

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, FÍSICO-MECÂNICA E  
DURABILIDADE DE ROCHAS ORNAMENTAIS FLUMINENSES**

**KELLY DE OLIVEIRA BORGES DA COSTA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
NOVEMBRO – 2021

# **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, FÍSICO-MECÂNICA E DURABILIDADE DE ROCHAS ORNAMENTAIS FLUMINENSES**

**KELLY DE OLIVEIRA BORGES DA COSTA**

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.”

Orientador: Prof. Gustavo de Castro Xavier

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
NOVEMBRO – 2021

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
UENF-Bibliotecas  
Elaborada com os dados fornecidos pela autora

C837 Costa, Kelly de Oliveira Borges da.

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, FÍSICO-MECÂNICA E DURABILIDADE DE ROCHAS ORNAMENTAIS FLUMINENSES / Kelly de Oliveira Borges da Costa. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2022.

164 f. : il.  
Bibliografia: 145 - 157.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2022.  
Orientador: Gustavo de Castro Xavier.

1. ROCHA ORNAMENTAL E DE REVESTIMENTO. 2. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS. 3. DURABILIDADE. 4. POROSIDADE. 5. TRATAMENTO TÉRMICO. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

# **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL, FÍSICO-MECÂNICA E DURABILIDADE DE ROCHAS ORNAMENTAIS FLUMINENSES**

**KELLY DE OLIVEIRA BORGES DA COSTA**

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.”

Aprovada em 03 de Novembro de 2021

Comissão examinadora:

---

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

---

Prof. Aldo Durand Farfán (D.Sc., Engenharia Civil)– LECIV/UENF

---

Prof. Rubén Sánchez Rodriguez (D.Sc., Ciências Químicas) – LAMAV/UENF

---

Prof. Gustavo de Castro Xavier (Orientador, D.Sc., Engenharia Civil) - LECIVUENF

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
NOVEMBRO – 2021

À Deus e ao meus:  
Marcelo,  
Letícia e  
Lucas.

## **AGRADECIMENTOS**

À Marcelo, Letícia e Lucas pelas inúmeras horas de colaboração, por se fazerem presentes, pelo amor e apoio.

Aos meus pais Janildo (*in memorian*) e Elzy, meus primeiros educadores. À Antônio Carlos e Benise, meus pais do coração. Aos meus irmãos Jadson e Jair sempre torcendo pelo meu êxito. À vó Antônia, minha grande encorajadora, que no auge dos seus 90 anos dá lições de sabedoria e exemplo de fé.

Aos meus familiares e aos amigos que se tornaram família, que sempre me incentivaram a transpor os desafios. Aos amigos da UENF, pelo apoio dado nos experimentos e pelo convívio ao longo destes anos.

À UENF, ao corpo docente e aos Professores Paulo Maia e Rodrigo Martins pela atenção, argumentações e inspiração para o desenvolvimento desta pesquisa. Aos Técnicos e bolsistas do LECIV, do LAMAV, da Prefeitura do *Campus*, da Secretaria Acadêmica, Secretaria de Pós-Graduação e bolsistas do Laboratório de Cerâmicas. À FAPERJ, e aos Professores Victor Flores e Jorge Belizário, pela oportunidade ímpar de trabalhar com os bolsistas do Programa Jovens Talentos.

Ao Prof. Avacir Andrello (UEL), pela parceria e colaboração científica. Aos professores Leonardo Gonçalves Pedroti (UFV), Sergio Neves Monteiro (IME), Carlos Maurício Fontes Vieira (LAMAV/UENF), Júlio César Mendes (IGEO/UFRJ), e à Tarcísio Abreu (UFRJ), ao Profissionais do Cetem-ES, à empresa Pedras Paraíso, ao Sr. Ricardo Vívian e demais técnicos da Micrometics Brasil, pelas importantes contribuições ao longo desta pesquisa.

Às bancas de projeto e qualificação, pelas observações que somaram e aprimoram o trabalho.

À todos aqueles que direta ou indiretamente auxiliaram a elaborar esta tese, seja através do incentivo, orações ou colaborando nos ensaios, discussões, orientações e publicações.

Ao meu orientador, Prof. Gustavo Xavier, pelo profissionalismo, amizade, apoio e empenho para a realização do programa experimental proposto.

À DEUS, por todas as providências, e por sempre colocar anjos disfarçados de pessoas em minha vida.

À todos vocês, minha GRATIDÃO!

*Kelly Borges*

*"Nada temas, porque estou contigo,  
não lances olhares desesperados, pois eu sou teu Deus;  
eu te fortaleço e venho em teu socorro,  
eu te amparo com minha destra vitoriosa."*

*Isaías, 41:10*

# SUMÁRIO

|  |             |
|--|-------------|
| <b>SUMÁRIO .....</b>   | <b>vii</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>  | <b>ix</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>                                      | <b>xiv</b>  |
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>xvi</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>   | <b>xvii</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 – Considerações Iniciais.....  | 1           |
| 1.2 – Justificativa .....  | 3           |
| 1.3 - Objetivos.....   | 5           |
| 1.4 - Estrutura do Trabalho.....   | 6           |
| <b>CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                      | <b>7</b>    |
| 2.1 - Envelhecimentos natural e acelerado em laboratório .....                     | 11          |
| 2.1.1 <i>Clima da Região Norte Fluminense</i> .....                                | 16          |
| 2.2 – Tratamento térmico sob altas temperaturas.....                               | 18          |
| 2.3 – Avaliação da Porosidade e sua Significância na Durabilidade das Rochas ..... | 23          |
| 2.4 – Caracterização Tecnológica das Rochas .....                                  | 27          |
| 2.4.1 <i>Microestrutura da Rocha</i> .....   | 28          |
| 2.4.2 <i>Avaliação das Propriedades Mecânicas</i> .....                            | 31          |
| <b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                      | <b>33</b>   |
| 3.1 – Rochas Estudadas .....   | 33          |
| 3.1.1 <i>Gnaiss Granítico</i> .....  | 37          |
| 3.1.2. <i>Mármore Calcítico</i> .....  | 38          |
| 3.1.3. <i>Gnaiss Milonítico</i> .....  | 40          |
| 3.2 – Métodos .....  | 43          |
| 3.2.1. <i>Envelhecimento Natural</i> .....   | 44          |
| 3.2.2. <i>Degradação Acelerada em Laboratório</i> .....                            | 45          |



|   |            |
|---|------------|
| 3.2.3. <i>Tratamento Térmico</i> .....  | 46         |
| 3.2.4. <i>Ensaaios Tecnológicos</i> .....                                       | 47         |
| <b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                | <b>58</b>  |
| 4.1 – Envelhecimento natural.....   | 58         |
| 4.1.1 – <i>Análise microestrutural</i> .....                                    | 60         |
| 4.1.2 – <i>Resistência Mecânica</i> .....                                       | 78         |
| 4.2 – Envelhecimento de Laboratório.....  | 82         |
| 4.2.1 – <i>Análise microestrutural</i> .....                                    | 83         |
| 4.2.2 – <i>Resistência Mecânica</i> .....                                       | 96         |
| 4.3 – Tratamento Térmico.....   | 99         |
| 4.3.1 – <i>Análise microestrutural</i> .....                                    | 100        |
| 4.3.2 – <i>Análise da Resistência Mecânica</i> .....                            | 116        |
| 4.3.3 – <i>Comparação com outras pesquisas</i> .....                            | 119        |
| 4.4 – <i>Influência da Porosidade nas Propriedades Físicas e Mecânica</i> ..... | 122        |
| 4.5 – <i>Estimativa da Durabilidade</i> .....                                   | 134        |
| <b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES</b> .....  | <b>142</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>145</b> |
| <b>APÊNDICE A</b> .....   | <b>158</b> |
| <b>APÊNDICE B</b> .....   | <b>160</b> |
| <b>APÊNDICE C</b> .....   | <b>161</b> |
| <b>APÊNDICE D</b> .....   | <b>162</b> |
| <b>APÊNDICE E</b> .....   | <b>163</b> |
| <b>APÊNDICE F</b> .....   | <b>164</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 Alterabilidade dos Minerais e Rochas. Adaptada de Bowen (1956) e Minette (1982). .....   | 8  |
| Figura 2.2 -Ilustração Esquemática da seção Transversal de um Sólido Poroso (a: poro fechado; b: poro aberto tipo garrafa, c: poro aberto, d:poro aberto tipo funil, e: poro aberto interconectado, f: poros aberto tipo fenda; g: rugosidade). Adaptado: IUPAC (1994). ..... | 23 |
| Figura 2.3 -Classificação do Diâmetro dos Poros. Fonte: Autora.....   | 24 |
| Figura 3.1 -Domínios tectônicos da Faixa Ribeira Setentrional. Fonte: Tupinambá <i>et al.</i> 2007 .....  | 34 |
| Figura 3.2 -Exploração de Rochas Ornamentais no Estado do Rio de Janeiro. Fonte: DRM (2018). .....  | 35 |
| Figura 3.3 -Rochas Estudadas. Fonte: Autora. ....   | 36 |
| Figura 3.4 -Fotomicrografias da Granada Gnaiss (granito). Fonte: Autora .....   | 38 |
| Figura 3.5 - Fotomicrografias do Mármore Branco. Fonte: Autora .....  | 39 |
| Figura 3.6 -Fotomicrografias do Gnaiss Milonitizado (Pedra Madeira). Fonte: Autora .....  | 40 |
| Figura 3.7 -Envelhecimento Natural das Rochas. Fonte: Autora (a) Amostras sobre a laje na Praia de Sossego, (b) Amostras sobre a laje do Prédio da Reitoria/UENF. ..  | 45 |
| Figura 3.8 -(a) Equipamento de Lixiviação Contínua - Fonte: Autora (b) Esquema de funcionamento do equipamento. Adaptado de Dias Filho <i>et al.</i> (2020). .....  | 46 |
| Figura 3.9 -(a) Tratamento Térmico (b) Forno Mufla. Fonte: Autora .....   | 47 |
| Figura 3.10 -Confocal - Fonte: Olympus (2020) .....   | 49 |
| Figura 3.11 -Pundit. Fonte: Autora .....  | 50 |
| Figura 3.12 -(a) Porosímetro Autopore IV 9500 (b) Penetrômetro. Fonte: Autora...  | 52 |
| Figura 3.13 -Ilustração da PIM. Fonte: Micromeritics (2020).....  | 52 |
| Figura 3.14 -Microtomógrafo modelo SkyScan1173 – Fonte: LFNA/UEL. ....  | 54 |
| Figura 3.15 -Teste de Compressão Uniaxial. Fonte: Autora .....  | 55 |
| Figura 3.16 -Teste de Impacto de Corpo Duro. Fonte: Autora .....  | 56 |
| Figura 4.1 -(a1), (b1) e (c1) Rochas com Envelhecimento Natural em ambiente urbano, na UENF; (a2), (b2) e (c2) Rochas com Envelhecimento Natural em ambiente costeiro, na praia de Sossego. Fonte: Autora.....  | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.2 - Gnaiss granítico intacto e com Envelhecimento Natural; (a)(b)(c) Fotomicrografia 2-D; (d), (e) e (d) Fotomicrografia 3-D. Fonte: Autora .....   | 61 |
| Figura 4.3 -Mármore intacto e com Envelhecimento Natural; (a)(b)(c) Fotomicrografia 2-D; (d), (e) e (d) Fotomicrografia 3-D. Fonte: Autora .....   | 62 |
| Figura 4.4 – Gnaiss milonítico com Envelhecimento Natural; (a)(b)(c) Fotomicrografia 2-D; (d), (e) e (d) Fotomicrografia 3-D. Fonte: Autora .....  | 63 |
| Figura 4.5 -Curvas dilatométricas. (a) gnaiss granítico, (b) mármore, (c) gnaiss milonítico. Fonte: Autora .....   | 66 |
| Figura 4.6 –Vp - Envelhecimento Natural em Ambiente Urbano. Fonte: Autora .....  | 68 |
| Figura 4.7 –Vp - Envelhecimento Natural em Ambiente Costeiro. Fonte: Autora .....  | 69 |
| Figura 4.8 -Distribuição do Diâmetro dos Poros no gnaiss granítico. Fonte: Autora. ....  | 71 |
| Figura 4.9 -Distribuição do Diâmetro dos Poros no Mármore. Fonte: Autora .....   | 72 |
| Figura 4.10 -Distribuição do Diâmetro dos poros no gnaiss milonítico. Fonte:Autora .....   | 73 |
| Figura 4.11 -Mármore calcítico intacto analisado por micro-CT. a) Modelo 3D b) Fase sólida (esqueleto) c) Fase porosa. Fonte: Autora.....  | 76 |
| Figura 4.12 -Gnaiss milonítico analisado por micro-CT. a) Modelo 3-D b) Fase sólida (esqueleto) c) Fase porosa. Fonte: Autora.....   | 77 |
| Figura 4.13 -UCS – Envelhecimento Urbano. Fonte: Autora.....   | 78 |
| Figura 4.14 -UCS – Envelhecimento Costeiro. Fonte: Autora .....  | 79 |
| Figura 4.15 -(a1), (b1) e (c1) Rochas com envelhecimento Acelerado em Laboratório. Fonte: Autora.....  | 83 |
| Figura 4.16 – Gnaiss milonítico envelhecido em laboratório. Fonte: Autora .....  | 83 |
| Figura 4.17 -Fotomicrografia das Lâminas Petrográficas da Rocha Envelhecidas em Laboratório. Fonte: Autora .....   | 84 |
| Figura 4.18 - Rochas após envelhecimento de laboratório. Fonte: Autora.....  | 87 |
| Figura 4.19 –Vp - Degradação Acelerada em Laboratório. Fonte: Autora .....   | 89 |
| Figura 4.20 - Distribuição do Diâmetro dos Poros no Gnaiss Granítico Degradado. Fonte: Autora. Legenda: Gg_intacto: gnaiss granítico; Gg_90L: gnaiss granítico com 90 dias de envelhecimento em laboratório; Gg_210: gnaiss granítico com 210 dias de envelhecimento em laboratório..... | 91 |
| Figura 4.21 - Distribuição do Diâmetro dos Poros no Mármore Degradado. Fonte: Autora. –Legenda: Mc_intacto: mármore intacto; Mc _90: mármore com 90 dias de  |    |

|   |     |
|---|-----|
| degradação em laboratório; Mc _210: mármore com 210 dias de degradação em laboratório. ....   | 92  |
| Figura 4.22 -- Distribuição do Diâmetro dos Poros no gnaiss milonítico. Fonte: Autora. - Legenda: Gm_intacto: gnaiss milonítico intacto; Gm _90 gnaiss milonítico com 90 dias de degradação em laboratório; Gm _210u: gnaiss milonítico com 210 dias de degradação em laboratório. ....             | 92  |
| Figura 4.23 -Gnaiss milonítico após envelhecimento de laboratório, analisado por micro-CT. Fonte: Autora .....  | 95  |
| Figura 4.24 – Corte Longitudinal do gnaiss milonítico após envelhecimento de laboratório. Fonte: Autora.....  | 96  |
| Figura 4.25 -UCS – Degradação em Laboratório. Fonte: Autora .....   | 97  |
| Figura 4.26 - Rochas Submetidas ao Tratamento Térmico. Fonte: Autora .....  | 99  |
| Figura 4.27 - Fotomicrografia das Rochas – 750°C. Fonte: Autora.....  | 102 |
| Figura 4.28 - Fotomicrografia das Rochas sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora (a),(b),(e),(i), (j) e (f) Micrografia 2D; (c) , (d), (g), (h), (k) e (l) Fotomicrografia 3D. ....   | 104 |
| Figura 4.29 - Fotomicrografia do MEV, das Rochas sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora.....   | 106 |
| Figura 4.30 – Vp com o Tratamento Térmico. Fonte: Autora .....  | 110 |
| Figura 4.31 - Distribuição do Diâmetro dos Poros no Gnaiss Granítico Sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora. Legenda: Gg_intacto: gnaiss granítico intacto; Gg _400°C: gnaiss granítico sob 400°C; Gg _750°C: gnaiss granítico sob 750 °C; Gg _1100°C: gnaiss granítico sob 1100°C.....              | 111 |
| Figura 4.32 -Distribuição do Diâmetro dos Poros no Mármore Sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora. Legenda: Mc_intacto:mármore intacto; Mc _400°C:mármore tratado a 400°C; Mc _750°C: mármore tratado a 750 °C. ....   | 112 |
| Figura 4.33 -Distribuição do Diâmetro dos Poros na Pedra Madeira. Sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora. Legenda: Gm_intacto: gnaiss milonítico intacto; Gm _400: gnaiss milonítico tratado a 400°C; Gm _750: gnaiss milonítico tratado a 750°C; Gm _1100: gnaiss milonítico tratado a 1100°C. .... | 112 |
| Figura 4.34 - Mármore à 750°C analisado por micro-CT. Fonte: Autora.a) Modelo 3D b) Fase sólida (esqueleto) c) Fase porosa. ....  | 115 |
| Figura 4.35 - Microfissuras Transgranulares no Mármore à 750°C. Fonte: Autora .   | 116 |
| Figura 4.36 - UCS – Tratamento Térmico. Fonte: Autora.....  | 117 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.37 - Comparação da Velocidade de Propagação de Ondas. Fonte: Autora .....  | 120 |
| Figura 4.38 -Comparação da UCS. Fonte: Autora .....   | 122 |
| Figura 4.39 – Relação entre Densidade Aparente e Porosidade Aparente (envelhecimento natural e laboratório). Fonte: Autora .....          | 124 |
| Figura 4.40 – Relação entre Absorção Aparente e Porosidade Aparente (envelhecimento em laboratório). Fonte: Autora .....                  | 125 |
| Figura 4.41 – Relação entre Densidade Aparente e Porosidade Aparente (tratamento térmico). Fonte: Autora.....                             | 126 |
| Figura 4.42 – Relação entre Absorção Aparente e Porosidade Aparente (tratamento térmico). Fonte: Autora.....                              | 126 |
| Figura 4.43 – Relação entre $V_p$ e Porosidade Aparente (envelhecimento natural). Fonte: Autora.....                                      | 127 |
| Figura 4.44 – Relação entre $V_p$ e Porosidade Aparente (tratamento térmico). Fonte: Autora.....  | 129 |
| Figura 4.45 – Relação entre resistência à compressão e porosidade aparente (envelhecimento natural e de laboratório). Fonte: Autora ..... | 129 |
| Figura 4.46 – Relação entre resistência à compressão e porosidade aparente (tratamento térmico). Fonte: Autora .....                      | 130 |
| Figura 4.47 – Relação entre $V_p$ e resistência à compressão (envelhecimento natural). Fonte: Autora .....                                | 132 |
| Figura 4.48 – Relação entre $V_p$ e resistência à compressão (tratamento térmico). Fonte: Autora.....                                     | 133 |
| Figura 4.49 - Previsão da Durabilidade com Envelhecimento Acelerado em Laboratório. Fonte: Autora .....                                   | 138 |
| Figura 4.50 -Previsão da Durabilidade com o Envelhecimento Natural. Fonte: Autora .....   | 139 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2.1 - Índices de Durabilidade .....  | 9   |
| Tabela 2.2 - Especificação para Granitos .....  | 10  |
| Tabela 2.3 - Tratamento Térmico Relatado na Literatura.....   | 22  |
| Tabela 3.1 -Composição Mineralógica .....   | 42  |
| Tabela 4.32 -Índices Físicos do Mármore Calcítico.....  | 65  |
| Tabela 4.5 -Porosimetria (envelhecimento urbano).....   | 75  |
| Tabela 4.6 -Porosimetria (envelhecimento costeiro) .....  | 75  |
| Tabela 4.7 -Impacto de Corpo Duro .....   | 81  |
| Tabela 4.8 - Índices Físicos das Rochas após 210 dias de envelhecimento de laboratório. ....              | 88  |
| Tabela 4.9 - Porosimetria das Amostras após envelhecimento de laboratório.....                            | 94  |
| Tabela 4.10 - Impacto de Corpo Duro após Envelhecimento de Laboratório.....                               | 98  |
| Tabela 4.11 - Composição Mineralógica dos Litotipos a 750°C .....   | 101 |
| Tabela 4.12 -Índices Físicos e Perda de Massa Após o Tratamento Térmico .....                             | 108 |
| Tabela 4.13 - Porosimetria das Amostras Sob Tratamento Térmico.....                                       | 114 |
| Tabela 4.14 - Impacto de Corpo Duro .....   | 119 |
| Tabela 4.15 - Taxa de Mudança dos Índices Físicos, Vp e UCS- Envelhecimento Natural.....                  | 135 |
| Tabela 4.16 - Taxa de Mudança dos Índices Físicos, Vp e UCS- Envelhecimento acelerado em laboratório..... | 136 |
| Tabela 4.17 - Taxa de Mudança dos Índices Físicos, Vp e UCS- Tratamento Térmico .....                     | 136 |
| Tabela 4.18 - Constante de decaimento .....   | 137 |
| Tabela 4.19 - Previsão de Durabilidade .....  | 139 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>ABNT</b>           | Associação Brasileira de Normas Técnicas                             |
| <b>ASTM</b>           | <i>American Society for Testing and Materials</i>                    |
| <b>CCT</b>            | Centro de Ciências e Tecnologias                                     |
| <b>CEE</b>            | Comissão de Estudos Especiais  |
| <b>DRM</b>            | Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro        |
| <b>IGEO</b>           | Instituto de Geociências   |
| <b>INEA</b>           | Instituto Estadual do Ambiente                                       |
| <b>IUPAC</b>          | <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>             |
| <b>LAMAV</b>          | Laboratório de Materiais Avançados                                   |
| <b>LECIV</b>          | Laboratório de Engenharia Civil                                      |
| <b>UEL</b>            | Universidade Estadual de Londrina                                    |
| <b>UENF</b>           | Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro              |
| <b>UFRJ</b>           | Universidade Federal do Rio de Janeiro                               |
| <b>Unesco</b>         | Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura |
| <b>ZACAS</b>          | Zona de Convergência do Atlântico Sul                                |
| <b>A</b>              | área   |
| <b>DO</b>             | taxa de mudança  |
| <b>E<sub>DT</sub></b> | estimador de danos da rocha ornamental sob altas temperaturas        |
| <b>Gyd</b>            | granito <i>yellow desert</i>   |
| <b>h</b>              | altura de ruptura  |
| <b>J</b>              | Jaule  |
| <b>II ; =</b>         | paralelo às foliações  |
| <b>M<sub>0</sub></b>  | propriedade mecânica inicial   |

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>M<sub>bi</sub></b>  | mármore branco Italva                                 |
| <b>MPa</b>             | Megapascal  |
| <b>M<sub>N</sub></b>   | propriedade mecânica após os ciclos de envelhecimento |
| <b>M<sub>sat</sub></b> | massa da amostra saturada                             |
| <b>M<sub>sec</sub></b> | massa da amostra seca;                                |
| <b>M<sub>sub</sub></b> | massa da amostra submersa                             |
| <b>N</b>               | número de ciclos                                      |
| <b>n</b>               | número de dados                                       |
| <b>P</b>               | força máxima de ruptura,                              |
| <b>P<sub>F</sub></b>   | parâmetro físico ou mecânico no início dos ciclos     |
| <b>P<sub>n</sub></b>   | parâmetro físico ou mecânico no final dos ciclos      |
| <b>P<sub>mv</sub></b>  | pedra madeira verde                                   |
| <b>S</b>               | desvio padrão amostral                                |
| <b>W</b>               | Energia de ruptura                                    |
| <b>x<sub>i</sub></b>   | valor individual do dado                              |
| $\bar{x}$              | média   |
| <b>α<sub>a</sub></b>   | absorção de água                                      |
| <b>η<sub>a</sub></b>   | porosidade aparente                                   |
| <b>λ</b>               | constante de decaimento.                              |
| <b>ρ<sub>a</sub></b>   | densidade aparente                                    |
| <b>Σ</b>               | somatório   |
| <b>σ<sub>c</sub></b>   | tensão de ruptura na compressão                       |



## RESUMO

A alteração de materiais geológicos é um processo natural, uma vez que durante o seu emprego nas obras de engenharia estão expostos a uma variedade de influências físicas e químicas. A medição desses efeitos é de grande importância para garantir a durabilidade do geomaterial e a segurança das obras. Neste sentido, este trabalho aborda a investigação das propriedades tecnológicas de três rochas ornamentais fluminenses: o gnaisse granítico (*Granito Yellow desert*), o Mármore Branco e o gnaisse milonítico (*Pedra Madeira Verde*), extraídas nas cidades de Itaperuna-RJ, Italva-RJ e Santo Antônio de Pádua-RJ, respectivamente, para a avaliação da durabilidade da rocha. As rochas foram submetidas ao envelhecimento natural em ambiente urbano e costeiro por um período de 2 anos, ao envelhecimento acelerado em laboratório com ciclos de lixiviação contínua/choque térmico/congelamento e descongelamento, e ao tratamento térmico, nas temperaturas de 200, 400, 750 e 1100°C. A microestrutura do geomaterial, as propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas antes e após a degradação com a caracterização petrográfica, a microscopia, os índices físicos, medidas dilatométricas, os ensaios de propagação de ondas, a porosimetria por intrusão de mercúrio, microtomografia computadorizada, a compressão uniaxial, a resistência ao impacto de corpo duro. Objetiva-se prever a durabilidade das rochas estudadas e correlacionar o envelhecimento natural ao envelhecimento acelerado em laboratório, as feições microestruturais e porosidade às propriedades físicas e mecânicas. Os ciclos de envelhecimento em laboratório provocaram a redução da velocidade de propagação de ondas e da resistência mecânica com uma intensidade 8 vezes maior do que o envelhecimento natural. Com o tratamento térmico é possível observar intensa variação nos índices físicos, redução da velocidade de propagação de ondas e uma alteração na resistência mecânica à compressão, com redução da resistência no granito e no mármore, e um aumento na pedra madeira até a temperatura de 750°C. Em ambos os processos de degradação, a pedra madeira apresenta uma anisotropia causada pela foliação, enquanto o granito e o mármore apresentam isotropia. A expansão térmica de diferentes fases minerais contribui para o aparecimento de microfissuras. O envelhecimento natural, o envelhecimento acelerado em laboratório e o tratamento térmico a altas temperaturas promovem um incremento na intrusão de mercúrio relacionado ao aumento da porosidade e à formação de nova rede porosa com variação dos diâmetros. A porosimetria permitiu a avaliação da distribuição dos poros, e a microtomografia permitiu a reconstrução de um modelo digital em 3-D definindo a geometria do espaço poroso e dos grãos minerais, nas rochas submetidas à lixiviação e ao tratamento térmico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rocha Ornamental e de Revestimento, Propriedades Tecnológicas, Durabilidade, Porosidade, Tratamento Térmico.

## ABSTRACT

The alteration of geological materials is a natural process, since during their use in engineering works they are exposed to a variety of physical and chemical influences. The measurement of these effects is of great importance to guarantee the durability of the geomaterial and the safety of the works. In this sense, this work reports the investigation of the technological properties of three ornamental rocks from Rio de Janeiro, commercially designated: Granito Yellow Desert, Mármore Branco and Pedra Madeira Verde, extracted in the cities of Itaperuna-RJ, Italva-RJ and Santo Antônio de Pádua-RJ, respectively, for the evaluation of the rock's durability. The rocks were subjected to natural aging in an urban and coastal environment for a period of 2 years, to accelerated aging in the laboratory with continuous leaching/thermal shock/freezing and thawing cycles, and to thermal treatment at temperatures of 200, 400, 750 and 1100°C. Geomaterial microstructure, physical and mechanical properties were evaluated before and after degradation with petrographic characterization, microscopy, physical indices, dilatometric measurements, wave propagation tests, mercury intrusion porosimetry, computerized microtomography, uniaxial compression, hard body impact resistance. The aim is to predict the durability of the studied rocks and correlate natural aging with accelerated aging in the laboratory, microstructural features and porosity to physical and mechanical properties. Laboratory aging cycles caused a reduction in wave propagation speed and mechanical strength with an intensity 8 times greater than that of natural aging. With the heat treatment, it is possible to observe intense variation in physical indices, a reduction in the propagation speed of waves and a change in the mechanical strength to compression, with a reduction in strength in granite and marble, and an increase in pedra madeira up to a temperature of 750°C. In both degradation processes, pedra madeira presents an anisotropy caused by foliation, while granite and marble present isotropy. The thermal expansion of different mineral phases contributes to the appearance of microcracks. Natural aging, accelerated aging in the laboratory and heat treatment at high temperatures promote an increase in mercury intrusion related to the increase in porosity and the formation of a new porous network with varying diameters. Porosimetry allowed the evaluation of pore distribution, and microtomography allowed the reconstruction of a 3-D digital model defining the geometry of the pore space and mineral grains in rocks subjected to leaching and heat treatment.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ornamental Stone and Building Stone, Technological Properties, Durability, Porosity, Heat Treatment.

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 – Considerações Iniciais

A crosta terrestre é constituída principalmente por rochas, provenientes da solidificação do magma, de lavas vulcânicas, ou da consolidação de depósitos sedimentares, algumas vezes sujeitos a transformações metamórficas.

As rochas naturais são geomateriais de ampla aplicação, segundo Di Benedetto *et al.* (2015). Ao longo da história a utilização deste material se intensificou, diversificou e atualmente as rochas vêm sendo aplicadas em diversas finalidades construtivas, com destaque para a aplicação de rochas ornamentais e de revestimentos em pisos e pavimentos, cantarias, placas em lajes, obras de arte e revestimento de edificações, buscando a durabilidade e agregação de valor estético aos empreendimentos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma ABNT NBR 15012 (2013) define a rocha para revestimento como à rocha natural que, submetida a processos diversos de beneficiamento, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas, em obras de construção civil. E a rocha ornamental como o material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizado para exercer uma função estética. A Comissão de Estudos Especiais - CEE-187 da ABNT avalia a proposta de racionalizar esses conceitos e adotar uma nova definição para a rocha ornamental, onde seria designada como: material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária”, Alencar (2013).

Neste trabalho, os termos rocha ornamental e de revestimento serão empregados sem distinção, utilizados para designar pedras naturais, abrangendo os tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiadas, utilizadas em revestimentos, estruturas e com funções estéticas.

A durabilidade de rochas ornamentais é definida como a medida da capacidade do material manter as características físicas e mecânicas, num determinado tempo de uso. Esse tempo poderá ser maior ou menor e irá depender da ação intempérica e da aplicação da rocha em questão, Latham (1993).

A durabilidade é intrínseca do material rochoso e está relacionada a propriedades físicas, mineralogia, ao cenário geológico, ações hidrotérmicas, orientação, tamanho do grão e alterações preexistentes da rocha. O seu comportamento mecânico é acoplado a fatores como: litologia, mineralogia, estado de tensão, temperatura, estrutura, tempo, agentes climáticos e antrópicos (Liu e Xu, 2013; Mao *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2017; Frascá, 2019).

O termo degradação, na literatura técnica é difundido para designar as modificações sofridas pelos materiais geotécnicos devido à ação dos agentes do meio ambiente. De maneira geral, a degradação manifesta-se através da redução da resistência mecânica devido à ação dos agentes físicos, químicos e biológicos, Farjallat (1972). Os processos de degradação ou envelhecimento da rocha incluem uma série de agentes como: poluição do ar, chuvas ácidas, cristalização de sais, ciclos de congelamento-descongelamento, temperaturas elevadas, ciclos de saturação-secagem, carga de tráfego, agentes biológicos, falha no assentamento, na manutenção e o uso de produtos de limpeza inadequados.

Dentre os problemas construtivos observados nas rochas, destacam-se: os manchamentos dispostos pela superfície, provocando mudanças de coloração e deterioração estética, a eflorescências e subeflorescências oriundas da cristalização de sais, a desagregação, a decomposição, a desintegração e a oxidação, como os mais usuais.

A rocha é considerada um material durável, no entanto, a forma de uso e a localização devem ser consideradas. Um revestimento pode apresentar boa durabilidade em um determinado uso em uma região geográfica e ter a degradação acelerada em outra localização devido ao intemperismo ambiental, também conhecido como meteorização.

O intemperismo nas rochas ornamentais e as variações de suas propriedades podem ser avaliadas por diferentes abordagens, como: estudo de obras existentes, teste com exposição ao ar livre ou programas de testes laboratoriais com envelhecimento acelerado. Frascá (2019) enfatiza que as propriedades das rochas podem ser resumidas em físicas, como: densidade, porosidade, permeabilidade, absorção de água, dureza e condutividade térmica; e mecânicas, como: resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, ao impacto, à flexão, deformabilidade, elasticidade e resistência à abrasão.

Segundo a Abirochas (2021), as exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento naturais somaram US\$ 987,4 milhões e 2,16 milhões de toneladas em 2020. A participação de rochas processadas, no faturamento (80%) e no volume físico (55%) das exportações. Os principais produtos exportados incluíram chapas de granito (39%), chapas de quartzito (21%), blocos de granito (12%), chapas de mármore (7%) e produtos de pedra-sabão (6%), além de blocos de quartzito (5,4%) e produtos de ardósia (4,3%). Os Estados Unidos é o principal país de destino das exportações, seguido da Itália, México e Reino Unido, totalizando cerca de 70% das exportações de rochas ornamentais brasileiras.

O Espírito Santo permanece como principal estado brasileiro exportador de rochas. O Estado do Rio de Janeiro é o 3º maior produtor de rochas ornamentais da região Sudeste, e se destaca pela extração e mineração de materiais pétreos com acabamento rústico, com importante implicação para o desenvolvimento do Norte e Noroeste fluminense, onde se concentra a maior parte das atividades de lavra e beneficiamento primário em arranjos produtivos locais. Os afloramentos de gnaisses e granitos são explorados comercialmente tanto para a produção de rochas ornamentais, quanto para agregados, mostrando assim, que as pesquisas com os materiais pétreos do Estado tem importante aplicação nos dois mercados distintos.

## **1.2 – Justificativa**

A alterabilidade da rocha de revestimento vai depender de três principais fatores: a qualidade do material, a condição do meio externo e o tempo de exposição.

Considerando que um mesmo material pode ser apropriado em determinadas condições intempéricas, enquanto que em outras não, faz-se necessário caracterizar adequadamente as propriedades tecnológicas, bem como o estudo de degradação natural no campo e acelerada em laboratório para comparação dos efeitos do envelhecimento da rocha e, finalmente, definir a sua alterabilidade e durabilidade, proporcionando benefícios estéticos, financeiros e segurança quanto à utilização e aplicação nos projetos de engenharia (Xiao *et al.*, 2014; Dias Filho *et al.*, 2020).

Diante da pujança do setor brasileiro de rochas ornamentais e de revestimento e especialmente, do Estado do Rio de Janeiro, poucas são as

avaliações de alterabilidade e durabilidade destas rochas, principalmente quando estão expostas por alguns anos ao ambiente construído.

As exigências de sustentabilidade no setor da construção civil, observadas na última década, prenota a tendência mundial de privilegiar os aspectos de projeto voltados à durabilidade e à extensão da vida útil das construções e dos materiais. Considerando o emprego e a importância econômica das rochas ornamentais fluminenses, o presente trabalho buscou o estudo da durabilidade de três rochas ornamentais, por meio do envelhecimento natural em ambiente urbano e costeiro, envelhecimento acelerado em laboratório e o tratamento térmico até 1100°C, com os resultados abrangendo a caracterização de sua microestrutura, propriedades físicas e mecânicas para aplicação em revestimentos de edifício, muros, pisos de calçadas, praças e monumentos, e segurança em caso de incêndio.

Segundo o Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio (CBMERJ, 2019), a Capital do Estado é a região com maior proporção dos casos de incêndio em edificações. Os números de eventos realizados em combate a incêndio no ano de 2019 totalizaram 31.237 ocorrências, das quais 39% são edificações.

Destaca-se o ineditismo desta pesquisa quanto ao material estudado e a metodologia proposta, indicando singularidade quanto ao processo de degradação acelerada, o tratamento térmico e programa de testes, partindo de uma visão global das propriedades geo-mecânicas, para a visão microestrutural e a análise da porosidade por meio da porosimetria e microtomografia.

Existem poucas pesquisas de durabilidade dessas rochas regionais, e sua segurança em caso de incêndios. O conhecimento do comportamento desses litotipos em relação à sua suscetibilidade a alterações é fundamental e necessário para caracterizar o melhor local de utilização, aplicação e durabilidade, vislumbrando a agregação de valor as rochas em questão.

Tendo em vista a abrangência e as potencialidades deste estudo, pretende-se assim contribuir para o meio técnico, orientando quanto à durabilidade de rochas, em uso como geomateriais de construção, bem como fornecer subsídios para realização de trabalhos semelhantes em outras regiões do País.

### 1.3- Objetivos

Com a presente pesquisa almejou-se a análise das propriedades físicas e mecânicas das rochas, dos microfissuramentos e porosidade decorrentes do envelhecimento natural e envelhecimento acelerado em laboratório pelo processo de lixiviação contínua, o tratamento térmico até 1100°C, e a avaliação da metodologia aplicada.

Como objetivo geral espera-se a caracterização tecnológica e prever a durabilidade das rochas fluminenses estudadas e sua segurança em caso de incêndio, correlacionando as feições microestruturais e porosidade às propriedades avaliadas, corroborando na previsão do comportamento em longo prazo e na segurança de projetos, prevenindo manifestações patológicas precoces, além de contribuir para o desenvolvimento tecnológico, científico e a agregação de valor aos materiais pesquisados.

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Avaliar os parâmetros físicos e mecânicos da rocha antes e após o envelhecimento natural, a degradação acelerada das rochas em laboratório sob os processos de lixiviação contínua e tratamento térmico;
- ✓ Realizar o envelhecimento natural das rochas em ambiente urbano e costeiro;
- ✓ Comparar com os resultados das propriedades físicas e mecânicas das rochas intactas e obtidos após degradação acelerada em laboratório e envelhecimento no campo, estimando-se uma equivalência temporal entre a degradação natural e a degradação acelerada em laboratório;
- ✓ Avaliar o potencial da utilização da porosimetria por intrusão de mercúrio e a microtomografia computadorizada de raios x para estudar as alterações da estrutura sólida e porosa das rochas antes e depois dos processos de envelhecimento;
- ✓ Verificar a influência da porosidade nas propriedades físicas e mecânicas das rochas estudadas;
- ✓ Estimar a durabilidade das rochas fluminenses analisadas.

## **1.4 - Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco Capítulos que ordenam a sequência de abordagem.

No Capítulo 1, são apresentados os elementos básicos deste estudo, como a introdução, as justificativas e os objetivos.

No Capítulo 2, desenvolvem-se as considerações quanto à revisão da literatura, que traz os conceitos e os elementos teóricos adotados para o desenvolvimento deste estudo.

Nos Capítulos 3 são abordados os materiais e a metodologia de pesquisa.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões e finalmente, no Capítulo 5, discorrem as considerações finais, as sugestões para trabalhos futuros, seguido pelas referências bibliográficas e apêndices.



## CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

As rochas utilizadas para revestimento são amplamente aplicadas em grandes obras de engenharia e monumentos. Suas propriedades mecânicas e durabilidade são influenciadas pelas características intrínsecas da rocha e por agentes externos. Sua microestrutura é formada pela união de minerais na forma de cristais e grãos, materiais cimentícios, vazios, poros e microfissuras. Sob a ação de uma carga, essas microestruturas interagem umas com as outras para dar origem a uma resposta mecânica macroscópica correspondente.

Os estudos dos mecanismos de degradação, da microestrutura e da resposta mecânica devido à degradação levam a compreensão da durabilidade do material em determinado ambiente, e tem sido objeto de estudo em diversas pesquisas (Benavente e Pla, 2018; Germinario and Török, 2020; Lima 2019; Dias Filho *et al.*, 2020; Frascá *et al.*, 2020; Basu *et al.*, 2020; Stizia *et al.* 2021).

O programa experimental e a metodologia para avaliar a durabilidade de materiais geotécnicos devem ser escolhidos em função do objetivo da pesquisa e do tipo de material que será estudado, permitindo antecipar o comportamento da rocha sob esforços e em determinadas condições de uso.

É possível realizar a avaliação da alterabilidade de uma rocha por meio da sua composição mineralógica. Isso porque os primeiros minerais a se formarem no esfriamento do magma são os menos estáveis na condição de intemperismo da superfície. Tem-se como exemplo a olivina e o plagioclásio cálcico. Por sua vez, minerais como a hematita e o quartzo, últimos a se formarem no magma, são mais estáveis face ao intemperismo.

Considerando a alterabilidade, Bowen (1956) apresenta séries de reações que sugerem uma sequência de formação de minerais no líquido magmático. Minette (1982) expõe uma sequência de rochas, em função da susceptibilidade à alteração dos minerais constituintes. A Figura 2.1 exhibe essas séries de minerais e sequências rochosas.

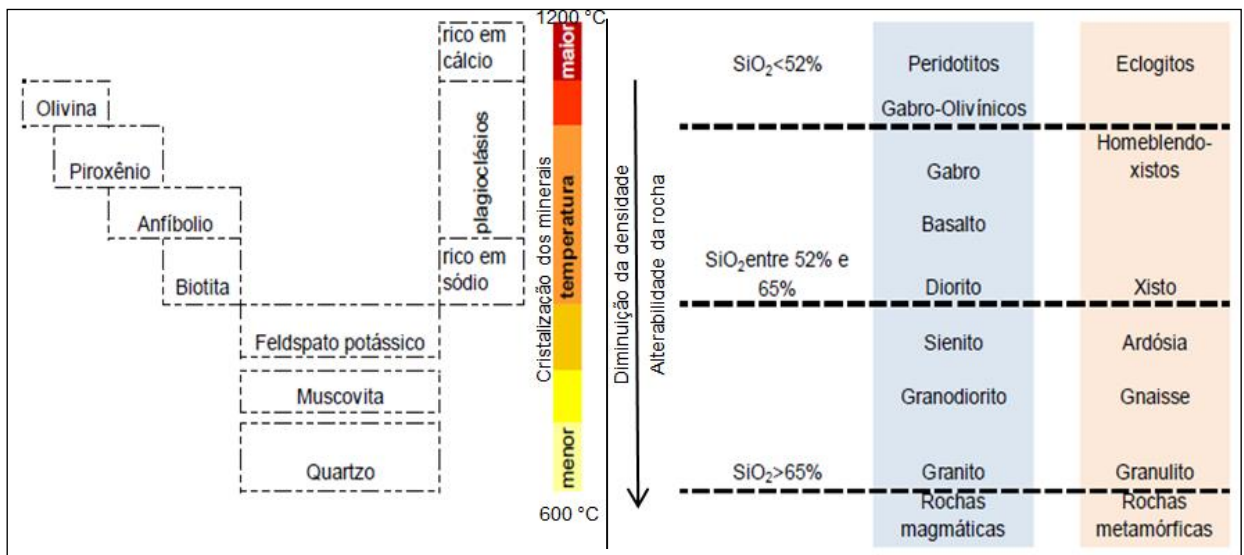


Figura 2.1 Alterabilidade dos Minerais e Rochas. Adaptada de Bowen (1956) e Minette (1982).

Na literatura são observadas propostas para a susceptibilidade de rochas de revestimento de se degradarem em ambiente costeiro e por ataque de soluções ácidas e de forma acelerada em laboratório. Os resultados dos danos são descritos por estimadores de índices de alteração e de susceptibilidade à solução atacada, na qual a rocha é submetida, mostrando que as rochas ornamentais aparentemente são podem apresentar degradação rápida Ruiz-Agudo *et al.* (2007).

A durabilidade das rochas pode ser expressa por índices ou modelos usados para avaliar a variação de parâmetros específicos após certa duração de exposição ao intemperismo ou a ciclos de envelhecimento. Esses parâmetros podem ser físicos, geomecânicos, químicos, mineralógicos ou estatísticos, conforme apresentado por vários autores ( Binal *et al.*, 1998; Benavente *et al.*, 2004; Mutluturk *et al.*, 2004; Angeli *et al.* 2007; Oliveira *et al.*, 2015; Dias *et al.*, 2016; Dias *et al.*, 2020, Fonseca *et al.* 2021).

Mousavi *et al.* (2019) estudou a degradação de rochas de revestimento em fachadas e considera o uso de métodos estatísticos eficiente para avaliar os danos através do uso de um índice quantitativo, correlacionando a extensão da degradação da fachada e a área total do revestimento.

A Tabela 2.1 apresenta alguns dos estimadores de durabilidade propostos para materiais rochosos.

Tabela 2.1 - Índices de Durabilidade

| Estimador de durabilidade                   | Fórmula  | Parâmetros  | Materiais   | Autor  |
|---|--|---|---|--|
| Taxa de mudança                             | $DO = \frac{P_n}{P_F} \times 100$                      | DO é a taxa de mudança em (%), $P_n$ é o parâmetro físico ou mecânico no final dos ciclos, e $P_F$ é o valor inicial deste parâmetro.                               | Ignimbritos                                       | Binal <i>et al.</i> (1998)                                   |
| Estimador petrofísico de durabilidade       | $PDE = \frac{X}{\sigma}$                               | X, características da estrutura dos poros, $\sigma$ variação da resistência mecânica.   | Calcários e quartzo-arenito                       | Benavente <i>et al.</i> (2004)                               |
| Índice estimador de alteração (AI)          | $AI = \ln \frac{100C}{E\sqrt{\sigma_T}}$               | C, coeficiente de capilaridade; ( $\sigma_T$ ) resistência a tração; E, coeficiente de evaporação   | Calcários e quartzitos                            | Angeli <i>et al.</i> (2007)                                  |
| Coeficiente de enfraquecimento              | $\lambda = \frac{R_{T0} - R_{Tn}}{R_{T0}}$             | $R_{T0}$ , resistência a compressão inicial; $R_{Tn}$ , resistência a compressão após n ciclos de degradação;   | Granitos  | Chen <i>et al.</i> (2019)                                    |
| Índice de alteração                         | $I = I_{ult} (1 - e^{-\lambda(T_0)})$                  | $I_{ult}$ e $T_0$ parâmetros de durabilidade do material, $I_{ult}$ estado último   | Gnaisses  | Dias <i>et al.</i> (2016);<br>Dias <i>et al.</i> (2020)      |
| Função de decaimento (exponencial e linear) | $M_N = M_0 e^{-\lambda N}$<br>$M_N = -\lambda N + M_0$ | $M_N$ é a propriedade mecânica após ciclos de envelhecimento, $M_0$ é a propriedade mecânica inicial, N é o número de ciclos e $\lambda$ a constante de decaimento. | Mármore, diabásio e calcários; basalto e dolomita | Mutluturk <i>et al.</i> (2004);<br>Aral <i>et al.</i> (2021) |

Ugur *et al.* (2014) ao analisar as alterações nas características de porosidade de algumas pedras naturais averiguou que os espaços vazios são a principal preocupação do material, já que o volume, tamanho e distribuição afetam o comportamento das rochas em ambientes agressivos sujeitos a cristalização do sal, congelamento-descongelamento e penetração de poluentes. A água é o principal

agente de intemperismo, a presença de poros abertos e as micro-fissuras têm efeitos consideráveis no armazenamento e circulação de fluidos dentro dos materiais geológicos, favorecendo inevitavelmente a sua deterioração e redução da resistência mecânica, Martínez-Martínez *et al.*(2013).

Estudos de Hawkins e McConnell (1992), Hoek e Brown (1997); Vásárhelyi (2005) e Zhou e Song (2016) apontam que a deterioração química e física provocada pela presença da água no interior das rochas corroboraram para a perda de resistência mecânica entre 20% a 80% nos litotipos pesquisados.

A norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) mostrada na Tabela 2.2, fixa valores limites dos ensaios de caracterização para a aplicação das rochas graníticas no Brasil. A ASTM C615 (2018) é referência para os requisitos mínimos dos materiais usados para exportação.

Tabela 2.2 - Especificação para Granitos

| Propriedades  | Requisitos       |                  |
|---|------------------|------------------|
|   | NBR 15844 (2015) | ASTM C615 (2018) |
| Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> ), mín.               | ≥ 2.550          | ≥ 2.560          |
| Porosidade aparente (%), máx.                               | 1,0              | não especificado |
| Absorção d'água (%), máx.                                   | ≤ 0,4            | ≤ 0,4            |
| Módulo de ruptura (flexão três pontos) (MPa), mín.          | > 10,0           | ≥ 10,34          |
| Flexão por quatro pontos (MPa), mín.                        | > 8,0            | ≥ 8,27           |
| Desgaste (mm/1000 m), máx.                                  | < 1,0            | n.e              |
| Impacto de corpo duro (m), mín.                             | > 0,3            | n.e              |
| Dilatação térmica linear [10 <sup>-3</sup> mm/(m.°C)], máx. | < 8,0            | n.e              |
| Compressão uniaxial (MPa), mín.                             | >100             | ≥ 131            |

Destaca-se a importância do estudo dos geomateriais de construção, o entendimento da durabilidade, da vida útil e a melhor forma de emprego das rochas em projetos de engenharia, uma vez que melhorias em termos de aplicabilidade, desempenho, durabilidade e estratégias de manutenção, promovem a sustentabilidade das obras e edifícios, reduzindo custos e riscos desde o projeto, contribuindo como uma atitude cultural, uma vez que colabora para a preservação histórica das edificações à medida que ocorre o crescimento das cidades (Frasca *et al.*, 2020; Fonseca *et al.*, 2021).

## 2.1 - Envelhecimentos natural e acelerado em laboratório

Nos testes de envelhecimento natural, comumente chamados testes ao ar livre, as amostras são expostas a radiação solar, chuva, umidade do ar, variação de temperatura, vento e condições ambientais combinadas entre si em uma determinada localização geográfica. O tempo necessário para concluir os testes pode ser excessivo e inviável devido ao cronograma do projeto ou da construção. Simulações em laboratório das condições naturais de intemperismo podem acelerar o processo e fornecer informações úteis em um tempo relativamente curto.

O envelhecimento acelerado em laboratório ou “envelhecimento artificial acelerado” ou, “ensaio de durabilidade” ou ainda de “alteração acelerada”, como são normalmente conhecidos e diferentemente denominados, consiste em submeter às amostras estudadas em câmaras, sob ação de atmosferas artificiais e diferentes mecanismos de degradação, conjuntos ou não, buscando simular as condições ambientais do local de exposição do material, de uma forma intensa, para posterior determinação da variação microestrutural e das propriedades físicas e mecânicas do material em diferentes níveis de degradação.

Os testes de envelhecimento podem ser divididos em três tipologias, Segundo Stizia *et al.* (2021):

- Controle de qualidade e qualificação: Consistem em ensaios de curta a média duração com resultado de reprovação/aprovação a ser comparado com a especificação do material ou referências normativas. O envelhecimento em materiais de construção dedicados ao controle de qualidade, expressa os danos em termos de perda de peso e resistência do material e devem estar dentro de uma determinada faixa de valores aceitáveis para um uso específico;
- Validação ou correlativo: Os ensaios correlativos fornecem dados de ordem de classificação que devem ser comparados com a exposição natural.

Para Dias *et al.*, 2016, uma análise mais satisfatória do material é obtida quando é possível combinar os resultados da degradação ao ar livre, aos resultados da degradação acelerada no laboratório e comparar em relação ao material intacto.

Ao pesquisar o envelhecimento natural de rochas ornamentais em fachadas, Mousavi *et al.* (2019) concluiu que a degradação foi condicionada por diversos fatores que costumam agir sinergicamente, e que quanto mais alto um edifício, maior sua suscetibilidade aos efeitos do tempo. O autor destaca três grupos distintos de defeitos nos revestimentos pétreos devido ao envelhecimento natural:

- Degradação estética: Esses defeitos geralmente afetam o aspecto estético do revestimento, mas não representam um risco para sua integridade, de modo geral, estes são os tipos de defeitos mais comuns e estão presentes na grande maioria dos revestimentos. Esses defeitos compreendem manchas, eflorescências, crescimento de vegetação, colonização biológica, mudança de cor e sujeira superficial;
- Fixação ao substrato: As anomalias estão relacionadas com os elementos de fixação e sua influência nos materiais pétreos; este grupo de defeitos põe em risco os requisitos de segurança do revestimento e conseqüentemente, um risco para pessoas e bens;
- Perda de integridade: Os defeitos correspondem a alterações das propriedades físicas e químicas da pedra natural e podem afetar o material de forma definitiva, causando a redução da resistência mecânica e levando a deterioração estética do revestimento.

Testes realizados por Oliveira *et al.* (2015) em basaltos submetidos a 36 anos de alteração natural, apontaram diferentes comportamentos de alteração num mesmo material, sob a mesma intensidade de intemperismo e mostraram uma correlação entre a porosidade aparente e a absorção de água nas amostras. Uma maior porosidade ou absorção de água correspondeu a uma maior taxa de dissolução de íons. Por outro lado, uma maior densidade de rochas correspondeu a uma menor liberação de íons na solução aquosa. A resistência dos litotipos analisados mostrou-se inversamente proporcional à porosidade aparente e à absorção de água, e uma maior densidade de rochas correspondeu a uma maior resistência à compressão.

Dependendo do clima, vários fatores relacionados ao intemperismo são ameaças às rochas ornamentais. Por exemplo, Cárdenes *et al.* (2014) considera o congelamento-descongelamento, a cristalização de sal e o choque térmico como os fatores mais importantes na deterioração da rocha em monumentos. Yavuz (2012)

em seu estudo atribui a degradação aos ciclos de aquecimento e resfriamento, mesmo com pequenas variações de temperaturas.

Uma extensa revisão da literatura realizada por Liu e Dai (2021) evidenciam que ciclos de carregamentos e ciclos de exposição climática atuam sinergicamente para a degradação da rocha. Seus estudos apontam que testes cíclicos de umedecimento e secagem ou congelamento e descongelamento aceleram o decaimento das propriedades rochas, o processo de umedecimento e secagem reproduz a variação da chuva, vaporização e mudança nos níveis de água subterrânea. Devido à interação água-rocha, a pressão efetiva diminui durante o processo de umedecimento e o cimento nas rochas enfraquece durante o processo de secagem, levando à redução da resistência das rochas. Além disso, nos ciclos de congelamento e descongelamento as rochas ficam suscetíveis à pressão induzidas pelo congelamento e descongelamento da água presente em seu poros.

Dias *et al.* (2020) avalia em laboratório, ciclos combinados de lixiviação (com água na temperatura ambiente e a 70°C) seguidos de congelamento, como eficaz para o estudo de degradação de rocha ornamental em clima tropical. Os autores correlacionaram os tempos de degradação em laboratório com os tempos de envelhecimento do gnaisse no campo, observando os danos às amostras. Concluíram que a porosidade aparente aumenta com o tempo de degradação, tanto em campo quanto em laboratório. Os minerais como o quartzo e microclina, se desagregaram da superfície da rocha, influenciando na perda de massa.

A importância dos testes laboratoriais de intemperismo provocado pela cristalização de sal nas rochas é destacada por Rivas *et al.* (2010) e por Menéndez e Petráňová (2016). Os autores avaliam granitos e rochas calcárias respectivamente, e apontam que o sal é um dos agentes intempéricos mais perigosos. Os sais estão presentes em qualquer ambiente, natural ou antropogênico e sob quaisquer condições climáticas. Os sais cristalizam-se pelo processo de evaporação e passam do estado líquido para o sólido, expandindo-se internamente dentro dos poros e causando tensões internas. Devido aos diversos fatores causadores de umidade, os sais solúveis formam um ciclo de liquefação e solidificação contínua, provocando microfissuramento e a perda de coesão entre os grãos minerais, resultando na desintegração granular. A intensidade da degradação depende da natureza do sal, do material poroso, e também das condições ambientais e sua variação.

Os mecanismos de degradação devido ao intemperismo atuam da seguinte forma:

- Mudanças rápidas de temperatura ao longo do dia levam à criação de ciclos de choque térmico, mesmo que a ocorrência das mudanças de temperatura seja baixa, o repetido aquecimento e resfriamento da pedra podem levar à sua degradação. Características como o tamanho e o formato do grão, orientação dos minerais, expansão térmica e a textura são os principais fatores determinantes da taxa de degradação térmica, Yavuz (2012).
- Os ciclos de umedecimento e secagem simulam a condição de degradação provocada pelas variações sazonais de umidade e temperatura no campo. Os resultados indicados na literatura mostram que o ensaio pode ser representativo das condições de degradação no campo, Minette (1982).
- Frascá (2019) aponta que mudanças de umidade e temperatura, típicas de regiões tropicais e subtropicais corroboram principalmente com a alteração de minerais argilosos. Se comparar dois litotipos similares expostos às mesmas condições climáticas locais, o que possui o menor teor mineral de argila apresentará maior resistência à compressão uniaxial e menor absorção de água.
- O congelamento da água nos espaços dos poros gera tensões, resultantes da expansão da água durante a cristalização do gelo, induzindo ao microfissuramento da rocha (Fener e Ince, 2015; Benavente *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018).
- A poluição atmosférica e a retenção de água higroscópica podem acarretar a cristalização de sais solúveis dentro dos espaços dos poros das rochas nos edifícios e monumentos gerando tensões, que levam a degradação (Cardell *et al.*, 2003; Zalooli *et al.*, 2018; Benavente *et al.*, 2018).

A escolha de uma rocha ornamental não deve ser baseada apenas no aspecto estético. As propriedades físicas, químicas e mecânicas desempenham um papel importante na decisão da sua área de aplicação.



Um programa experimental para a caracterização tecnológica e da durabilidade da rocha ornamental deve ser planejado considerando-se o litotipo, as suas características mineralógicas e o meio exógeno, devendo-se observar que:

- Toda obra está sujeita a variações diárias e sazonais de temperatura. Tais variações térmicas são importantes fontes de tensão provocada pela cíclica expansão e contração térmica dos minerais;
- Em rochas que contêm argilas, deve-se considerar a expansão por absorção de água e a contração provocada pela sua liberação;
- Avaliar a porosidade e absorção de água são relevantes devido à capilaridade. Juntamente com a umidade, vêm os sais solúveis, precipitando reações químicas desfavoráveis à conservação dos materiais porosos;
- Bactérias e fungos produzem reações químicas que podem corroer os materiais de construção;
- Obras e monumentos que estão inseridos nos grandes centros urbanos e industriais estão mais expostos à ação da poluição atmosférica, causando a deterioração de minerais;
- Em ambientes costeiros há a presença de sais que solubilizam na água e posteriormente solidificam dentro dos poros, causando tensões internas, aumento da porosidade e a degradação.

Os ensaios de envelhecimentos acelerado em laboratório e ao ar livre atuam no diagnóstico do comportamento da rocha e na previsão da sua durabilidade. São interpretados em termos comparativos dos resultados dos testes da rocha sã com a rocha envelhecida, tentando-se estabelecer a correspondência entre os danos mensurados nos ensaios e o tempo de exposição durante a sua aplicação nas construções, evitando uma degradação prematura, sem que ocorram perdas em suas propriedades físicas e mecânicas ou mudanças estéticas durante o período de uso previsto em projeto.

### **2.1.1 Clima da Região Norte Fluminense**

As cidades de Campos dos Goytacazes e São Francisco do Itabapoana localizam-se no Norte Fluminense, no setor semi-úmido do estado. Suas sedes distanciam-se aproximadamente 38 Km uma da outra. A cidade de Campos dos Goytacazes é situada na latitude 21° 45' 15" Sul e longitude: 41° 19' 28" Oeste, com uma altitude de 13m, enquanto São Francisco de Itabapoana localiza-se na latitude 21° 18' 7" Sul e longitude 40° 57' 41" Oeste, com altitude de 8m, (CEPERJ, 2021).

As temperaturas médias, bem como o regime pluviométrico, são resultados das características combinadas de relevo e altitude com pouca influência da latitude. Na região, as características climáticas são influenciadas pela presença do Oceano Atlântico ao longo dos limites meridionais e orientais do estado, que proporciona temperaturas mais elevadas nas porções litorâneas.

O clima Predominante na área é o Tropical Seco (Aw), com moderado índice pluviométrico, apresentando altas temperaturas e pluviosidade no verão, e estação seca pronunciada no outono-inverno, com alta taxa de evaporação. A precipitação pluviométrica é de 1050 a 1250 mm anual. Os meses mais secos na região são junho, julho e agosto e os mais úmidos são novembro dezembro e janeiro, (INMET, 2020).

Em relação à precipitação, ocorrem chuvas em aproximadamente 25% dos dias. Quanto à composição química, Chrispim (2016) estudou amostras de águas de chuva captadas na UENF e na praia de Sossego, obtendo a concentração de ânions em mg/L respectivamente de 4,1 e 30,5 para Cl; 0,23 e 4,75 para NO<sub>3</sub> -N e 1,73 e 18,22 para SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. As altas concentrações dos ânions na praia de Sossego propiciam a maior acidez das chuvas nesse local, elevados valores de Cl são normalmente observados em áreas costeiras, devido à proximidade do mar.

O balanço hídrico anual é negativo, isto é, evapora mais água do que precipita, predominam valores de 150 a 300 mm de deficiência hídrica anual, podendo atingir 450 mm nas áreas mais secas. Souza *et al.* (2000) associa esta situação a atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Este sistema de alta pressão provoca uma grande estabilidade atmosférica ao longo de todo o período de outono-inverno. No período de primavera-verão a estabilidade atmosférica diminui e a umidade aumenta, incrementando também a quantidade de chuva. O sistema mais importante a provocar chuvas nesta área é a ZACAS (Zona de Convergência do

Atlântico Sul). Ela se forma originariamente devido a interação entre uma frente fria e toda a umidade proveniente da floresta Amazônica.

O Instituto Estadual do Ambiente (INEA) monitora os poluentes indicadores da qualidade do ar. Devido ao impacto ambiental e os efeitos negativos na saúde da população, são monitorados os níveis de: Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>), Partículas Inaláveis (PM<sub>10</sub>), Partículas Totais em Suspensão (PTS) e Ozônio (O<sub>3</sub>). Segundo o Instituto, os setores de atividades associados à cadeia produtiva do petróleo, gás, energia, bem como as atividades sucroalcooleiras, são os maiores poluidores da atmosfera. Além disso, destaca-se o grande crescimento previsto para os próximos anos que contará com atividades como metal-mecânica, atividades portuárias e aumento da frota de veículos automotores. Nessa região registrou-se apenas violação aos padrões de Ozônio e Partículas Inaláveis. Nos anos anteriores havia ainda a presença de Partículas Totais em Suspensão.

No verão, a temperatura média mensal encontra-se entre 31°C no litoral, 32°C na região central e 34°C no interior, e no inverno, na ordem de 14°C. As temperaturas máximas atingem 40°C no interior e mínimas de 6°C no litoral e interior. Os ventos apresentam variação ao longo do dia, com velocidades desde 34 km/h a 22km/h, Freitas (2003). A umidade se mantém alta durante todo o ano, principalmente devido a proximidade do Oceano Atlântico. Os valores das médias mensais ficam entre 74% e 85% ao longo do ano.

Os valores de pressão atmosférica variam sazonalmente de 1017 a 1009 hPa, sendo maiores no inverno do que no verão, devido ao maior aquecimento da superfície, o que gera movimentos verticais ascendentes. Os maiores valores são registrados entre maio e setembro. Esse período caracteriza uma atmosfera mais estável e temperatura amena, enquanto que no restante do ano predominam as condições de pressão baixa que, associadas às temperaturas mais altas, correspondem a condições de instabilidade, (CGE Muritubas, 2011).

A insolação medida pelo número de horas de brilho solar, é função da nebulosidade existente e também da duração do período claro dos dias ao longo do ano, mais longos no verão e mais curtos no inverno, com variação de 225 horas no verão para 148 inverno, (CGE Muritubas, 2011). Mendonça *et al.* (2020) avaliou o período entre 1998 a 2020 no município de Campos dos Goytacazes e obteve a média mensal de 224 horas para a radiação solar global.

## 2.2 – Tratamento térmico sob altas temperaturas

Durante o tratamento térmico, o efeito de altas temperaturas nas rochas vem mostrando: aumento da porosidade e permeabilidade, causado por reações químicas, alterações minerais e microfissuras; microfissuras, atribuídas a diferenças nos coeficientes de dilatação térmica dos minerais constituintes ou mesmo propagação das fissuras existentes; mudança de cor, devido à oxidação e mudanças na fase mineralógica; variações da rugosidade superficial provocada pela desagregação dos grãos de minerais devido à dilatação térmica ou o aparecimento de fissuras; variações na resistência mecânica, influenciadas pelo gradiente térmico e temperatura final, afetando sua durabilidade (Xiao *et al.*, 2014; Gautam *et al.*, 2018; Biró *et al.* 2019; Wong *et al.*, 2020).

O estudo das rochas sob altas temperaturas é relevante e tem aplicação direta em projetos de segurança contra incêndio em túneis, cavernas e edifícios, bem como no processo de restauração de monumentos e edifícios históricos danificados. Os resultados também podem corroborar para o avanço das metodologias para testar a vulnerabilidade ao fogo e risco (Freire-Lista *et al.*, 2016; Sirdesai *et al.*, 2018; Biró *et al.*, 2019, Martinho *et al.*, 2020).

Na literatura, ainda não há consenso sobre a taxa de aquecimento, a temperatura adequada para o tratamento térmico, ou o tipo de aquecimento adotado. Sabe-se que a magnitude das mudanças nas propriedades mecânicas e na microestrutura da rocha depende de fatores ligados ao tratamento térmico, como a taxa de aquecimento, a duração do aquecimento na temperatura alvo e o tipo de resfriamento (Shushakova *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2017; Sirdesai *et al.*, 2018).

Os efeitos de altas temperaturas são estudados em laboratório por quatro métodos usuais. O mais difundido é o tratamento térmico expondo as amostras ao calor no forno mufla, isso porque a sua automação permite melhor controle da temperatura, taxa de aquecimento e replicação das condições estabelecidas. Outra forma é uso do fogo real, com as chamas em contato direto com as amostras e a posterior avaliação dos danos. O uso de laser é indicado para replicar os efeitos térmicos e avaliar as reações químicas decorrentes. Em ambos os métodos, o resultado obtido pode ser fortemente influenciado pela metodologia adotada, Ban *et al.* (2019). O tratamento térmico empregando irradiação de microondas depende fortemente da mineralogia ou do teor de água da rocha. Rochas com baixo teor de

absorvedores de microondas como o granito e o arenito, aquecem lentamente e não mostram mudanças físicas fortes, enquanto rochas com melhor absorção de microondas como o basalto e rochas vulcânicas máficas, aquecem rapidamente levando a mudanças físicas significativas. A presença de água no volume poroso da rocha ou na estrutura mineralógica, como nos argilominerais, sob o efeito do microondas gera pressão de vapor e contribui para a degradação da rocha, Hartlieb *et al.* (2018).

Para o estudo de rochas aquecidas em forno mufla, em geral, o procedimento experimental é realizado de duas formas distintas, a primeira, envolvendo um aparato e condições de ensaio mais refinadas, é estabelecida uma taxa de aquecimento, a temperatura alvo é atingida e a avaliação das propriedades da rocha é realizada em tempo real, com a rocha em altas temperaturas. A segunda forma segue o aquecimento da rocha semelhante ao descrito, porém, após a rocha atingir a temperatura desejada, ocorre um resfriamento no forno, na água ou em temperatura ambiente para posterior avaliação dos parâmetros estudados.

Durante um tratamento térmico, o resfriamento ou aquecimento rápido causará danos térmicos adicionais, conseqüentemente afetando a resistência da rocha. A adoção de uma taxa de aquecimento lenta e constante evita microfissuras indesejadas (Tian *et al.*, 2016; Shushakova *et al.*, 2013; Sirdesai *et al.*, 2018).

Devido à diversidade das rochas aplicadas na construção civil e à sua mineralogia, é necessária uma investigação sistemática envolvendo várias litologias e faixas de temperaturas.

Pesquisas recentes abordaram investigações associadas aos efeitos da alta temperatura em diferentes rochas, avaliando danos térmicos e variações nas propriedades mecânicas. Zhang *et al.* (2016) investigou as propriedades físicas e mecânicas de granito e arenito após tratamento térmico entre 25 e 500°C. Seus resultados mostraram mudanças significativas nas propriedades físicas e mecânicas das rochas tratadas termicamente acima de 200°C. A mudança nas propriedades das rochas está relacionada à perda de hidroxilas das fases cristalinas e expansão mineral de quartzo, feldspato, biotita no granito e calcita, dolomita e feldspato no arenito.

Sirdesai *et al.* (2018) estudou arenito Dholpur submetido a aquecimento térmico a uma taxa de 5°C/min nas temperaturas de 200, 400, 600, 800 e 1000°C. As amostras foram mantidas na temperatura alvo por 120h e então resfriadas à

temperatura ambiente em 120h. As propriedades mecânicas aumentaram na zona de temperatura (400 – 600°C) devido ao fechamento de microfissuras e poros pré-existentes. Acima de 600°C, novas microfissuras foram criadas dentro e ao redor dos grãos minerais, causando uma queda acentuada na resistência mecânica.

Biró *et al.* (2019) realizou um estudo experimental em quatro tipos de rochas: labradorito, granito, mármore e travertino. Os corpos de prova foram expostos a temperaturas de 50, 150, 300, 500, 800°C. A duração da temperatura alvo foi de 2h. A resistência mecânica do granito diminuiu após tratamento térmico acima de 500 °C. A labradorita e o travertino se comportaram de maneira semelhante, com um percentual de redução da resistência mecânica entre o granito e o mármore. Por sua vez, o mármore apresentou a maior perda de resistência mecânica. Os resultados indicaram que travertino e labradorita são recomendados para ladrilhos e elementos estruturais comprimidos de suporte de carga.

Zhu *et al.* (2018) realizou uma revisão detalhada sobre as propriedades mecânicas do mármore com diferentes tratamentos térmicos e concluiu que em temperaturas acima de 200°C, ocorre uma diminuição da resistência mecânica e fissuração devido à expansão térmica anisotrópica.

Saiang e Miskovsky (2012) avaliaram as propriedades mecânicas de diabásio, granito e xisto quartzítico. A resistência da rocha aumentou 6% para granito e 29% para diabásio a 400°C. O comportamento mecânico dos espécimes de rocha dependeu da temperatura, mineralogia e mudanças físicas que ocorreram nessa temperatura. A 1100°C, as rochas eram altamente friáveis e desintegravam-se facilmente quando testadas mecanicamente. Devido à alteração do piroxênio, o diabásio tinha aparência física de ferro natural.

Qin *et al.* (2020) avaliou o granito em temperaturas entre 20 e 1000°C e concluiu que nas temperaturas de 400, 600 e 800°C, o material sofre transformações em suas propriedades, com queda na resistência mecânica acima de 600°C. Shang *et al.* (2019) analisaram mudanças na composição mineral, estrutura de poros e resistência mecânica do granito em temperaturas entre 25°C e 1200°C. Verificou-se que existem pequenas mudanças nas propriedades do granito abaixo de 500°C, piroxênio e quartzo sofrem transformação de fase entre 500 e 800°C, e os minerais se deterioraram drasticamente acima de 800°C.

Ao realizar uma extensa revisão da literatura, foi observado por Wong *et al.* (2020) que o tratamento térmico pode levar ao fortalecimento e/ou enfraquecimento

da rocha. Esses efeitos dependem de uma série de variáveis como a mineralogia da rocha, a temperatura, a textura, o teor de água e a presença de argilominerais.

A metodologia aplicada é descrita no item 3.2.3. Os parâmetros de teste detalhados para as referências discutidas estão resumidos na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Tratamento Térmico Relatado na Literatura**

| <b>Referências</b>           | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Tx. de aquecimento (°C/min)</b> | <b>Tempo de temperatura constante (h)</b> | <b>Materiais</b>                          | <b>UCS Rocha sã (MPa)</b> | <b>Propagação de onda (m/s)</b> |
|------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---|---|---------------------------|---------------------------------|
| Ranjith <i>et al.</i> (2012) | 25 - 950                | 5                                  | 2   | arenito                                   | 36,5                      | -                               |
| Biró <i>et al.</i> (2019)    | 50 - 800                | 10                                 | 2   | labradorita; granito; travertino; mármore | 81,3;61,5; 63,5;<br>59,1  | -                               |
| Chen <i>et al.</i> (2012)    | 20-1000                 | 10                                 | 6   | granito                                   | 85,5                      | -                               |
| Saiang e Miskovsky (2012)    | 400-1100                | 0,8 -1,5                           | 1   | diabásio; granito e xisto quartizítico    | 191; 231;<br>254; 149     | -                               |
| Yang <i>et al.</i> (2014)    | 25-900                  | 20                                 | 2   | arenito                                   | 52,6                      | -                               |
| Liu e Xu (2015)              | 100-1000                | 10                                 | 2   | granito, arenito                          | 90,4; 59,7                | 4262;2060                       |
| Yin <i>et al.</i> (2015)     | 25-850                  | 2                                  | 2   | granito                                   | -                         | ≈6600                           |
| Sun <i>et al.</i> (2016)     | 25-850                  | 30                                 | 0,5                                       | arenito                                   | -                         | ≈3100                           |
| Yao <i>et al.</i> (2016)     | 20-600                  | 10                                 | 4   | mármore                                   | ≈70                       | 5814                            |
| Fan <i>et al.</i> (2018)     | 25 - 1000               | 2,5                                | 6   | granito                                   | -                         | -                               |
| Gautam <i>et al.</i> (2018)  | 25-600                  | 10                                 | 12  | granito                                   | 68,1                      | 5492                            |
| Shen <i>et al.</i> (2018)    | (-30) - 1000            | 20                                 | 2   | calcáreo; arenito                         | -                         | 5420;3250                       |
| Shang <i>et al.</i> (2019)   | 25-1200                 | 5                                  | 2   | granito                                   | 191,9                     | 4029                            |
| Qin <i>et al.</i> (2020)     | 25-1000                 | 3                                  | 2   | granito                                   | 84,8                      | 4799                            |



### 2.3 – Avaliação da Porosidade e sua Significância na Durabilidade das Rochas

Porosidade é a razão entre o volume de vazios, e o volume total da rocha. Os poros são descontinuidades intrínsecas das rochas ou são introduzidos durante as etapas de extração, beneficiamento e uso. Segundo a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 1994) os poros podem ser classificados de acordo com a sua acessibilidade ao ambiente externo, a sua geometria e o seu diâmetro.

Quanto a sua acessibilidade aos fluidos externos, os poros são classificados em abertos e fechados, mostrados na Figura 2.2. Os fechados são aqueles totalmente isolados de outros poros, eles influenciam propriedades macroscópicas como densidade aparente, resistência mecânica e condutividade térmica, mas são inativos em processos como fluxos de fluido e adsorção de gases. Os poros abertos possuem canal de comunicação entre si e/ou com a superfície externa do sólido, quando conectados são os responsáveis pelos processos de adsorção de gases e fluxo de fluido. Alguns podem ser abertos apenas em uma extremidade, sendo descritos como cegos. A classificação geométrica os divide geralmente em poros cilíndricos, tipo funil, tipo fenda, com formato de garrafa e ocos.

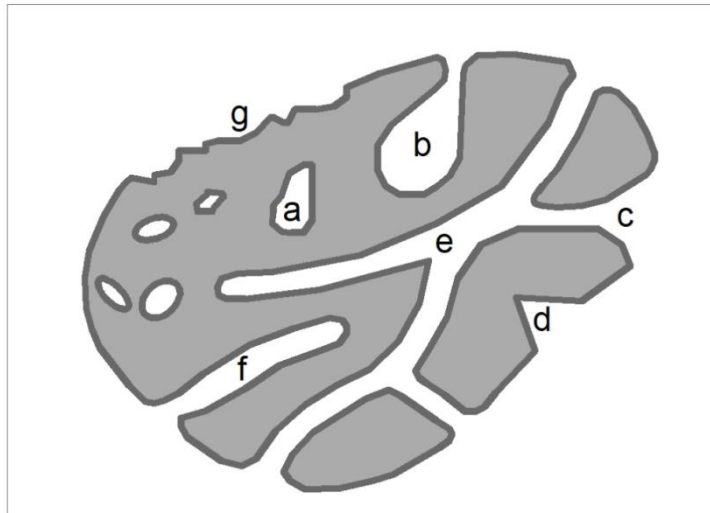


Figura 2.2 -Ilustração Esquemática da seção Transversal de um Sólido Poroso (a: poro fechado; b: poro aberto tipo garrafa, c: poro aberto, d:poro aberto tipo funil, e: poro aberto interconectado, f: poros aberto tipo fenda; g: rugosidade). Adaptado: IUPAC (1994).

Poros com diâmetros ou fendas com largura menores que 2 nm, são apresentados como microporos, diâmetros entre de 2 nm e 50 nm são classificados como mesoporos e macroporos com diâmetros acima de 50 nm (IUPAC, 1994). Em relação aos critérios de classificação do tamanho dos poros, observa-se na

literatura diversas classificações, de acordo com diferentes métodos e propósitos de pesquisa, a Figura 2.3 apresenta algumas dessas classificações. Nas discussões dos resultados deste trabalho serão usadas as faixas de diâmetros empregadas por Shang *et al.* (2019), que demonstram uma maior divisão entre as classificações.

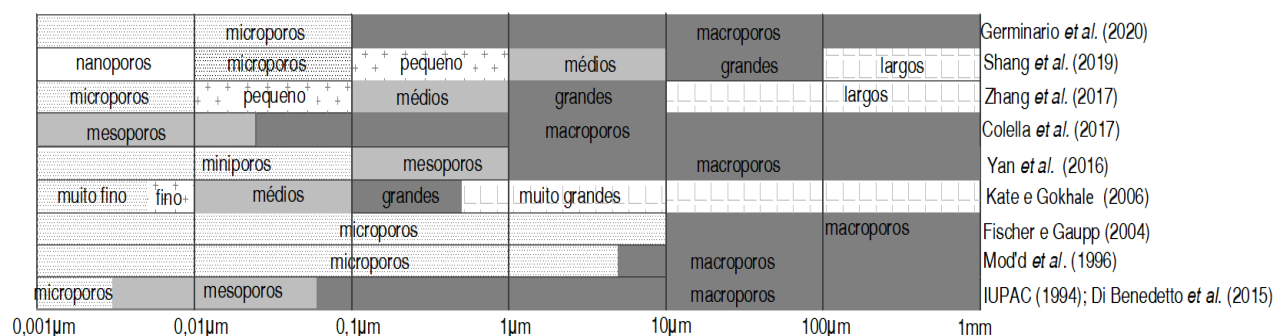


Figura 2.3 -Classificação do Diâmetro dos Poros. Fonte: Autora

Os fatores que determinam a maior ou menor porosidade de uma rocha são: o tipo de rocha, o seu estado de fraturação e alterações posteriores. As rochas intrusivas possuem menor porosidade do que as extrusivas vistas se consolidarem a pressões mais elevadas. As rochas metamórficas têm em geral baixa porosidade, variando com o grau de metamorfismo, sendo mais baixa nas rochas de elevado grau metamórfico.

A distribuição do tamanho dos poros é um dos fatores-chave para a determinação da durabilidade da rocha (Benavente *et al.* 2004; Török *et al.* 2007; ). Yu e Oguchi (2010) consideram a distribuição do tamanho dos poros e a sua interconexão como principais fatores de controle da absorção e transporte de líquido no seu interior. Considerando a infiltração de líquido, observaram que quando o tamanho do poro é menor que 1 µm, o líquido não pode infiltrar-se nele; quando mede entre 1 e 10 µm, o líquido pode infiltrar-se sob pressão externa, mas a permeabilidade é baixa; para diâmetros entre 10 e 100 µm, a água pode infiltrar-se por ele em condições naturais. Winkler (1997) destaca que o movimento da água é impulsionado principalmente por forças capilares quando o tamanho do poro está no intervalo de 0,1 e 2500 µm.

Yu e Oguchi (2010), avaliaram que a microporosidade é associada a danos de cristalização de sal. A pressão de cristalização é menor em poros maiores e acarreta maiores tensões em poros capilares menores ou pela combinação de ação do sal e do gelo ( Török *et al.*, 2007; Benavente *et al.*, 2004; Benavente *et al.*, 2007). Larsen

e Cady (1969) afirmaram que o tamanho crítico do poro é de 5  $\mu\text{m}$ , medidas inferiores não permite que a água seja drenada naturalmente, tornando a rocha suscetível ao congelamento e danos por causa da cristalização de sal, além disso, poluentes atmosféricos depositam-se nos poros, contribuindo para a degradação da rocha.

Zhao *et al.* (2012) destacam que a permeabilidade e a retenção de umidade nas rochas dos edifícios são alguns dos problemas comuns, muitas vezes induzindo danos estruturais a prédios e monumentos históricos e resultando em crescimento microbiano prejudicial a saúde humana.

A presença de umidade nos poros das rochas que apresentam argilominerais em sua composição pode ser considerada um dos fatores mais importantes que afetam a sua deterioração e durabilidade, isso devido a alteração química e pela expansão dos minerais sob determinada umidade relativa. As tensões geradas pelo movimento da água e do ar nos poros e os minerais de argila dilatados podem levar à rápida desintegração, especialmente durante os processos cíclicos, Germinario *et al.* (2017).

Existem diversas técnicas de caracterização de porosidade. Alguns métodos só conseguem acessar poros abertos, outros ambos os poros abertos e fechados. Assim, o valor de porosidade depende do material e do método utilizado para sua determinação.

Algumas técnicas utilizadas na caracterização de porosidade são porosimetria por intrusão de mercúrio ou absorção de gás, absorção de água, picnometria de hélio, análise de imagem por microscopia eletrônica de varredura, microtomografia de raios x, ressonância magnética nuclear de baixo campo e medição de velocidade ultrassônica. Uma breve descrição de cada um desses métodos, com suas vantagens e limitações, estão listadas a seguir:

- Porosimetria de mercúrio ou absorção de gás: É uma técnica simples. Detecta porosidade aberta com precisão, porém, fornece valores menores de porosidade total por não medir porosidade fechada. O método permite avaliar o diâmetro dos poros e a intrusão total;
- Absorção de água: É uma técnica barata e simples. Porém, não fornece resultados muito confiáveis, isso porque as condições em que se realizam as medidas podem não ser adequadas para permitir que a água preencha as cavidades. Além disso, apenas a porosidade efetiva (aberta) é determinada;

- Picnometria de hélio: Uma vez conhecida a densidade dos materiais, pode-se determinar porosidade aberta e fechada por esta técnica, mas sem distinguí-los. Além disso, não se pode medir diâmetro ou tamanho dos poros;
- Análise de imagem por microscopia eletrônica de varredura (MEV): Pode ser utilizada para diferenciar, através do processamento de imagens, porosidade fechada ou aberta. No MEV, a imagem é formada através de um feixe de elétrons que é usado para varrer a amostra previamente preparada para análise. O processamento da imagem utiliza softwares específicos para extrair informações quantitativas sobre área, volume e diâmetro dos poros a partir de imagens binárias. A técnica permite a determinação da distribuição do tamanho e da morfologia dos poros, porém os resultados são limitados pela resolução espacial da imagem.
- Microtomografia de raios x: Não requer uma preparação prévia das amostras. Permite o estudo de seções transversais não destrutivas e de modelos tridimensionais, possibilitando a visualização e quantificação de partes específicas da estrutura interna do material. O tamanho da amostra influencia na resolução adquirida pela possibilidade de aproximação da fonte de raios x em relação à amostra, além da escolha da resolução da câmera. O processo de reconstrução da imagem é realizado por softwares específicos, onde as fatias transversais da amostra são unidas para produção da imagem tridimensional, o pixel é transformado matematicamente em voxel, capaz de representar a profundidade na imagem radiológica captada, permitindo o estudo da porosidade fechada, aberta e microfaturas.
- Ressonância magnética nuclear de baixo campo: é uma técnica não-destrutiva, que necessita de pouco ou nenhum preparo da amostra, consiste na resposta dos núcleos atômicos de certos elementos quando submetidos à ação de um campo magnético externo. As ferramentas de ressonância magnética se caracterizam pelas medidas serem independentes da litologia e influenciadas essencialmente pelos fluidos presentes nos poros. Os resultados para a estimativa da porosidade, distribuição de tamanhos de poros, saturação de fluidos e permeabilidade são obtidos a partir do uso da Transformada inversa de Laplace, e da associação de uma série de funções exponenciais comumente utilizadas para caracterização de reservatórios em rochas siliciclásticas.

- Medição de velocidade ultrassônica: este método é baseado no princípio de que a velocidade de propagação de uma onda depende somente das propriedades do material, sendo assim, a medição desta velocidade permite uma avaliação das condições do material testado, mas não permite quantificar a porosidade e diâmetro dos poros.

Avaliar a porosidade, a absorção de água e a densidade são relevantes devido à capilaridade. Para Benavente *et al.* (2004), um material poroso que absorve grande quantidade de água é mais suscetível à decomposição porque facilita diferentes mecanismos de decomposição. Assim, valores elevados de absorção e saturação levam a níveis mais baixos de durabilidade da rocha. Com base em estimadores de estrutura de poros, o autor conclui que a durabilidade de uma rocha com poros grandes deve ser maior do que uma pedra com poros pequenos. Quanto menor os poros abertos da rocha, maior a tensão gerada pela cristalização dos sais e ainda maior é a capacidade de sucção de água, gerando um caminho para os sais solúveis.

## **2.4 – Caracterização Tecnológica das Rochas**

A determinação das propriedades das rochas é realizada por meio de ensaios e análises, cujo principal objetivo é a obtenção de parâmetros petrográficos, químicos, físicos e mecânicos do material, que fornece informações sobre a alterabilidade, o uso mais adequado da rocha e a durabilidade. Para a caracterização tecnológica das rochas ornamentais, são utilizados diversos testes, para a certificação de que o material pétreo atenda aos requisitos mínimos das normas ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) e a ASTM C615 (2018) apresentando durabilidade a longo prazo em diferentes ambientes em termos de resistência mecânica e resistência a condições agressivas.

Frasca (2019) aponta que todas as propriedades das rochas, principalmente a porosidade e resistência mecânica, estão relacionadas às suas características petrográficas, que por sua vez estão intrinsecamente relacionadas ao cenário geológico e ações do intemperismo.

### **2.4.1 Microestrutura da Rocha**

A análise petrográfica permite descrever a rocha de forma macroscópica (estruturação, cor) e microscópica (mineralogia, textura, granulação), dando destaque aquelas características que influenciam o comportamento mecânico e a durabilidade da rocha sob as condições de uso a que será submetida, tais como deformação, alteração, padrão de microfissuramento e deteriorações.

Segundo Graue *et al.* (2011), a análise petrográfica de uma rocha ornamental estabelece a classificação petrográfica e põe em evidência uma série de características, tais como existência de poros, alteração, deformação, discontinuidades, fissuras e outros que influenciam no comportamento mecânico e durabilidade sob as condições de uso a que será submetida. Heidari *et al.* (2017) ao estudar o envelhecimento de rochas destaca que os parâmetros petrográficos desempenham um papel importante no controle do potencial de intemperismo. Rochas com petrografias diferentes mostram graus distintos de intemperismo, mesmo sob condições climáticas semelhantes.

A densidade aparente e a absorção de água são obtidas a partir do mesmo ensaio e em ambos existe uma relação inversa. Para um mesmo tipo de rocha, quanto maior a densidade aparente, menor é a porosidade e menor será o coeficiente de absorção, Chiodi e Rodrigues (2009). As propriedades de densidade, porosidade e absorção, fornecem indicação de fissuras, poros e vazios, sendo fatores determinantes para a resistência e durabilidade na avaliação comparativa de um conjunto de rochas, Winkler (1997).

O grau de alterabilidade, a cor, a dureza e a densidade o estão diretamente ligadas aos minerais constituintes da rocha, a granulação e aos seus padrões texturais. A mineralogia, o tamanho do grão e a porosidade são as propriedades intrínsecas que controlam a resistência da rocha. As rochas que contêm quartzo como material de ligação são as mais fortes, seguidas pela calcita, minerais ferrosos; as rochas com material de ligação argiloso são as mais fracas. Em geral, quanto maior o teor de quartzo, maior é a resistência .

Utilizando a técnica de análise de imagens digitais é possível determinar a porosidade, intervalos e morfologias dos poros. No entanto, essa técnica tem certas limitações ao distinguir entre partes sólidas (ou seja, grãos minerais) e espaços vazios, e ao escolher a ampliação de imagem mais adequada, pois certas

ampliações revelam apenas determinados tamanhos de poros, Gibeaux *et al.* (2018). Os métodos de ensaios para avaliação da porosidade foram apresentados neste Capítulo, no item 2.3.

As limitações instrumentais de técnicas de imagens para avaliação de materiais pétreos são discutidas por Molina *et al.* (2011). Foi observado que o uso isolado de uma técnica de análise, leva a resultados incompletos. Por outro lado, o uso combinado de técnicas analíticas complementares baseadas tanto na observação direta do sistema poroso por meio de microscopia ótica e eletrônica acoplada à análise de imagem digital, e na medição indireta do sistema poroso usando testes hídricos, porosimetria de intrusão de mercúrio e absorção de nitrogênio, pode melhorar significativamente o conhecimento neste campo de pesquisa. Neste sentido, o ideal é avaliar a textura e a microtextura das pedras, a morfologia e o tamanho dos poros, a existência e distribuição de fissuras por meio de microscopia ótica e microscopia eletrônica. Embora a microscopia ótica seja técnica recomendada na literatura para estudar os poros maiores que 1mm, o estudo dos diâmetros podem ser estendidos até 0,1  $\mu\text{m}$ , com o uso do microscópio eletrônico de varredura.

Ao se aumentar ou diminuir a temperatura de uma rocha, ocorre à variação do seu comprimento, caracterizada pelo coeficiente de dilatação térmica linear. Ensaio de dilatométrica são indicados para verificar a variação de comprimento ocorrida em um determinado intervalo de temperatura correspondente. Zhu *et al.* (2018) aponta a expansão térmica como um fator de falhas devido ao surgimento de microfissuras e um parâmetro significativo para prever e avaliar o dano térmico e o desempenho de segurança de materiais devido a mudança de temperatura. Ševčil *et al.* (2018), recomenda a dilatométrica para o monitoramento das transformações dimensionais, em função da mudança na estrutura da amostra devido a transformações de fase e mudança na estrutura cristalina decorrentes de ciclos térmicos e variação de temperatura.

As rochas usadas em revestimentos de pisos e fachadas expostas à insolação estão sujeitas a patologias decorrentes da dilatação. O conhecimento da dilatação térmica permite definir o espaçamento mínimo recomendável entre as chapas de um revestimento, de forma a se evitar o seu contato, compressão lateral e imbricamento. Em revestimentos de pisos e fachadas fixados com argamassas, o rejuntamento entre as peças com materiais ligantes preenche o espaço vazio que

acomodaria a dilatação. Nestes casos há a ação do coeficiente de dilatação rocha, da argamassa e do rejunte, que pode culminar com o deslocamento da rocha.

A determinação da velocidade de propagação de onda permite que as propriedades físicas e mecânicas sejam indiretamente avaliadas, de forma não destrutiva. De acordo com Cerrillo *et al.* (2004) a avaliação ultrassônica permite que o estado das rochas seja determinado de forma rápida e econômica, atendendo às demandas dos atuais produtores de rochas ornamentais, como sustentabilidade ambiental, durabilidade e segurança de uso. O autor indica o uso de correlações estatísticas entre os parâmetros de ultrassom das rochas e as propriedades físicas e mecânicas obtidas em ensaios destrutivos.

Os testes de propagação da onda em materiais rochosos não dependem apenas das propriedades físicas como densidade, porosidade e conteúdo de água, mas também do arranjo textural, distribuições espaciais e orientações preferidas. A velocidade de propagação da onda pode refletir o estado de conservação, comparando dados da rocha sã com aqueles obtidos em ensaios feitos em material deteriorado.

Os testes realizados por Cerrillo *et al.* (2014) mostraram que a velocidade do pulso ultrassônico diminui à medida que a deterioração da rocha aumenta com o envelhecimento acelerado, evidenciando uma forte correlação entre a velocidade da onda P e a porosidade, confirmando que a velocidade do pulso ultrassônico é um bom indicador de danos para pedras carbonáticas, particularmente para variedades sem anisotropias claras, em termos de estrutura e textura.

Chen *et al.* (2019) ao avaliar a perda de resistência de rochas após ciclos de saturação e secagem enfatiza que os principais métodos para examinar danos a microestrutura de rochas são a microscopia eletrônica de varredura, a tomografia ou microtomografia computadorizada e a ressonância magnética nuclear. Para Fais *et al.* (2019), a interação entre os métodos permite uma melhor avaliação da microestrutura, com boa resolução para a avaliação de microfraturas, fissuras e porosidade, abrangendo diâmetros desde micro até macroporos.

Yang e Huang (2017) conduziram uma série de observações com tomografia computadorizada de raios x para analisar o mecanismo de dano interno em granitos. Imagens reconstruídas em 3-D indicaram danos devido aos efeitos da pressão de confinamento e fissuras no granito, confirmando a viabilidade da aplicação da técnica para o estudo proposto e avaliação da microestrutura.



Os resultados das observações obtidos por microtomografia computadorizada de raios x são imagens bidimensionais, que só podem ser utilizadas para analisar a estrutura sólida ou a morfologia de fissura e poros em um plano de camada única. No entanto, Yang *et al.* (2018) afirma que é possível analisar as características espaciais de fissuras e danos realizando a reconstrução tridimensional usando softwares de processamento de imagens, com base em uma série de imagens de seções transversais bidimensionais. A reconstrução tridimensional permite a avaliação da microestrutura sólida e porosa da amostra estudada com alta resolução.

#### **2.4.2 Avaliação das Propriedades Mecânicas**

A resistência da rocha é um parâmetro essencial na determinação de sua durabilidade e pode ser caracterizada macroscopicamente a partir dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, à flexão, resistência ao impacto, esclerometria, entre outros.

O ensaio de resistência à compressão uniaxial é usado para determinar o valor máximo de tensão obtida antes da falha do material. Este ensaio frequentemente solicitado para a avaliação das resistências dos materiais sobre os quais vão atuar forças verticais (Benavente *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2019).

Segundo Vidal *et al.* (1999), a resistência na direção perpendicular à estrutura da rocha é, em geral, maior que na direção paralela e maior ainda que na direção inclinada. Para um mesmo tipo petrográfico a resistência à compressão será maior para aquelas amostras de granulação menor, rochas que apresentam altas resistências à compressão mostram, em geral, valores adequados de outras propriedades, tais como baixa porosidade, alta resistência à flexão.

Ao avaliar dois tipos de granitos após ciclos de saturação e secagem, Chen *et al.* (2019) registram que a deformação e ruptura da rocha são causadas por danos à sua estrutura interna, que podem ser caracterizados por uma mudança na energia. O processo de ruptura da rocha é composto de entrada de energia, acúmulo de energia de deformação elástica e dissipação de energia. Para Xie *et al.* (2004), a dissipação da energia da rocha se manifesta principalmente no

desenvolvimento e expansão de fraturas internas, e a liberação de energia é a causa essencial da ruptura repentina da rocha.

A resistência ao impacto é a propriedade que reflete a coesão e indica a maior ou menor capacidade do revestimento suportar uma ação mecânica instantânea. O valor da energia liberada pelo impacto de um corpo que provoque a ruptura de uma placa é importante para subsidiar o dimensionamento, tanto de pisos como de partes baixas de um revestimento vertical. As propriedades petrográficas que influenciam no controle da resistência ao impacto das rochas são a natureza composicional, os aspectos texturais e estruturais como anisotropia, dimensões e imbricamento mineral, microfissuramento e grau de alteração mineral.

As rochas anisotrópicas apresentam planos de fraqueza dados pela orientação mineral, foliação metamórfica, bandamento composicional e dobramento estrutural, tornando-as menos resistentes às solicitações de impacto, Vidal *et al.* (1999).

Em relação à textura, Pazetto e Artur (2015) alertam que materiais de granulação mais grossa e com texturas megaporfíricas tendem a apresentar maior grau microfissural e imbricamento mineral menos coeso, o que também diminui a resistência da rocha. O mesmo pode ser dito de materiais que apresentam grau de alteração mineral considerável, uma vez que os cristais deteriorados são conseqüentemente mais porosos e friáveis, exercendo assim influência direta na fragilização, perda de coesão e resistência ao impacto da rocha.

O uso de correlações entre os ensaios de resistência mecânica e outros testes são discutidos por Afolagboye *et al.* (2017). Eles verificaram que a análise conduzida em diferentes grupos de rocha com as mesmas características litológicas mostraram coeficientes de correlação mais forte do que quando variados litotipos foram agrupados. Nicholson e Nicholson (2000) conclui que rochas com alta resistência à compressão, módulo de Young ou velocidades de propagação de ondas ultrassônicas tendem a ter uma durabilidade mais longa.

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo são apresentadas as características geológicas fluminense, o embasamento rochoso, as rochas ornamentais de origem metamórficas, objeto deste estudo com a suas características texturais, a metodologia e os ensaios usados para determinar as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas e durabilidade das rochas ornamentais.

Para facilitar o entendimento do leitor, as rochas comerciais são referidas pelo nome técnico, sendo:

- Nome comercial: granito *yellow desert* / nome técnico: granada gnaissé álcali granítico, referido neste trabalho como gnaissé granítico (Gg);
- Nome comercial: mármore branco/ nome técnico: mármore calcítico, referido como (Mc);
- Nome comercial: pedra madeira verde / nome técnico: gnaissé milonítico, referido como (Gm).

### 3.1 – Rochas Estudadas

O embasamento cristalino da região sudeste brasileira é parte de um importante cinturão orogênico que se estende paralelamente ao litoral, denominado de Faixa Ribeira. Essa faixa apresenta distintos domínios tectônicos, mostrados na Figura 3.1.

A evolução geológica do estado do Rio de Janeiro é formada por eventos tectônicos que envolvem abertura e fechamento de bacias em terrenos com embasamento paleo-proterozóico, acumulação de sedimentos com geração de sequencias metassedimentares, granitogênese, e magmatismo alcalino acarretando em unidades geológicas formadas por rochas ígneas, sedimentares e metamórficas de diferentes granulometrias, deformação, e cores que variam entre amarelas, verdes, pretas e cinzas decorrentes do processo de intemperismo. As rochas metamórficas representam mais de 80% do seu território, CPRM (2001).

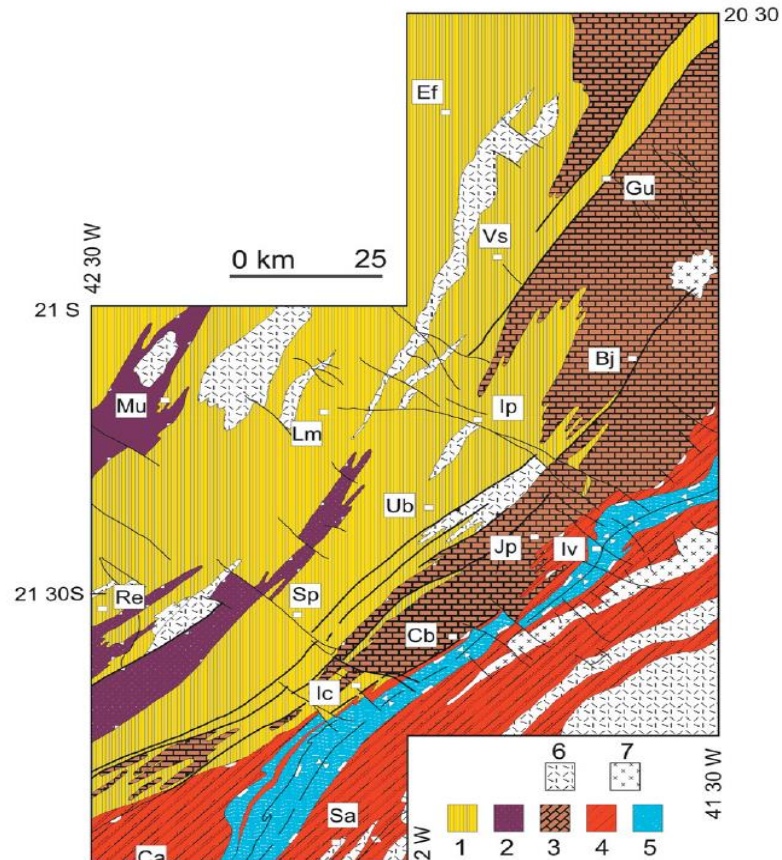


Figura 3.1 -Domínios tectônicos da Faixa Ribeira Setentrional. Fonte: Tupinambá *et al.* 2007  
 Legenda: 1 – Domínio Juiz de Fora; 2 – Klippe Paraíba do Sul; 3 – Domínio Costeiro; 4 – Domínio Cambuci; 5 – Klippe de Italva; 6 e 7 - Rochas plutônicas gnaissificadas. Cidades mencionadas: Cantagalo (Ca); São Sebastião do Alto (Sa); Itaocara (Ic); Cambuci (Cb); Santo Antônio de Pádua (Sp); Recreio (Re); Italva (Iv); São João do Paraíso (Jp); São José de Ubá (Ub); Laje do Muriaé (Lm); Muriaé (Mu); Itaperuna (Ip); Bom Jesus do Itabapoana (Bj); Varre-Sai (Vs); Guaçuí (Gu); Espera Feliz(Ef).

A diversidade dos padrões litológicos propicia a exploração de rochas, principalmente na região Noroeste do Estado, destacando-se os municípios de Santo Antônio de Pádua, Itaperuna e Italva, conforme mostrado na Figura 3.2.

Na primeira metade do século XX, as regiões de Cantagalo e de Italva eram os principais fornecedores estaduais de rochas ornamentais empregadas nas fachadas dos edifícios do período. Frascá *et al.* (2020) destacam que na época da construção de Brasília, foi adotado o mármore branco Italva como revestimento nos palácios e nos monumentos da capital. Lima (2019) avalia a fachada do edifício do Congresso Nacional, com mármore branco Italva revestindo às empenas das torres de 29 andares, e aponta que a orientação solar é um fator decisivo para a degradação no sistema, onde a empena Noroeste apresentou maior criticidade de danos em comparação à Sudeste e mostra a necessidade de ações planejadas de monitoramento, estudos de durabilidade da rocha e a elaboração de um plano de

conservação. Tamanho é o valor arquitetônico, que o Conjunto Urbanístico de Brasília foi tombado nos âmbitos distrital, federal e considerado Patrimônio Cultural da Humanidade pela Unesco.

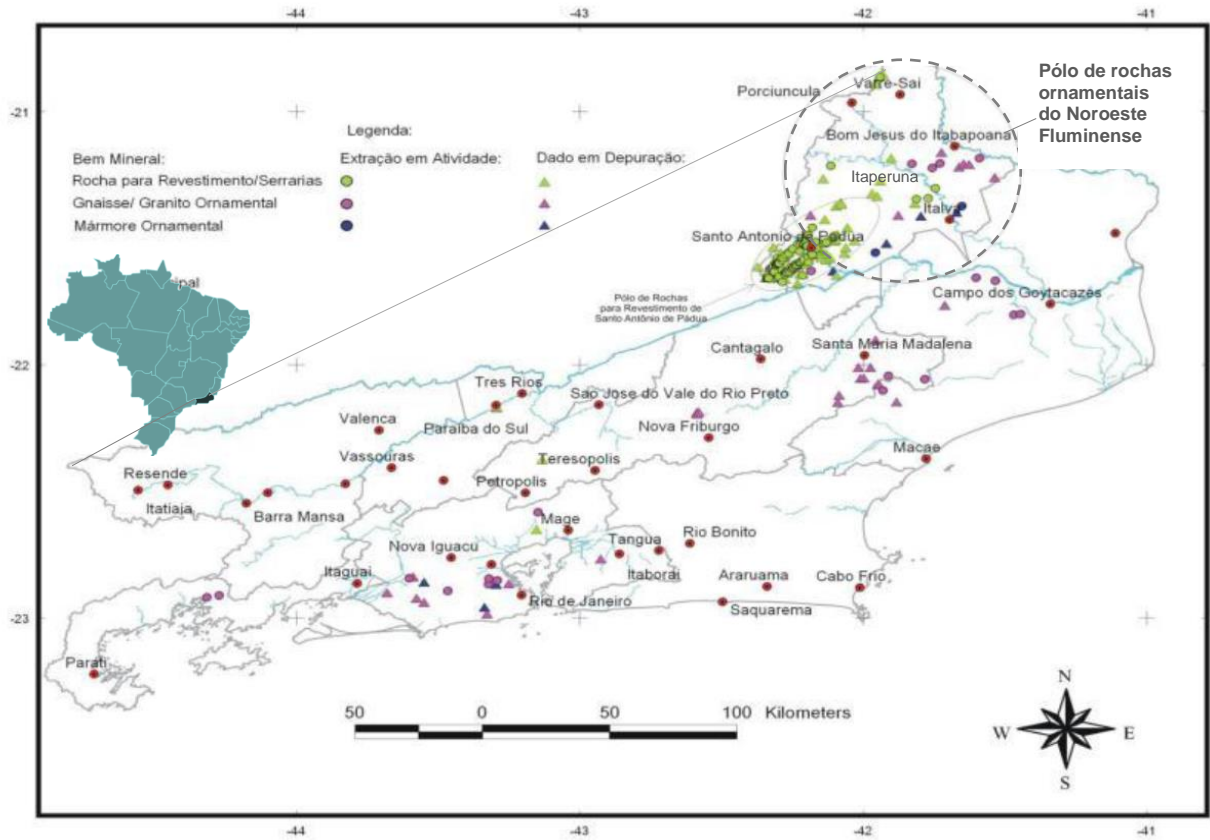


Figura 3.2 -Exploração de Rochas Ornamentais no Estado do Rio de Janeiro. Fonte: DRM (2018).

Em Itaperuna o embasamento é formado por um conjunto muito heterogêneo de granulitos gnaissificados de origem ígnea, denominado Complexo Juiz de Fora. Duarte et al. (2012) descrevem três diferentes conjuntos: ortogranulitos básicos, em geral máficos e, subordinadamente, ultramáficos; ortogranulitos enderbíticos a charnockíticos de cor verde-cana e granulação fina a média; e ortogranulitos charnockíticos de cor bege-caramelo e granulação média a grossa. A mineralogia principal compreende ortopiroxênio, clinopiroxênio, plagioclásio, feldspato potássico, quartzo, hornblenda e biotita em proporções variadas, além de zircão, allanita e minerais opacos, incluindo sulfetos, como acessórios.

Italva é caracterizada pela presença de anfibólitos e rochas metassedimentares, que indicam ter havido um grande depósito de sedimentos carbonáticos associado a um ambiente marinho na região. Duarte *et al.* (2012)

aponta afloramentos de mármore calcítico ou dolomítico em cristas em topos de morros e blocos. Comumente tem cores claras, branca a cinza claro, mas, localmente desenvolve outras tonalidades, também claras, como rosa, laranja, azul e verde. Os mármore dolomíticos apresentam-se maciços, microcristalinos e de aspecto leitoso. Os mármore calcítico possuem granulação grossa, com cristais centimétricos e euédricos de calcita de brilho vítreo. Os minerais constituintes são: calcita, dolomita, diopsídio, tremolita, flogopita, olivina, pirita e grafita. A serpentina e a clorita ocorrem como fases secundárias.

O Município de Santo Antônio de Pádua apresenta uma quantidade significativa de pedreiras, serrarias e expressiva variedade litológica. Segundo Silva (2001), nessa região destacam-se os anfibólitos granitóides miloníticos a ultramiloníticos, com texturas granoblásticas, blastomiloníticas, atualmente designados Pedra Miracema e o Granito Itajara, sendo suas diversas fácies comercialmente conhecidas como Olho de Pombo, Pedra Madeira, Ouro Velho e Pedra Preta, composta por uma matriz de quartzo, microclina, plagioclásio, hornblenda e biotita. As rochas ocorrem na forma de estreitas cristas com comprimento de até 45 km e menos de 100 m de largura, em zonas de cisalhamento transcorrente que cortam o Complexo Paraíba do Sul. A textura ultramilonítica, totalmente recrystalizada sob a forma de agregados poligonais com tamanho de grão milimétrico, indica recrystalização em níveis crustais profundos.

As rochas apresentadas nesse trabalho, oriundas do Noroeste Fluminense são mostradas na Figura 3.3, sendo o granada gnaiss alcali granítico comercialmente denominado granito *yellow desert* extraído na cidade de Itaperuna; o gnaiss milonítico conhecido como pedra madeira verde, com lavra na cidade de Santo Antônio de Pádua e o mármore calcítico, conhecido como mármore branco, em Italva.



Figura 3.3 -Rochas Estudadas. Fonte: Autora.

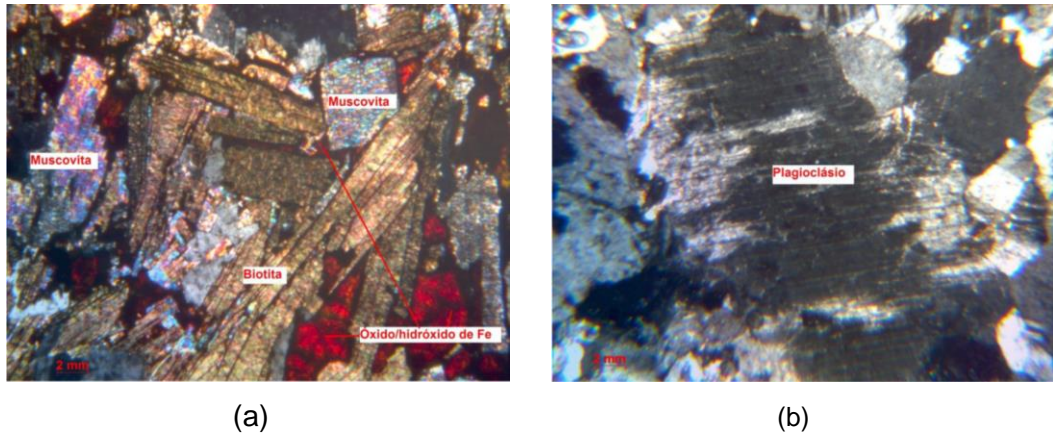
### 3.1.1 Gnaiss Granítico

A análise petrográfica revela que a rocha trata-se de uma granada gnaiss álcali granítico, de coloração amarelada, estrutura bandada contínua e de gênese metamórfica. A rocha é composta por feldspato potássico, quartzo, biotita, granada e muscovita, apresentando-se de forma inequigranular xenomórfica, mostrando dois domínios distintos de tamanhos de grãos: cristais maiores de quartzo fitado, que atinge 7mm, e cristais menores de microclina, plagioclásio, granada, quartzo e biotita que formam uma matriz fina com evidência de recristalização dada por contatos retos e lobados e grãos poligonais.

O gnaiss granítico apresenta granulação variando de fina a média, alto grau de microfissuramento, exibindo microfissuras intra e intercristalinas preenchidas por óxido/hidróxido de ferro ou argilominerais e intracristalinas sem preenchimento. O grau de alteração também é alto, sendo observados processos de sericitização de feldspatos e muscovitização de biotitas. As superfícies de contato variam de planar a irregular.

A rocha é composta essencialmente por microclina, ortoclásio, quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita e granada, como material de alteração têm-se sericita, argilominerais e óxido/hidróxido de ferro. Os cristais de microclina são xenoblásticos (sem faces definidas), exibem macla Tartan (em xadrez), superfícies de contato irregular entre os grãos, microfissuras intra e transgranulares preenchidas por argilominerais ou óxido/hidróxido de ferro (Figura 3.4 a) e por vezes encontram-se em processos iniciais de sericitização.

Os cristais de plagioclásio ocorrem em grande parte como pseudomorfos sericitizados e em alguns cristais o processo se inicia das bordas para o centro (Figura 3.4 b), são xenoblásticos, exibem macla polissintética, superfícies de contato irregular entre os grãos e microfissuras intercristalinas preenchidas.



(a) (b)  
 Figura 3.4 -Fotomicrografias da Granada Gnaiss (granito). Fonte: Autora

a) biotita em processo de muscovitização b) plagioclásio sericitizados; polarizadores cruzados.

Os cristais de biotita são hipidioblásticos, exibem superfícies de contato planar entre os grãos e encontram-se em processo avançado de alteração por muscovitização, gerando cristais de muscovita e óxido/hidróxido de ferro (Figura 3.4 a), esse último ocorre impregnado nos planos de clivagem do mineral e/ou preenchendo microfissuras.

Os cristais de ortoclásio são xenoblásticos, exibem superfícies de contato irregular entre os grãos, microfissuras intra e intercristalinas preenchidas por óxido/hidróxido de ferro e encontram-se em processos sericitização, iniciando das bordas para o centro do cristal. Os cristais de quartzo são xenoblásticos, exibem extinção ondulante, em sua maior parte estão dispostos sob forma de fitas, possuem microfissuras intracristalinas abertas sem preenchimento e intercristalinas preenchidas por óxido/hidróxido de ferro ou argilominerais.

Os cristais de muscovita são hipidioblásticos, exibem superfícies de contato planar entre os grãos, ocorrem substituindo cristais de biotita e por vezes encontram-se com bordas de alteração para argilominerais. Os cristais de granada são idioblásticos, exibem superfícies de contato curvilíneas entre os grãos, microfissuras intra e intercristalinas sem preenchimento e/ou preenchidas por óxido/hidróxido de ferro e inclusões de quartzo.

### 3.1.2. Mármore Calcítico

Para Peixoto e Heilbron (2010), o mármore do Domínio Italva teria evoluído em um ambiente geotectônico de bacia retro-arco, em estágios iniciais da subducção.



As condições metamórficas apresentam temperaturas entre 697°C e 720°C sendo esta última à temperatura do pico metamórfico.

Os mármore da região possuem uma diversidade de coloração, podendo ser na cor branca, amarelada, cinza azulada de aspecto leitoso e azul, com composição mineralógica variada. Apresentam dolomita, quartzo e diopsídio granulares, tremolita, mica e zircão. A granulometria varia de média a muito grossa com cristais de carbonatos romboédricos bem desenvolvidos. A textura granular dos mármore dificulta a observação de anisotropia. Esta é expressiva quando há níveis ricos em grafita ou em quartzo bem orientados marcando uma foliação penetrativa, Peixoto e Heilbron (2010).

A análise petrográfica do mármore branco indica mármore calcíticos, de gênese metamórfica, com estrutura maciça e quanto ao grau de visibilidade dos grãos a olho nu, é granoblástica. A rocha é composta basicamente por calcita e diopsídio (Figura 3.5). Os cristais são de cor branca, possuem granulação variando de fina (< 1 mm) a média (1 a 2 mm), brilho vítreo, hábito prismático e são anédricos (sem faces definidas) a subédricos (algumas faces bem desenvolvidas) quanto ao grau de perfeição dos grãos.

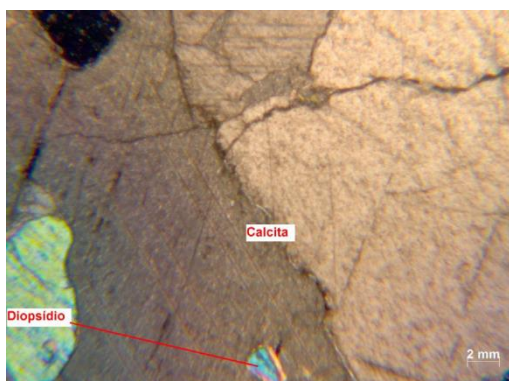


Figura 3.5 - Fotomicrografias do Mármore Branco. Fonte: Autora

Os cristais de calcita são xenoblásticos (sem faces definidas), exibem maclas, superfícies de contato irregular entre os grãos e microfissuras intra e transgranulares sem preenchimento. Os cristais de diopsídio são hipidioblásticos (algumas faces bem desenvolvidas) a xenoblásticos, possuem hábito granular, microfissuras intra e intergranulares sem preenchimento, exibem superfícies de contato planar e curvilínea e observam-se processos de alteração para argilominerais.

### 3.1.3. Gnaiss Milonítico

Litologicamente Santo Antônio de Pádua-RJ é constituído por gnaisses, quartzitos e granulitos, que pertence ao Complexo Charnockítico. A rocha milonitizada ocorre em duas serras, a do Bonfim e a do Catete. Na Serra do Bonfim são exploradas principalmente rochas milonitizadas de cor cinza, conhecidas como Pedra Miracema.

As rochas exploradas na Serra do Catete também são miloníticas, comercialmente conhecidas como Pedra Madeira e encontradas nas seguintes variedades: Pedra Madeira Branca, Pedra Madeira Amarela e Pedra Madeira Rosa e a Pedra Madeira Verde.

O protólito de pedra Madeira Verde é uma rocha ígnea de composição granítica, apresentando um estrato composicional marcado por faixas brancas, com maior quantidade de plagioclásio em relação ao feldspato potássico.

A petrografia aponta que a rocha é um gnaiss milonitizado, caracterizado por cristais fitados (*ribbon*) de quartzo (Figura 3.6) e minerais opacos maiores orientados paralelamente aos ribbons, com rara ocorrência de porfiroclasto de K-feldspato e de anfibólio. A rocha é composta por plagioclásio, quartzo, piroxênio (aegirina-augita), ortoclásio, magnetita e opacos, como material de alteração possui hornblenda, carbonato e sericita, e como mineral acessório, zircão. Estes minerais estão inseridos em meio a uma matriz recristalizada.

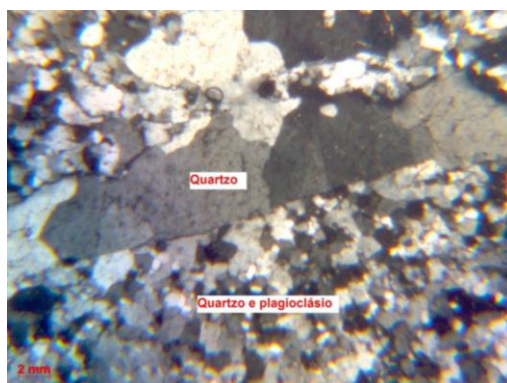


Figura 3.6 -Fotomicrografias do Gnaiss Milonitizado (Pedra Madeira). Fonte: Autora

Os cristais de plagioclásio possuem coloração rosada e amarelada, são anédricos quanto ao grau de perfeição dos grãos, possuem granulação fina (< 1 mm), hábito prismático e brilho nacarado. Os cristais de quartzo são incolores

possuem brilho vítreo, hábito prismático, granulação variando de fina (< 1 mm) a média (1,5 mm) e são anédricos quanto ao grau de perfeição dos grãos. Os cristais de piroxênio e/ou anfibólio são de cor preta, possuem brilho vítreo a resinoso, hábito prismático, granulação fina (< 1mm) e são anédricos quanto ao grau de perfeição dos grãos. Os cristais de magnetita possuem cor preta, brilho metálico, granulação média (1 a 3 mm), são anédricos quanto ao grau de perfeição dos grãos e são atraídos pelo ímã.

Os cristais de quartzo ocorrem tanto na matriz, possuindo granulação fina quanto com granulação média, com formas alongadas (fitas de quartzo) e são xenoblásticos. Exibem microfissuras intra e intercristalinas preenchidas por argilominerais e óxido/hidróxido de ferro e superfícies de contato planar e irregular entre os grãos. Os cristais de aegirina-augita são xenoblásticos, possuem granulação fina e encontram-se em estágio avançado de alteração para hornblenda (uralitização) e/ou para minerais opacos. Exibem microfissuras intracristalinas sem preenchimento ou preenchidas por material ferruginoso, superfícies de contato irregular entre os grãos e em alguns locais estão orientados segundo uma direção preferencial na rocha. Os cristais de ortoclásio são xenoblásticos, exibem superfícies de contato irregular entre os grãos, textura pertítica e possuem microfissuras intragranulares preenchidas por óxido/hidróxido de ferro. Os minerais opacos são xenoblásticos, exibem superfícies de contato irregular entre os grãos e possuem granulação variando de fina a média. O óxido/hidróxido de ferro ocorre como alteração dos piroxênios e encontra-se preenchendo microfissuras. Os cristais de carbonato ocorrem em regiões pontuais e são provenientes da alteração de plagioclásios. Epidoto ocorre como alteração de piroxênios em regiões pontuais.

A composição mineralógica modal média para os constituintes da rocha intacta, obtidos pela integração através da quantificação macro e microscópica, é apresentada na Tabela 3.1.

A análise petrográfica das rochas intactas apontou que o granito possui um grau alto de microfissuramento, exibindo microfissuras intra e intercristalinas preenchidas por óxido/hidróxido de ferro (2%) ou argilominerais (traços) e intracristalinas sem preenchimento. O seu grau de alteração também é alto, sendo observados processos de sericitização de feldspatos (microclina de 45%, ortoclásio 7% e plagioclásio 4%) e muscovitização de biotitas (5%), com as superfícies de contato entre os grãos variando de planar a irregular (Figura 3.4).

Tabela 3.1 -Composição Mineralógica

| <b>Minerais</b>          | <b>Gg (%)</b> | <b>Mc (%)</b> | <b>Gm (%)</b> |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Microclina               | 45            | -             | -             |
| Ortoclásio               | 7             | -             | 49            |
| Quartzo                  | 29            | -             | 30            |
| Biotita                  | 5             | -             | -             |
| Muscovita                | 2             | -             | -             |
| Granada                  | 3             | -             | -             |
| Plagioclásio             | 4             | -             | 8             |
| Óxido/hidróxido de ferro | 2             | -             | 6             |
| Sericita                 | 3             | -             | -             |
| Opacos                   | -             |               | 2             |
| Argilominerais           | traços        | 1             | traços        |
| Calcita                  | -             | 90            | -             |
| Diopsídio                |               | 9             |               |
| Piroxênio                | -             | -             | 5             |
| Zircão e Epidoto         | -             | -             | traços        |

O mármore apresenta um alto grau de microfissuramento, com microfissuras intra e intergranulares sem preenchimento. O grau de alteração é baixo, sendo observado diopsídio (9%) com bordas de alteração para argilominerais (1%) em regiões pontuais. As superfícies de contato são planares a irregulares (Figura 3.5).

A pedra madeira possui um grau de microfissuramento elevado, exibindo microfissuras intracristalinas preenchidas por óxido e/ou hidróxido de ferro (6%) e intercristalinas abertas vazias. O estado de alteração é moderado, sendo observados processos de uralitização, impregnação por óxido/hidróxido de ferro e em regiões pontuais, e carbonatação. Os contatos entre as superfícies minerais são predominantemente planares (Figura 3.6).

### 3.2 – Métodos

A proposta deste trabalho é a avaliação tecnológica e a durabilidade de três rochas ornamentais metamórficas, extraídas no Noroeste Fluminense, e a influência da porosidade nas propriedades físicas e mecânicas das amostras.

As rochas foram selecionadas em virtude do seu valor comercial regional. As amostras foram compradas em marmorarias que beneficiam os blocos direto das lavras, com o intuito de garantir que os litotipos pertencessem a um único lote de extração em suas respectivas pedreiras.

O tamanho das amostras foi definido em função das dimensões de ensaio especificadas na ABNT NBR 15845 (2015), com as adaptações de dimensões pertinentes à espessura as quais as chapas são produzidas e comercializadas. As chapas de gnaiss granítico e do gnaiss milonítico são comercializadas com 3 cm de espessura. O mármore é comercializado com espessura de 2 cm. As dimensões das amostras adotadas para análise e ensaios foram as seguintes:

*Petrografia:* Amostra de mármore medindo 7 x 7 x 2 cm. Gnaiss granítico e gnaiss milonítico medindo 7 x 7 x 3 cm.

*Índices físicos, microscopia e compressão uniaxial:* Em função da capacidade de carga das prensas disponíveis no Laboratório de Engenharia Civil da UENF, as amostras submetidas à compressão uniaxial tiveram suas dimensões reduzidas, com as amostras cúbicas de mármore medindo 2 x 2 x 2 cm; as amostras de gnaiss granítico e gnaiss milonítico medindo 3 x 3 x 3 cm.

*Dilatometria:* Amostras cilíndricas com diâmetro de 6mm e altura de 12 mm.

*Ensaio de propagação de ondas:* Amostras cúbicas de mármore com arestas medindo 5 cm. Amostras cúbicas de granito e pedra madeira com arestas medindo 7 cm.

*Porosimetria por intrusão de mercúrio:* Fragmentos irregulares de rocha medindo em torno de 6 x 6 x 6 mm.

*Microtomografia computadorizada:* Amostras cilíndricas com diâmetro de 6 mm e altura entre 12 e 15 mm.

*Resistência ao impacto de corpo duro:* Amostras retangulares medindo 20 x 20 cm, nas espessuras das chapas dos respectivos materiais.

Para a avaliação da alteração e durabilidade, as rochas foram divididas em 5 lotes, um lote designado “lote de controle”, considerada a rocha intacta, um lote com envelhecimento natural em ambiente urbano, outro lote com envelhecimento natural

em ambiente costeiro, um lote submetido ao envelhecimento acelerado em laboratório no equipamento de lixiviação, e outro lote submetido ao tratamento térmico.

Ao término do processo de envelhecimento, as rochas foram submetidas à avaliação microestrutural e ensaios mecânicos. Os resultados dos testes foram analisados e comparados com dados obtidos na literatura.

### **3.2.1. Envelhecimento Natural**

O envelhecimento natural da amostra no campo foi feito por meio da exposição das rochas às condições naturais de alteração em ambiente urbano, na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ e em ambiente costeiro, na praia de Sossego, na cidade de São Francisco de Itabapoana-RJ.

✓ envelhecimento natural na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ, na UENF, por dois anos (Figura 3.7a). As amostras foram dispostas sobre a laje da do Prédio E1 da UENF, e retiradas com 1 e 2 anos de envelhecimento natural para avaliação das propriedades físicas e mecânicas. Ainda há material disposto no local para pesquisas futuras.

✓ envelhecimento natural em ambiente costeiro, na cidade de São Francisco de Itabapoana-RJ, na Praia de Sossego, por dois anos (Figura 3.7b). As rochas foram dispostas sobre a laje de uma residência, retiradas com 1 e 2 anos de envelhecimento natural para posterior avaliação dos efeitos do intemperismo. Ainda há material disposto no local para pesquisas futuras.

As rochas empregadas como revestimentos em fachadas e pisos apresentam uma face exposta à intempéries e outra fixada no piso ou alvenaria. Para melhor simular a condição de uso, as amostras foram mantidas com as mesmas faces expostas às intempéries até a retirada para análise.



(a)



(b)

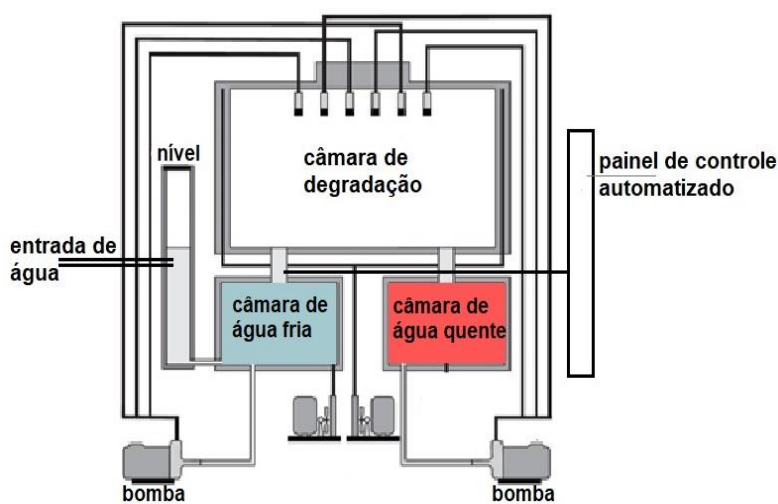
Figura 3.7 -Envelhecimento Natural das Rochas. Fonte: Autora (a) Amostras sobre a laje na Praia de Sossego, (b) Amostras sobre a laje do Prédio da Reitoria/UENF.

### **3.2.2. Degradação Acelerada em Laboratório**

A degradação acelerada em laboratório foi realizada no Laboratório de Ensaios de Durabilidade em Materiais Geotécnicos do LECIV/CCT/UENF, usando o equipamento de lixiviação contínua (Figura 3.8). A calibração do equipamento foi realizada a partir das curvas de saturação e secagem das amostras e avaliação da temperatura atingida pelas amostras durante exposição solar, conforme descrito no Apêndice A.

O equipamento provoca a lixiviação dos minerais, similar à degradação natural, porém, com maior intensidade. As rochas foram acondicionadas na câmara do equipamento de lixiviação contínua desenvolvido na UENF, os ciclos iniciados com 1 hora de lixiviação com água deionizada a 70°C, 1 hora de lixiviação com água em 25°C, o congelamento ocorreu à -5°C por 6 horas e posterior choque térmico com o início do ciclo de lixiviação com água quente a 70°C. Os mecanismos de intemperismo representados pelo equipamento são: variação de temperatura, variação de umidade, saturação e secagem, congelamento e degelo, lixiviação e choque térmico.

As rochas foram retiradas para análise dos índices físicos, porosidade e resistência mecânica, com 90 dias, 180 e 210 dias, quando os ciclos de degradação foram encerrados.



(a)

(b)

Figura 3.8 -(a) Equipamento de Lixiviação Contínua - Fonte: Autora (b) Esquema de funcionamento do equipamento. Adaptado de Dias Filho *et al.* (2020).

### 3.2.3. Tratamento Térmico

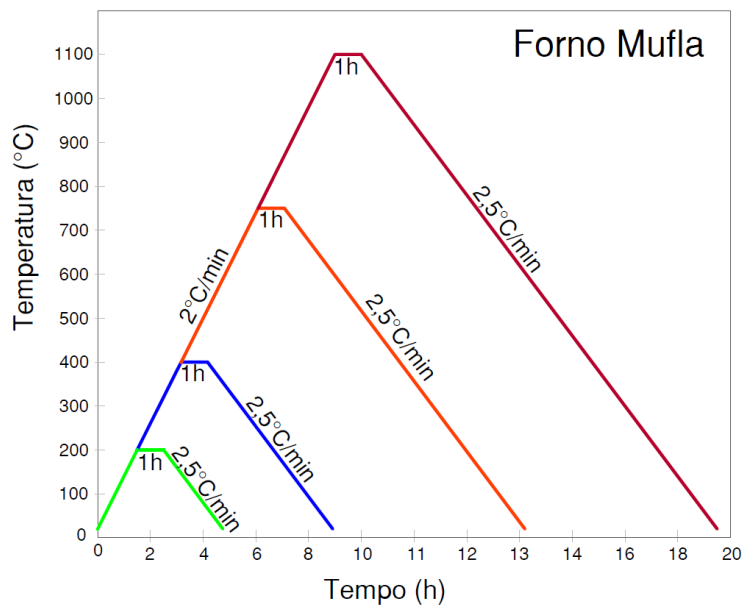
O tratamento térmico foi proposto para avaliar a durabilidade e segurança de utilização das rochas em situações que envolvam incêndio ou irradiação de calor, com as temperaturas entre 200 e 1100°C.

O tratamento térmico foi realizado de forma lenta, com as amostras colocadas em um forno mufla, com a taxa de aquecimento de 2°C/minuto até atingir as temperaturas determinadas de 200°C, 400°C, 750°C e 1100°C, que equivalem as temperaturas de incêndios de pequena a grande proporção, onde ocorre o colapso das rochas. Esta metodologia é similar à adotada por Saiang e Miskovsky (2012).

Os corpos de prova foram mantidos na temperatura estabelecida por 1 hora para garantir o total aquecimento das amostras e as alterações das propriedades na temperatura desejada. Decorrido esse tempo, o forno foi desligado, e após 3 horas a porta foi aberta e as amostras resfriadas naturalmente até atingir o equilíbrio com a temperatura ambiente. As medidas de tempo e temperatura indicam uma taxa de resfriamento aproximado de 2,5°C/minuto.

A Figura 3.9 apresenta a ilustração da metodologia e o forno usado no tratamento térmico.





(a)

(b)

Figura 3.9 -(a) Tratamento Térmico (b) Forno Mufla. Fonte: Autora

Um lote de amostras de referência não foi submetido ao tratamento térmico para que as propriedades pudessem ser comparadas antes e após o tratamento, no entanto, para obtenção dos índices físicos, essas rochas foram expostas a temperatura de 100°C em estufa.

A avaliação da microestrutura e propriedades físicas do gnaisse granítico, do mármore branco e do gnaisse milonítico foi realizada antes e depois dos processos de envelhecimento acelerado pelos seguintes testes laboratoriais:

### 3.2.4. Ensaios Tecnológicos

✓ *Análise petrográfica:*

Realizadas na IGEO/UFRJ e no Cetem-ES, a partir da produção e análise de lâminas delgadas das rochas intactas, envelhecidas em laboratório e após o tratamento térmico, em consonância com as diretrizes expressas na norma da ABNT NBR 15845-1 (ABNT, 2015), onde foi identificada a composição mineralógica, a textura, estado de alteração dos minerais, estrutura, bem como o tipo e intensidade de microfissuramentos. Foi usado o Microscópio petrográfico de luz polarizada. Modelo: Axioskop 40 Carl Zeiss, da marca

Zeiss. A classificação petrográfica seguiu os critérios propostos por Best (2003), e para os modais dos minerais Streckeisen (1976).

✓ *Índices físicos:*

Seguidos os procedimentos da norma ABNT NBR 15845 - 2 (ABNT 2015), foram verificadas as massas das amostras (intactas, com envelhecimento natural, degradação em laboratório e após o tratamento térmico) nas condições seca, saturada e submersa para a obtenção da densidade aparente ( $\rho_a$ ), da porosidade aparente ( $\eta_a$ ), e a absorção de água ( $\alpha_a$ ), por meio das seguintes Equações 1, 2 e 3:

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

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

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

Onde:  $M_{sec}$  é a massa da amostra seca;

$M_{sat}$  é a massa da amostra saturada;

$M_{sub}$  é a massa da amostra submersa.

✓ *Microscopia de varredura laser com o confocal*

As observações da superfície das amostras foram realizadas com a microscopia de varredura laser, usando o microscópio confocal Olympus, OLS LEXT 4000 do Laboratório de Materiais Avançados da UENF (LAMAV/CCT/UENF).

A Microscopia Confocal a Laser (Figura 3.10) obtém imagens planas tendo como fonte de luz de varredura o laser de alta velocidade, na direção XY. A imagem 3-D é criada com a movimentação da lente objetiva na direção Z. O microscópio OLS LEXT 4000 está equipado com um sistema de óptica confocal que só capta a imagem em foco, ao mesmo tempo elimina reflexos.



Figura 3.10 -Confocal - Fonte: Olympus (2020)

O microscópio laser obtém uma resolução mais alta diminuindo o comprimento de onda de uma fonte de luz. O emprego de um laser de 405 nm proporciona uma boa resolução.

As superfícies das amostras previamente secas em estufa a 100°C foram observadas com as aproximações de 216x e 1075x. Foram geradas imagens 2-D e 3-D e avaliadas as superfícies das rochas intactas, com envelhecimento acelerado em laboratório e após o tratamento térmico, quanto à presença de microfissuras e a textura da superfície horizontal.

✓ *Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que permite a observação e análise das características morfológicas microestruturais de materiais sólidos. Esta técnica foi usada para obtenção das imagens das amostras de rochas ornamentais intactas e após o tratamento térmico.

O equipamento usado foi um microscópio Shimadzu, modelo SSX-550, operando a 20 KeV, disponível no LAMAV/CCT//UENF. Os fragmentos de rocha foram secos em estufa a 100°C por 24h. Em seguida, as amostras foram fixadas em um porta amostras, stub de alumínio e sofreram metalização com ouro, gerando uma fina camada para a produção de elétrons secundários.

Durante o processo de metalização, as amostras do gnaiss granítico degradado a 1100°C fragmentaram-se, não sendo possível a sua análise pela MEV.

✓ *Dilatometria:*

A análise dilatométrica é a medição das mudanças dimensionais que sofre um material, em função da temperatura, quando submetido a um programa controlado de temperatura. Neste trabalho o ensaio dilatométrico foi realizado no equipamento Netzsch DIL 402 PC, com taxa de aquecimento de 2°C/min e temperatura variando entre 30 e 1050°C. Foram avaliadas amostras cilíndricas de rochas intactas com diâmetro de 6mm e altura de 12mm.

Essa análise fornece dados que auxiliam a determinar qual a melhor utilização para o material, considerando a sua expansão e contração térmica. As áreas de aplicação desta técnica são principalmente a investigação e o desenvolvimento de materiais de construção.

✓ *Propagação de onda:*

A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais permite avaliar indiretamente o grau de alteração e coesão das rochas.

A avaliação das rochas ornamentais fluminenses intactas, com envelhecimento natural e em laboratório e após o tratamento térmico foram realizadas segundo as recomendações da ASTM D 2845 (2017), com o Pundit Lab da marca Proceq, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, usando transdutores ultrassônicos com uma frequência média de 50 kHz, precisão de amostragem de 0,1  $\mu$ s, acoplados a rocha com vaselina, na posição de leitura direta, mostrado na Figura 3.11.

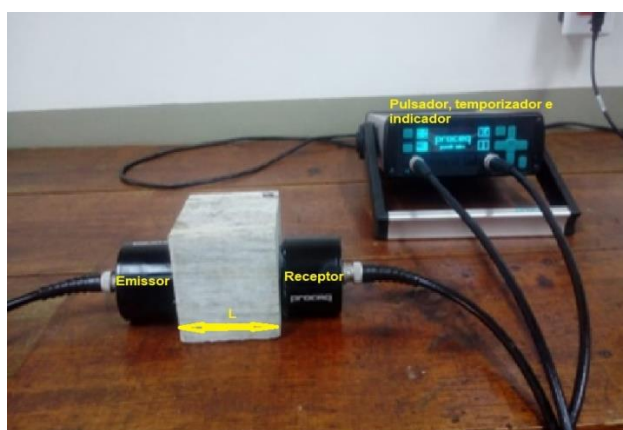


Figura 3.11 -Pundit. Fonte: Autora

De um modo geral os ultrassons são ondas elásticas da mesma natureza das ondas sonoras, porém, com frequências que estão fora do nível de percepção do ouvido humano (15 a 20 kHz) e a sua velocidade é medida com base no tempo de transito percorrido entre um emissor e um receptor por uma onda sonora numa distância conhecida. As técnicas de ultrassons aplicam-se para o estudo da anisotropia, propriedades mecânicas e estrutura do meio, pois a medição dessa velocidade num material rochoso constitui um meio de investigação complementar aos ensaios de resistência mecânica, tendo a vantagem de não ser destrutivo e de rápida execução.

A velocidade de propagação de ondas foi medida nos três planos ortogonais das amostras cúbicas. O mármore e o gnaisse granítico apresentaram variação máxima de 10% nos valores medidos, enquanto o gnaisse milonítico apresentou leitura com variação superior a 20% nos sentidos paralelo e perpendicular às foliações.

✓ *Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM):*

A técnica de PIM consiste em colocar a amostra em um recipiente chamado penetrômetro. A amostra é previamente evacuada e depois imersa em mercúrio. A técnica de análise da porosimetria de mercúrio é baseado na intrusão de mercúrio em uma estrutura porosa sob pressões estritamente controlada. Aumenta-se a pressão por incrementos sucessivos e, para cada valor de pressão, atinge-se um equilíbrio e o volume de mercúrio penetrado fica registrado pela diminuição do volume no capilar. Este dado determina o volume de poros no material em um determinado intervalo de tamanho de acesso. Registrando-se a redução do nível de mercúrio no capilar juntamente com a pressão aplicada, constrói-se a curva porosimétrica, Mata (1998).

As características dos poros das rochas intactas, com envelhecimento natural, envelhecimento acelerado em laboratório e após o tratamento térmico, foram obtidas no porosímetro por injeção automática de mercúrio, modelo Autopore IV 9500, da Micromeritics Instrument Company of America, em amostras medindo aproximadamente 6 x 6 x 6 mm. A intrusão e extrusão de mercúrio foram investigadas sobre pressões entre 0 a 33.000 Psi, equivalente a 228 MPa, com leitura de diâmetros de poros entre 0,005  $\mu\text{m}$  e 360  $\mu\text{m}$ .

A Figura 3.12 mostra o porosímetro e o penetrômetro do Laboratório de Engenharia Civil da UENF (LE CIV/CCT/UENF); a Figura 3.13 ilustra o princípio da técnica de PIM.

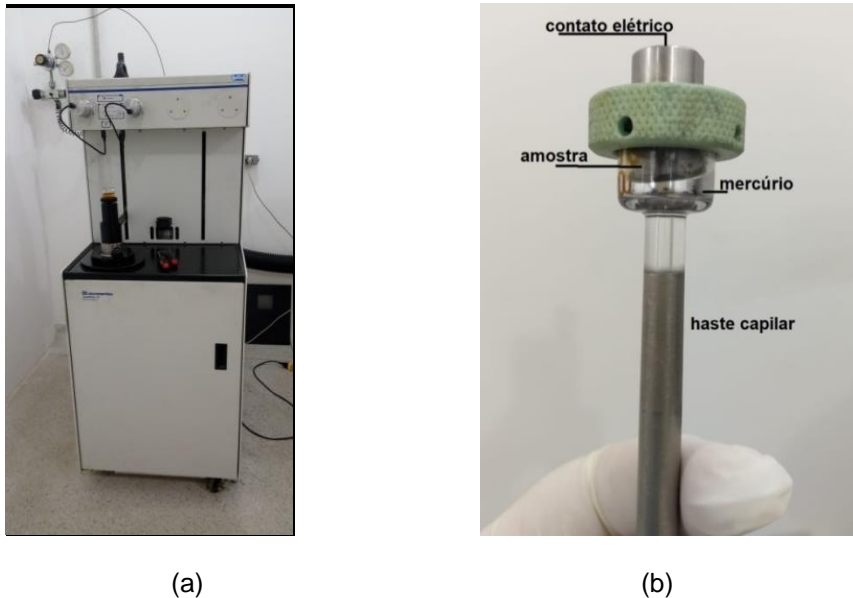


Figura 3.12 -(a) Porosímetro Autopore IV 9500 (b) Penetrômetro. Fonte: Autora

A porosimetria por intrusão de mercúrio proporciona uma ampla faixa de avaliação de parâmetros dos poros, como: distribuições de tamanho, volume total de poros, área total da superfície de poro, diâmetro médio dos poros, e densidades das amostras.

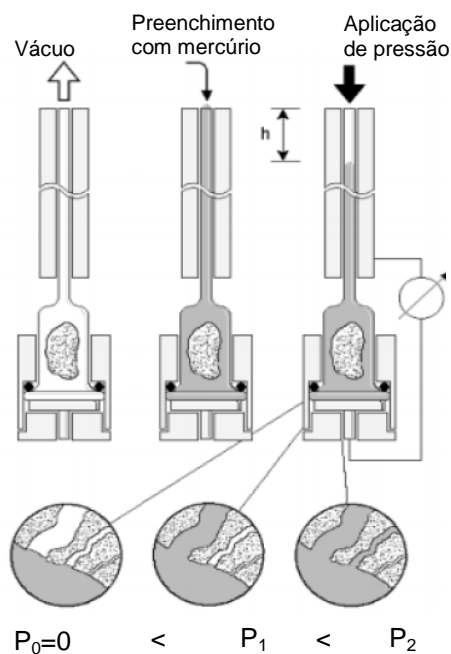


Figura 3.13 -Ilustração da PIM. Fonte: Micromeritics (2020)

✓ *Microtomografia computadorizada por transmissão de Raios X (Micro-CT).*

A micro-CT é a microscopia em 3-D que fornece informações externas e internas da estrutura de materiais sólidos. A técnica permite a visualização tridimensional do material e a realização de medidas verdadeiramente 3-D. Em geral, requer a amostra com as dimensões adequadas e nenhuma outra preparação específica. Por se tratar de um ensaio não destrutivo, possibilita a realização de outras análises ou outras técnicas em uma mesma amostra.

A análise é realizada obtendo as projeções do corpo de prova a partir de várias direções. Isto pode ocorrer rotacionando o corpo de prova segundo a direção da radiação e com isso é medida, em cada passo, a atenuação da radiação. Cada projeção é adquirida com o objeto rotacionado de certo ângulo em relação à posição original, de modo que, se obtém uma projeção para cada ângulo.

O pequeno diâmetro do foco do tubo de raios X é um atributo muito importante do ensaio de micro-CT. Isso ocorre porque quanto menor for esse parâmetro melhor se dará a focalização das estruturas inspecionadas, o que está intimamente relacionado com a qualidade da imagem adquirida no ensaio microtomográfico.

A obtenção dos dados de micro-CT foi realizada em colaboração científica com a Universidade Estadual de Londrina (UEL), usando o equipamento SkyScan1173, da marca Bruker, do Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA/UEL), mostrado na Figura 3.14. Foram analisadas as amostras que apresentaram resultados mais expressivos em relação ao envelhecimento acelerado em laboratório e ao tratamento térmico. Avaliou-se uma amostra de pedra madeira verde lixiviadas por 210 dias, por apresentar deslocamento macroscópico de camadas paralelas à foliação e a rocha intacta, seguidos pelo mármore tratado a 750°C e a mesma rocha intacta, possibilitando observar as alterações em sua estrutura sólida e porosa, antes e após a degradação.

Para a obtenção do conjunto de projeções com uma melhor resolução foi utilizado um filtro de metal 0,25 mm entre o foco do tubo e a amostra de rocha ornamental. Os parâmetros definidos para as aquisições foram os seguintes: burning 1x1, pixel 6  $\mu\text{m}$ , aquisição em 360° com passo angular de -0,4° e 3 aquisições por imagem.



Figura 3.14 -Microtomógrafo modelo SkyScan1173 – Fonte: LFNA/UEL.

Uma vez obtido o conjunto das projeções, dá-se então a necessidade de sua reconstrução. O processo de reconstrução constitui num caminho matemático que envolve a obtenção dos coeficientes de atenuação. Nesta etapa foi utilizado o programa CtVox Bruker. A escolha de qual método dever-se-á utilizar depende tanto das limitações do sistema de aquisição de dados quanto do tempo para o seu processamento.

O terceiro passo compreende o tratamento dos dados utilizando-se softwares como o Skyscan DataViewer. O período total para reconstrução completa da imagem é variável, dependendo da dimensão do material e da resolução exigida.

A micro-CT, a princípio, foi desenvolvida para aplicações no campo da medicina. Posteriormente foi inserida em outras áreas de estudos como nas engenharias, física e química.

✓ *Ensaio de compressão uniaxial (UCS).*

Este ensaio determina a tensão de ruptura da rocha quando submetida a esforços compressivos, avaliando se a rocha poderá ser utilizada como elemento estrutural. Essa análise é recomendável para revestimentos verticais, pisos, degraus e tampos.

Os ensaios de compressão uniaxial nas rochas intactas, com envelhecimento natural, envelhecimento acelerado em laboratório e após o tratamento térmico foram realizados no LECIV/CCT/UENF, em uma prensa manual (Figura 3.15), em cubos de gnaisses com arestas medindo 3 cm, e mármore medindo 2 cm de aresta, seguindo as recomendações da norma ABNT 15845-5 (2015). Em cada estágio de degradação foram testadas entre 3 e 5 amostras. O gnaiss milonítico, por se tratar



de uma rocha com foliações bem definidas, foi testada com a aplicação de carga paralela e perpendicularmente às foliações.



Figura 3.15 -Teste de Compressão Uniaxial. Fonte: Autora

A tensão de ruptura na compressão é obtida pela Equação 4:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\sigma_c$  é a tensão de ruptura na compressão, expressa em megapascal (MPa);

P é a força máxima de ruptura, expressa em quilonewtons (kN);

A é a área da face do corpo de prova submetida a carregamento, expressa em metros quadrados (m<sup>2</sup>).

✓ *Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro;*

Rochas usadas em revestimento estão sujeitas a ações mecânicas instantâneas, como quedas de objetos. A maior ou menor capacidade da rocha suportar a ação de um impacto denomina-se tenacidade. A estrutura, textura e os minerais formadores da rocha influenciam na resistência ao impacto do material estudado.

O ensaio de resistência ao impacto de corpo duro (Figura 3.16), foi realizado no LECIV/CCT/UENF, nas rochas intactas, com envelhecimento natural, envelhecimento acelerado em laboratório e após o tratamento térmico, seguindo as recomendações da norma ABNT 15845-8 (2015). Este teste simula em laboratório, a resistência da rocha ao impacto, a qual é obtida a partir da determinação de queda de um corpo sólido que provoca a ruptura do corpo de prova, em forma de placas.



Figura 3.16 -Teste de Impacto de Corpo Duro. Fonte: Autora

Em cada estágio de degradação foram avaliadas 3 placas de cada tipo de rocha medindo 20 x 20 cm, nas espessuras comerciais de 3 cm para a pedra madeira e o granito e 2 cm para o mármore.

Os resultados são expressos pela média aritmética da altura de ruptura e pela energia de ruptura calculada pela Equação 5:

$$W = m \cdot g \cdot h \quad \text{Equação 5}$$

Onde,

W é a energia de ruptura, expressa em joules (J);

m é a massa da esfera, expressa em quilogramas (kg);

g é a aceleração da gravidade (9,806 m/s<sup>2</sup>);

h é a altura de ruptura, expressa em metros (m).

#### ✓ *Análise Estatística*

Os resultados dos ensaios foram avaliados com o desvio padrão amostral (S), permitindo verificar a dispersão dos dados em relação à média, calculado pela Equação 6:

$$S = \frac{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}}{N} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:  $\Sigma$  representa o somatório;

$x_i$  é o valor individual do dado;

$\bar{x}$  é a média;

n é o número de dados;

✓ *Avaliação das mudanças e Previsão da durabilidade*

Os resultados do envelhecimento natural foram relacionados aos resultados da degradação acelerada em laboratório e estimada a durabilidade das rochas para 5 e 10 anos de envelhecimento natural usando a função de decaimento.

As mudanças percentuais nas propriedades físicas e mecânicas das rochas foram determinadas usando a Equação 7, proposta por Binal *et al.* (1998).

$$DO = \frac{P_n}{P_F} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde,

DO é a taxa de mudança em (%);

$P_n$  é o parâmetro físico ou mecânico no final dos ciclos, e

$P_F$  é o valor inicial deste parâmetro.

A durabilidade para 5 e 10 anos de envelhecimento natural foi obtida com a função de decaimento proposta por Mutluturk *et al.* (2004), mostrada na Equação 8.

$$M_N = M_0 e^{-\lambda N} \quad \text{Equação 8}$$

Onde,

$M_N$  é a propriedade mecânica após os ciclos de envelhecimento;

$M_0$  é a propriedade mecânica inicial;

$N$  é o número de ciclos de envelhecimento;

$\lambda$  a constante de decaimento.

A constante de decaimento foi determinada por análise de regressão simples.  $\lambda$  indica a perda média de integridade de cada propriedade mecânica pela ação de qualquer ciclo de envelhecimento.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

As rochas estudadas foram separadas em 5 lotes, um lote de referência denominado rocha intacta, avaliado sem ser submetido a metodologia de envelhecimento proposta. Os demais lotes foram submetidos aos processos de envelhecimento natural, degradação acelerada e tratamento térmico. Ambos os lotes foram testados seguindo as recomendações da ABNT NBR 15845 (2015), com os ensaios descritos no item 3.2.4.

### 4.1 – Envelhecimento natural

O envelhecimento natural do gnaisse granítico, do mármore calcítico e do gnaisse milonítico foi realizado sobre a laje de edificações, em ambiente urbano e em ambiente costeiro. A rocha intacta submetida ao envelhecimento natural é mais propensa ao intemperismo quando comparada aquela já exposta, pois sua superfície e seu sistema poroso estão completamente expostos ao meio ambiente, livres de crostas e pátinas (Germinario *et al.*, 2017).

A avaliação das propriedades físicas, mineralógicas e mecânicas das rochas deu-se com 1 e 2 anos de exposição natural, permitindo comparar o comportamento entre litologias distintas nos ambientes citados.

Decorrido o tempo de envelhecimento natural, as amostras foram inicialmente comparadas entre si por inspeção visual, mostrada na Figura 4.1. As rochas expostas em ambiente urbano não apresentaram mudanças no padrão cromático e alterações.

A influência das características climáticas locais é observada macroscopicamente nas amostras com exposição em ambiente costeiro. O mármore com 1 ano e 2 anos de envelhecimento apresentam sujidades que surgem de sua base, resultante da deposição de partículas, favorecidas por via da umidade ascendente, causando o manchamento superficial. No granito e na pedra madeira a deposição de material particulado é notado no segundo ano de exposição (Figura 4).

A nomenclatura adotada para distinguir os processos de envelhecimento em ambiente urbano e costeiro nas rochas estudadas é a seguinte:

*Ambiente urbano*

- gnaisse granítico com envelhecimento em área urbana: Gg\_u;
  - mármore calcítico com envelhecimento em área urbana: Mc\_u;
  - gnaisse milonítico com envelhecimento em área urbana: Gm\_u;
- o símbolo (=) indica o ensaio no sentido paralelo às foliações;  
o símbolo (t) indica o ensaio no sentido transversal às foliações;

*Ambiente costeiro*

- gnaisse granítico com envelhecimento em área costeira: Gg\_c;
- mármore calcítico com envelhecimento em área costeira: Mc\_c;
- gnaisse milonítico com envelhecimento em área costeira: Gm\_c;

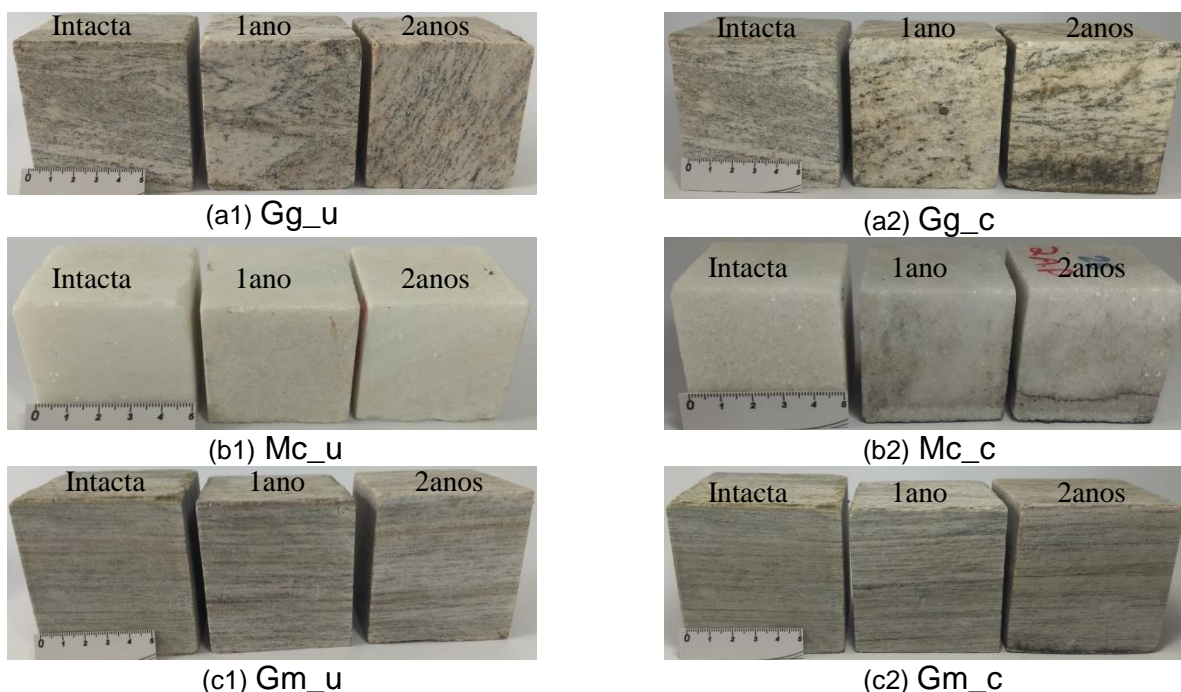


Figura 4.1 -(a1), (b1) e (c1) Rochas com Envelhecimento Natural em ambiente urbano, na UENF; (a2), (b2) e (c2) Rochas com Envelhecimento Natural em ambiente costeiro, na praia de Sossego. Fonte: Autora

A dilatação térmica causada pela insolação e os ciclos de saturação e secagem corroboraram para o surgimento de trinca no mármore com 2 anos de

envelhecimento, provavelmente decorrente de falha pré-existente na amostra, não notada a olho nú.

#### *4.1.1 – Análise microestrutural*

##### *Microscopia*

A microscopia confocal foi utilizada para avaliação das condições texturais e estruturais da rocha, verificando desta forma as variações ocorridas. Foram obtidas imagens planas e tridimensionais da superfície, conforme as Figura 4.2, 4.3 e 4.4.

O granito e a pedra madeira sofreram a granulação da superfície dos minerais, mostrando-se mais intensa na amostra com envelhecimento no ambiente costeiro (Figura 4.2 (c) e (f)) e (Figura 4.4 (c) e (f)).

Similar ao granito, as alterações superficiais do mármore evidenciam-se com o envelhecimento em ambiente costeiro, apresentando à formação de cavidades decorrentes da desagregação de grãos minerais, mostrado na Figura 4.3 (c) e (f).

Nas amostras envelhecidas na praia de Sossego, a proximidade com a linha de costa faz com que as rochas estejam submetidas ao intemperismo mais agressivo, causado pela ação conjunta de fatores como as névoas salinas, que podem levar a cristalização de sais nos poros expostos, gerando tensões responsáveis pelo aumento do diâmetro dos poros e causando alterações superficiais de origem física.

A maior acidez das chuvas nesse local, a alta concentração de Cl e a umidade atmosférica (Chrispim (2016); Freitas (2003)), propiciam o intemperismo químico decorrente da água que infiltra e percola as rochas levando a hidratação, responsável pela variação de volume dos minerais, a dissolução que acarreta a perda de minerais; a hidrólise, responsável pelo enfraquecimento da estrutura devido à retirada de íons e a oxidação que promove a formação de óxidos e hidróxidos facilmente lixiviados, conforme descrito por Yu e Oguchi (2010).

A umidade atmosférica, a variação da temperatura e a insolação mais intensa descrita no item 2.1.1, promovem ciclos de saturação e secagem mais agressivos do que em ambiente urbano, provocando a dilatação e contração térmica.

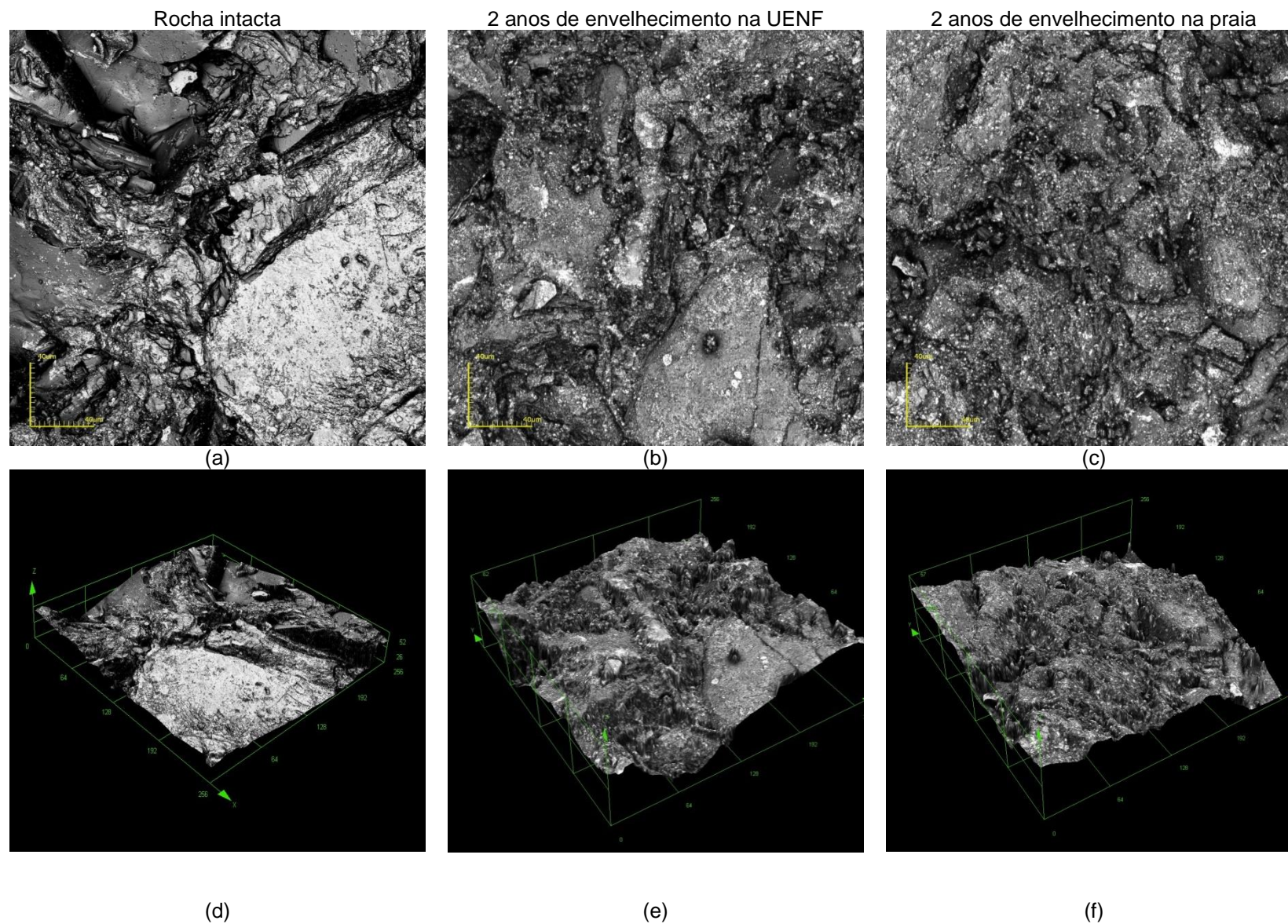
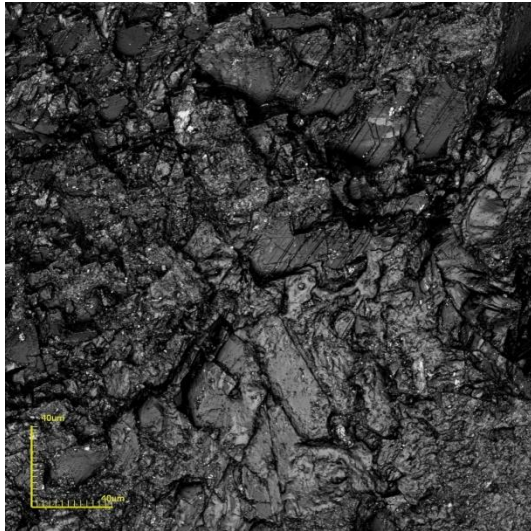


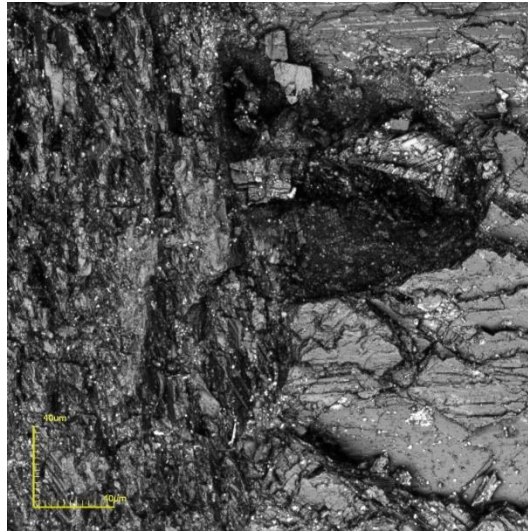
Figura 4.2 - Gnaiss granítico intacto e com Envelhecimento Natural; (a)(b)(c) Fotomicrografia 2-D; (d), (e) e(d) Fotomicrografia 3-D.  
 Fonte: Autora

Rocha intacta



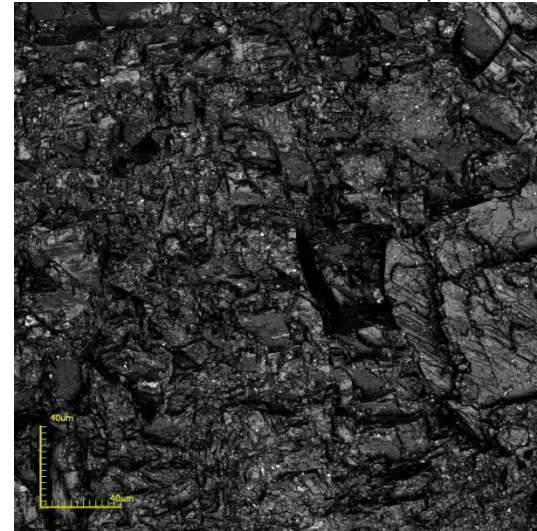
(a)

2 anos de envelhecimento na UENF

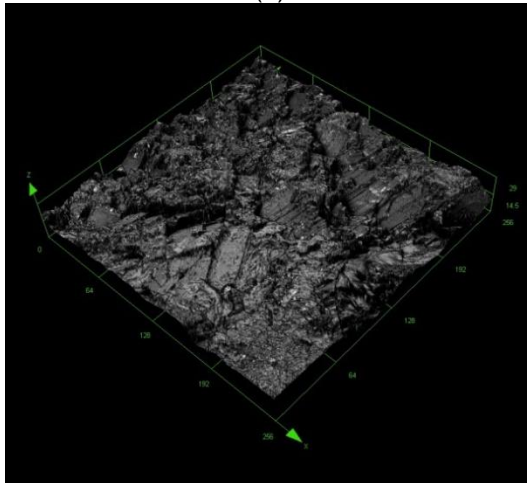


(b)

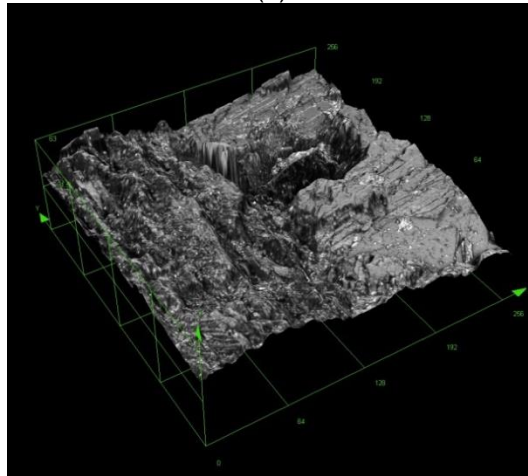
2 anos de envelhecimento na praia



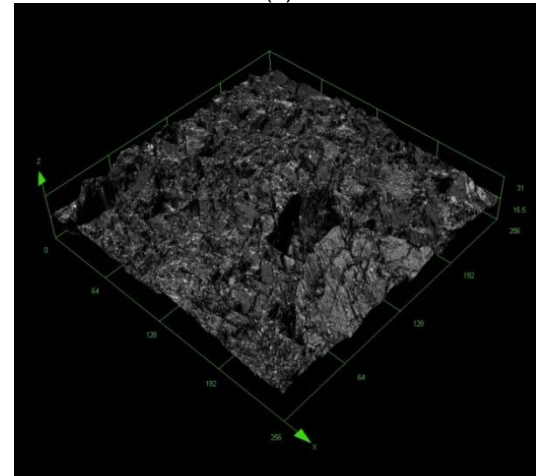
(c)



(d)



(e)

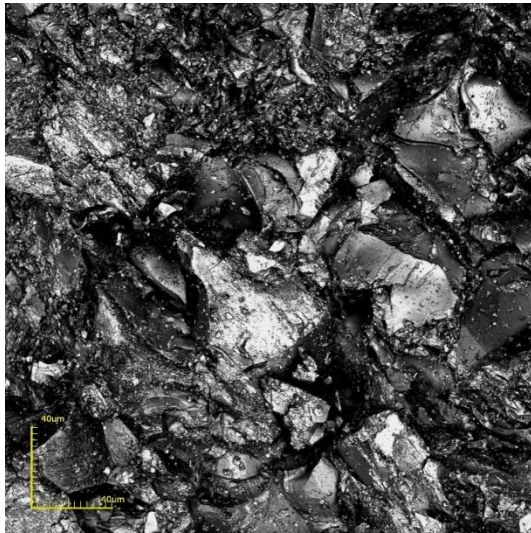


(f)

Figura 4.3 -Mármore intacto e com Envelhecimento Natural; (a)(b)(c) Fotomicrografia 2-D; (d), (e) e (d) Fotomicrografia 3-D. Fonte: Autora

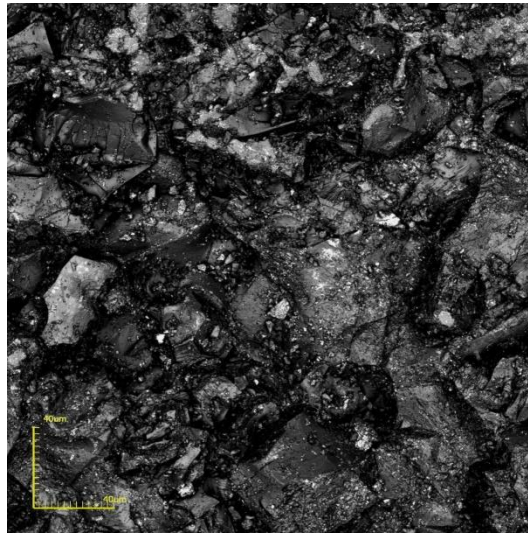


Rocha intacta



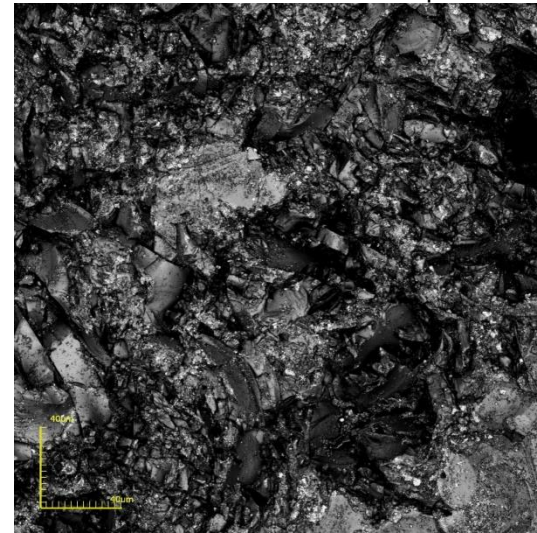
(a)

2 anos de envelhecimento na UENF

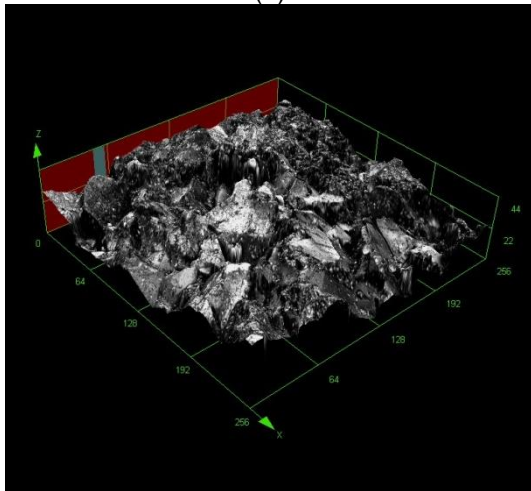


(b)

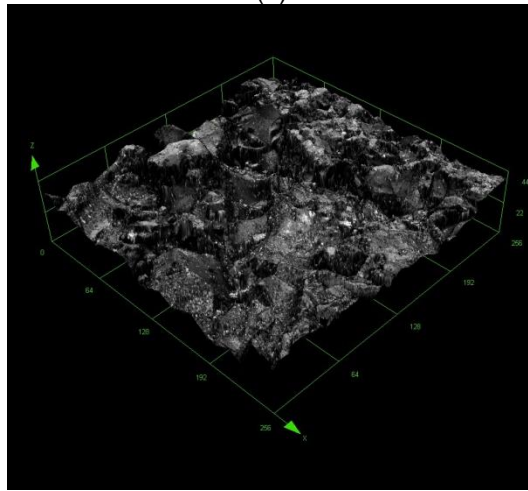
2 anos de envelhecimento na praia



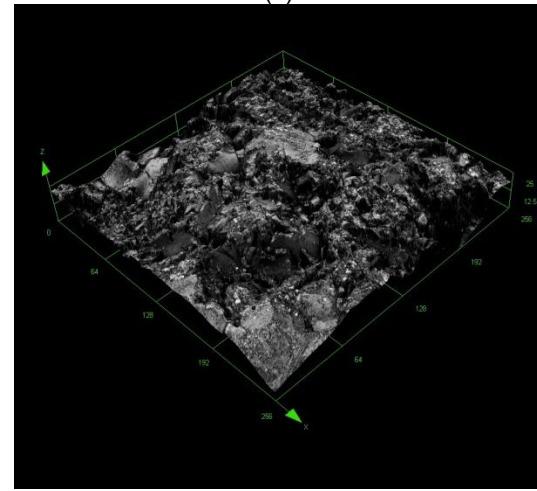
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.4 – Gnaiss milonítico com Envelhecimento Natural; (a)(b)(c) Fotomicrografia 2-D; (d), (e) e(d) Fotomicrografia 3-D. Fonte: Autora

## Índices Físicos

As propriedades físicas são de notável interesse como indicadores da qualidade e durabilidade das rochas. Influenciam diretamente parâmetros importantes como a resistência mecânica e a propagação de ondas.

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam a média dos resultados obtidos para os índices físicos das três litologias estudadas, em estado intacto e após o envelhecimento natural.

Tabela 4.1 -Índices Físicos do Gnaisse Granítico

|                             | Densidade aparente<br>[ $\rho_a$ ] ( $\text{kg/m}^3$ ) | Porosidade<br>aparente [ $\eta_a$ ] (%) | Absorção de água<br>aparente [ $\alpha_a$ ] (%) |
|-----------------------------|--|---|---|
| Rocha intacta               | 2.612±52   | 0,93±0,14                               | 0,35±0,06                                       |
| 1 ano ambiente urbano       | 2.624±33   | 1,00±0,15                               | 0,39±0,06                                       |
| 2 anos ambiente urbano      | 2.603±16   | 1,08±0,17                               | 0,42±0,07                                       |
| 1 ano em ambiente costeiro  | 2.637±13   | 0,83±0,05                               | 0,32±0,02                                       |
| 2 anos em ambiente costeiro | 2.583±34   | 1,25±0,32                               | 0,48±0,13                                       |

As amostras envelhecidas em ambiente urbano não apresentaram variações significativas da densidade aparente quando comparadas à rocha intacta, para o envelhecimento em ambiente costeiro, ocorreu um discreto acréscimo no primeiro ano, pode ser atribuído à heterogeneidade do material, seguido de uma redução de 0,5% para 2 anos de envelhecimento. Ambos os resultados apresentam-se dentro do desvio padrão amostral.

Nas amostras de granito com 2 anos de envelhecimento no ambiente urbano, houve um aumento de 16% para a porosidade aparente e 20% para a absorção de água. Considerando o mesmo intervalo de tempo para o envelhecimento em ambiente costeiro, houve um incremento de 34% para a porosidade aparente e 37% para a absorção de água devido a lixiviação por chuva, sais e umidade relativa do ar.

Tabela 4.12 - Índices Físicos do Mármore Calcítico

|                             | Densidade aparente<br>[ $\rho_a$ ] (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidade<br>aparente [ $\eta_a$ ] (%) | Absorção de água<br>aparente [ $\alpha_a$ ] (%) |
|-----------------------------|---|---|---|
| Rocha intacta               | 2.721±24  | 0,60±0,18                               | 0,22±0,07                                       |
| 1 ano ambiente urbano       | 2.785±49  | 0,62±0,07                               | 0,22±0,02                                       |
| 2 anos ambiente urbano      | 2.721±55  | 0,60±0,12                               | 0,22±0,04                                       |
| 1 ano em ambiente costeiro  | 2.781±12  | 0,60±0,09                               | 0,21±0,03                                       |
| 2 anos em ambiente costeiro | 2.736±22  | 0,64±0,06                               | 0,23±0,02                                       |

No mármore, as variações dos índices físicos mantiveram-se dentro do desvio padrão, com uma tendência de aumento da média da porosidade e da absorção aparente com o envelhecimento em ambiente costeiro, e um discreto incremento da densidade aparente com 1 ano de envelhecimento natural em ambos os ambientes.

Tabela 4.3 - Índices Físicos do Gnaisse Milonítico

|                             | Densidade aparente<br>[ $\rho_a$ ] (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidade<br>aparente [ $\eta_a$ ] (%) | Absorção de água<br>aparente [ $\alpha_a$ ] (%) |
|-----------------------------|---|---|---|
| Rocha intacta               | 2.591±10  | 0,95±0,13                               | 0,37±0,05                                       |
| 1 ano ambiente urbano       | 2.625±3   | 0,81±0,06                               | 0,31±0,02                                       |
| 2 anos ambiente urbano      | 2.606±8   | 0,97±0,02                               | 0,38±0,02                                       |
| 1 ano em ambiente costeiro  | 2.604±3   | 0,91±0,08                               | 0,36±0,03                                       |
| 2 anos em ambiente costeiro | 2.608±16  | 0,99±0,05                               | 0,38±0,03                                       |

Assim como o mármore no ambiente costeiro, as variações dos índices físicos da pedra madeira mantiveram-se dentro do desvio padrão, com uma tendência de aumento da média da porosidade e da absorção aparente com 2 anos de envelhecimento em ambiente urbano e costeiro.

Ambas as rochas intactas se apresentaram dentro dos requisitos de aplicação estabelecidos pelas normas ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) e ASTM C615 (2018), com densidade aparente superior a 2.550 kg/m<sup>3</sup> e porosidade aparente inferior a 1%, segundo a norma brasileira; densidade aparente superior a 2.560 kg/m<sup>3</sup>, segundo a norma americana, e absorção de água aparente  $\leq$  0,4% atendendo ambas as normas.

O resumo gráfico dos índices físicos para o envelhecimento natural encontra-se no Apêndice C.

## Dilatometria

A dilatometria é uma ferramenta muito importante para levantar dados do comportamento de expansão e retração de materiais, assim como a indicação de temperatura de transformação de fases.

As curvas dilatométricas apresentadas na Figura 4.5 mostram o comportamento das amostras de gnaiss granítico (Fig. 4.5(a)), de mármore calcítico (Fig. 4.5(b)), e gnaiss milonítico (Fig. 4.5(c)), submetidas às temperaturas de 25°C até 1050°C.

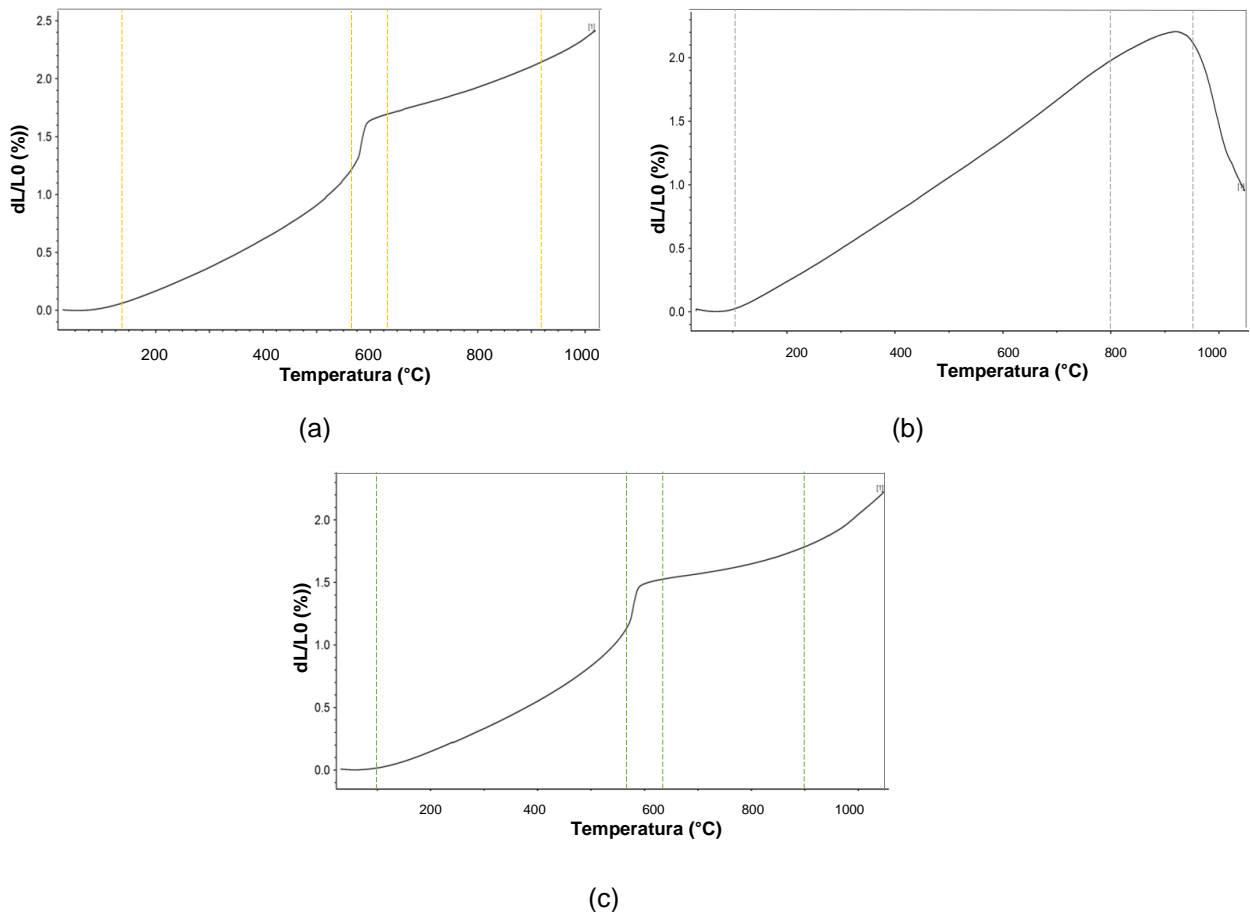


Figura 4.5 -Curvas dilatométricas. (a) gnaiss granítico, (b) mármore, (c) gnaiss molonítico. Fonte: Autora

A amostra de gnaiss granítico (Figura 4.5(a)), apresentou uma expansão volumétrica total de 2,41%. Até 140°C a inclinação da curva é desprezível, nesta faixa de temperatura ocorrem fenômenos como a eliminação da água de umidade, da água adsorvida em forma de gás e início de reações de desidroxilação.

Entre 140 e 570°C há uma expansão não linear, após este intervalo, um súbito incremento até a temperatura de 630°C. Segundo Vázquez *et al.* (2016), em 573°C ocorre a transição de fase do quartzo- $\alpha$  em quartzo- $\beta$ , sendo este uma forma onde a rede cristalina assume uma configuração com maior volume específico, causando possíveis alterações e defeitos macroscópicos, isso se deve a presença de 29% de quartzo na matriz do gnaiss granítico conforme a Tabela 3.1.

No próximo intervalo, a curva é novamente não linear até 920°C, quando há um novo incremento na variação de volume até o término do aquecimento, desta vez marcados pela decomposição, mudanças de fase e expansão dos minerais.

O comportamento do mármore é mostrado na Figura 4.5(b), com a expansão volumétrica total de 2,2%. No início do aquecimento há eliminação de água e gases, a aproximação das partículas e, em consequência, uma retração da curva até a temperatura de 115°C. A partir dessa temperatura o mármore apresenta uma expansão linear, explicado de forma simples pelo coeficiente linear de expansão térmica, com o seu final em torno de 800°C e o surgimento de uma curva, que se prolonga até 963°C, quando o corpo-de-prova deixa de dilatar e inicia o processo de retração, observando-se assim uma mudança na inclinação da curva dilatométrica e uma retração de 1,07%. Isso se deve a presença de 90% de calcita na rocha.

A expansão térmica anisotrópica da calcita desencadeia tensões internas e desenvolve fissuras que afetam a integridade dos mármore. A decomposição térmica da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) resulta na formação de cal ( $\text{CaO}$ ) e liberação de  $\text{CO}_2$  (Török e Hajpál, 2005).

O gnaiss milonítico (Figura 4.5(c)), tem comportamento similar ao gnaiss granítico, apresenta uma expansão volumétrica total de 2,2%. Entre 25°C e 100°C não há a expansão volumétrica significativa, no intervalo entre 101°C até 570°C há um incremento volumétrico com comportamento não linear. Entre 571°C e 630°C ocorre um pico e acentuada expansão volumétrica, e em seguida segue não linear até 900°C, quando tem um progressivo incremento na variação de volume.

Nos gnaisses, os intervalos são marcados pela decomposição de distintos minerais, mudanças de fase e expansão. Em torno de 350°C, o óxido de potássio presente no ortoclásio (7% granito e 49% pedra madeira - Tabela 4.1) decompõem-se, tendo seu ponto de fusão em torno de 490°C. Na temperatura de 600°C a biotita (5% - Tabela 4.1) é alterada para clorita e óxidos, uma vez excedida a temperatura de 573°C, o quartzo (30% - Tabela 4.1) sofre mudança de fase, que é transformada

da fase  $\alpha$  para a fase  $\beta$  (Sun *et al.*, 2016; Gautam *et al.*, 2018). Isso causa aumentos volumétricos e fissuras no contorno dos grãos.

#### Velocidade de Propagação de Onda

Os testes de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, realizados conforme a ASTM D 2845 (2008), permitem avaliar o grau de fissuramento, porosidade e coesão das rochas. Por se tratar de um ensaio não destrutivo, é empregado no estudo de recuperação de monumentos históricos e fachadas.

Na Figura 4.6 é mostrada a velocidade de propagação de ondas ( $V_p$ ) para as rochas intactas e envelhecidas em ambiente urbano, na UENF. O envelhecimento na região costeira é apresentado na Figura 4.7.

O gnaisse milonítico, por se tratar de uma rocha bandada, foi necessária a realização de testes nos sentidos paralelo (=) e transversal (t) às foliações.

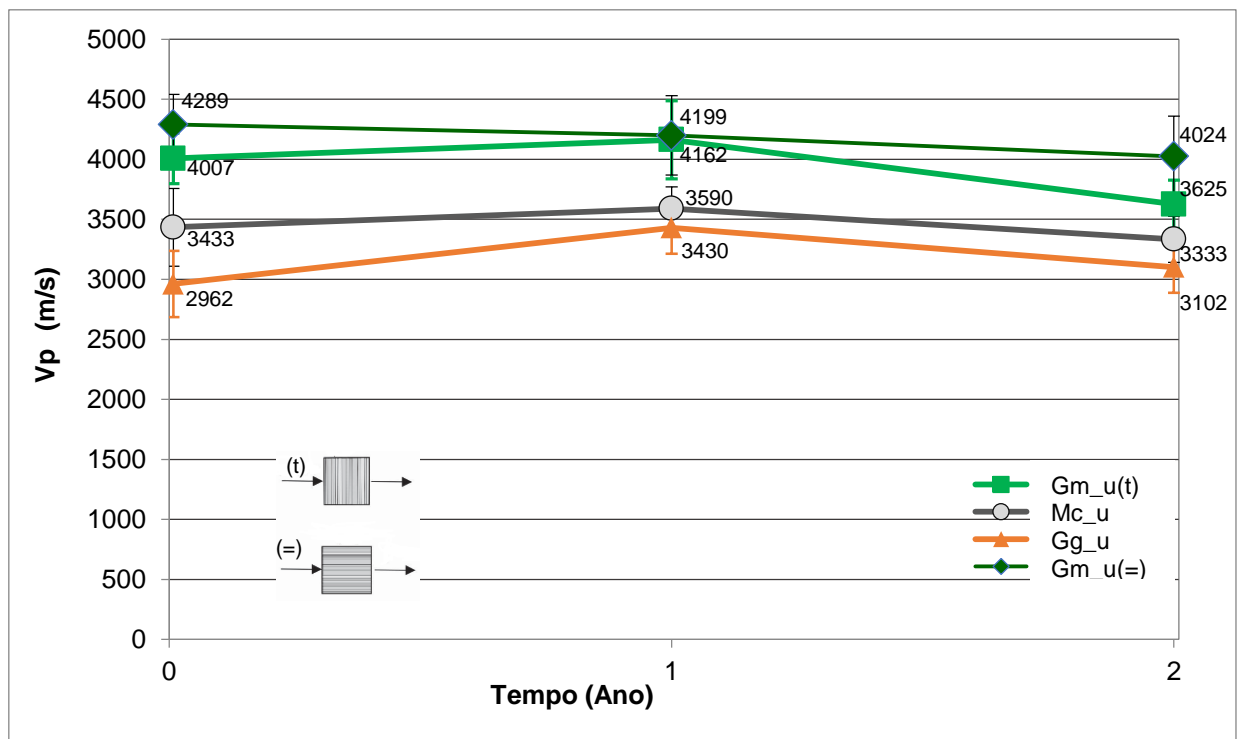


Figura 4.6 –  $V_p$  - Envelhecimento Natural em Ambiente Urbano. Fonte: Autora

Avaliando os resultados obtidos na Figura 4.6, nota-se que no gnaisse granítico ocorreu um aumento médio de 15% nos valores de  $V_p$  para o primeiro ano de envelhecimento, e 3% no segundo ano, quando comparados aos valores medidos para a rocha intacta.

Com 1 ano de envelhecimento, o mármore calcítico apresentou aumento médio de 4% para Vp e com 2 anos, uma redução média de 3%, quando comparados à rocha intacta. As variações nos valores de Vp correlacionam-se se com as variações da densidade aparente, que a média aumentou 2% no primeiro ano e reduziu no segundo ano de envelhecimento, conforme Tabela 4.3.

Para o gnaisse milonítico, a Vp medida paralela às foliações apresentou redução média gradual, chegando a 6% no segundo ano. Nas medições transversais às foliações ocorreu um aumento médio de 10% no primeiro ano e uma posterior redução de 9% no segundo ano, quando comparados à rocha intacta.

As variações dos valores médios da velocidade de propagação de ondas indicam a tendência de acréscimo para o primeiro ano de envelhecimento urbano, no entanto, deve-se observar que os resultados mantiveram-se dentro do desvio padrão. Em ambas as rochas, as variações nos valores médios da Vp correlacionam-se com as variações dos valores médios da densidade aparente (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3), que aumentou discretamente no primeiro ano e reduziu no segundo ano de envelhecimento, e mostra-se inversa a porosidade aparente e absorção aparente (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3), com o incremento desses índices são observadas as reduções dos valores da Vp.

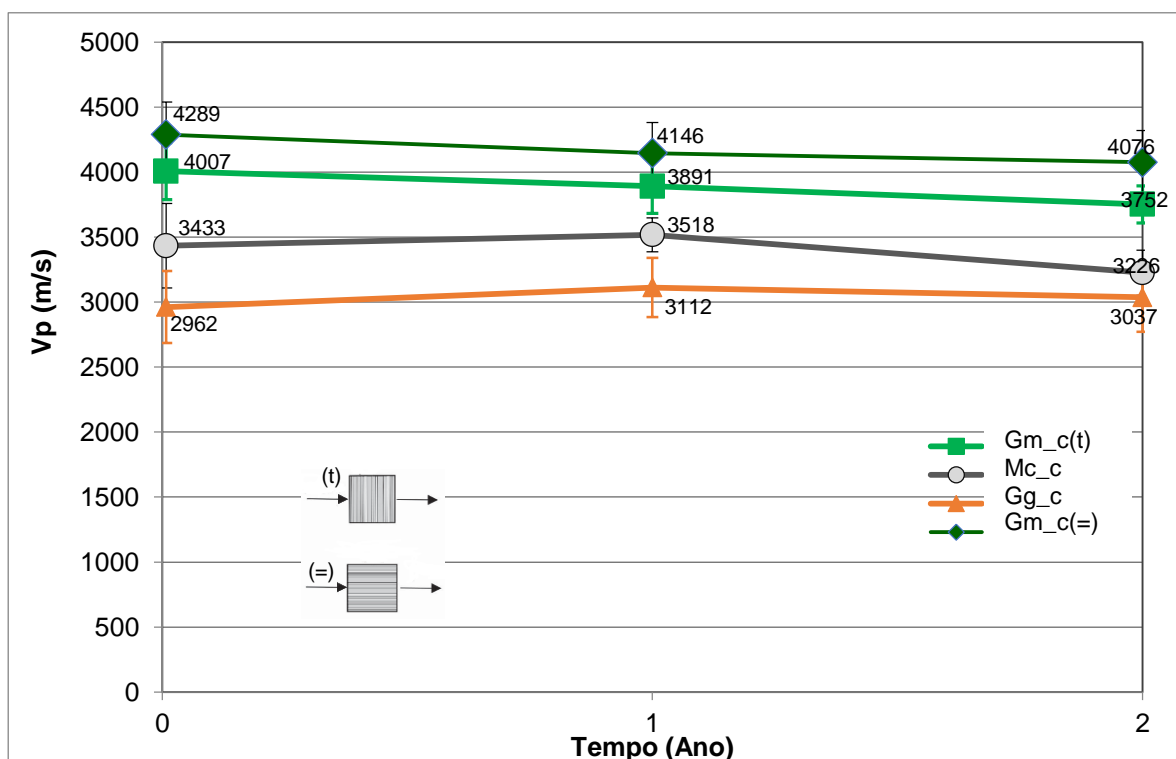


Figura 4.7 –Vp - Envelhecimento Natural em Ambiente Costeiro. Fonte: Autora

Para o envelhecimento em ambiente costeiro, no gnaisse granítico ocorreu um aumento médio de 2,5% nos valores de Vp para o primeiro ano de envelhecimento, e uma redução de 6% para o segundo ano, quando comparados aos valores medidos para a rocha intacta. As variações nos valores da Vp correlacionam-se com as variações da densidade aparente (Tabela 4.1), que aumentou discretamente no primeiro ano e reduziu no segundo ano de envelhecimento, e mostra-se inversa a porosidade aparente e absorção aparente, com o incremento desses índices são observadas as reduções dos valores da Vp.

Com 1 ano no ambiente costeiro, o mármore apresentou aumento de 5% para Vp e com 2 anos, uma redução média de 6%, quando comparados à rocha intacta. Assim como as variações nos valores da Vp correlacionam-se com as variações da densidade aparente (Tabela 4.2), que aumentou discretamente no primeiro ano e reduziu no segundo ano de envelhecimento, e mostra-se inversa a porosidade aparente e absorção aparente, onde com o incremento desses índices são observadas as reduções dos valores da Vp.

A Figura 4.7 mostra que no gnaisse milonítico, a Vp foi reduzindo com o envelhecimento natural das amostras aos 2 anos de envelhecimento, para as medidas transversais às foliações houve uma redução de 12%, enquanto para as medições paralelas a redução medida foi de 5%.

No gnaisse milonítico, os resultados das leituras realizadas paralelas e transversais às foliações da rocha evidenciam a influência da anisotropia decorrente das foliações descritas na petrografia. Independente da condição de envelhecimento natural, a velocidade de propagação medida transversal às foliações mostrou-se menor do que as medidas paralelas as foliações minerais.

Em geral, quanto mais denso e melhor o estado microestrutural da rocha, maior a velocidade Vp, no entanto, dois fatos interessantes devem ser observados nos resultados obtidos:

- ✓ As densidades médias das rochas seguem a seguinte ordem crescente:  $M_c > G_g > G_m$ , no entanto, as velocidades de propagação de onda obtidas seguiram a seguinte ordem:  $G_m > M_c > G_g$ . Fonseca et al. (2021) ressaltam que a concentração de microfissuras intra e intergranulares tem impacto significativo na redução o valor da velocidade de propagação de ondas cruzá-las durante os ensaios. A descrição petrográfica do item 3.1 e a rede de



microfissuras (Figuras 3.4, 3.5 e 3.6), indicam que o mármore apresenta baixo grau de alteração, enquanto o granito moderado grau de alteração, corroborando com os resultados obtidos.

- ✓ As variações da velocidade de propagação de ondas são pequenas devido ao tempo de exposição de 2 anos que pouco influenciou nesta propriedade. Observando-se o desvio padrão, não houve variações significativas, no entanto, ao valor médio da Vp tende a reduzir com 2 anos de envelhecimento natural em ambos os ambientes.

### Porosimetria

A caracterização das amostras em termos de sua estrutura porosa consiste na determinação de parâmetros como: a distribuição do tamanho de poros, o diâmetro médio, a densidade aparente, a densidade aparente do esqueleto e a porosidade.

A Figura 4.8 mostra a distribuição dos poros no gnaiss granítico, enquanto as Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a distribuição dos poros no mármore e no gnaiss milonítico, respectivamente.

As ações intempéricas promovem o aumento do diâmetro dos poros existentes e o conseqüente aumento da porosidade e do volume da intrusão de mercúrio.

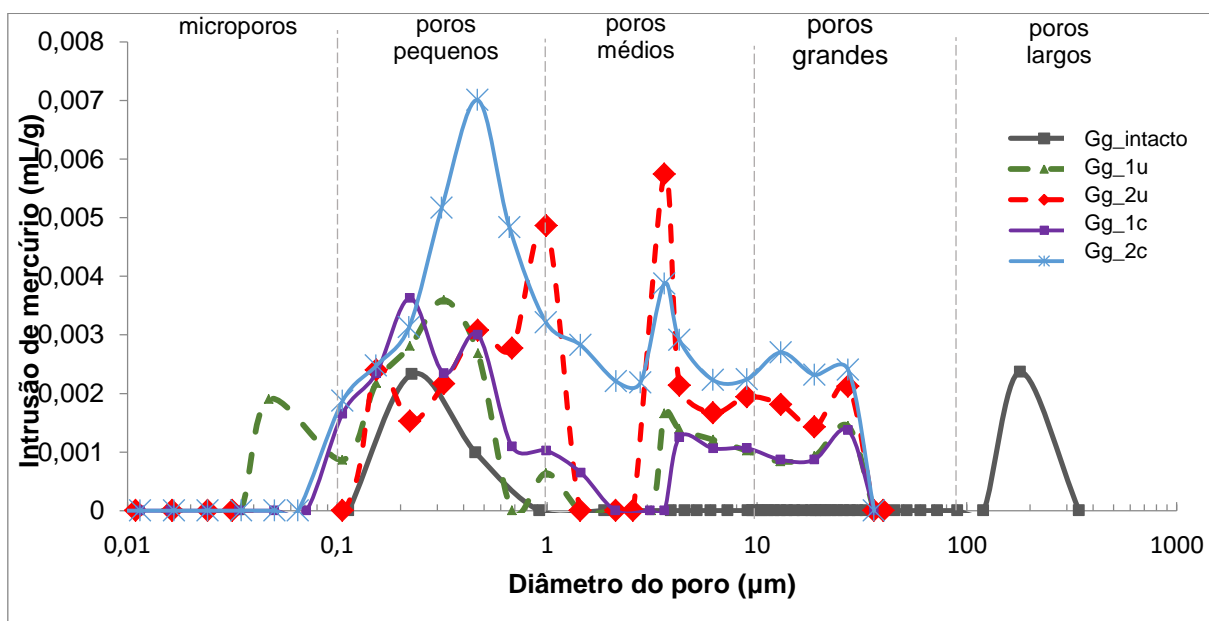


Figura 4.8 -Distribuição do Diâmetro dos Poros no gnaiss granítico. Fonte: Autora.

Legenda: Gg\_intacto: gnaiss granítico intacto; Gg\_1u: gnaiss granítico com 1 ano em ambiente urbano; Gg\_2u: gnaiss granítico com 2 anos em ambiente urbano; Gg\_1c: gnaiss granítico com 1 ano em região costeira; Gg\_2c: gnaiss granítico com 2 anos em região costeira.

O gnaise granítico intacto (Figura 4.8), possui duas faixas de diâmetros de poros, os largos e os pequenos. As amostra com o envelhecimento de 1 e 2 anos não apresentaram faixas de poros largos, indicando que poros com diâmetros superiores a 100 $\mu\text{m}$  foi encontrado pontualmente, provavelmente decorrente da heterogeneidade do geomaterial ou poros grandes na superfície da amostra.

O diâmetro dos poros, o volume e a intrusão de mercúrio aumentou no primeiro ano de envelhecimento, com um aumento adicional no segundo ano. Os aumentos mais acentuados deram-se no ambiente costeiro.

O mármore intacto mostrado na Figura 4.9, apresenta poros que variam de pequenos a grande, em três intervalos definido. Com o envelhecimento natural das rochas, há um aumento subsequente no volume de intrusão de mercúrio indicando o surgimento de novos poros e o aumento do diâmetro dos poros existentes, predominando no intervalo com diâmetros entre 1 e 40  $\mu\text{m}$ .

O envelhecimento costeiro no mármore mostrou-se mais pronunciado do que o urbano.

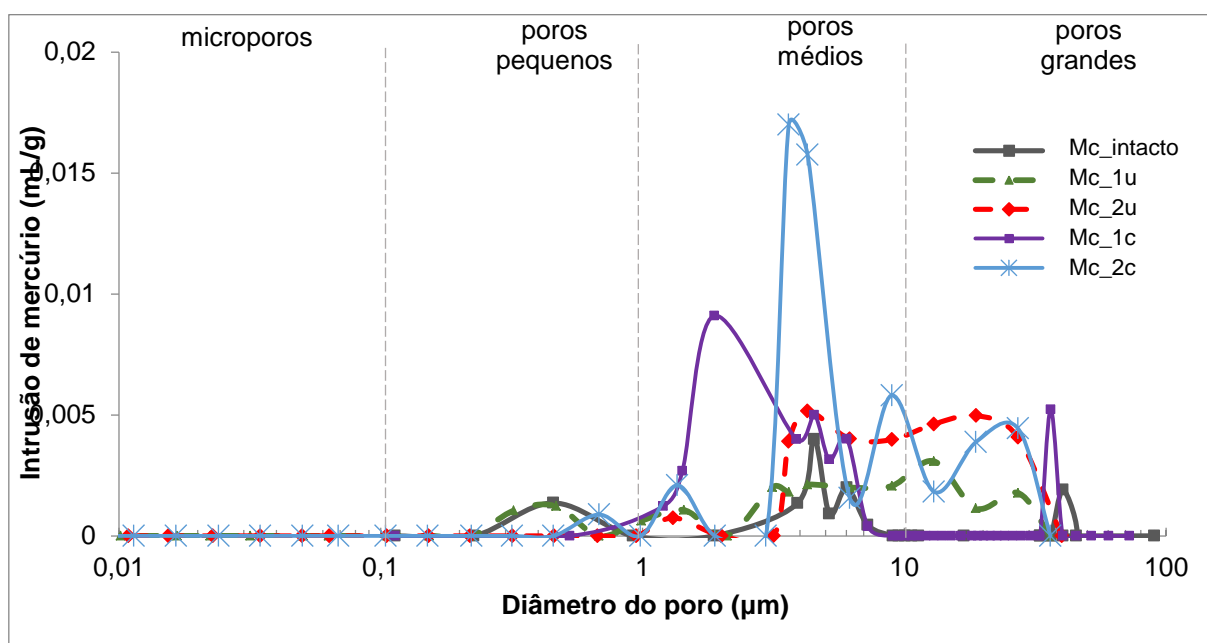


Figura 4.9 -Distribuição do Diâmetro dos Poros no Mármore. Fonte: Autora

Legenda: Mc\_intacto:mármore calcítico intacto; Mc\_1u:mármore calcítico com 1 ano em região urbana; Mc\_2u: mármore calcítico com 2 anos em região urbana; Mc\_1c: mármore calcítico com 1 ano em região costeira; Mc\_2c: mármore calcítico com 2 anos em região costeira.

Na Figura 4.10, as amostras de gnaise milonítico intacto e envelhecida naturalmente, possuem poros com diâmetros entre 0,03 a 40  $\mu\text{m}$ , nos intervalos

classificados como microporos, poros pequenos, médios e grandes. Com o envelhecimento, não foi notado o aparecimento de diâmetros superiores ou inferiores aos existentes na rocha intacta. Há um incremento da intrusão de mercúrio, indicando o aumento de poros e da porosidade no intervalo existente, destacando-se o aumento da intrusão para o ambiente urbano.

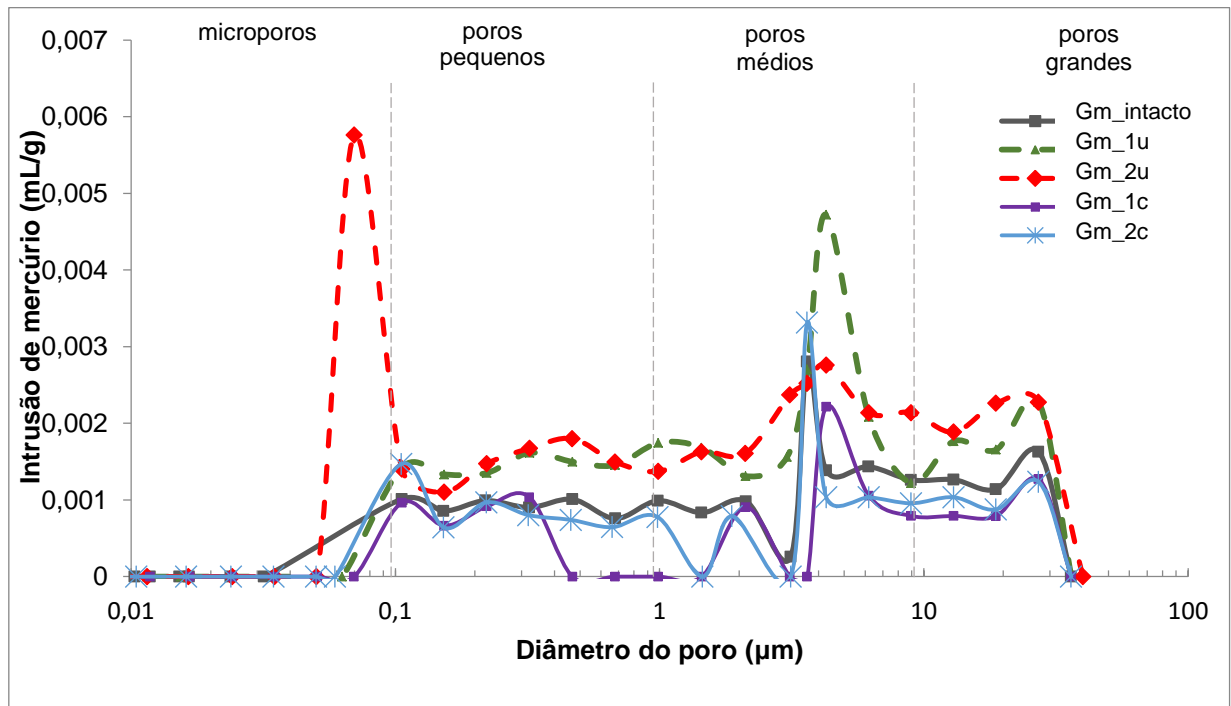


Figura 4.10 -Distribuição do Diâmetro dos poros no gnaisse milonítico. Fonte:Autora

Legenda: Gm\_intacto:gnaisse milonítico intacto; Gm\_1u: gnaisse miloníticocom 1 ano em região urbana; Gm\_2u: gnaisse miloníticocom 2 anos em região urbana; Gm\_1c: gnaisse milonítico com 1 ano em região costeira; Gm\_2c: gnaisse miloníticocom 2 anos em região costeira.

Os resultados da porosimetria para o envelhecimento natural em ambiente urbano são mostrados na Tabela 4.4 e os resultados para o envelhecimento natural em ambiente costeiro são apresentados na Tabela 4.5.

O gnaisse granítico intacto teve intrusão de volume de 0,0017 ml/g de mercúrio e a porosidade de 0,44%. Após o envelhecimento em área urbana por 2 anos foi registrado o volume de 0,0057 ml/g e a porosidade de 0,71% e, 0,0070 ml/g com a porosidade de 1,71% para o mesmo tempo na área costeira.

Entre as rochas estudadas, o mármore calcítico apresentou a maior intrusão após o envelhecimento natural. Com valor de 0,0045 ml/g de intrusão para a rocha intacta e intrusão de 0,0049 ml/g para 2 anos de envelhecimento em área urbana e, intrusão de 0,0157 ml/g para a área costeira. Isso representa um percentual de

349% de acréscimo de intrusão de mercúrio entre o mármore intacto e após 2 anos de área costeira.

No gnaisse granítico e no mármore calcítico, as maiores intrusões de mercúrio foram observadas para o envelhecimento na região litorânea, isso mostra o efeito danoso desta região.

O gnaisse milonítico teve o maior volume de intrusão de mercúrio para o envelhecimento na área urbana em 2 anos, totalizando 0,0057 ml/g e uma porosidade de 1,27%. Os resultados obtidos para a rocha intacta foram de 0,0028 ml/g com a porosidade de 0,66% e, um volume de mercúrio de 0,0033 ml/g com a porosidade de 0,96%, para o envelhecimento em área costeira.

A PIM apontou um aumento geral da porosidade com 2 anos de envelhecimento em todas as rochas, independente do ambiente (Figuras 4.8, 4.9 e 4.10). Aumento similar foi notado na porosidade aparente e absorção aparente dos litotipos, mostrados nas Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4. Ressalta-se que a petrografia indica que os litotipos possuem microfissuras intragranular, e que o gnaisse granítico e o mármore calcítico apresentam microfissuras intergranulares (Figuras 3.4, 3.5 e 3.6), que sofrem aumento com o efeito dos agentes intempéricos.

Com o envelhecimento natural, o mármore e o gnaisse granítico apresentaram aumento gradual na intrusão de mercúrio e no diâmetro médio dos poros, ocorrido em virtude do surgimento de novas faixas de poros por lixiviação de minerais pela chuva, variação de temperatura e sais que se cristalizam nos poros, expandem-se e geram tensões aumentando o diâmetro destes. Estudos de Benavente et al. (2004) e Yu e Oguchi (2010) indicam que soluções salinas podem vir de fontes externas como sais naturais ou descargas antrópicas, como spray marinho, pesticidas e os resíduos do combustão de combustíveis fósseis, induzindo a um aumento da porosidade e capilaridade.

Aumento similar do volume de poros e da intrusão de mercúrio foi observado no gnaisse milonítico, porém o diâmetro médio dos poros não sofreu grandes variações. A relação entre a porosidade e a densidade obtida pela PIM é discutida mais adiante, no item 4.4.

Tabela 4.2 -Porosimetria (envelhecimento urbano)

| Parâmetros                    | (Gg_u)  |        |        | (Mc_u)  |        |         | (Gm_u)  |        |        |
|-------------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|
|                               | intacto | 1ano   | 2anos  | intacto | 1ano   | 2anos   | intacto | 1ano   | 2anos  |
| Volume de intrusão (ml/g)     | 0,0017  | 0,0041 | 0,0057 | 0,0045  | 0,0030 | 0,0049  | 0,0028  | 0,0047 | 0,0057 |
| Diâmetro médio ( $\mu$ m)     | 0,5510  | 0,4268 | 4,9542 | 6,3872  | 6,4943 | 11,6396 | 3,3705  | 4,7757 | 3,6559 |
| Densidade aparente (g/ml)     | 2,4451  | 2,3505 | 2,0344 | 2,5155  | 2,6094 | 2,5545  | 2,3728  | 2,3576 | 2,2139 |
| Densidade do esqueleto (g/ml) | 2,4486  | 2,3735 | 2,0418 | 2,5640  | 2,6299 | 2,5867  | 2,3885  | 2,3839 | 2,2423 |
| Porosidade                    | 0,4416  | 0,9704 | 0,7102 | 1,0912  | 0,7799 | 1,2448  | 0,6563  | 1,1052 | 1,2671 |

Os valores da porosimetria das amostras intactas estão mantidos para possibilitar uma análise mais adequada das modificações dos parâmetros da porosidade com o envelhecimento natural das amostras.

Tabela 4.3 -Porosimetria (envelhecimento costeiro)

| Parâmetros                    | (Gg_c)  |        |        | (Mc_c)  |        |        | (Gm_c)  |        |        |
|-------------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
|                               | intacto | 1ano   | 2anos  | intacto | 1ano   | 2anos  | intacto | 1ano   | 2anos  |
| Volume de intrusão (ml/g)     | 0,0017  | 0,0036 | 0,0070 | 0,0045  | 0,0102 | 0,0157 | 0,0028  | 0,0022 | 0,0033 |
| Diâmetro médio ( $\mu$ )      | 0,5510  | 0,5912 | 1,3197 | 6,3872  | 5,6751 | 7,1520 | 3,3705  | 4,6149 | 2,5345 |
| Densidade aparente (g/ml)     | 2,4451  | 2,2782 | 2,4393 | 2,5155  | 2,4548 | 2,2936 | 2,3728  | 1,9070 | 1,6131 |
| Densidade do esqueleto (g/ml) | 2,4486  | 2,2971 | 2,4817 | 2,5640  | 2,5142 | 2,3791 | 2,3885  | 1,9150 | 1,6190 |
| Porosidade                    | 0,4416  | 0,8235 | 1,7102 | 1,0912  | 1,605  | 3,5945 | 0,6563  | 0,6130 | 0,9641 |

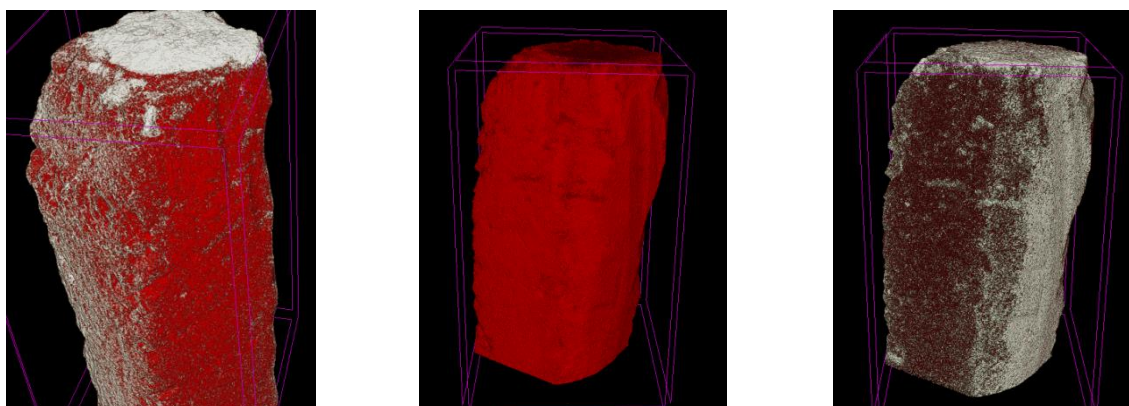
### Microtomografia

A análise das imagens fornece uma grande quantidade de dados, oferecendo informações importantes para caracterizar o meio poroso e o esqueleto sólido.

As imagens foram obtidas com uma resolução de 6  $\mu\text{m}$ , a parte da rede porosa com diâmetros inferiores não foi analisada nessa técnica. Esta resolução foi considerada apropriada, uma vez que a literatura aponta que o diâmetro crítico para que a água seja drenada e percole livremente nos poros é de 5  $\mu\text{m}$ . Em diâmetros inferiores água é impulsionada pelas forças capilares e há a movimentação de vapores (Winkler,1997; Wu *et al.* 2005; Yu e Oguchi, 2010; Zhang *et al.* 2005).

Para as amostras envelhecidas, foram analisadas as amostras que apresentaram resultados mais expressivos em relação a degradação acelerada em laboratório (Figura 3.8) e ao tratamento térmico, destacando-se o mármore tratado a 750°C e a pedra madeira verde lixiviada por 210 dias no referido equipamento.

Nessa sessão são mostradas nas Figuras 4.11 e 4.12 as respectivas análises tridimensionais das amostras intactas do mármore calcítico e do gnaisse milonítico.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.11 -Mármore calcítico intacto analisado por micro-CT. a) Modelo 3D b) Fase sólida (esqueleto) c) Fase porosa. Fonte: Autora.

O mármore intacto apresenta a superfície da placa porosa decorrente da rugosidade acentuada, indicada pela cor branca na Figura 4.11 (a). Foram geradas imagens e analisada a fase sólida (Figura 4.11(b)) e a fase porosa (Figura 4.11 (c)). A porosidade foi calculada considerando-se o volume 3-D gerado após a segmentação das imagens.

A amostra apresenta um volume total de 206,50  $\text{mm}^3$  e um volume de poros de 32,07  $\text{mm}^3$ , perfazendo uma porosidade total de 15,53%, onde 13,48% apresentam-

se conectados, sendo classificados como porosidade aberta e 2,05% poros fechados.

A análise tridimensional não observou uma orientação preferencial para a rede de poros do mármore, condizente com a descrição petrográfica, onde indica que o mármore é uma rocha maça, de granulação média a fina, com microfissuras intergranulares. Considerando que não há uma orientação dos grão minerais (Figura 4.12 (b)), as microfissuras nos seus contatos (Figura 3.5) não seguem um arranjo definido.

Na Figura 4.12 é apresentado o gnaiss milonítico.

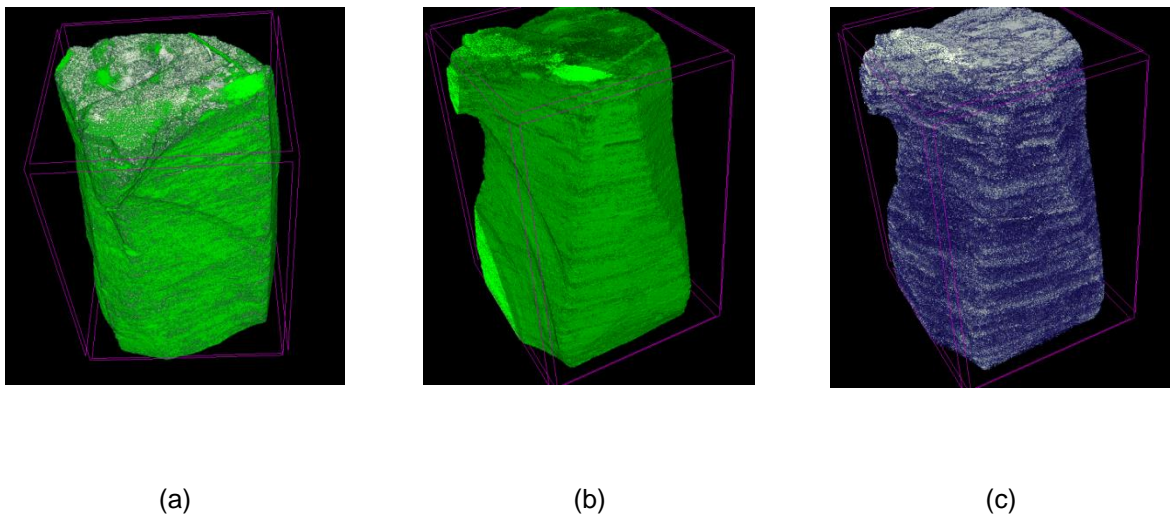


Figura 4.12 -Gnaiss milonítico analisado por micro-CT. a) Modelo 3-D b) Fase sólida (esqueleto) c) Fase porosa. Fonte: Autora.

O gnaiss milonítico é uma rocha com foliações, sua estrutura bandada consiste na alternância de laminações de camadas minerais distintas, mostrada nas Figuras 3.6 e 4.12 (a,b) .

A partir da reconstrução das seções transversais, foram geradas imagens 3-D e analisada a fase sólida (Figura 4.12 (b)) e a fase porosa (Figura 4.12 (c)).

A porosidade foi calculada considerando-se o volume 3-D gerado após a segmentação das imagens. Os resultados obtidos indicam que a amostra apresenta um volume total de 383,14 mm<sup>3</sup>, volume de poros de 40,74 mm<sup>3</sup>, uma porosidade total de 10,63%, com a rede de poros, seguindo uma orientação preferencial e concentrada paralela às foliações.

A porosidade aberta representa 7,55% e os 3,08% restantes são classificados como poros fechados.

Com a micro-CT foram obtidas a porosidade total, porosidade aberta e fechada e avaliada a distribuição da rede de poros em diâmetros classificados como médios e grandes. Por outro lado, a porosimetria por intrusão de mercúrio avalia microporos com diâmetros a partir de  $0,1\mu\text{m}$  até poros pequenos ( $1\mu\text{m}$ ), não fornecendo informações de poros fechados e as interligações, ou seja, faixas de poros distintas da micro-CT.

#### 4.1.2 – Resistência Mecânica

##### Ensaio de Compressão

A Figura 4.13 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão das rochas intactas e submetidas ao envelhecimento natural urbano. Na Figura 4.14 são plotados os resultados do envelhecimento em área costeira.

O gnaiss milonítico apresenta foliação e lineação dos minerais, implicando na realização do ensaio de compressão com a aplicação de carga paralela (II) e transversal (t) às foliações.

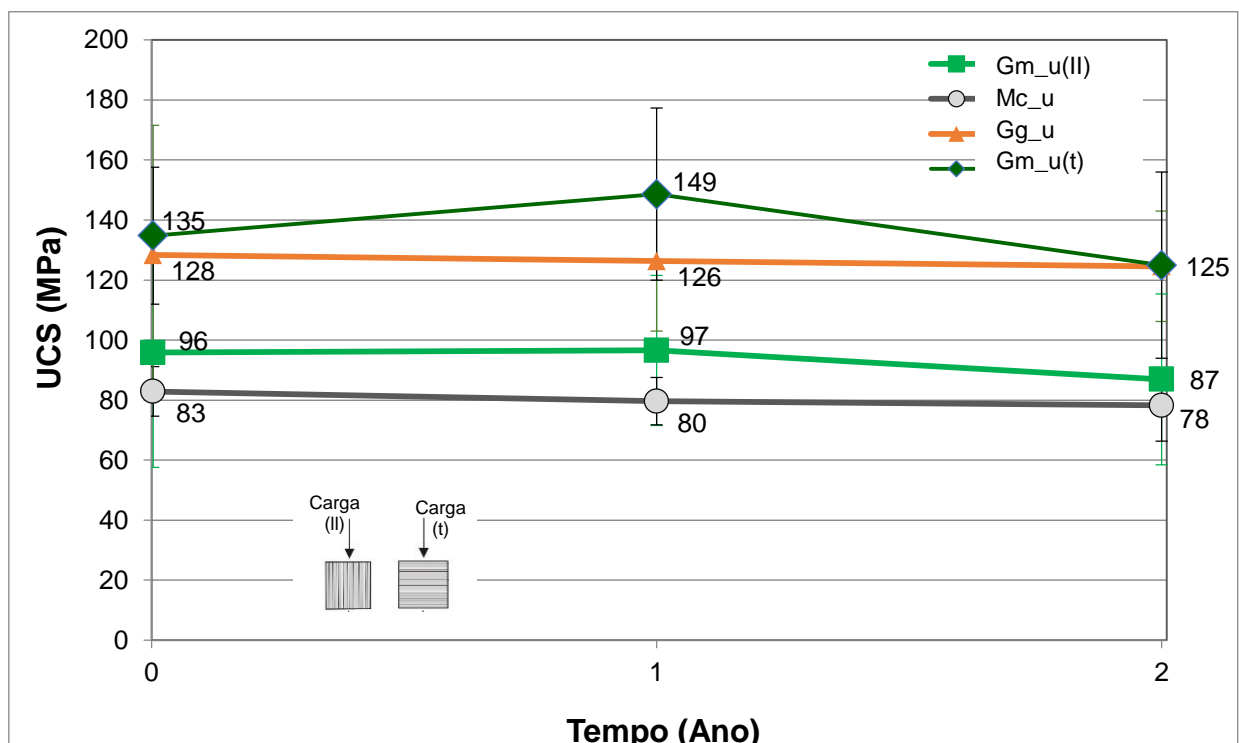


Figura 4.13 -UCS – Envelhecimento Urbano. Fonte: Autora

O gnaiss granítico e o gnaiss milonítico atendem aos requisitos mínimos da norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) mostrada na Tabela 2.2, onde estabelece



que a resistência à compressão da rocha deve ser superior a 100 MPa. Considerando-se o desvio padrão dos resultados obtidos no gnaiss granítico, pode-se afirmar que ambos os gnaisses atendem a ASTM C615 (2018), cumprindo o requisitos mínimo 131 MPa, para exportação. A norma brasileira não estabelece um valor mínimo para as rochas carbonáticas.

Em relação aos resultados de compressão para a rocha intacta, pode-se verificar que o gnaiss milonítico apresentou o valor médio, de 135 MPa para a carga aplicada transversal às foliações, e 97 MPa para a carga aplicada de forma paralela. A resistência à compressão do gnaiss granítico intacto foi de 128 MPa, enquanto o mármore 83 MPa.

A redução da resistência do gnaiss granítico e do mármore com 1 ano de exposição são discretas, assim como o incremento sofrido pelo gnaiss milonítico, podendo ser atribuído em ambos os casos às pequenas heterogeneidades entre as amostras de mesma litologia.

Ao término do período de 2 anos de envelhecimento (Figura 4.13), todos os litotipos reduziram as suas resistências em relação ao estado intacto. O gnaiss granítico reduziu a sua resistência em 3%, o mármore 6% e o gnaiss milonítico apresentou a maior perda de resistência, com a diminuição de 8%.

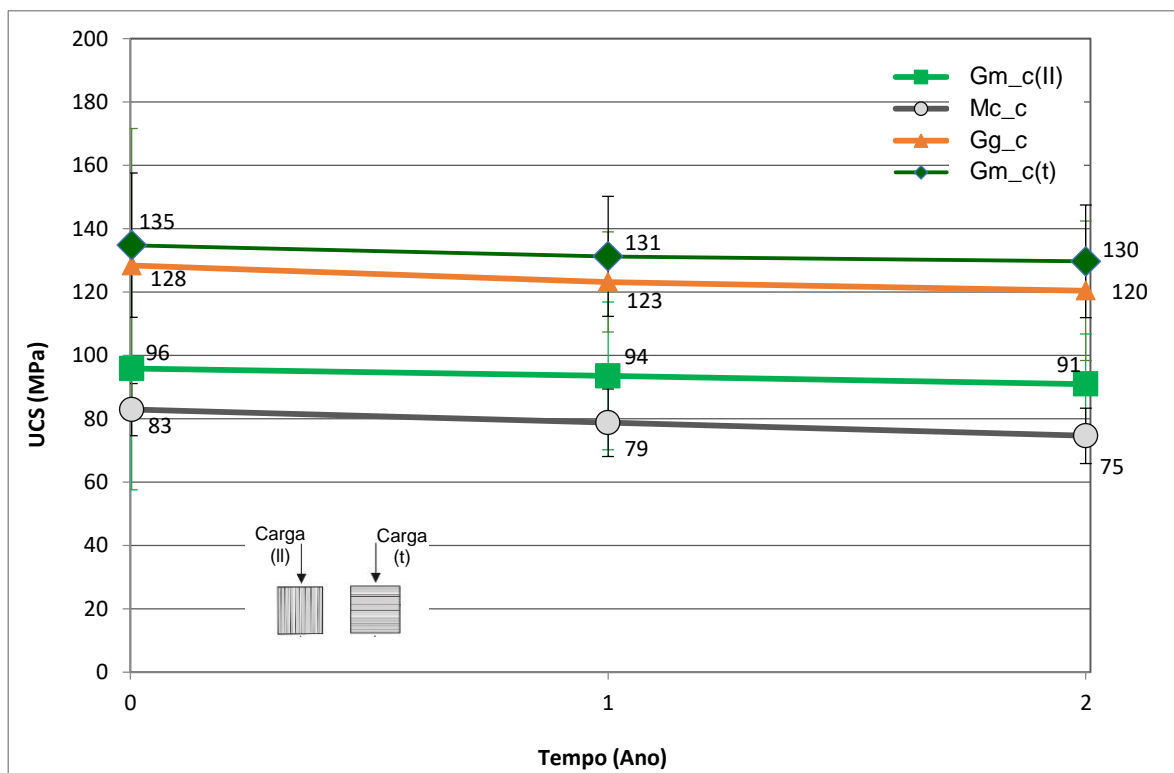


Figura 4.14 -UCS – Envelhecimento Costeiro. Fonte: Autora

Ao comparar o resultado da rocha intacta aos resultados da compressão após 2 anos de envelhecimento em ambiente costeiro (Figura 4.14), verificou-se que as amostras sofreram alteração, mostrando a diminuição da resistência.

O gnaise granítico reduziu a sua resistência à compressão em 6%, o mármore apresentou a maior perda, um decréscimo de 10%, e o gnaise milonítico, 4%. O mármore e o gnaise granítico mostraram-se mais propensos às alterações em ambiente costeiro. Germinario *et al.* (2017) e Basu *et al.* (2020) discutem o efeito do clima no envelhecimento de rochas e descrevem vários padrões de deterioração, como descamação, pulverização, esfoliação, erosão e eflorescência, com diferentes intensidades relacionadas ao ambiente.

A velocidade de propagação de ondas apresentou maiores valores no gnaise milonítico, assim como maior resistência mecânica. O mármore apresentou maior  $V_p$  do que o gnaise granítico, devido provavelmente ao estado microfissural mais acentuado do gnaise granítico. Liu *et al.* (2015) descrevem que o maior volume de poros e microfissuras produz a atenuação da velocidade de propagação da onda longitudinal.

A porosidade obtida na PIM mostrou-se sensível ao aumento da quantidade de poros ocorrida nas amostras envelhecidas, sendo inversamente proporcional a resistência à compressão.

### *Resistência ao Impacto de Corpo Duro*

Os testes de resistência ao impacto de corpo duro, permitem mensurar o comportamento das rochas às ações mecânicas instantâneas aplicadas na superfície do revestimento, refletindo a coesão e ao grau de imbricamento dos cristais de minerais formadores da rocha.

As amostras foram testadas com as espessuras de aplicação na obra. Os mármore são comercializados com a espessura de 2cm, as placas do gnaise granítico e do gnaise milonítico são comercializados com espessura de 3cm. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.7. A altura representa a média das alturas de ruptura utilizadas no ensaio.

O ensaio tem importância para rochas a serem empregadas nos revestimentos de pisos, paredes até 1,5 metros de altura, degraus, soleiras, entre outros. Quanto

maiores forem os valores das alturas encontrados nos resultados, maior será a sua resistência ao impacto.

Tabela 4.4 -Impacto de Corpo Duro

|                             | <b>Gnaisse granítico</b> |      | <b>Mármore</b> |      | <b>Gnaisse milonítico</b> |      |
|-----------------------------|--------------------------|------|----------------|------|---------------------------|------|
|                             | Altura (m)               | W(J) | Altura (m)     | W(J) | Altura (m)                | W(J) |
| Rocha intacta               | 0,48                     | 5    | 0,43           | 4    | 0,47                      | 5    |
| 1 ano ambiente urbano       | 0,48                     | 5    | 0,42           | 4    | 0,47                      | 5    |
| 2 anos ambiente urbano      | 0,47                     | 5    | 0,38           | 4    | 0,45                      | 4    |
| 1 ano em ambiente costeiro  | 0,48                     | 5    | 0,42           | 4    | 0,45                      | 5    |
| 2 anos em ambiente costeiro | 0,47                     | 5    | 0,38           | 4    | 0,45                      | 4    |

\*W=energia de ruptura

A altura de ruptura média obtida para a rocha intacta foi de 0,48m para o gnaisse granítico, com uma energia de ruptura de 5J. O gnaisse milonítico apresentou uma altura de 0,47m e uma energia de ruptura de 5J. A menor altura de ruptura foi 0,43m para a energia de ruptura de 4 J, medida no mármore, que apresenta a placa com menor espessura.

Os resultados para 2 anos de envelhecimento das rochas ornamentais foram os mesmos, independente do local de exposição do material.

Considerando que a norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) estabelece para o uso da rocha de revestimento a altura mínima de queda de 0,30m, pode-se afirmar que os litotipos estudados atendem ao requisito.

A perda de resistência das amostras apresentou percentuais próximos por compressão (Figuras 4.13 e 4.14) e energia de ruptura por impacto de corpo duro (Tabela 4.7). Em ambos, o mármore apresentou a maior perda de resistência frente ao envelhecimento em ambiente costeiro. Uma análise a ser considerada é que o aumento da espessura da placa ocasiona um aumento da energia necessária para a ruptura da rocha ornamental, o que deve ser observado na análise, devido aos gnaisses ter espessura de aplicação de 3 cm.

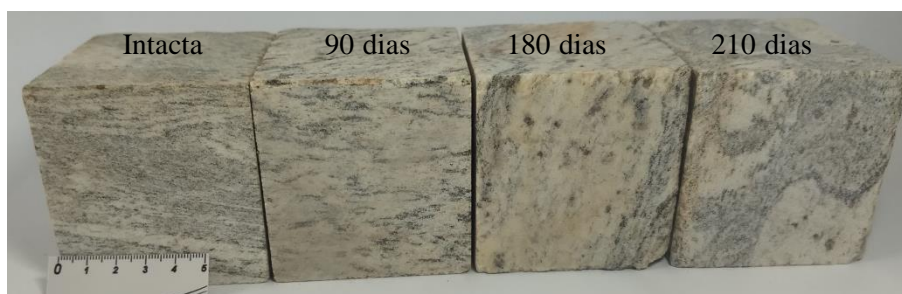
## 4.2 – Envelhecimento de Laboratório

O envelhecimento acelerado em laboratório foi realizado em câmara de degradação no equipamento de lixiviação contínua desenvolvido na UENF, por um período de 210 dias. As rochas foram acondicionadas e submetidas aos ciclos com 1 hora de lixiviação com água deionizada à 70°C, 1 hora de lixiviação com água em 25°C, congelamento na temperatura de -5°C por 6 horas, totalizando 630 ciclos.

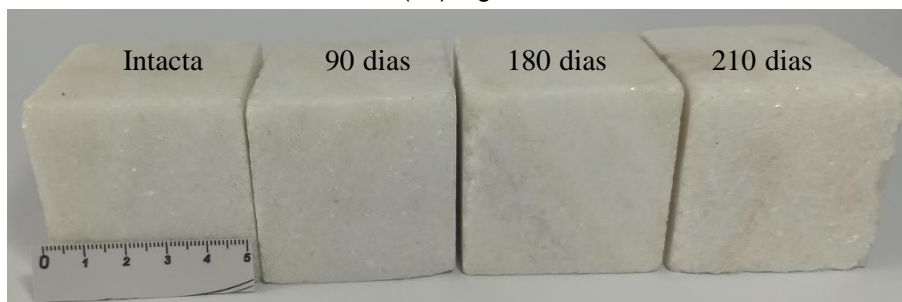
A análise dos índices físicos e propriedades mecânicas das rochas com 90 dias, 180 e 210 dias em câmara de degradação, perfazendo 180, 540 e 630 ciclos são apresentadas.

A inspeção visual das rochas ornamentais mostradas na Figura 4.15, não revelou alteração significativa em relação a rocha intacta. O gnaisse granítico e o mármore mostraram uma discreta perda de brilho e a coloração amarelo variegado em algumas peças.

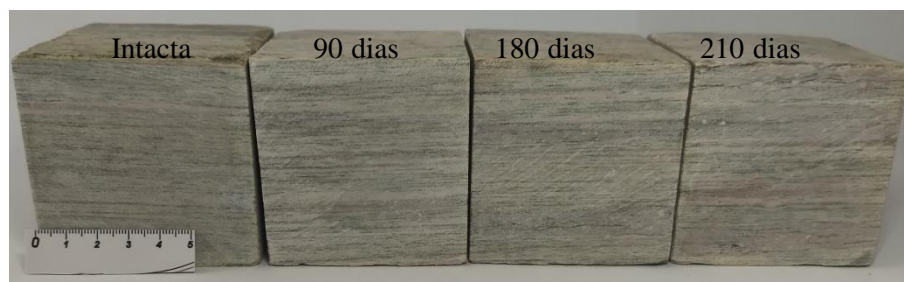
O gnaisse milonítico apresentou a coloração amarelo variegado na superfície de algumas peças e sinais de deslocamento das camadas superficiais, mostrado na Figura 4.16, evidenciando o enfraquecimento da superfície e a perda de massa, deixando à mostra a camada subjacente.



(a1) Gg\_L



(b1) Mc\_L



(c1) Gm\_L

Figura 4.15 -(a1), (b1) e (c1) Rochas com envelhecimento Acelerado em Laboratório. Fonte: Autora



Figura 4.16 – Gnaise milonítico envelhecido em laboratório. Fonte: Autora

#### 4.2.1 – Análise microestrutural

##### *Petrografia*

A análise petrográfica das rochas intactas havia apontado que o gnaise granítico apresenta alto grau de fissuração e microfissuras intra e intercristalinas preenchidas, o gnaise milonítico apresenta fissuras intracristalinas, e o mármore apresenta um alto grau de microfissuramento, com as microfissuras livres de preenchimento. As lâminas petrográficas (Figura. 4.17) avaliadas após o processo de lixiviação não indicaram mudanças no estado de alteração.

Corroborando aos resultados da petrografia das rochas intactas, a lâmina petrográfica do gnaise granítico lixiviado (Fig. 4.17 (a)) apresenta cristais de biotita (5%) com superfícies de contato planar entre os grãos, em processo avançado de alteração por muscovitização, gerando cristais de muscovita (2%) e óxido/hidróxido de ferro (2%) impregnado nos planos de clivagem do mineral e/ou preenchendo microfissuras. Os cristais de muscovita ocorrem substituindo cristais de biotita e por

vezes encontram-se com bordas de alteração para argilominerais. Os cristais de granada (3%), exibem superfícies de contato curvilíneas entre os grãos, microfissuras intra e intercrystalinas sem preenchimento e/ou preenchidas por óxido/hidróxido de ferro e inclusões de quartzo.

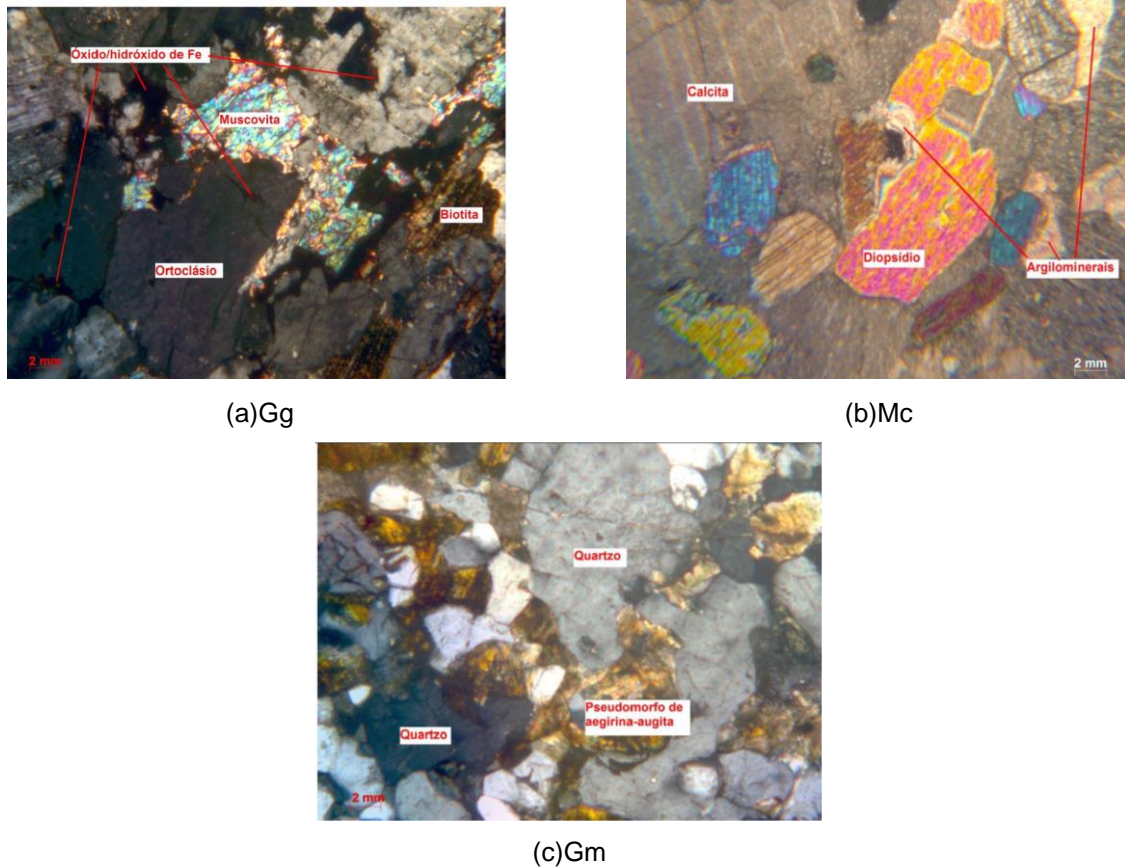


Figura 4.17 -Fotomicrografia das Lâminas Petrográficas da Rocha Envelhecidas em Laboratório. Fonte: Autora

A Figura. 4.17 (b) exibe os minerais constituintes do mármore, com os cristais de diopsídio (9%) de hábito granular, microfissuras intra e intergranulares sem preenchimento, com as superfícies de contato planar e curvilínea, em processos de alteração para argilominerais.

No gnaisse milonítico (Figura 14.17 (c)) são visualizados os cristais de quartzo (30%) de granulação fina a granulação média, com formas alongadas (fitas de quartzo). Exibem microfissuras intra e intercrystalinas preenchidas por argilominerais (traços) e óxido/hidróxido de ferro (6%) e superfícies de contato planar e irregular

entre os grãos. Os cristais de aegirina-augita, possuem granulação fina e encontram-se em estágio avançado de alteração para hornblenda (uralitização) e/ou para minerais opacos (2%). Exibem microfissuras intracristalinas sem preenchimento ou preenchidas por material ferruginoso, superfícies de contato irregular entre os grãos e em alguns locais estão orientados segundo uma direção preferencial na rocha.

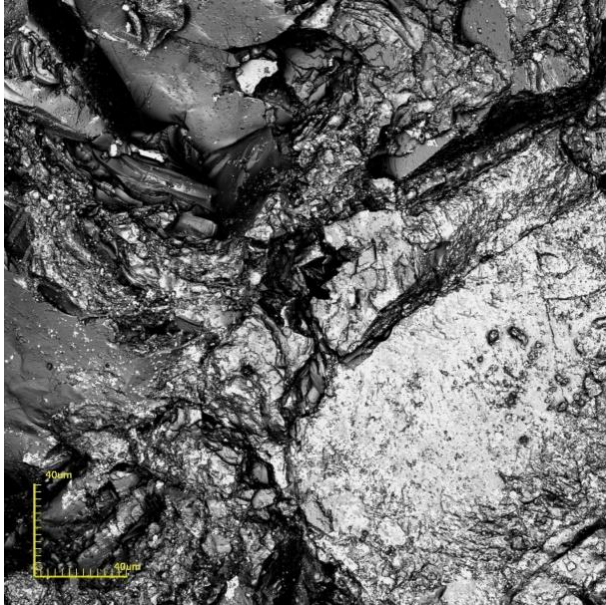
### *Microscopia*

A microscopia confocal foi utilizada para avaliação das condições texturais e estruturais da rocha ao término dos ciclos de lixiviação, verificando desta forma o seu envelhecimento. Foram obtidas imagens planas e tridimensionais da superfície, conforme as Figura 14.18, e comparada à rocha intacta.

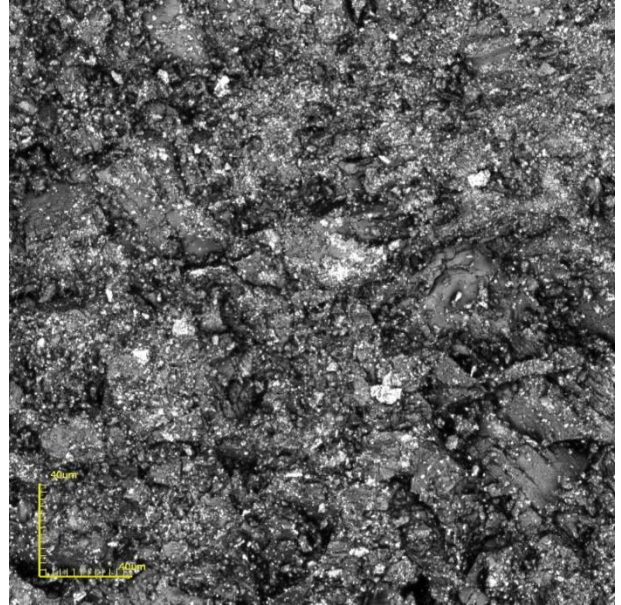
A superfície lixiviada do granito e da pedra madeira (Fig. 14.18(b) e (l)) exhibe microgranulação, sinalizando que o mineral sofreu alteração, indicando a perda de coesão da superfície, que conduz ao desprendimento do material sob a forma de pó e/ou pequenas partículas.

O processo de degradação acelerado gerou microfissuras na superfície do mármore, mostrada nas Figuras 14.18(f) e (h), conforme observado na Figura 4.17 (b) da petrografia. Essas fissuras podem ser decorrentes da mudança de volume dos argilominerais após saturação, e das tensões de expansão geradas pelo congelamento da água nos poros do mármore durante os processos cíclicos de degradação. Resultados similares foram observados por Jimenez e Scherer (2004) e Germinario *et al.* (2017).

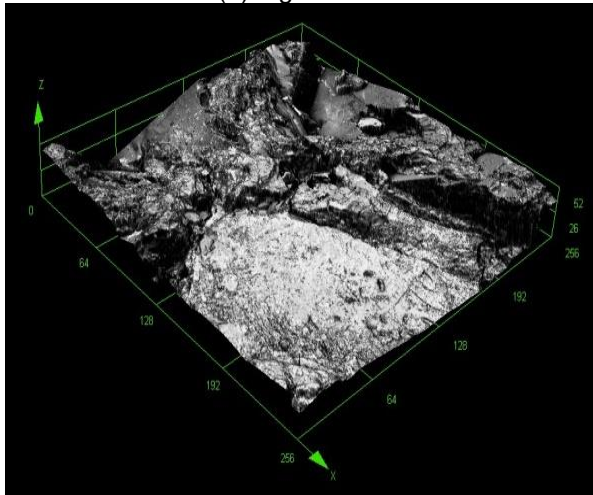
Na microscopia não foi possível visualizar o deslocamento das camadas do gnaisse milonítico.



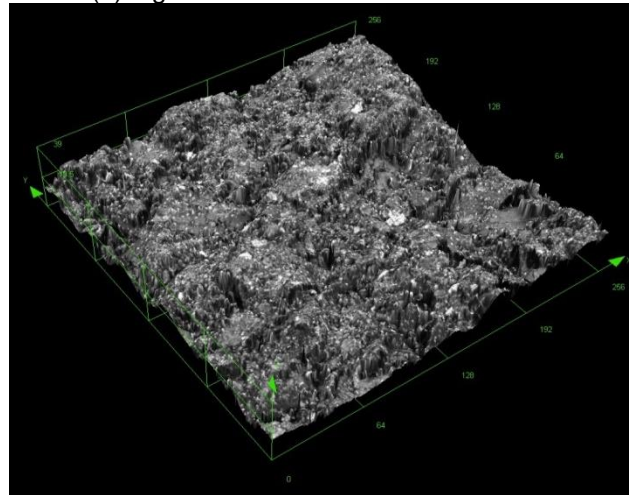
(a) Gg intacto.



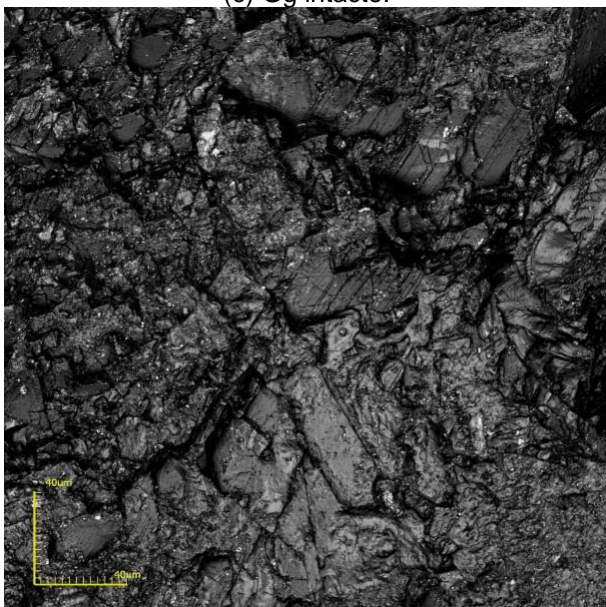
(b) Gg 210 dias de env. de laboratório.



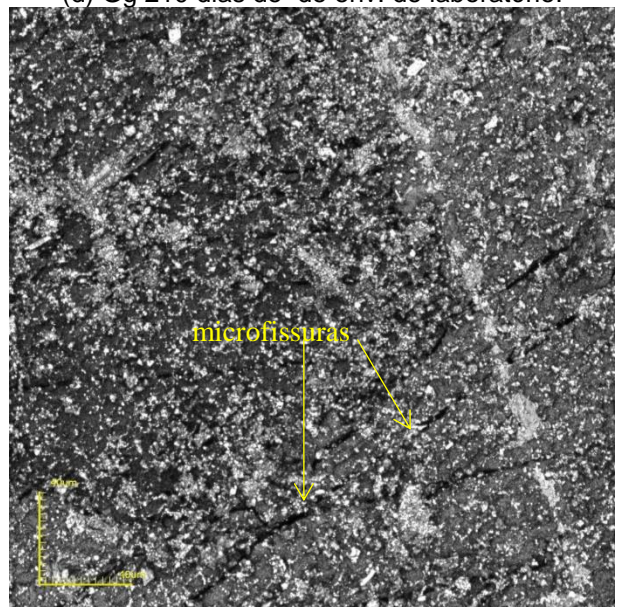
(c) Gg intacto.



(d) Gg 210 dias de de env. de laboratório.

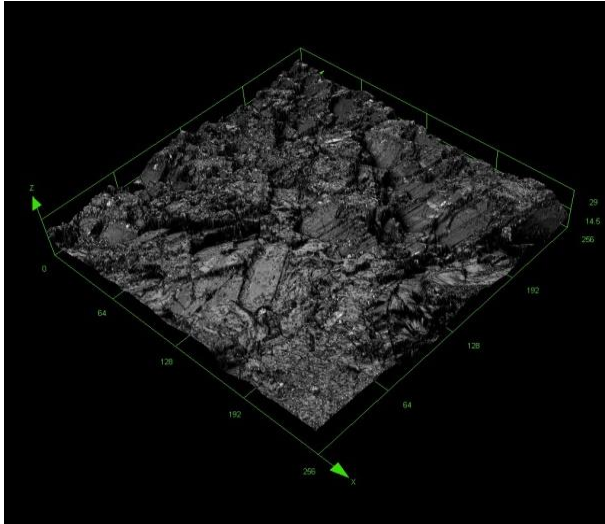


(e) Mc intacto.

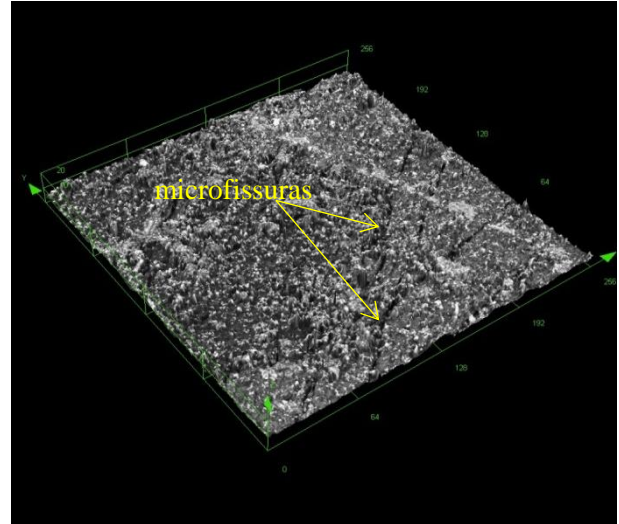


(f) Mc 210 dias de env. de laboratório.

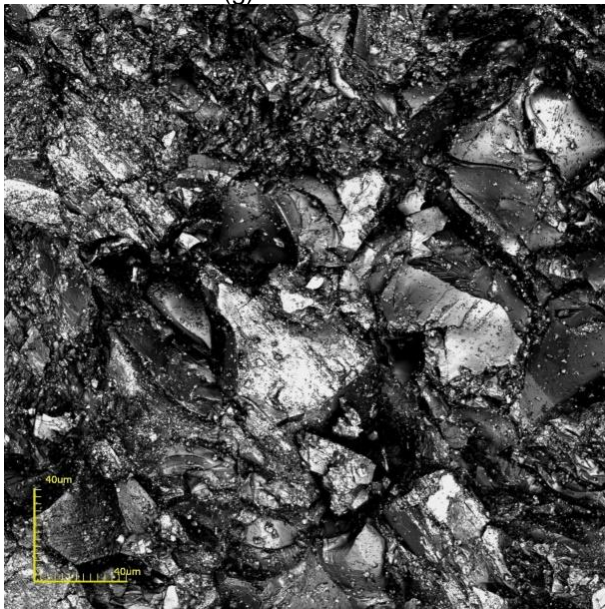




(g) Mc intacto.



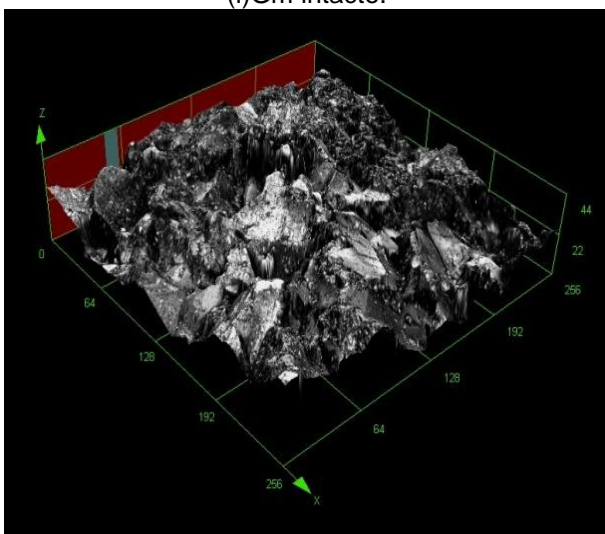
(h) Mc 210 dias de env. de laboratório.



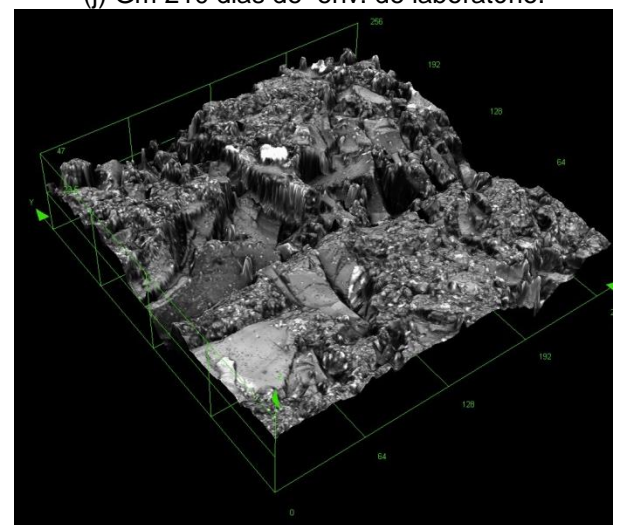
(i) Gm intacto.



(j) Gm 210 dias de env. de laboratório.



(k) Gm intacto.



(l) Gm 210 dias de env. de laboratório.

Figura 4.18 - Rochas após envelhecimento de laboratório. Fonte: Autora  
 (a), (b), (e), (i), (j) e (f) Fotomicrografia 2-D; (c), (d), (g), (h), (k) e (l) Fotomicrografia 3-D.

### Índices Físicos

Os índices físicos das três litologias após 210 dias de envelhecimento de laboratório são mostrados na Tabela 4.8. As propriedades das rochas intactas foram mantidas para facilitar a interpretação das mudanças ocorridas na densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água.

Tabela 4.5 - Índices Físicos das Rochas após 210 dias de envelhecimento de laboratório.

|                       |               | Densidade aparente<br>[ $\rho_a$ ] (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidade<br>aparente [ $\eta_a$ ] (%) | Absorção de água<br>aparente [ $\alpha_a$ ] (%) |
|-----------------------|---------------|---|---|---|
| gnaisse<br>granítico  | Rocha intacta | 2.612±52  | 0,93±0,14                               | 0,35±0,06                                       |
|                       | 90 dias       | 2.619±22  | 1,11±0,25                               | 0,42±0,10                                       |
|                       | 180 dias      | 2.639±72  | 1,10±0,22                               | 0,40±0,06                                       |
|                       | 210 dias      | 2.619±13  | 1,15±0,10                               | 0,44±0,04                                       |
| Mármore               | Rocha intacta | 2.721±24  | 0,60±0,18                               | 0,22±0,07                                       |
|                       | 90 dias       | 2.730±30  | 0,68±0,03                               | 0,28±0,01                                       |
|                       | 180 dias      | 2.725±30  | 0,70±0,10                               | 0,29±0,04                                       |
|                       | 210 dias      | 2.738±93  | 0,79±0,12                               | 0,30±0,04                                       |
| Gnaisse<br>milonítico | Rocha intacta | 2.591±10  | 0,95±0,13                               | 0,37±0,05                                       |
|                       | 90 dias       | 2.622±36  | 0,93±0,10                               | 0,35±0,03                                       |
|                       | 180 dias      | 2.604±12  | 0,98±0,03                               | 0,38±0,04                                       |
|                       | 210 dias      | 2.596±60  | 1,14±0,06                               | 0,43±0,02                                       |

As amostras com envelhecimento em laboratório mantiveram a densidade aparente com as variações dentro do desvio padrão. A porosidade aparente e a absorção de água apresentaram um discreto incremento.

Ao término dos ciclos de envelhecimento o gnaisse granítico aumentou na média 23% na porosidade aparente e 25% a absorção aparente podendo ser atribuído ao alto grau de fissuração da Figura 4.17 (a); o mármore aumentou na média 31% na porosidade aparente e 36% na absorção aparente devido as microfissuras intra e intergranulares sem preenchimento (Figura 4.17 (b) e Figura 4.18 (f) e (h)); o gnaisse milonítico aumentou na média de 20% na porosidade aparente e 16% a absorção aparente, podendo ser atribuída ao estágio avançado de alteração de minerais presentes e microfissuras provocadas pelo envelhecimento acelerado de laboratório.

O resumo gráfico dos índices físicos para o envelhecimento acelerado em laboratório encontra-se no Apêndice D.

### Velocidade de Propagação de Onda

Os testes de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foram realizados nas amostras com 90, 180 e 210 dias após envelhecimento de laboratório. A Figura 14.19 apresenta os resultados obtidos. No gnaisse milonítico, foram realizados ensaios no sentido paralelo (=) e transversal (t) às foliações.

A nomenclatura adotada para distinguir a rocha e a degradação acelerada em laboratório acompanha as iniciais adotadas para cada rocha, seguido da letra "L", referindo-se ao processo em laboratório, por exemplo:

- gnaisse granítico com degradação acelerada em laboratório: Gg\_L;
- mármore calcítico com degradação acelerada em laboratório: Mc\_L;
- gnaisse milonítico com degradação acelerada em laboratório: Gm\_L;

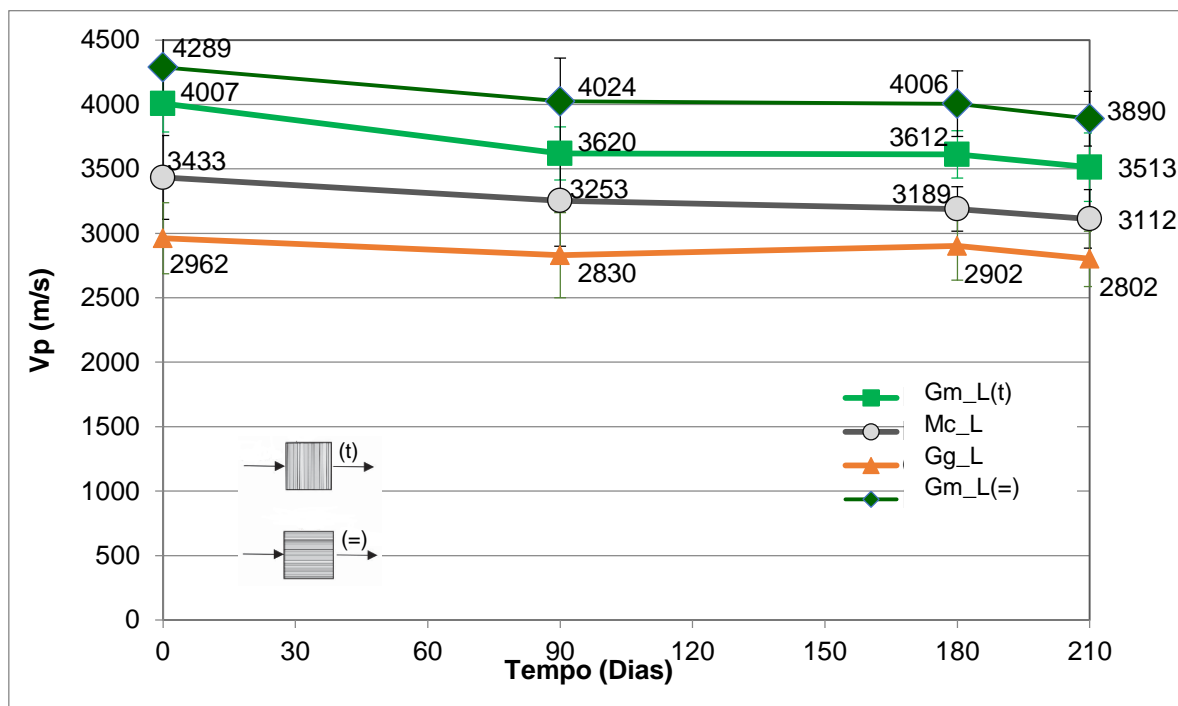


Figura 4.19 –Vp - Degradação Acelerada em Laboratório. Fonte: Autora

Os resultados apresentados na Figura 14.19 mostram que os três litotipos analisados apresentaram decréscimo na velocidade de propagação de ondas, indicando que ocorreu a degradação e mudanças microestruturais nas rochas.

Similar às Figuras 4.6 e 4.7 que apresentam a velocidade de propagação de ondas para o envelhecimento natural, a Figura 4.18 matém as velocidades de propagação de ondas maiores para o gnaisse milonítico, seguida do mármore e posteriormente do gnaisse granítico. A descrição petrográfica do item 3.1 e a rede de microfissuras (Figuras 3.4, 3.5 e 3.6), indicam que o gnaisse milonítico não apresenta microfissuras intergranulares, enquanto as demais rochas apresentam microfissuras inter e intragranular. O mármore apresenta baixo grau de alteração, enquanto o gnaisse granítico apresenta moderado grau de alteração. O maior microfissuramento no gnaisse granítico leva a atenuação dos valores de  $V_p$  ao percorrer a amostra. Fonseca *et al.* (2021) observou semelhante redução da  $V_p$  em litotipos com elevado grau de microfissuramento intra e intergranular.

Quando comparada a rocha intacta, ao término de 210 dias de degradação, o gnaisse granítico sofreu uma diminuição de 6% da velocidade de propagação de ondas, o mármore 9%, e o gnaisse milonítico 10% para as leituras paralelas às foliações e 12% para as leituras transversais. Os decréscimos registrados indicam que as alterações microestruturais na degradação em laboratório são superiores às sofridas no envelhecimento natural (Fonseca *et al.*,2001), podendo ser explicado pelo aumento da porosidade aparente e absorção aparente conforme Tabela 4.8.

Comparando as velocidades de propagação de ondas do envelhecimento natural em ambiente urbano e costeiro, ao envelhecimento em laboratório, é possível afirmar que para o mármore com as velocidades de propagação de 3.333 m/s e 3.226 m/s e o gnaisse milonítico com 4.024 m/s e 4.076 m/s em 2 anos de envelhecimento natural correspondem a aproximadamente 90 dias de degradação acelerada no equipamento de lixiviação contínua da UENF.

A diferença entre os valores iniciais da velocidade de propagação de ondas e os valores finais são relativamente pequenas, indicando que ocorreram mudanças microestruturais de pequena intensidade durante o envelhecimento acelerado em laboratório. Comportamento similar foi observado nos índices físicos (Tabela 4.8), com aumentos na média da porosidade e absorção aparente, no entanto, estes índices físicos se mantiveram abaixo de 1,15 e 0,44%, respectivamente.

## Porosimetria

A distribuição dos poros nas amostras com 90 e 210 dias após envelhecimento de laboratório são mostradas na Figura 4.20, 4.21 e 4.22. Os parâmetros da PIM são apresentados na Tabela 4.9.

O gnaiss granítico intacto (Figura 4.20), possui duas faixas de diâmetros de poros, os largos e os pequenos. As amostras com 90 e 210 dias apresentaram faixas de diâmetros que iniciam-se nos microporos, 0,03  $\mu\text{m}$ , até os poros grandes, medindo 40  $\mu\text{m}$ . A intrusão do volume de mercúrio aumenta com o tempo de envelhecimento da amostra em laboratório. Comparando com a porosidade aparente da Tabela 4.8, notou-se a convergência de resultados, com o incremento desta propriedade e também, conforme a Figura 4.17 (a), houve o alto grau de microfissuramento.

A Tabela 4.9 mostra o aumento da intrusão chegando ao volume de 0,0102 ml/g, porosidade de 2,5% e diâmetro médio dos poros de 2,7097  $\mu\text{m}$ .

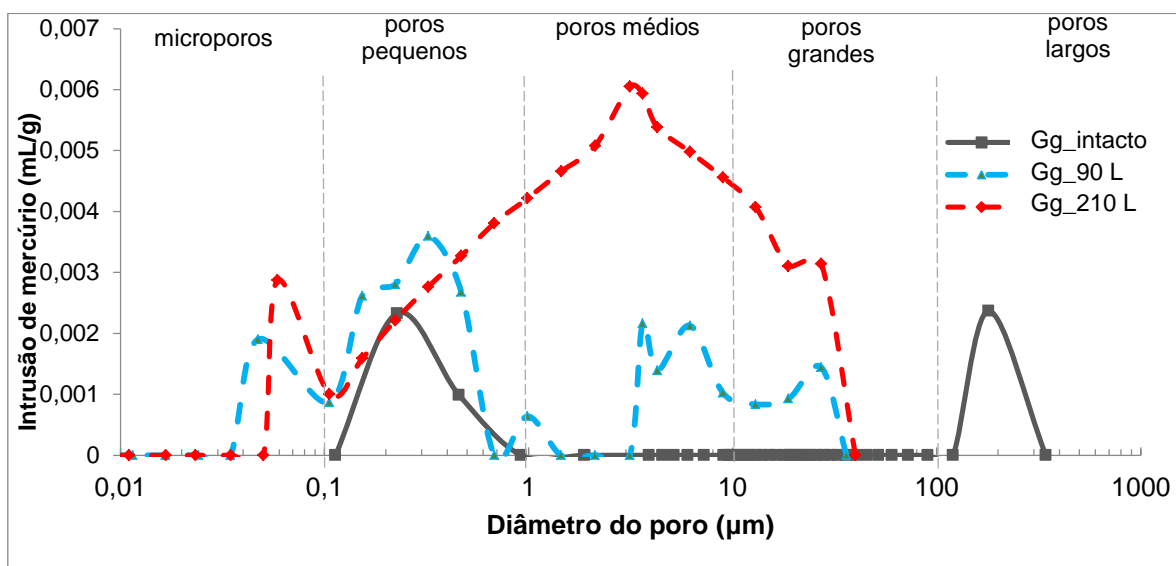


Figura 4.20 - Distribuição do Diâmetro dos Poros no Gnaiss Granítico Degradado. Fonte: Autora. Legenda: Gg\_intacto: gnaiss granítico; Gg\_90L: gnaiss granítico com 90 dias de envelhecimento em laboratório; Gg\_210: gnaiss granítico com 210 dias de envelhecimento em laboratório.

O mármore intacto (Figura 4.21) apresenta poros que variam de pequenos a grande, em três intervalos definido. Com o envelhecimento de laboratório há o surgimento de novos poros e a ampliação dos diâmetros dos poros existentes, ocorreu a redução do volume da intrusão de mercúrio (Tabela 4.9) e o rearranjo da rede porosa com a redistribuição da intrusão para a faixa de diâmetro ente 0,2 e 40

μm após 210 dias, ou seja, o procedimento de laboratório mudou toda a estrutura da rede porosa, isso pode ser devido aos processos de alteração dos argilominerais.

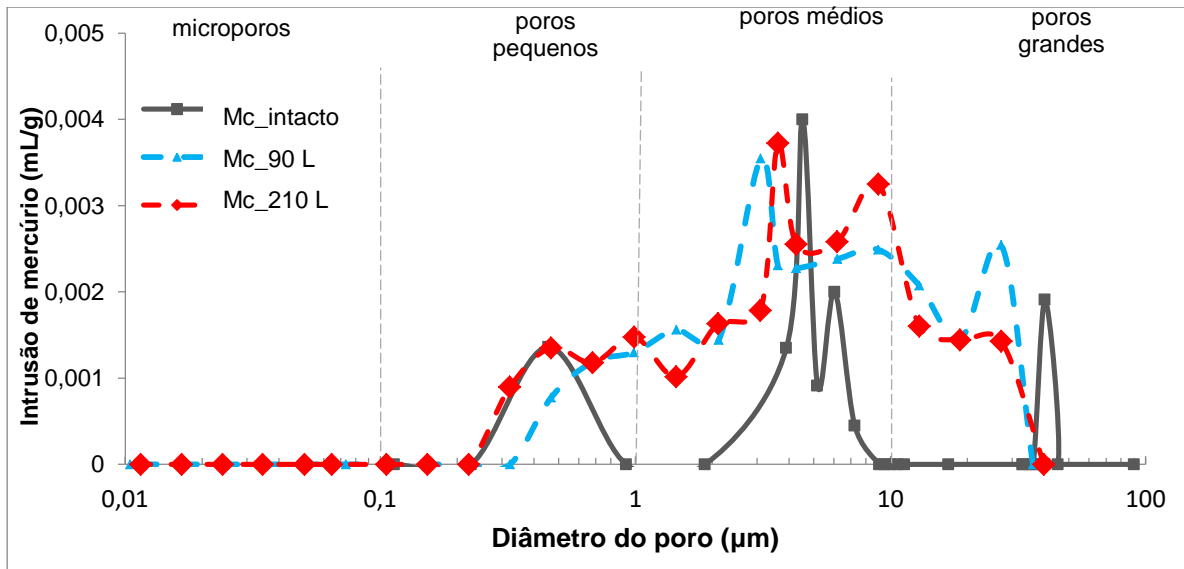


Figura 4.21 - Distribuição do Diâmetro dos Poros no Mármore Degradado. Fonte: Autora. –Legenda: Mc\_intacto: mármore intacto; Mc\_90: mármore com 90 dias de degradação em laboratório; Mc\_210: mármore com 210 dias de degradação em laboratório.

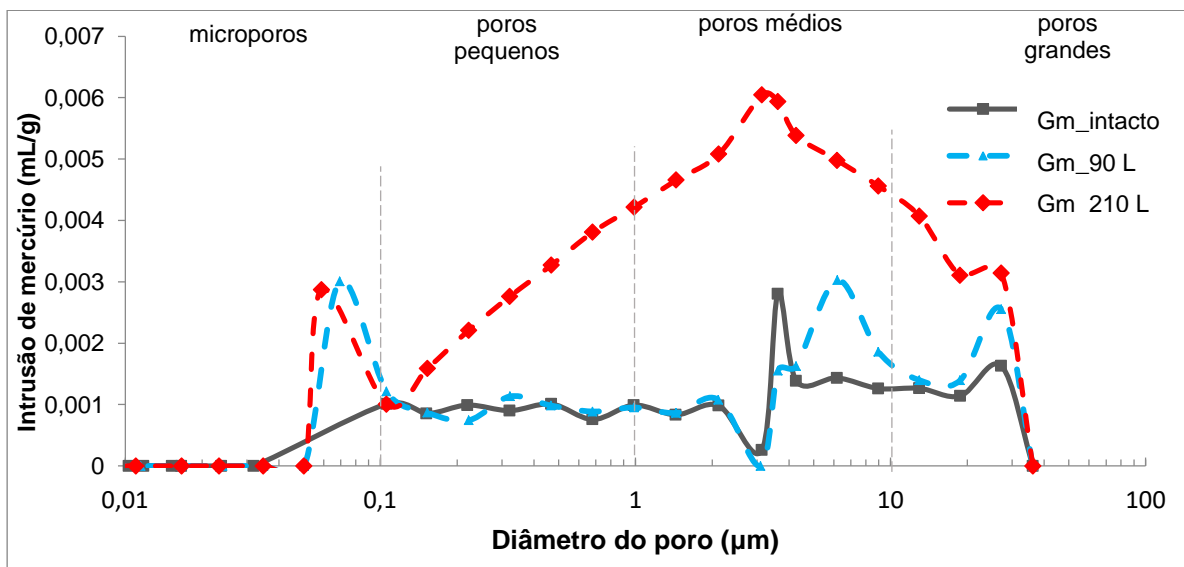


Figura 4.22 — Distribuição do Diâmetro dos Poros no gnaisse milonítico. Fonte: Autora. - Legenda: Gm\_intacto: gnaisse milonítico intacto; Gm\_90 gnaisse milonítico com 90 dias de degradação em laboratório; Gm\_210u: gnaisse milonítico com 210 dias de degradação em laboratório.

Na Figura 4.22, as amostras de gnaisse milonítico intacta e envelhecida possuem poros com diâmetros entre 0,03 e 40 μm, nos intervalos classificados como microporos, poros pequenos, médios e grandes. Similar ao envelhecimento natural,

a degradação em laboratório não favoreceu o aparecimento de diâmetros diferentes aos existentes na rocha intacta. Há um incremento da intrusão de mercúrio no diâmetro de poros classificados como médios, indicando o aumento da porosidade.

A Tabela 4.9 registra os valores da PIM após degradação acelerada, e aponta que a maior intrusão deu-se no gnaiss granítico, 0,0102 ml/g de mercúrio após 210 dias de envelhecimento de laboratório, seguido da maior porosidade registrada 2,49%. Isso também foi observado na Figura 4.17 e Tabela 4.8, com as microfissuras intra e intercristalinas indicadas na petrografia, provocando aumento na porosidade aparente.

Os gnaisses apresentaram aumento gradual da porosidade e da intrusão de mercúrio, com aumento do diâmetro médio dos poros do gnaiss granítico, ocorrido em virtude do surgimento de novas faixas de poros devido a lixiviação de minerais provocadas pelo envelhecimento acelerado de laboratório, a variação de temperatura, ao choque térmico e ao congelamento da água absorvida, que expande-se nos poros e geram tensões aumentando o diâmetro destes, (Cardell *et al.*, 2003; Benavete *et al.*, 2007). Aumento similar do volume de poros e da intrusão de mercúrio foi observado no gnaiss milonítico e no mármore, porém, o diâmetro médio dos poros não sofreu grandes variações.

O mármore apresentou a redução da porosidade (Tabela 4.9), provavelmente decorrente da heterogeneidade da amostra. A Figura 4.21 mostra o rearranjo da rede porosa com a redistribuição da intrusão para uma nova faixa de diâmetro de poros, podendo ser observado na Tabela 4.8 o incremento da porosidade aparente e da absorção aparente.

A relação entre a porosidade e a densidade obtida pela PIM é discutida no item 4.4.

Tabela 4.6 - Porosimetria das Amostras após envelhecimento de laboratório.

| Parâmetros                       | Gnaise Granítico (Gg) |        |          | Mármore (Mc) |        |          | Gnaise Milonítico (Gm) |        |          |
|----------------------------------|-----------------------|--------|----------|--------------|--------|----------|------------------------|--------|----------|
|                                  | intacto               | 90dias | 210 dias | intacto      | 90dias | 210 dias | intacto                | 90dias | 210 dias |
| Volume de intrusão (ml/g)        | 0,0017                | 0,0042 | 0,0102   | 0,0045       | 0,0035 | 0,0037   | 0,0028                 | 0,0047 | 0,0057   |
| Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ ) | 0,5510                | 0,5271 | 2,7097   | 6,3872       | 5,2049 | 4,9256   | 3,3705                 | 4,7757 | 3,6559   |
| Densidade aparente (g/ml)        | 2,4451                | 2,3605 | 2,4470   | 2,5155       | 2,4204 | 2,5137   | 2,3728                 | 2,3576 | 2,2139   |
| Densidade do esqueleto (g/ml)    | 2,4486                | 2,3785 | 2,5095   | 2,5640       | 2,4420 | 2,5373   | 2,3885                 | 2,3839 | 2,2423   |
| Porosidade (%)                   | 0,4416                | 0,9904 | 2,4921   | 1,0912       | 0,8850 | 0,9291   | 0,6563                 | 1,1052 | 1,2671   |



### Microtomografia

A degradação em laboratório foi avaliada por análise de imagens no gnaisse milonítico, sendo possível verificar a deslocamento superficial da amostra de forma macroscópica, mostrada na Figura 4.16.

Na Figura 4.23 são mostradas as respectivas análises tridimensionais com a estrutura rochosa subdividida em fase sólida e fase porosa. A fase sólida é marcada pela variação mineralógica e assentamento de sucessivas camadas, com a estrutura bandada indicada na descrição petrográfica. A fase porosa destaca a porosidade na superfície da amostra e a orientação da rede de poros paralela às foliações.

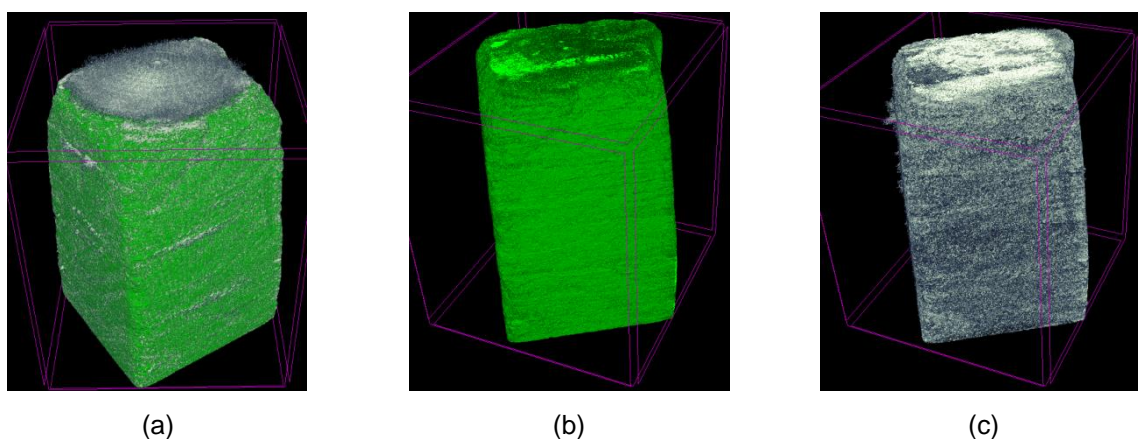


Figura 4.23 -Gnaisse milonítico após envelhecimento de laboratório, analisado por micro-CT. Fonte: Autora

a) Modelo 3D b) Fase sólida (esqueleto) c) Fase porosa.

Realizando-se um corte longitudinal próximo da superfície da amostra (Figura 4.24) é possível visualizar o deslocamento das camadas superficiais da rocha apontado na Figura 4.16. Nota-se o surgimento de microfissuras paralelas às foliações, provocando o aumento da porosidade nas camadas superficiais da amostras, o enfraquecimento da camada superior e a exposição da camada subjacente.

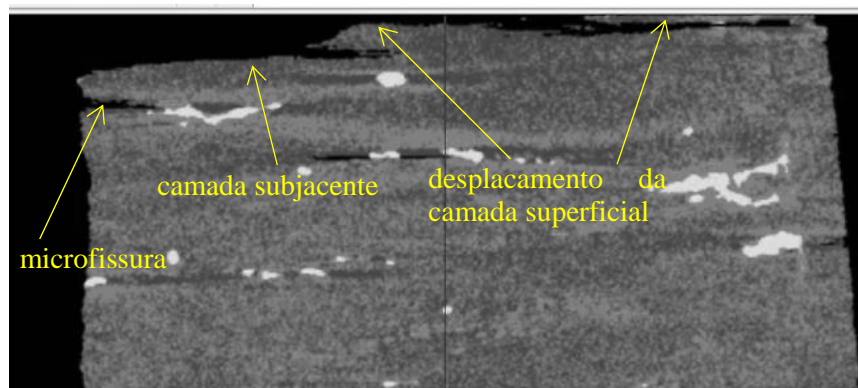


Figura 4.24 – Corte Longitudinal do gnaiss milonítico após envelhecimento de laboratório. Fonte: Autora

A amostra apresenta um volume total de 325,47 mm<sup>3</sup> e um volume de poros de 32,07 mm<sup>3</sup>, perfazendo uma porosidade total de 15,20%, onde 13,65% estão conectados, e 1,55% são classificados como poros fechados.

Os resultados da rocha intacta indicaram uma porosidade total de 10,63%, com a rede de poros seguindo uma orientação preferencial paralela às foliações, a porosidade aberta representa 7,55% e os 3,08% restantes são classificados como poros fechados.

Há um aumento percentual de 43% nos valores da porosidade. Isso também foi observado na Tabela 4.8 com o aumento da porosidade aparente e aumento no resultado da porisimetria quanto a intrusão de mercúrio (Tabela 4.9). Observa-se a redução do percentual de poros fechados, indicando que a degradação acelerada provocou a conectividade entre os poros existentes.

#### 4.2.2 – Resistência Mecânica

##### *Ensaio de Compressão*

A resistência à compressão das rochas degradadas foi avaliada com 90, 180 e 210 dias. Os resultados obtidos (Figura 4.25) indicam o declínio da resistência de ruptura das rochas estudadas, mostrando que os ciclos de degradação na câmara são eficientes para o estudo da durabilidade de rochas ornamentais carbonáticas e silicáticas.

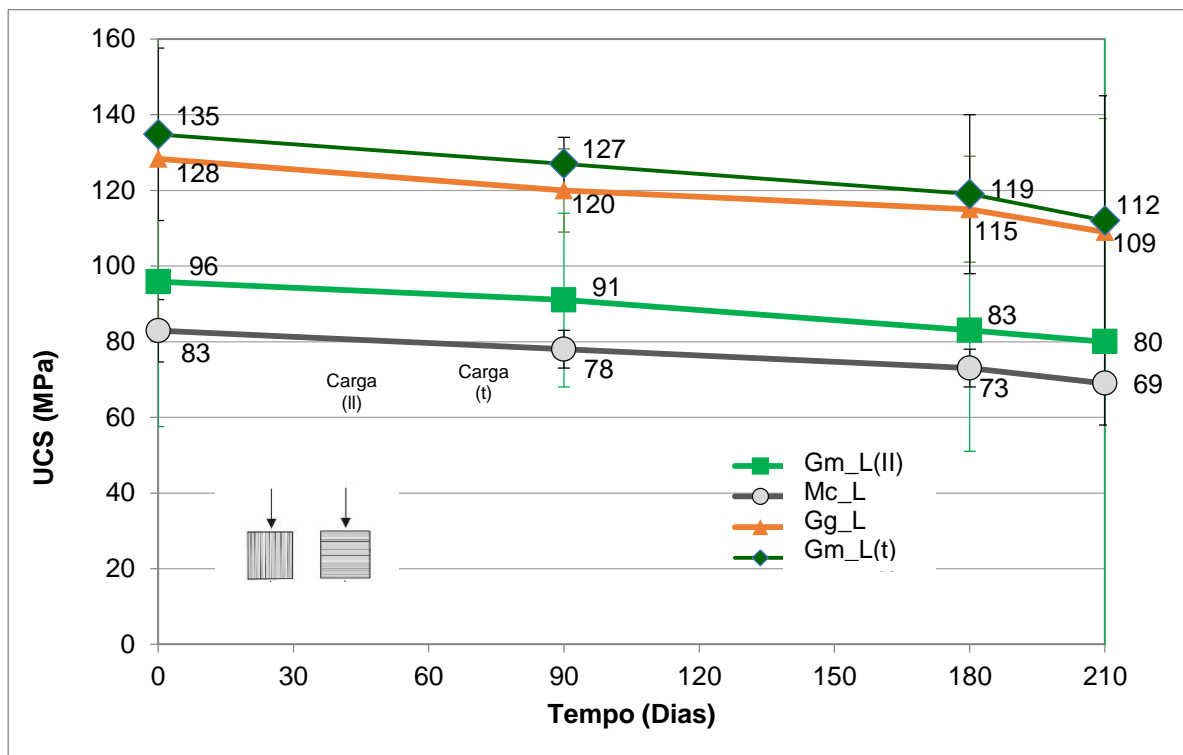


Figura 4.25 -UCS – Degradação em Laboratório. Fonte: Autora

Com a degradação, o gnaisse granítico apresenta em relação à rocha intacta, uma redução de 15%, o mármore reduziu 16% e o gnaisse milonítico 17%.

Independente do ambiente de envelhecimento, a resistência à compressão segue a seguinte ordem crescente:  $Mc < Gg < Gm$ .

Comparando os resultados do envelhecimento natural ao envelhecimento em laboratório, pode-se definir o tempo de exposição externo hipotético, definido por Stizia *et al.* (2021) como o produto do tempo de teste por um fator de aceleração hipotético ( $r$ ), capaz de reproduzir os resultados da exposição natural. Os autores destacam que a deterioração da rocha no curto prazo é claramente diferente da deterioração natural, em longo prazo. Isso ocorre porque em laboratório, há a dinamicidade dos processos devido à velocidade dos ciclos que produzem o intemperismo de forma intensa.

É possível afirmar que a perda de resistência das rochas com 90 dias de degradação em câmara no laboratório, assemelha-se a perda da resistência sofrida pelas amostras em 2 anos (730 dias) de envelhecimento natural, determinando assim um fator de aceleração hipotético  $r = 8,11$ .

Essas reduções de resistência mecânica também são influenciadas pelo aumento da microfissuração das rochas (Figura 4.17), aumento da porosidade

aparente e porosimetria (Tabelas 4.8 e 4.9) e, para o gnaisse milonítico, aumento da rede de poros paralelo às foliações (Figura 4.23 (c)) e deslocamento da camada superficial (Figura 4.24).

### *Resistência ao Impacto de Corpo Duro*

Os resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para as rochas degradadas em laboratório são mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.7 - Impacto de Corpo Duro após Envelhecimento de Laboratório.

|               | <b>Gnaisse granítico</b> |      | <b>Mármore</b> |      | <b>Gnaisse milonítico</b> |      |
|---------------|--------------------------|------|----------------|------|---------------------------|------|
|               | Altura (m)               | W(J) | Altura (m)     | W(J) | Altura (m)                | W(J) |
| Rocha intacta | 0,48                     | 5    | 0,43           | 4    | 0,47                      | 5    |
| 90 dias       | 0,48                     | 5    | 0,40           | 4    | 0,45                      | 4    |
| 180 dias      | 0,47                     | 5    | 0,43           | 3    | 0,45                      | 4    |
| 210 dias      | 0,48                     | 5    | 0,42           | 4    | 0,42                      | 4    |

\*W=energia de ruptura

A altura de ruptura média obtida para o gnaisse granítico com 210 dias de degradação foi 0,48 m, com uma energia de ruptura de 5J. O gnaisse milonítico apresentou uma redução contínua da altura e da energia de ruptura, totalizando 0,42 m e uma energia de ruptura de 4J ao término dos ciclos de degradação. A última altura de ruptura do mármore foi 0,43 m para a energia de 4J.

O gnaisse granítico e o mármore apresentaram variação da altura de queda, com redução seguida de aumento. A energia de ruptura inicial dessas amostras foi mantida aos 210 dias de degradação. O envelhecimento acelerado de laboratório aumentou a heterogeneidade destes materiais em relação à altura de impacto.

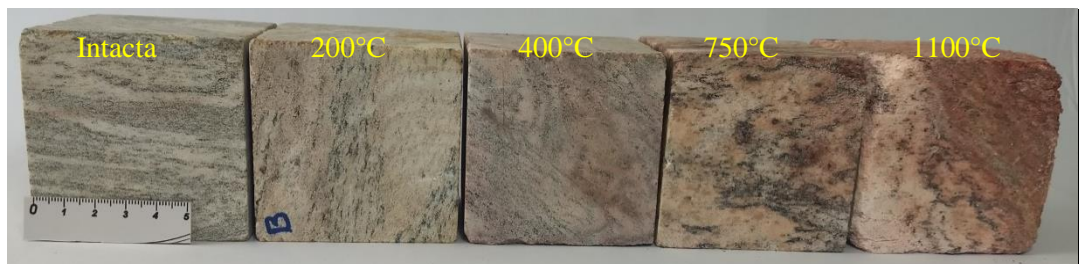
De modo geral, quanto à redução da altura de queda, isso se deve a estado de microfissuramento intra e intergranular após o envelhecimento de laboratório, conforme observado nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.23.

### 4.3 – Tratamento Térmico

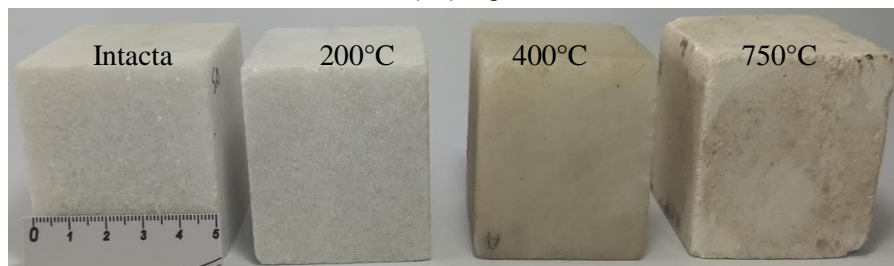
O tratamento térmico das amostras de gnaiss granítico, mármore e gnaiss milonítico foi realizado para avaliar os efeitos do calor na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material. As rochas inicialmente foram submetidas às temperaturas de 200°C, 400°C, 750°C e 1100°C e resfriadas lentamente até a temperatura ambiente, para posterior avaliação de suas propriedades.

Este estudo fornece informações para o entendimento do efeito de temperaturas elevadas, como no caso de incêndios, corroborando para a avaliação da segurança de edificações e obras de restauração.

O tratamento térmico provocou alterações físicas nas amostras (Figura 4.26), tais como: perda de brilho, som cavo, mudanças na coloração, expansão volumétrica, desagregação granular do gnaiss granítico à 1100°C e desagregação granular do mármore em 750°C.



(a1) Gg



(b1) Mc



(c1) Gm

Figura 4.26 - Rochas Submetidas ao Tratamento Térmico. Fonte: Autora

Após o tratamento térmico na temperatura de 1100°C, o mármore encontrou-se com fissuras, mas não destruído. Após algumas horas exposto ao ar, as fissuras foram aumentando e as amostras esfarelaram-se, resultado do incremento de volume produzido pela reação do CaO com umidade do ar para formar a portlandita, Ca(OH)<sub>2</sub>. Este processo foi relatado por Török e Hajpál (2005) e Gomez-Heras et al. (2009) como o resultado de testes tratamento térmico sob alta temperatura de rochas contendo calcita, conforme encontrado na petrografia (Figuras 3.5, 4.17 e Tabela 4.1).

#### 4.3.1 – Análise microestrutural

##### *Petrografia*

A temperatura de 1100°C deixou as rochas friáveis, dificultando a confecção das lâminas petrográficas. A análise das lâminas petrográficas foi realizada nas rochas sob 750°C. A Figura 4.27 apresenta as micrografias obtidas.

A composição mineralógica modal média para os constituintes da rocha intacta, e sob tratamento térmico é apresentada na Tabela 4.11.

A composição mineral das rochas após o tratamento térmico é semelhante ao estado intacto, algumas diferenças no percentual mineral resultam da heterogeneidade da rocha e da distribuição dos grãos. Resultados semelhantes foram observados por *Yang et al. (2017)*.

O gnaiss granítico à 750°C apresentou um estágio avançado de alteração, alto grau de fissuramento, coloração rosa, exibindo níveis de coloração avermelhada impregnados por óxido/hidróxido de ferro (traços) provenientes da alteração de biotitas (3%) e granadas (5%). Os cristais de biotita (3%) exibem superfícies de contato planar entre os grãos, encontram-se em estágios avançados de alteração para minerais opacos (3%), conforme observados os valores da Tabela 4.11. Os cristais de granada (5%) encontram-se em processo de alteração e possuem microfissuras intercristalinas e fraturas intracristalinas preenchidas por óxido/hidróxido de ferro.

Os diferentes valores dos minerais entre o gnaiss granítico intacto e após 750°C provavelmente deve-se ao efeito provocado pelo tratamento térmico onde alguns minerais perdem hidroxilas e se volatilizam, outros se transformam, e a heterogeneidade do material, que produzem variações percentuais em distintas lâminas. Estes resultados foram encontrados também por Török e Hajpál (2005).

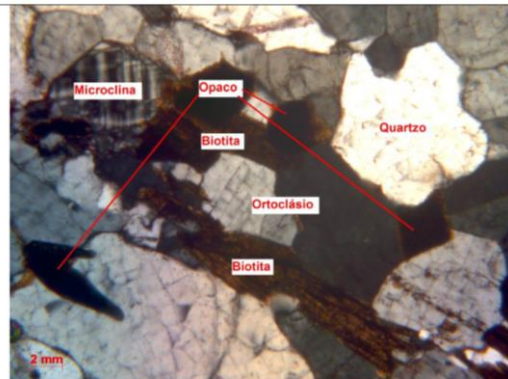
Tabela 4.8 - Composição Mineralógica dos Litotipos a 750°C

| Minerais                 | Gnaiss Granítico (%) |        | Mármore (%) |        | Gnaiss Milonítico (%) |        |
|--------------------------|----------------------|--------|-------------|--------|-----------------------|--------|
|                          | intacto              | 750°C  | intacto     | 750°C  | intacto               | 750°C  |
| Microclina               | 45                   | 30     | -           | -      | -                     | -      |
| Ortoclásio               | 7                    | 8      | -           | -      | 49                    | 47     |
| Quartzo                  | 29                   | 24     | -           | -      | 30                    | 29     |
| Biotita                  | 5                    | 3      | -           | -      | -                     | -      |
| Muscovita                | 2                    | -      | -           | 3      | -                     | -      |
| Granada                  | 3                    | 5      | -           | -      | -                     | -      |
| Plagioclásio             | 4                    | 27     | -           | -      | 8                     | 9      |
| Óxido/hidróxido de ferro | 2                    | traços | -           | -      | 6                     | 8      |
| Sericita                 | 3                    | -      | -           | -      | -                     | -      |
| Opacos                   | -                    | 3      | -           | -      | 2                     | 4      |
| Argilominerais           | traços               |        | 1           | traços | traços                |        |
| Calcita                  | -                    | -      | 90          | 97     | -                     | -      |
| Diopsídio                | -                    | -      | 9           | -      | -                     | -      |
| Piroxênio                | -                    | -      | -           | -      | 5                     | 4      |
| Hornblenda               |                      |        |             |        | traços                |        |
| Rutilo e Apatita         | -                    | -      |             |        | -                     | traços |
| Zircão, e Epidoto        | traços               | -      | -           | -      | traços                |        |

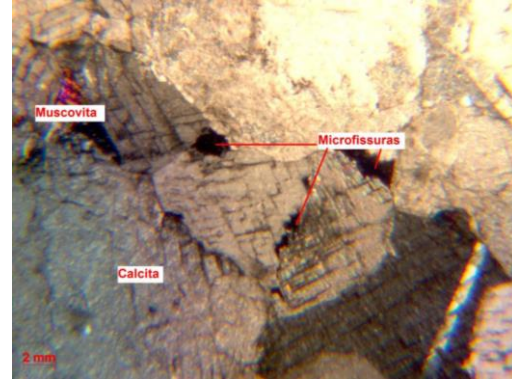
No mármore a 750°C é observado um grau alto de microfissuramento, exibindo microfissuras intragranulares e intergranulares sem preenchimento, sendo observado muscovita (3%) alterando-se para argilominerais com granulação variando de fina a média.

Devido ao aquecimento sofrido (750°C) no gnaiss milonítico, os cristais de hornblenda (traços) e alguns minerais opacos (4%) se desestabilizaram, alteraram e exsolvaram. Observa-se somente vestígio de hornblenda, que se transformou em uma fase de alteração de cor ocre (possível hidróxido de Fe) e em uma fase opaca, por vezes de tonalidade vermelha. Os minerais opacos que sofreram desequilíbrio deram lugar a cristais de rutilo (traços) e também a mineral secundário de cor ocre

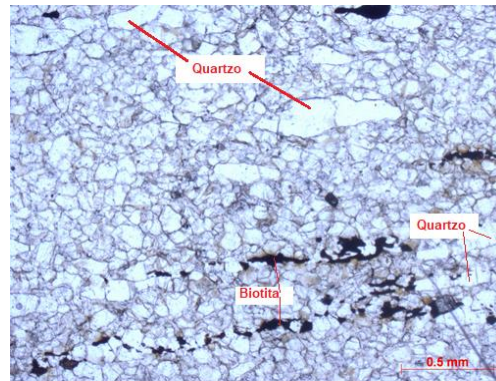
avermelhado, dando a coloração rosa à rocha. Esta fase secundária ocre precipitou na superfície dos minerais félsicos (ortoclásio (47%), plagioclásio (9%) e quartzo (29%)) da matriz e ocupa os contatos entre esses pequenos cristais.



(a) Gg\_T (750°C)



(b) Mc\_T (750 °C)



(c) Gm\_T (750°C)

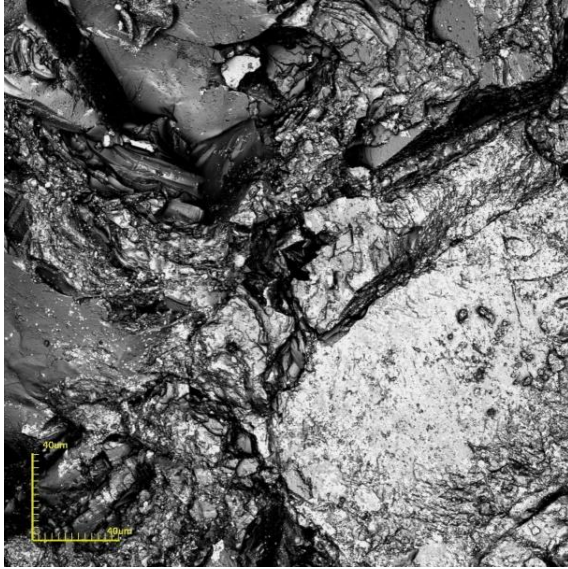
Figura 4.27 - Fotomicrografia das Rochas – 750°C. Fonte: Autora

### Microscopia

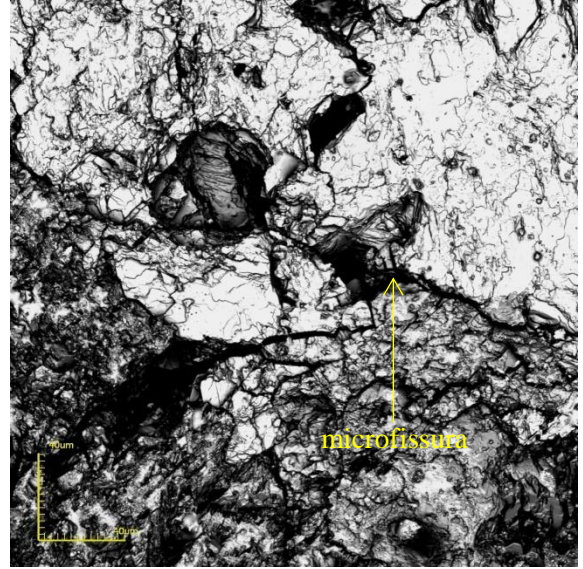
Foram obtidas com a microscopia confocal, imagens planas e tridimensionais do granito e da pedra madeira com 1100°C e do mármore a 750°C e comparadas à rocha intacta, mostradas na Figura 4.28.

Observa-se o dano microestrutural em toda a superfície da rocha nas temperaturas finais de tratamento térmico, com microfissuras transgranulares afetando mais de um grão e a maiores profundidades. Yang et al. (2014) e Freire-Lista *et al.* (2016) verificaram em seus estudos a densificação de fissuras e apontam que ocorre a redução da coesão entre os grãos, da resistência à compressão uniaxial e a desintegração da rocha.

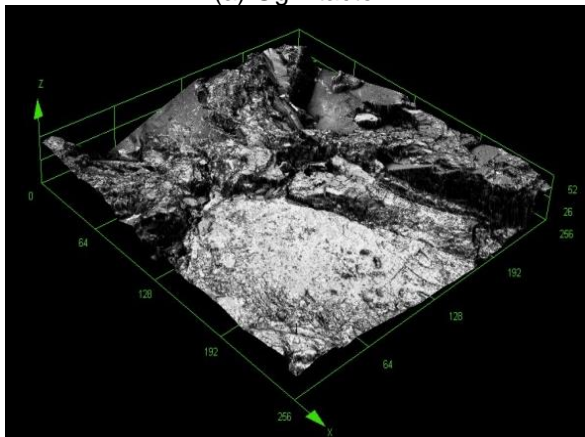




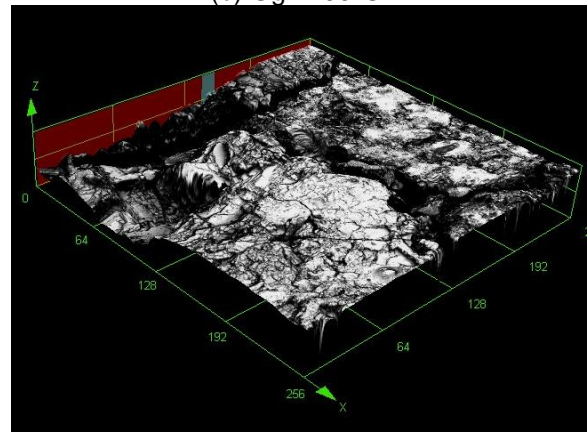
(a) Gg intacto.



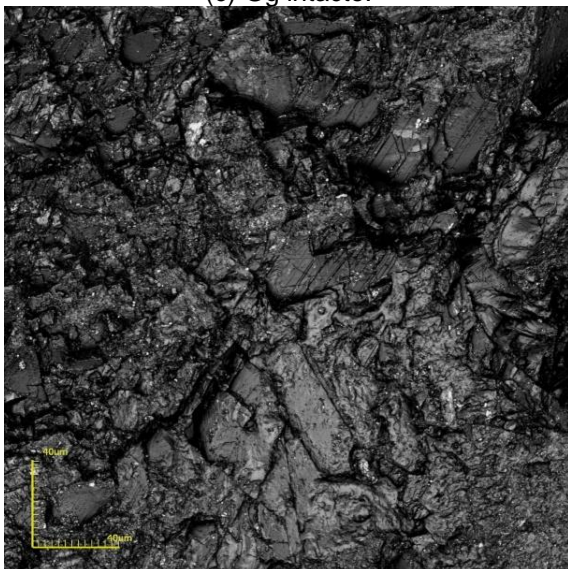
(b) Gg 1100°C.



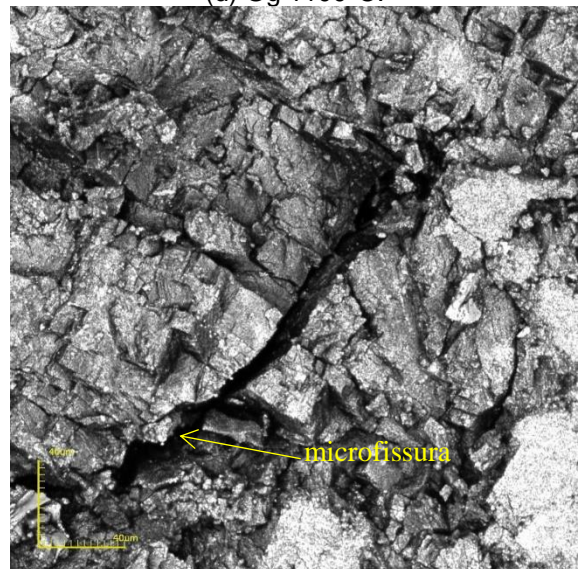
(c) Gg intacto.



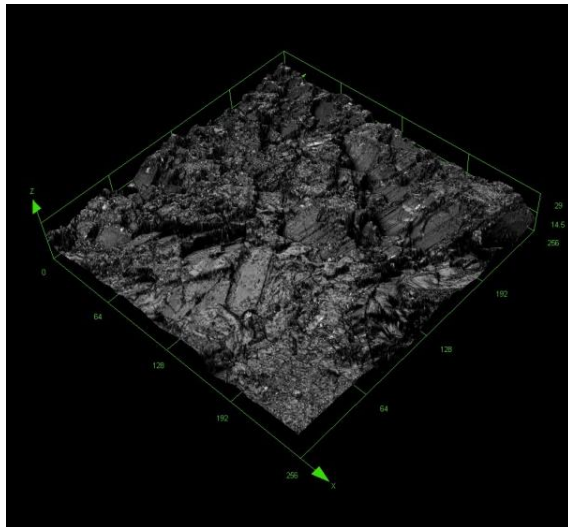
(d) Gg 1100°C.



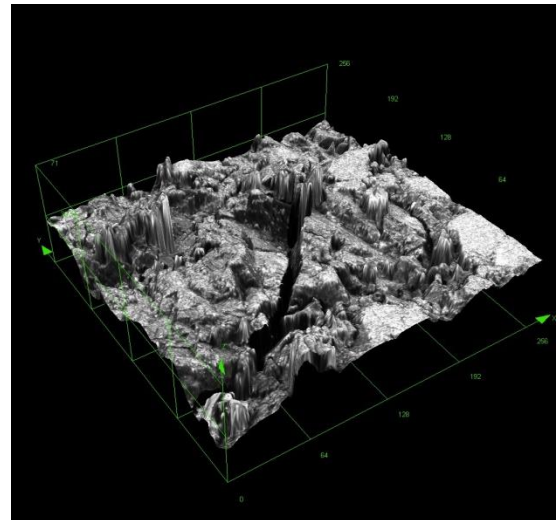
(e) Mc intacto.



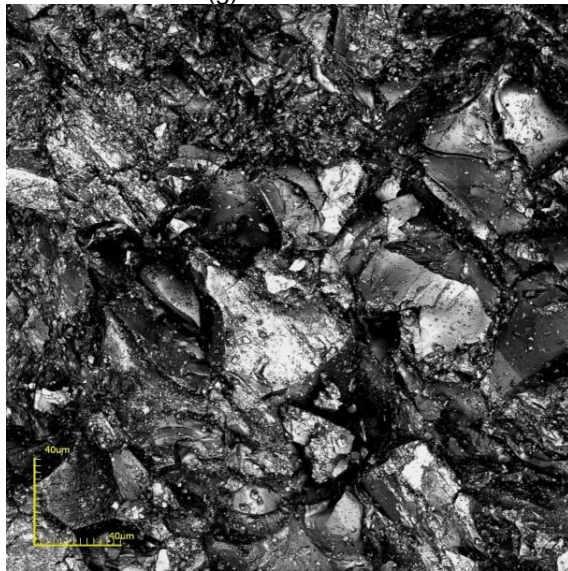
(f) Mc 750°C.



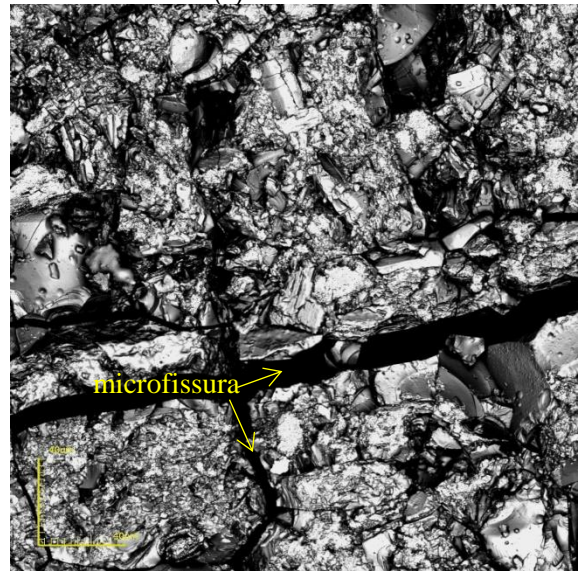
(g) Mc intacto.



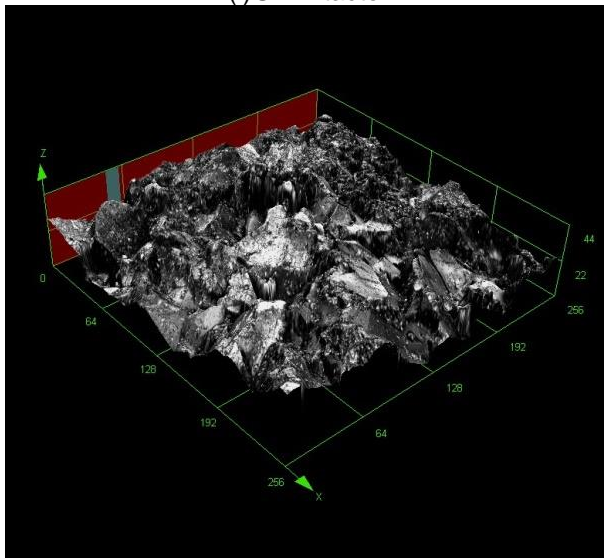
(h) Mc 750°C.



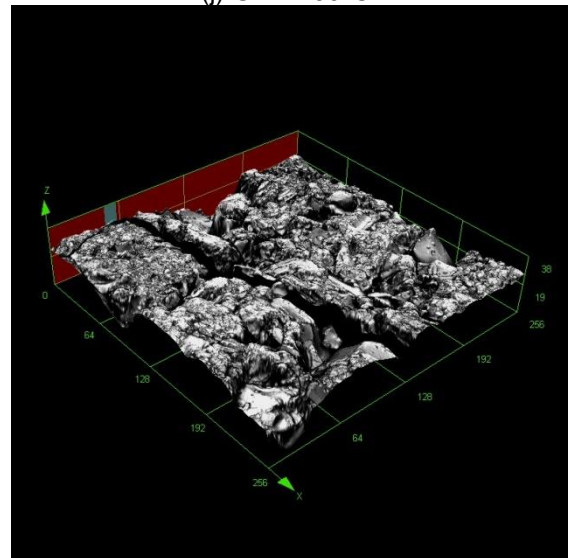
(i) Gm intacto.



(j) Gm 1100°C.



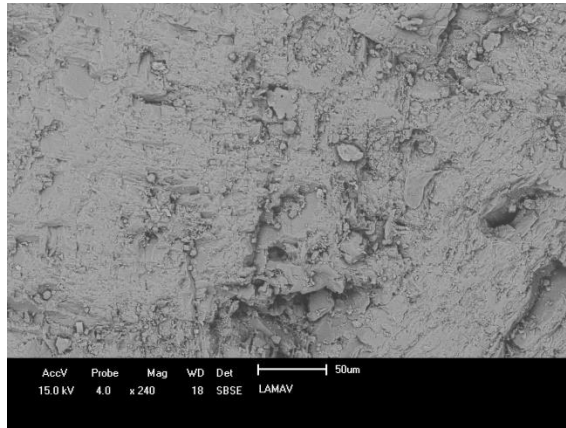
(k) Gm intacto.



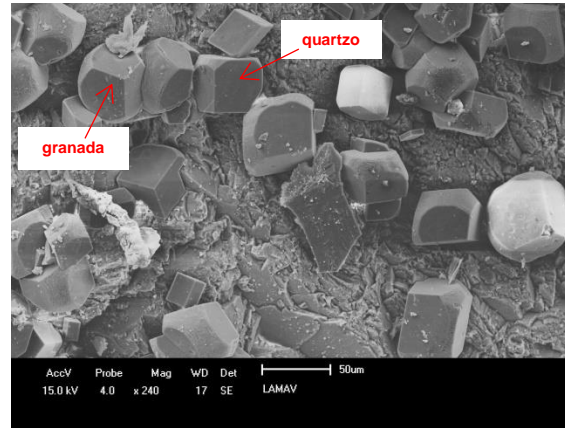
(l) Gm 1100°C.

Figura 4.28 - Fotomicrografia das Rochas sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora (a),(b),(e),(i), (j) e (f) Micrografia 2D; (c), (d), (g), (h), (k) e (l) Fotomicrografia 3D.

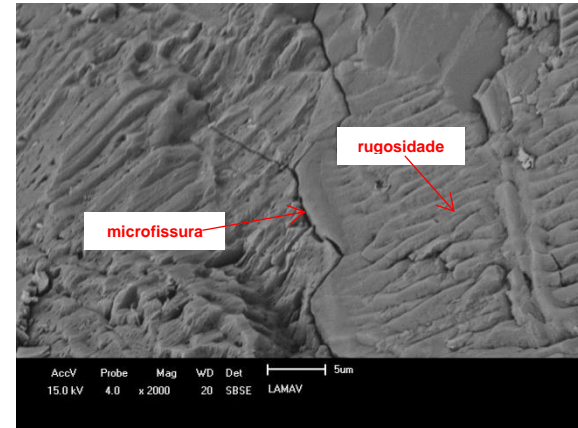
Durante o processo de metalização, as amostras do gnaiss granítico degradadas a 1100°C fragmentaram-se, não sendo possível a análise pela MEV nessa temperatura. Na Figura 4.29 são apresentadas as rochas intactas e sob tratamento térmico.



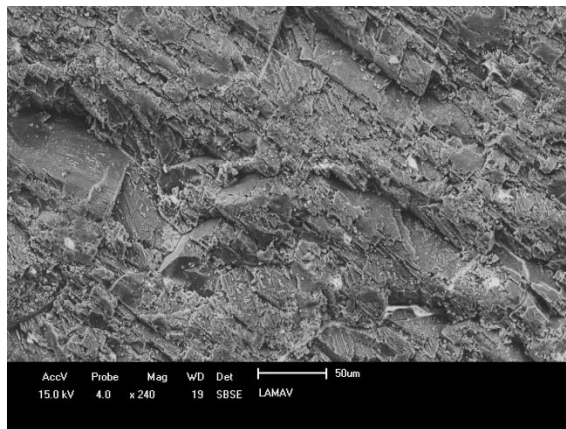
(a) Ggintacto.



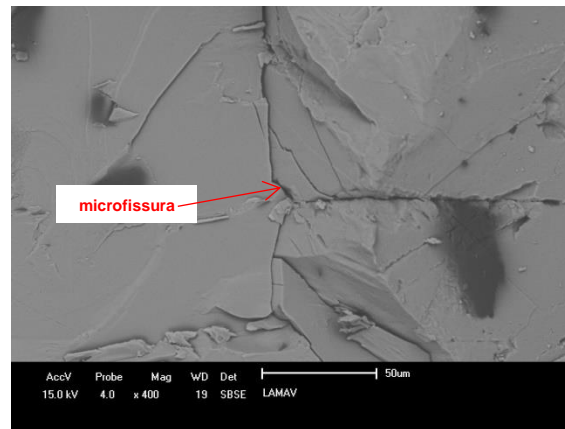
(b) Gg 1100°C.



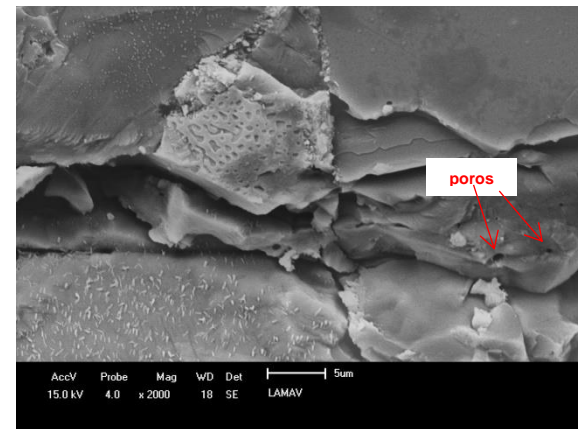
(c) Gg1100°C.



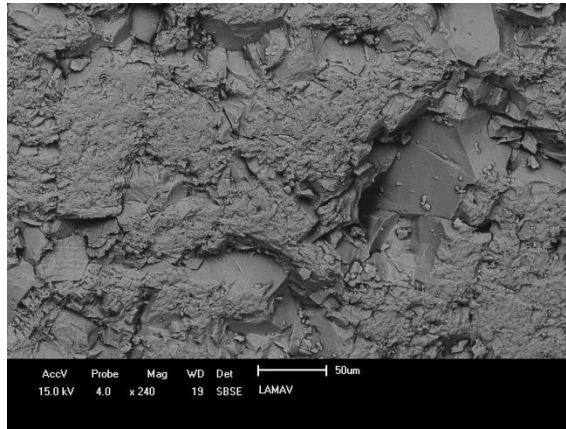
(d) Mc intacto.



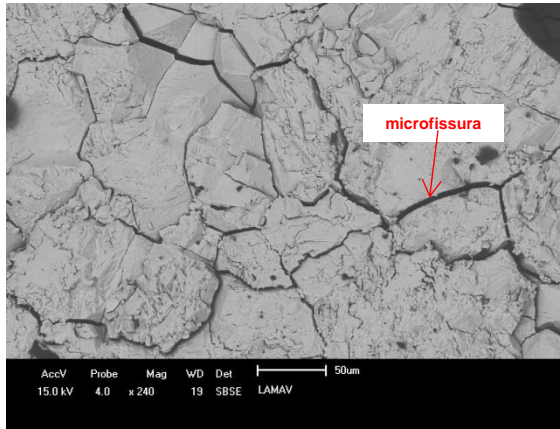
(e) Mc 750°C.



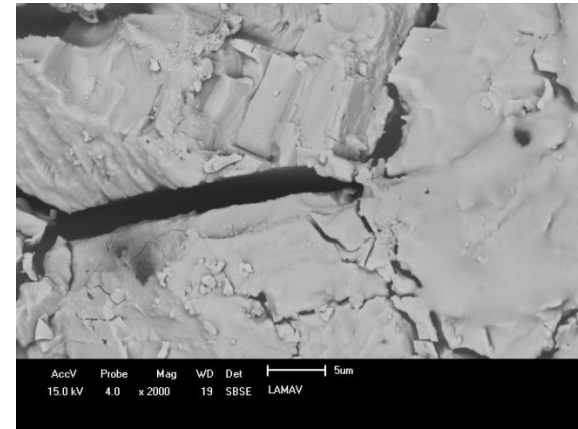
(f) Mc 750°C.



(g) Gm intacto.



(h) Gm 1100°C.



(i) Gm 1100°C.

Figura 4.29 - Fotomicrografia do MEV, das Rochas sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora

O gnaiss granítico e o mármore submetidos ao tratamento térmico apresentaram alargamento das microfissuras existentes intergranulares e intragranulares (Figura 3.4 e 3.5). O surgimento de microfissuras decorrentes da alteração e expansão térmica mineral a partir de 750°C foi observado nos três litotipos estudados. A incompatibilidade de expansões térmicas de diferentes grãos minerais promove a geração de microfissuras nos contatos minerais, e a anisotropia de expansão térmica de minerais individuais leva ao desenvolvimento de microfissuras intragranulares e transgranulares (Chen *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2016).

As fotomicrografias da rocha intacta foram obtidas no MEV com a ampliação de 240 vezes, e após o tratamento térmico com ampliação de 240 e 2000 vezes, possibilitando a melhor visualização da superfície alterada (Figura 4.29). Pode-se observar que o tratamento térmico provoca uma significativa variação microestrutural, com o surgimento de microfissuras e poros decorrentes da expansão volumétrica diferencial dos minerais, da perda de água e a densificação da matriz rochosa resultante da sinterização e mudanças de fase durante o aquecimento, conforme a Figura 4.5.

A Figura 4.29 (h) apresenta a superfície do gnaiss milonítico com acentuado microfissuramento, quando comparada ao gnaiss granítico na mesma temperatura. Essa quantidade de microfissuras é explicada pelo surgimento de microfissuras intergranulares, os grãos minerais do gnaiss milonítico são caracterizados por cristais fitados de quartzo (Figura 3.6), feldspato e minerais orientados paralelamente, que lhe conferem uma textura milonítica com grãos finos. Quanto menor os grãos, maior o volume de microfissuras intergranular observado.

As mudanças microestruturais corroboram com a variação da densidade aparente, o aumento da porosidade aparente, da absorção aparente. Variações semelhantes e a diminuição gradual da densidade aparente foram obtidas por Gautam *et al.* (2018). Essas mudanças e o incremento da intrusão de mercúrio na Porosimetria, são apresentadas nos resultados adiante.

### *Índices Físicos*

As rochas foram pesadas antes e após o tratamento térmico, para averiguar a perda de massa ocorrida. Os índices físicos mostrados na Tabela 4.12, fornecem uma noção das microdescontinuidades, poros, vazios e do estado de alteração do material decorrente do tratamento térmico. As propriedades das rochas intactas foram mantidas para facilitar a interpretação das mudanças ocorridas.

O tratamento térmico a 200°C não apresentou variação nos índices físicos em relação à rocha intacta, sendo desconsideradas as demais análises nessa temperatura por não ser notada alterações microestruturais significativas. Wong *et al.* (2020) aponta que a temperatura de 200°C pode ser considerada uma temperatura amena para rochas, e que nessa faixa de temperatura os principais efeitos ocorridos são a liberação da água absorvida e um pequeno fechamento de espaços vazios decorrente da expansão térmica de minerais. Gautam *et al.*

(2018) descreve que o dano térmico até 200°C é menor significativo, e que as microfissuras começaram a aparecer depois que a temperatura de rocha atinge 300°C.

A Tabela 4.12 indica que ao término do tratamento térmico as rochas avaliadas apresentaram a redução da densidade aparente, o aumento da porosidade aparente e da absorção aparente.

Tabela 4.9 -Índices Físicos e Perda de Massa Após o Tratamento Térmico

|                   |               | Densidade aparente [ $\rho_a$ ] ( $\text{kg/m}^3$ ) | Porosidade aparente [ $\eta_a$ ] (%) | Absorção de água aparente [ $\alpha_a$ ] (%) | Perda de massa (%) |
|-------------------|---------------|---|--------------------------------------|--|--------------------|
| Gnaiss granítico  | Rocha intacta | 2.612±52  | 0,93±0,14                            | 0,35±0,06                                    | -                  |
|                   | 200°C         | 2.629±28  | 1,06±0,22                            | 0,32±0,08                                    | -                  |
|                   | 400°C         | 2.624±220   | 1,12±0,16                            | 0,47±0,08                                    | 0,15±0,08          |
|                   | 750°C         | 2.576±498   | 4,49±0,43                            | 1,69±0,08                                    | 0,19±0,06          |
|                   | 1100°C        | 2.527±40  | 4,55±0,73                            | 1,72±0,16                                    | 0,29±0,04          |
| Mármore           | Rocha intacta | 2.721±24  | 0,60±0,18                            | 0,22±0,07                                    | -                  |
|                   | 200°C         | 2.733±13  | 0,58±0,12                            | 0,21±0,04                                    | -                  |
|                   | 400°C         | 2.752±28  | 1,18±0,13                            | 0,42±0,05                                    | 0,36±0,01          |
|                   | 750°C         | 2.620±30  | 4,36±0,16                            | 1,62±0,06                                    | 1,01±0,12          |
| Gnaiss milonítico | Rocha intacta | 2.591±10  | 0,95±0,13                            | 0,37±0,05                                    | -                  |
|                   | 200°C         | 2.574±58  | 1,15±0,12                            | 0,40±0,03                                    | -                  |
|                   | 400°C         | 2.609±25  | 1,05±0,03                            | 0,35±0,01                                    | 0,11±0,04          |
|                   | 750°C         | 2.491± 24   | 2,38±0,12                            | 1,26±0,04                                    | 0,15±0,03          |
|                   | 1100°C        | 2.404±60  | 9,24±0,06                            | 3,56±0,02                                    | 0,20±0,10          |

Comparando as amostras à 1100°C e a rocha intacta, observa-se no gnaiss granítico uma redução de 3% na densidade aparente, e um incremento de 329% na porosidade aparente e 437% na absorção aparente, com uma perda de massa de 0,29%. o gnaiss milonítico teve uma redução de 7% na densidade aparente, e um incremento de 873% na porosidade aparente e 862% na absorção aparente, com uma perda de massa de 0,20%.

No mármore à 750°C ocorreu à diminuição de 4% na densidade aparente, e um incremento de 710% na porosidade aparente e 632% na absorção aparente, com uma perda de massa de 1,01%. No mármore e na pedra madeira à 400°C, o incremento da densidade pode ser atribuído às variações das amostras.

Em geral, a perda de massa das três rochas mostrou uma tendência crescente com a temperatura. A pequena perda de massa nos gnaisses é principalmente devido a sua composição ser constituída por minerais mais estáveis como o quartzo e feldspatos (Tabela 4.11), com maiores ponto de fusão, diferente do mármore composto basicamente por calcita (90-97%).

A redução da densidade aparente deve-se à perda de massa que é causada pela evaporação de água contidas nos poros, microfissuras (Figuras 4.28 e 4.29), alterações químicas causando mudanças de fase e alterações nos minerais (Figura 4.5 e Tabela 4.11). No mármore a decomposição da calcita e liberação dos gases CO e CO<sub>2</sub> corroboram para a redução da densidade, Yao *et al.* (2016).

O aumento do microfissuramento inter e intracristalino (Figura 4.27) e as microfissuras (Figuras 4.28 e 4.29) associadas à expansão térmica (Figura 4.5) proporcionam o aumento da porosidade aparente e absorção aparente.

O resumo gráfico dos índices físicos para as rochas submetidas ao tratamento térmico encontra-se no Apêndice E.

#### *Velocidade de Propagação de Onda*

Na Figura 4.30 são apresentados os resultados dos testes de propagação de ondas. A nomenclatura adotada para distinguir a rocha com o tratamento térmico acompanha as iniciais adotadas para cada rocha, seguido da letra “T”, referindo-se ao tratamento térmico:

- gnaisse granítico após o tratamento térmico: Gg\_T;
- mármore calcítico após o tratamento térmico: Mc\_T;
- gnaisse milonítico após o tratamento térmico: Pmv\_T;

o símbolo (=) indica a leitura registrada no sentido paralelo às foliações, e (t) indica a leitura no sentido transversal às foliações.

As rochas avaliadas apresentaram um considerável decréscimo na velocidade de propagação de ondas, mostrando que a metodologia adotada provocou intensas alterações microestruturais, e que os testes de propagação de ondas fornecem um bom indicativo dessas mudanças no granito, no mármore e na pedra madeira sob tratamento térmico.

Similar às Figuras 4.6, 4.7 e 4.19 que apresentam a velocidade de propagação de ondas para o envelhecimento natural e a degradação acelerada em laboratório, a Figura 4.30 matém as velocidades de propagação de ondas maiores para o gnaissé milonítico, seguida do mármore e posteriormente do gnaissé granítico.

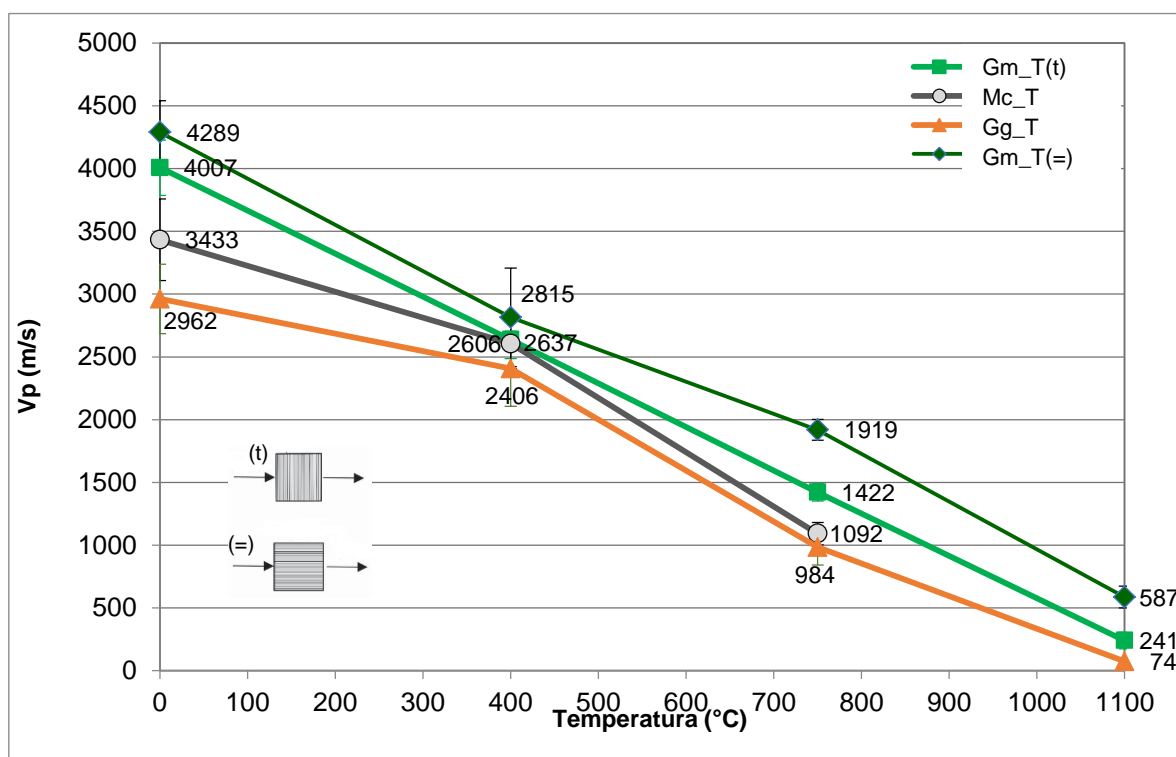


Figura 4.30 – Vp com o Tratamento Térmico. Fonte: Autora

Quando comparada a rocha intacta, ao término do tratamento térmico, o gnaissé granítico sofreu uma diminuição de 97% da velocidade de propagação de ondas, o mármore 68% (até a temperatura de 750 °C), e o gnaissé milonítico 86% para as leituras paralelas às foliações e 96% para as leituras transversais. Esses elevados percentuais indicam os extensos danos às amostras sob o efeito de alta temperatura, tais como expansão térmica, alterações químicas, alterações nos minerais, mudanças de fase (Figura 4.5), perda de massa, mudanças na densidade aparente, aumento da porosidade aparente e da absorção aparente (Tabela 4.12), propagação do microfissuramento inter e intracristalino (Figura 4.27) microfissuras (Figuras 4.28 e 4.29).

A velocidade Vp mostrou-se inversamente proporcional à porosidade aparente e a absorção aparente. O aumento da porosidade aparente acarreta a redução dos valores da velocidade de propagação de ondas.



## Porosimetria

O tratamento térmico gerou mudanças microestruturais e o surgimento de novos poros nas amostras, apresentados nas Figura 4.31, 4.32 e 4.33. Os parâmetros da PIM estão descritos na Tabela 4.13.

No gnaiss granítico submetido a altas temperaturas ocorre o surgimento de novos poros com diâmetro ente 0,04  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$ , e os picos da intrusão de mercúrio nos poros de diâmetro médio (Figura 4.31).

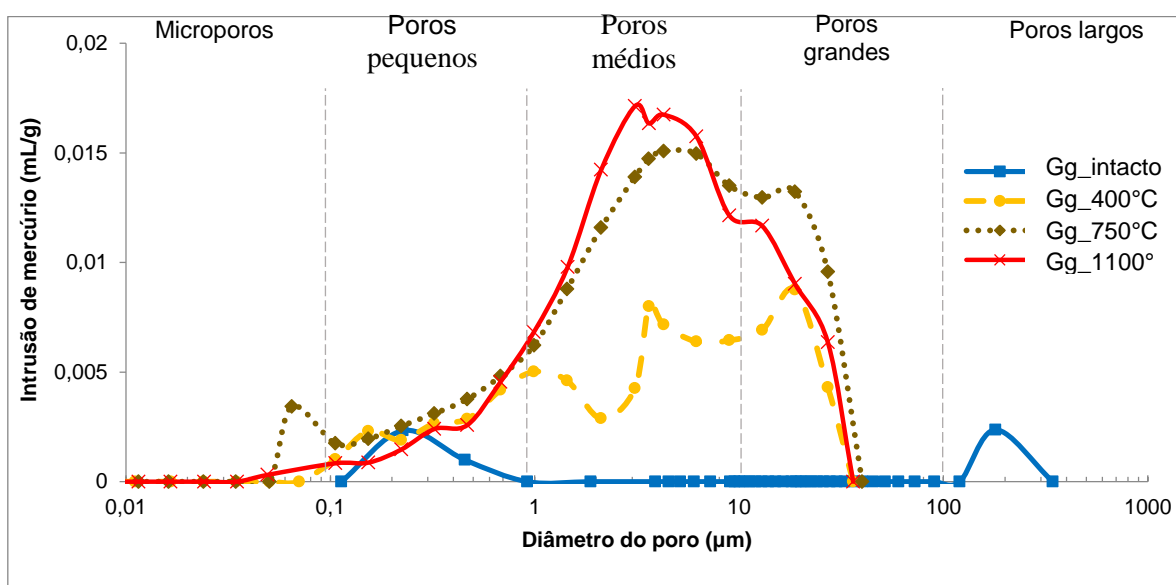


Figura 4.31 - Distribuição do Diâmetro dos Poros no Gnaiss Granítico Sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora. Legenda: Gg\_intacto: gnaiss granítico intacto; Gg\_400°C: gnaiss granítico sob 400°C; Gg\_750°C: gnaiss granítico sob 750 °C; Gg\_1100°C: gnaiss granítico sob 1100°C.

Nota-se o aumento do diâmetro médio (Tabela 4.13), partindo de 0,55  $\mu\text{m}$  para a rocha intacta, chegando em 5  $\mu\text{m}$  após o tratamento térmico. Poros com diâmetros acima de 5  $\mu\text{m}$  favorecem a livre circulação de água, agravando a velocidade de alteração da rocha. O volume máximo de mercúrio foi registrado em 1100°C, totalizando 0,0209 ml/g, e uma porosidade de 4,99%.

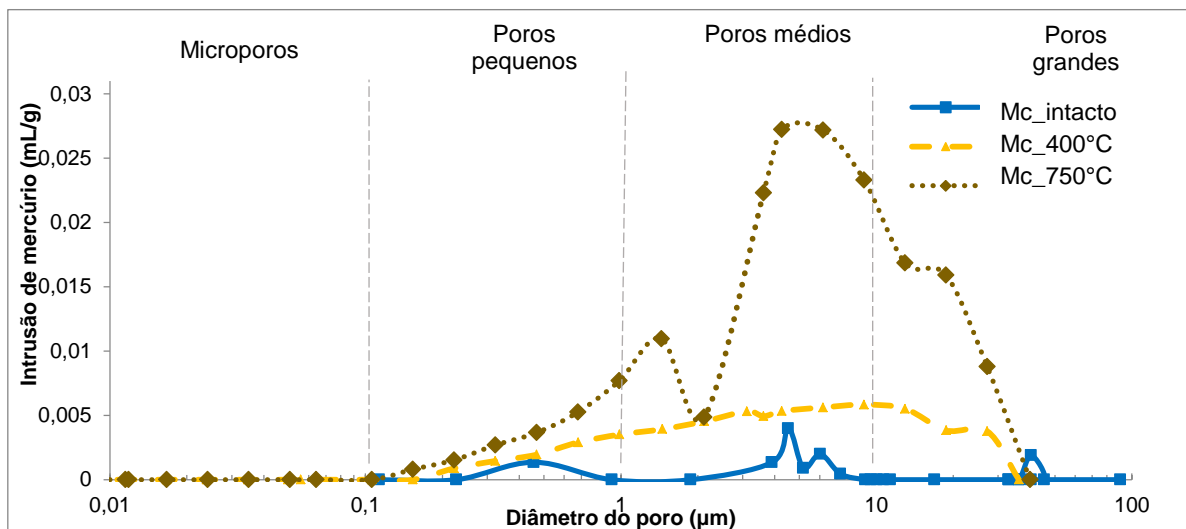


Figura 4.32 -Distribuição do Diâmetro dos Poros no Mármore Sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora. Legenda: Mc\_intacto:mármore intacto; Mc\_400°C:mármore tratado a 400°C; Mc\_750°C: mármore tratado a 750 °C.

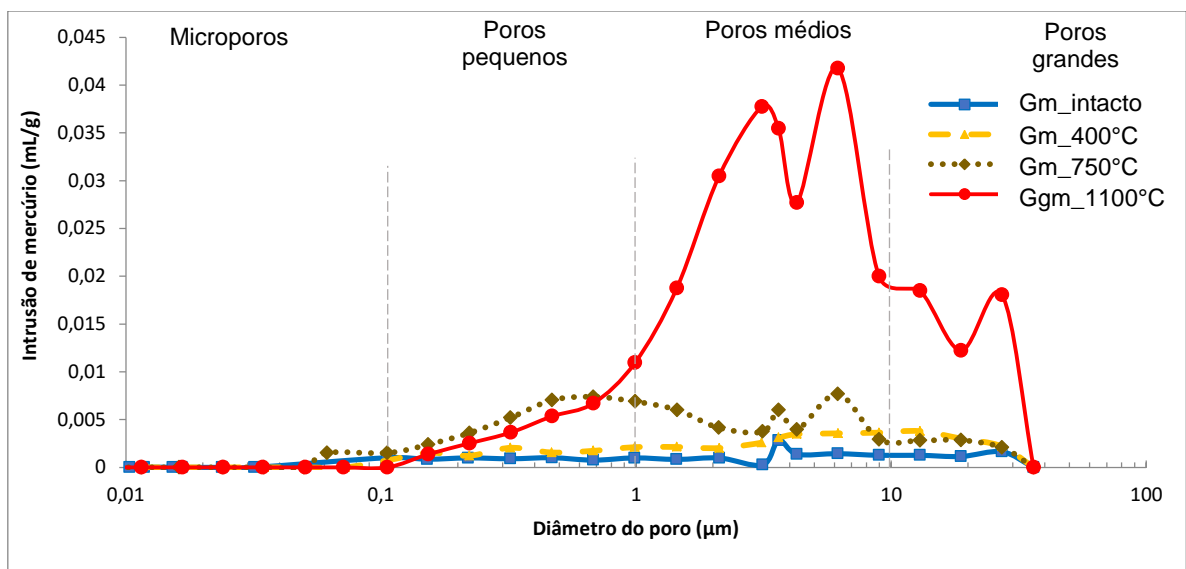


Figura 4.33 -Distribuição do Diâmetro dos Poros na Pedra Madeira. Sob Tratamento Térmico. Fonte: Autora. Legenda: Gm\_intacto: gnaisse milonítico intacto; Gm\_400: gnaisse milonítico tratado a 400°C; Gm\_750: gnaisse milonítico tratado a 750°C; Ggm\_1100: gnaisse milonítico tratado a 1100°C.

No mármore (Figura 4.32) e no gnaisse milonítico (Figura 4.33), a intrusão do volume de mercúrio aumenta com o incremento da temperatura na qual as amostras são submetidas. Há o surgimento de novos poros, com maior volume entre 1 e 10  $\mu\text{m}$ . O mármore não apresenta variação significativa no diâmetro médio dos poros, com os diâmetros entre 5 e 6  $\mu\text{m}$ . A pedra madeira gnaisse milonítico sofreu variações com um aumento do diâmetro para as temperaturas de 400°C e 1100°C

e a redução em 750°C. A petrografia aponta que os cristais de hornblenda (traços) e alguns minerais opacos (4%) se alteraram e exsolveram, provavelmente ocupando o espaço de poros e microfissuras de diâmetros superiores a 9 µm, isso explica o porquê de haver a redução da intrusão de mercúrio nesses diâmetros.

A Tabela 4.13 mostra o aumento da intrusão de mercúrio, chegando ao volume de 0,027 ml/g e a porosidade de 6,38% para o mármore tratado a 750°C, e volume de 0,0399 ml/g, porosidade de 8,93% para o gnaisse milonítico.

De modo geral, os litotipos estudados sob o tratamento térmico apresentaram aumento da porosidade e da intrusão de mercúrio obtidos pela PIM.

As fotomicrografias nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam as mudanças microestruturais e microfissuras, corroborando com a avaliação do incremento da porosidade, do volume de intrusão de mercúrio, e as mudanças ocorridas nos índices físicos (Tabela 4.12).

Tabela 4.10 - Porosimetria das Amostras Sob Tratamento Térmico

| Parâmetros                    | Gnaiss granítico (Gg) |        |        |         | Mármore (Mc) |        |        | Gnaiss milonítico (Gm) |        |        |         |
|-------------------------------|-----------------------|--------|--------|---------|--------------|--------|--------|------------------------|--------|--------|---------|
|                               | intacto               | 400 °C | 750 °C | 1100 °C | intacto      | 400 °C | 750 °C | intacto                | 400 °C | 750 °C | 1100 °C |
| Volume de intrusão (ml/g)     | 0,0017                | 0,0116 | 0,0224 | 0,0209  | 0,0045       | 0,086  | 0,0270 | 0,0028                 | 0,0059 | 0,0118 | 0,0399  |
| Diâmetro médio ( $\mu$ )      | 0,5510                | 4,9017 | 5,1099 | 4,8134  | 6,3872       | 5,0236 | 6,7098 | 3,3705                 | 4,6044 | 1,4431 | 4,8309  |
| Densidade aparente (g/ml)     | 2,4451                | 2,3591 | 2,2724 | 2,2888  | 2,5155       | 2,5826 | 2,3636 | 2,3728                 | 2,3131 | 2,4483 | 2,2404  |
| Densidade do esqueleto (g/ml) | 2,4486                | 2,4255 | 2,3944 | 2,5142  | 2,5640       | 2,1713 | 2,5247 | 2,3885                 | 2,3453 | 2,5209 | 2,4601  |
| Porosidade (%)                | 0,4416                | 2,7392 | 5,0970 | 4,9899  | 1,0912       | 2,1713 | 6,3802 | 0,6563                 | 1,3754 | 2,8814 | 8,9293  |

As mudanças microestruturais decorrentes do tratamento térmico são sucessivas. Existem vários fatores que influenciam a suscetibilidade das rochas às ações térmicas, como a mineralogia, o tamanho do grão, a geometria, orientação preferencial e a combinação de alguns desses parâmetros pode tornar a amostra propensa a sofrer maiores ou menores alterações pela ação térmica. Yang *et al.* (2017) e Gautam *et al.* (2018) atribuem à extensa fissuração intra e intergranular, o incremento da porosidade e absorção, e a falha à propagação e penetração das fissuras.

### Microtomografia

O mármore à 750°C apresentou a maior degradação devido à decomposição térmica da calcita (Tabela 4.12), expansão térmica e mudança de fase mineral (Figura 4.5 (b)), e microfissuramento, mostrada na Figura 4.27.

Na Figura 4.34 são mostradas as respectivas análises tridimensionais com a estrutura rochosa subdividida em fase sólida e fase porosa.

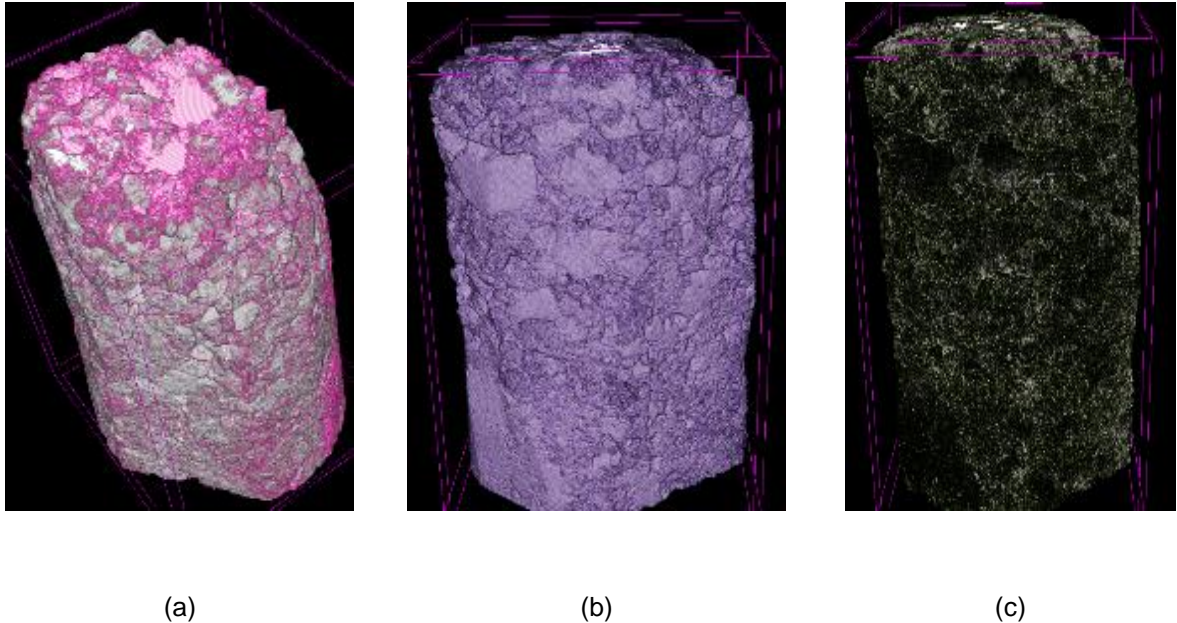


Figura 4.34 - Mármore à 750°C analisado por micro-CT. Fonte: Autora. a) Modelo 3D b) Fase sólida (esqueleto) c) Fase porosa.

No modelo 3-D (Figura 4.34 (a)), é possível observar a composição granular do mármore e a porosidade, destacada na cor magenta. A fase sólida destaca a desagregação dos grãos de calcita, com grãos subarredondados a arredondados, a fase porosa destaca o microfissuramento que podem causar o enfraquecimento da coesão dos grãos minerais. Não foi observada uma orientação preferencial para a rede de poros, e sim a tendência de desenvolvimento de microfissuras intergranulares, que podem ser visualizadas realizando-se um corte transversal na amostra (Figura 4.35).

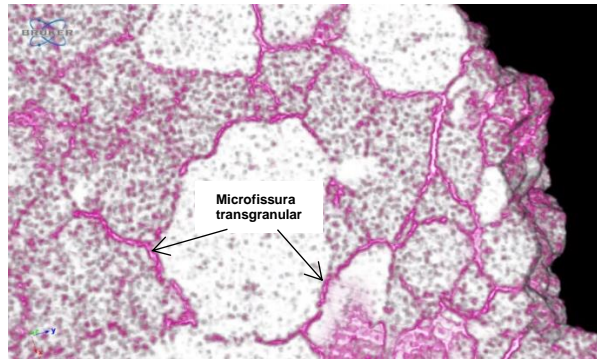


Figura 4.35 - Microfissuras Transgranulares no Mármore à 750°C. Fonte: Autora

A Figura 4.35 apresenta poros e microfissuras com dimensões superiores a 6  $\mu\text{m}$ , conforme a resolução estabelecida para a captura das sessões da amostra. Além das microfissuras intergranulares observa-se poros intra granulares, provocados pela expansão térmica (Figura 4.5 (b)) e decomposição da calcita.

A amostra apresenta um volume total de 294,92  $\text{mm}^3$  e um volume de poros de 52,55  $\text{mm}^3$ , perfazendo uma porosidade total de 17,82%, onde a porosidade aberta é 16,94%, e os poros fechados totalizam 1,06%.

Observa-se o aumento da porosidade aberta e redução da porosidade fechada, indicando que as microfissuras intergranulares formam uma rede de conexão dos poros. As microfissuras também foram observadas nas Figuras 4.27 (b) e 4.28 (c) e (d).

#### 4.3.2 – Análise da Resistência Mecânica

##### *Ensaio de Compressão*

A resistência à compressão das rochas degradadas foi avaliada nas temperaturas de 400°C, 750°C e 1100°C. Os resultados obtidos são apontados na Figura 4.36.

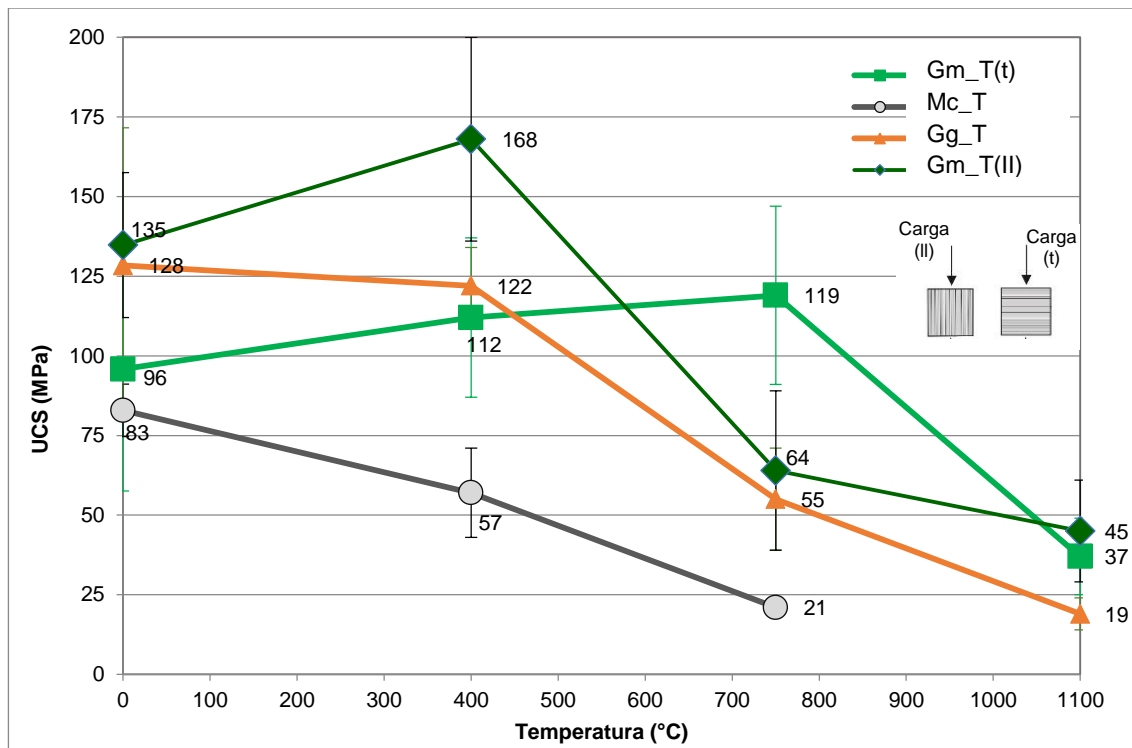


Figura 4.36 - UCS – Tratamento Térmico. Fonte: Autora

Na temperatura final do tratamento térmico, os litotipos estudados apresentaram decréscimos significativos na resistência à compressão. O gnaíse granítico sob 1100°C apresentou 15% de sua resistência inicial, o gnaíse milonítico quando avaliado paralelo às foliações apresentou 33% e perpendicular 39% de sua resistência em condição intacta. A temperatura final do mármore foi 750°C, com 25% da sua resistência à compressão inicial.

A perda de massa, porosidade aparente e absorção aparente (Tabela 4.12), mostraram-se crescentes com a temperatura. O aumento do microfissuramento inter e intracristalino (Figura 4.27) e as microfissuras (Figuras 4.28 e 4.29) associadas à expansão térmica (Figuras 4.5 ; 4.27 (b); 4.28 (c) e (d) e 4.35) indicam os danos microestruturais introduzidos pelo tratamento térmico, que podem ser responsáveis pelo enfraquecimento da coesão dos grãos minerais e a iniciação da propagação de trincas durante a compressão.

O gnaíse granítico e o mármore tiveram perda de resistência mecânica em todas as temperaturas, ao longo do tratamento térmico. As microfissuras induzidas pelo tratamento térmico nesses litotipos não têm uma orientação preferencial e o

carregamento mecânico fecha as microfissuras que são orientadas em relação à direção de carga aplicada.

O gnaisse milonítico apresentou uma diferença abrupta no comportamento da resistência mecânica nos sentidos paralelo e transversal aos bandamentos. A pedra madeira apresenta orientação preferencial dos poros paralelos às foliações, influenciando no comportamento mecânico quando submetida à compressão.

Avaliando a aplicação de carga paralela às foliações do gnaisse milonítico, nota-se um gradual ganho de resistência até a temperatura de 400°C, enquanto testada com a carga paralela às foliações, há aumento da tensão de ruptura e posterior declínio.

Quando a carga é aplicada transversalmente às foliações há o aumento da resistência mecânica até 750°C. Wones e Eugster (1965) e Somerton (1992) atribuem o ganho de resistência entre as temperaturas de 400°C e 750°C a decomposição do óxido de potássio, biotita e alterações do quartzo, provocando um pico de resistência. Tian *et al.* (2017) descrevem que abaixo de 500°C os argilominerais sinterizados contribuem para o aumento da resistência da rocha.

Zhang *et al.* (2018) indicam que acima de 500°C a expansão térmica isotrópica e a lineação dos minerais geram microfissuras, paralelas às foliações e a lineação do grão, fazendo com que durante a compressão ocorra a propagação das fissuras no sentido paralelo a foliação, ocorrendo a redução da resistência do gnaisse milonítico quando a carga é aplicada neste sentido, à 750°C.

O aumento na resistência mecânica em baixas temperaturas é observado por Ranjith *et al.* (2012) e Wong *et al.* (2020), pelo fechamento de fissuras e poros originais da rocha devido a expansão diferencial dos minerais, e pela homogeneização e densificação da matriz rochosa durante o aquecimento, que acarreta uma maior adesividade entre os grãos dos minerais componentes da rocha.

A resistência à compressão foi influenciada pela mineralogia, granulação e estado microfissural da rocha intacta e orientação da rede porosa. Os gnaisses apresentam composição mineralógica semelhante, no entanto, o gnaisse milonítico intacto não apresenta microfissuramentos intergranulares, beneficiando a coesão entre seus minerais e sua resistência.



### Resistência ao Impacto de Corpo Duro

Os resultados do ensaio de resistência ao impacto de corpo duro para as rochas degradadas em laboratório são mostrados na Tabela 4.14.

Tabela 4.11 - Impacto de Corpo Duro

|               | Gnaiss granítico |      | Mármore    |      | Gnaiss milonítico |      |
|---------------|------------------|------|------------|------|-------------------|------|
|               | Altura (m)       | W(J) | Altura (m) | W(J) | Altura (m)        | W(J) |
| Rocha intacta | 0,48             | 5    | 0,43       | 4    | 0,47              | 5    |
| 400 °C        | 0,42             | 4    | 0,43       | 4    | 0,45              | 4    |
| 750 °C        | 0,32             | 3    | 0,35       | 3    | 0,32              | 3    |
| 1100 °C       | 0,20             | 2    | -          | -    | 0,22              | 2    |

\*W:energia de ruptura

As rochas estudadas apresentaram uma redução contínua da altura e da energia de ruptura com o tratamento térmico.

Em relação à altura de queda, o gnaiss granítico e o milonítico tiveram uma redução de 59% e 53% para a temperatura final de 1100°C. O mármore reduziu 20% na temperatura de 750°C.

De modo geral, quanto à redução da altura de queda, isso se deve ao estado de microfissuramento intra e intergranular decorrente do tratamento térmico, conforme observado nas Figuras 4.27 (b), 4.28 (c), (d) e 4.35.

#### 4.3.3 – Comparação com outras pesquisas

Independente do tratamento térmico adotado, a temperatura tem uma influência significativa nas propriedades mecânicas e nas propriedades físicas das rochas. As diversas litologias são analisadas por perspectivas micro e macroscópica, com a avaliação dos índices físicos e ensaios como a petrografia, propagação de ondas, resistência mecânica entre outros.

Nas Figuras 4.37 e 4.38 são apresentados os resultados do tratamento térmico com os testes de propagação de onda e compressão uniaxial, e a comparação com resultados obtidos na literatura.

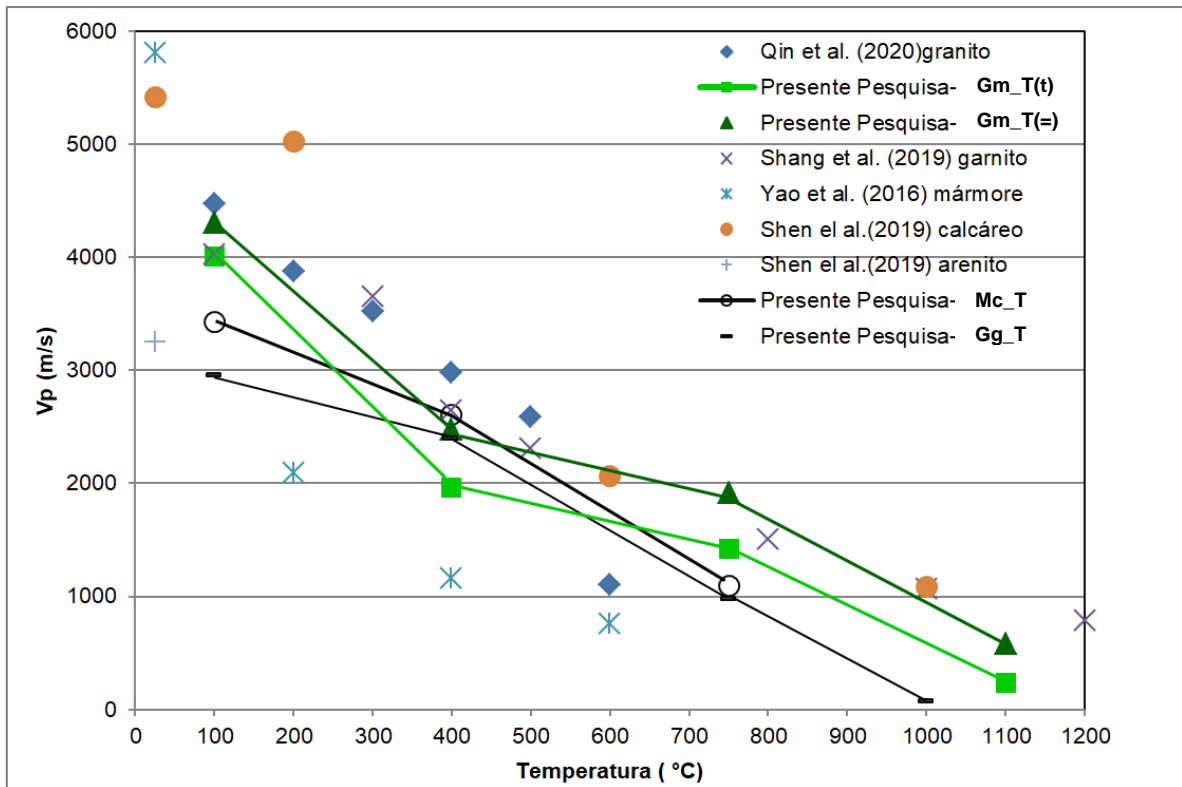


Figura 4.37 - Comparação da Velocidade de Propagação de Ondas. Fonte: Autora

Com o tratamento térmico, observou-se o decréscimo da velocidade de propagação de ondas entre as temperaturas de 100 até 1100°C, com a redução de 98% no gnaisse granítico, 94% e 86% para o gnaisse milonítico no sentido transversal e paralelo às foliações, e 68% de redução no mármore até a temperatura limite de 750°C, identificando-se o aumento da porosidade, a expansão térmica, a perda de massa, alterações químicas, transição de fase mineral e propagação de microfissuras inter e intragranulares.

Qin *et al.* (2020) observou ao analisar um granito, que Vp diminuiu linearmente com o aumento das temperaturas até 500°C e diminuiu drasticamente, chegando a 75% na temperatura de 600°C, não sendo mais identificada nas temperaturas de 800°C e 1000°C. Shang *et al.* (2019) identificou deterioração no estado cristalino dos minerais constituintes do granito, aumento da porosidade e uma diminuição de 80% da Vp em 1200°C. O mármore estudado por Yao *et al.* (2016) apresenta alterações químicas, microfissuras e uma redução de 87% na velocidade de propagação de onda até a temperatura de 600°C. Na temperatura de 1000°C, Shen *et al.* (2019), observou uma redução de 80% e 82% na velocidade de propagação de onda dos

calcáreos e arenitos, respectivamente, com dano térmico acarretando em trincas, perda de massa e aumento da porosidade.

Os resultados dos trabalhos apresentados corroboram para o estudo das alterações nas rochas submetidas a tratamento térmico, uma vez que a velocidade de propagação de ondas é influenciada pelas mudanças decorrentes da temperatura nas amostras. Para Liu *et al.* (2015), as mudanças nas características macroscópicas do material rochoso resultam das mudanças na microestrutura, portanto, as mudanças dos componentes minerais dentro da rocha, afetam as suas propriedades físicas e mecânicas.

A Figura 4.38 apresenta a comparação com os resultados da resistência à compressão. Os estudos de Chen *et al.* (2012) e Shang *et al.* (2019), mostram resultados típicos do decaimento da resistência mecânica de rochas submetidas a altas temperaturas. Os autores indicam que além da alteração mineral, pode ocorrer a fratura de partículas cristalinas ou fissuras transgranulares entre os grãos dos minerais, resultando na redução da resistência e durabilidade da rocha.

Os resultados deste estudo, somados aos de Qin *et al.* (2020), Saiang e Miskovsky (2012), Ranjith *et al.* (2012) e Gautam *et al.* (2018), mostram que o tratamento térmico em determinadas temperaturas pode ocasionar aumento da resistência da rocha. Neste caso, o incremento da resistência ocorre abaixo de uma temperatura limite de 400°C, e posterior declínio. Török e Hajpál (2005) atribuem o declínio à dissociação da água na estrutura do mineral, que geralmente acontece acima de 400°C, induzindo o desenvolvimento de microfissuras.

Todos os mecanismos envolvidos no incremento da resistência à compressão ainda não foram devidamente estudados, mas sabe-se que os minerais constitutivos, a porosidade inicial e as alterações microestruturais refletem no comportamento da rocha.

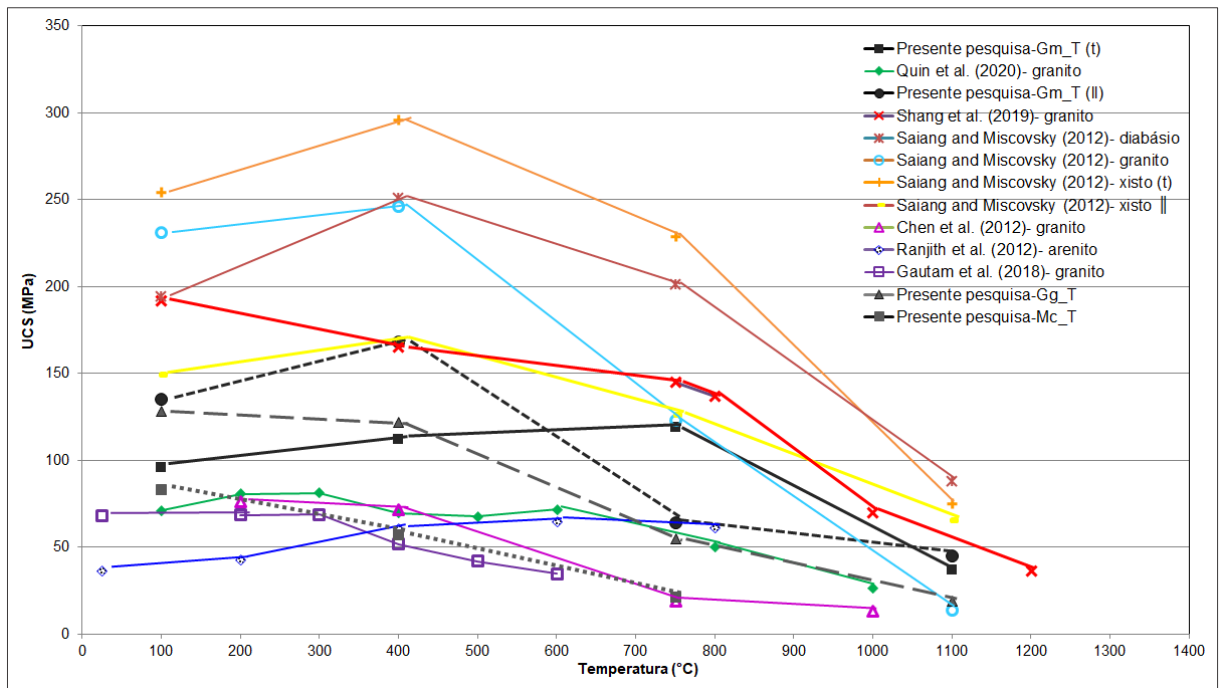


Figura 4.38 -Comparação da UCS. Fonte: Autora

Os resultados experimentais analisados demonstraram que, a temperatura tem influência na resistência da rocha, ocasionando enfraquecimento devido às fissuras, decomposição, dilatação e transições de fase dos minerais, ou o aumento na resistência mecânica, explicado pelo fechamento de fissuras e poros originais da rocha devido à expansão diferencial dos minerais, a homogeneização e densificação da matriz rochosa durante o aquecimento, que acarreta uma maior adesividade entre os grãos dos minerais componentes da rocha, a sinterização e argilominerais abaixo de 500°C (Ranjith *et al.* 2012; Tian *et al.* 2016; Wong *et al.* 2020).

#### 4.4 – Influência da Porosidade nas Propriedades Físicas e Mecânica

A mudança no ambiente de envelhecimento natural, acelerado em laboratório e o tratamento térmico produziram alterações microestruturais de diferentes intensidades, refletindo porosidades menores ou maiores consoantes a intensidade das alterações na rocha. Por apresentarem pequenas variações na porosidade, serão adicionados os resultados do envelhecimento natural e o envelhecimento acelerado em laboratório. O tratamento térmico será avaliado separadamente.

Os resultados utilizados para a resistência à compressão da pedra madeira foram com a carga aplicada transversal às foliações da rocha e leitura da  $V_p$  registrada paralela às foliações.

As características petrográficas, como composição mineral, a microestrutura, o grau de alteração e fissuração ditaram a evolução da porosidade e microfissuras nas rochas, e por sua vez influenciaram a resistência mecânica. A pedra madeira intacta apresenta microfissuras intragranular e rede de poros paralela às foliações. O granito e o mármore intactos apresentaram microfissuras intra e intergranular, com rede de poros sem indicação de orientação preferencial, corroborando para o aumento da porosidade e aumento das microfissuras existentes. O menor tamanho dos grãos minerais da pedra madeira provocou uma densificação das microfissuras intergranulares a 1100°C.

A seguir são apresentadas os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre a porosidade e as propriedades físicas e mecânicas estudadas e, entre a resistência à compressão e velocidade de propagação de ondas. Esses coeficientes são métodos estatísticos para se medir o quão próximo os dados estão da linha de regressão adotada.

O que a correlação procura entender é como uma variável se comporta em um cenário onde outra está variando, visando identificar se existe alguma relação entre a variabilidade de ambas, quantificando a relação entre as variáveis. A classificação desse coeficiente varia de 0 a 1, onde:  $R^2 < 0,1$  (muito baixa);  $R^2 = 0,1 < 0,3$  (baixa);  $R^2 = 0,3 < 0,5$  (moderada);  $R^2 = 0,5 < 0,7$  (alta);  $R^2 = 0,7 < 0,8$  (muito alta);  $R^2 = 0,9 < 1$  (quase perfeita) (Hopkins, 2016).

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam o coeficiente de determinação da porosidade com os índices físicos para o envelhecimento natural e a degradação em laboratório. As Figuras 4.41 e 4.42 apresentam as mesmas correlações com o tratamento térmico. Foi calculada e adotada as equações de regressão com o maior coeficiente de determinação entre as propriedades avaliadas.

Na Figura 4.39, observa-se que o mármore apresentou coeficiente de determinação muito baixo ( $R^2 = 0,01$ ), o gnaisse granítico e o gnaisse milonítico podem ser classificados com coeficiente de determinação baixo, com  $R^2=0,27$  e  $0,31$  respectivamente. Isso reflete o comportamento da densidade aparente, que não apresentou mudanças significativas com o envelhecimento natural e acelerado em laboratório com os valores dentro do desvio padrão.

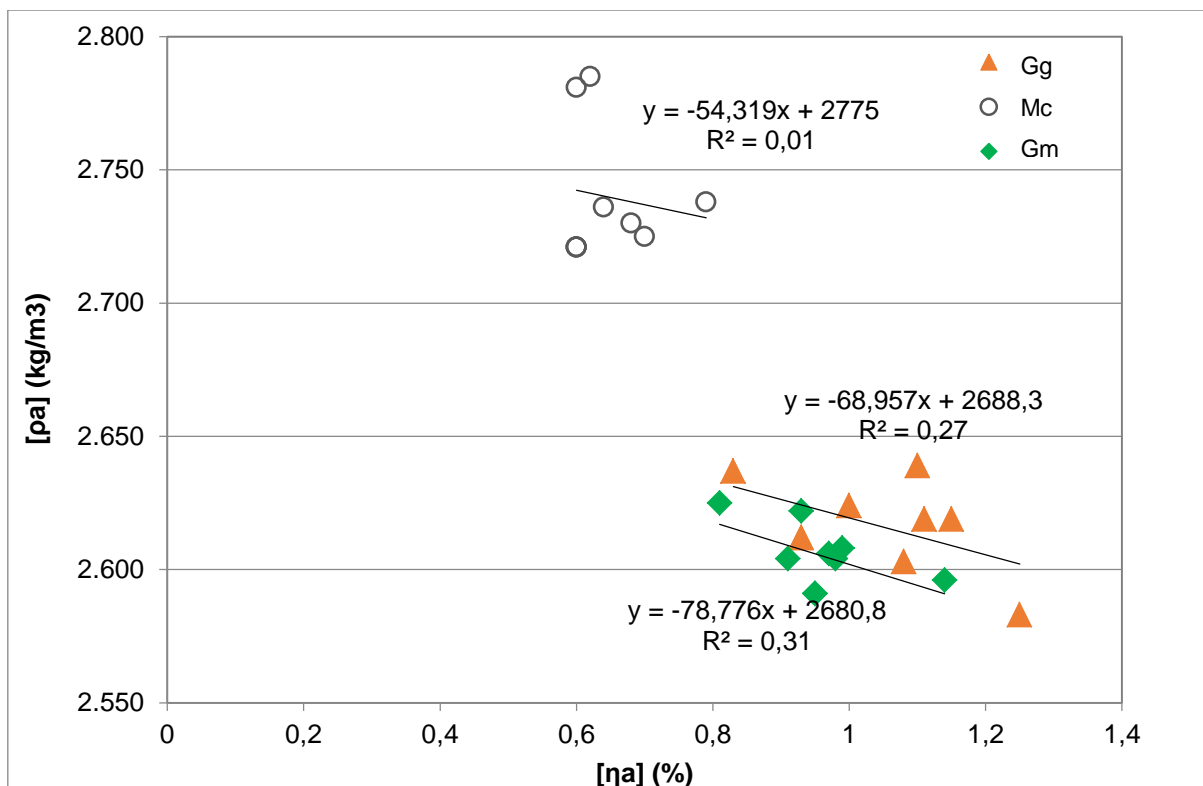


Figura 4.39 – Relação entre Densidade Aparente e Porosidade Aparente (envelhecimento natural e laboratório). Fonte: Autora

A Figura 4.40 apresenta a relação entre absorção aparente e porosidade aparente com o envelhecimento natural e o envelhecimento acelerado em laboratório.

A absorção e a porosidade aumentaram com o envelhecimento dos litotipos. O maior percentual médio foi do gnaíse granítico com o envelhecimento acelerado em ambiente costeiro, com incremento de 34 e 37% para a porosidade aparente e densidade aparente respectivamente. Foi observado  $R^2$  de 0,97 para o gnaíse granítico, 0,96 para o gnaíse milonítico e 0,87 para o mármore, indicando uma correspondência muito alta para o mármore e quase perfeita para os dois gnaíses estudados. De fato, a absorção e porosidade aparente mostraram-se diretamente relacionadas, com o incremento de uma refletindo no acréscimo da outra, mesmo que em percentuais pequenos.

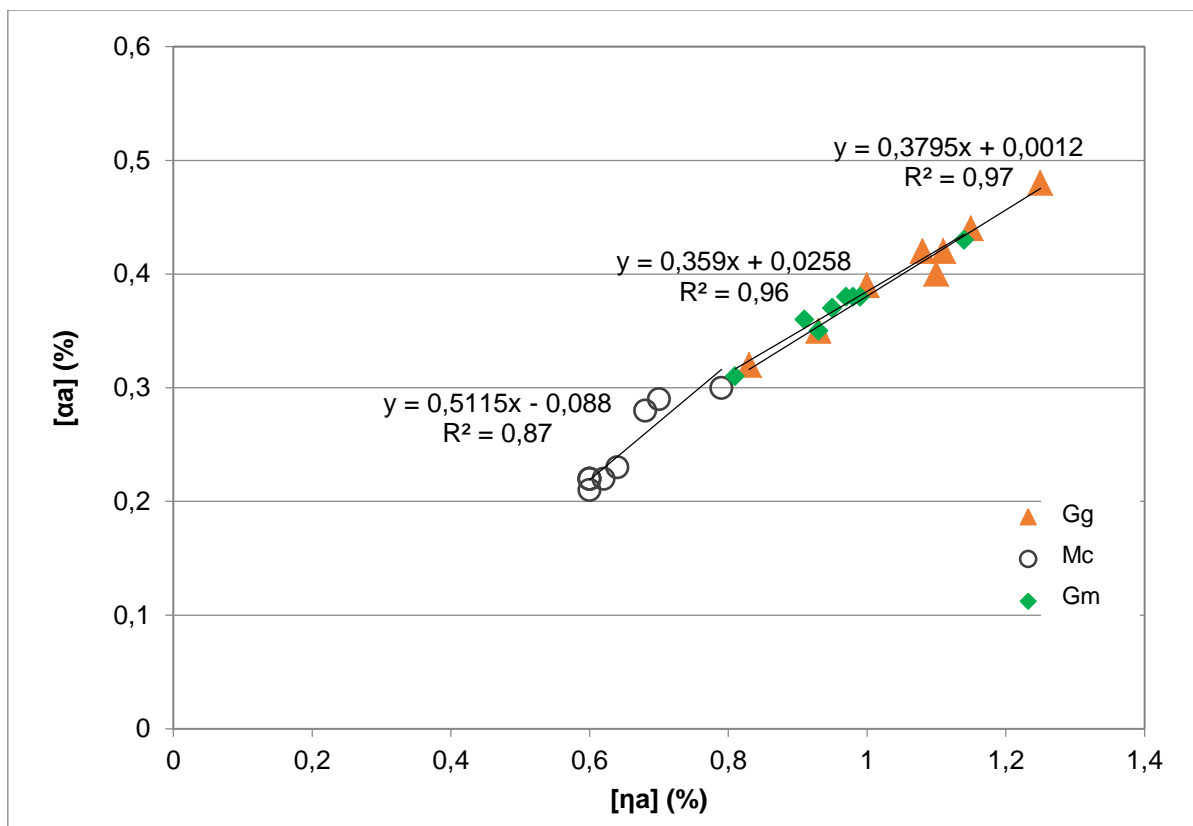


Figura 4.40 – Relação entre Absorção Aparente e Porosidade Aparente (envelhecimento em laboratório). Fonte: Autora

O tratamento térmico provocou a perda de massa, a expansão volumétrica, mudança de fase, alteração mineral e o microfissuramento que contribuíram para a redução da densidade aparente para todos os litotipos estudados (Zhao *et al.*, 2012; Gautam *et al.*, 2018).

A densidade da amostra após o tratamento térmico mostra uma diminuição gradual, enquanto a porosidade aumenta com o incremento da temperatura, quando comparada a rocha intacta. A densidade do gnaiss granítico e do mármore diminuiu de em média 3%, enquanto o gnaiss milonítico reduziu 7%. Foi obtido coeficiente de determinação de 0,81 e 0,87 para o gnaiss granítico e o mármore, classificado como muito alto para essas rochas, enquanto 0,95 para o gnaiss milonítico indica um coeficiente de determinação quase perfeito, mostrando que os valores obtidos apresentam proximidade com a linha de regressão calculada, evidenciando o uso das correlações para representar a diminuição da densidade aparente e o aumento da porosidade aparente com o tratamento térmico.

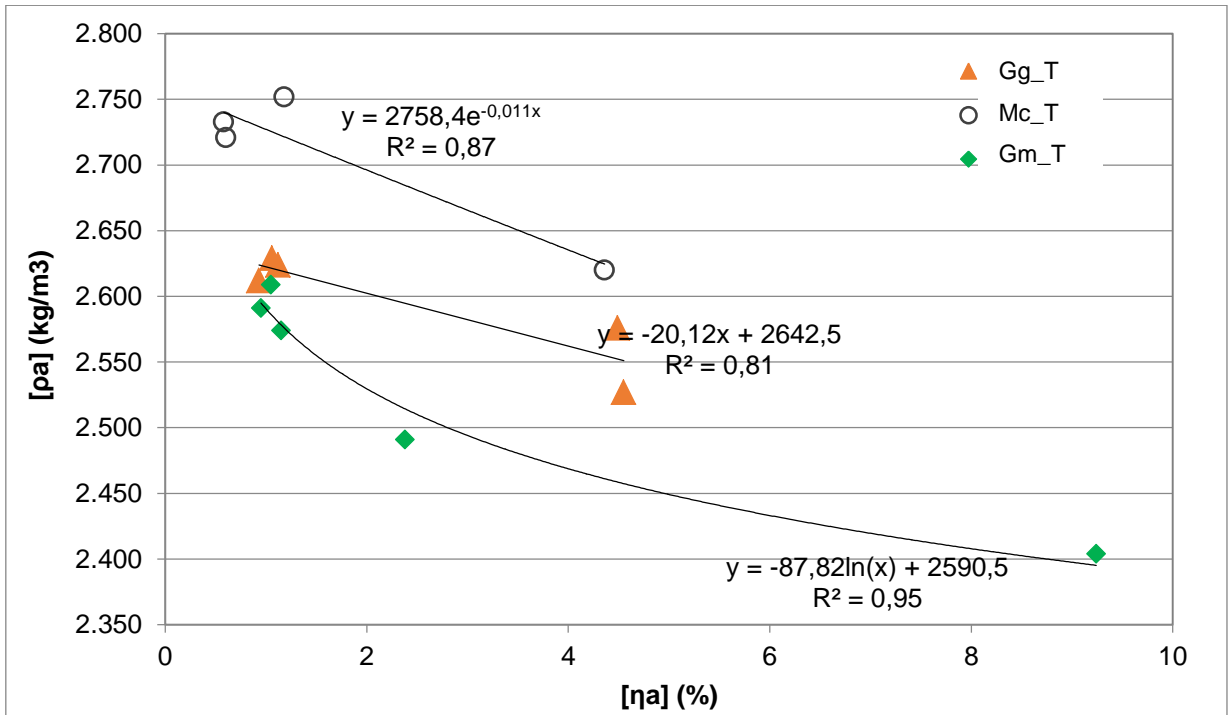


Figura 4.41 – Relação entre Densidade Aparente e Porosidade Aparente (tratamento térmico). Fonte: Autora

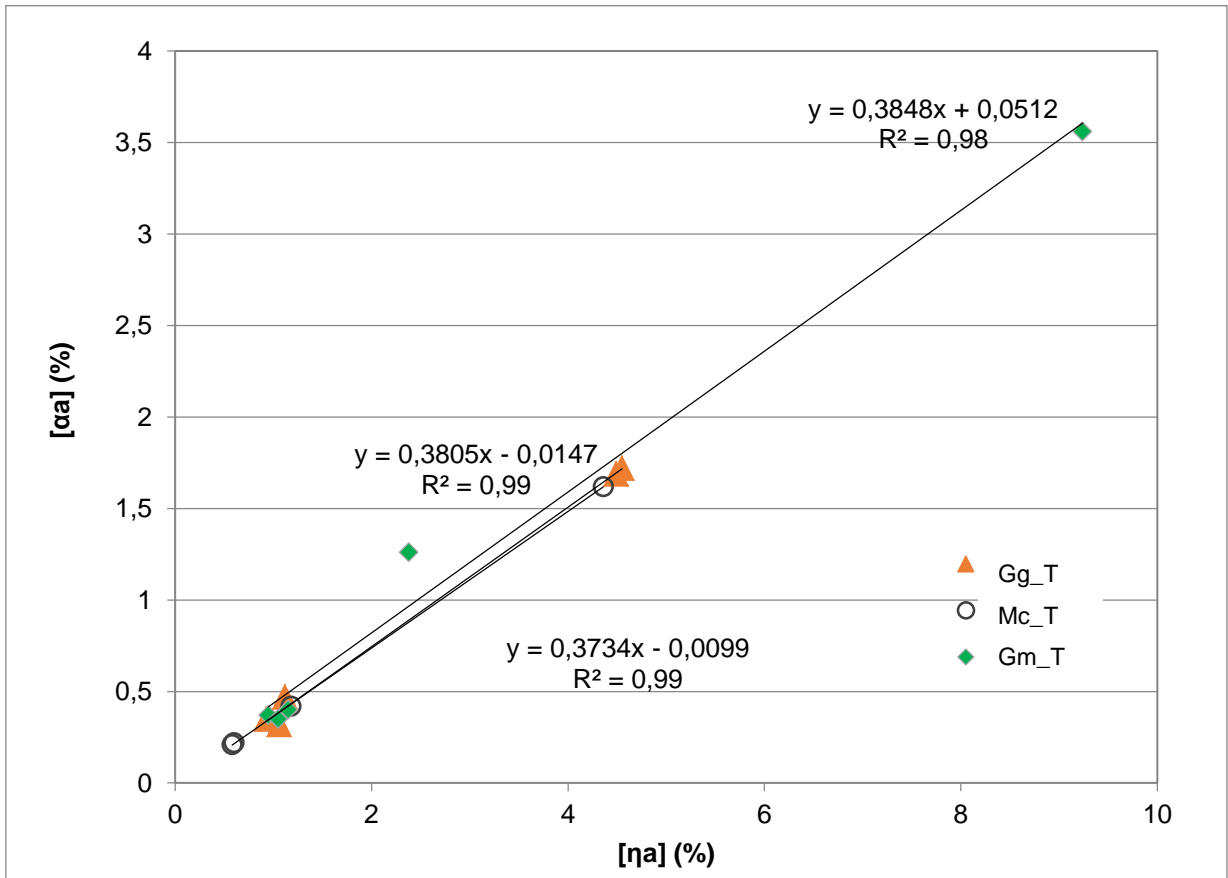


Figura 4.42 – Relação entre Absorção Aparente e Porosidade Aparente (tratamento térmico). Fonte: Autora



A Figura 4.42 apresenta a relação entre absorção aparente e porosidade aparente obtido com o tratamento térmico dos litotipos. Similar ao observado para o envelhecimento natural (Figura 4.40), o tratamento térmico registra coeficiente de determinação quase perfeita, com valores de  $R^2 = 0,99$  para o mármore e o gnaise granítico e  $0,98$  para o gnaise milonítico. A absorção aparente e a porosidade aparente mostraram-se diretamente relacionadas, com o incremento de uma refletindo no acréscimo da outra. Conforme observado no item 4.3.1, o tratamento térmico impõe mudanças microestruturais que levam à perda de massa, a alterações de minerais, ao microfissuramento, que contribuíram para a redução da densidade aparente (Figura 4.41) e conseqüentemente ao aumento da porosidade aparente e da absorção aparente.

A Figura 4.43 apresenta a relação entre a velocidade de propagação de ondas e a porosidade aparente com o envelhecimento natural e o envelhecimento acelerado em laboratório. A Figura 4.44 indica a relação entre  $V_p$  e a porosidade aparente com o tratamento térmico.

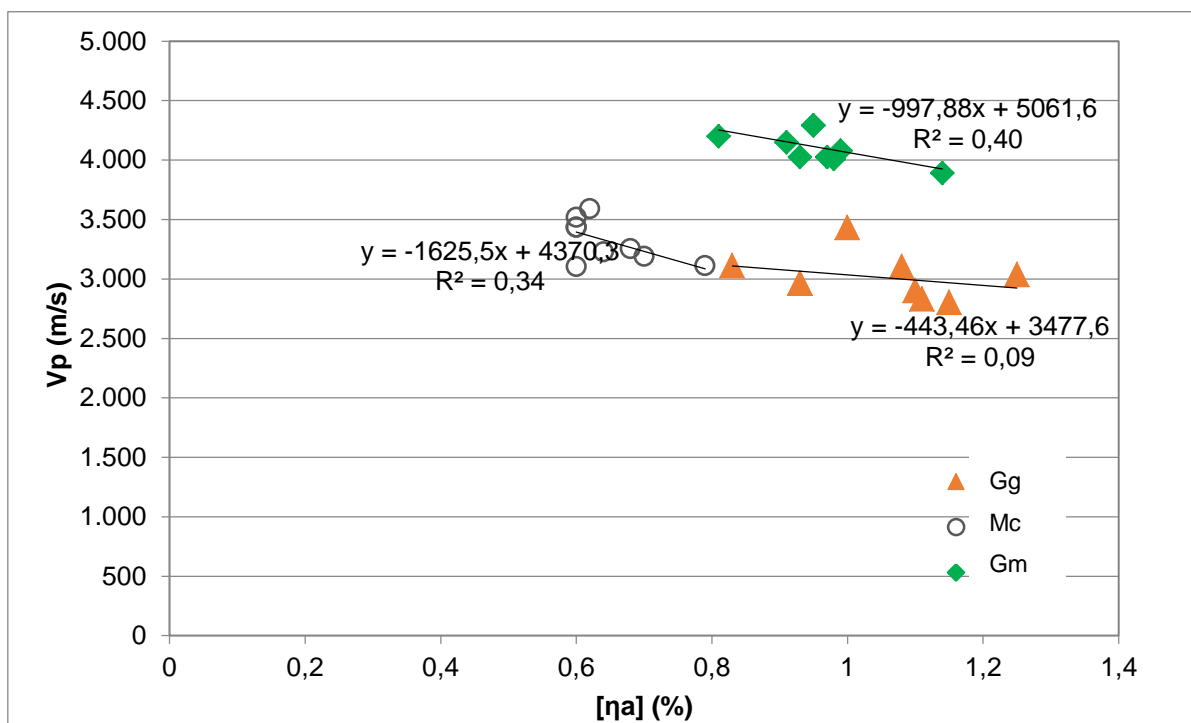


Figura 4.43 – Relação entre  $V_p$  e Porosidade Aparente (envelhecimento natural). Fonte: Autora

Nas rochas estudadas, a velocidade de propagação de ondas aumentou 2% no gnaise granítico, e reduziu 12% no mármore e 5% no gnaise milonítico, enquanto a porosidade aparente manteve-se dentro do desvio padrão, com uma tendência de

redução dos valores médios. Os coeficientes de determinação (Figura 4.43) apontam a correspondência muito baixa para o gnaisse granítico, com  $R^2 = 0,09$  e moderada para o mármore e o gnaisse milonítico, com valores de 0,34 e 0,40 respectivamente. As variações percentuais da velocidade aparente e da porosidade aparente foram pequenas, o intervalo de tempo de 2 anos de envelhecimento natural e 210 dias de envelhecimento acelerado mostraram-se pequenos para ocorrer mudanças significativas que pudessem ser devidamente mensuradas pela velocidade de propagação de ondas e porosidade aparente.

A Figura 4.44 apresenta a relação entre a velocidade de propagação de ondas e a porosidade aparente com o tratamento térmico. Oposta a Figura 4.43, o tratamento térmico induziu danos significativos nas amostras estudadas, com uma expressiva redução da velocidade de propagação de ondas e aumento da porosidade aparente e coeficientes de determinação quase perfeita para os litotipos estudados, com valor de  $R^2 = 0,95$  para o gnaisse granítico, 0,90 e 0,93 para o mármore e a pedra madeira respectivamente. A velocidade de propagação de ondas e a porosidade aparente avaliadas no tratamento térmico são bons indicadores das condições microestruturais das rochas, apresentam equações de regressão com o maior coeficiente de determinação quase perfeita e correlação entre as propriedades avaliadas. No entanto, observa-se na Figura 4.43, que a correlação só é possível com a mudança significativa desses índices.

As principais causas para o declínio da velocidade de propagação de onda da rocha após o tratamento térmico são: o aumento do volume dos poros, com os vazios produzindo um efeito de barreira na velocidade de propagação de ondas, o grande número de microfissuras em desenvolvimento no interior da rocha, que sob a ação da temperatura expandem-se, o surgimento de maior quantidade de novas microfissuras, a desidroxilação e as mudanças dos componentes minerais, onde um declínio significativo da  $V_p$  é resultado da mudança significativa nas propriedades do material ( Liu e Xu, 2015; Yin *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2016; Yao *et al.*, 2016; Gautam *et al.*, 2018 ; Shen *et al.*, 2018; Shang *et al.*, 2019; Qin *et al.*, 2020).

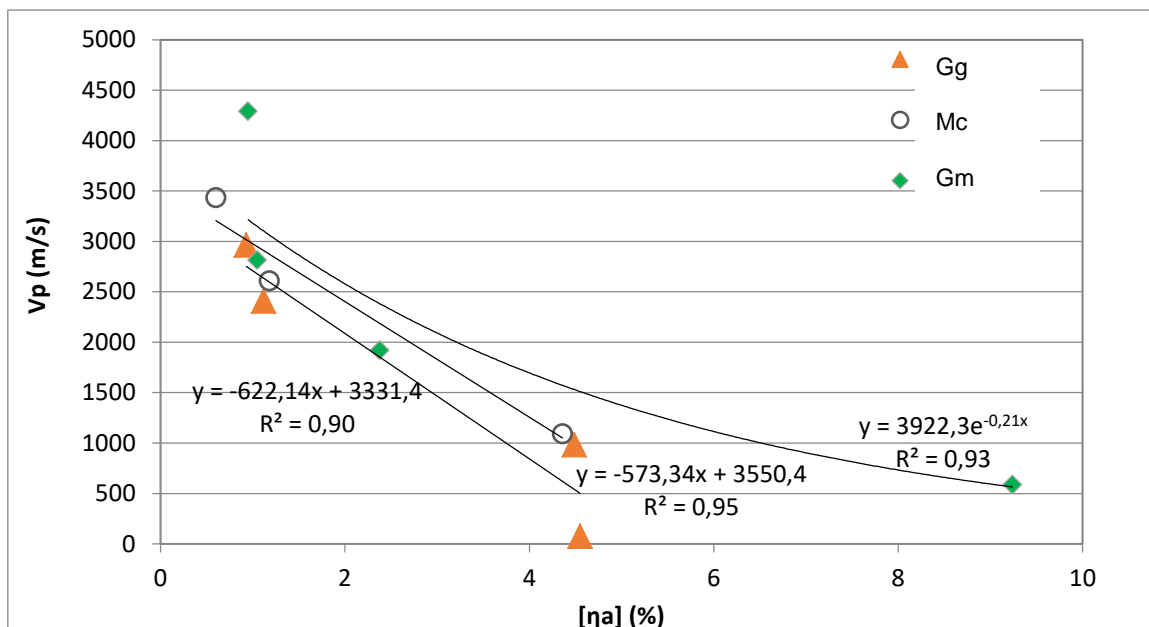


Figura 4.44 – Relação entre Vp e Porosidade Aparente (tratamento térmico). Fonte: Autora

A Figura 4.45 apresenta a correlação da resistência à compressão com a porosidade aparente durante o envelhecimento natural e a degradação em laboratório. A Figura 4.46 indica a relação entre esses parâmetros com o tratamento térmico.

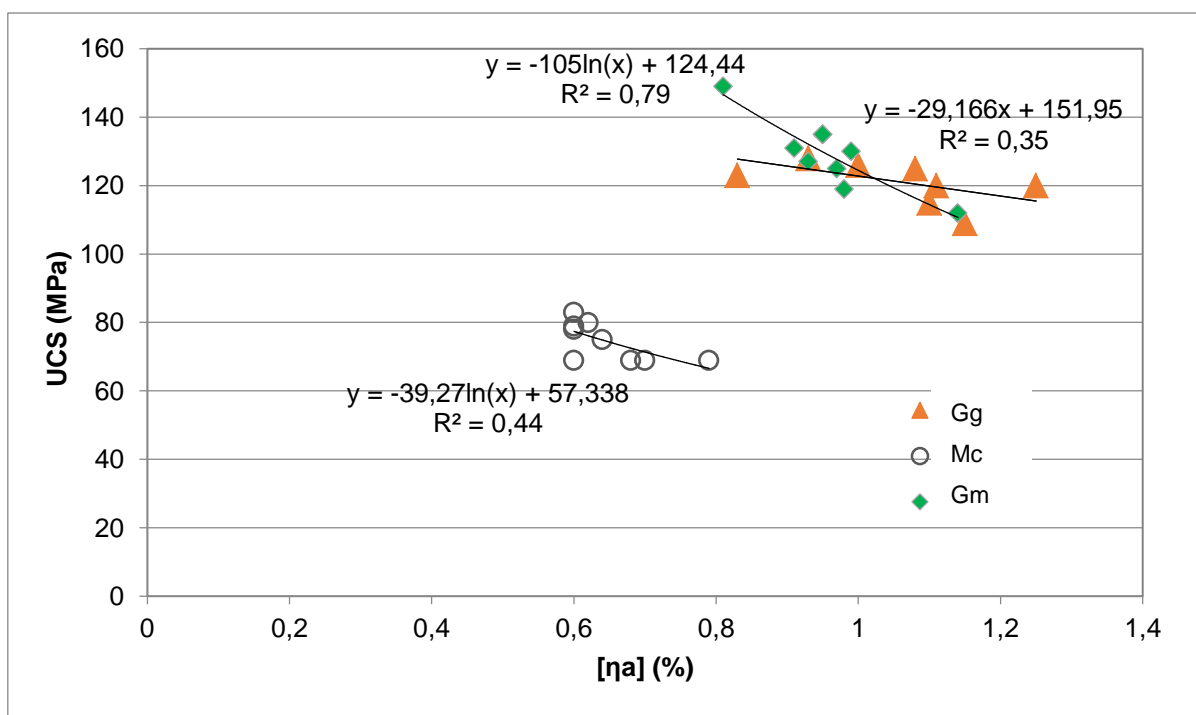


Figura 4.45 – Relação entre resistência à compressão e porosidade aparente (envelhecimento natural e de laboratório). Fonte: Autora

O envelhecimento natural e o envelhecimento acelerado em laboratório provocaram o decaimento da resistência à compressão e o incremento da

porosidade. Salienta-se que essas variações foram de pequena magnitude, que reflete em menores coeficientes de determinação, conforme observado nas Figuras (4.39 e 4.43). Os coeficientes de determinação da Figura 4.45 apontam a correspondência moderada para o gnaisse granítico e o mármore com valores de  $R^2 = 0,35$  e  $0,44$  respectivamente, e uma correspondência alta no gnaisse milonítico, com valor de  $R^2 = 0,79$ .

As variações percentuais da resistência à compressão e da porosidade aparente foram pequenas, o intervalo de tempo de 2 anos de envelhecimento natural e 210 dias de envelhecimento acelerado mostraram mudanças de pequenas magnitudes, não favorecendo as correlações com curvas de regressão e os ajustes quase perfeitos almejados.

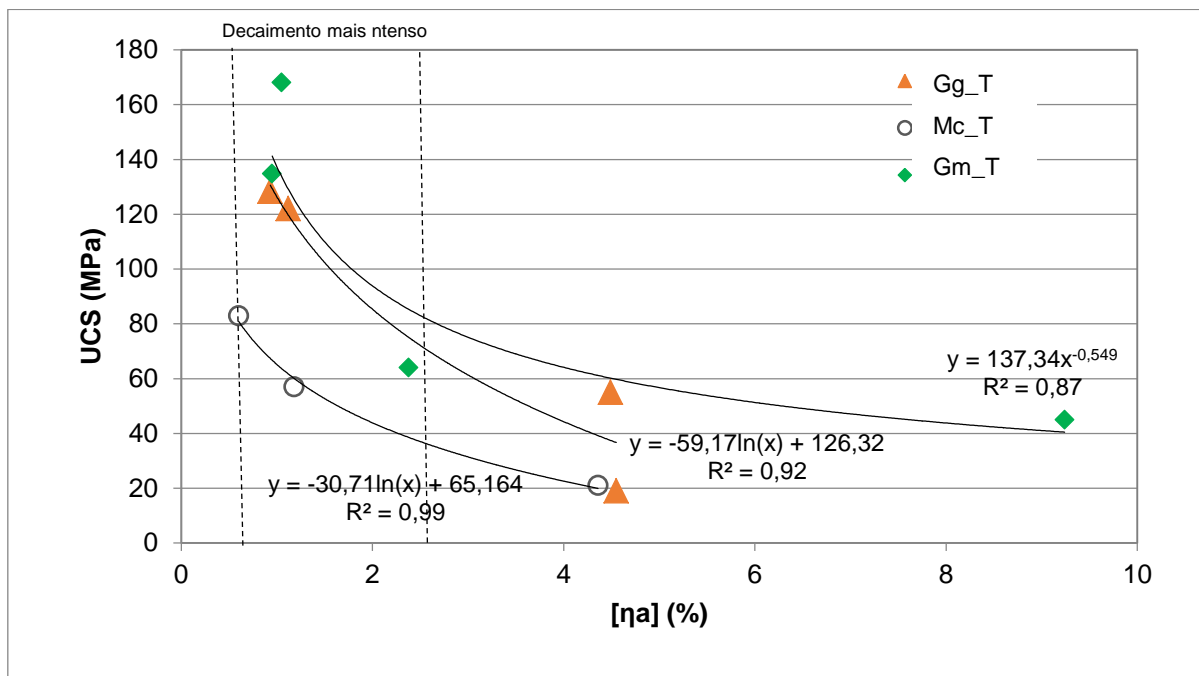


Figura 4.46 – Relação entre resistência à compressão e porosidade aparente (tratamento térmico).  
Fonte: Autora

A Figura 4.46 apresenta a relação entre a resistência à compressão e a porosidade aparente com o tratamento térmico. Similar à Figura 4.44, o tratamento térmico induziu danos significativos nas amostras estudadas, com uma expressiva redução da resistência à compressão e aumento da porosidade aparente. Os coeficientes de determinação obtidos para o gnaisse granítico e o mármore são classificados como quase perfeitos, com valores de  $0,92$  e  $0,99$  respectivamente. O

gnaisse milonítico apresenta um alto coeficiente de determinação, com valor de 0,87.

Os maiores coeficientes de determinação para o gnaisse granítico e o mármore são justificados pelo comportamento do material frente aos ensaios de resistência à compressão, que apresentou declínio da propriedade mecânica e o incremento da porosidade aparente com o aumento da temperatura do tratamento térmico, conforme esperado para a maioria das rochas testadas nessas condições (Saiang e Miskovsky, 2012; Zhu *et al.*, 2018). Observa-se que o gnaisse granítico e o mármore intactos apresentam microfissuras intra e intergranulares, sem direção preferencial, que corroboram com o microfissuramento, o aumento da porosidade e absorção aparente, a redução da velocidade de propagação de ondas e da resistência mecânica.

Observa-se na Figura 4.46 entre 0,5% e 2,5% ocorre um decaimento de resistência mais intenso dos gnaisses estudados verde observados entre o intacto (temperatura ambiente) e a 750°C, para baixo acréscimo de poros. O mármore apresenta maior intensidade de decaimento de resistência mecânica entre o intacto (temperatura ambiente) e a 400°C, sugerindo maior efeito nesta propriedade do que na porosidade aparente (entre 0,5 e 1,18%).

O gnaisse milonítico apresentou aumento de resistência à compressão até a temperatura de 750°C (Figura 4.36), aumento linear da porosidade aparente e absorção aparente (Figura 4.42) com o tratamento térmico, acarretando em um coeficiente de determinação alto, com valor de  $R^2 = 0,87$ , mas diferente das demais rochas estudadas.

Conforme discutido nos itens 4.3.2 e 4.3.3, a resistência à compressão foi influenciada pela mineralogia, granulação e principalmente pelo estado microfissural e orientação da rede porosa. O gnaisse milonítico apresenta orientação preferencial dos poros paralelos às foliações e não apresenta microfissuras intergranulares, influenciando no comportamento mecânico quando submetida à compressão até 750°C.

A carga aplicada transversal às foliações promovem um fechamento dos poros e microfissuras, a decomposição de minerais entre 400°C e 750°C, a sinterização dos argilominerais até 500°C promovem a homogeneização e densificação da matriz rochosa durante o aquecimento, que acarreta uma maior adesividade entre os grãos dos minerais componentes da rocha, corroboram para o aumento da resistência

mecânica (Wones e Eugster, 1965; e Somerton, 1992 ; Tian *et al.*, 2017, Zhang *et al.*, 2018; Ranjith *et al.*, 2012; Wong *et al.*, 2020).

A correlação entre a velocidade de propagação de ondas e a resistência à compressão com o envelhecimento natural e a degradação em laboratório é mostrada na Figura 4.47. A Figura 4.48 indica a correlação entre esses parâmetros com o tratamento térmico.

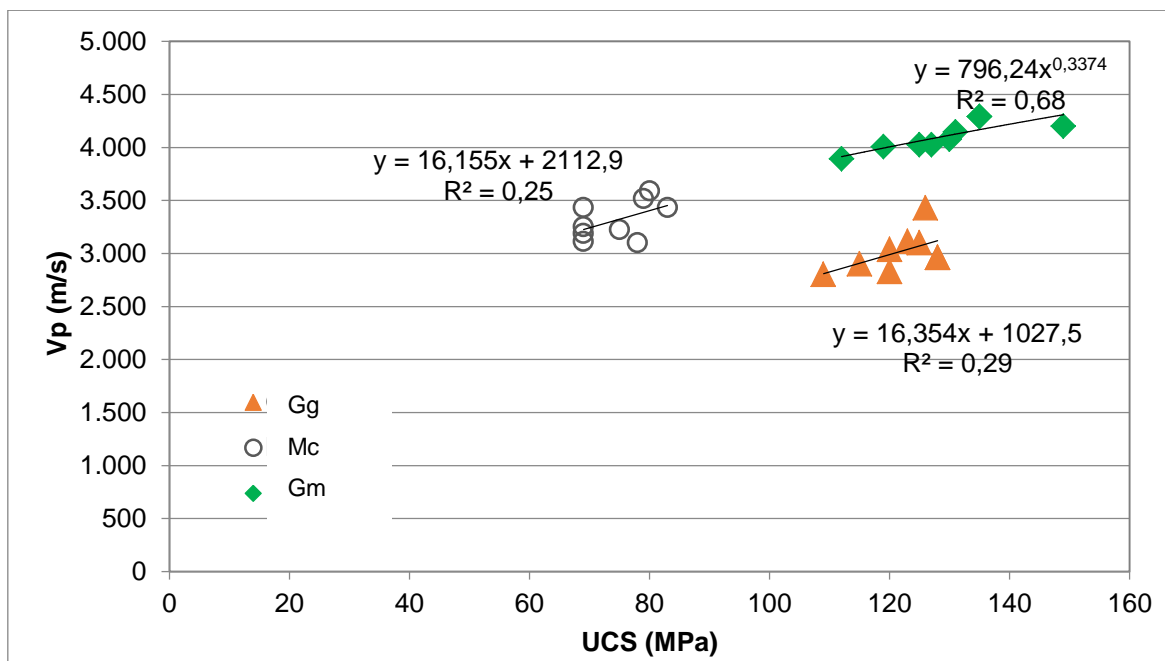


Figura 4.47 – Relação entre Vp e resistência à compressão (envelhecimento natural). Fonte: Autora

Na Figura 4.47, a velocidade de propagação de ondas e a resistência à compressão apresentaram baixos coeficientes de correlações, com valores de 0,29 para o garnito e 0,25 para o mármore. O gnaisse milonítico apresentou uma alto coeficiente de correlação, com valor de 0,68. Conforme apresentado nas Figuras (4.39, 4.43 e 4.45) a pequena magnitude dos efeitos do envelhecimento natural e do envelhecimento acelerado em laboratório, somados à heterogeneidade das rochas promovem a dispersão dos resultados, acarreta em coeficientes de determinação menores. As correlações dos índices são melhores observados no tratamento térmico, com os valores mensurados apresentando maior magnitude.

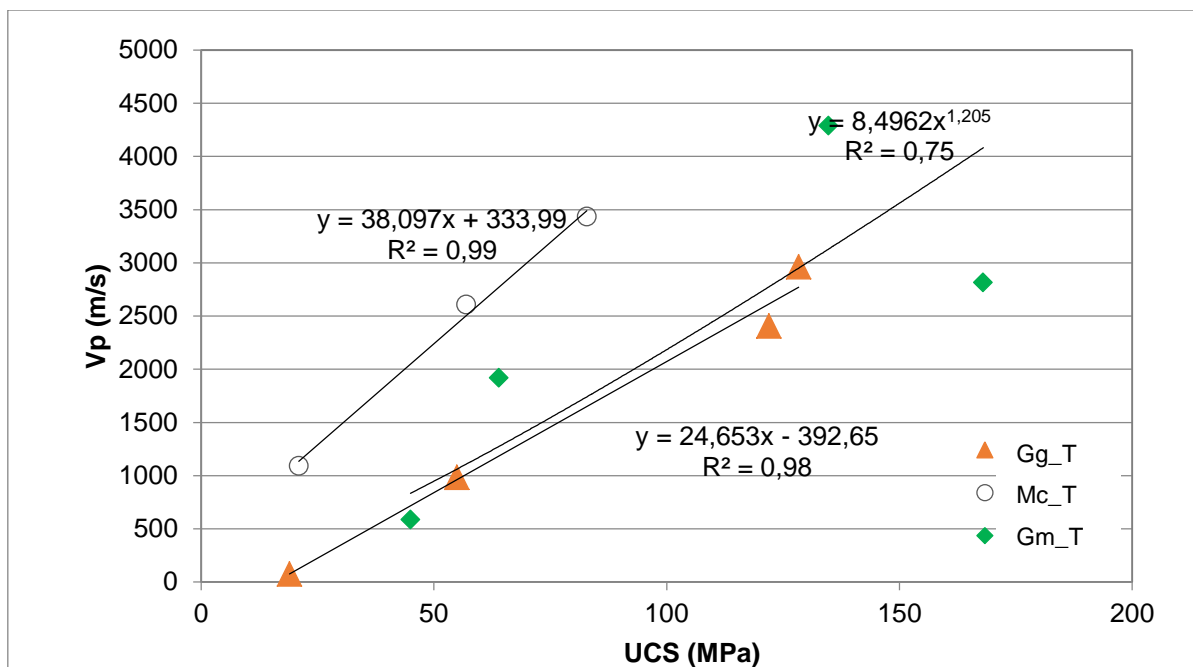


Figura 4.48 – Relação entre Vp e resistência à compressão (tratamento térmico). Fonte: Autora

A Figura 4.48 apresenta a relação entre a resistência à compressão e a porosidade aparente com o tratamento térmico. Similar as Figuras (4.44 e 4.46), o tratamento térmico induziu danos significativos nas amostras estudadas, com uma expressiva redução velocidade de propagação de ondas e da resistência à compressão no gnaiss granítico e no mármore, e diminuição da velocidade de propagação de ondas e aumento da resistência mecânica no gnaiss milonítico. Os coeficientes de determinação obtidos para o gnaiss milonítico e o mármore são classificados como quase perfeitos, com valores de  $R^2 = 0,98$  e  $0,99$  respectivamente. O gnaiss milonítico apresenta um coeficiente de determinação classificado como muito alto, com valor de  $R^2 = 0,75$ .

Os maiores coeficientes de determinação para o gnaiss granítico e o mármore são justificados pelo comportamento do material frente aos ensaios de velocidade de propagação de ondas e resistência à compressão, que apresentou declínio de ambas as propriedades. Conforme descrito, o gnaiss milonítico apresentou redução da velocidade de propagação de ondas e aumento da resistência mecânica.

As correlações entre a velocidade de propagação de ondas e a resistência mecânica são consistentes com o comportamento das litologias frente ao tratamento térmico e indicam as mudanças microestruturais ocorridas nas rochas.

A magnitude do incremento e decréscimo das propriedades avaliadas influenciou nos coeficientes de determinação, com as melhores regressões apresentadas no tratamento térmico.

Nas rochas submetidas ao tratamento térmico, os índices avaliados apresentaram excelentes correlações. As propriedades físicas e mecânicas mostraram-se influenciadas pela porosidade e estado microestrutural das rochas.

Ao avaliar a intrusão máxima do volume de mercúrio que corresponde a degradação acelerada do gnaiss milonítico com 210 dias, tem-se um total de 0,0102 ml/g. Com o tratamento térmico o volume máximo da intrusão é 0,0399 ml/g para a mesma rocha. O volume de mercúrio intrudido é triplicado, mostrando no tratamento térmico as alterações sofridas pela rocha são mais acentuadas, há o aumento do diâmetro dos poros, uma maior porosidade e conseqüentemente maior absorção. A microscopia mostram a densificação da matriz rochosa, a micro-CT indica o surgimento de microfissuras, criando uma rede de interligação entre os poros, reduzindo a porosidade fechada. A petrografia aponta oxidação e transformações de minerais que levam a perda de massa durante o aquecimento, reduzindo a densidade das amostras estudadas e conseqüentemente reduzindo o valor da propagação de ondas.

Avaliando os valores da porosidade obtida pelos índices físicos e da porosidade obtida pela PIM, a segunda apresenta valores superiores. A intrusão de mercúrio alcança poros de menores diâmetros que a água não penetra durante a saturação.

#### **4.5 – Estimativa da Durabilidade**

Para se estimar o quanto uma propriedade avaliada após o envelhecimento acelerado de laboratório é mais intenso que o natural, compara-se os resultados entre ambos, definindo um fator de aceleração hipotético (Stizia *et. al.*, 2021), que indica que a reprodução das alterações e variação das propriedades da rocha em laboratório é 8,11 vezes mais rápida do que em ambiente natural, para o período avaliado.

Partindo dessa relação, os 210 dias de degradação em câmara no laboratório, assemelham-se a perda da resistência sofrida pelas amostras em aproximadamente 4 anos e 8 meses (1.703 dias) de envelhecimento natural.



As mudanças percentuais nas propriedades físicas e mecânicas das rochas foram determinadas usando a Equação 7 (Capítulo 3), proposta por Binal *et al.* (1998).

A taxa de mudança percentual dos índices físicos, velocidade de propagação de ondas e resistência à compressão das rochas com envelhecimento natural e degradação acelerada em laboratório é mostrada na Tabela 4.15 e 4.16.

A densidade aparente aumentou com o envelhecimento e degradação, excetuando-se o gnaisse granítico com envelhecimento natural.

Tabela 4.12 - Taxa de Mudança dos Índices Físicos, Vp e UCS- Envelhecimento Natural

|    |          | Densidad<br>e<br>aparente | Porosidad<br>e<br>aparente | Absorção<br>de água<br>aparente | UCS     | UCS(II)* | Vp      | Vp(t)*  |
|----|----------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------|----------|---------|---------|
| Gg | 1 a urb  | 100,46%                   | 107,53%                    | 111,43%                         | 98,44%  | -        | 115,80% | -       |
|    | 2 a urb  | 99,66%                    | 116,13%                    | 120,00%                         | 97,66%  | -        | 104,73% | -       |
|    | 1 a cost | 100,96%                   | 89,25%                     | 91,43%                          | 96,09%  | -        | 105,06% | -       |
|    | 2 a cost | 98,89%                    | 134,41%                    | 137,14%                         | 93,75%  | -        | 102,53% | -       |
| Mc | 1 a urb  | 102,35%                   | 103,33%                    | 100,00%                         | 96,39%  | -        | 104,57% | -       |
|    | 2 a urb  | 100,00%                   | 100,00%                    | 100,00%                         | 93,98%  | -        | 90,36%  | -       |
|    | 1 a cost | 102,21%                   | 100,00%                    | 95,45%                          | 95,18%  | -        | 90,65%  | -       |
|    | 2 a cost | 100,55%                   | 106,67%                    | 104,55%                         | 90,36%  | -        | 88,46%  | -       |
| Gm | 1 a urb  | 101,31%                   | 85,26%                     | 83,78%                          | 110,37% | 101,04%  | 97,90%  | 103,87% |
|    | 2 a urb  | 100,58%                   | 102,11%                    | 102,70%                         | 92,59%  | 90,63%   | 93,82%  | 90,47%  |
|    | 1 a cost | 100,50%                   | 95,79%                     | 97,30%                          | 97,04%  | 97,92%   | 96,67%  | 97,11%  |
|    | 2 a cost | 100,66%                   | 104,21%                    | 102,70%                         | 96,30%  | 94,79%   | 95,03%  | 93,64%  |

UCS(II)\* Resistência à compressão com carga aplicada paralela às foliações.

Vp(t)\* Velocidade de propagação de ondas, medida transversal às foliações.

\*1 a: 1 ano; 2 a: 2anos.

As maiores taxas de mudança na porosidade e absorção aparente são observadas no gnaisse granítico, que aumentou 34 e 37%, com 2 anos de envelhecimento natural e 50 e 37% com 180 dias de degradação acelerada de laboratório.

A variação das propriedades apresentando aumento e decréscimo sucessivo com o envelhecimento, pode ser atribuída as diferenças à heterogeneidade do material.

Tabela 4.13 - Taxa de Mudança dos Índices Físicos, Vp e UCS- Envelhecimento acelerado em laboratório

|    | Tempo dias | Densidade aparente | Porosidade aparente | Absorção de água aparente | UCS    | UCS(II) | Vp     | Vp(t)  |
|----|------------|--------------------|---------------------|---------------------------|--------|---------|--------|--------|
| Gm | 90         | 100,27%            | 119,35%             | 120,00%                   | 93,75% | -       | 95,54% | -      |
|    | 180        | 101,03%            | 118,28%             | 114,29%                   | 89,84% | -       | 97,97% | -      |
|    | 210        | 100,27%            | 123,66%             | 125,71%                   | 85,16% | -       | 94,60% | -      |
| Mc | 90         | 100,33%            | 113,33%             | 127,27%                   | 93,98% | -       | 94,76% | -      |
|    | 180        | 100,15%            | 116,67%             | 131,82%                   | 87,95% | -       | 92,89% | -      |
|    | 210        | 100,62%            | 131,67%             | 136,36%                   | 83,13% | -       | 90,65% | -      |
| Gm | 90         | 101,20%            | 97,89%              | 94,59%                    | 94,07% | 94,79%  | 93,82% | 90,34% |
|    | 180        | 100,50%            | 103,16%             | 102,70%                   | 88,15% | 86,46%  | 93,40% | 90,14% |
|    | 210        | 100,19%            | 120,00%             | 116,22%                   | 82,96% | 83,33%  | 90,70% | 87,67% |

De modo geral, a rocha submetida ao envelhecimento acelerado em laboratório e ao envelhecimento natural apresentaram ao final de 210 dias e de 2 anos, decaimento das médias das propriedades avaliadas.

A Tabela 4.17 apresenta a taxa de mudança percentual dos índices físicos, velocidade de propagação de ondas e resistência à compressão das rochas submetidas ao tratamento térmico.

Tabela 4.14 - Taxa de Mudança dos Índices Físicos, Vp e UCS- Tratamento Térmico

|    | Temp °C | Densidade aparente | Porosidade aparente | Absorção de água aparente | UCS     | UCS (II) | Vp     | Vp(t)  |
|----|---------|--------------------|---------------------|---------------------------|---------|----------|--------|--------|
| Gg | 200 °C  | 100,65%            | 113,98%             | 91,43%                    | -       | -        | -      | -      |
|    | 400 °C  | 100,46%            | 120,43%             | 134,29%                   | 95,04%  | -        | 81,23% | -      |
|    | 750 °C  | 98,62%             | 482,80%             | 482,86%                   | 42,84%  | -        | 33,22% | -      |
|    | 1100 °C | 96,75%             | 489,25%             | 491,43%                   | 14,80%  | -        | 2,50%  | -      |
| Mc | 200 °C  | 100,44%            | 96,67%              | 95,45%                    | -       | -        | -      | -      |
|    | 400 °C  | 101,14%            | 196,67%             | 190,91%                   | 68,77%  | -        | 75,91% | -      |
|    | 750 °C  | 96,29%             | 726,67%             | 736,36%                   | 25,34%  | -        | 31,81% | -      |
| Gm | 200 °C  | 99,34%             | 121,05%             | 108,11%                   | -       | -        | -      | -      |
|    | 400 °C  | 100,69%            | 110,53%             | 94,59%                    | 124,65% | 116,89%  | 65,63% | 65,81% |
|    | 750 °C  | 96,14%             | 250,53%             | 340,54%                   | 47,48%  | 124,19%  | 44,74% | 35,49% |
|    | 1100 °C | 92,78%             | 972,63%             | 962,16%                   | 33,39%  | 38,61%   | 13,69% | 6,01%  |

Na temperatura final do tratamento térmico, os litotipos estudados apresentaram decréscimos significativos nas propriedades avaliadas.

O gnaisse granítico sob 1100°C apresentou 15% de sua resistência inicial, o gnaosse milonítico quando avaliado paralelo às foliações apresentou 33% e perpendicular 39% de sua resistência em condição intacta. A temperatura final do mármore foi 750°C, com 25% da sua resistência à compressão inicial.

A perda de massa, porosidade aparente e absorção aparente (Tabela 4.17), mostraram-se crescentes com a temperatura. O gnaisse granítico e o mármore tiveram perda de resistência mecânica em todas as temperaturas, ao longo do tratamento térmico, enquanto o gnaisse milonítico apresentou variações, discutidas anteriormente.

A Figura 4.49 apresenta a previsão do comportamento da resistência mecânica das rochas estudadas, elaborada a partir do envelhecimento acelerado e da função de decaimento proposta por Mutluturk *et al.* (2004), mostrada na Equação 8 (Capítulo 3). As linhas de tendência para obtenção do constante de decaimento  $\lambda$  encontram-se no apêndice F.

A Tabela 4.18 contém a constante  $\lambda$  e o coeficiente de correlação da equação. A constante de decaimento foi determinada por análise de regressão simples.  $\lambda$  indica a perda média de integridade de cada propriedade mecânica pela ação de qualquer ciclo de envelhecimento.

Tabela 4.15 - Constante de decaimento

|                        | <b>Gg</b> |                | <b>Mc</b> |                | <b>Gm</b> |                | <b>Gm (II)</b> |                |
|------------------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|----------------|----------------|
|                        | $\lambda$ | R <sup>2</sup> | $\lambda$ | R <sup>2</sup> | $\lambda$ | R <sup>2</sup> | $\lambda$      | R <sup>2</sup> |
| Degrad.<br>Laboratório | -0,0007   | 0,99           | -0,0008   | 0,99           | -0,0008   | 0,99           | -0,0009        | 0,99           |
| Env. Amb.<br>Urbano    | -0,012    | 0,96           | -0,031    | 0,99           | -0,038    | 0,19           | -0,049         | 0,67           |
| Env. Amb.<br>Costeiro  | -0,032    | 0,98           | -0,051    | 0,99           | -0,019    | 0,89           | -0,027         | 0,98           |

O sinal negativo na constante  $\lambda$  indica a perda de integridade de uma propriedade mecânica. Valores de constante de decaimento relativamente mais altos revelam a maior sensibilidade da rocha ao processo de envelhecimento.

Valores de constante de decaimento relativamente mais altos foram obtidos para as propriedades mecânicas do gnaisse granítico e no mármore submetidos ao

envelhecimento costeiro, o gnaiss milonítico apresentou maiores valores em ambiente urbano, revelando a maior sensibilidade e maiores danos microstruturais dos litotipos nesses respectivos ambientes.

A Figura 4.49 apresenta os resultados dos testes de resistência à compressão das rochas envelhecidas em laboratório e a previsão do decaimento da resistência à compressão para 450 dias de degradação acelerada, equivalente a 10 anos do material submetido ao envelhecimento natural, e uma extrapolação, segundo a função de decaimento proposta por Mutluturk *et al.* (2004), do tempo necessário para o decaimento da resistência à compressão para 20 MPa, com os litotipos sujeitos a desfragmentação granular.

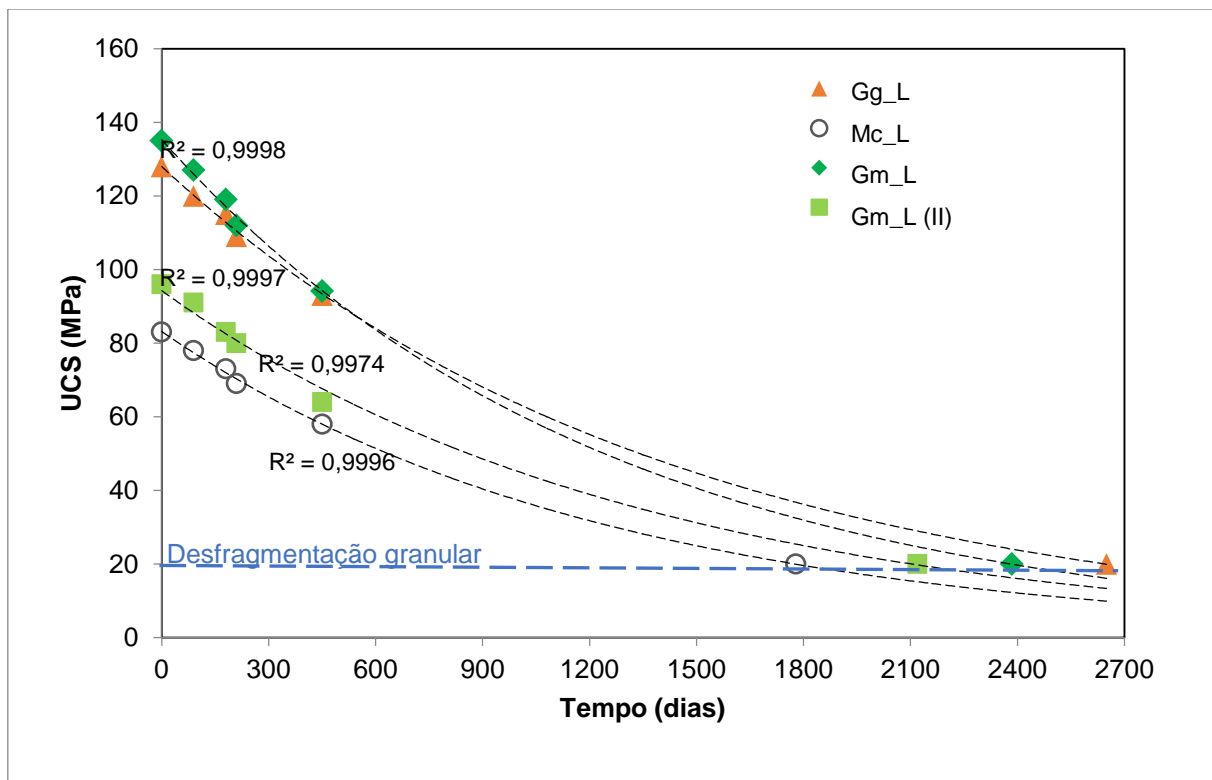


Figura 4.49 - Previsão da Durabilidade com Envelhecimento Acelerado em Laboratório. Fonte: Autora

Os coeficientes de determinação obtidos apresentam valores de  $R^2$  acima de 0,90, sendo classificados como quase perfeitos, indicando uma excelente correspondência dos valores obtidos com a curva de regressão proposta.

Aplicando a função de decaimento (Equação 8 ) aos resultados da resistência à compressão obtidos para o envelhecimento em ambiente urbano e costeiro tem-se uma outra previsão de durabilidade, apresentada na Figura 4.50.

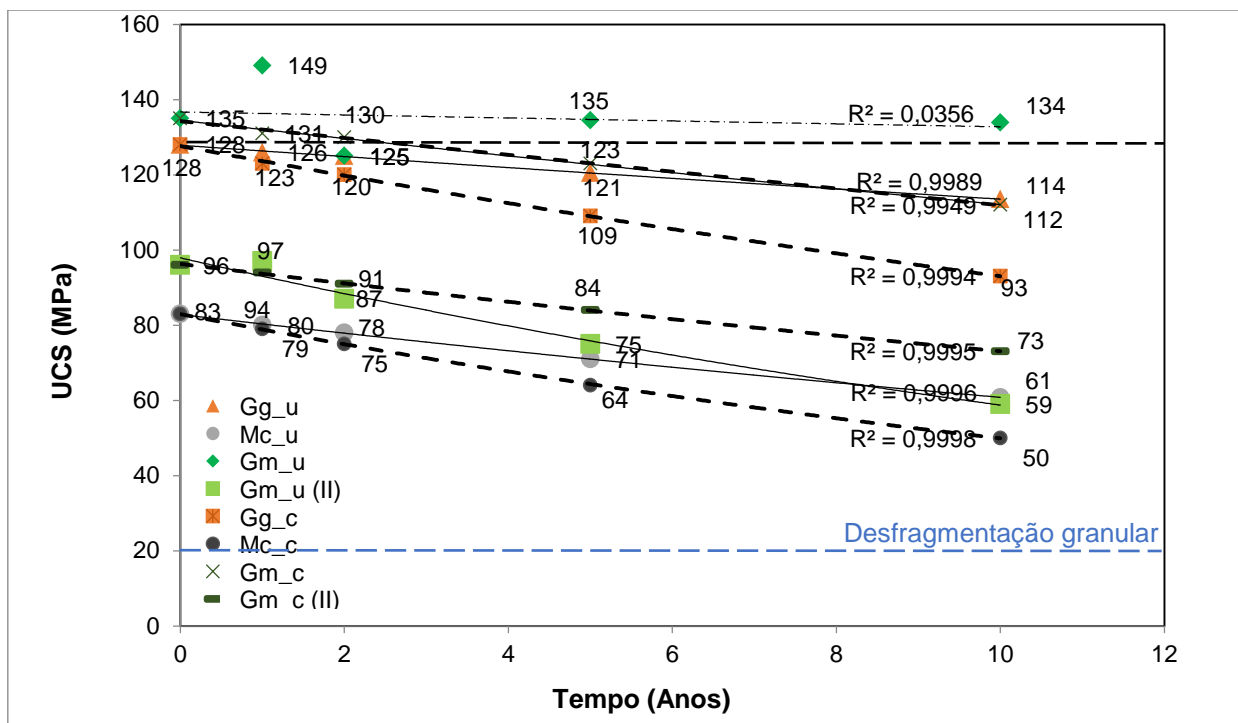


Figura 4.50 -Previsão da Durabilidade com o Envelhecimento Natural. Fonte: Autora

Os coeficientes de determinação obtidos apresentam valores acima de 0,90 ( $R^2$ ), sendo classificados como quase perfeitos, exceto a o gnaisse milonítico submetido a compressão paralela às foliações, que apresentou um coeficiente de determinação de 0,03, explicado pelo ganho de resistência mecânica até 400°C.

A Tabela 4.19 apresenta o resumo das previsões da resistência à compressão para a rocha com 5 e 10 anos de envelhecimento natural, obtidas a partir da Equação 8.

Tabela 4.16 - Previsão de Durabilidade

|                     | Gg    |         | Mc    |         | Gm    |         | Gm (II) |         |
|---------------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|---------|---------|
|                     | 5anos | 10 anos | 5anos | 10 anos | 5anos | 10 anos | 5anos   | 10 anos |
| Degrad. Laboratório | 109   | 93      | 69    | 58      | 112   | 94      | 80      | 64      |
| Env. Amb. Urbano    | 121   | 114     | 71    | 61      | 135   | 134     | 75      | 59      |
| Env. Amb. Costeiro  | 109   | 93      | 64    | 50      | 123   | 112     | 84      | 73      |
| Desvio Padrão       | 7     | 12      | 4     | 6       | 11    | 20      | 4       | 7       |

A previsão obtida com o envelhecimento acelerado em laboratório e em ambiente costeiro para o gnaisse granítico é coincidente. O envelhecimento em

ambiente urbano mostra-se brando no gnaisse granítico, com previsão de maiores valores de resistência à compressão para 5 e 10 anos, ou seja, o decaimento de 128 MPa para 93 MPa. Esse decaimento mostra que o gnaisse granítico não atenderia ao critério mínimo de resistência segundo a ABNT NBR 15844 (2015), o que não seria indicada para obra de cantaria. Utilizando a mesma equação exponencial do granito, este atingiria 20 MPa em 59 anos (Figura 4.49), ou seja, baixa resistência para permanência em ambiente construído, devendo ser substituído.

O mármore apresenta a previsão da degradação acelerada em laboratório com valores intermediários, com o envelhecimento urbano apresentando as maiores resistências e o envelhecimento costeiro os menores valores. O mármore decresce de 83 MPa para 58 MPa após 10 anos e, atinge 20 MPa em 40 anos (Figura 4.49), mostrando baixa resistência para permanência em ambiente construído.

O gnaisse milonítico apresenta maior durabilidade em ambiente urbano, com valores intermediários para a previsão em ambiente costeiro e menor resistência para a degradação acelerada em laboratório.

Avaliando a variação percentual do desvio padrão em relação às maiores tensões, que são as previstas para o ambiente urbano, o desvio padrão apresentou uma variação de 6 a 15% dos valores previsto, sendo considerado bom. Em 10 anos, o decaimento de resistência transversal à foliação de 135 MPa para 94 MPa, em 53 anos cairá para 20 MPa (Figura 4.49), segundo metodologia dada por Mutluturk *et al.* (2004). Seguindo os litotipos anteriores, a baixíssima resistência após o tempo futuro poderia inclusive apresentar riscos graves nos casos de revestimentos de prédio mais altos, com risco de queda dos deslocamentos e fragmentação que o intemperismo local possa atuar na rocha.

A durabilidade da rocha ornamental é dependente de um conjunto de fatores como a composição mineral, as características petrofísicas, a resistência, a porosidade e a estrutura dos poros, o tempo de exposição e os mecanismos de intemperismo presentes no ambiente. A metodologia dada por Mutluturk *et al.* (2004) e aplicada às rochas estudadas mostra-se conservadora, com um considerável decaimento de resistência mecânica para o tempo futuro.

Na estimativa da durabilidade apresentada, pode-se atribuir às variações em relação à resistência da rocha às diferenças entre os mesmos litotipos e ao ambiente no qual as rochas estão expostas, com mecanismos distintos de

deterioração, como o choque térmico e congelamento das amostras degradadas em laboratório e o sal presente na atmosfera do ambiente costeiro.

Algumas técnicas de previsão de danos foram aprimoradas graças a envelhecimento acelerado em laboratório. Stizia *et al.* (2021), avalia que simulando o intemperismo natural e reproduzindo alguns parâmetros climáticos que aceleram os processos de decomposição de diferentes materiais, obtêm-se a alteração requerida do material.

No entanto, sempre existirá a incerteza entre a perda da propriedade de interesse reproduzida por processos naturais e a correspondência do envelhecimento acelerado, uma vez que todos os mecanismos envolvidos não são reproduzidos ao mesmo tempo e nas intensidades proporcionais.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado um estudo das rochas ornamentais fluminenses, extraídas no pólo produtor da região noroeste do estado do Rio de Janeiro, comercialmente denominadas granito *yellow desert* (granada gnaisse álcali granítico), mármore branco (mármore calcítico) e pedra madeira verde (gnaisse milonítico), avaliando a sua durabilidade e a influência da porosidade nas suas propriedades.

A metodologia proposta submeteu as amostras a diferentes ambientes e agentes intempéricos e posterior análise, possibilitando uma compreensão das propriedades tecnológicas frente a distintos mecanismos de alteração, como o envelhecimento em ambiente urbano e ambiente costeiro, que apresentam diferenças entre as temperaturas locais, na umidade e concentração de sais precipitados na atmosfera; o envelhecimento acelerado em laboratório promove ciclos de saturação e secagem, congelamento e descongelamento e choque térmico; e o tratamento térmico, que expõe as rochas a elevadas temperaturas, provocando mudanças químicas e físicas.

A seguir, são descritas as conclusões gerais deste trabalho e as sugestões para estudos futuros.

A metodologia utilizada para avaliar o envelhecimento natural e o envelhecimento acelerado em laboratório mostrou-se eficiente, assim como o equipamento de degradação, que produziu as alterações requeridas nas rochas.

A comparação dos resultados do envelhecimento natural e do envelhecimento acelerado em laboratório mostrou que o período de 2 anos de envelhecimento natural provoca alterações de pequena intensidade. Os danos microestruturais impactam a resistência mecânica, e possibilitou relacionar o envelhecimento acelerado em laboratório ao envelhecimento natural, mostrando que a degradação acelerada no equipamento da UENF é 8,11 vezes maior do que a degradação natural.

A ação do intemperismo em ambiente costeiro regional foi mais intensa nas rochas carbonáticas do que nas rochas silicáticas.

A observação visual e microestrutural forneceram informações sobre alterações sofridas nas rochas com o envelhecimento natural e a degradação acelerada em laboratório, como a perda de brilho, o amarelamento, a porosidade, as microfissuras



e o estado de alteração mineral. Nas rochas submetidas ao tratamento térmico foi possível notar a mudança cromática decorrente da oxidação, as alterações minerais, a expansão térmica aumentando as dimensões da amostra, o incremento da porosidade, o microfissuramento, a desagregação granular, a mudança de fase e a desintegração dos mármores submetidos a 1100°C, corroborando para avaliar a segurança do uso dos litotipos em situações de incêndio.

Os índices físicos das rochas submetidas ao envelhecimento natural e ao envelhecimento acelerado não apresentaram relação direta com a alteração do material e perda de resistência mecânica, com  $R^2$  variando entre muito baixo a moderado, decorrente da pequena magnitude das mudanças das propriedades. Ocorreu a correspondência entre o aumento da porosidade aparente e a absorção aparente com  $R^2$  muito alto.

O tratamento térmico apresentou correlação entre os índices físicos e a resistência à compressão uniaxial, classificadas como muito alta e quase perfeita.

A velocidade de propagação de onda mostrou-se inversamente proporcional a porosidade aparente, mostrando-se eficaz para avaliar as mudanças microestruturais das amostras.

A PIM permitiu avaliar adequadamente a porosidade e a distribuição do tamanho dos poros nas amostras, mostrando que com o envelhecimento e tratamento térmico proporcionam modificações na rede porosa com o surgimento de novos poros e o incremento da intrusão de mercúrio. Completando a análise da estrutura porosa, a micro-CT avaliou poros acima de 6  $\mu\text{m}$ , fornecendo informações sobre a porosidade aberta e fechada, a orientação espacial da rede porosa com a identificação de poros paralelos às foliações na pedra madeira, e o desenvolvimento de microfissuras intergranulares no mármore sob tratamento térmico.

O tratamento térmico pode ocasionar o enfraquecimento dos litotipos devido ao surgimento de microfissuras, a decomposição, a dilatação ou retração e transições de fase dos minerais, ou o aumento na resistência mecânica, decorrente do fechamento de fissuras, poros e da densificação da matriz rochosa durante o aquecimento.

A extrapolação temporal da resistência mecânica foi realizada para um período de 5 e 10 anos, segundo a metodologia dada por Mutluturk *et al.* (2004). Estendendo a extrapolação para o período em que a rocha apresentaria 20 MPa de resistência à compressão, conclui-se que o granito demoraria 59 anos até a

desagregação granular, a pedra madeira 53 anos, e o mármore 40 anos, mostrando que a metodologia apresenta o decaimento intenso da resistência mecânica dos litotipos estudados .

Sugere-se bastante atenção para aplicação destas rochas como revestimento externo em prédios de mais de 2 pavimentos, por ocorrer como previsto em 10 anos, considerável perda de resistência e, conseqüentemente a desfragmentação superficial, podendo ser perigoso para os transeuntes.

Ressalta-se que todos os mecanismos envolvidos no envelhecimento não são exatamente reproduzidos em laboratório, podendo ser considerada uma limitação capaz de produzir a dispersão do resultado quanto à durabilidade da rocha.

Em regiões de clima Equatorial, Subtropical e Tropical, devido a ocorrência de geadas e grande variação da umidade, recomenda-se o uso de selantes ou impermeabilizantes, devido a porosidade aparente e a formação de novos poros identificada pela PIM.

Para estudos futuros, sugere-se:

- ❖ A avaliação das rochas em maiores tempos de envelhecimento natural, uma vez que as amostras ainda se encontram dispostas no ambiente urbano e costeiro, ou avaliá-las *in loco* em edificações antigas;
- ❖ A análise da durabilidade das rochas perante agentes manchantes e alguns reagentes comumente usados em produtos de limpeza e de uso doméstico
- ❖ A determinação da tenacidade à fratura, uma vez que a microscopia e microtomografia apontou o surgimento de microfissura como patologia responsável pelo enfraquecimento da rocha.
- ❖ A variação dos parâmetros do tratamento térmico como a taxa de aquecimento, o tempo de exposição na temperatura alvo e o resfriamento em água e em temperatura ambiente para avaliação da metodologia de tratamento térmico da rocha em caso de incêndio.
- ❖ O efeito da variação de temperatura nas características de fratura e tenacidade à fratura de rochas.

## REFERÊNCIAS

Afolagboye L., Talabi A., Oyelami C (2017). The use of index tests to determine the mechanical properties of crushed aggregates from Precambrian basement complex rocks, Ado-Ekiti, SW Nigeria Journal of African Earth Sciences 129:659 – 667.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C615 Standard Specification for Granite Dimension Stone Philadelphia, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D 2845 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. Philadelphia, 2017.

Angeli, M., Bigas, J.P., Benavente, D., Menéndez, B., Hébert, R., David, C., (2007). Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. Environmental Geology 52, 205–213.

Aral, İ.F., Boy, R., Dinçer, A.R.M., Bigas, (2021). Effects of freeze-thawing cycles on the physical and mechanical properties of basaltic and dolomitic rocks evaluated with a decay function model. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 80(4), pp. 2955-2962.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS – (2021). Balanço Das Exportações E Importações Brasileiras De Rochas Ornamentais Em 2020 - Informe 01/2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015). ABNT NBR 15844: Rochas para revestimento - Requisitos para granitos Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015). ABNT NBR 15845-8. Rochas para revestimento Parte 8: Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015). ABNT NBR 15845-2 Rochas para revestimento Parte 2: Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015). ABNT NBR 15845-5 Rochas para revestimento Parte 5: Determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013) ABNT NBR 15012: Rochas para revestimentos de edificações — Terminologia. Rio de Janeiro.

Ban M.; Mascha E.; Weber J.; Rohatsch A.; Rodrigues J. D. (2019). Efficiency and Compatibility of Selected Alkoxysilanes on Porous Carbonate and Silicate Stones, *Materials*, volume 12, pp.156.

Basu S.; Orr S.A., Aktas Y. (2020) A Geological Perspective on Climate Change and Building Stone Deterioration in London: Implications for Urban Stone-Built Heritage Research and Management. *Atmosphere* , 11, 788.

Benavente D, Cueto N., Martínez-Martínez J, García del Cura M.A., Cañaveras J.C., (2007). The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks, *Environ. Geol.* 52 (2) (2007) 215–224.

Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R., Ordóñez, S., (2004). Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology* 74, 113–127.

Benavente D., Pla C., (2018). Effect of pore structure and moisture content on gas diffusion and permeability in porous building stones, *Mater. Struct.* 51 (1).

Binal A., Kasapoğlu K.E., Gökçeoğlu C. (1998). Variation of some physical and mechanical properties of the volcano-sedimentary rocks around Eskişehir–Yazılıkaya under freezing–thawing effect. *Earth Sci J* 20:41–54.

Biró A.; Hlavicöka V.; Lubláy É. (2019). Effect of fire-related temperatures on natural stones. *Construction and Building Materials*, volume 212, pp. 92–101.

BOWEN, N. L. (1956). *The Evolution of the Igneous Rocks*. New York, Dorser Publications, pp. 1-334.

Cardell C, Rivas T, Mosquera MJ, Birginie JM, Moropoulou A, Prieto B, Silva B, Van Grieken R (2003). Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea-salt weathering. *Earth Surf Process Landf* 28:1–14.

Cárdenes V., Mateos F J., M. Fernández-Lorenzo S. (2014). Analysis of the correlations between freeze–thaw and salt crystallization tests - *Environ Earth Sci* (2014) 71:1123–1134.

CBMERJ (2019) . Anuário Estatístico do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro:2019 / CBMERJ. Rio de Janeiro: CBMERJ, 2016- Disponível em: <http://www.cbmerj.rj.gov.br/anuarios/anuario2019.pdf>. Acessado em 10/01/2021.

CEPERJ- DADOS ESTATÍSTICOS (2021). Disponível em: [http://arquivos.proderj.rj.gov.br/sefaz\\_ceperj\\_imagens/Arquivos\\_Ceperj/ceep/dados-estatisticos/series-historicas/excel/cogeo/Tab%202.0.0.34.html](http://arquivos.proderj.rj.gov.br/sefaz_ceperj_imagens/Arquivos_Ceperj/ceep/dados-estatisticos/series-historicas/excel/cogeo/Tab%202.0.0.34.html). Acessado em 01/08/2021.

Cerrillo C., Jiménez A., Rufo M., Paniagua J., Pachón F.T., (2014).. New contributions to granite characterization by ultrasonic testing, *Ultrasonics*, Volume 54, Issue 1, Pages 156-167.

CGE Muritiba –(2011) Relatório Ambiental Simplificado.

Chen YL, Shao W, Zhou YC (2012). Experimental study on the influence of temperature on the mechanical properties of granite under uni-axial compression and fatigue loading. *International Journal Rock Mechanics Mining Science* 56:62–66

Chen, X., He, P. & Qin, Z. (2019). Strength Weakening and Energy Mechanism of Rocks Subjected to Wet–Dry Cycles. *Geotech Geol Eng* 37, 3915–3923.

Chiodi Filho, Cid; Rodrigues, Eleno de Paula (2009) Guia de aplicação de rochas em revestimentos ABIROCHAS - São Paulo.

Chrispim, Z. M. P. (2016). Análise da vulnerabilidade e caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos livres rasos da parte emersa da Bacia Sedimentar de Campos– Campos dos Goytacazes, 2016. xxvii, 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes .

Colella A., Di Benedetto C, Calcaterra D., Cappelletti P., D'Amore M., Di Martire D., Graziano S.F., Papa L., de Gennaro M., Langella A., (2017). The Neapolitan Yellow

Tuff: An outstanding example of heterogeneity, *Construction and Building Materials*, Volume 136, Pages 361-373.

CPRM (2001) *Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro— Brasília: CPRM. 2ª edição revista em 2001.*

Di Benedetto C.; Cappelletti P.; Favaro M.; Graziano S.F.; Langella A.; Calcaterra D.; Colella A. (2015). Porosity as key factor in the durability of two historical building stones: Neapolitan Yellow Tuff and Vicenza Stone. *Engineering Geology*, , Volume 193, Pages 310-319.

Dias Filho JLE, Xavier GC, Maia PCA (2020). Durability of Ornamental Gneiss Stones From Pádua, Rio De Janeiro, Brazil. *Journal Mater. Civ. Eng.* 32(7):230-246.

Dias J; L., Xavier G., Maia P.C., Santos V. (2016). Durability of Ornamental Gneisses from Pádua-RJ as Covering Stone Vol. 21, *Bund.* 05 1957:1976.

DRM (2018) disponível em: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads.html>. Acessado 16 de novembro de 2018.

Duarte, Beatriz Paschoal (2012). *Geologia e recursos minerais da folha Itaperuna SF.24-V-C-I, estado do Rio de Janeiro Série Geologia do Brasil escala 1:100.000 Belo Horizonte : CPRM, 2012. 138 p.*

Fais S., Cuccuru F., Casula G., Bianchi M.G., Ligas P. (2019). Characterization of Rock Samples by a High-Resolution Multi-Technique Non-Invasive Approach *Minerals*, 9, 664.

Fan L.F., Gao J.W., Wub Z.J., Yang S.Q., Mad G.W. (2018). An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique. *Applied Thermal Engineering* 140:505–519.

Farjallat, J. E. S. (1972). Relato sobre o Tema: Desagregabilidade de Rochas e Problemas Relativos à sua Aplicabilidade. 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, São Paulo, vol. II A, pp. 19-53.

Fischer C.; Gaupp R., (2004). Multi-scale rock surface area quantification—a systematic method to evaluate the reactive surface area of rocks *Geoquímica* Volume 64, Edição 3 , Páginas 241-256.

Fonseca B. S., Ferreira P.A.P., Rodrigues A., Piçarra S., Fonseca D, Montemor M.F., (2021). On the estimation of marbles weathering by thermal action using drilling resistance, *Journal of Building Engineering*, Volume 42, 102494.

Frasca M. H., Neves R., Castro N. F. (2020). *The White Marbles of Brasília, a World Heritage site and capital of Brazil*. Geological Society, London, Special Publications, 486, 217-227.

Frasca, M. H. B. O. (2019). Assessment of alterability of basalt used for riprap by petrographic examination, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 11, Issue 1, , Pages 208-213.

Freire-Lista D.M., Fort R., Varas-Muriel M. J. (2016). Thermal stress-induced microcracking in building granite. *Engineering Geology* 20:683–93.

Gautam P.K., Verma A.K., Jha M. K., Sharma P., Singh T. N. (2018). Effect of high temperature on physical and mechanical properties of Jalore granite. *Journal of Applied Geophysics*, volume159, pp.460–474.

Germinario L, Török Á. (2020). Surface Weathering of Tuffs: Compositional and Microstructural Changes in the Building Stones of the Medieval Castles of Hungary, *Minerals*, 10, 376.

Germinario, L., Siegesmund, S., Maritan, L., Simon, K., Mazzoli, C. (2017). Trachyte weathering in the urban built environment related to air quality. *Herit. Sci.*, 5, 44.

Gibeaux S., Vázquez P., Kock T, Cnudde V., Thomachot-Schneider C (2018). Weathering assessment under X-ray tomography of building stones exposed to acid atmospheres at current pollution rate *Construction and Building Materials* 168 ,pág187–198.

Gomez-Heras, Miguel & McCabe, Shelby & Smith, Bernard & Fort, R.. (2009). Impacts of Fire on Stone-Built Heritage An Overview. *Journal of Architectural Conservation*. 15. 47-58.

Graue B., Siegesmund S., Middendorf B. (2011). Quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements *Environ Earth Sci* (2011) 63:1799–1822.

- Hartlieb P, Kuchar F., Moser P., Kargl H, Restner U. (2018). Reaction of different rock types to low-power (3.2 kW) microwave irradiation in a multimode cavity. *Minerals Engineering* 118 (2018) 37–51.
- Hawkins, A.B., McConnell, B.J., (1992). Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content. *Q. J. Eng. Geol.Hydrogeol.* 25, 115–130.
- Heidari M., Torabi-Kaveh M., Mohseni H. (2017). Assessment of the Effects of Freeze–Thaw and Salt Crystallization Ageing Tests on Anahita Temple Stone, Kangavar, West of Iran. *Geotech Geol Eng* (2017) 35:121–136.
- Hoek E. Brown E- (1997). Practical Estimates of Rock Mass Strength *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol 34, No 8, 1997, pages 1165-1186.
- Hopkins, W. G. Correlation coefficient: a new view of statistics. 2006. Disponível em: <http://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html> Acesso em: 15 outubro 2021.
- INMET (2020). Instituto Nacional de Meteorologia, Clima., Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/clima>. acessado em 01 de abril de 2020.
- IUPAC (1994). Recommendations for the Characterization of Porous Solids- (Technical Report) *Pure & Appl. Chern.*, Vol. 66, No. 8, pp. 1739-1758, 1994.
- Jiménez-González, I., and G. W. Scherer (2004). Effect of swelling inhibitors on the swelling and stress relaxation of clay bearing stones, *Environ. Geol.*, 46, 364– 377, doi:10.1007/s00254-004-1038-8.
- Kate JM, Gokhale C.S. (2006). A simple method to estimate complete pore size distribution of rocks *Geologia de Engenharia* Volume 84, Edições 1–2, páginas 48-69.
- Larsen, T.D., Cady, P.D. (1969). Identification of frost susceptible particles in concrete aggregates, National Cooperative Research Program Report, 66. Washington D.C.: Highway Research Board.



Latham J. (1993). "A Mill Abrasion Test for Wear Resistance of Armour Stone," in *Rock for Erosion Control*, ed. C. McElroy and D. Lienhart (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1993), 46-61.

LIMA B. B. (2019). *Sistema De Revestimento Em Mármore Nas Fachadas Do Congresso Nacional – Cenários Do Estado De Conservação - Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.*

Liu Shi; Xu-An J. (2015). Experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks .*Engineering Geology*, volume 185, pp. 63–70.

Liu Y., Dai F. (2021). A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical* Volume 13, Issue 5, Pages 1203-1230.

Mao, R.R., Mao, X.B., Zhang, L.Y., Liu, R.X. (2015). Effect of loading rates on the characteristics of thermal damage for mudstone under different temperatures. *International Journal of Mining Science and Technology*, 15, volume 25, pp.797–801.

Martínez-Martínez J., Benavente D., Gomez-Heras M., Marco-Castaño L, García-del-Cura M. (2013). Non-linear decay of building stones during freeze–thaw weathering processes, *Construction and Building Materials*, Volume 38, 2013, Pages 443-454.

Martinho E., Dionísio A. (2018). Assessment Techniques for Studying the Effects of Fire on Stone Materials: A Literature Review, *International Journal of Architectural Heritage*, 2018, Portugal.

Mendonça J. C. Garcia A., Franco J. (2020). Coeficientes de angström-prescott para estimar a radiação solar global em campos dos goytacazes, RJ. *Irriga, Botucatu*, v. 25, n. 3, p. 481-491.

Menéndez B., Petráňová V. (2016). Effect of mixed vs single brine composition on salt weathering in porous carbonate building stones for different environmental conditions *Engineering Geology* Volume 210, p 124-139.

Mengjia Zhou M., Song E. (2016). A random virtual crack DEM model for creep behavior of rockfill based on the subcritical crack propagation theory - *Acta Geotechnica* (2016) 11:827–847.

Micrometics do Brasil (2020) disponível em: <http://www.micrometics.com.br/images/documentos/catalogos/2020>. Acessado em 10/06/2020.

Minette, E. (1982). Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, pp. 1-262.

Molina E., Cultrone G., Sebastián E., Alonso F. (2011). The pore system of sedimentary rocks as a key factor in the durability of building materials *Engineering Geology* 118(2011):110-121.

Mousavi S., Silva A. Brito J., Ekhlasi A, Hosseini B. (2019) Influence of Design on the Service Life of Indirectly Fastened Natural Stone Cladding. *J. Perform. Constr. Facil.*, 33 (3): 04019021.

Mutlutürk M., Altindag R., Turk G. (2004). A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing–thawing and heating–cooling *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41, 237–244.

Myron G. Best (2003). em “Igneous and Metamorphic Petrology” - Second edition.

Nicholson D., Nicholson F (2000). Physical Deterioration of Sedimentary Rocks Subjected to Experimental Freeze ± Thaw Weathering *Earth Surf. Process. Landforms* 25, 1295 ± 1307 (2000).

Oliveira P., Patias J., Zuquette L. (2015). A study of the alterability of basaltic lithotypes from the Itaipu Dam site. *Bull Eng. Geol. Environ.* 74:1331-1348.

Pazetto A., e Artur A., (2015). Correlação Entre Comportamento Tecnológico E Propriedades Petrográficas Das Rochas Ornamentais Silicáticas Branco Galaxy, Ocre Itabira e Diamante Negro São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 34, n. 4, p.828-847.

Peixoto C, Heilbron M (2010). Geologia Da Klippe Italva Na Região Entre Cantagalo E Itaocara, Nordeste Do Estado Do Rio De Janeiro. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 29, n. 3, p. 277-289, 2010.

- Qin Y., Tian H., Xu N.X., Chen Y. (2020). Physical and Mechanical Properties of Granite After High Temperature Treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53:305–322.
- Ranjith P.G., Viete D.R., Chen B.J. (2012). Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure. *Engineering Geology* 151:120–127.
- Rivas T., Alvarez E., Cosquera M. J., Alejano L, Taboada J. (2010). Crystalization modifiers applied in granite desalination: the role of the stone pore structure *Construction and Building Materials* 24, 766-776.
- Ruiz-Agudo E., Mees P., Patric Jacobs P., Rodriguez-Navarro (2007). The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*. 52(2). p. 305-317.
- Saiang C., Miskovsky K. (2012). Effect of heat on the mechanical properties of selected rock types – a laboratory, *Harmonising Rock Engineering and the Environment – Qian & Zhou (eds)*. 34:.815–820.
- Ševčil R., Sasek P., Viani A. (2018). Physical and nanomechanical properties of the synthetic anhydrous crystalline CaCO<sub>3</sub> polymorphs: vaterite, aragonite and calcite - *J Mater Sci* 53:4022–4033.
- Shang X., Zhang Z., Xu X., Liu T., Xing Y. (2019). Mineral Composition, Pore Structure, and Mechanical Characteristics of Pyroxene Granite Exposed to Heat Treatments. *Minerals* 9:553-572.
- Shen Y., Yang Y.G., Hou1 X., Ye W., You Z., Xi J. (2018). Damage characteristics and thermo-physical properties changes of limestone and sandstone during thermal treatment from –30°C to 1000°C. *Heat and Mass Transfer* 54:3389–3407.
- Shushakova V., Fuller E. R., Siegesmund S. (2013). Microcracking in calcite and dolomite marble: microstructural influences and effects on properties. *Environ Earth Sci.*, volume 69, pp.1263–1279.
- Silva, L. C. (2001). *Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro. – Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Brasília: CPRM. 2ª edição*

Sirdesai N., Gupta T., Singh T., Ranjith P. (2018). Studying the acoustic emission response of an Indian monumental sandstone under varying temperatures and strains Construction and Building Materials volume 168, páginas 346-361.

Sirdesai N., Gupta T., Singh T. N., Ranjith P.G, (2018). Studying the acoustic emission response of an Indian monumental sandstone under varying temperatures and strains, Construction and Building Materials, Volume 168, 2018, Pages 346-361.

Somerton, W. H. (1992). Thermal Properties and Temperature-related Behavior of Rock/Fluid Systems. Elsevier, Amsterdam, pp. 22–29.

Souza, R. de O., SILVA, M.de M., LOPES, G. F. (2000). Noroeste Fluminense – Um Novo Semi-Árido Brasileiro. In: Revista Ecologia & Desenvolvimento Rio de Janeiro. 10 (834):24-25.

Stizia F. Carla Lisci C., Mirão J. (2021). Building pathology and environment: Weathering and decay of stone construction materials subjected to a Csa mediterranean climate laboratory simulation Construction and Building Materials 300 (2021) 124311.

Streckeisen, A. L. (1976). To each plutonic rock its proper name. Earth-Science Reviews, Volume 12 (1), 1-33.

Sun Q., Zhang W., Su T., Zhu S. (2016). Variation of Wave Velocity and Porosity of Sandstone after High Temperature Heating. Acta Geophysica, 64:633-648.

Tian H., Mei G., Jiang G., Yan Q. (2017). High Temperature Influence on Mechanical Properties of Diorite. Rock Mech Rock Eng. volume 50, pp. 1661–1666.

Torabi-Kaveh M., Heidari M., Mohseni H, Menendez B. (2019). Role of petrography in durability of limestone used in construction of Persepolis complex subjected to artificial accelerated ageing tests. Environmental Earth Sciences, 78:297.

Török, Á. (2007) Hungarian dimensional stones: An overview. Z. Der Dtsch. Ges. Geowiss. 158, 361–374.

Tupinambá M, Heilbron M., Duarte B. P., Nogueira J. R., Valladares C., Almeida J., Luiz Silva, Medeiros, Almeida, Miranda, Ragatky, Mendes J., Ludka I. (2007).

Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: Estado da Arte e Conexões com a Faixa Araçuaí *Geonomos* 15(1): 67 – 79.

Ugur I., Sengun N., Demirdag S., Altindag R. (2014). Analysis of the alterations in porosity features of some natural stones due to thermal effect, *Ultrasonics*, Volume 54, Issue 5.

Vásárhelyi, B., (2005). Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the miocene limestone. *Rock Mech. Rock Eng.* 38, 69–76.

Vázquez P., Acuña M., Benavente D., Gibeaux S., Navarro I., Gómez-Heras M., (2016). Evolution of surface properties of ornamental granitoids exposed to high temperatures, *Constr. Build. Mater.* 104 263–275.

VIDAL F., Bessa M., Lima M. (1999). Avaliação das rochas ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas. (Série Tecnologia Mineral, 74)- Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 30p.

Wei S., Yang Y., Su C., Cardosh S. R., Wang H. (2019). Experimental Study of the Effect of High Temperature on the Mechanical Properties of Coarse Sandstone. *Applied Sciences.* 9(12):2424.

Winkler E. M. (1997). *Stone in Architecture: Properties, Durability* (3rd edition), Springer-Verlag, Berlin

Wones D, Eugester H. (1965). Stability of biotite: experiment. Theory, and application. *The american mineralogist*, vol. 50. September

Wong L.N.Y., Zhang Y., Wu Z. (2020). Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range? *Engineering Geology* 272:105-123.

Wong L.N.Y., Zhang Y., Wu Z. (2020). Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range? *Engineering Geology* 272:105-123.

Wu Zhong, Qin B. D., Chen L., Luo Y. (2005). Experimental study on mechanical character of sandstone of the upper plank of coal bed under high temperature. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 24, 1863-1867.

- Wu S., Zhang K., Wen H., DeVol J. Kelsey K, (2016). Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt Containing Recycled Asphalt Shingles in Washington State. *J. Mater. Civ. Eng.*, 28 (1): 04015088.
- Xiao Y., Liu H., Chen Y. (2014). Bounding surface model for rockfill materials dependent on density and pressure under triaxial stress conditions. *J Eng Mech*, vol 140, issue 4 .
- Xie Q., He S., Wanfeng P. (2010). The effects of temperature and acid number of crude oil on the wettability of acid volcanic reservoir rock from the Hailar Oil field *Pet.Sci.*(2010)7:93-99.
- Yang S., Ranjith P. G., Hong-Wen J., Tian W., Ju Y. (2017). An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments, *Geothermics* 65:180-197.
- Yang S. Q., Jing H. W., Huang Y. H., Ranjith P. G., Jiao Y. Y. (2014). Fracture mechanical behavior of red sandstone containing a single fissure and two parallel fissures after exposure to different high temperature treatments. *Journal Struct. Geol.* 69:245–264.
- Yang, B., Xue, L., Zhang, K. (2018). X-ray micro-computed tomography study of the propagation of cracks in shale during uniaxial compression. *Environ. Earth Sci.*, 77, 652.
- Yao M., Rong G., Zhou C., Peng J. (2016). Effects of thermal damage and confining pressure on the mechanical properties of coarse marble. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49(6):2043–2054.
- Yavuz A. B. (2012). Durability assessment of the Alacati tuff (Izmir) in western Turkey *Environ Earth Sci* (2012) 67:1909–1925.
- Yin T., Li X., Cao W. (2015). Effects of Thermal Treatment on Tensile Strength of Laurentian Granite Using Brazilian Test. *Rock Mech Rock Eng* 48:2213–2223
- Yu S., Oguchi C. (2010). Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones *Engineering Geology* 115(3):226-236

Zalooli A., Freire-Lista D. M., Khomehchiyan M., Nikudel M. R., Fort R., Ghasemi S. (2018). Ghaleh-khargushi rhyodacite and Goid andesite from Iran: characterization, uses, and durability. *Environ Earth Sci* 77:315.

Zhang F., Zhao J., Hu D, Skoczylas F., Shao J., (2018). Laboratory Investigation on Physical and Mechanical Properties of Granite After Heating and Water- Cooling Treatment *Rock Mech Rock Eng* 51:677–694 .

Zhang W., Sun Q., Hao S. (2016). Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment. *Appl Therm Eng.* 98:1297–1304.

Zhao Y., Wan Z., Feng Z., Yang D., Zhang Y., Qu F. (2012). Triaxial compression system for rock testing under high temperature and high pressure. *Int J Rock Mech. Min. Sci.* 52:132–138.

Zhu Z., Tian H., Guosheng J. G., Cheng W. (2018). Effects of High Temperature on the Mechanical Properties of Chinese Marble. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 51:1937–1942.

## APÊNDICE A

### Curvas de saturação e secagem para a calibração do equipamento de lixiviação

O procedimento experimental para obtenção das curvas de saturação e secagem foi o seguinte: cinco amostras foram secas em estufa à 110°C por 48h e em seguida, retiradas para resfriamento e pesagem, obtendo a média da massa seca. Logo em seguida as amostras foram colocadas em um tanque de água na temperatura de 24°C e retiradas após o intervalo de 1h até 6h e depois em 24h para medição da massa média saturada até a estabilização.

A secagem ocorre de forma inversa, como as amostras estavam por 24h imersas em um tanque, estas foram colocadas em estufa à 110°C pelo período entre 1h e 6h até 24h e medida sua perda de massa até estabilizar. Os resultados estão apresentados na Figura A1.

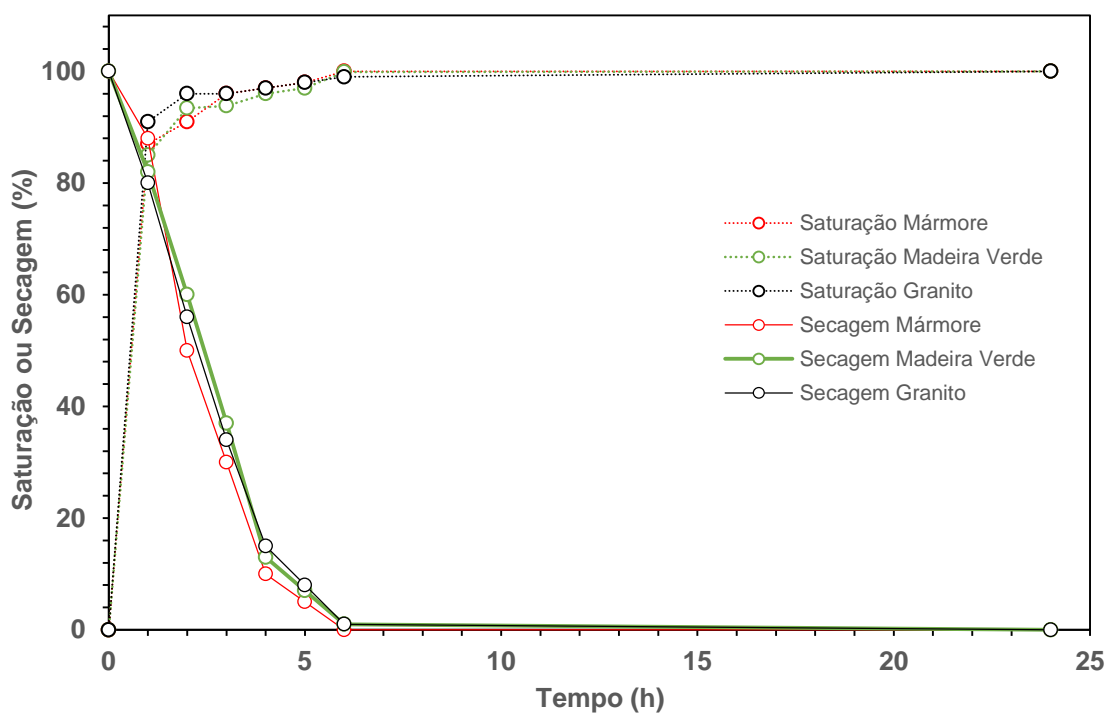


Figura A1- Curvas de Saturação e Secagem. Fonte: Autora

As curvas de saturação e secagem são apresentadas na Figura A1, baseada nas quais foi feita a calibração do equipamento de lixiviação.

Para se proceder com o ensaio de lixiviação, considerou-se o tempo de 1h tanto para os ciclos de saturação quanto para os ciclos de secagem pelo fato de que



todas as amostras atingiram nas curvas de saturação da Figura A1, no mínimo 85% para o gnaisse milonítico (Madeira Verde), 87% para o mármore calcítico e 91% para o gnaisse granítico (Granito) da imersão por 24h destas mesmas amostras, respectivamente. Para as curvas de secagem, a perda de massa atingida em 1h foi no mínimo de 80% no gnaisse granítico (Granito), 82% no gnaisse milonítico (Madeira Verde) e 88% no mármore, respectivamente, ou seja, utilizar 1h tanto no ciclo de saturação quanto no ciclo de secagem, se atinge percentuais próximos à estabilização. Por isso o equipamento foi programado para 1h em cada ciclo.

A temperatura de 70°C no ciclo de secagem utilizado foi obtida pela medida da média da temperatura das amostras ao sol no período de verão, nas horas mais quentes entre 12h e 14h do dia, cuja a temperatura atingiu 58°C medida na superfície das amostras, com isso, utilizou-se um valor acima para garantir maior secagem neste ciclo. No caso do congelamento pelo período de 6h foi devido ao próprio sistema de congelamento do equipamento levar este tempo para chegar à -4°C e manter-se estável nesta temperatura.

## APÊNDICE B

### Sumário das Características Petrográficas das Rochas Estudadas

#### Sumário das Características Petrográficas

| Rocha         | Classificação Petrográfica      | Cor                  | Granulação                        | Estrutura | Textura                | Estado Microfissural                    | Grau de alteração | Mineralogia essencial (%) |    |    |    |    |       |    |    |    |
|---------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------|------------------------|---|-------------------|---------------------------|----|----|----|----|-------|----|----|----|
|               |                                 |                      |                                   |           |                        |   |                   | Ca                        | Dp | Mc | Or | Qt | Bt/ M | Gr | Pl | Ox |
| Granito       | Gnaiss granada álcali granítico | Amarelado            | Fina (20%); média (80%) <1 a 2 mm | Bandada   | Inequigranular seriada | Alto grau Intragranular e intergranular | Mo                | -                         | -  | 45 | 7  | 29 | 7     | 3  | 4  | -  |
| Mármore       | Mármore calcítico               | Branca               | Fina (20%); média (80%) 1 a 2 mm  | Maciça    | Inequigranular seriada | Alto grau Intragranular e intergranular | Ba                | 90                        | 9  | -  | -  | -  | -     | -  | -  | -  |
| Pedra Madeira | Gnaiss milonitizado             | Amarelado esverdeado | Fina (90%); média (10%) <1 a 2 mm | Bandada   | Milonítica             | Alto grau Intragranular                 | Mo                | -                         | -  | -  | 49 | 30 | -     | -  | 8  | 6  |

Legenda: Mo: moderado; Ba: Baixo. Mineralogia: Ca: Calcita; Dp: Diopsídio; Mc: Microclina; Or: Ortoclásio; Qt: Quartzo; Bt/M: Biotita/muscovita; Gr: Granada; Pl: Plagioclásio, Ox: Óxidos/Hidróxidos de ferro

## APÊNDICE C

### Índices físicos para o envelhecimento natural em ambiente urbano e costeiro

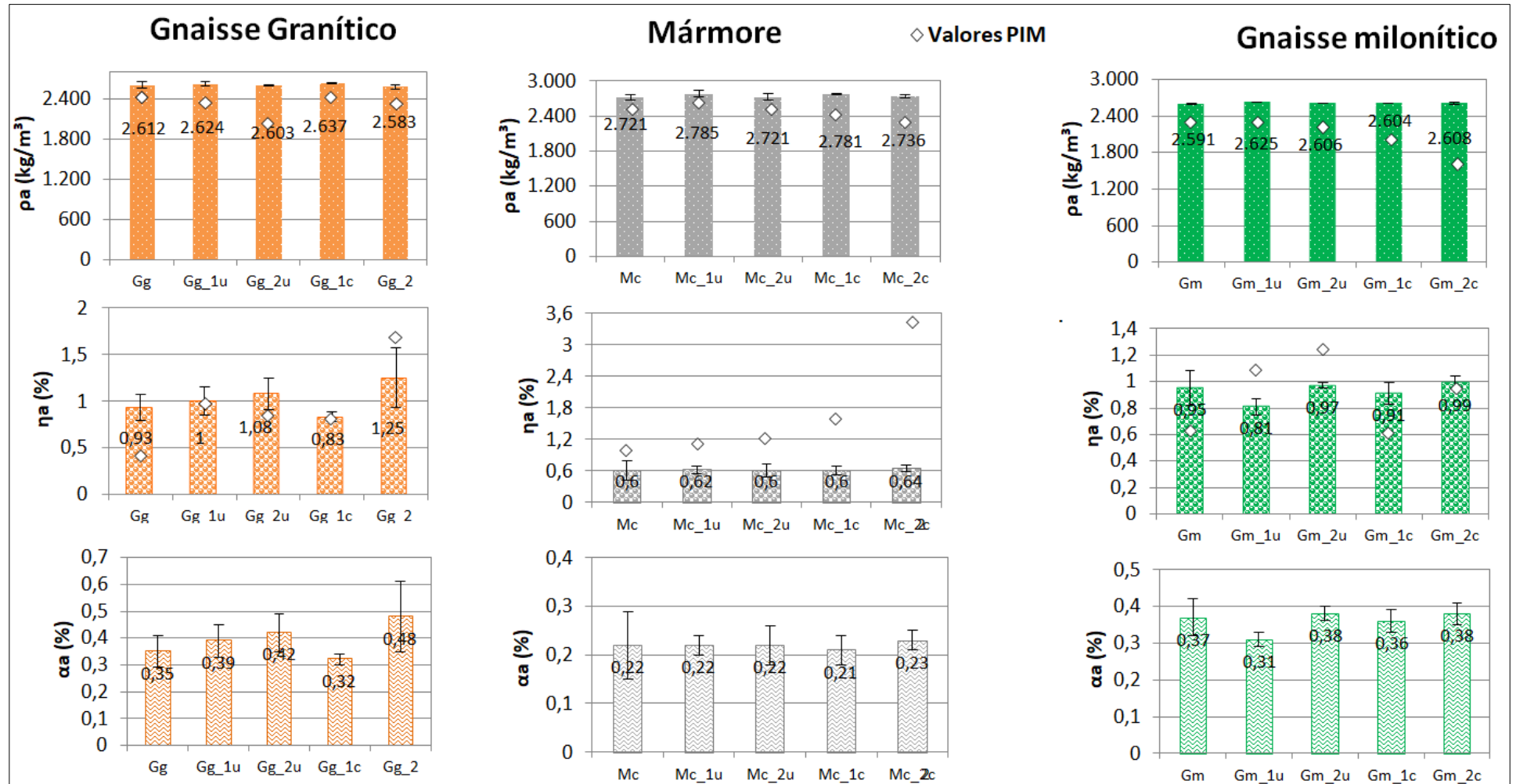


Figura A2- Índices Físicos – envelhecimento natural. Fonte: Autora

## APÊNDICE D

### Índices físicos para o envelhecimento acelerado em laboratório

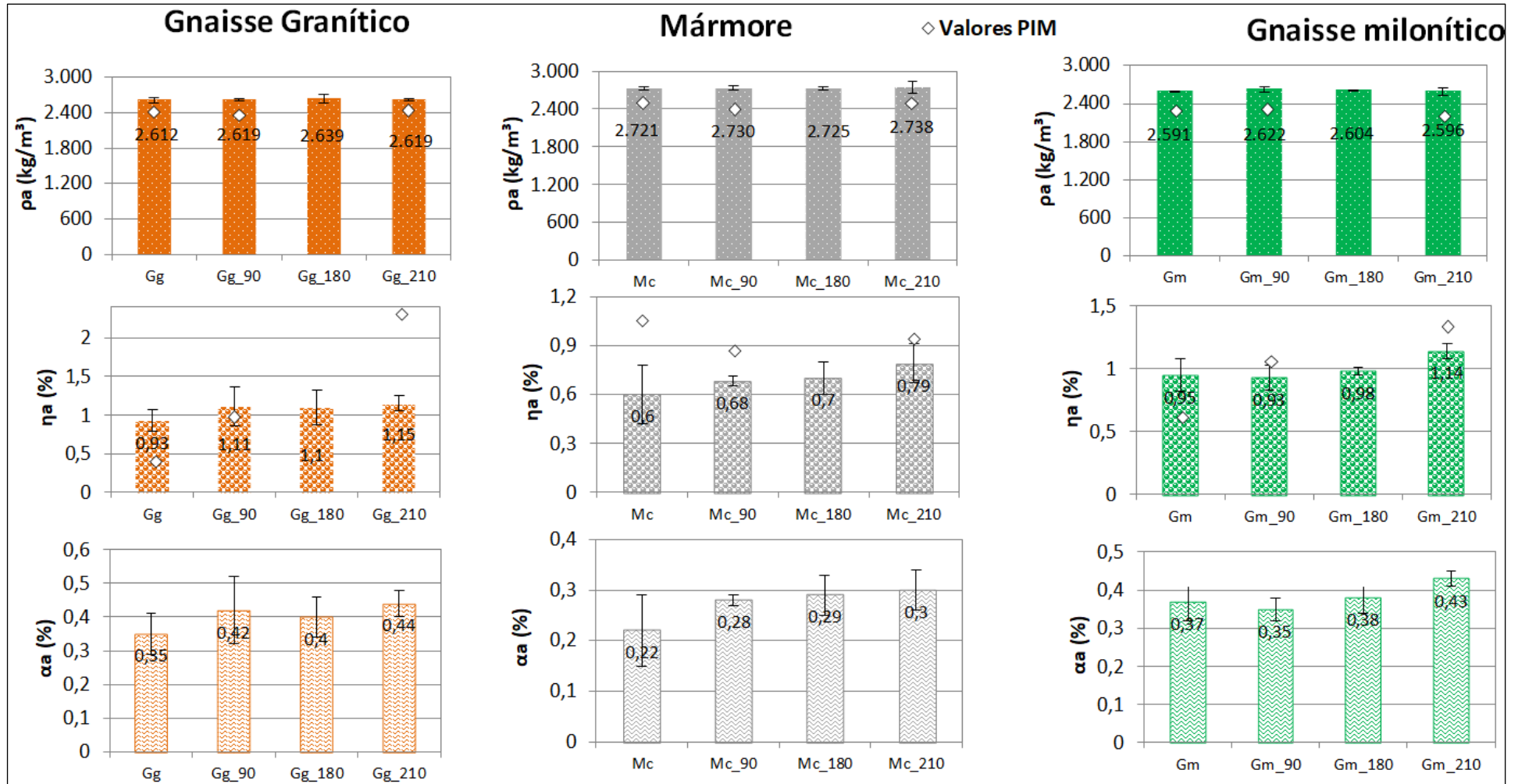


Figura A3- Índices Físicos – envelhecimento acelerado. Fonte: Autora

## APÊNDICE E

### Índices físicos para o tratamento térmico

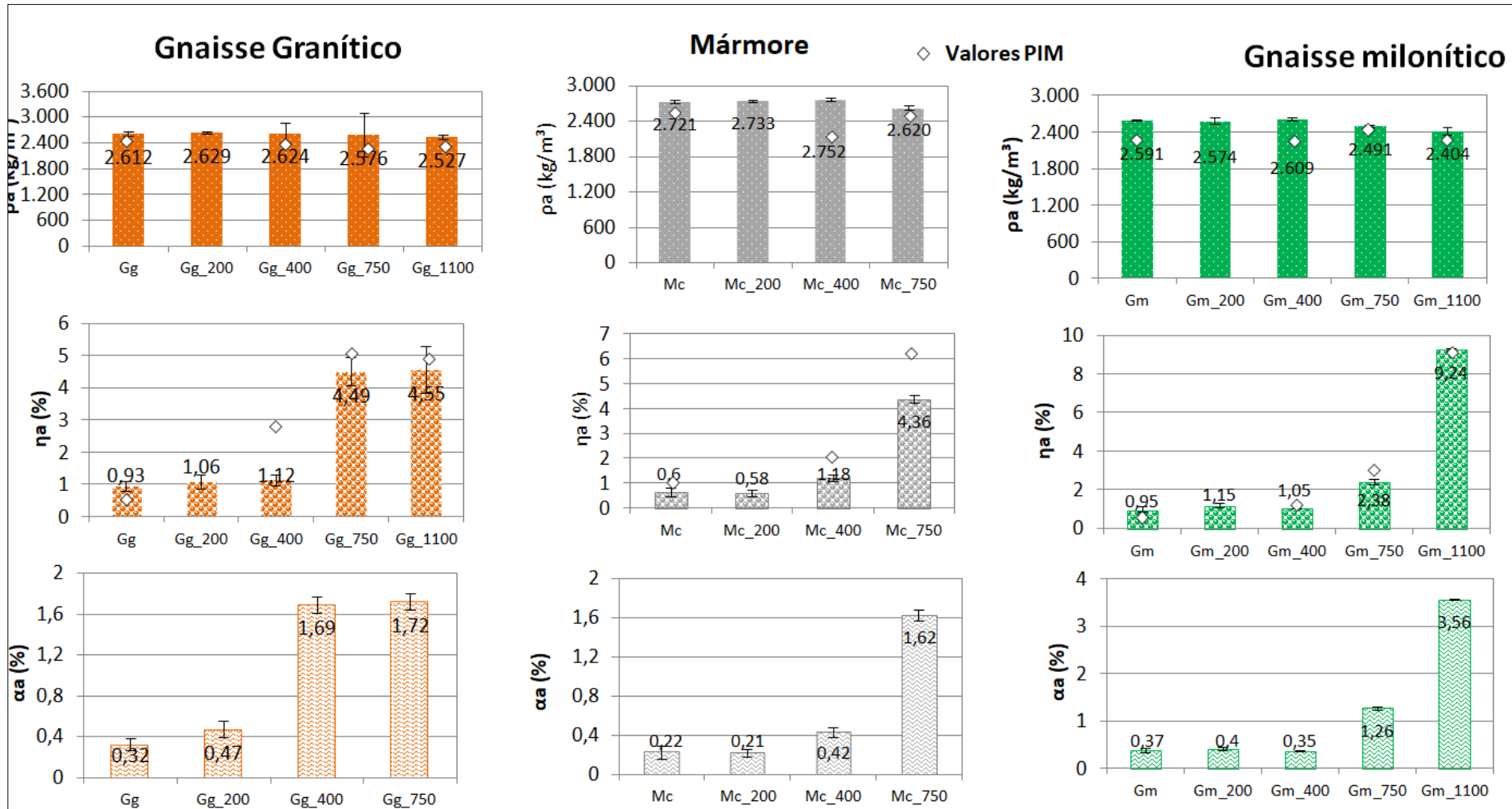


Figura A4- Índices Físicos – tratamento térmico. Fonte: Autora

## APÊNDICE F

Linhas de tendência para obtenção do constante de decaimento  $\lambda$  (Equação 8) do ambiente urbano e costeiro.

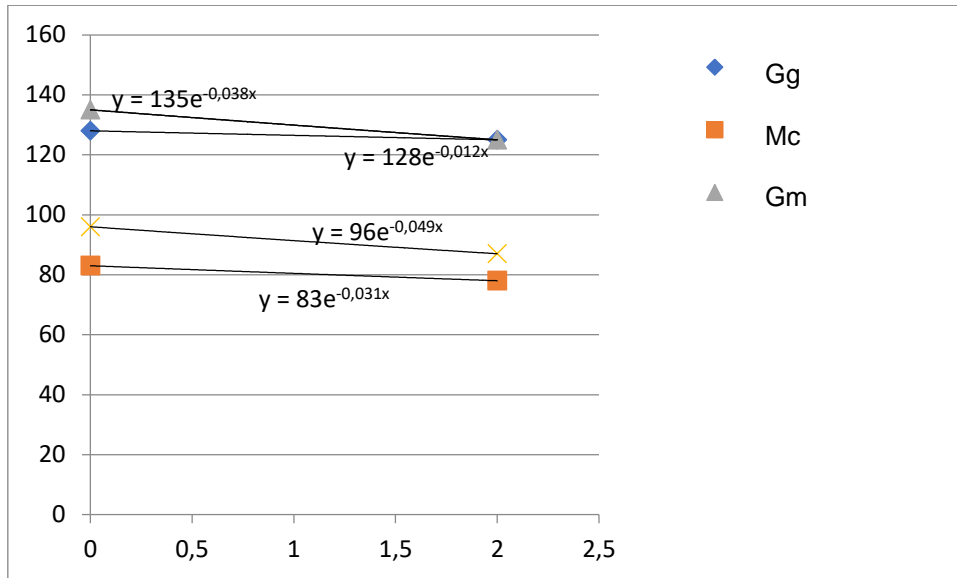


Figura A5- Constante de decaimento  $\lambda$  no ambiente urbano. . Fonte: Autora

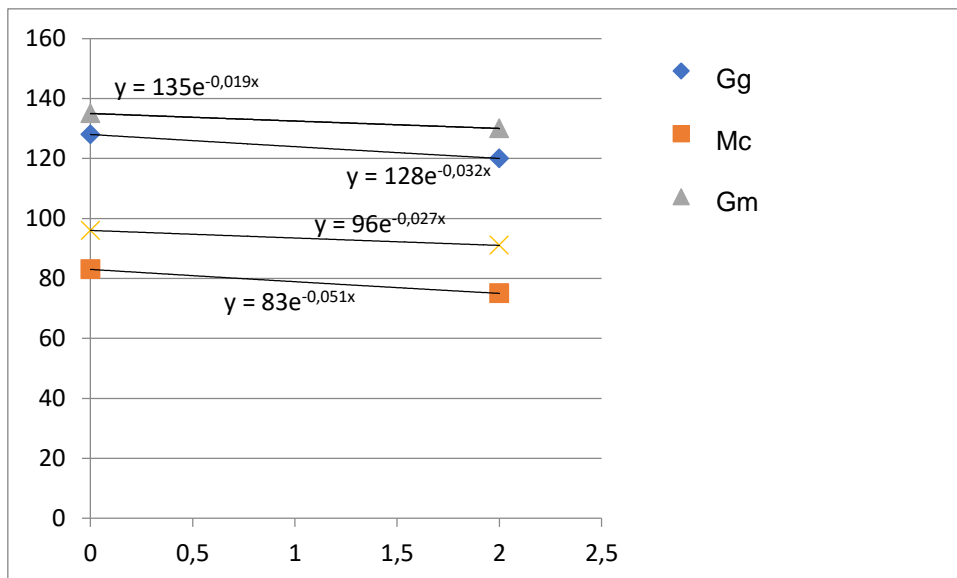


Figura A6- Constante de decaimento  $\lambda$  no ambiente costeiro . Fonte: Autora