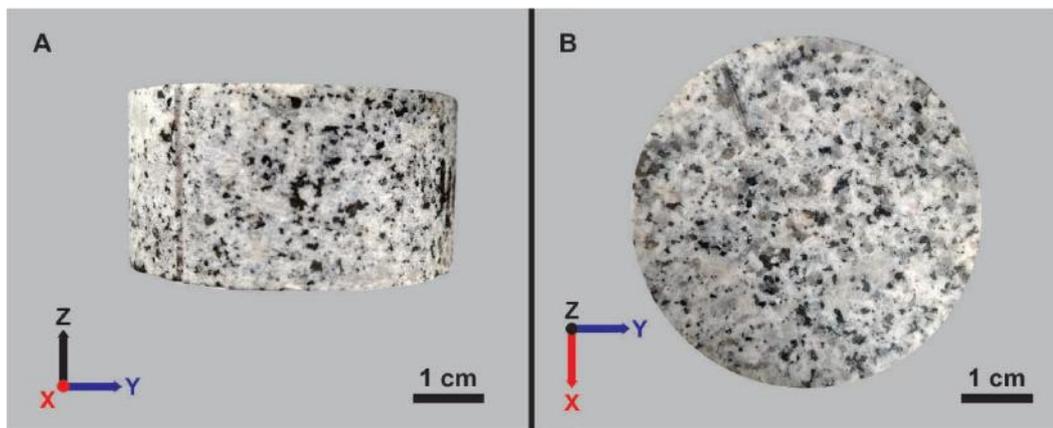


Figura 7 - Corpo de prova preparado em formato cilíndrico para as análises laboratoriais.

### 3.2 Petrografia

Estudos petrográficos foram feitos em amostra da rocha considerada sã (sem ter sido submetida aos ensaios de ciclagem) com o intuito de verificar e descrever características como: mineralogia, tamanho e contato entre os cristais, anisotropia, porosidade, fissuras, presença de alterações iniciais. Para tanto, foram confeccionadas lâminas delgadas da rocha estudada, no seu estado inicial.

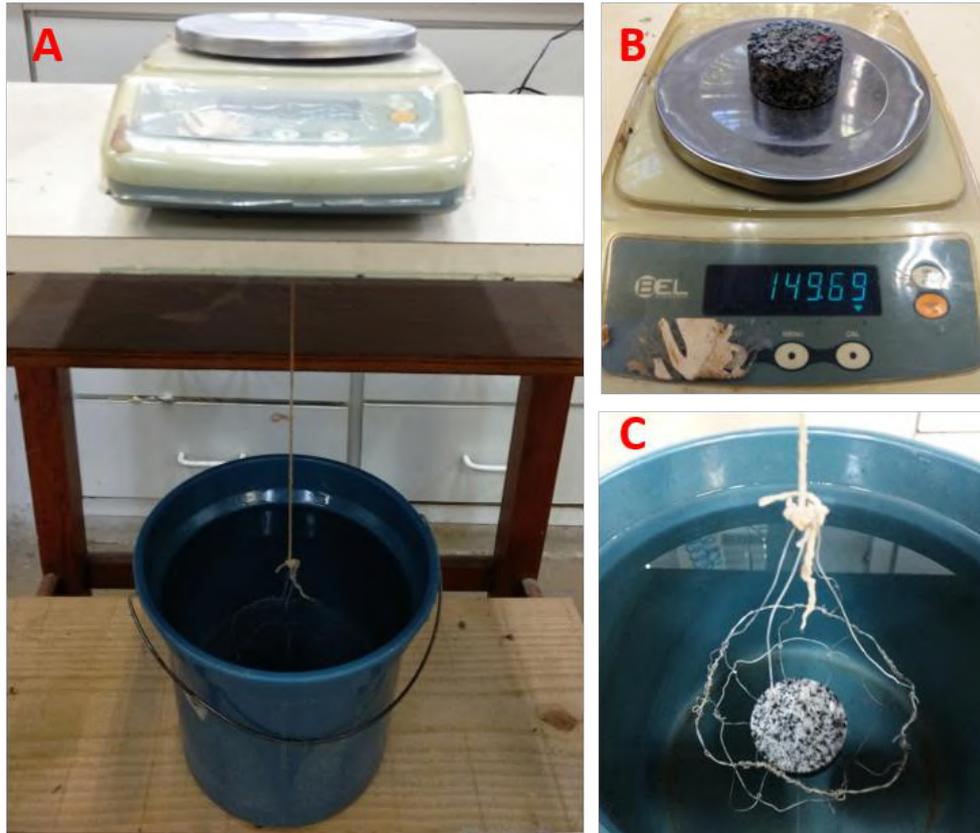
Tais análises buscaram complementar a escolha do litotipo, além de ajudar a entender seu comportamento mediante aos ensaios de ciclagem realizados.

### 3.3 Propriedades petrofísicas

As propriedades petrofísicas foram determinadas para todos os corpos de prova, antes e depois dos ensaios de durabilidade, utilizando a norma da ABNT - NBR 15.845/10. Os índices físicos quantificam propriedades das rochas que guardam dependência entre si, sendo densidade aparente (massa específica), porosidade aparente e índice de absorção de água (Frazão, 2002). Essas propriedades permitiram avaliar indiretamente o estado inicial das rochas e, posteriormente, o comportamento dessas propriedades mediante aos ensaios realizados.

Para as determinações, as amostras foram inicialmente pesadas após 24 horas em estufa a 70° C, fornecendo o valor equivalente ao peso seco ( $M_{sec}$ ). Esse procedimento foi realizado novamente, após mais 24 horas em estufa, para verificar a constância de massa, com variações de 0,1%, como indica a norma.

Posteriormente, as amostras foram submersas em água destilada e mantidas a vácuo por um período de 2 horas para a saturação. Após esse procedimento, cada amostra foi posicionada em uma rede (peso desconsiderado) acoplada à balança utilizada e submersa em um balde com água, a fim de obter seu peso submerso ( $M_{sub}$ ) e, logo após, era obtido seu peso saturado ( $M_{sat}$ ) (Figura 8).



**Figura 8 - A – Visão geral da balança utilizada; B – Amostra na balança para obtenção do peso saturado ( $M_{sat}$ ) e C – Detalhe da amostra posicionada na rede e submersa em balde com água, para obter o peso submerso ( $M_{sub}$ ).**

A partir dos pesos obtidos, foram calculados o peso específico aparente ( $\rho_a$ ), a porosidade aparente ( $\eta$ ) e o índice de absorção ( $\alpha_a$ ) das amostras, utilizando as seguintes equações, respectivamente:

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 1000 \quad (1)$$

$$\eta_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100 \quad (2)$$

$$\alpha_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100 \quad (3)$$

### 3.4 Ensaios de durabilidade acelerados

Como método de análise, foram utilizados ensaios de durabilidade do tipo acelerado, também chamados ensaios de envelhecimento artificial, segundo proposto por Lima (2006). Os ensaios consistiram na imersão total em solução salina e exposição à névoa salina, utilizando uma solução saturada em cloreto de sódio (NaCl), realizados em ciclos controlados e pré-determinados.

A escolha do cloreto de sódio para a realização dos ensaios deve-se ao fato de ser formado por dois íons com concentrações mais expressivas na composição da água do mar, em vista de sua grande solubilidade em água, além de seus cristais terem grande estabilidade em condições normais de temperatura e pressão (Mohriak *et al.*, 2008). Dessa forma, é provável que este sal seja um dos que possuem maior influência no intemperismo de rochas aplicadas em construções civis localizadas em regiões costeiras.

A concentração de NaCl utilizada para ambos os ensaios foi padronizada conforme a norma seguida para o ensaio de exposição à névoa salina, pretendendo comparar os mecanismos de percolação e cristalização do sal em cada um dos ensaios, segundo a viscosidade da solução.

#### **3.4.1 Imersão total em solução salina**

Esse ensaio foi realizado com o intuito de avaliar a variação de propriedades petrofísicas em virtude da degradação por cristalização de sais solubilizados em água, utilizando ciclos envolvendo imersão total em solução saturada em NaCl (salmoura) e secagem ao ar livre.

Para a realização desse procedimento, foram separadas 16 amostras nomeadas, dispostas em quatro grupos, cada um contendo quatro amostras. Cada um desses grupos foi submetido a ciclagens alternadas em submersão total em salmoura e secagem ao ar livre. As ciclagens propostas para cada grupo foram: 10, 20, 30 e 40 ciclos, respectivamente (Figura 9).



**Figura 9 - Amostras submersas em solução com NaCl e posicionadas conforme o número de ciclos pré-definidos.**

A submersão consistiu inicialmente com o preparo da solução salina, sendo feita a diluição de cloreto de sódio a concentração de 53g/L em água destilada. Essa concentração equivale a 5% de NaCl, levando em conta possíveis impurezas contidas no sal utilizado em laboratório. Esse teor de concentração utilizado trata-se do proposto na norma utilizada no ensaio de exposição à névoa salina (ASTM B117/11). A solução utilizada era trocada a cada cinco ciclos, visando manter as condições de concentração e pH constantes.

Os corpos de prova eram submersos por um período de 6 horas nessa solução, seguido de um período de 18 horas de secagem em temperatura ambiente de, aproximadamente 25° C. Ao final do conjunto de ciclos de cada grupo, ou seja, a cada 10 ciclos, este passava para a etapa de retirada do sal (dessalinização), seguida de novos cálculos de índices físicos.

Alves *et al.* (2017) destacaram que esse tipo de experimento apresenta uma amostragem sem grande dispersão de resultados. Esse método foi considerado análogo ao que se observa em uma estrutura de enrocamento, por exemplo, onde ciclos de variação do nível do mar promovem um efeito semelhante ao que se busca com esse experimento.

### **3.4.2 Exposição à névoa salina**

Esse ensaio tem por objetivo simular, em um ambiente controlado, os efeitos causados pela emissão natural de cloreto de sódio (NaCl) sob a forma de spray salino, visando

reproduzir os efeitos da maresia (Frascá, 2001). Para tanto, é utilizada uma câmara apropriada para geração da atmosfera ou névoa salina.

A norma usada na realização do ensaio foi a ASTM B117/11, a qual indica um posicionamento padrão das amostras na câmara salina, quando as mesmas possuem dimensões iguais, ficando apoiados em um ângulo de 15° a 30° com a vertical, permitindo livre acesso da névoa a todas elas. No entanto, como foram utilizados corpos com diferentes faces, optou-se por arrumá-los na vertical (menor face da amostra voltada para cima) e na horizontal (maior face da amostra voltada para cima), a fim de verificar a influência do posicionamento desses corpos na sua degradação.

Para a realização do experimento, foram separadas 32 amostras nomeadas, dispostas em oito grupos, dos quais quatro foram posicionados na vertical e quatro foram posicionados na horizontal, cada um dos grupos contendo quatro amostras (Figura 10). Os corpos de prova foram distribuídos no interior da câmara de modo a não receberem diretamente o fluxo de névoa e também de modo a não entrarem em contato entre si, evitando alterações nas condições do ensaio.



**Figura 10 - Câmara de névoa salina utilizada para o ensaio, com corpos de prova posicionados.**

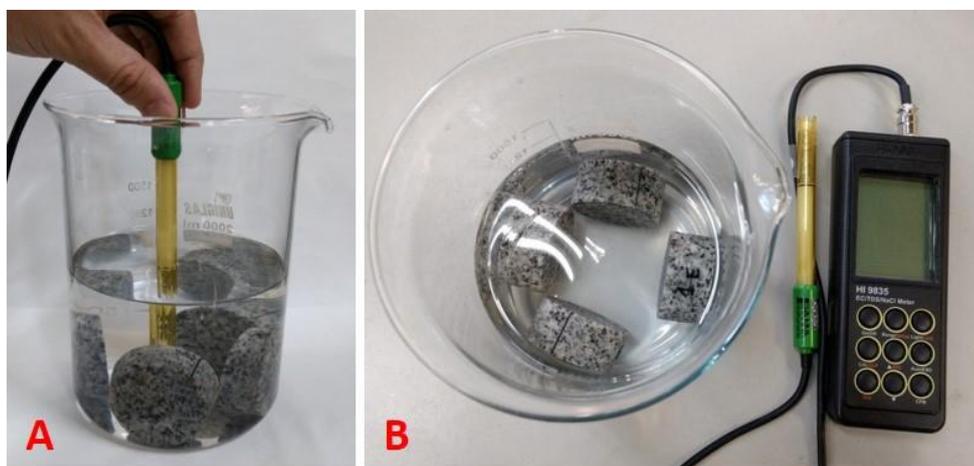
A solução salina para geração da atmosfera na câmara foi preparada dissolvendo cloreto de sódio em água de forma a ter uma solução salina de 5% de NaCl e pH entre 6,5 e 7,2. Considerando possíveis impurezas encontradas no sal do laboratório, é indicada pela norma a utilização de 53g/L de sal nessa solução.

Cada um desses grupos foi submetido a ciclagens alternadas em exposição à névoa salina, por um período de 6 horas e secagem ao ar livre, por um período de 18 horas. As ciclagens propostas para cada grupo, em ambas as posições, foram: 10 20, 30 e 40 ciclos, respectivamente. Ao final das ciclagens propostas, ou seja, a cada 10 ciclos, os devidos grupos eram retirados, passados para a etapa de dessalinização e seus novos índices físicos eram calculados.

### 3.5 Dessalinização

A etapa de dessalinização foi realizada para cada grupo de corpos de prova após completarem as ciclagens, tanto em imersão total quanto em exposição à névoa salina, conforme indicado no fluxograma mostrado na (Figura 11), para retirada do sal precipitado em seus poros e fissuras.

Cada grupo de amostras foi separado em um *becker* com água destilada, onde a condutividade elétrica, total de sólidos dissolvidos e percentual de NaCl liberados nessa água eram medidos diariamente, utilizando um condutivímetro portátil (Figura 11). Após as medidas, cada *becker* tinha sua quantidade de água substituída pela mesma anterior.



**Figura 11 - A - Medição da condutividade das amostras submetidas à dessalinização, B - Amostras submersas em água destilada e condutivímetro portátil utilizado.**

O sal foi considerado retirado das amostras quando o valor da condutividade encontrado na água destilada estivesse mais próximo do valor considerado mínimo, de aproximadamente  $1,8 \mu\text{S}/\text{cm}$ , e mais distante do valor considerado máximo, de  $65 \mu\text{S}/\text{cm}$ . O valor de  $1,8 \mu\text{S}/\text{cm}$  foi considerado o mínimo, pois equivale ao valor da condutividade verificado na água destilada do laboratório, enquanto que o valor de  $65 \mu\text{S}/\text{cm}$  foi considerado o máximo, pois

corresponde à média observada em amostras em estado natural, ou seja, que não foram submetidas a nenhuma ciclagem.

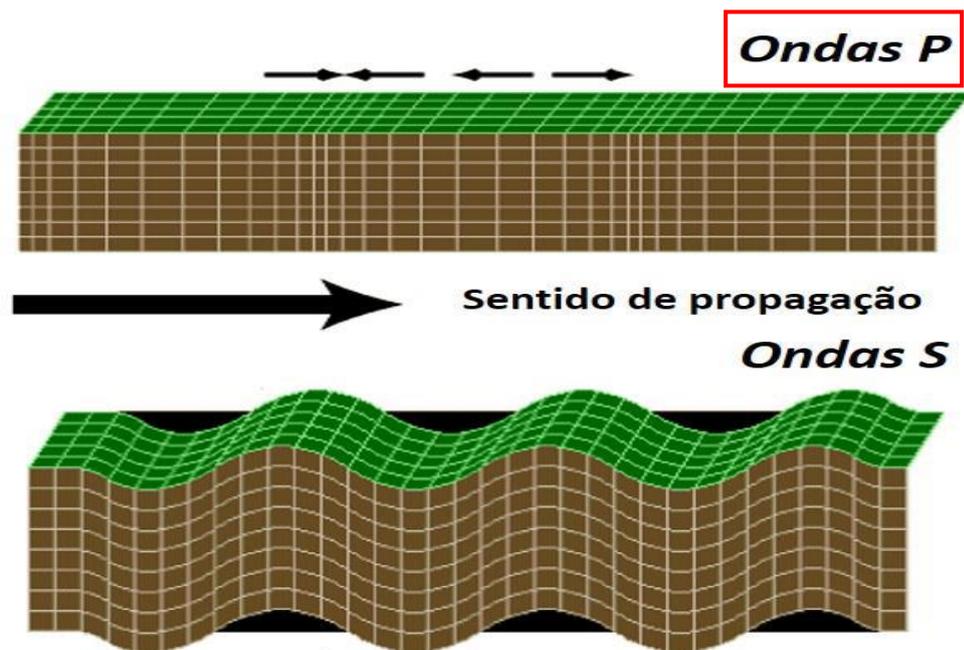
A importância desse procedimento deve-se ao fato de a presença do sal alterar as propriedades físicas das rochas, podendo gerar uma quantificação tendenciosa na avaliação das características físicas pós-ciclagens, segundo abordado por Mohriak *et al.* (2008).

Também é importante destacar que, embora a dessalinização em alguns casos seja feita utilizando temperaturas mais elevadas, como realizando por Silva (2012) e Ricardo (2015), no presente trabalho esse procedimento foi feito à temperatura ambiente de, aproximadamente 25° C, visando não quantificar quaisquer outras alterações que não as causadas pela cristalização do sal, como por exemplo, a fadiga térmica devido aos diferentes coeficientes de dilatação dos minerais constituintes da rocha (Franzoni, 2013).

### 3.6 Velocidade de propagação de ondas

Análises utilizando velocidade de propagação de ondas mecânicas são práticas comuns em análises geomecânicas, onde o método mais popular consiste no uso de pulsos emitidos por um gerador que, com o auxílio de um cristal pizoelétrico, percorrem o interior de uma amostra até sua extremidade oposta, onde outro cristal pizoelétrico, igualmente acoplado, recebe o sinal e o envia para um osciloscópio, para a interpretação do comportamento das ondas (Goodman, 1989).

Esse tipo de ensaio faz uso de ondas P, ou longitudinais, e ondas S, ou transversais. Nas análises do estudo, foram utilizadas as ondas elásticas do tipo P, também chamadas compressivas, caracterizando um deslocamento no sentido paralelo à sua direção de propagação (Figura 12).

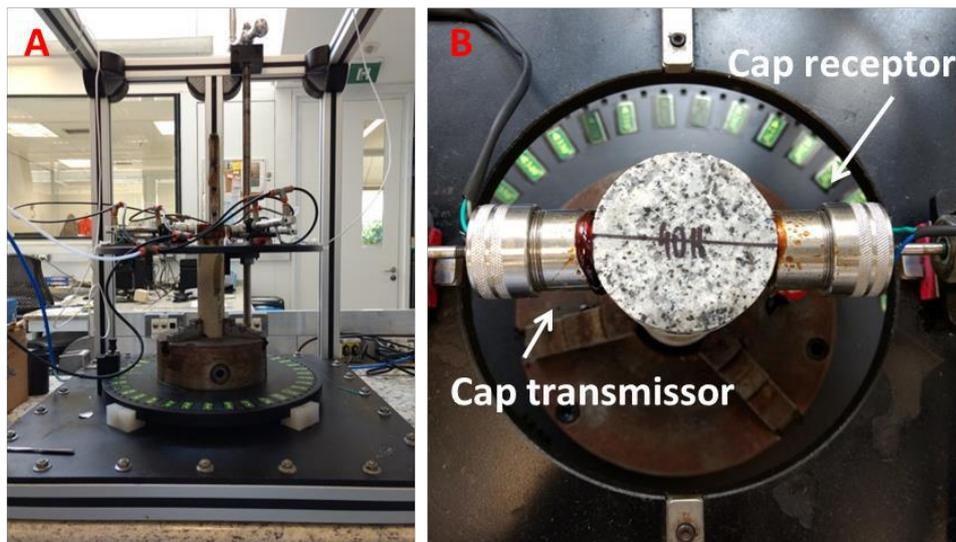


**Figura 12 - Simulação do movimento das partículas em relação à passagem de ondas tipo P e tipo S. Em destaque o padrão de ondas utilizadas (Fonte: USGS 2019).**

O objetivo desse experimento foi comparar o comportamento da onda P em uma amostra do grupo considerado são (sem submissão a ensaios) e dos grupos submetidos aos ensaios de alterabilidade, após 10, 20, 30 e 40 ciclos.

O método usado é conhecido como Velan ("Velocity Anisotropy") e consiste na medição da velocidade de propagação de ondas compressivas ultrassônicas nas direções radiais de uma determinada amostra de formado cilíndrico, permitindo estimar as principais orientações de tensões nas amostras com um equipamento próprio (Ricardo, 2015).

Para a realização do ensaio, cada amostra selecionada foi acoplada em outra amostra disponível no laboratório e, todo o conjunto, fixado sobre a base móvel giratória do equipamento. É importante destacar que o corpo cedido pelo laboratório foi utilizado apenas para fins de posicionamento adequado das amostras que foram ensaiadas. A base móvel giratória possuem direções variadas de ensaio (entre 0° e 360°), com intervalos de, no mínimo, 5 graus. Para os ensaios, optou-se por realizar medições a cada 20 graus (Figura 13).



**Figura 13 - A - Equipamento pertencente ao CEMPES utilizado para a medição da velocidade de ondas P nos corpos de prova selecionados e B - Corpo de prova posicionado no equipamento, com destaque para os condutores pizoelétricos (Cap).**

Durante o ensaio é determinado o intervalo de tempo ( $T_p$ ) que a onda compressional leva para percorrer o diâmetro da amostra (D) em cada umas das direções propostas. Também foi medido o tempo do sistema ( $T_s$ ), que a onda leva desde a emissão até a chegada dos pulsos ao osciloscópio, sem a amostra posicionada entre os cristais. A velocidade da onda compressional (VP) calculada em metros por segundo (m/s) segundo a equação:

$$VP = \frac{D}{T_p - T_s} \quad (4)$$

## 4 RESULTADOS

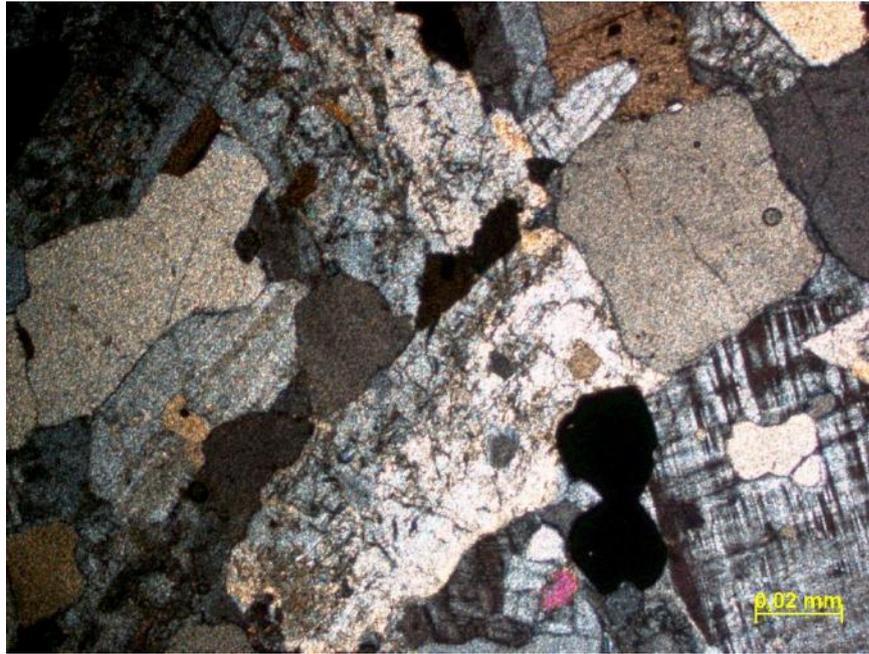
### 4.1 Descrição mineralógica

Foram feitas avaliações a partir de duas seções delgadas de uma mesma amostra do granitóide estudado, sendo um corte paralelo e um ortogonal à direção dos testemunhos obtidos.

Trata-se de uma rocha leucocrática com índice de cor em torno de 17%, holocristalina, fanerítica, com matriz inequigranular hipidiomórfica porfirítica, fina a muito fina. Apresenta fenocristais em torno de 2 mm. Sua assembleia mineralógica apresenta plagioclásio, ortoclásio, microclina, biotita, quartzo e hornblenda como minerais essenciais; zircão, apatita e titânica como minerais acessórios. Os feldspatos apresentam alteração evidente, marcada por processo de sericitização e presença de muscovita, este último encontrado nos cristais de plagioclásio e microclina (Figura 14). Também são encontrados minerais opacos e rutilo ocorrendo como inclusões e produtos de alteração, sobretudo da biotita, na qual também se observam bordas de reação (Figura 15).

A ocorrência de exudações de sílica em cristais de microclina é evidente em grande parte das lâminas analisadas (Figura 16). Apesar dessas feições de intercrescimento indicarem deformações e heterogeneidades na rocha, a mesma ainda é considerada isotrópica em escala macroscópica, como indicado por Alves *et al.* (2017).

Para a classificação, foram utilizados os métodos de composição modal por meio de visadas, contagem de 300 pontos e o diagrama QAPF (Le Maitre *et al.*, 2002) (Figura 17). A rocha foi classificada como um granodiorito.



**Figura 14 - Lâmina delgada perpendicular mostrando plagioclásios alterados por processo de sericitização, a nicóis cruzados.**



**Figura 15 - Lâmina delgada perpendicular mostrando biotita com inclusões, bordas de reação e alterações, a nicóis cruzados.**

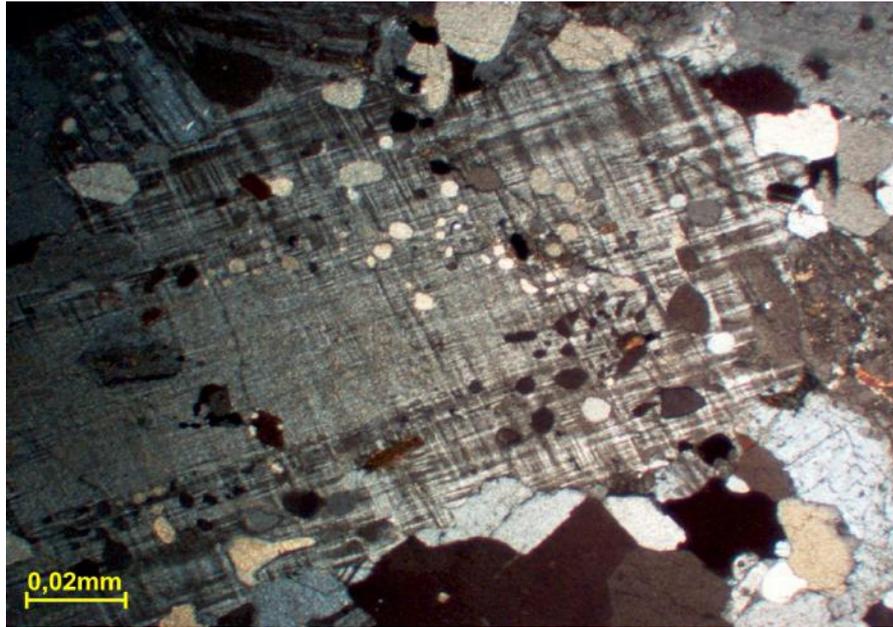


Figura 16 - Lâmina delgada paralela mostrando exudações de sílica em cristal de microclina.

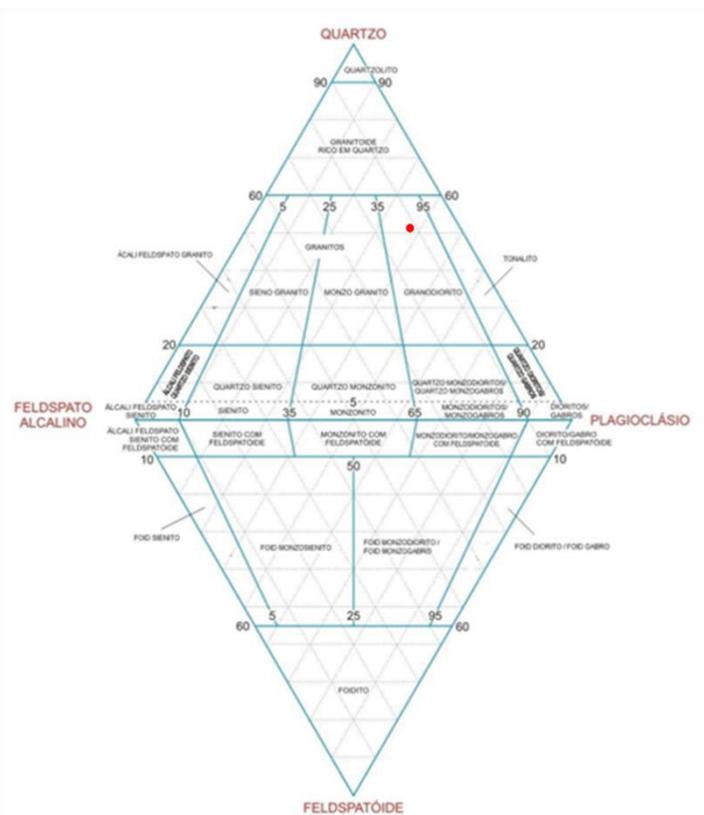


Figura 17 - Diagrama QAPF utilizado para a classificação moral de rochas plutônicas (modificando de Le Maitre *et al.*, 2002).

## 4.2 Feições macroscópicas da cristalização de sais

Após a realização dos ensaios de envelhecimento acelerado, foram observadas, com o auxílio de uma lupa, morfologias geradas pela cristalização do sal na superfície das amostras, preenchendo a clivagem de alguns minerais (Figura 18). Os cristais de halita começam a precipitar quando a concentração da solução saturada ou salmoura excede a solubilidade do sal (Mohriak, 2009).

Também foram observados cristais com estrutura *hopper*, também chamada estrutura piramidal (Figura 19), apresentando o centro da face superior deprimido em relação às bordas.

Essa feição é análoga ao que se observa em ambientes evaporíticos, quando as condições de saturação da salmoura excedem a solubilidade do sal, ainda com uma quantidade considerável de solvente na solução, fazendo com que os cristais cresçam “flutuando” na mesma (Mohriak, 2009).

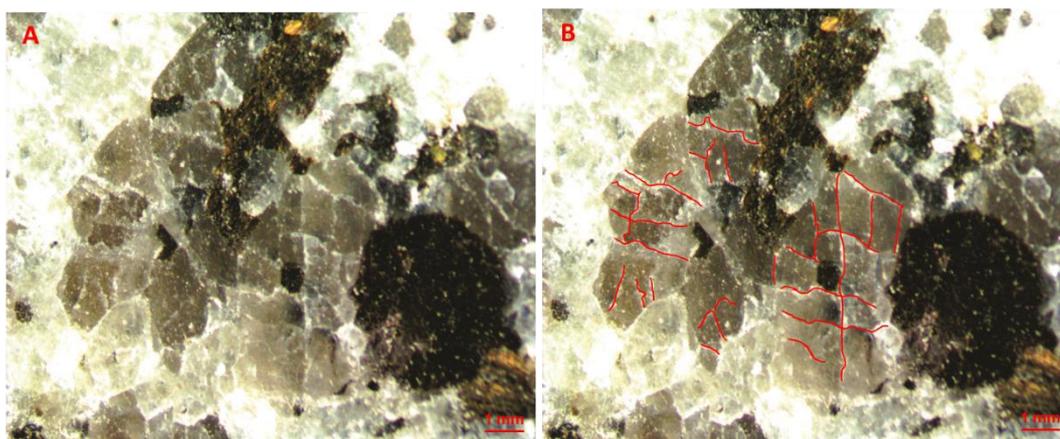


Figura 18 - A - Visão em lupa de cristais de plagioclásio com clivagem preenchida por sal e B - Locais de preenchimento por sal destacados (amostra submetida a 20 ciclos no ensaio de exposição à névoa salina).

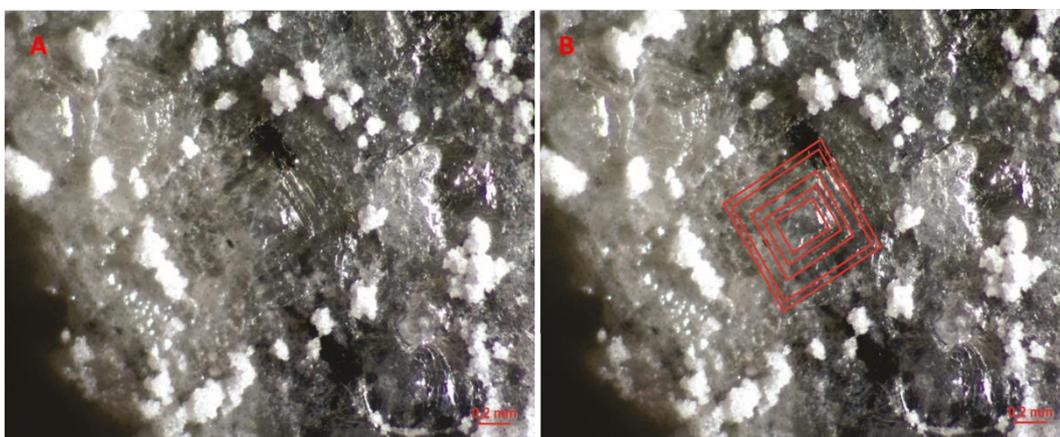
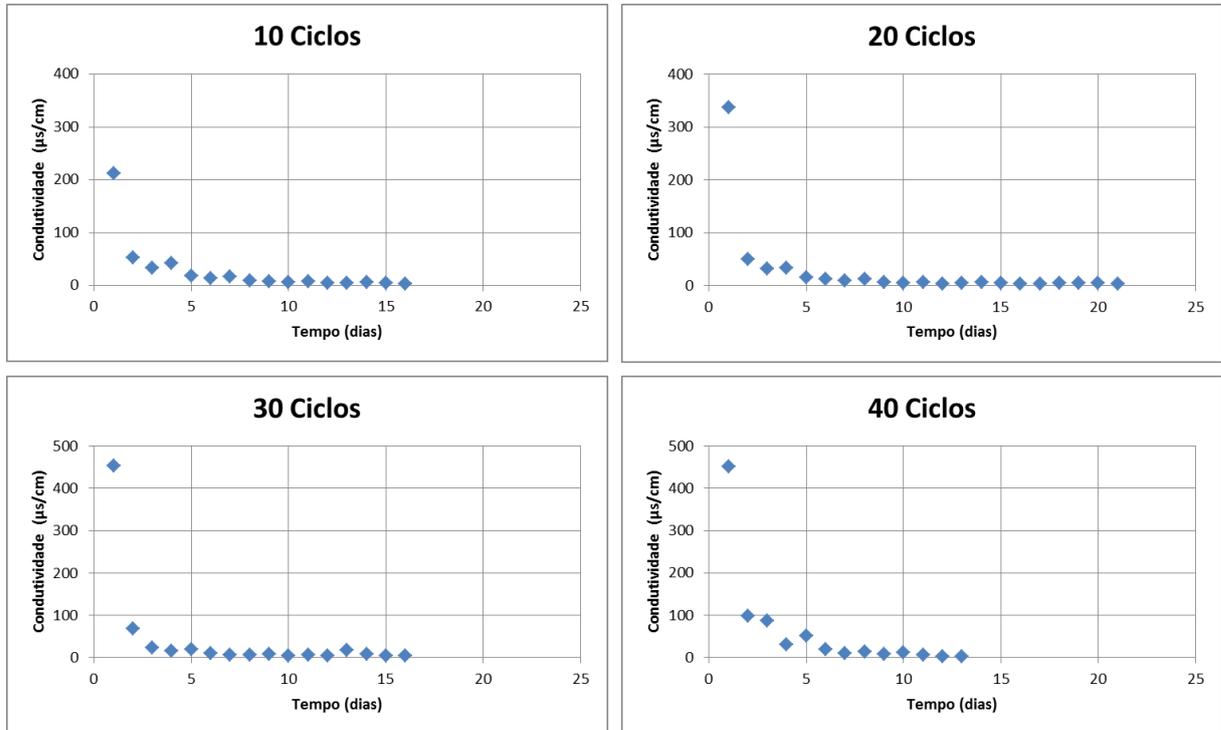


Figura 19 – A Visão em lupa de eflorescências de sal e cristais com estrutura hopper na superfície da amostra e B - Padrão de estrutura hopper destacado (amostra submetida a 30 ciclos em ensaio de imersão em solução salina).

### 4.3 Dessalinização

A remoção do sal para as amostras de granodiorito submetidas aos ensaios de ciclagem. Com as medidas de condutividade elétrica obtidas a cada 24 horas foram elaborados gráficos de condutividade elétrica x tempo (Figuras 20 a 22).



**Figura 20 - Gráficos de condutividade elétrica x tempo. Amostras submetidas ao ensaio de imersão em solução salina.**

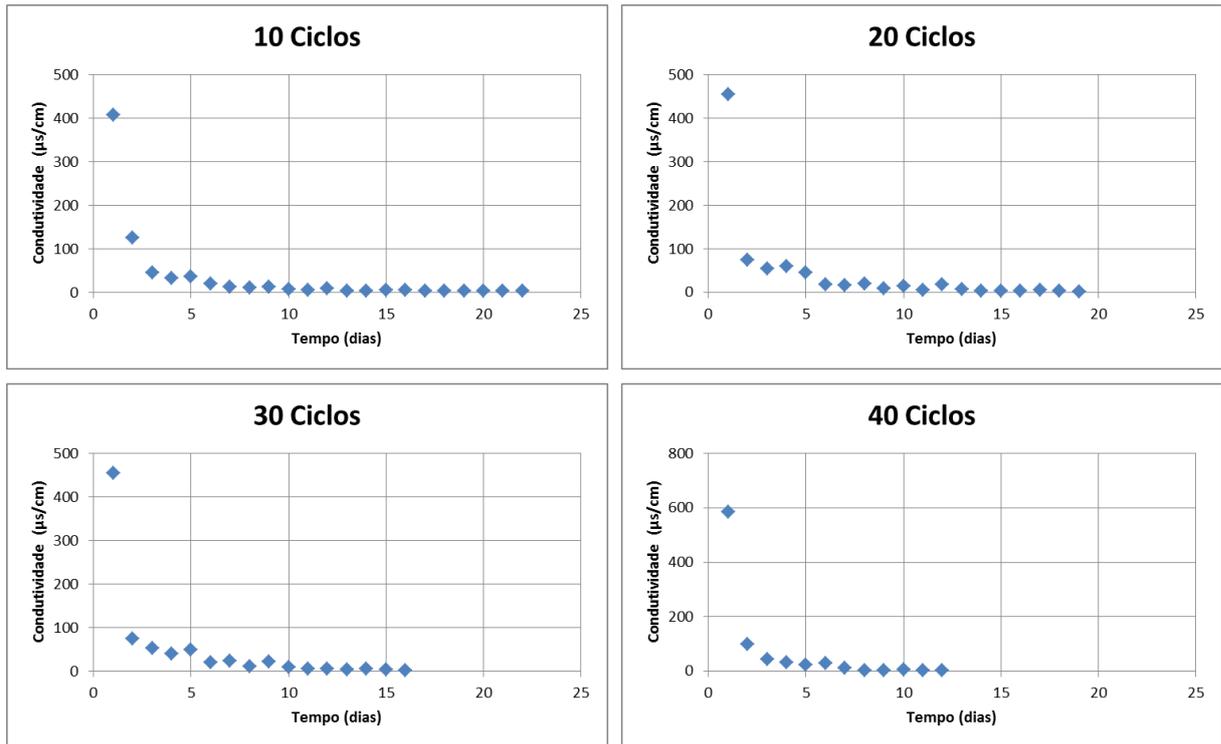


Figura 21 - Gráficos de condutividade elétrica x tempo. Amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina - posição vertical.

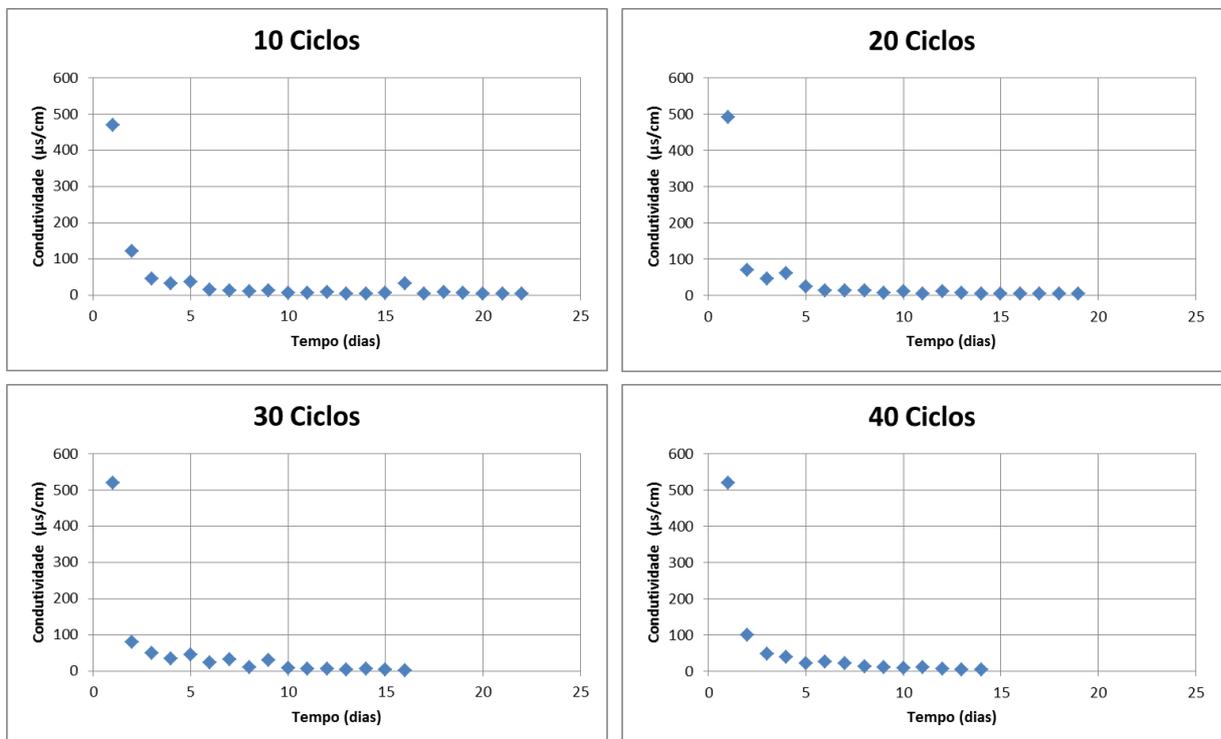


Figura 22 - Gráficos de condutividade elétrica x tempo. Amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina - posição horizontal.

Nos gráficos é possível observar um comportamento exponencial decrescente, além de uma tendência a maiores valores de condutividade inicial da solução, conforme o aumento do número de ciclos. Também é possível notar maiores oscilações nos valores da condutividade, após os primeiros decréscimos conforme o aumento do número de ciclos, indicando maior dificuldade no processo de dessalinização. Todas essas características ocorrem de forma mais acentuada nas amostras expostas à névoa salina.

Esses indícios levam a crer que, quanto maior o número de ciclos, maior a presença de sal saturando as rochas. Também mostram que a solução na forma de vapor parece possuir melhores mecanismos para percolação e consequente cristalização do sal.

O valor de condutividade elétrica nas amostras que não foram submetidas a ciclagens, sendo de 65  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , possivelmente está relacionado com a liberação de cátions dos minerais sob alteração, principalmente os feldspatos.

#### **4.4 Evolução das propriedades petrofísicas**

Os índices físicos foram determinados antes e depois dos ensaios de alteração acelerada, onde foram utilizadas a porosidade aparente e o índice de absorção para elucidar a evolução das propriedades petrofísicas. Os valores de densidade aparente sofreram variações consideradas muito pequenas (para mais informações *vide* anexo A).

##### **4.4.1 Porosidade**

A porosidade é utilizada para avaliar o grau de alteração da rocha, funcionando como um parâmetro de qualidade no que compete a materiais pétreos com baixas porosidades iniciais. Dessa forma, para determinar o grau de alteração relacionado ao intemperismo por cristalização de sal, a porosidade normalizada foi calculada, dada pela razão entre a porosidade das amostras após determinado número de ciclos e sua porosidade média inicial.

Assim tem-se que, se a porosidade normalizada ( $\eta_{norm}$ ) é igual a um, não há alteração na porosidade, se é maior que um, houve aumento da porosidade e, caso seja menor que um, houve diminuição. Esse comportamento é provavelmente justificado pela cristalização do sal nos poros da rocha. A porosidade normalizada foi calculada pela as amostras segundo a equação:

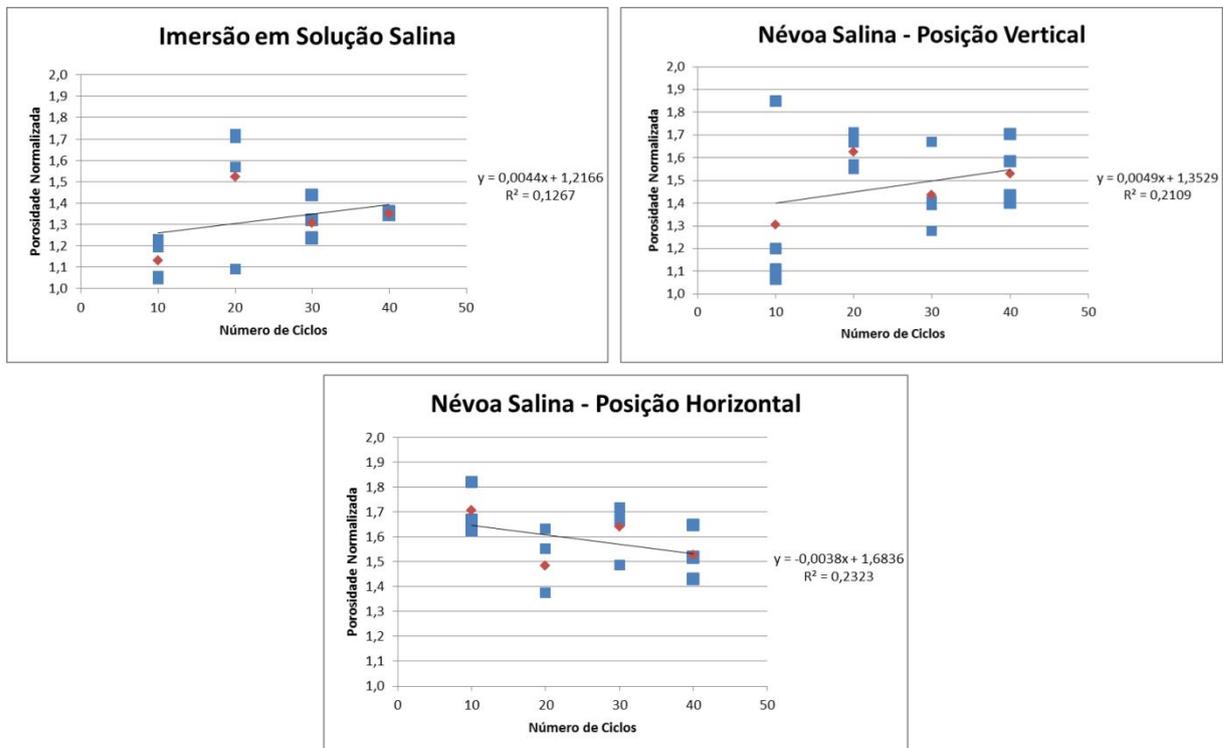
$$\eta_{norm} = \frac{\eta_{xciclos}}{\eta_{inicial}} \dots \dots \dots (5)$$

Onde:

$\eta_{inicial}$  = porosidade antes da realização dos ensaios de durabilidade

$\eta_{xciclos}$  = porosidade após determinado número de ciclos de ensaio

A partir desses valores, foram construídos gráficos para se observar o comportamento dessa porosidade mediante o aumento das ciclagens feitas, em cada um dos ensaios (Figura 23).



**Figura 23 - Gráficos de porosidade normalizada x número de ciclos com a equação estabelecida pela linha de tendência.**

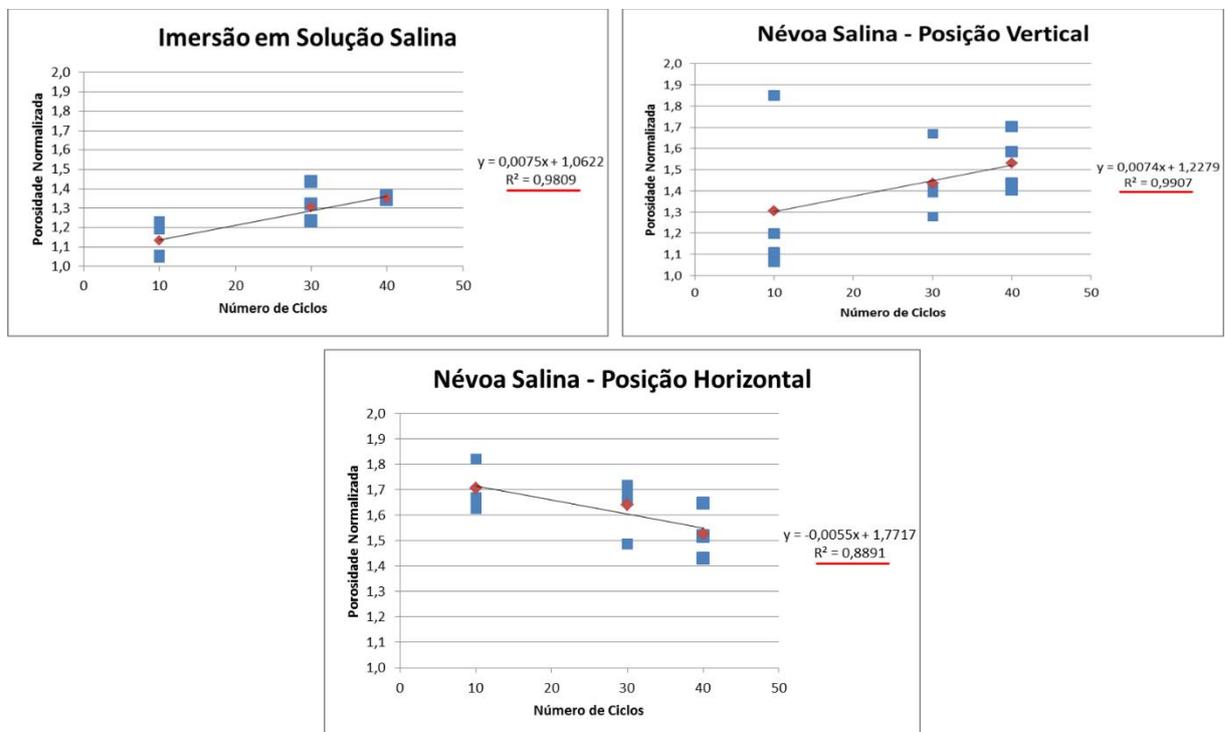
Nos gráficos é possível observar que conforme aumenta o número de ciclos a porosidade normalizada também tende a aumentar, porém trata-se de um aumento pouco expressivo.

Inicialmente os gráficos apresentaram um coeficiente de determinação inferior ao esperado. O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson é chamado de coeficiente de determinação ou simplesmente  $R^2$  e indica, em proporção, quanto da variabilidade em uma

variável é explicada pela variabilidade de outra. Segundo Quintino *et al.* (1991), essa relação representa um grau percentual da qualidade de ajuste de um modelo.

Uma correlação perfeita ( $R^2 = 1$  ou 100%) é pouco comum na prática, porque existem muitos fatores que determinam as relações entre variáveis na natureza. Já um valor reduzido desse coeficiente em ensaios pode denotar algum erro experimental.

Os valores baixos do coeficiente de determinação foram, em grande parte, justificados pela maior dispersão dos valores de porosidade das amostras submetidas a 20 ciclos de ensaio, sendo assim, optou-se por gerar gráficos sem esses dados para a verificação da alteração da rocha (Figura 24).



**Figura 24 - Gráficos de porosidade normalizada x número de ciclos, exceto 20 ciclos. Destaque para os valores de coeficiente de determinação encontrados.**

Utilizando as linhas de tendência que melhor descrevem o comportamento dos gráficos, bem como as equações geradas pelas mesmas, a relação entre a porosidade e a quantidade de ciclos pode ser quantificada, onde, a porosidade normalizada é descrita pela função (“y”) e o número de ciclos realizados é descrita por sua variável independente (“x”).

É importante destacar que, frente à ordem de grandeza dos valores encontrados, optou-se por colocar exagero vertical nos gráficos, a fim de destacar seu comportamento.

A Tabela 2 indica a quantidade de ciclos em ensaios de imersão e névoa salina com amostras na vertical para chegar ao valor de porosidade considerada limite para a utilização

de granitóides como rocha ornamental, segundo Frazão & Farjallat (1995) (porosidade aparente igual a 1% ou porosidade normalizada igual a 2%, segundo este trabalho). Também indica a quantidade de ciclos para chegar a uma porosidade considerada avançada, para uso como rocha ornamental ( porosidade aparente igual a 2,5% ou porosidade normalizada igual a 5%, segundo esse estudo).

**Tabela 2 - Quantidade de ciclos para atingir porosidade limite e avançada para rochas ornamentais, segundo ensaios de durabilidade.**

Ensaio	Equação da Linha de Tendência	Ciclos para porosidade normalizada	
		2%	5%
Imersão em Solução Salina	$y = 0,0075x + 1,0622$	125	525
Névoa Salina - Posição Vertical	$y = 0,0074x + 1,2279$	104	510

Os valores indicam menor número de ciclos necessários no ensaio de exposição à névoa salina com amostras na vertical, sugerindo que esse processo gera maiores degradações na rocha.

Os resultados encontrados para o ensaio de exposição à névoa salina em amostras na horizontal mostram uma oscilação dos valores de porosidade em relação às ciclagens realizadas, contrários ao que foi observado nos demais ensaios. Esse comportamento sugere que essa orientação das amostras gera alterações muito pequenas, nos padrões escolhidos para os ensaios de durabilidade.

#### 4.4.2 Índice de absorção

O índice de absorção ou absorção de água representa a capacidade que a rocha tem de absorver fluidos molhantes, estando intimamente relacionada com a porosidade e permeabilidade da mesma. As Tabelas 3 a 5 mostram a evolução da média dos índices de absorção para cada grupo de amostras, conforme o número de ciclos a que foram submetidos e segundo os ensaios feitos.

**Tabela 3 - Índices de absorção média medidos antes e depois das amostras submetidas ao ensaio de absorção em solução salina.**

Ciclos	Índice de Absorção	Índice de Absorção	Diferença (%)
	antes (%)	depois (%)	
10	0,24	0,24	-
20	0,22	0,34	52,82

30	0,25	0,33	30,96
40	0,24	0,32	35,26

**Tabela 4 - Índices de absorção média medidos antes e depois das amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina (posição vertical).**

Ciclos	Índice de Absorção	Índice de Absorção	Diferença (%)
	antes (%)	depois (%)	
10	0,20	0,26	29,66
20	0,19	0,31	62,52
30	0,23	0,32	42,02
40	0,21	0,32	52,18

**Tabela 5 - Índices de absorção média medidos antes e depois das amostras submetidas ao ensaio de exposição à névoa salina (posição horizontal).**

Ciclos	Índice de Absorção	Índice de Absorção	Diferença (%)
	antes (%)	depois (%)	
10	0,23	0,38	62,02
20	0,20	0,30	47,95
30	0,19	0,31	63,36
40	0,21	0,32	52,58

Observa-se um aumento geral da capacidade de absorção das amostras, sobretudo daquelas submetidas à névoa salina. Esses dados corroboram o aumento da porosidade observado anteriormente. O ensaio de imersão não gerou aumento do índice de absorção para amostras submetidas aos primeiros 10 ciclos, levando a crer que as degradações geradas nesse ensaio tornam-se relevantes apenas a partir de 20 ciclos (para mais informações *vide* Anexo A).

#### **4.5 Variação da velocidade de propagação de ondas**

Para a medição da velocidade de propagação, foi escolhida uma amostra de cada grupo. O critério utilizado para a escolha foi o valor da porosidade, onde a amostra selecionada foi a que apresentou porosidade mais próxima à média encontrada para o grupo.

Por meio desse ensaio foi possível verificar a velocidade de propagação de ondas longitudinais (P) na amostra considerada sã, assim como a variação da velocidade dessas ondas conforme o número de ciclos e o tipo de ensaio em que os demais corpos de prova foram submetidos.

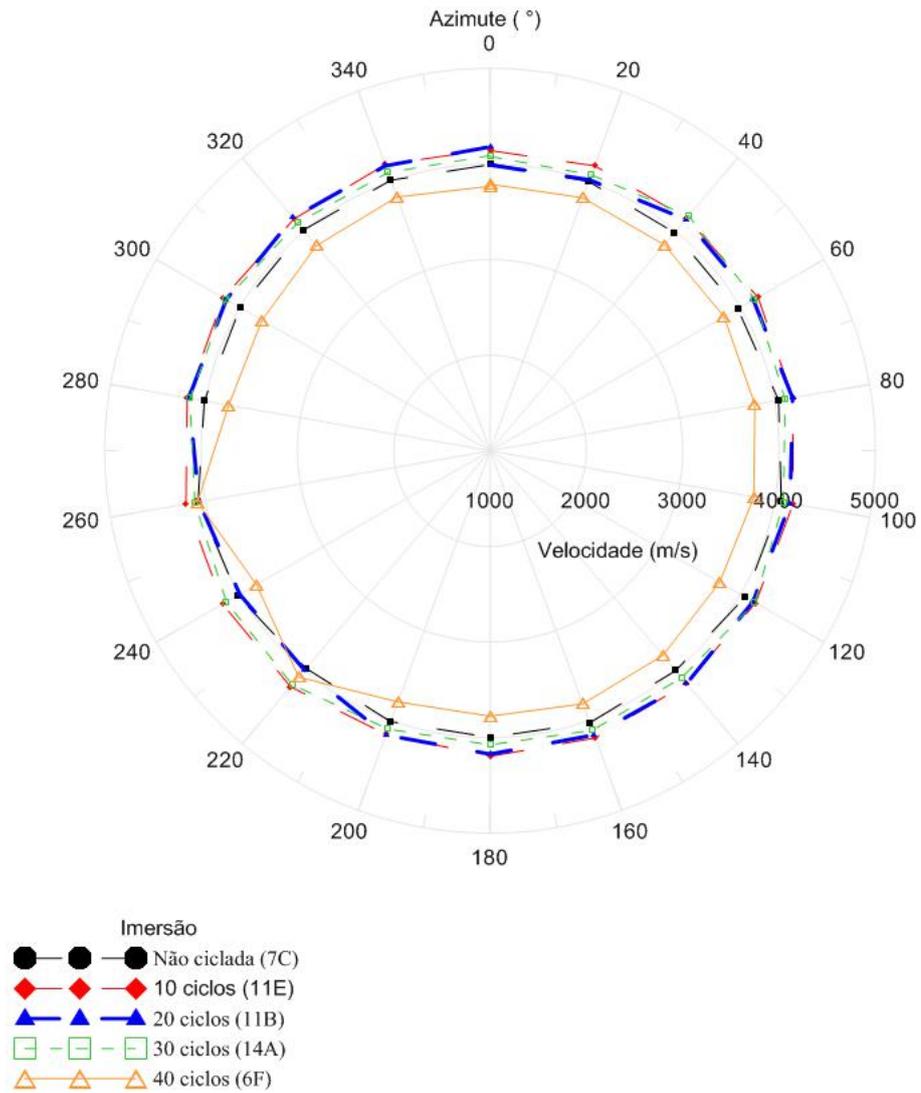
A Tabela 6 indica valores de velocidade de propagação sugeridos para rochas ornamentais.

**Tabela 6 - Valores especificados pela norma ASTM e sugeridos no Brasil (Frazão & Farjallat, 1995).**

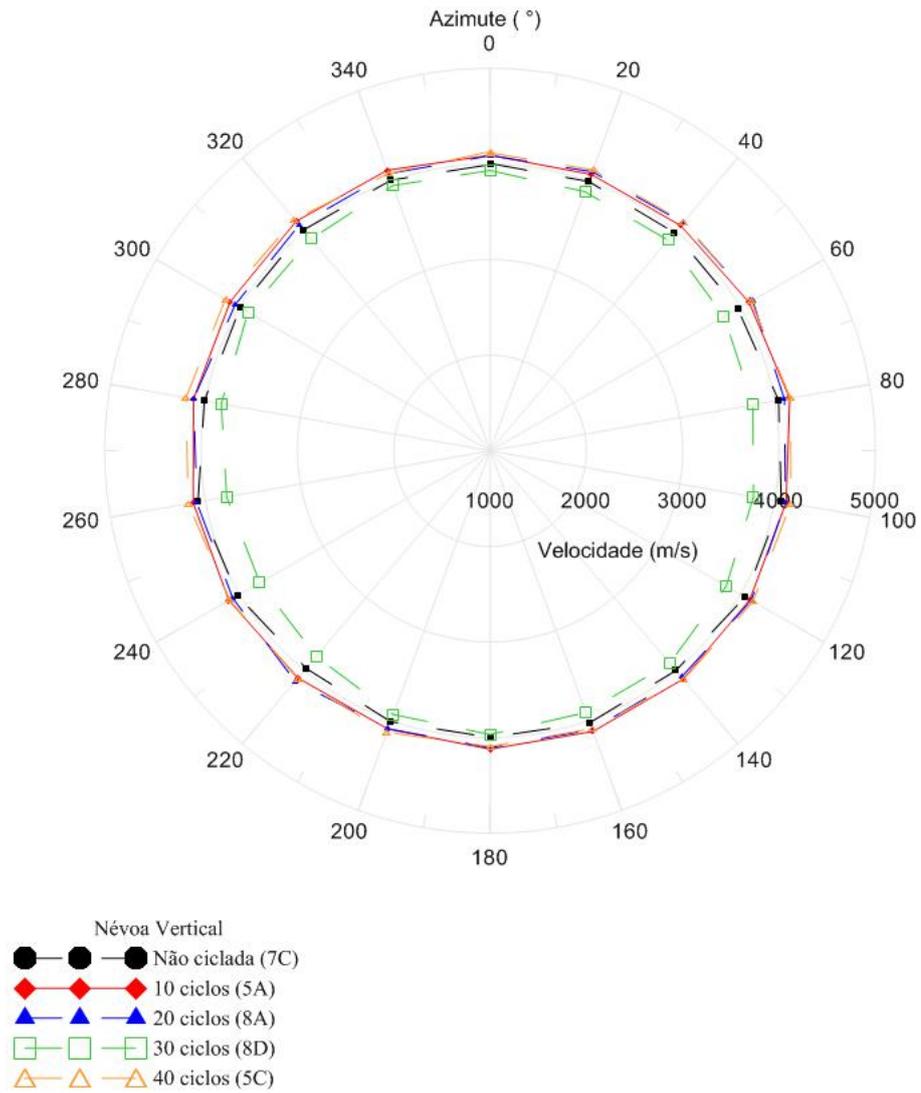
<b>Propriedades</b>	<b>Valores Fixados pela ASTM C - 615</b>	<b>Valores sugeridos por Frazão &amp; Farjallat</b>
Massa específica	$\geq 2.560,00$	$\geq 2.550$
Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )		
Porosidade Aparente (%)	n.e.	$\leq 1,0$
Absorção D'água (%)	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$
Velocidade de Propagação de Ondas (m/s)	n.e.	$\geq 4.000$
Dilatação Térmica Linear (103/mm.°C)	n.e.	$\leq 12,0$
Desgaste Amsler (mm)	n.e.	$\leq 1,0$
Compressão Uniaxial (MPa)	$\geq 131,0$	$\geq 100,0$
Flexão (módulo de ruptura) (MPa)	$\geq 10,34$	$\geq 10,0$
Módulo de Deformabilidade Estático (GPa)	n.e.	$\geq 30,0$
Impacto de Corpo Duro (m)	n.e.	0,4

A média das velocidades encontradas para a amostra considerada são no trabalho (4015 m/s) se encontra nos valores sugeridos da tabela, reafirmando o esperado.

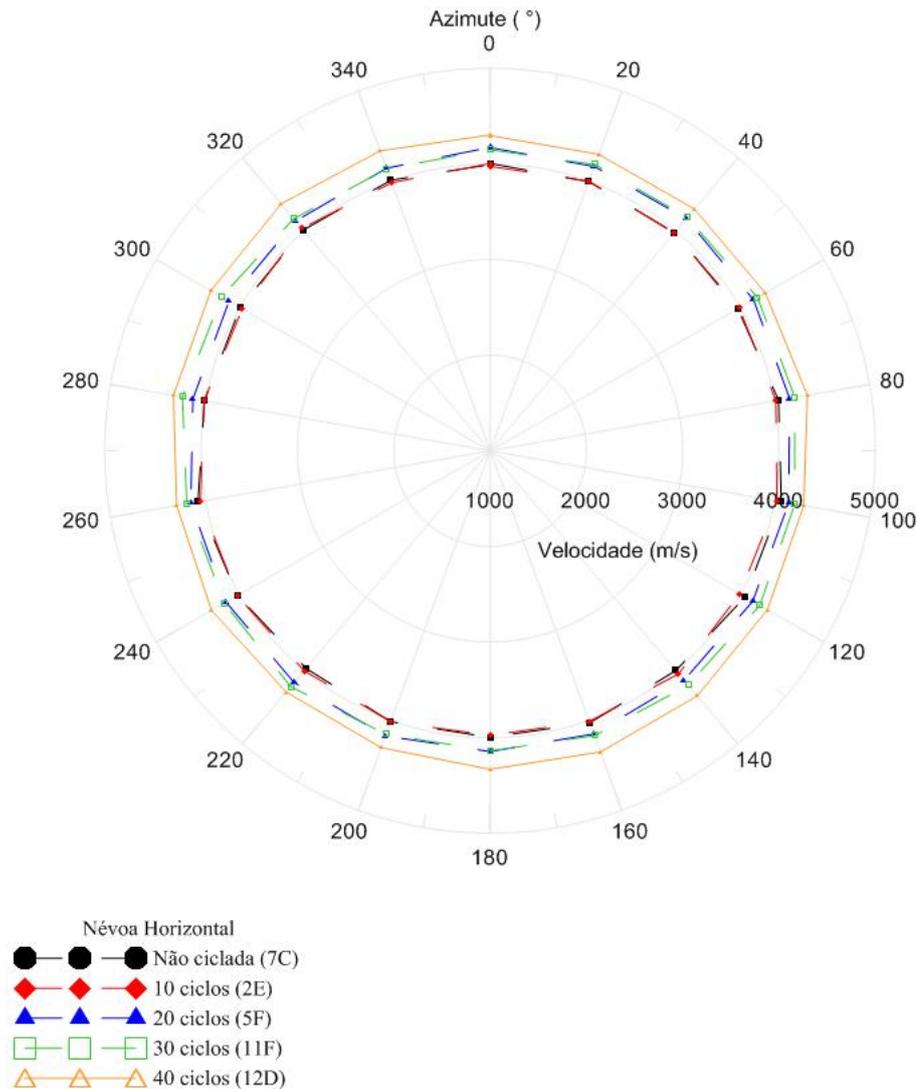
A partir das medições, foram confeccionados gráficos circulares indicando as velocidades de propagação para as amostras escolhidas (Figuras 25 a 27).



**Figura 25 - Gráfico circular mostrando o comportamento da velocidade de propagação na amostra sã e nas amostras submetidas à ciclagem no ensaio de imersão.**



**Figura 26 - Gráfico circular mostrando o comportamento da velocidade de propagação na amostra sã e em amostras cicladas em ensaio de exposição à nevoa salina - posição vertical.**



**Figura 27 - Gráfico circular mostrando o comportamento da velocidade de propagação na amostra sã e em amostras cicladas em ensaio de exposição á névoa salina - posição horizontal.**

É possível observar uma pequena mudança na velocidade de propagação, conforme o aumento do número de ciclos, o que parece indicar pequenas variações causadas pelos ensaios de alterabilidade. Nas amostras sujeitas ao ensaio de imersão, a velocidade só tem uma redução influente a partir de 40 ciclos, enquanto que as amostras expostas à névoa salina em posição vertical apresentaram uma velocidade menor em 30 ciclos. Os corpos de prova expostos à névoa salina na horizontal não apresentaram redução da velocidade com o número de ciclos, como nos outros experimentos. Nesse caso foi apenas observado um conjunto de oscilações nas velocidades.

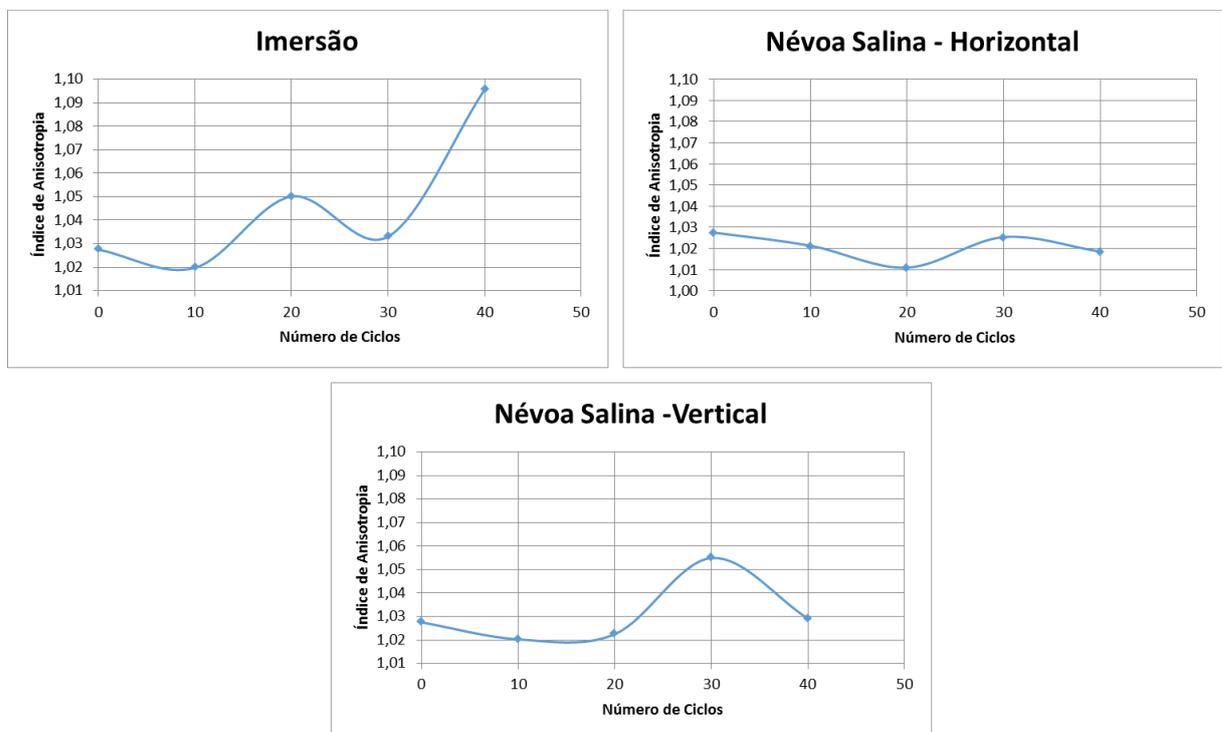
De acordo com Vellozo *et al.* (2001), essas medições de VP tornam possível determinar as direções de máxima e de mínima velocidade das ondas longitudinais no plano em que estão

associadas. Dessa forma, é possível calcular o índice anisotropia (IA), utilizando os valores dos eixos equivalentes aos raios máximo e raio mínimo, conforme a expressão:

$$IA = \frac{raio_{m\acute{a}ximo}}{raio_{m\acute{i}nimo}} \quad (6)$$

Esse índice, conforme seu aumento, retrata uma direção preferencial de formação de poros e fissuras ou, conforme sua diminuição, indica uma distribuição homogênea desses espaços vazios que foram formados.

A evolução da anisotropia da rocha conforme a ciclagem foi avaliada por meio de gráficos construídos para cada ensaio de envelhecimento artificial feito (Figura 28).



**Figura 28 - Gráficos mostrando a evolução do índice de anisotropia de acordo com os ciclos realizados nos ensaios de durabilidade.**

Apesar de as alterações serem perceptíveis apenas com exagero vertical, é possível observar uma tendência ao aumento da anisotropia nas amostras cicladas nos ensaios de imersão e, supostamente, no ensaio de exposição à névoa salina com amostras posicionadas na vertical, sugerindo a formação de fissuras e modificando o comportamento das ondas P na rocha. As amostras cicladas em névoa salina na posição horizontal mostram um equilíbrio quanto ao desenvolvimento da anisotropia, diferindo dos demais resultados. Esse comportamento sugere uma degradação de baixa intensidade e/ ou se dando de forma

homogênea, nessa orientação dos corpos de prova. Para comprovas essas hipóteses, seria necessário utilizar uma solução mais saturada em NaCl ou então aumentar o número de ciclos do ensaio.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos em laboratório mostraram que a degradação pela cristalização de sais pode ser observada e avaliada, utilizando ensaios de durabilidade. As análises das propriedades petrofísicas iniciais e pós-ensaios de envelhecimento nas amostras de granodiorito mostraram processos de alteração incipientes, porém notáveis, possibilitando as seguintes conclusões:

- Foram observadas subflorescências ocorrendo mais nas amostras submetidas à névoa salina e eflorescências ocorrendo mais nas amostras submetidas à imersão em solução salina.
- Com a ciclagem das amostras ocorreu aumento da porosidade aparente média e índice de absorção para todos os grupos. O peso específico aparente não sofreu mudanças consideráveis, indicando que a perda de massa não é o mecanismo mais apropriado para avaliação da alterabilidade da rocha.
- A padronização da concentração de sal utilizada nos ensaios, além da etapa de secagem em cada ciclo permitiu relacionar os mecanismos de percolação e cristalização do sal, constatando que as partículas transportadas por um meio de menor viscosidade (estado gasoso), apresentam maior capacidade de percolação nos poros da rocha.
- Os valores de porosidade média e a tendência da porosidade normalizada mostraram níveis de alteração maiores nas amostras expostas à névoa salina e posicionadas na vertical e menores nas amostras submetidas ao mesmo ensaio, posicionadas na horizontal, indicando que a orientação do corpo de prova influencia na acumulação do sal. Acredita-se que, quanto maior a superfície de contato da rocha com o sal sob a forma de aerossol, maiores as alterações causadas.
- Por meio da tendência gerada pela porosidade normalizada em cada ciclo dos ensaios, foi possível gerar uma relação entre o número de ciclos/dias e a porosidade normalizada encontrada, comprovando que o ensaio de imersão necessita de mais ciclos que o ensaio de exposição à névoa salina para atingir valores críticos de porosidade.

- Os valores de velocidade de propagação indicaram uma evolução da anisotropia das amostras conforme a progressão dos ensaios de envelhecimento. Tal evolução não foi observada em amostras expostas á névoa salina na posição horizontal.
- É preciso realizar ensaios com uma concentração maior de sal dissolvido ou com um maior número de ciclos, a fim de avaliar os efeitos do intemperismo por cristalização de sais nas amostras submetidas à névoa salina na posição horizontal.

Entender como a cristalização de cloreto de sódio afeta as propriedades petrofísicas das rochas, é fundamental para a conservação de construções e monumentos que as utilizam, bem como para a escolha mais adequada desses materiais em construções futuras.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15845. 2010. Rochas para revestimento; métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 32p.

Alves, C.; Figueiredo, C., & Maurício, A. 2017. A critical discussion of salt weathering laboratory tests for assessment of petrological features susceptibility. *Procedia Earth and Planetary Science*. n.17 p 324-327.

Andrade, C.; Sarría, J. & Alonso, C. 1999. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. *Cement and concrete research*. n 29 p 1249-1259.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B 117. 2011. Standard practice for operating salt spray; fog; apparatus. Philadelphia. 12p.

Band. Aniversário do Rio presenteará cariocas. Disponível em: <http://bandrio.band.uol.com.br/noticias/100000655772/aniversario-do-rio-presentearacariocas.html/>. Acessado em Novembro de 2018.

Benavente, D.; Garcia del Cura, M. A.; Bernabéu, A.; Ordóñez, S. 1999. Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth*. n.204 p. 168-178.

Benavente, D.; Garcia del Cura, M. A.; Bernabéu, A.; Ordóñez, S. 2001. Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*. n.59 p. 313-325.

Bland, W. & Rolls, D. 1998. *Weathering: An Introduction to the Scientific Principles*. Arnold, Great Britain. pp. 352.

Cavalcanti, A. M. S. 1951 *Tecnologia da pedra*. Pongetti. 309p.

Camuffo, D. 1998. *Microclimate for cultural heritage*. Amsterdam and New York:Elsevier.

Chanvillard, G., & Scherer, G. W. 2006. Effect of the pore size distribution on crystallization pressure. In *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. Springer, Dordrecht. p. 669-673.

Charola, A. E. 2000. Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of the American institute for conservation*. n.39 p 327-343.

Costa, A. G., Campello, M. S., & Pimenta, V. B. 2000. Rochas ornamentais e de revestimento de Minas Gerais: Principais ocorrências, caracterização e aplicações na indústria da construção civil. *Revista Geonomos*. n 8 p 9-13.

Dias, A. 2001. Caracterização Mecânica de Enrocamentos Através de Ensaio de Grande Escala Visando Barragens com Face de Concreto. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 114 p.

Evans, I. S. 1970. Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de Geomorphologie Dynamique*. n.19 p 153-177.

Franzoni, E.; Sassoni, E.; Scherer, G. W., & Naidu, S. 2013. Artificial weathering of stone by heating. *Journal of Cultural Heritage*. n.14 p 85-93.

Frasca M.H.B.O. 2002. Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. In: Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, 1, Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2, Salvador. Anais. Rio de Janeiro: MCT/CETEM. p. 128-135.

Frasca, M. H. B. O. & Yamamoto, J. K. 2014. Deterioração de rochas graníticas em edificações e monumentos. Investigação por ensaios de alteração acelerada. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 4, p. 23-32, 2014.

Frazão, E. B.; Farjallat, J. E. S. 1995. Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. I Congresso Internacional da Pedra Natural. Lisboa. p 47-58.

Frazão, E. B. 2002. Tecnologia de Rochas na Construção Civil. São Paulo. ABGE. 132p.

Gimenez, A. M. S. (2018). Suscetibilidade experimental de rochas do patrimônio histórico aos agentes do intemperismo. Programa de Pós-Graduação em Geociências (Mineralogia e Petrologia), Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 286p.

Goodman, R. E. 1989. Introduction to rock mechanics. Canada. Richard Goodman (2ed.), 289p.

Kakizawa, M., Yamasaki, A., & Yanagisawa, Y. 2001. A new CO<sub>2</sub> disposal process via artificial weathering of calcium silicate accelerated by acetic acid. *Energy*. n.26 p 341-354.

Le Maitre, R. W. ; Streckeisen, A.; Zanettin, B.; Le Bas, M.J.; Bonin, B.; Bateman, P. ; Bellieni, G. ; ; Dudek, A. , Efremova, S. ; Keller, J. ; Lameyre, J. ; Sabine, P.A. ; Schmid, R. ; Sbransen, H. ; Woolley, A.R. 2002. Igneous rocks: a Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences (2ed.). Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, Cambridge.

Lima, M. A. B. 2006. Estudo do comportamento dos gnaisses casablanca, juparaná delicato e giallo falésia (Ceará-Brasil) em atmosfera salina. Tese de Doutorado.

Universidade Estadual Paulista – UNESP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, São Paulo. 160p.

Maciel Filho, C. L. 1997. Introdução à Geologia de Engenharia. Editora da UFSM Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 284p.

Matsukura, Y. ; Oguchi, C. T. & Kuchitsu, N. 2004 Salt damage to brick kiln walls in Japan:spatial and seasonal variation of efflorescence and moisture content Bulletin of Engineering Geology and the Environmental. n.63 p 167-176.

Mohkiak, W. ; Szatmari, P. ; Anjos, S. M. C. 2008 Sal – Geologia e Tectônica. São Paulo:Beca Edições Ltda. 450p.

Morais, J. O. ; Sales, F. A. C. B. & Sousa, J. F. 2003. Rochas industriais: Pesquisa Geológica, Exploração, Beneficiamento e Impactos Ambientais. Realce, Fortaleza. 514p.

Neill, H. L. & Smith. B. J. 1996. Background controls on stone decay in polluted environments: preliminary observations from Rio de Janeiro, In: Smith, B. J. & Warke, P. A. Processes of Urban Stone Decay. Donnhead Publishing Ltd. p 113-126.

Nichols, G. 2009. Sedimentology and Stratigraphy. Oxford: Blackwell (2ed.). 361p.

Ollier, C. D. 1969. Weathering. Edinburgo: Oliver & Boyd. (1ed.).

Ollier, C. D. 1975. Weathering. Londres: Longman Group Ltd. (2ed.).

Petrucci, E. G. R. 1973. Materiais de construção. (12ed.) São Paulo: Globo. 435p.

Quinino, Roberto C.; Reis, Edna A.; Bessegato, Lupércio F. 1991. O Coeficiente de Determinação R 2 como Instrumento Didático para Avaliar a Utilidade de um Modelo de Regressão Linear Múltipla. Belo Horizonte: UFMG. 14p.

Ricardo, A, M. (2015). Uma rocha e um palácio: características e alterabilidade do gnaiss facoidal no Paço Imperial do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Geologia de Engenharia e Ambiental, Instituto de Geociências , Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 219p.

Rodriguez-Navarro, C. & Doehne, E. 1999 Salt Weathering: Influence of Evaporation Rate, Supersaturation and Crystallization Pattern. Earth Surface Processes and Landforms. n.24 p 191-209.

Sawdy, A., Heritage, A. & Pel, L. 2008. A review of salt transport in porous media, assessment methods and salt reduction treatments. SWBSS. Copenhagen. p 432 - 553.

Silva, L.C.; Santos, R.A.; Delgado, I.M. & Cunha, H.C. (Coord) 2000. Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro em escala 1: 400.000. CPRM/DRM, Rio de Janeiro.

Silva, V. F da. (2012). Simulação experimental da degradação das rochas por cristalização de sal solúvel. Programa de Pós-graduação em Geologia de Engenharia e

Ambiental, Instituto de Geociências , Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 110p.

Snethlage, R. & Wendled, E. 1997. Moisture cycles and sandstone degradation. In Saving our architectural heritage: The conservation of historic stone structures. N. S. Baer and R. Snethlage. Chichester: Elsevier. p 7-24.

Steiger, M. 2005. Salts in porous materials: thermodynamics of phase transitions, modeling and preventive conservation. Restoration of Buildings and Monuments. v 11. n 6. p 416 - 432.

Suguio, K. 2003. Geologia Sedimentar. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. (1ed.). 400p.

Teixeira, R. B. (2009). Cristalização de sais solúveis e ataques químicos em rochas de cantaria: efeitos mecânicos e estéticos. Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Trabalho de Conclusão de Curso, 61p.

USGS. Science for a changing world: Earthquake Hazards Program. Disponível em: <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=P%20wave>. Acessado em Janeiro de 2019.

Vellozo, R. *et al.* 2001. Estimativa das direções principais de tensão in situ por anisotropia de velocidades. SBGF. p. 167-169.

Vitruvius. Arqutextos: Parque do Flamengo, Rio de Janeiro, Brasil: o caso da marina – parte 2. Disponível em: <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arqutextos/12.136/4048/>. Acessado em Outubro de 2018.

Waztko, A. 2007. Barragens de enrocamento com face de concreto no Brasil. Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina 122p.

Wellman, H. W. & Wilson, A. T. 1965. Salt weathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments, Nature. n.205 p 1097-1098.

ANEXO A – TABELAS DE PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DAS AMOSTRAS DE  
GRANODIORITO

TABELA 1 - PROPRIEDADES PETROFÍSICAS INICIAIS DO GRANODIORITO

Amostras	M seca (g)	M submersa (g)	M saturada (g)	Densidade aparente	Porosidade aparente (%)	Índice de absorção (%)
7C	157,59	98,97	157,91	2673,74	0,54	0,20
12F	159,16	99,97	159,45	2675,86	0,49	0,18
1E	154,45	96,05	154,79	2629,38	0,58	0,22
10B	152,86	97,12	153,13	2729,16	0,48	0,18
4E	151,29	95,20	151,63	2681,02	0,60	0,22
7E	159,75	100,59	160,16	2681,72	0,69	0,26
8E	159,39	100,35	159,80	2681,08	0,69	0,26
11E	156,44	98,37	156,81	2676,93	0,63	0,24
4B	156,36	98,53	156,73	2686,60	0,64	0,24
11B	158,62	99,79	158,96	2680,75	0,57	0,21
12B	158,84	99,93	159,20	2679,94	0,61	0,23
14	159,99	100,66	160,33	2681,25	0,57	0,21
2A	155,74	97,99	156,18	2676,40	0,76	0,28
9A	149,34	93,92	149,75	2674,91	0,73	0,27
14A	156,96	98,91	157,33	2686,75	0,63	0,24
4C	155,77	98,03	156,11	2681,99	0,59	0,22
6F	160,10	100,66	160,49	2675,92	0,65	0,24
15C	159,93	100,5	160,30	2674,41	0,62	0,23
15D	151,10	95,25	151,45	2688,61	0,62	0,23
12C	158,28	99,59	158,68	2678,63	0,68	0,25
1C	154,82	97,30	155,10	2678,55	0,48	0,18
13B	159,59	100,5	159,92	2685,80	0,56	0,21
8B	159,43	100,3	159,76	2681,30	0,55	0,21
5B	156,07	98,24	156,38	2684,38	0,53	0,20
10A	158,65	99,65	158,96	2674,93	0,52	0,20
5A	155,6	97,83	155,90	2679,52	0,52	0,19
8A	159,37	100,31	159,67	2684,80	0,51	0,19
11A	159,61	100,40	159,92	2681,62	0,52	0,19
2D	154,31	97,05	154,71	2676,21	0,69	0,26
3D	144,3	90,73	144,57	2680,16	0,50	0,19
6D	161,13	101,45	161,49	2683,71	0,60	0,22
8D	160,53	100,91	160,90	2675,95	0,62	0,23
4D	156,70	98,46	157,00	2676,80	0,51	0,19
5C	157,98	99,46	158,33	2683,54	0,59	0,22
10C	160,19	100,68	160,56	2675,18	0,62	0,23
13C	161,34	101,53	161,65	2683,63	0,52	0,19
2E	157,01	98,76	157,34	2680,27	0,56	0,21
3E	141,27	88,81	141,62	2675,06	0,66	0,25
6E	159,75	100,59	160,17	2681,27	0,70	0,26
9E	151,45	95,29	151,78	2681,01	0,58	0,22
1F	154,15	96,99	154,45	2682,74	0,52	0,19
5F	159,75	100,52	160,04	2683,97	0,49	0,18
4F	156,60	98,62	156,97	2683,80	0,63	0,24
7F	159,50	100,37	159,82	2682,93	0,54	0,20
5E	160,07	100,67	160,40	2679,89	0,55	0,21
9F	151,28	95,07	151,57	2677,52	0,51	0,19
11F	158,43	99,61	158,72	2680,26	0,49	0,18
13F	158,01	99,35	158,29	2680,86	0,48	0,18
10D	158,76	99,57	159,07	2668,24	0,52	0,20
11D	158,46	99,65	158,77	2680,31	0,52	0,20
12D	162,14	101,91	162,49	2676,46	0,58	0,22
13D	158,48	99,62	158,83	2676,57	0,59	0,22

TABELA 2 - PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DO GRANODIORITO APÓS ENSAIOS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA

Ciclo	Amostras	M seca (g)	M submersa (g)	M saturada (g)	Densidade aparente	Porosidade aparente (%)	Índice de absorção (%)
10	4E	150,04	109,02	150,3	3634,69	0,63	0,17
	7E	158,94	109,38	159,35	3180,71	0,82	0,26
	8E	159,03	107,32	159,41	3052,98	0,73	0,24
	11E	156,11	102,58	156,53	2893,60	0,77	0,27
20	4B	156,09	98,48	156,67	2682,42	0,99	0,37
	11B	158,38	99,78	158,96	2676,24	0,98	0,37
	12B	158,51	99,87	159,13	2674,82	1,06	0,39
	14	159,93	100,68	160,30	2682,49	0,62	0,23
30	2A	155,40	97,97	156,03	2676,54	1,08	0,40
	9A	149,06	94,91	149,59	2726,04	0,96	0,36
	14A	156,84	98,35	157,30	2660,56	0,78	0,29
	4C	155,67	98,02	156,09	2680,73	0,72	0,27
40	6F	159,90	100,61	160,43	2673,02	0,88	0,33
	15C	159,74	100,46	160,24	2672,13	0,83	0,31
	15D	150,92	95,16	151,39	2683,98	0,83	0,31
	12C	158,06	99,45	158,60	2672,19	0,91	0,34

TABELA 3 - PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DO GRANODIORITO APÓS ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA – POSIÇÃO VERTICAL

Ciclo	Amostras	M seca (g)	M submersa (g)	M saturada (g)	Densidade aparente	Porosidade aparente (%)	Índice de absorção (%)
10	1C	154,52	97,12	154,83	2677,53	0,54	0,20
	13B	159,26	102,41	159,85	2772,63	1,03	0,37
	8B	159,15	100,29	159,5	2687,89	0,60	0,22
	5B	155,77	98,25	156,14	2690,79	0,64	0,24
20	10A	158,40	99,67	158,88	2675,22	0,81	0,30
	5A	155,35	97,86	155,82	2680,30	0,81	0,30
	8A	159,10	100,29	159,6	2682,52	0,84	0,31
	11A	159,33	100,40	159,86	2679,62	0,89	0,33
30	2D	154,06	97,02	154,57	2676,98	0,87	0,33
	3D	144,07	90,74	144,52	2678,88	0,84	0,31
	6D	160,90	101,42	161,40	2682,56	0,83	0,31
	8D	160,29	100,94	160,81	2677,30	0,87	0,32
40	4D	156,40	98,45	156,91	2675,33	0,87	0,32
	5C	157,76	99,43	158,25	2682,08	0,83	0,31
	10C	159,91	100,64	160,44	2674,08	0,89	0,33
	13C	161,03	101,49	161,52	2682,49	0,82	0,30

TABELA 4 - PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DO GRANODIORITO APÓS ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA – POSIÇÃO HORIZONTAL

<b>Ciclo</b>	<b>Amostras</b>	<b>M seca (g)</b>	<b>M submersa (g)</b>	<b>M saturada (g)</b>	<b>Densidade aparente</b>	<b>Porosidade aparente (%)</b>	<b>Índice de absorção (%)</b>
<b>10</b>	2E	156,68	98,80	157,28	2679,21	1,03	0,38
	3E	141,01	88,67	141,58	2665,09	1,08	0,40
	6E	159,47	100,63	160,06	2683,32	0,99	0,37
	9E	151,17	95,29	151,72	2678,89	0,97	0,36
<b>20</b>	1F	153,91	96,92	154,40	2677,63	0,85	0,32
	5F	159,50	100,48	159,95	2682,02	0,76	0,28
	4F	156,38	98,46	156,89	2676,36	0,87	0,32
	7F	159,28	100,34	159,72	2682,38	0,74	0,27
<b>30</b>	5E	159,83	100,66	160,32	2679,01	0,82	0,30
	9F	151,04	95,27	151,52	2685,16	0,85	0,32
	11F	158,20	99,63	158,69	2678,63	0,83	0,31
	13F	157,72	99,38	158,20	2681,40	0,82	0,30
<b>40</b>	10D	158,50	99,57	159,01	2666,55	0,86	0,32
	11D	158,20	99,62	158,67	2679,09	0,80	0,30
	12D	161,88	101,86	162,38	2674,82	0,83	0,31
	13D	158,19	99,58	158,72	2674,84	0,90	0,33

ANEXO B - TABELAS DE PROPRIEDADES DA ÁGUA DURANTE O PROCESSO DE  
DESSALINIZALÇÃO DAS AMOSTRAS

TABELA 1 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 10 (DEZ) CICLOS DE ENSAIOS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA

Dia	Condutividade (µs/cm)	ppm	% NaCl
1	213,00	142,00	0,1
2	53,20	26,60	0,1
3	32,80	16,40	0,1
4	42,40	21,20	0,1
5	18,55	9,30	0
6	13,87	6,86	0
7	16,47	8,32	0
8	8,49	4,16	0
9	8,40	4,20	0
10	5,98	3,00	0
11	7,17	3,60	0
12	5,31	2,65	0
13	4,46	2,23	0
14	6,16	3,14	0
15	4,23	2,10	0

TABELA 2 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 20 CICLOS DE ENSAIOS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA

Dia	Condutividade (µs/cm)	ppm	% NaCl
1	837,00	418,00	1,2
2	49,50	24,70	0,1
3	32,20	16,10	0,1
4	33,50	16,80	0,1
5	15,80	7,84	0
6	12,60	6,30	0
7	9,42	4,72	0
8	12,00	6,00	0
9	6,25	3,13	0
10	5,11	2,57	0
11	6,59	3,30	0
12	3,90	1,96	0
13	3,96	1,99	0
14	6,61	3,31	0
15	4,03	2,03	0
16	3,48	1,75	0
17	3,46	1,74	0
18	4,52	2,25	0
19	4,13	2,05	0
20	4,78	2,30	0
21	3,70	1,86	0
22	20,19	10,10	0
23	9,57	4,79	0

TABELA 3 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 30 CICLOS DE ENSAIOS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA

Dia	Condutividade (µs/cm)	ppm	% NaCl
1	754,00	377,00	1,5
2	67,30	33,70	0,1
3	22,66	13,34	0,1
4	15,88	7,95	0
5	19,96	9,99	0
6	10,18	5,12	0
7	6,62	3,30	0
8	5,80	2,93	0
9	8,04	4,02	0
10	4,63	2,24	0
11	5,97	2,99	0
12	3,82	1,91	0
13	18,00	9,00	0
14	8,24	4,12	0
15	3,82	1,92	0
16	3,90	1,95	0
17	3,50	1,75	0

TABELA 4 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 40 CICLOS DE ENSAIOS DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO SALINA

Dia	Condutividade (µs/cm)	ppm	% NaCl
1	451,00	225,00	0,9
2	97,60	42,20	0,2
3	87,20	43,60	0,2
4	31,10	15,60	0,1
5	51,19	26,00	0,1
6	19,38	9,69	0
7	9,88	4,94	0
8	12,9	6,45	0
9	7,10	3,55	0
10	10,76	3,38	0
11	4,96	2,48	0
12	2,10	1,06	0
13	2,36	1,18	0

TABELA 5 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 10 (DEZ) CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO VERTICAL)

Dia	Condutividade (µs/cm)	ppm	% NaCl
1	408,00	205,00	0,8
2	126,00	63,00	0,2
3	451,00	22,60	0,1
4	32,30	16,10	0,1
5	37,20	18,60	0,1
6	20,00	10,00	0
7	12,90	6,50	0
8	11,40	5,70	0
9	12,60	6,33	0
10	7,21	3,62	0
11	6,22	3,13	0
12	8,70	4,35	0
13	4,23	2,11	0
14	4,31	2,16	0
15	5,79	2,90	0
16	5,90	2,95	0
17	3,99	1,99	0
18	4,62	2,32	0
19	4,34	2,18	0
20	3,28	1,64	0
21	4,33	2,17	0
22	3,30	1,17	0

TABELA 6 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 20 CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO VERTICAL).

Dia	Condutividade (µs/cm)	ppm	% NaCl
1	355,00	178,00	0,7
2	74,30	37,10	0,1
3	55,20	27,60	0,1
4	59,40	29,70	0,1
5	46,10	23,00	0,1
6	19,17	9,59	0
7	16,06	80,30	0
8	19,85	9,93	0
9	9,75	4,87	0
10	13,91	6,95	0
11	5,69	2,84	0
12	18,90	9,45	0
13	7,16	3,59	0
14	4,53	2,26	0
15	4,65	2,33	0
16	4,11	2,06	0
17	4,83	2,42	0
18	3,74	1,87	0
19	2,37	1,17	0

TABELA 7 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 30 CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO VERTICAL).

Dia	Condutividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	ppm	% NaCl
1	455,00	228,00	0,9
2	75,40	37,70	0,1
3	52,00	26,00	0,1
4	39,70	19,90	0,1
5	49,90	24,90	0,1
6	20,22	10,12	0
7	24,11	12,06	0
8	10,57	5,28	0
9	21,72	10,87	0
10	8,55	4,28	0
11	5,71	2,85	0
12	5,26	2,62	0
13	4,47	2,24	0
14	5,57	2,78	0
15	4,02	2,01	0
16	2,23	1,12	0

TABELA 8 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 40 CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO VERTICAL).

Dia	Condutividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	ppm	% NaCl
1	585,00	292,00	1,1
2	99,70	49,90	0,2
3	43,60	21,80	0,1
4	31,40	15,70	0,1
5	22,32	11,15	0
6	28,08	14,05	0,1
7	11,13	5,57	0
8	3,35	1,68	0
9	3,31	4,12	0
10	6,24	3,13	0
11	4,18	2,52	0
12	3,70	1,85	0

TABELA 9 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 10 (DEZ) CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO HORIZONTAL)

Dia	Condutividade (µs/cm)	ppm	% NaCl
1	580,00	292,00	1,2
2	120,10	60,10	0,2
3	44,10	22,10	0,1
4	30,90	15,50	0,1
5	35,60	17,80	0,1
6	15,26	7,63	0
7	11,60	5,83	0
8	9,82	4,96	0
9	12,03	5,94	0
10	5,47	2,75	0
11	5,42	2,72	0
12	6,67	3,34	0
13	3,44	1,72	0
14	3,98	2,02	0
15	5,34	2,65	0
16	32,1	16,00	0,1
17	3,84	1,93	0
18	8,02	4,02	0
19	5,11	2,57	0
20	3,18	1,59	0
21	4,37	2,18	0
22	3,18	1,60	0

TABELA 10 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 20 CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO HORIZONTAL).

Dia	Condutividade (µs/cm)	Ppm	% NaCl
1	392,00	196,00	0,8
2	68,40	34,30	0,1
3	45,10	22,60	0,1
4	60,60	30,30	0,1
5	23,75	11,96	0
6	12,58	6,29	0
7	12,02	6,02	0
8	12,37	6,19	0
9	6,62	3,32	0
10	9,20	4,60	0
11	4,21	2,12	0
12	8,88	4,45	0
13	4,85	2,43	0
14	3,97	1,99	0
15	4,28	2,14	0
16	4,04	2,04	0
17	3,62	1,81	0
18	3,28	1,63	0
19	2,69	1,32	0

TABELA 11 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 30 CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO HORIZONTAL).

Dia	Condutividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	ppm	% NaCl
1	550,00	272,00	1,1
2	79,60	39,80	0,2
3	48,20	24,10	0,1
4	34,60	17,30	0,1
5	45,70	22,80	0,1
6	23,40	11,70	0
7	31,10	15,60	0,1
8	9,10	4,56	0
9	30,30	15,20	0,1
10	7,62	3,81	0
11	5,31	2,66	0
12	5,46	2,73	0
13	4,28	2,14	0
14	4,57	2,28	0
15	3,91	1,96	0
16	2,18	1,09	0

TABELA 12 - DESSALINIZAÇÃO DAS AMOSTRAS APÓS 40 CICLOS DE ENSAIOS DE EXPOSIÇÃO À NÉVOA SALINA (EM POSIÇÃO HORIZONTAL).

Dia	Condutividade ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	ppm	% NaCl
1	520,00	260,00	1
2	98,20	49,30	0,2
3	46,30	23,20	0,1
4	37,40	19,00	0,1
5	21,40	10,69	0
6	24,30	12,16	0
7	12,30	6,15	0
8	3,02	1,51	0
9	7,25	3,64	0
10	5,78	2,90	0
11	4,13	2,42	0
12	3,72	1,88	0