

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA MATEMÁTICA E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE PERFIS DE  
INTEMPERISMO DE ROCHAS GRANÍTICAS NO MUNICÍPIO DE  
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM- ES**

LUIZ PAULO SILVA PAIVA DE OLIVEIRA

RIO DE JANEIRO

2020

**COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE PERFIS DE  
INTEMPERISMO DE ROCHAS GRANÍTICAS NO MUNICÍPIO DE  
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM- ES**

LUIZ PAULO SILVA PAIVA DE OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Eurípedes do Amaral Vargas

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE PERFIS DE INTEMPERISMO DE  
ROCHAS GRANÍTICAS NO MUNICÍPIO DE CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM- ES

Luiz Paulo Silva Paiva de Oliveira

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CORPO  
DOCENTE DO CURSO DE GEOLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM GEOLOGIA.

Examinado por:

---

Prof. Dr. Eurípedes, do Amaral Vargas

---

Prof. Dr. Julio Cezar Mendes

---

Prof. Dra. Silvia Regina de Medeiros

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
FEVEREIRO, 2020

Oliveira, Luiz Paulo Silva Paiva de.

Comportamento geomecânico de perfis de intemperismo de rochas graníticas no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES/ Luiz Paulo Silva Paiva de Oliveira – Rio de Janeiro: UFRJ/ Instituto de Geociências, 2019.

XI, 80p.: il.; 30 cm.

Orientador: Eurípedes do Amaral Vargas.

Trabalho de Conclusão de Curso – UFRJ/ Instituto de Geociências/ Departamento de Geologia, 2019.

Referencias Bibliográficas: p. 68-69.

1.Intemperismo em Climats Tropicais 2. Ensaio de compressão triaxial 3. Intemperismo em Granitos 4. Mecânica das rochas.

I. Vargas, Eurípedes do Amaral *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Comportamento geomecânico de perfis de intemperismo de rochas graníticas no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Katia Elena e Washington Luiz, por apoio, amor, conselhos e ensinamentos, carinho, cobranças, e principalmente a todo o investimento que permitiu que eu concluísse o ensino superior e me tornar Geólogo, amo vocês! A minha irmã Gabriella, colega de profissão e responsável pela escolha do curso de geologia e a toda a minha família.

A todos os meus amigos que acompanharam minha história até aqui. A galera da república da Codorna que me acolheu no Rio de Janeiro, principalmente ao Ramon que é grande amigo que usei como espelho pessoal e profissional. A galera da Geologia em destaque para o Diretório Acadêmica Joel Valença, por terem dividido tantos campos, perrengues, provas, cervejas e experiências de vida. Aos meus amigos de Colatina, que sempre me apoiaram. A Mari por todo amor, apoio e grandes conselhos nessa reta final da faculdade.

Ao meu orientador Vargas por ter topado esse desafio e ter me inserido na área de Geologia de Engenharia. Ao Márcio, desde o início teve uma atenção e ajuda em tudo que foi necessário. Ao professor Julinho e Silvia, por terem aceitado participar da banca mesmo que de última hora. Ao Daniel Jaques, pelo apoio nos dados e amostras deste trabalho.

A infraestrutura da universidade que foi utilizada neste trabalho, a PUC-RJ e a todos dos laboratórios de mecânica das rochas principalmente ao Anderson, Bruno e Raquel que se dedicaram semanas para a realização dos ensaios, aprendi muito com vocês.

A todos vocês minha gratidão!

## RESUMO

Perfis de intemperismo marcam os níveis de alteração de rochas devido a ação de processos químicos, físicos e biológicos. Em função do intemperismo, as propriedades geomecânicas de rochas são modificadas. Nesse sentido, estudos detalhados destas alterações e variações de comportamentos são necessários para verificar a viabilidade de projetos de engenharia e geologia em zonas de transição. Em regiões tropicais, os perfis de intemperismo apresentam características muito específicas, como presença de corestones (blocos frescos) e mudanças abruptas entre diferentes níveis de intemperismo em matriz consideravelmente alterada. O objetivo deste trabalho é avaliar como geologia local e o efeito do intemperismo influenciam as propriedades geomecânicas em rochas graníticas, presentes em pedreiras de exploração na região do município de Cachoeiro de Itapemirim (ES), uma área com grande influência do intemperismo sobre os maciços rochosos graníticos. Em parceria com outros autores deste projeto, no âmbito petrográfico foram definidas, a partir da metodologia da ISRM (2007), cinco classes de alteração: W1–Rocha sã, W2–Rocha levemente intemperizada, W3–Rocha medianamente intemperizada, W4–Rocha altamente intemperizada e W5–Rocha completamente intemperizada. Foram realizados ensaios de compressão triaxial nos níveis de intemperismo W1, W2 e W3 utilizando três corpos-de-prova para cada nível e aplicando diferentes tensões confinantes (5 MPa, 10 MPa, 15 MPa) até o seu rompimento com o objetivo de ter um efeito comparativo para os resultados obtidos. Para as condições de rocha muito intemperizada (W4) e extremamente intemperizada (W5) a friabilidade do material, neste caso, não permitiu a extração de corpos-de-prova. Conclui-se que os valores da compressão triaxial (tensão axial) apresentaram uma pequena variação de W1 e W2, mas para W3 houve uma mudança significativa, mostrando que ocorre uma mudança mineralógica e física brusca a partir de certo nível de alteração. Interpretando e correlacionando os valores das tensões obtidas, foi possível observar que o valor da tensão desviadora (rompimento) aumenta de acordo com o aumento da tensão confinante aplicada em cada corpo-de-prova

**Palavras-chave:** Alteração em granitos, perfis de intemperismo, ensaio de compressão triaxial.

## ABSTRACT

Weathering profiles marks the levels of rock alteration due to the action of chemical, physical and biological processes. As a function of weathering, the geomechanical properties of rocks are modified. Therefore, detailed studies of alterations and behavior changes must be carried out to attest the viability of engineering and geology projects in transition zones. In tropical regions, weathering profiles have specific characteristics, such as abrupt changes between different weathering zones and the presence of fresh blocks (corestones) within a severely altered matrix. The objective of this paper is to evaluate the effect of local geological settings condition and the weathering affect geomechanical properties in granite rocks, present in slopes of road and quarry exploitation fronts of the region of Cachoeiro de Itapemirim (ES), area where weathering has a great influence on granite rock massifs. In partnership with the other authors of this project and from an petrographic approach, five weathering profiles were determined considering the ISRM (2007) methodology: W1- Fresh rock, W2- Slightly weathered rock, W3- Moderately weathered rock, W4- Highly weathered rock and W5- Completely weathered rock. Triaxial compression tests were made on W1, W2 and W3 weathering levels using three proof-bodies for each of them. The proof-bodies were submitted to different confining stress tensions (5 MPa, 10 MPa, 15 MPa) until their rupture for comparison of the obtained results. In regards to the W4 and W5 profiles, it was not possible to obtain viable proof-bodies for the tests due to the fiability of the material. In conclusion, the results for the triaxial compression (axial tension) presented a small value variation for the W1 and W2 profiles, but a significant change for the W3 profile. The results indicate that an abrupt mineralogical and physical change occurs from certain levels of weathering. When interpreting and correlating the tension values obtained as results of the tests, it was possible to observe that the rupture tension increases accordingly with the increase of the confining stress tensions applied to each of the proof-bodies.

**Palavras-chave:** weathering in granite rocks; weathering profiles; triaxial compression tests.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                | <b>1</b>  |
| <b>1.1 OBJETIVOS.....</b>                                 | <b>2</b>  |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                     | <b>2</b>  |
| <b>2.1 INTEMPERISMO.....</b>                              | <b>2</b>  |
| <b>2.2 INTEMPERISMO EM GRANITOS.....</b>                  | <b>3</b>  |
| <b>2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO.....</b>           | <b>4</b>  |
| <b>2.4 CLASSES DE ALTERAÇÃO .....</b>                     | <b>6</b>  |
| <b>2.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA.....</b>                | <b>12</b> |
| <b>2.6 MICROPETROGRAFIA.....</b>                          | <b>14</b> |
| <b>2.6. 1 LÂMINA W1 .....</b>                             | <b>14</b> |
| <b>2.6.2 LÂMINA W2 .....</b>                              | <b>16</b> |
| <b>2.6.3 LÂMINA W3 .....</b>                              | <b>18</b> |
| <b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>          | <b>20</b> |
| <b>3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....</b>                      | <b>20</b> |
| <b>3.2 CLIMA E VEGETAÇÃO .....</b>                        | <b>22</b> |
| <b>3.3 GEOMORFOLOGIA.....</b>                             | <b>23</b> |
| <b>3.4 GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL.....</b>                 | <b>23</b> |
| <b>3.4.1 GRANITOS PÓS-OROGÊNICOS .....</b>                | <b>29</b> |
| <b>4. METODOLOGIA .....</b>                               | <b>32</b> |
| <b>4.1 LEVANTAMENTO DE CAMPO.....</b>                     | <b>32</b> |
| <b>4.2 TESTE DE LABORATÓRIO .....</b>                     | <b>32</b> |
| <b>5. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CORRELAÇÕES.....</b> | <b>39</b> |
| <b>5.1 COMPRESSÃO TRIAXIAL .....</b>                      | <b>39</b> |
| <b>5.2 TENSÃO DESVIADORA x DEFORMAÇÃO AXIAL.....</b>      | <b>55</b> |
| <b>5.3 DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA x DEFORMAÇÃO AXIAL ...</b>  | <b>60</b> |
| <b>5.4 COMPRESSÃO TRIAXIAL x UNIAXIAL.....</b>            | <b>65</b> |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                       | <b>67</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                    | <b>68</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1: PERFIL DE INTEMPERISMO TÍPICO DE GRANITOS EM CLIMA TROPICAL (OLLIER, 2010). .....   | 3  |
| FIGURA 2: MATRIZ E DESCONTINUIDADES EM MACIÇO ROCHOSO (OLIVEIRA & BRITO, 1981). .....   | 5  |
| FIGURA 3: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA W1 A NICÓIS CRUZADOS. CRISTAIS POUCO OU NADA FRATURADOS, POUCO OU NADA<br>ALTERADOS. BIOTITA SÃ. KF=MICROCLINA, PLG=PLAGIOCLÁSIO, BT=BIOTITA, QTZ=QUARTZO (MESQUITA,2019). .....  | 14 |
| FIGURA 4: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA W1 A NICÓIS DESCRUZADOS (MESQUITA, 2019) .....  | 15 |
| FIGURA 5: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA W2 A NICÓIS CRUZADOS. CRISTAIS TABULARES DE PLAGIOCLÁSIO E FELDSPATOS<br>APRESENTAM FRATURAMENTO ORTOGONAL EM RELAÇÃO AO SEU MAIOR EIXO CRIStALOGRAFÍCO. MINERAIS EM GERAL POUCO<br>ALTERADOS KF=MICROCLINA, PLG=PLAGIOCLÁSIO, BT=BIOTITA, QTZ=QUARTZO (MESQUITA, 2019) ..... | 16 |
| FIGURA 6: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA W2 A NICÓIS DESCRUZADOS (MESQUITA, 2019) .....  | 17 |
| FIGURA 7: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA W3 A NICÓIS CRUZADOS. MAIOR FRATURAMENTO, ALTERAÇÕES SE DESENVOLVENDO ENTRE<br>AS FRATURAS. MINERAIS EM GERAL ALTERADOS A MUITO ALTERADOS. KF=MICROCLINA, PLG=PLAGIOCLÁSIO, BT=BIOTITA,<br>QTZ=QUARTZO,OP=OPACOS (MESQUITA 2019). .....                                       | 19 |
| FIGURA 8: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA W3 A NICÓIS DESCRUZADOS (MESQUITA, 2019) .....  | 19 |
| FIGURA 9: LOCALIZAÇÃO DE CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM NO MAPA DO ESPÍRITO SANTO. (GOOGLE MAPS) .....   | 21 |
| FIGURA 10: MAPA CLIMÁTICO MUNDIAL (KÖPPEN, ADAPTADO).....   | 22 |
| FIGURA 11: ÁREA DE ESTUDO, FRENTE DE LAVRA DE GRANITO ORNAMENTAL. AO FUNDO, RELEVO ESCARPADO COM VALES INCISOS.<br>(MESQUITA, 2019).....  | 23 |
| FIGURA 12: CRÁTÓN DO SÃO FRANCISCO, FOLHA SF.24-V-A. (ALMEIDA, 1981) .....  | 25 |
| FIGURA 13: MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO (CPRM, 2013). .....   | 26 |
| FIGURA 14: MAPA GEOLÓGICO LOCAL (JAQUES, 2019). .....   | 28 |
| FIGURA 15: BLOCO SENDO CORTADO PARA ROCHA ORNAMENTAL. INJEÇÕES APLÍTIAS SÃO COMUNS CORTANDO O GRANITO<br>(MESQUITA, 2019).....  | 30 |
| FIGURA 16: CONTATO ENTRE DIFERENTES CLASSES DE ALTERAÇÃO DO GRANITO (JAQUES, 2019). .....   | 30 |
| FIGURA 17: GRANITO PÓS-OROGÊNICO TIPO I EM DETALHE (JAQUES, 2019). .....  | 31 |
| FIGURA 18: ESTADO DE TENSÕES EM UM ENSAIO TRIAXIAL (VARGAS JR. <i>ET AL.</i> 1992) .....  | 33 |
| FIGURA 19: CPS NÍVEL DE INTEMPERISMO W1: A (W1-1); B (W1-2) E C (W1-5) .....  | 34 |
| FIGURA 20: CPS NÍVEL DE INTEMPERISMO W2: A (W2-8); B (W2-9) E C (W2-12) .....   | 34 |
| FIGURA 21: CPS NÍVEL DE INTEMPERISMO W3: A (W3-10); B (W3-13) E C (W3-9). .....   | 35 |
| FIGURA 22: A - CÂMARA TRIAXIAL ANTES DO ENSAIO E B- ÓLEO SENDO TRANSFERIDO PARA A CÂMARA TRIAXIAL.....  | 36 |
| FIGURA 23: CORPO DE PROVA ENVOLTO POR UMA MEMBRANA DE BORRACHA. ....  | 37 |
| FIGURA 24: EXTENSÔMETROS PARA REGISTRO DE DEFORMAÇÃO AXIAL (A E B) E CIRCUNFERENCIAL.....   | 38 |
| FIGURA 25: LADO A - ROMPIMENTO DO W1-1 NA TENSÃO CONFINANTE DE 5 MPA E TENSÃO DESVIADORA DE 356,26 MPA.....   | 40 |
| FIGURA 26: LADO B - ROMPIMENTO DO W1-1 NA TENSÃO CONFINANTE DE 5 MPA E TENSÃO DESVIADORA DE 356,26 MPA.....   | 41 |
| FIGURA 27: LADO A - ROMPIMENTO DO W1-2 NA TENSÃO CONFINANTE DE 10 MPA E TENSÃO DESVIADORA DE 486,24 MPA.....  | 42 |
| FIGURA 28: LADO B - ROMPIMENTO DO W1-2 NA TENSÃO CONFINANTE DE 10 MPA E TENSÃO DESVIADORA DE 486,24 MPA.....  | 43 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 29: LADO A - ROMPIMENTO DO W1-5 NA TENSÃO CONFINANTE DE 15 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 537,94 MPa..... | 44 |
| FIGURA 30: LADO B - ROMPIMENTO DO W1-5 NA TENSÃO CONFINANTE DE 15 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 537,94 MPa..... | 45 |
| FIGURA 31: LADO A - ROMPIMENTO DO W2-8 NA TENSÃO CONFINANTE DE 5 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 263,52 MPa.....  | 46 |
| FIGURA 32: LADO B - ROMPIMENTO DO W2-8 NA TENSÃO CONFINANTE DE 5 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 263,52 MPa.....  | 47 |
| FIGURA 33: LADO A - ROMPIMENTO DO W2-9 NA TENSÃO CONFINANTE DE 10MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 388,08 MPa. .... | 48 |
| FIGURA 34: LADO B - ROMPIMENTO DO W2-9 NA TENSÃO CONFINANTE DE 10 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 388,08 MPa..... | 49 |
| FIGURA 35: ROMPIMENTO DO W2-12 NA TENSÃO CONFINANTE DE 15 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 484,38 MPa. ....        | 50 |
| FIGURA 36: LADO A- ROMPIMENTO DO W3-10 NA TENSÃO CONFINANTE DE 5 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 116,04 MPa. .... | 51 |
| FIGURA 37: LADO B- ROMPIMENTO DO W3-10 NA TENSÃO CONFINANTE DE 5 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 116,04 MPa. .... | 52 |
| FIGURA 38: ROMPIMENTO DO W3-13 NA TENSÃO CONFINANTE DE 10 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 183,93 MPa. ....        | 53 |
| FIGURA 39: ROMPIMENTO DO W3-13 NA TENSÃO CONFINANTE DE 15 MPa E TENSÃO DESVIADORA DE 200,20 MPa. ....        | 54 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 1: SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DO INTEMPERISMO PROPOSTO PARA MACIÇO E MATRIZ ROCHOSA. (JAQUES, 2019) ..... | 13 |
| TABELA 2: CONTAGEM MODAL MICROSCÓPICA DOS MINERAIS FORMADORES DE ROCHA W1. (MESQUITA, 2019) .....              | 15 |
| TABELA 3: CONTAGEM MODAL MICROSCÓPICA DOS MINERAIS ALTERADOS W1 (MESQUITA, 2019) .....                         | 16 |
| TABELA 4: CONTAGEM MODAL MICROSCÓPICA DOS MINERAIS FORMADORES DE ROCHA W2 (MESQUITA, 2019) .....               | 17 |
| TABELA 5: CONTAGEM MODAL MICROSCÓPICA DOS MINERAIS ALTERADOS W2.....   | 18 |
| TABELA 6: CONTAGEM MODAL MICROSCÓPICA DOS MINERAIS FORMADORES DE ROCHA W3 (MESQUITA, 2019) .....               | 20 |
| TABELA 7: CONTAGEM MODAL MICROSCÓPICA DOS MINERAIS ALTERADOS W3 (MESQUITA, 2019) .....                         | 20 |
| TABELA 8: TESTES DE LABORATÓRIO PARA CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DA MATRIZ ROCHOSA.....                         | 32 |
| TABELA 9: TENSÃO CONFINANTE E TAXA DE CARREGAMENTO APLICADA AOS CPS. ....                                      | 35 |
| TABELA 10: PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA DO GRANITO. ....  | 39 |
| TABELA 11: CORRELAÇÃO COMPRESSÃO UNIAXIAL ( $\Sigma_c$ ) E TENSÃO DESVIADORA ( $\Sigma_D$ ) .....              | 65 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| QUADRO 1: DIVISÃO DAS SEIS CLASSES DE ALTERAÇÃO (MOYE, 1955). ....                                    | 7  |
| QUADRO 2: CLASSIFICAÇÃO DE INTEMPERISMO DE ACORDO COM A RAZÃO ROCHA/SOLO (RUXTON & BERRY, 1957). .... | 9  |
| QUADRO 3: CLASSIFICAÇÃO DO INTEMPERISMO FRENTE À DESINTEGRAÇÃO FÍSICA (DEARMAN, 1974). ....           | 10 |
| QUADRO 4: CLASSIFICAÇÃO DO INTEMPERISMO FRENTE À DECOMPOSIÇÃO QUÍMICA (DEARMAN, 1974). ....           | 10 |
| QUADRO 5: CLASSIFICAÇÃO DO INTEMPERISMO FRENTE À DISSOLUÇÃO (DEARMAN, 1974).....                      | 11 |
| QUADRO 6: CLASSIFICAÇÃO DO INTEMPERISMO FRENTE AO GRAU DE ALTERAÇÃO DA MATRIZ (DEARMAN, 1976).....    | 11 |
| QUADRO 7: ESCALA DE ALTERAÇÃO PARA MACIÇO ROCHOSO (DEARMAN, 1976).....                                | 12 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| GRÁFICO 1: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W1-1.....        | 56 |
| GRÁFICO 2: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W1-2.....        | 56 |
| GRÁFICO 3: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W1-5.....        | 57 |
| GRÁFICO 4: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W2-8.....        | 57 |
| GRÁFICO 5: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W2-9.....        | 58 |
| GRÁFICO 6: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W2-12.....       | 58 |
| GRÁFICO 7: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W3-10.....       | 59 |
| GRÁFICO 8: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W3-13.....       | 59 |
| GRÁFICO 9: TENSÃO DESVIADORA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W3-9.....        | 60 |
| GRÁFICO 10: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W1-1.....  | 61 |
| GRÁFICO 11: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W1-2.....  | 61 |
| GRÁFICO 12: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W1-5.....  | 62 |
| GRÁFICO 13: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W2-8.....  | 62 |
| GRÁFICO 14: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W2-9.....  | 63 |
| GRÁFICO 15: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W2-12..... | 63 |
| GRÁFICO 16: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W3-10..... | 64 |
| GRÁFICO 17: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W3-13..... | 64 |
| GRÁFICO 18: DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA X DEFORMAÇÃO AXIAL PARA W3-9.....  | 65 |

## 1. INTRODUÇÃO

Este estudo foi desenvolvido no programa de graduação de Geologia na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em parceria com a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) e Universidade Federal de Viçosa (UFV). Os perfis de intemperismo marcam a transição da rocha sã até porções mais alteradas (solos eluviais), preservam características do protólito em suas porções mais jovens podendo ser recobertos ainda por colúvios (materiais transportados). O objetivo do trabalho é avaliar o efeito do intemperismo em rochas graníticas, presente em taludes rodoviários e em frentes de exploração de pedreiras da região do município de Cachoeiro de Itapemirim (ES). Apesar de conhecido o efeito do intemperismo em rochas graníticas em regiões de clima frio, ainda são escassos os trabalhos nessas rochas em regiões de clima tropical como o Brasil.

Essas rochas estão associadas a problemas de estabilidade e principalmente como matéria-prima à extração de rochas ornamentais, importante atividade econômica do Estado. Por estas razões, o processo de intemperismo e seus produtos derivados geram interesse para investigações geotécnicas, análises de estabilidade e projetos de engenharia em maciços rochosos, tendo em vista alterar as características químicas e físicas das rochas e considerável efeito sobre as propriedades e o comportamento geomecânico das mesmas. Além dessas alterações, há reorganização do padrão de distribuição espacial das rochas com diferentes intensidades de alteração intempérica e comportamento geomecânico anisotrópico. Trabalhos anteriores realizaram atividades de campo a partir da caracterização, identificação e descrição da morfologia dos perfis e frentes de intemperismo dos granitos, considerando a escala do maciço rochoso e características das discontinuidades. Assim, foram definidas cinco classes de alteração: W1 – Rocha sã, W2 – Rocha levemente intemperizada, W3 – Rocha medianamente intemperizada, W4 – Rocha altamente intemperizada e W5 – Rocha completamente intemperizada.

As propriedades geomecânicas descrevem as variações de resistência e deformação do material rocha em condições naturais, pelo tempo geológico, e sob solitação externa, quando o rearranjo do campo de tensões obriga a rocha a uma resposta mecânica em termos de sua capacidade de suporte. Sempre que possível, em projetos de engenharia, estas propriedades devem ser analisadas em sua totalidade, abrangendo uma investigação sobre a rocha intacta, as discontinuidades e o maciço rochoso.

O município de Cachoeiro de Itapemirim foi escolhido para realização deste estudo por possuir pedreiras na região que propiciam uma boa visualização das frentes intemperismo nos granitos.

## **1.1 OBJETIVOS**

O objetivo principal do trabalho é identificar como a geologia local condiciona o efeito do intemperismo sobre as propriedades geomecânicas em rochas graníticas, presente em taludes rodoviários e em frentes de exploração de pedreiras da região do município de Cachoeiro de Itapemirim (ES).

Os objetivos secundários e necessários são dados por:

- Realização de ensaios de compressão triaxial nos corpos de prova para cada nível de intemperismo.
- Processar os dados obtidos para estabelecer um perfil de alteração em granitos de clima tropical para a indústria de rochas ornamentais e para obras de engenharia.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 INTEMPERISMO**

Segundo OLLIER (1984) intemperismo são processos químicos e físicos que alteram as propriedades da rocha, deixando-as mais estáveis sob o ponto de vista físico-químico na qual foram originadas. O intemperismo pode ser dividido em biológico, físico, químico.

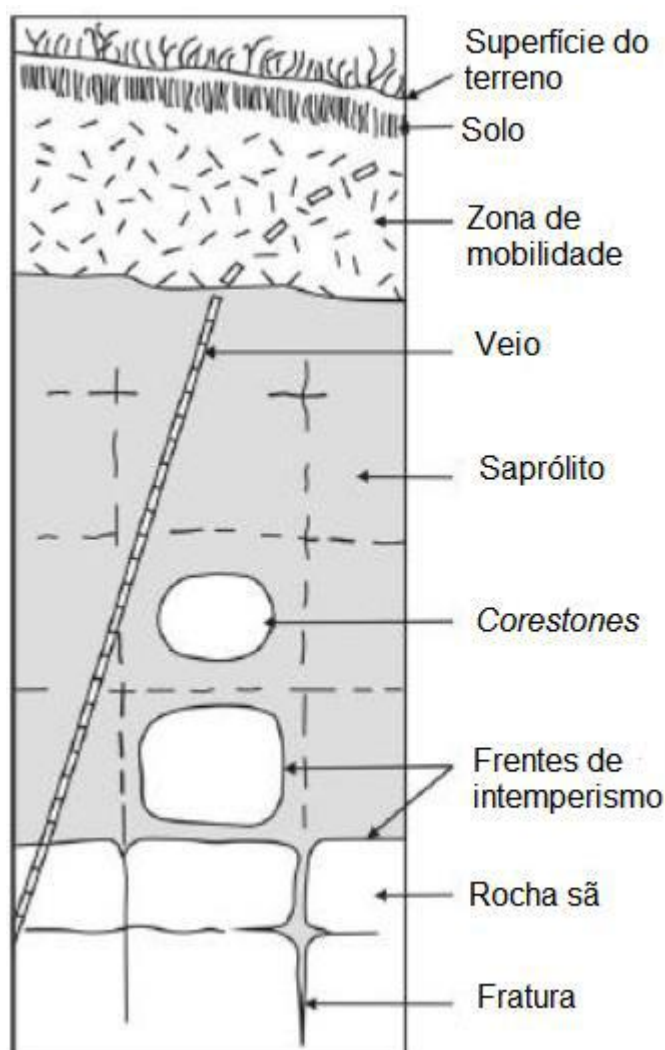
O intemperismo químico envolve reações químicas e suas respectivas modificações, onde o principal agente é a água, devido à presença de CO<sub>2</sub> dissolvido e ácidos orgânicos aumenta seu efeito à medida que se acidifica. Ocorre a formação de minerais secundários, dissolvidos e/ou precipitados.

O intemperismo físico está relacionado a desagregação mineralógicas e mecânica da rocha, sem que ocorra reações químicas envolvidas no processo. O intemperismo físico é um fenômeno chave aos processos críticos de modificação e evolução global da paisagem em todos os ambientes (ALDRED, 2016). O desenvolvimento do intemperismo físico é condicionado por alívio de pressão, congelamento das fendas rochosas, variação térmica e crescimento dos cristais.

O intemperismo físico facilita a ação do intemperismo químico, pois aumenta a superfície de reação. Segundo MARQUES (1998), no intemperismo químico ocorre alteração química dos minerais constituintes das rochas em minerais secundários, estáveis ou não. O seu desenvolvimento é condicionado por dissolução, hidrólise e principalmente pelos processos de oxi-redução.

## 2.2 INTEMPERISMO EM GRANITOS

Trabalhos na literatura sobre este tema aparecem em grande quantidade, mas a grande maioria discute o intemperismo apenas em granitos de clima temperado. Os maciços rochosos em regimes tropicais tendem a sofrer grandes alterações, resultando em zonas de alteração e caracterização complexa, e espessos perfis de intemperismo (ABAD et al., 2016). Na Figura 1 um perfil de intemperismo idealizado que pode ser aplicado aos granitos de clima tropical, pois ocorre a presença de *corestones* envoltos em matriz de solo, marcando a grande heterogeneidade típica desse tipo de perfil. O avanço do intemperismo químico em profundidade é relacionado ao desenvolvimento de juntas de alívio e fraturas subverticais. Essa morfologia condiciona a estabilidade geotécnica do maciço e a cubagem para jazidas de rochas ornamentais (OLLIER, 2010).



**Figura 1:** Perfil de intemperismo típico de granitos em clima tropical (OLLIER, 2010).

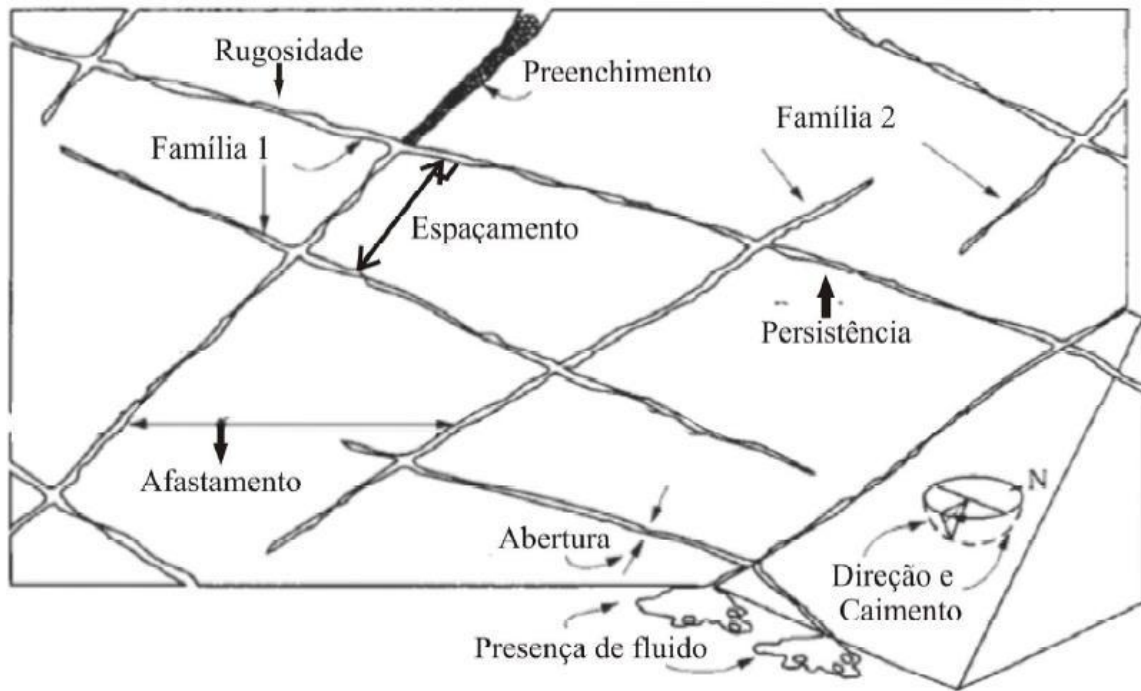
De acordo com DEWANDELL *et al.* (2016) a caracterização de um o perfil de intemperismo de forma análoga é dada pela sequência, da base para topo, 1. Base – rocha sã, sem alterações mineralógicas e sem fraturas; 2. Camada rochosa fraturada, apresentando ou não preenchimento entre as fraturas; 3. camada saprolítica, em que os grandes blocos rochosos estão individualizados por fraturas pretéritas; 4. solo residual jovem, associação com pequenos blocos mais frescos; 5. camada pouco espessa de solo residual maduro

Em granitos essa transição de diferentes graus de alteração é rápida, exceto nos próprios *corestones*. Esses blocos rochosos possuem sua própria sequência intempérica, aumentando o grau de alteração lentamente do centro rochoso (rocha sã), passando por todas as classes de alteração até atingir o contato da sua borda alterada com o solo residual do granito.

A evolução de um perfil de clima tropical ocorre inicialmente através do desenvolvimento de falhas subverticais, fraturas e juntas de alívio, que permite a individualização de blocos rochosos no perfil (*corestones*). Após esse processo, a água meteórica tem a capacidade de circular com facilidade entre os *corestones*, provocando um intemperismo químico. Isto responderia à questão da heterogeneidade destes perfis, caracterizados por grandes blocos rochosos em contato diretamente com solo residual. (DEARMAN,1974)

### **2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO**

Segundo OLIVEIRA & BRITO (1981) o conjunto matriz de rocha e descontinuidades caracteriza um maciço rochoso (Figura 2). Maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos. Dependendo da escala em que se deseja trabalhar, podem ser considerados como homogêneos isotrópicos e contínuos.



**Figura 2:** Matriz e descontinuidades em maciço rochoso (OLIVEIRA & BRITO, 1981).

Através da descrição das propriedades litológicas e geotécnicas inerentes ao maciço rochoso, é possível obter a classificação de um maciço rochoso. Essa classificação visa obter parâmetros como deformabilidade, resistência, permeabilidade e estado natural de tensões.

Segundo MESQUITA (2019) as propriedades relevantes do ponto de vista da matriz rochosa são:

1. Litologia que leva em consideração a textura, composição mineralógica, tamanho dos grãos, estruturas, relação de contato entre os grãos;
2. Alteração podem ser intempéricas (ambiente exógeno) ou deutéricas (ambiente magmático). As alterações químicas são mais fortes em climas tropicais, afetando em grande profundidade e com mais intensidade a deformabilidade, resistência mecânica e a permeabilidade do maciço;
3. Coerência, quanto maior for o grau de alteração da rocha, menor será sua coerência e a tenacidade, friabilidade e dureza e definem o grau de coerência de determinada rocha;
4. Orientação é de fundamental importância para definição da estabilidade de um talude, ou construção de obras subterrâneas. Rupturas planares são comuns em taludes caso mergulho da descontinuidade seja menor que a inclinação do talude e maior que o ângulo de atrito;



5. Espaçamento, medida linear entre uma descontinuidade e a seguinte;
6. Rugosidade, compreende as irregularidades e ondulações na superfície das descontinuidades, possuindo influência direta na resistência ao cisalhamento, pois eleva o valor do ângulo de atrito;
7. Abertura, distância entre um par de paredes de uma descontinuidade, sendo medida ortogonalmente. Podem ser consideradas abertas, fechadas ou preenchidas;
8. Preenchimento, o preenchimento pode ou aumentar (veios de quartzo) ou diminuir a resistência do maciço (material argiloso);
9. Fraturamento, é a quantidade de descontinuidades por metro que afeta uma parte estudada do maciço, normalmente analisada em testemunhos de sondagem. Através do fraturamento é possível obter o RQD (*Rock Quality Designation*) do maciço.

## **2.4 CLASSES DE ALTERAÇÃO**

Os primeiros métodos de determinação das classes de intemperismo em rochas graníticas foram propostas por MOYE (1955), posteriormente diversos autores (RUXTON e BERRY, 1957; LITTLE, 1967, 1969; NEWBERY, 1971; DEARMAN, 1974, 1976; DEARMAN et al., 1978; dentre outros) colaboraram para o desenvolvimento da pesquisa, obtendo métodos que fossem preferenciais de acordo com os diferentes tipos de rochas em diferentes condições climáticas.

Segundo MOYE (1955), os granitos possuem um desenvolvimento padrão de alteração, possibilitando uma avaliação consistente do intemperismo. Os feldspatos se alteram quimicamente em argilominerais (sericita e caulinita), a biotita (clorita e óxidos de Fe) e oxidação geral do *fabric*, o que resulta em uma diminuição gradual da resistência comparada à rocha sã.

MOYE (1955) ainda propôs seis classes de alteração, tendo como base suas análises das características físicas e mineralógicas, de maneira que pudesse se quantificar o grau de intemperismo em granitos. São elas solo granítico, granito completamente alterado, granito muito alterado, granito moderadamente alterado, granito levemente alterado e granito sã ou fresco (Quadro 1). A alteração em profundidade será fortemente condicionada pelas estruturas locais. Quanto menor for o espaçamento, maior for a persistência e número de fraturas, mais intenso será o grau de alteração.

**Quadro 1:** Divisão das seis classes de alteração (MOYE, 1955).

| Classificação               | Definição   | Propriedades de Engenharia   |
|-----------------------------|---|--|
| Solo                        | Superfície de solo derivada do granito, na qual não é possível reconhecer o <i>Fabric</i> da rocha; a superfície desta camada normalmente contém húmus e raízes de plantas  | Normalmente inadequado para fundações em estruturas de estradas, ou para uso como camada de pavimento; solo que para sua conservação demanda o estabelecimento de uma vegetação para prevenir da erosão; na ausência de vegetação pode tornar-se altamente instável e sujeito a movimentação quando saturado.  |
| Completamente intemperizado | Rocha completamente decomposta pelo intemperismo, mas ainda é possível reconhecer a Fábrica granítica; Os feldspatos estão completamente decompostos em argilominerais; biotita pode estar decomposta em diferentes níveis de alteração; pode se desintegrar facilmente quando imerso na água e, normalmente, não são recuperados em sondagens diamantadas; muitas vezes apresenta coloração/mancha marrom devido à limonita. | Pode ser escavado manualmente e sem uso de explosivos; inadequado para local de fundação de barragens e grandes estruturas de concreto; talvez aplicável para fundações de barragens de terra (com permeabilidade de 1,5 a 30,5 metros por ano); instável em cortes com inclinação maior que 1:1; pode ser adequado para construção do maciço de barragem de terra (com permeabilidade de 0,03 a 1,5 metros por ano); facilmente erodido pela água e pelo gelo; portanto, demanda proteção contra erosão.  |
| Muito intemperizado         | Rocha intemperizada numa intensidade tal que os testemunhos de sondagem (Core NX) podem ser quebrados e desintegrados facilmente pelas mãos; não se desintegra quando imerso em água; com muito cuidado, é possível recuperar alguns dos seus testemunhos de sondagem diamantada, mas, frequentemente, estes testemunhos são perdidos; apresenta-se, normalmente, com uma descoloração marrom avermelhado, devido à limonita. | Similar ao Granito Completamente Alterado  |
| Moderadamente intemperizado | Possui uma considerável alteração em toda a parte, mas ainda apresenta uma resistência tal que pedaços de testemunhos de sondagem (diâmetro NX) não podem ser quebrados unicamente pelas mãos; normalmente apresenta uma descoloração marrom avermelhado, devido à limonita.  | Pode ser escavado, com uma certa dificuldade, sem a ajuda de explosivos; talvez seja adequado para a fundação de pequenas estruturas de concreto; sua estabilidade em taludes dependerá da estrutura do maciço rochoso, especialmente das juntas, podendo ser capaz de sustentar-se verticalmente; a maior parte pode ser desmontada a partir da escavação mecânica; talvez seja adequado para o preenchimento inicial de barragens; apesar da rocha ser praticamente impermeável, o maciço pode apresentar alta permeabilidade devido à presença de juntas abertas. |

|                            |   |  |
|----------------------------|---|--|
| Levemente intemperizado    | A fábrica da rocha apresenta-se nitidamente intemperizada sendo isso visível pela descoloração da limonita e a decomposição de alguns feldspatos; mas sua resistência aproxima-se da do granito são.  | Requer o uso de explosivos para o desmonte; pode ser adequado para a fundação de barragens de concreto; praticamente impermeável, mas o maciço rochoso pode apresentar-se bastante permeável dependendo da existência de juntas abertas; não é adequado para utilização como agregado de concreto. |
| São ou Fresco (Inalterado) | Apesar de estar imediatamente abaixo das outras zonas de transição pode apresentar uma leve descoloração da limonita ao longo de suas juntas; sendo assim é comum ser descrito como "granito são com descoloração devido à limonita nas juntas", o que indica que o maciço rochoso é permeável, podendo apresentar blocos soltos que requerem suporte, por exemplo em túneis. |  |

RUXTON & BERRY (1957) observaram uma típica sequência, destacada por *corestones* e gradação decrescente na razão rocha/solo da base para o topo dos perfis. Foi utilizado a razão solo/rocha para determinar o intemperismo nos maciços rochosos (Quadro 2). Nesse método é necessário observar a geomorfologia local, pois relevos dissecados extremamente controlados pela erosão produzem perfis rasos e alta razão rocha/solo, enquanto relevos suaves produzem espessos pacotes intempéricos (baixa razão rocha/solo).

**Quadro 2:** Classificação de intemperismo de acordo com a razão rocha/solo (RUXTON & BERRY, 1957).

| Descrição                              | Características  | Percentual de Rocha Maciça | Zona/Classe de Intemperismo |
|--|--|----------------------------|-----------------------------|
| Solo                                   | Coloração escura da superfície; até poucos metros de profundidade; camada superior arenosa e camada inferior argilosa. | 0%                         | Horizontes A e B do solo    |
| Rocha Decomposta                       | Areia ou argila sem presença de estruturas.  | Normalmente 0 %            | I                           |
| Rocha Decomposta com <i>Corestones</i> | Fragmentos de rocha maciça, arredondados e envoltos pela massa decomposta.   | Menos que 50 %             | II                          |
| <i>Corestones</i> com Rocha Decomposta | Predominância de <i>Corestones</i> retangulares em detrimento da rocha decomposta.                                     | De 50 a 90 %               | III                         |
| Rocha Parcialmente Alterada            | Apenas alguma alteração ao longo dos planos das juntas, podendo apresentar algum traço de oxidação.                    | Mais que 90 %              | IV                          |

DEARMAN (1976) revisou inúmeros trabalhos anteriores e propôs dois esquemas para classificação do intemperismo (Quadro 3, Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6).

**Quadro 3:** Classificação do intemperismo frente à desintegração física (DEARMAN, 1974).

| Desintegração Física       |         |   |
|----------------------------|---------|---|
| Termo                      | Símbolo | Feições Típicas   |
| São ou Inalterado          | W1      | 100% rocha; descontinuidades fechadas.  |
| Levemente Desintegrado     | M II    | 100% rocha; descontinuidades abertas e espaçadas mais do que 60 mm.   |
| Moderadamente Desintegrado | M III   | Até 50% de rocha está desintegrada pelas descontinuidades abertas ou pela escamação esferoidal espaçadas até 60 mm ou menos, e/ou pela desintegração granular. A estrutura da rocha está preservada.                  |
| Muito Desintegrado         | M IV    | Entre 50% e 100% da rocha está desintegrada pelas descontinuidades abertas ou pela escamação esferoidal espaçadas até 60 mm ou menos, e/ou pela desintegração granular. A estrutura da rocha está preservada.         |
| Completamente Desintegrado | M V     | A rocha está praticamente modificada à condição de solo pela desintegração granular e/ou fraturamento dos grãos. A estrutura da rocha está, em sua maioria, preservada.   |
| Solo Residual              | M VI    | A rocha está modificada à condição de solo pela desintegração granular e/ou fraturamento dos grãos. A estrutura da rocha está destruída e o solo é composto pelos residuais minerais, inalterados, da rocha original. |

**Quadro 4:** Classificação do intemperismo frente à decomposição química (DEARMAN, 1974).

| Decomposição Química     |         |  |
|--------------------------|---------|--|
| Termo                    | Símbolo | Feições Típicas  |
| São ou Inalterado        | W I     | 100% de rocha; sem descoloração, decomposição, ou qualquer outra mudança.  |
| Levemente Decomposto     | C II    | 100 % de rocha; descoloração nas superfícies das descontinuidades; o material rocha pode apresentar alguma descoloração. |
| Moderadamente Decomposto | C III   | Solo resultante da decomposição da rocha compõe até 50% da sua massa   |
| Muito Decomposto         | C IV    | Solo resultante da decomposição da rocha compõe entre 50% e 100% da sua massa.   |
| Completamente Decomposto | C V     | A rocha está praticamente toda modificada à condição de solo. A estrutura da rocha está, em sua maioria, preservada.     |
| Solo Residual            | C VI    | A rocha está completamente modificada à condição de solo e a estrutura da rocha está completamente destruída.            |

**Quadro 5:** Classificação do intemperismo frente à dissolução (DEARMAN, 1974).

| Dissolução               |  |
|--------------------------|--|
| Termo                    | Feições Típicas  |
| São ou Inalterado        | 100% rocha; descontinuidades fechadas.   |
| Levemente Dissolvido     | 100% de rocha; descontinuidades estão abertas. Uma leve dissolução nas superfícies das descontinuidades pode estar presente.                       |
| Moderadamente Dissolvido | Até 50% da rocha foi removida pela dissolução. Um pouco de resíduo ainda pode estar presente nos vazios. A estrutura da rocha está preservada.     |
| Muito Dissolvido         | Mais de 50% da rocha foi removida pela dissolução. Um pouco de resíduo ainda pode estar presente nos vazios. A estrutura da rocha está preservada. |

**Quadro 6:** Classificação do intemperismo frente ao grau de alteração da matriz (DEARMAN, 1976)

| Termo        | Descrição  |
|--------------|--|
| Fresco       | Sem sinais visíveis de alteração   |
| Descolorido  | A cor original da rocha não está modificada, sendo evidência de alteração. O grau de descoloração pode ser indicado. Se a mudança de cor for especificamente para um mineral isso deve ser mencionado. |
| Decomposto   | A rocha está alterada à condição de solo em que a rocha ainda está intacta, mas algum ou todos os grãos minerais estão decompostos.  |
| Desintegrado | A rocha está alterada à condição de solo em que a rocha ainda está intacta. A rocha é friável, mas os grãos minerais não estão decompostos.  |

DEARMAN (1976), criou uma classificação que tem como base a descrição do estado do maciço rochoso (Quadro 7), podendo ser ajustado e utilizado para diferentes litotipos em diferentes ocasiões, utilizando parâmetros como razão rocha/solo, grau de descoloração e textura original preservada.

**Quadro 7:** Escala de alteração para maciço rochoso (DEARMAN, 1976).

| Termo                       | Classe | Descrição   |
|-----------------------------|--------|---|
| Fresco                      | I      | Sem sinais visíveis de alteração da matriz; talvez uma leve descoloração nas superfícies da descontinuidade principal.  |
| Levemente intemperizado     | II     | Descoloração indica alteração na matriz e nas superfícies das descontinuidades. Toda a matriz pode estar descolorida pela alteração.  |
| Moderadamente intemperizado | III    | Menos da metade da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente como material contínuo ou na forma de <i>corestone</i> .                 |
| Muito intemperizado         | IV     | Mais da metade da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente como material contínuo ou na forma de <i>corestone</i> .                  |
| Completamente intemperizado | V      | Toda a matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço e a Fábrica da rocha estão praticamente intactos.                                 |
| Solo residual               | VI     | Toda a matriz está convertida a solo. A estrutura do maciço e a Fábrica da rocha estão destruídos. Há uma grande mudança de volume, mas o solo ainda não foi transportado significativamente. |

## 2.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

No ano de 1978 a *International Society For Rock Mechanics* (ISRM) publicou um sistema que é um dos mais difundidos no mundo inteiro, sendo muito aplicável até hoje. Seu principal objetivo foi reunir em um único sistema todos os elementos qualitativos e descritores mais observados pelos sistemas anteriores adaptando-os para uma classificação que abrange características da matriz rochosa e do maciço, tendo como base a análise táctil-visual para inspeção de descoloração das descontinuidades, sinais de oxidação, alteração de biotita e feldspatos, razão rocha/solo, presença de *corestones*, estado de preservação da estrutura do maciço e a desintegração da matriz. De acordo com a Tabela 1, a ISRM (1978), categorizou o intemperismo das rochas em seis classes ou graus de intemperismo.

**Tabela 1:** Sistema de classificação do intemperismo proposto para maciço e matriz rochosa. (ISRM, 1978)

| <b>TERMO</b>                | <b>DESCRIÇÃO</b>   | <b>CLASSE</b> |
|-----------------------------|--|---------------|
| SÃO                         | Nenhum sinal visível de alteração do material; pode existir alguma leve descoloração nas paredes da descontinuidade principal.   | W1            |
| LEVEMENTE INTEMPERIZADO     | Descoloração indica alteração da rocha e das descontinuidades. A rocha pode estar toda descolorida e talvez algo menos resistente externamente que a rocha.                                    | W2            |
| MODERADAMENTE INTEMPERIZADO | Menos da metade da rocha está decomposta e, ou, desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida forma um arcabouço descontínuo ou ocorre como <i>corestones</i> .                     | W3            |
| MUITO INTEMPERIZADO         | Mais da metade da rocha está decomposta e ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida forma um arcabouço descontínuo ou ocorre como <i>corestones</i> .                        | W4            |
| COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO | Toda a rocha está decomposta e ou desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço está, em grande parte, preservada.   | W5            |
| SOLO RESIDUAL               | Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e a Fábrica da matriz da rocha estão destruídos. Há grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado. | W6            |

Fonte: ISRM, 1978.

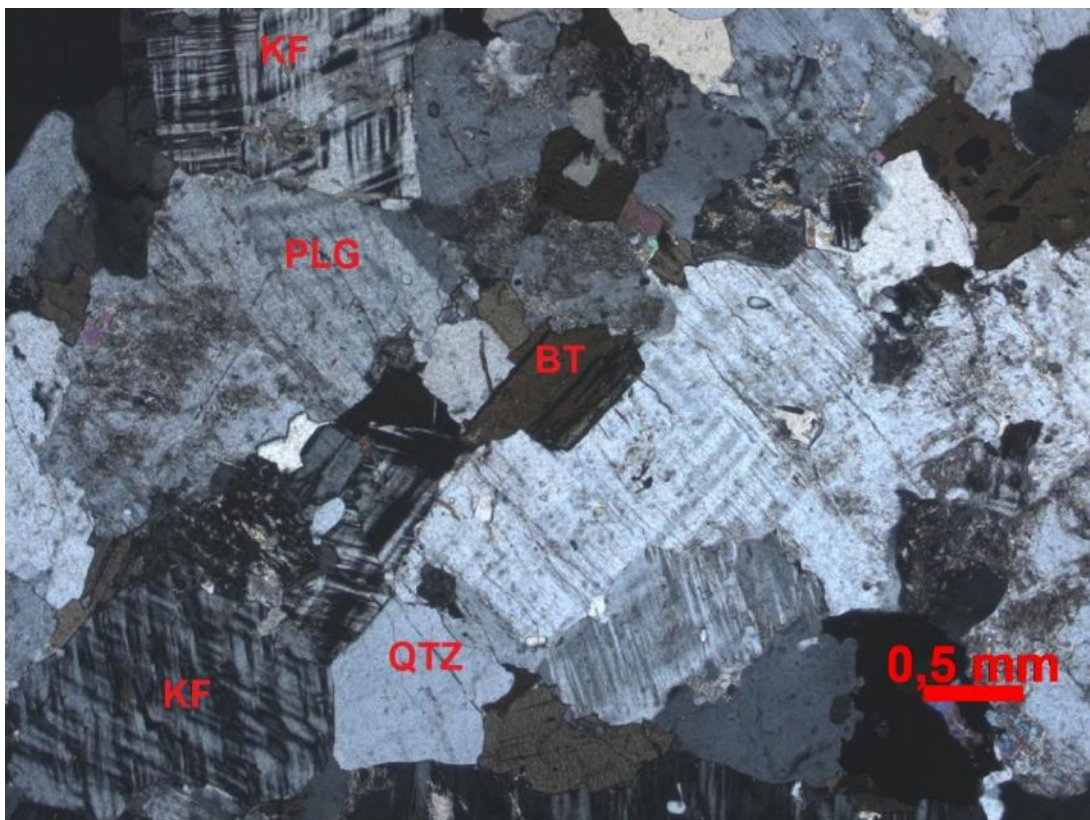


## 2.6 MICROPETROGRÁFIA

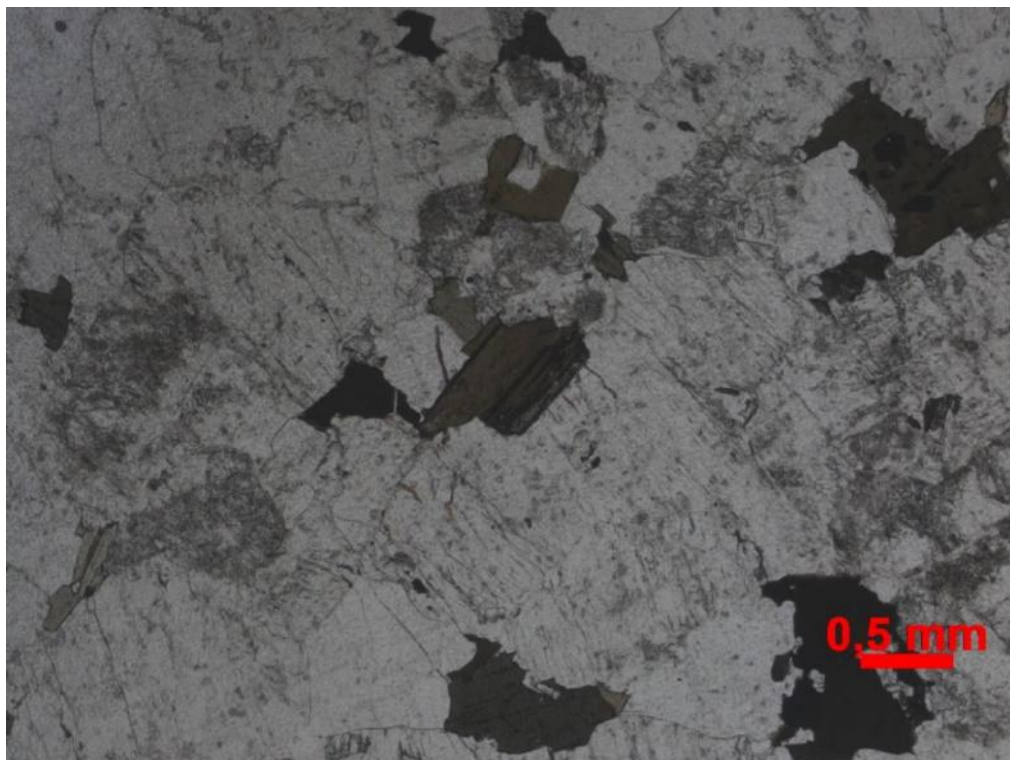
De acordo com MESQUITA (2019) as amostras coletadas em campo foram descritas observando suas características texturais, mineralógicas, de cor e estruturais.

### 2.6.1 LÂMINA W1

Segundo MESQUITA (2019), rocha holocristalina, leucocrática, com índice de cor entre 15 e 20%, fanerítica. Textura inequigranular, hipidiomórfica, com granulação média a grossa, variando de 0,25 a 6,0 milímetros. A composição mineralógica principal corresponde a quartzo, K-feldspato (microclina), plagioclásio e biotita (Figura 3 e Figura 4). Os minerais acessórios presentes são opacos, apatita, zircão e titanita. Os minerais secundários são provenientes da alteração dos K-feldspatos (sericita, caulinita, muscovita), plagioclásios (epidoto) e biotita (clorita e opacos).



**Figura 3:** Fotomicrografia da lâmina W1 a nicóis cruzados. Cristais pouco ou nada fraturados, pouco ou nada alterados. Biotita são. KF=Microclina, PLG=Plagioclásio, BT=Biotita, QTZ=quartzo (MESQUITA,2019).



**Figura 4:** Fotomicrografia da lâmina W1 a nicóis descruzados (MESQUITA, 2019)

MESQUITA (2019) descreveu o total de minerais formadores de rocha e a porcentagem dos minerais que apresentam mais de um terço da sua área alterada (lâmina **W1**) (Tabela 2 e Tabela 3).

**Tabela 2:** Contagem modal microscópica dos minerais formadores de rocha W1. (MESQUITA, 2019)

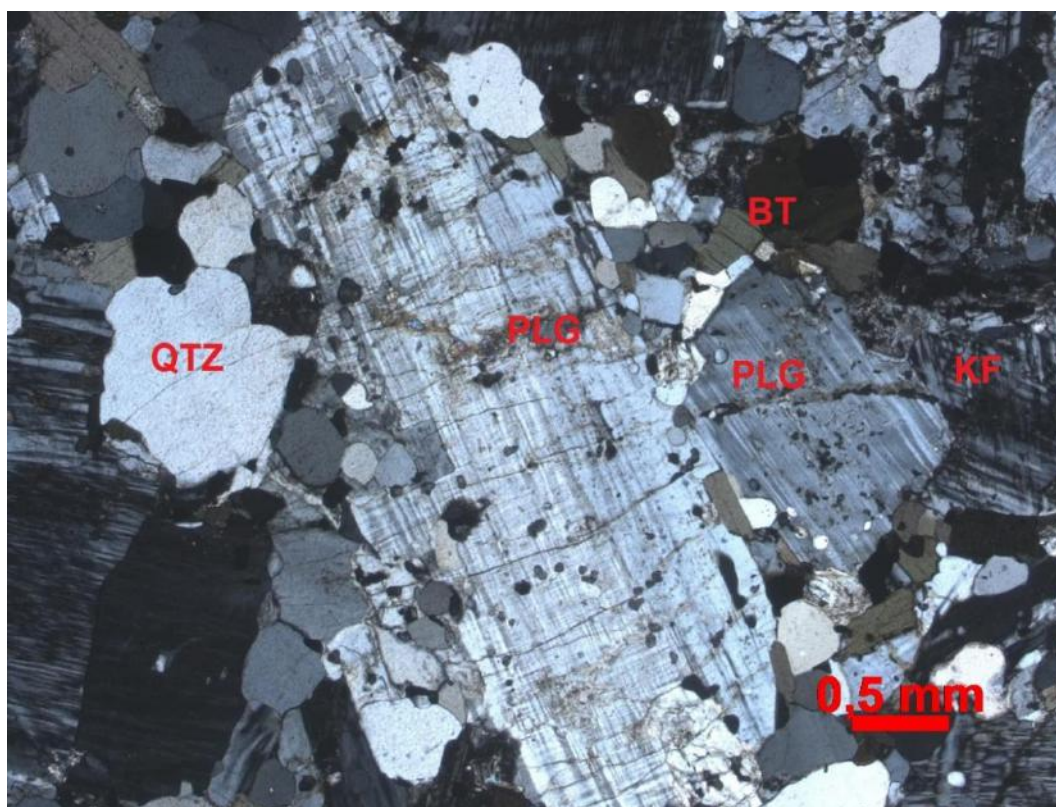
| MINERAIS TOTAIS | CONTAGEM MODAL |
|-----------------|----------------|
| Quartzo         | 27%            |
| K-Feldspato     | 43%            |
| Plagioclásio    | 13%            |
| Biotita         | 11%            |
| Opacos          | 6%             |

**Tabela 3:** Contagem modal microscópica dos minerais alterados W1 (MESQUITA, 2019)

| MINERAIS ALTERADOS | CONTAGEM MODAL |
|--------------------|----------------|
| Quartzo            | 0%             |
| K-Feldspato        | 39%            |
| Plagioclásio       | 46%            |
| Biotita            | 9%             |
| Opacos             | 0%             |

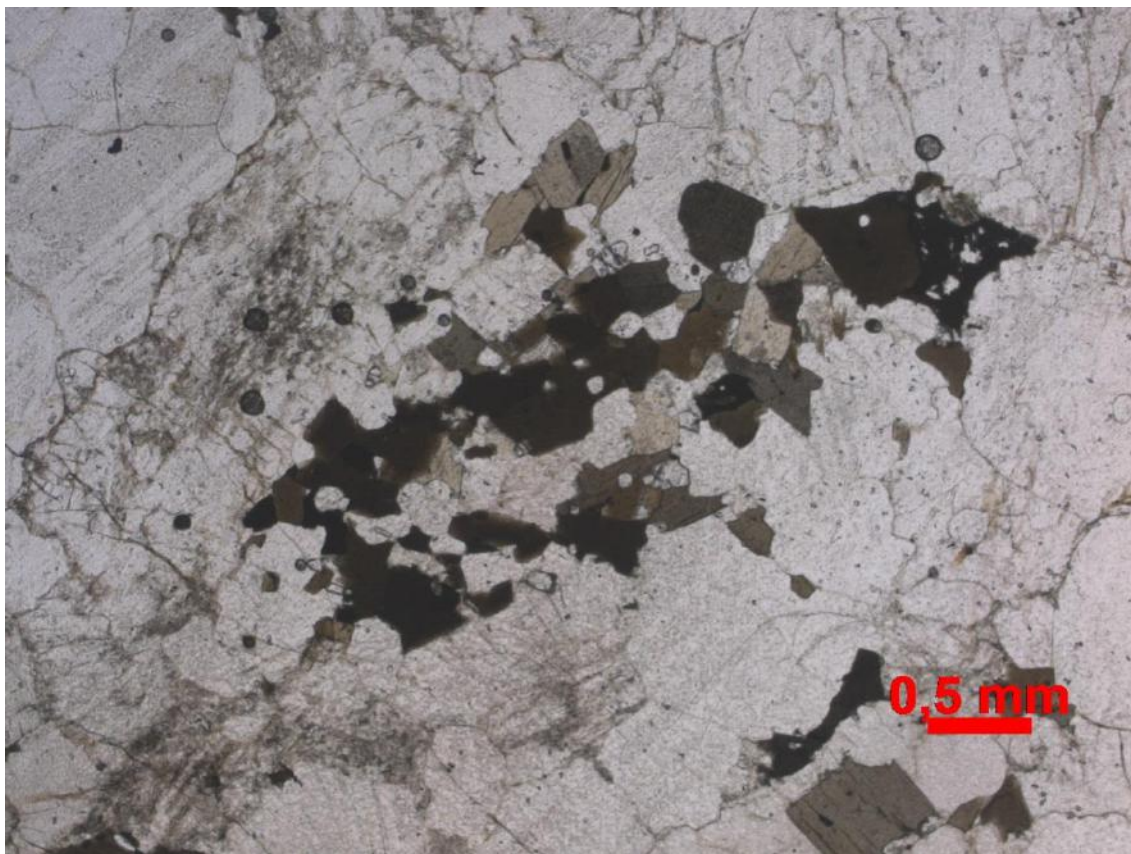
### 2.6.2 LÂMINA W2

Segundo MESQUITA (2019), rocha holocristalina, leucocrática, com índice de cor entre 15 e 20%, fanerítica. Textura inequigranular, hipidiomórfica, com granulação fina a média, variando de 0,25 a 4,5 milímetros. A composição mineralógica principal corresponde a quartzo, K-feldspato (microclina), plagioclásio e biotita (Figura 5 e Figura 6). Os minerais acessórios presentes são opacos, apatita, zircão e titanita. Os minerais secundários são provenientes da alteração dos K-feldspatos (sericita, caulinita, muscovita), plagioclásios (epidoto) e biotita (clorita e opacos).



**Figura 5:** Fotomicrografia da lâmina W2 a nicóis cruzados. Cristais tabulares de plagioclásio e feldspatos apresentam fraturamento ortogonal em relação ao seu maior eixo cristalográfico. Minerais em geral pouco alterados KF=Microclina, PLG=Plagioclásio, BT=Biotita, QTZ=quartzo (MESQUITA, 2019)





**Figura 6:** Fotomicrografia da lâmina W2 a nicóis descruzados (MESQUITA, 2019)

MESQUITA (2019) descreveu o total de minerais formadores de rocha e a porcentagem dos minerais que apresentam mais de um terço da sua área alterada (lâmina W2). (Tabela 4 e Tabela 5).

**Tabela 4:** Contagem modal microscópica dos minerais formadores de rocha W2 (MESQUITA, 2019)

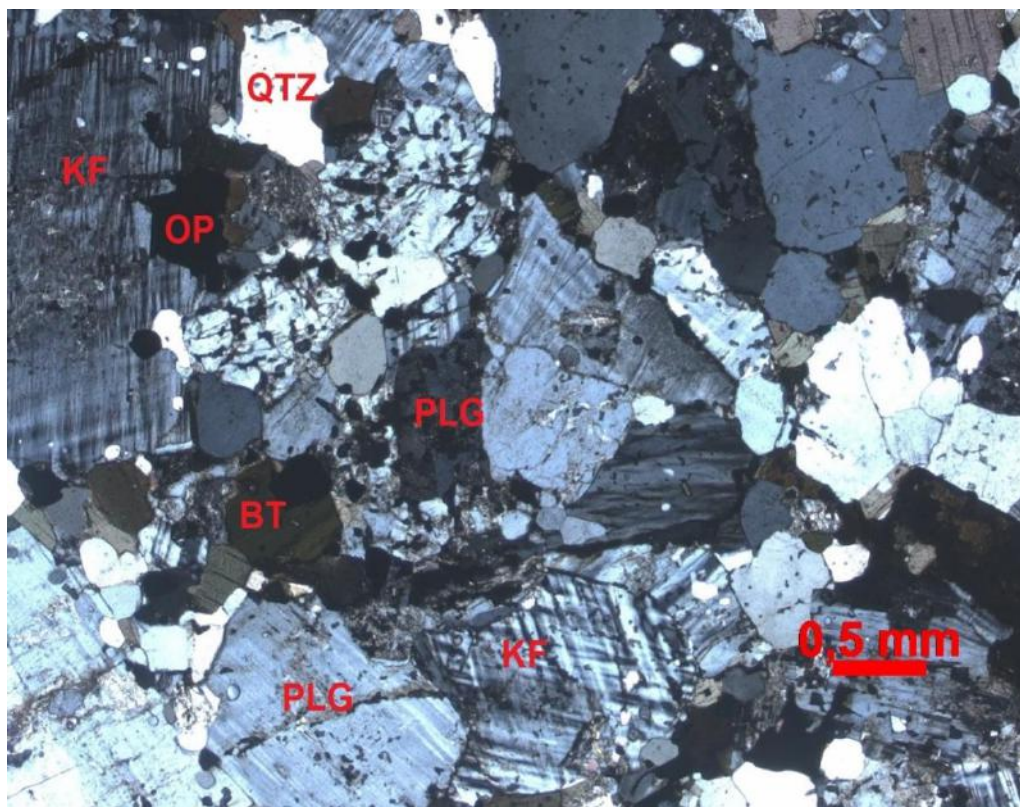
| MINERAIS TOTAIS | CONTAGEM MODAL |
|-----------------|----------------|
| Quartzo         | 34%            |
| K-Feldspato     | 36%            |
| Plagioclásio    | 18%            |
| Biotita         | 10%            |
| Opacos          | 2%             |

**Tabela 5:** Contagem modal microscópica dos minerais alterados W2.

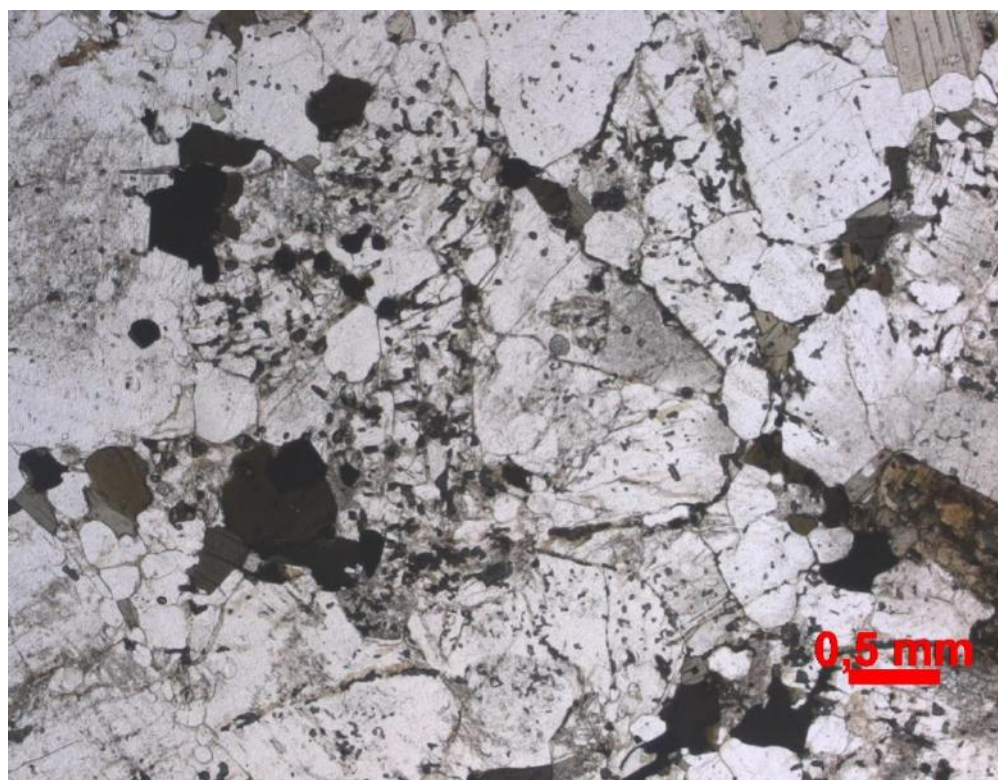
| <b>MINERAIS ALTERADOS</b> | <b>CONTAGEM MODAL</b> |
|---------------------------|-----------------------|
| Quartzo                   | 0%                    |
| K-Feldspato               | 31%                   |
| Plagioclásio              | 56%                   |
| Biotita                   | 30%                   |
| Opacos                    | 0%                    |

### **2.6.3 LÂMINA W3**

De acordo com MESQUITA (2019), rocha holocristalina, leucocrática, com índice de cor entre 15 e 20%, fanerítica. Textura inequigranular, hipidiomórfica com granulação média a grossa, variando de 0,25 a 5,0 milímetros. A composição mineralógica principal corresponde a quartzo, K-feldspato (microclina), plagioclásio e biotita (Figura 7 e Figura 8). Os minerais acessórios presentes são opacos, apatita, zircão e titanita. Os minerais secundários são provenientes da alteração dos K-feldspatos (sericita, caulinita, muscovita), plagioclásios (epidoto) e biotita (clorita e opacos).



**Figura 7:** Fotomicrografia da lâmina W3 a nicóis cruzados. Maior fraturamento, alterações se desenvolvendo entre as fraturas. Minerais em geral alterados a muito alterados. KF=Microclina, PLG=Plagioclásio, BT=Biotita, QTZ=quartzo, OP=Opacos (MESQUITA 2019).



**Figura 8:** Fotomicrografia da lâmina W3 a nicóis descruzados (MESQUITA, 2019)



MESQUITA (2019) descreveu As tabelas o total de minerais formadores de rocha e a porcentagem dos minerais que apresentam mais de um terço da sua área alterada (lâmina **W3**). (Tabela 6 e Tabela 7).

**Tabela 6:** Contagem modal microscópica dos minerais formadores de rocha W3 (MESQUITA, 2019)

| <b>MINERAIS TOTAIS</b> | <b>CONTAGEM MODAL</b> |
|------------------------|-----------------------|
| Quartzo                | 32%                   |
| K-Feldspato            | 34%                   |
| Plagioclásio           | 17%                   |
| Biotita                | 14%                   |
| Opacos                 | 2%                    |

**Tabela 7:** Contagem modal microscópica dos minerais alterados W3 (MESQUITA, 2019)

| <b>MINERAIS ALTERADOS</b> | <b>CONTAGEM MODAL</b> |
|---------------------------|-----------------------|
| Quartzo                   | 0%                    |
| K-Feldspato               | 59%                   |
| Plagioclásio              | 59%                   |
| Biotita                   | 57%                   |
| Opacos                    | 0%                    |

### **3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA**

A área de estudo deste trabalho se encontra no município de Cachoeiro de Itapemirim, estado do Espírito Santo. Mais precisamente na porção sul-sudeste do estado, dentro de um raio de 30 km a partir desse município (Figura 9).

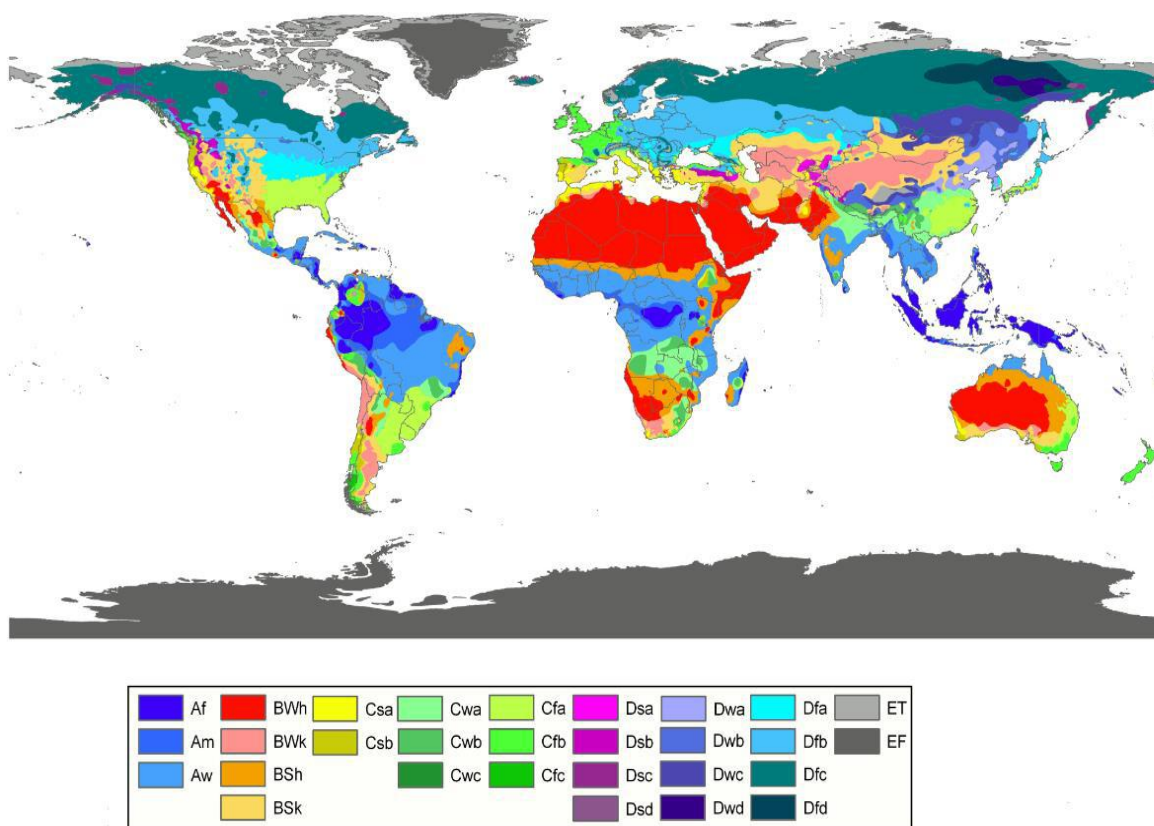


**Figura 9:** Localização de Cachoeiro de Itapemirim no mapa do Espírito Santo. (Google Maps)



### 3.2 CLIMA E VEGETAÇÃO

O estado do Espírito Santo é classificado por 3 tipos de clima: Cwa, Cwb e Aw, De acordo com a classificação de Köppen, O clima Cwa é encontrado em planaltos entre 400 e 700 metros de altitude. Ocorrem precipitações do tipo tropical abundantes e verões quentes associados a invernos secos, sendo que a temperatura média do mês mais quente superior a 22° C e a do mês mais frio é menor que 18° C. O clima Cwb é encontrado normalmente na serra do Caparaó, possui verões brandos e chuvosos, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22° C. O clima Aw é encontrado em encostas montanhosas até a faixa litorânea do Estado do Rio de Janeiro (Figura 10), é quente e úmido, com estação seca no inverno. (CPRM, 1997).



**Figura 10:** Mapa climático mundial (KÖPPEN, adaptado).

No município de Cachoeiro de Itapemirim, o clima é quente e úmido (Aw) e caracterizado por possuir inverno seco (Junho, Julho e Agosto). Segundo a INCAPER (2013) o índice pluviométrico é em média 1.200mm e os meses de maior pluviosidade vão de novembro a março.

A vegetação possui uma grande variação, no interior da região a vegetação herbácea subarbórea ou arbustiva, localizada na serra do Caparaó. A oeste de vegetação latifoliada tropical úmida e a leste apresenta a vegetação do tipo litorânea, composta por três tipos de formações: restingas, praias e mangues (CPRM, 1997).

### 3.3 GEOMORFOLOGIA

Segundo MESQUITA (2019) a geomorfologia das área estudada é predominantemente forma de vales encaixados controlados pelas discontinuidades do maciço rochoso e por uma topografia relativamente acidentada, sendo visto uma abundância de campos de blocos e matações (Figura 11). De acordo com VIEIRA (1997) o município de Cachoeiro de Itapemirim, possui uma relvo variável, correspondendo os grandes eventos tectônicos e estruturais. O paleoclima e a diversidade litológica contribuem para a composição geomorfológica do local.

A área em questão possui uma variedade de solos em função da diversidade estrutural e litológica, sendo controlados pela geomorfologia. Nas áreas de praias e restingas ocorrem solos Podzólicos vermelho-amarelos, solos orgânicos em várzeas e areias marinhas. Nas áreas de relevo forte, ondulado e montanhoso predominam os Latossolos vermelho-amarelos distróficos e cambissolos distróficos (CPRM, 1997).



**Figura 11:** Área de estudo, frente de lavra de granito ornamental. Ao fundo, relevo escarpado com vales incisos. (MESQUITA, 2019)

### 3.4 GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

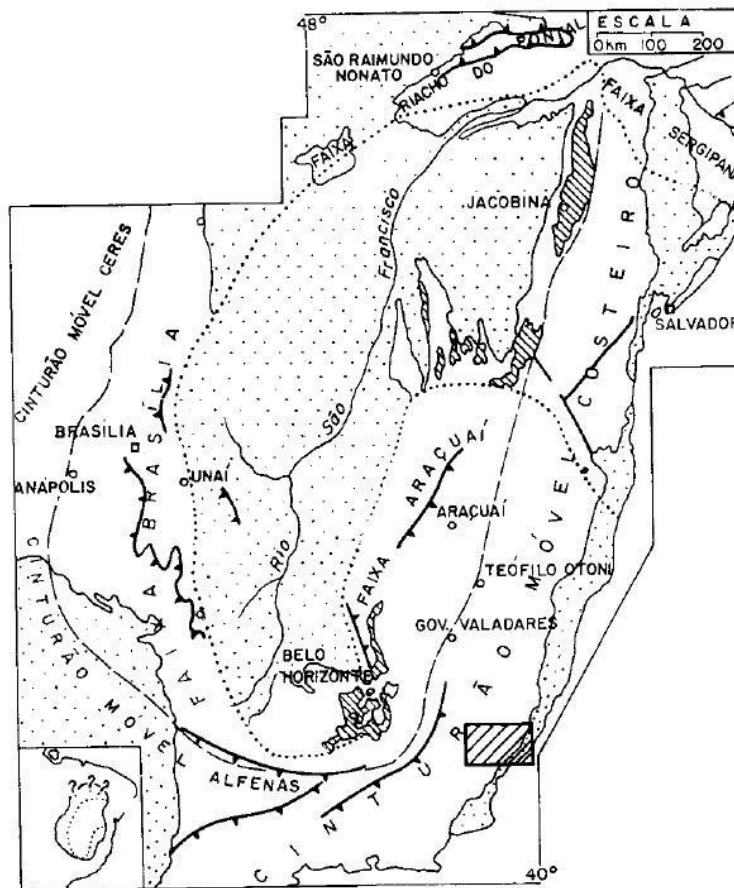
A área de pesquisa está inserida na Província Estrutural da Mantiqueira, considerada um sistema orogênico de idade Neoproterozóica, em que a extensão ocorre do Rio Grande do


Sul até o sul da Bahia. Constituída pelos orógenos Araçuaí, Brasília Meridional, Ribeira, Dom Feliciano e São Gabriel (HEILBRON et al., 2004).





ALMEIDA *et al.* (1977) definiu a Província Mantiqueira como uma faixa paralela à costa atlântica do sudeste e sul do Brasil, com direção NE-SW e mais de 3.000 km de comprimento, fazendo limite com outras províncias importantes como Cráton São Francisco e Província Tocantins (Figura 12 e Figura 13). Sendo dividida em três segmentos geográficos: Segmento Central, que engloba a Faixa Ribeira; Segmento Meridional, que inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel; Segmento Setentrional, que corresponde ao Orógeno Araçuaí, a Zona de Interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira, os terrenos Apiaí, São Roque e Embu. (HEILBRON et al., 2004).

A Província Mantiqueira é constituída, portanto, de rochas do embasamento, principalmente orto e paragneisses paleoproterozóicos (com ocorrências de rochas arqueanas), e de rochas supracrustais paleoproterozóicas a neoproterozóicas, sendo intrudidas por corpos plutônicos pré-, sin- e pós-colisionais durante a colagem orogênica brasileira (MESQUITA, 2019).

Segundo HEILBRON *et al.* (2004) a orogenia na Província Mantiqueira ocorreu de forma diacrônica, ou seja, em períodos de tempo similares ocorreram diferentes estágios de evolução nos vários segmentos de um mesmo sistema. A Orogenia Brasileira (de 880 a 580 Ma), responsável pela amalgamação do Paleocontinente Gondwana Ocidental, foi o período diacrônico que gerou a estruturação do embasamento da Plataforma Sul-Americana (HEILBRON *et al.*, 2004).



 - Folha Cachoeira de Itapemirim (SF.24-V-A)  
 Escala 1: 250 000

-  - PROTEROZÓICO ANTIGO
-  - PROTEROZÓICO MÉDIO A CENOZÓICO
-  - FOLIAÇÃO DAS FAIXAS DE DOBRAMENTOS BRASILEANOS MARGINAIS DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO.
-  - COBERTURAS DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO DOBRADAS NO CICLO BRASILEANO

**Figura 12:** Cráton do São Francisco, Folha SF.24-V-A. (ALMEIDA, 1981)



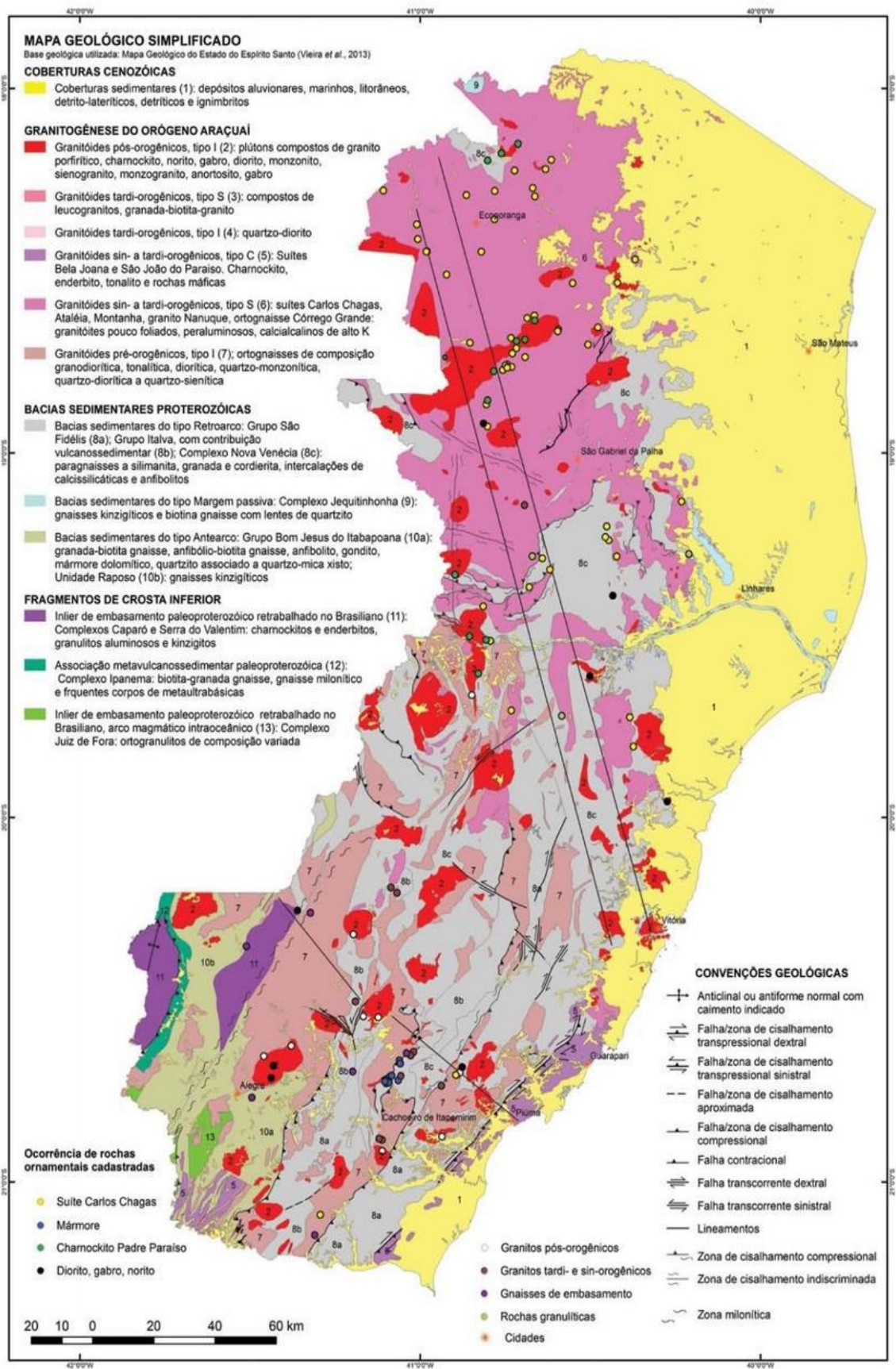


Figura 13: Mapa Geológico do Estado do Espírito Santo (CPRM, 2013).

A faixa de dobramentos Araçuaí compreende o segmento setentrional da Província Mantiqueira, definido como Orógeno Araçuaí (PEDROSA SOARES e WIEDEMANN LEONARDOS, 2000; PEDROSA SOARES *et al.*, 2001), que pode ser dividido amplamente no núcleo cristalino, também denominado de núcleo metamórfico-anatético, e na faixa de dobramentos e, a leste dela. (ALKMIM *et al.*, 2007). Atualmente é considerado o segmento brasileiro do sistema orogênico Araçuaí-Congo Ocidental, localizado na grande reentrância limitada pelos crátons do São Francisco e do Congo, edificados no Neoproterozóico-Cambriano, durante o Brasiliano III (PEDROSA SOARES *et al.*, 2007).

Alkmim e colaboradores propuseram um modelo de evolução tectônica “quebra-nozes”, que embasou o entendimento do processo de separação do Paleocontinente Gondwana Ocidental. Segundo essa teoria, um Ciclo de Wilson teria se iniciado com o rifte Macaúbas, sendo interrompido por eventos tectônicos de grandes magnitudes, antes da separação total do supercontinente Rodínia, de modo que mecanismo de fechamento da bacia Macaúbas teria se dado de maneira diferente, como um “quebra-nozes”, resultado da colisão das paleoplacas São Francisco-Congo, Amazônia, Paraná-Paranapanema Rio de La Plata e Kalahari. O choque de placas das margens opostas à bacia teria sido o mecanismo responsável pelo início do fechamento do pequeno oceano, que deu origem ao Orógeno Araçuaí (MESQUITA, 2019).

De acordo com MESQUITA (2019) a geologia local compreende as áreas das pedreiras localizadas no sul do município de Cachoeiro, que são intrusões graníticas pós-orogênicas tendo como encaixantes as rochas metassedimentares e metavulcanossedimentares do Complexo Paraíba do Sul (Figura 14). As rochas deste complexo possuem idade Neoproterozoica, geradas pelos eventos tectônicos e metamórficos do Panafricano-Brasiliano, fazendo parte da sequência supracrustal da Faixa Ribeira (Almeida *et al.*, 1973). É composta por uma variedade de gnaisses bandados ou homogêneos, com intercalações de quartzitos, mármore, rochas calcissilicáticas e anfibolitos.

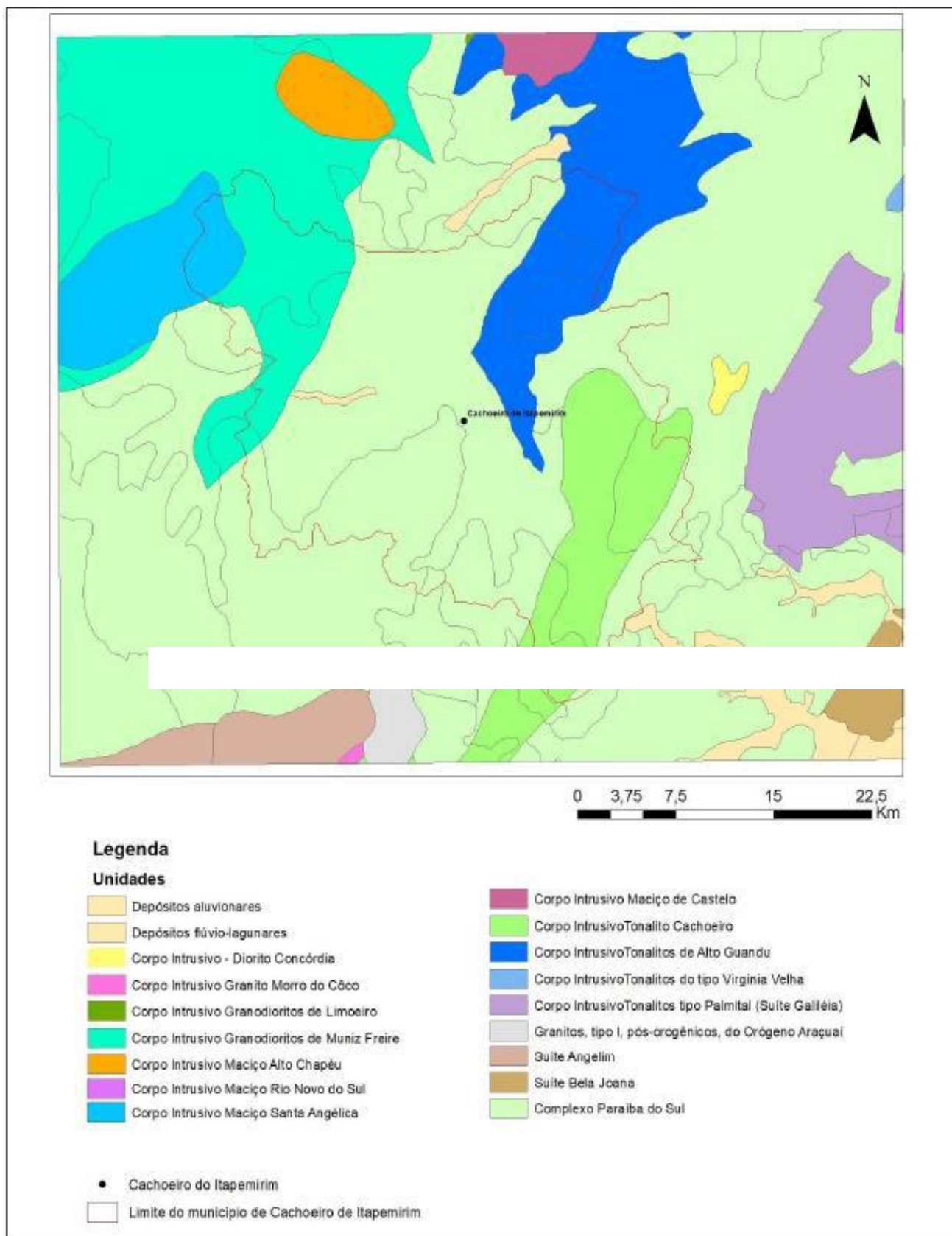


Figura 14: Mapa Geológico local (JAQUES, 2019).

### 3.4.1 GRANITOS PÓS-OROGÊNICOS

Na faixa Araçuaí, região do sul do Espírito Santo, o magmatismo pós-orogênico (535 a 480 Ma) tem como destaque granitoides metaluminosos cálcio-alcálicos de alto potássio. Constituídos por corpos do tipo-I, intrudidos ao longo de zonas de cisalhamento dúctil de alto ângulo e núcleos de estruturas antiformais, e pequenas lentes gabróicas, piroxeníticas, anortosíticas e de flogopitaperidotito são raras neste cinturão. O nível profundo da erosão associado a um relevo escarpado, destaca corpos afunilados com raízes cilíndricas sub-verticais, com graduação a planos de fluxo de menor ângulo de mergulho. Nas seções horizontais as formas são elípticas, ameboides e circulares. (MESQUITA, 2019)

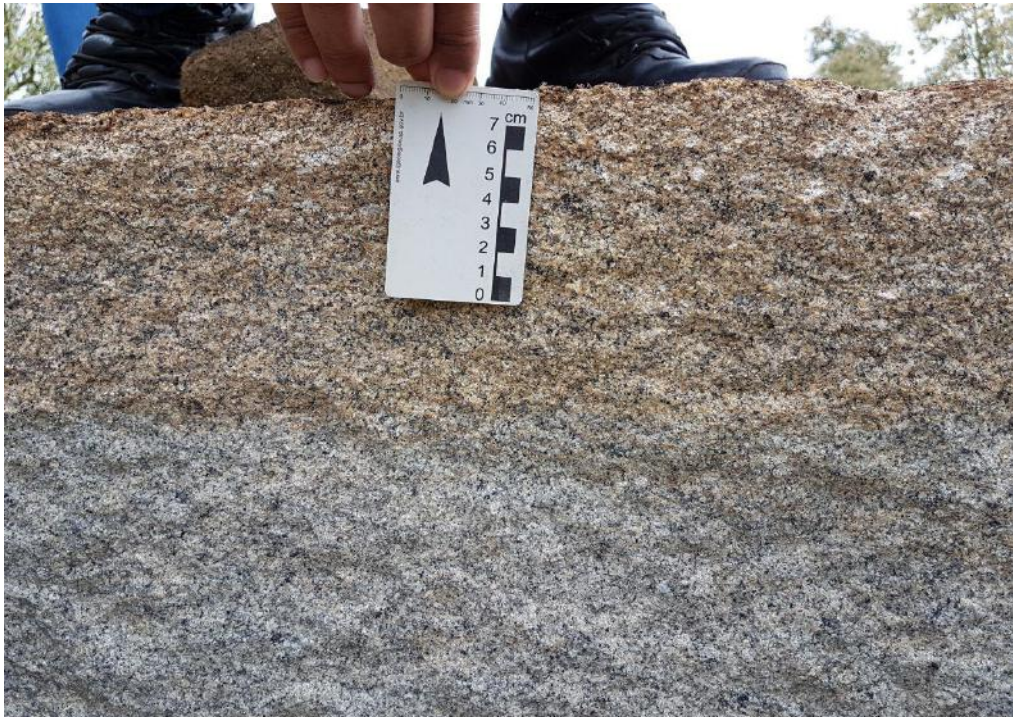
Os trabalhos de campo feitos por MESQUITA (2019) e JAQUES (2019) descrevem para esses granitos uma foliação ígnea bem desenvolvida e que a xistosidade das encaixantes envelopa os corpos ígneos se amoldando a eles. As intrusões possuem domínios concêntricos mais básicos a intermediários no centro e são envolvidos por anéis interdigitados de rochas mistas e granitoides. Granodioritos, sienogranitos e monzogranitos, apresentando em sua composição allanita, titanita e biotita compõem as fácies mais tardias, intrudidos como sills, diques e/ou formando o envoltório mais externo dos plútons, nas bordas da intrusão. Evidências regionais de misturas de magmas contrastantes, com composições que gradam de gabro a granito, são observadas em todas as intrusões (WIEDEMANN LEONARDOS et al., 2001).

De acordo com MESQUITA (2019) e JAQUES (2019) as Figura 15, Figura 16 e Figura 17 mostram as texturas dos blocos de granitos encontrados na área de estudo.





**Figura 15:** Bloco sendo cortado para rocha ornamental. Injeções aplíticas são comuns cortando o granito (MESQUITA, 2019).



**Figura 16:** Contato entre diferentes classes de alteração do granito (JAQUES, 2019).





**Figura 17:** Granito pós-orogênico tipo I em detalhe (JAQUES, 2019).

## 4. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo dividiu-se em duas etapas: teste de laboratório (ensaio de compressão triaxial), e interpretação e correlação dos dados obtidos.

### 4.1 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Os levantamentos de campo foram realizados em parceria com a Universidade Federal de Viçosa (UFV) através da tese de doutorado de JAQUES (2019). Foram coletados blocos da matriz rochosa, de todos os níveis de intemperismo identificados pela caracterização morfológica, para realização de testes de laboratório e confecção de lâminas petrográficas (não realizadas neste trabalho).

Nesta pesquisa foi escolhido usar o sistema de classificação do proposto pela ISRM (1978) por melhor descrever e compatibilizar as características de maciço e matriz rochosa na determinação grau ou nível de intemperismo da rocha. Serão utilizadas neste estudo as denominações e siglas das seis classes ou graus de intemperismo já apresentadas na Tabela 9: rocha sã (W1), rocha levemente intemperizada (W2), rocha moderadamente intemperizada (W3), rocha muito intemperizada (W4), rocha extremamente intemperizada (W5) e solo residual (W6).

### 4.2 TESTE DE LABORATÓRIO

A partir da amostragem de blocos da matriz rochosa e a necessidade da complementação do projeto em questão foi determinado ensaio de resistência a compressão triaxial como o teste que seria necessário para se proceder à caracterização geomecânica do granito. Suas diretrizes e local de realização são descritos na Tabela 8.

**Tabela 8:** Testes de laboratório para caracterização geomecânica da matriz rochosa.

| Teste                             | Local  | Equipamentos             | Diretriz    |
|-----------------------------------|--------|--------------------------|-------------|
| Resistência à compressão triaxial | PUC-RJ | Prensa triaxial MTS 815. | ISRM (2007) |

Fonte: Adaptado de JAQUES, 2019

Segundo VARGAS JR. *et al.* (1992) o ensaio consiste na compressão axial do cilindro com a aplicação simultânea de pressão confinante. O ensaio de compressão triaxial convencional consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico. O carregamento axial é feito por meio da aplicação de uma força crescente. A tensão devida ao carregamento axial é denominada acréscimo de tensão axial ou tensão desviadora (Figura 18). O ensaio de compressão triaxial nos dá deformação volumétrica que descreve a tendência de um material em se deformar em



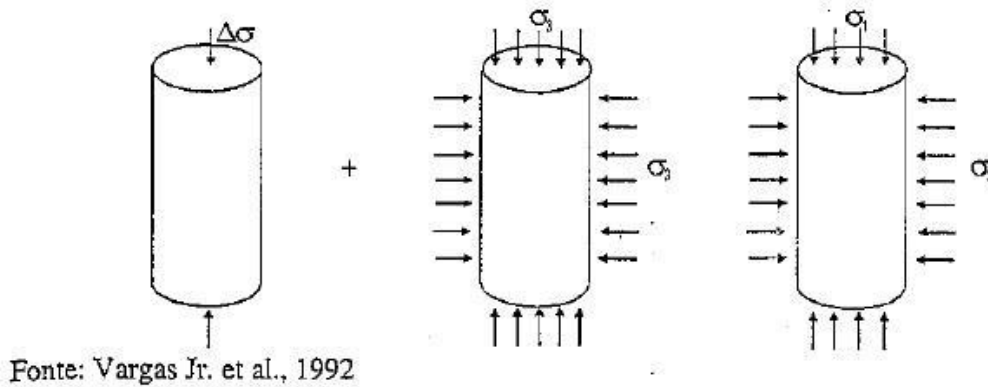
todas as direções, correlacionando a deformação axial ( $\epsilon_a$ ) e a deformação radial ( $\epsilon_r$ ), dada por:

$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_r$$

$\epsilon_v$  = deformação volumétrica

$\epsilon_a$  = deformação axial

$\epsilon_r$  = deformação radial



Na ruptura, o estado de tensões é dado por

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \Delta\sigma$$

em que

$\sigma_1$  - carga axial aplicada na amostra;

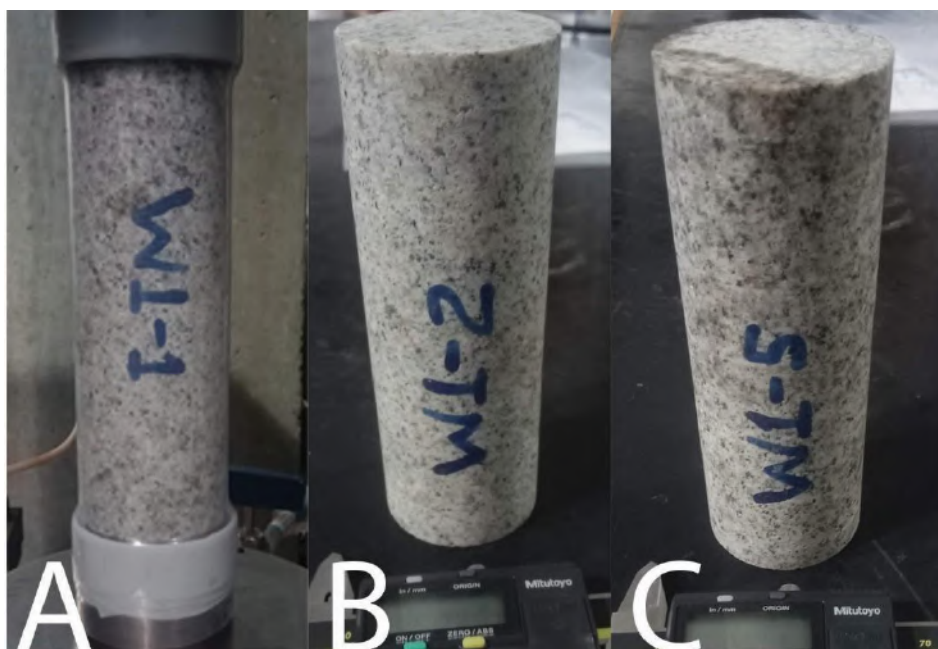
$\sigma_3$  - pressão confinante aplicada na amostra; e

$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$  - tensão desviadora aplicada na amostra.

**Figura 18:** Estado de tensões em um ensaio triaxial (VARGAS JR. et al. 1992)

Para a realização dos ensaios de compressão triaxial foi necessária a extração de amostras cilíndricas dos blocos da matriz rochosa a partir de extrator mecânico e serra copo diamantada, produzindo-se corpos-de-prova (CPs) com diâmetro próximo de 47 mm, sendo sua base e topo retificados para garantir que estivessem lisas, livres de ondulações e paralelas, de acordo com as recomendações da ISRM (2007). Contudo, este procedimento se limitou ao granito na condição sã (W1), levemente intemperizado (W2) e medianamente intemperizado (W3), pois para as condições de rocha muito intemperizada (W4) e extremamente intemperizada (W5) a friabilidade do material, neste caso, não permitiu a

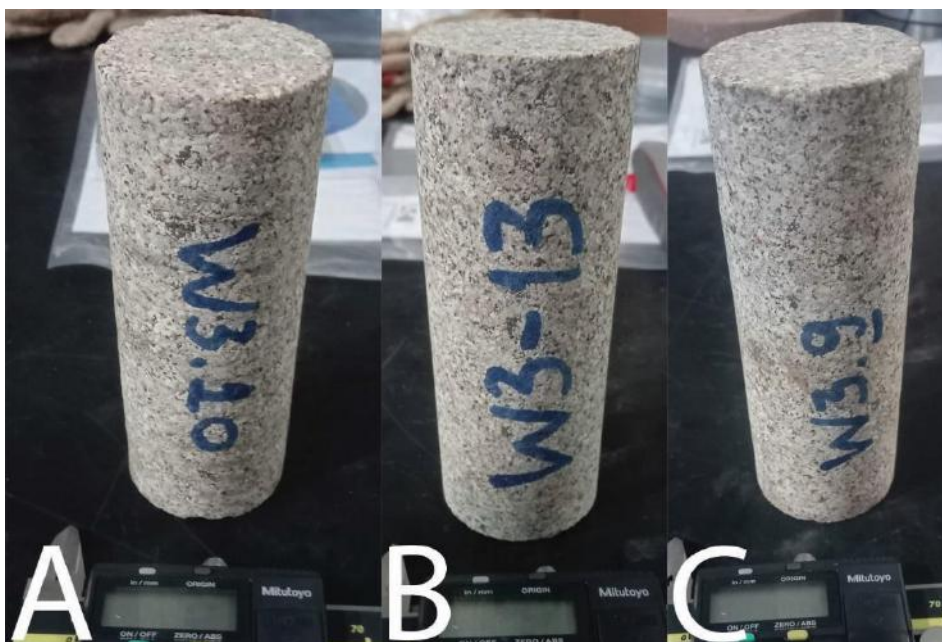
extração de CPs. Foram utilizados 3 CPs para cada nível de intemperismo (W1, W2 e W3) para efeito comparativo, como podemos observar nas Figura 19, Figura 20 e Figura 21.



**Figura 19:** CPs nível de intemperismo W1: A (W1-1); B (W1-2) e C (W1-5)



**Figura 20:** CPs nível de intemperismo W2: A (W2-8); B (W2-9) e C (W2-12)



**Figura 21:** CPs nível de intemperismo W3: A (W3-10); B (W3-13) e C (W3-9).

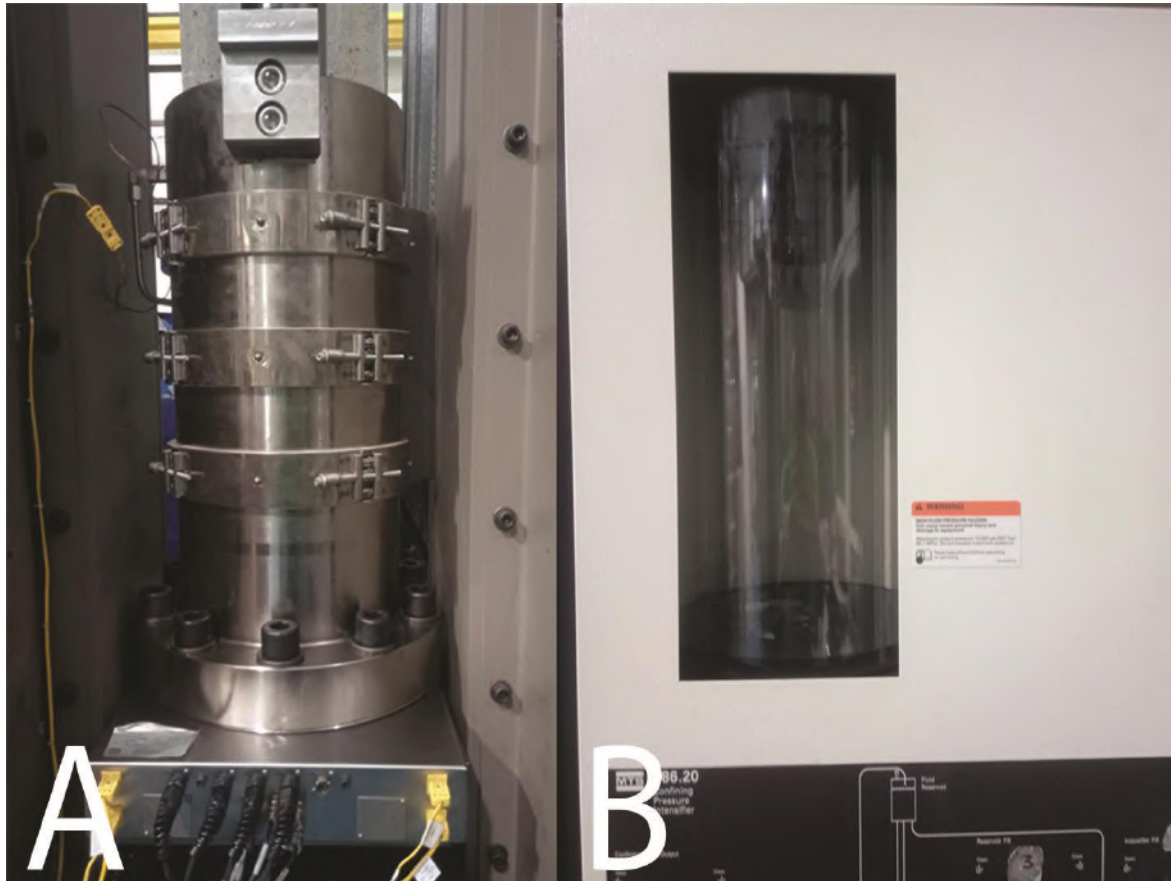
A resistência à compressão triaxial para a rocha nos níveis intempéricos W1 a W3 seguiu as recomendações da ISRM (2007). Os ensaios de resistência à compressão triaxial, para obtenção do valor da tensão desviadora  $\sigma_d$ , foram realizados a uma taxa de carregamento axial constante de 2,5 MPa/min. Foram utilizados 3 CPs para cada nível de intemperismo (W1, W2 e W3), e assim aplicado três tensões confinantes diferentes para cada CP dentro de cada nível (Tabela 9).

**Tabela 9:** Tensão confinante e taxa de carregamento aplicada aos CPs.

| Nível de intemperismo | CPs   | Tensão Confinante | Taxa de confinamento |
|-----------------------|-------|-------------------|----------------------|
| W1                    | W1-1  | 5 MPa             | 2,5 MPa/min          |
|                       | W1-2  | 10 MPa            | 2,5 MPa/min          |
|                       | W1-5  | 15 MPa            | 2,5 MPa/min          |
| W2                    | W2-8  | 5 MPa             | 2,5 MPa/min          |
|                       | W2-9  | 10 MPa            | 2,5 MPa/min          |
|                       | W2-12 | 15 MPa            | 2,5 MPa/min          |
| W3                    | W3-10 | 5 MPa             | 2,5 MPa/min          |
|                       | W3-13 | 10 MPa            | 2,5 MPa/min          |
|                       | W3-9  | 15 MPa            | 2,5 MPa/min          |

Fonte: o autor.

O efeito do confinamento, em ensaios triaxiais de rochas, é obtido por meio da aplicação de óleo sob pressão na câmara axial (Figura 22), onde é colocada a amostra de rocha envolvida por uma membrana impermeável (Figura 23). Quanto maior a pressão confinante, maior a resistência.



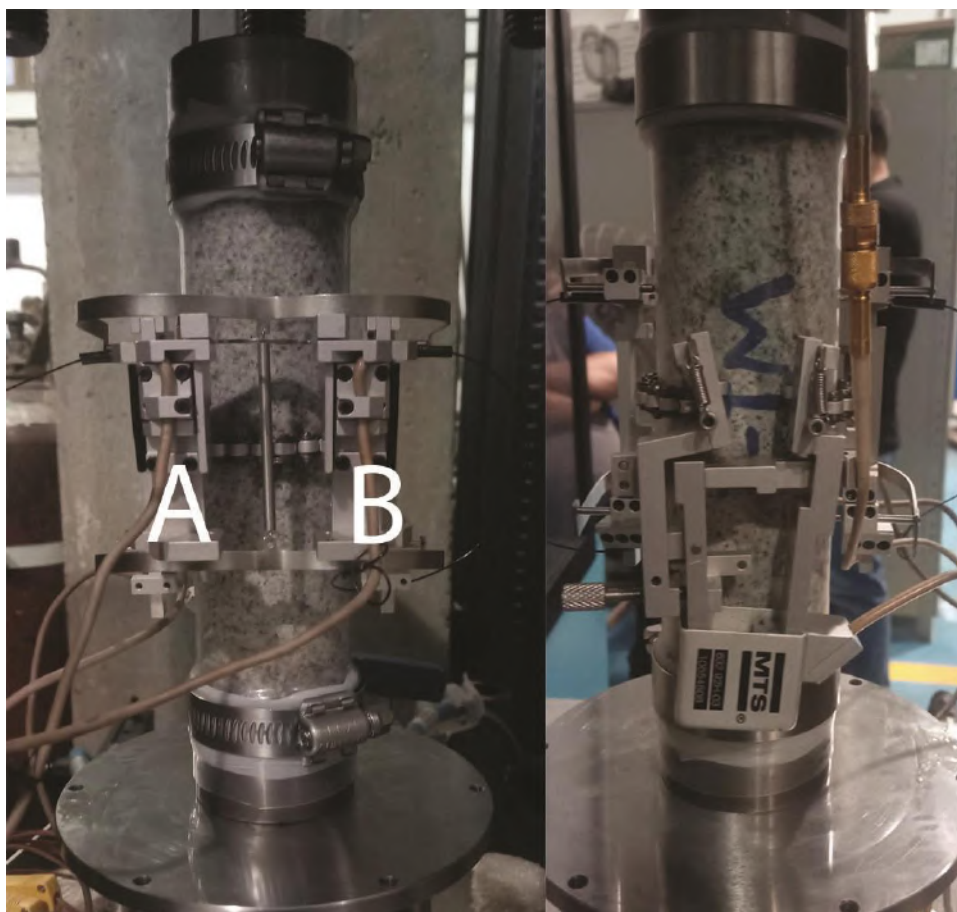
**Figura 22:** A - Câmara triaxial antes do ensaio e B- Óleo sendo transferido para a câmara triaxial.



**Figura 23:** Corpo de prova envolto por uma membrana de borracha.

Os testes para determinação das propriedades elásticas do material seguiram o escopo sugerido pela ISRM (2007) para obtenção da curva tensão vs. deformação. Neste ensaio a compressão triaxial é acompanhada de instrumentação do corpo-de-prova cilíndrico com extensômetros para registro de deformação axial e circunferencial. O arranjo típico dessas instrumentações para a rocha em estudo é apresentado na Figura 24. De acordo com ISRM (2007) a melhor maneira de se obter o módulo de elasticidade da rocha em ensaio instrumentado para medida de deformação é submetendo ao CP um carregamento e descarregamento pois, ao se ao realizar o cálculo baseado na tangente da porção linear da curva para apenas um carregamento estar-se-ia medindo, na verdade, o módulo de deformação em vez do módulo de elasticidade.





**Figura 24:** Extensômetros para registro de deformação axial (A e B) e circunferencial.

Portanto, nos ensaios para determinação da curva tensão vs. deformação foi realizado um ciclo de carregamento e descarregamento. Ao final do descarregamento, inicia-se o carregamento para ruptura, neste caso, passando a tensão aplicada a ser controlada pela taxa de deformação circunferencial, de modo a evitar a ruptura explosiva e ou precoce da rocha, permitindo traçar a curva pós pico e analisar o comportamento da rocha quanto à sua fragilidade-ductilidade.

## 5. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CORRELAÇÕES

Finalizadas as análises de laboratório e obtendo os resultados, as propriedades geomecânicas da rocha foram discutidas e comparando dados observados na literatura para outras pesquisas abrangendo rochas graníticas pelo mundo, sendo principalmente correlacionado de uma maneira complementar os valores das propriedades de engenharia com a tese de doutorado de JAQUES (2019) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

### 5.1 COMPRESSÃO TRIAXIAL

Os valores da tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) em testes padronizados pela ISRM (2007), para o granito W1 a W3, bem como suas tensões confinantes e taxas de confinamento encontram-se resumidos na Tabela 10.

**Tabela 10:** Propriedades de resistência do granito.

| Nível de intemperismo | CPs   | Tensão Confinante | Taxa de Confinamento | Tensão Desviadora ( $\sigma_d$ ) |
|-----------------------|-------|-------------------|----------------------|----------------------------------|
| W1                    | W1-1  | 5 Mpa             | 2,5 MPa /min         | 356.26 MPa                       |
|                       | W1-2  | 10 Mpa            | 2,5 MPa /min         | 486.24 MPa                       |
|                       | W1-5  | 15 Mpa            | 2,5 MPa /min         | 537.94 MPa                       |
| W2                    | W2-8  | 5 Mpa             | 2,5 MPa /min         | 263.52 MPa                       |
|                       | W2-9  | 10 Mpa            | 2,5 MPa /min         | 388.08 MPa                       |
|                       | W2-12 | 15 Mpa            | 2,5 MPa /min         | 484.38 MPa                       |
| W3                    | W3-10 | 5 Mpa             | 2,5 MPa /min         | 116.04 MPa                       |
|                       | W3-13 | 10 Mpa            | 2,5 MPa /min         | 183.93 MPa                       |
|                       | W3-9  | 15 Mpa            | 2,5 MPa /min         | 200.20 MPa                       |

Fonte: o autor.

Como já mencionado anteriormente após o início do segundo carregamento para ruptura, a tensão aplicada a deve ser controlada pela taxa de deformação circunferencial, de modo a evitar a ruptura explosiva e ou precoce da rocha. Podemos observar que a tensão desviadora aumenta com a elevação da tensão confinante. As Figuras Figura 25 a Figura 39 ilustram o rompimento dos CPs para cada nível de intemperismo (W1, W2, W3).



**Figura 25:** Lado A - Rompimento do W1-1 na tensão confinante de 5 MPa e tensão desviadora de 356,26 MPa.



**Figura 26:** Lado B - Rompimento do W1-1 na tensão confinante de 5 MPa e tensão desviadora de 356,26 MPa.



**Figura 27:** Lado A - Rompimento do W1-2 na tensão confinante de 10 MPa e tensão desviadora de 486,24 MPa.





**Figura 28:** Lado B - Rompimento do W1-2 na tensão confinante de 10 MPa e tensão desviadora de 486,24 MPa.



**Figura 29:** Lado A - Rompimento do W1-5 na tensão confinante de 15 MPa e tensão desviadora de 537,94 MPa.



**Figura 30:** Lado B - Rompimento do W1-5 na tensão confinante de 15 MPa e tensão desviadora de 537,94 MPa.

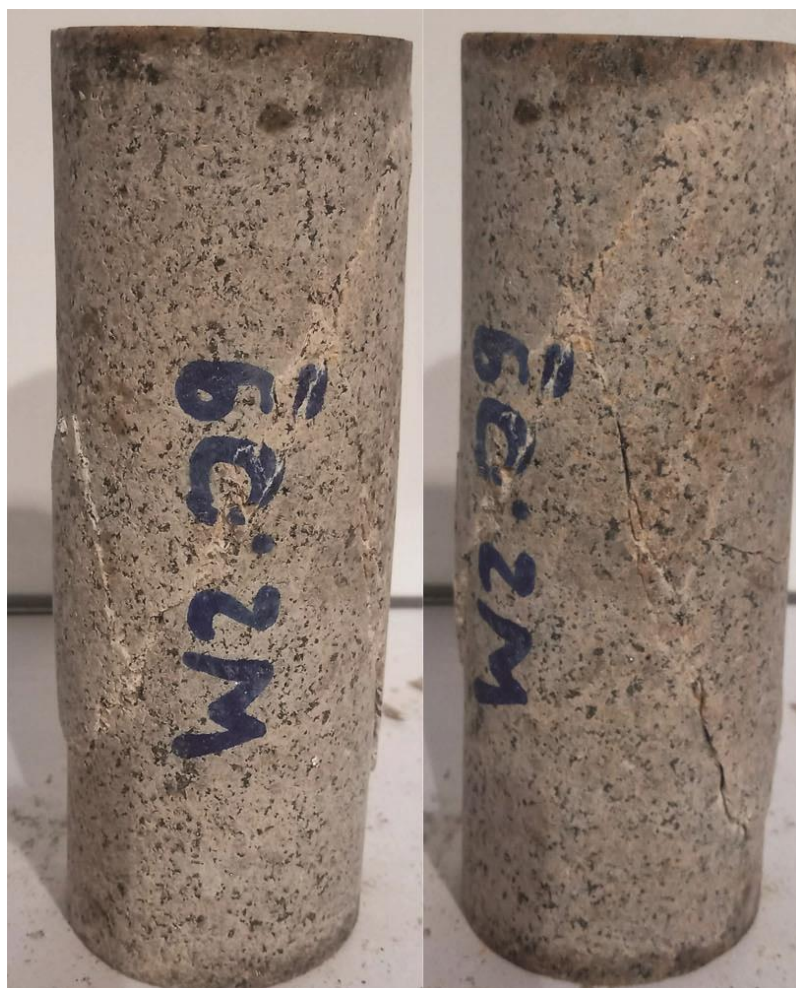




**Figura 31:** Lado A - Rompimento do W2-8 na tensão confinante de 5 MPa e tensão desviadora de 263,52 MPa.



**Figura 32:** Lado B - Rompimento do W2-8 na tensão confinante de 5 MPa e tensão desviadora de 263,52 MPa.



**Figura 33:** Lado A - Rompimento do W2-9 na tensão confinante de 10MPa e tensão desviadora de 388,08 MPa.

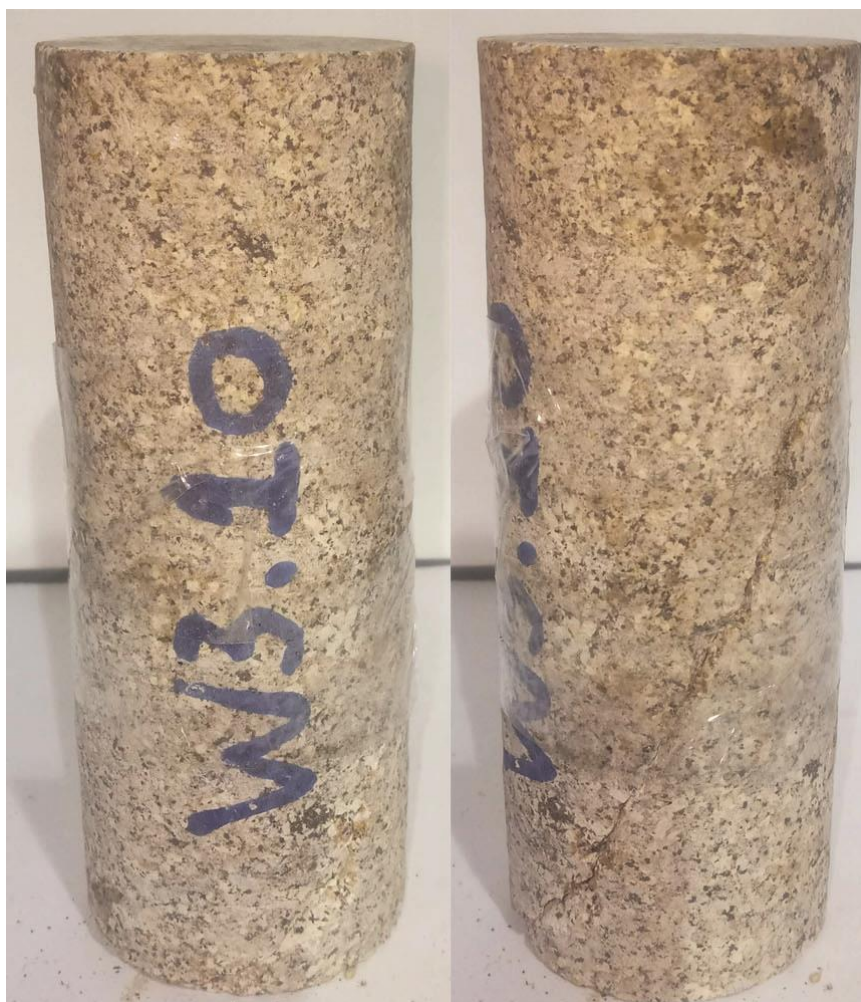


**Figura 34:** Lado B - Rompimento do W2-9 na tensão confinante de 10 MPa e tensão desviadora de 388,08 MPa.





**Figura 35:** Rompimento do W2-12 na tensão confinante de 15 MPa e tensão desviadora de 484,38 MPa.



**Figura 36:** Lado A- Rompimento do W3-10 na tensão confinante de 5 MPa e tensão desviadora de 116,04 MPa.

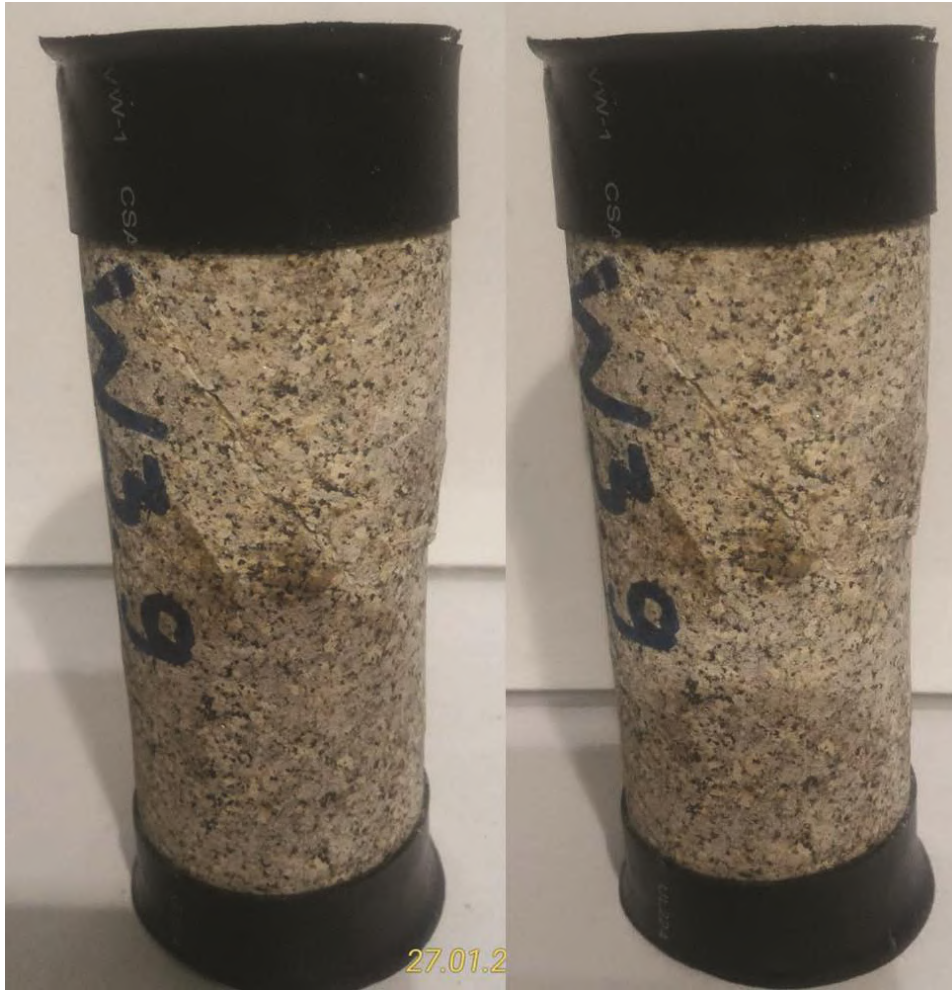




**Figura 37:** Lado B- Rompimento do W3-10 na tensão confinante de 5 MPa e tensão desviadora de 116,04 MPa.



**Figura 38:** Rompimento do W3-13 na tensão confinante de 10 MPa e tensão desviadora de 183,93 MPa.



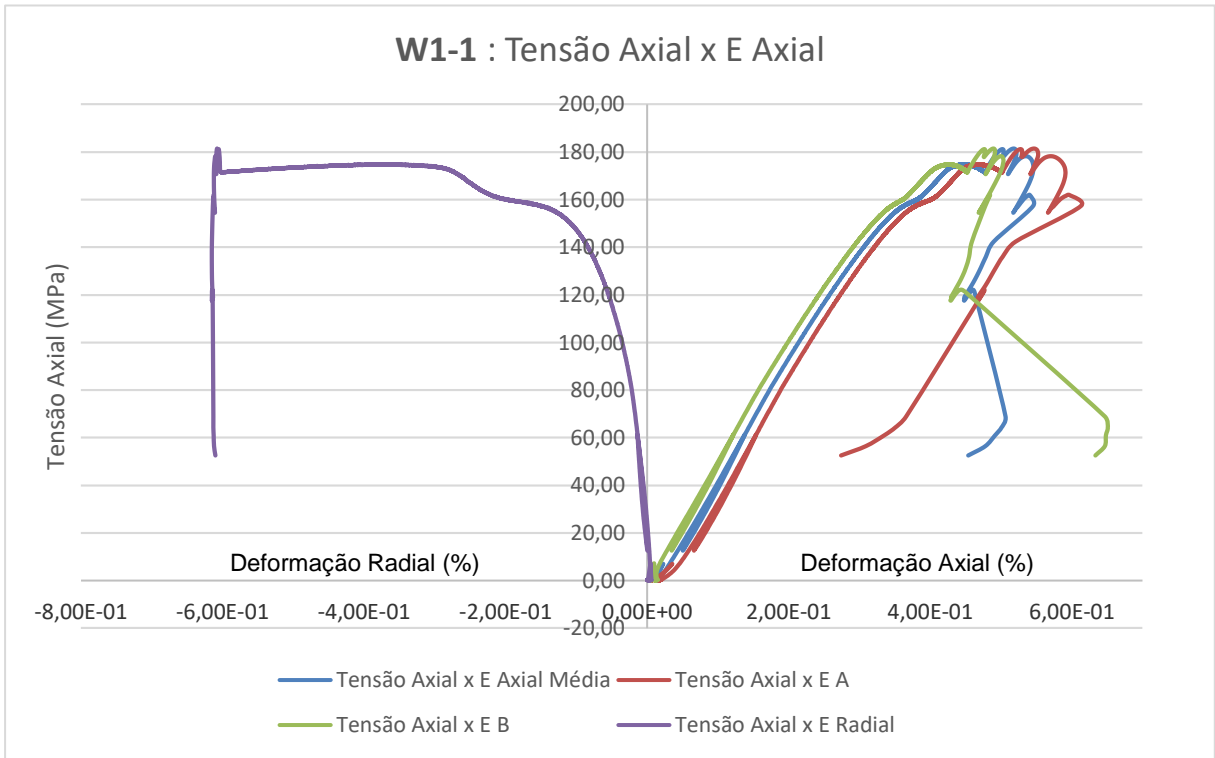
**Figura 39:** Rompimento do W3-13 na tensão confinante de 15 MPa e tensão desviadora de 200,20 MPa.

## 5.2 TENSÃO DESVIADORA x DEFORMAÇÃO AXIAL

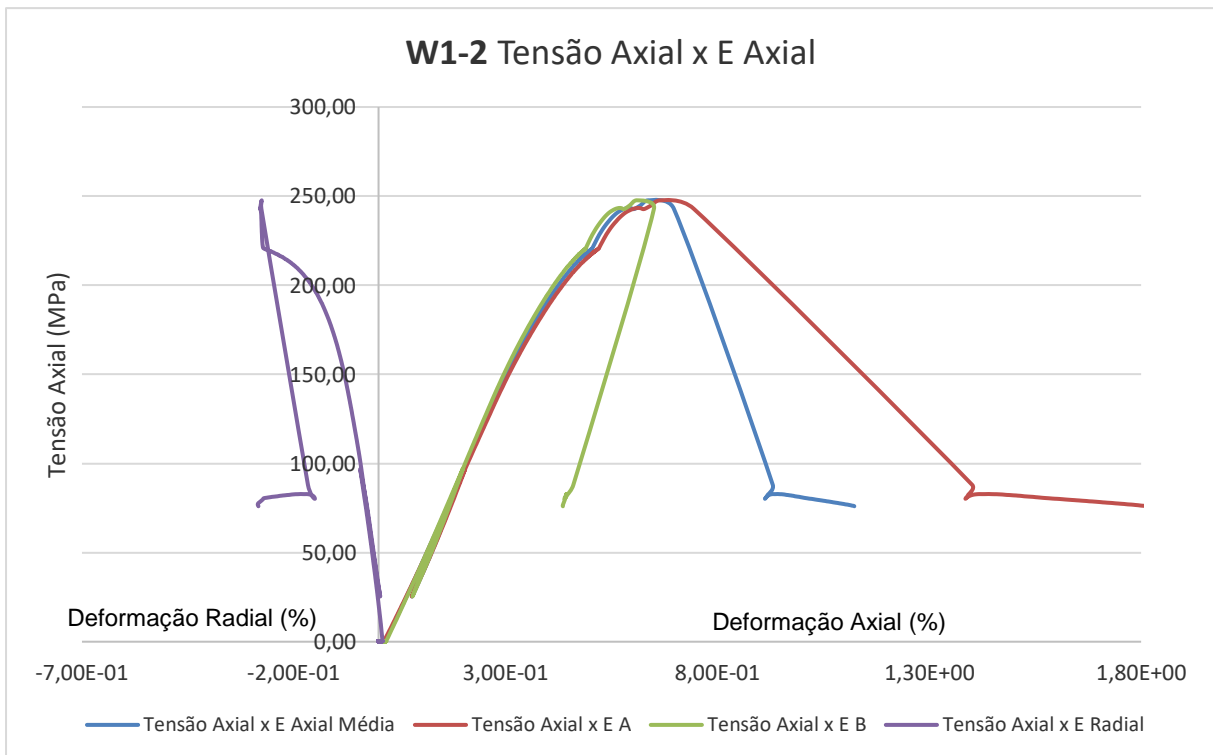
Durante o carregamento medem-se, a diversos intervalos de tempo, o acréscimo de tensão axial que está atuando e o deslocamento vertical do corpo de prova ( $\Delta v$ ). A correspondente deformação específica vertical é obtida dividindo o deslocamento pela altura inicial do corpo de prova, a medida em que evolui as tensões desviadoras, o que permite traçar a curva tensão x deformação para o ensaio. As tensões desviadoras representadas em gráfico, em função da deformação específica, evidenciam o valor máximo que corresponde à ruptura. Os gráficos 1 a 9 demonstram as curvas Tensão desviadora x deformação axial obtidas nos níveis W1, W2 e W3.

Segundo FIORI (2014), as rochas apresentam um comportamento padrão em seu gráfico de tensão vs. deformação ocorrendo três fases: o campo elástico, o campo plástico e o ponto de máxima resistência ou ponto de ruptura. A curva tensão vs. deformação tende a ser mais inclinada e apresenta um comportamento mais ou menos linear, demonstrando que a aplicação de tensão é correspondida por uma deformação do material no campo elástico. A principal característica da rocha é a sua capacidade de finalizar o carregamento, ocorrer a recuperação de sua forma e volume inicial.

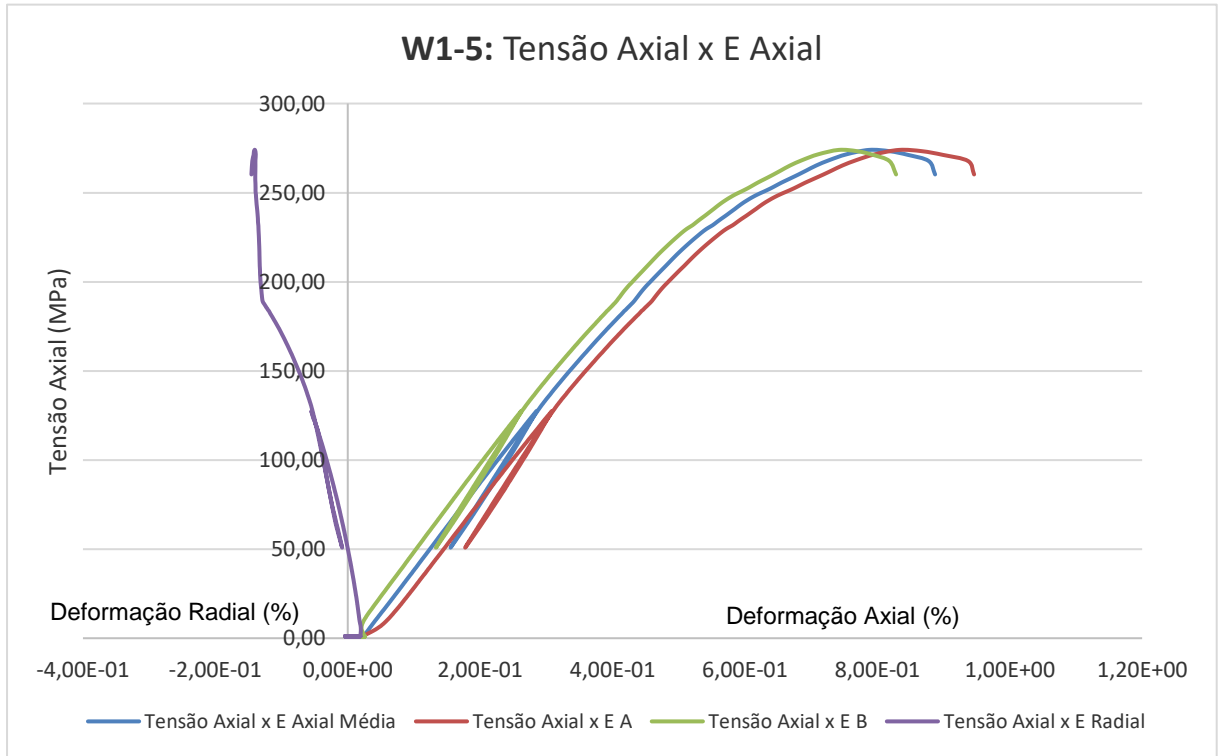
De acordo com JAQUES (2019) as rochas podem apresentar dois tipos característicos de comportamento, frágil ou dúctil, podendo ser verificada nas características da curva tensão vs. deformação no pós pico. Se a curva demonstrar um incremento de deformação à medida que a tensão diminui havendo uma resistência residual, então o pós pico é denominado Classe I e, por sua natureza, a rocha tem um comportamento dúctil ao ser carregada axialmente. Se, por outro lado, a deformação diminui ou cessa totalmente após a ruptura com uma grande diminuição da tensão, então trata-se de um material Classe II, indicando que a rocha tende a apresentar um comportamento frágil no carregamento axial. Por isso, é importante, ao se conhecer o comportamento (frágil ou dúctil) esperado para a rocha, realizar a instrumentação e controle corretos no teste, visando alcançar a curva tensão vs. deformação no pós pico.



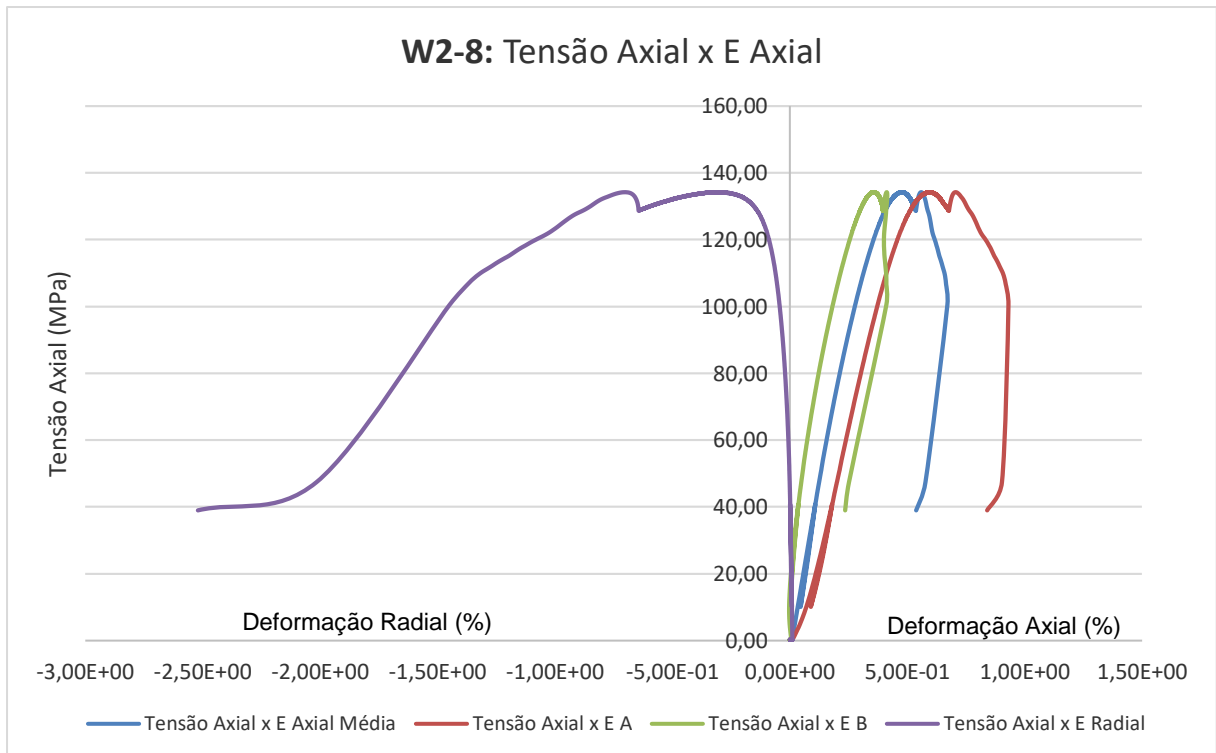
**Gráfico 1:** Tensão desviadora x deformação axial para W1-1.



**Gráfico 2:** Tensão desviadora x deformação axial para W1-2.

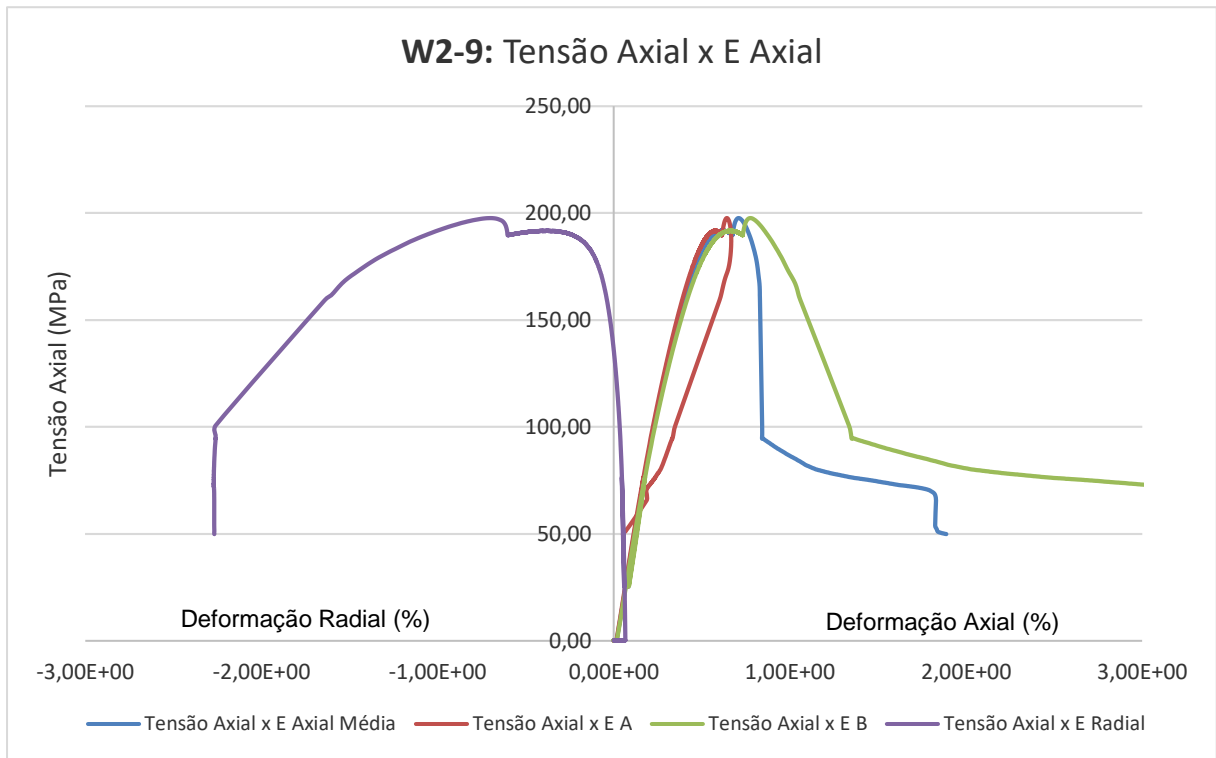


**Gráfico 3:** Tensão desviadora x deformação axial para W1-5.

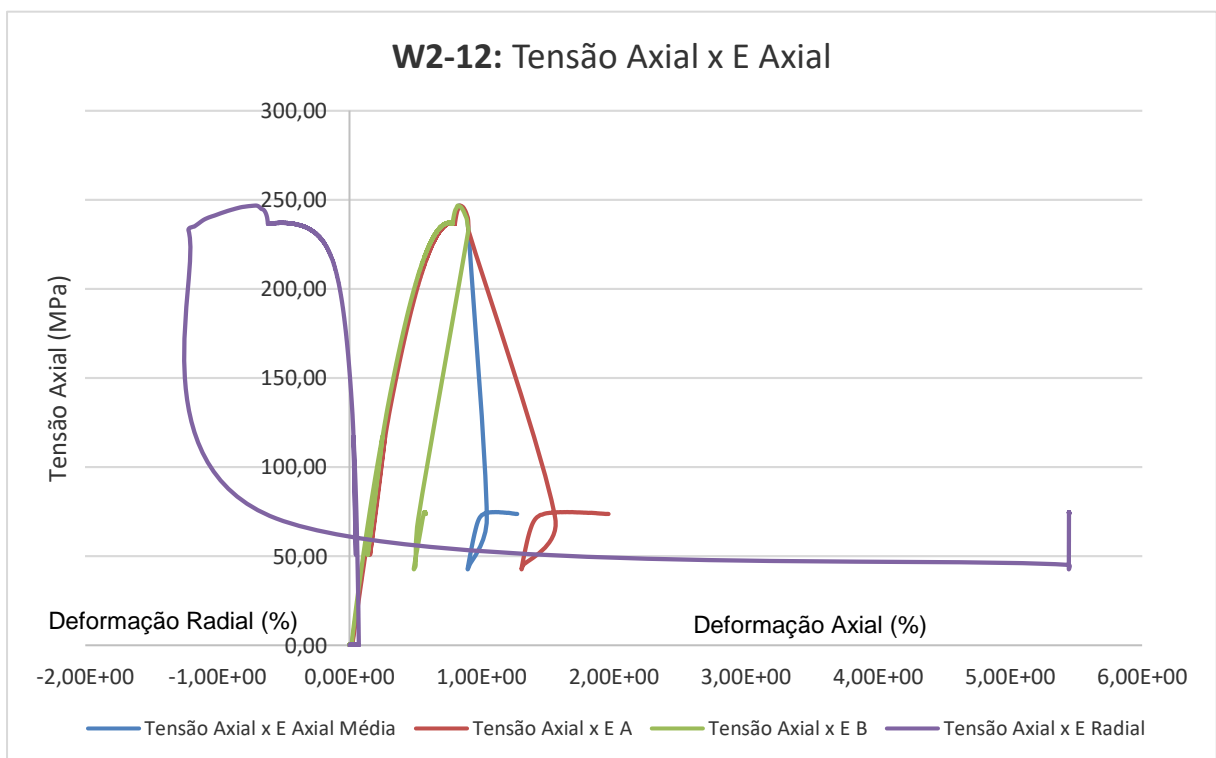


**Gráfico 4:** Tensão desviadora x deformação axial para W2-8.

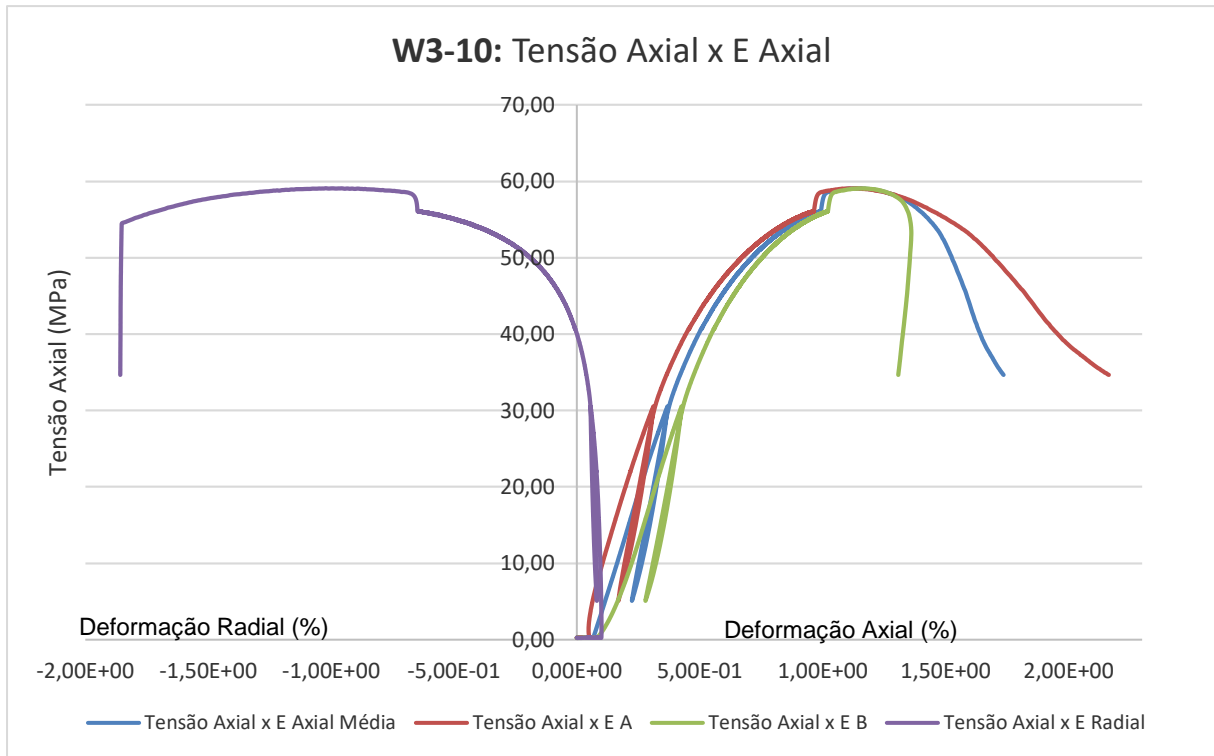




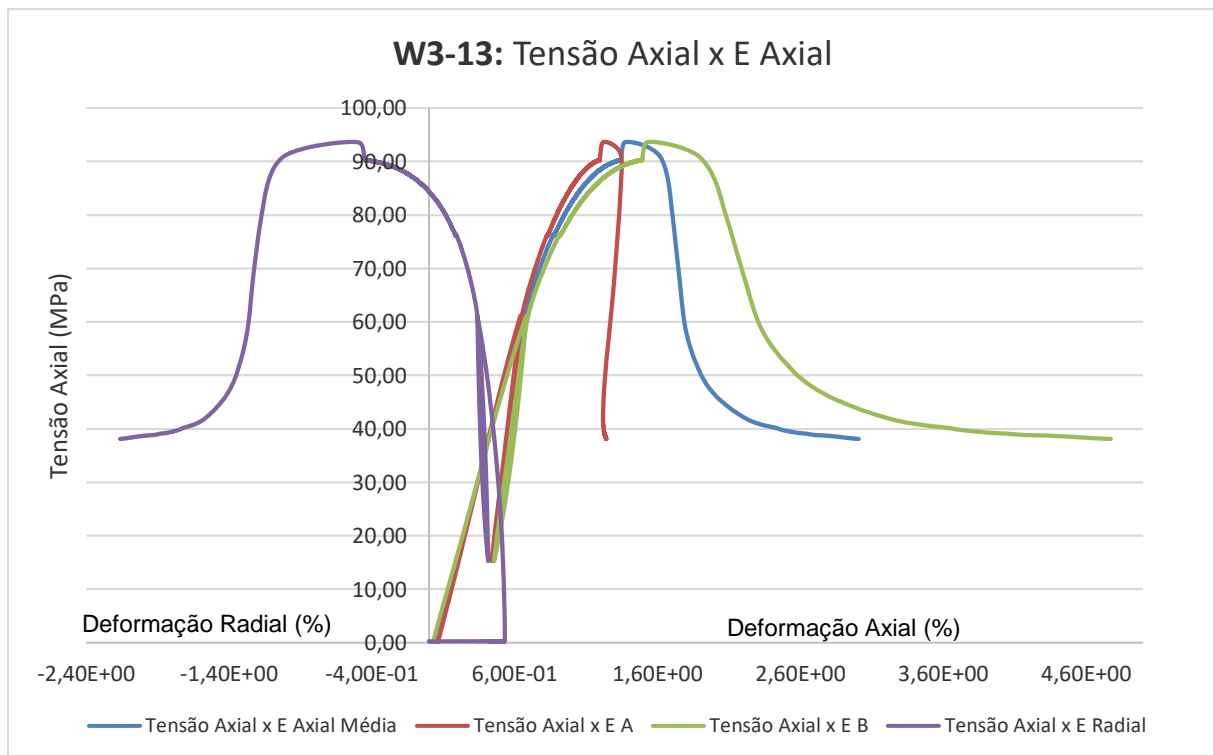
**Gráfico 5:** Tensão desviadora x deformação axial para W2-9.



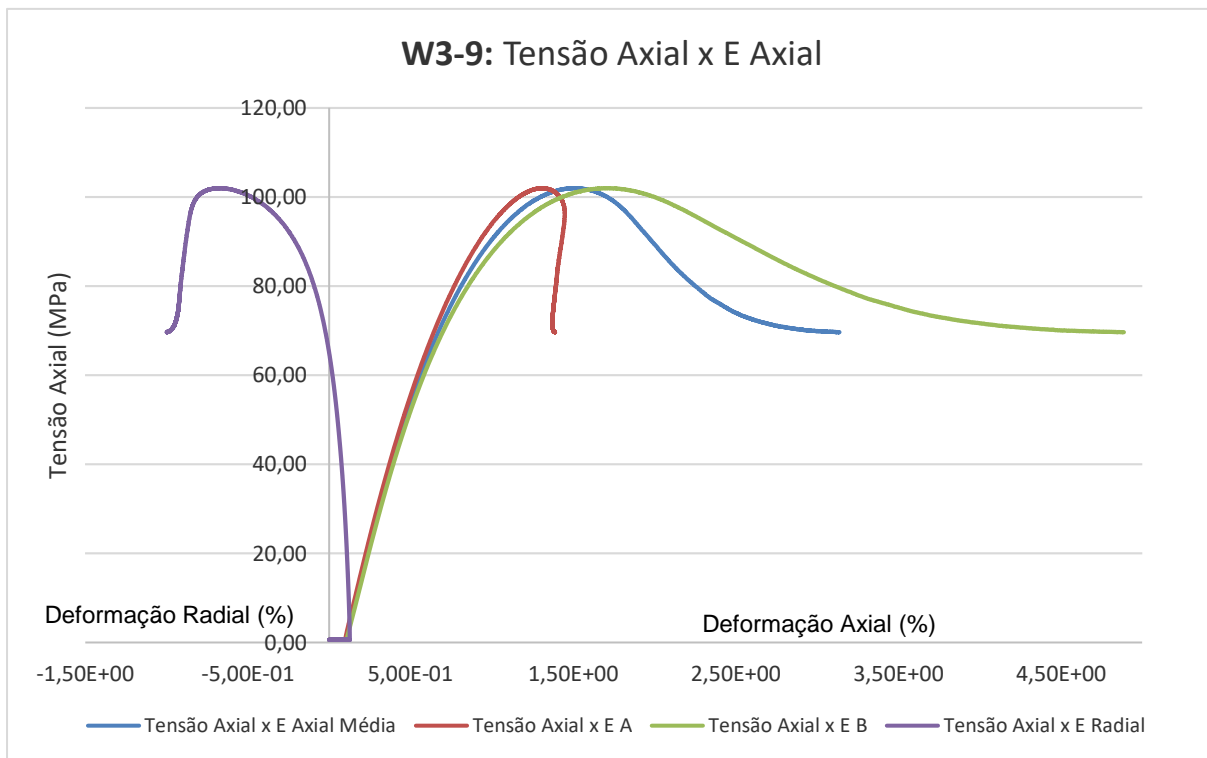
**Gráfico 6:** Tensão desviadora x deformação axial para W2-12.



**Gráfico 7:** Tensão desviadora x deformação axial para W3-10.



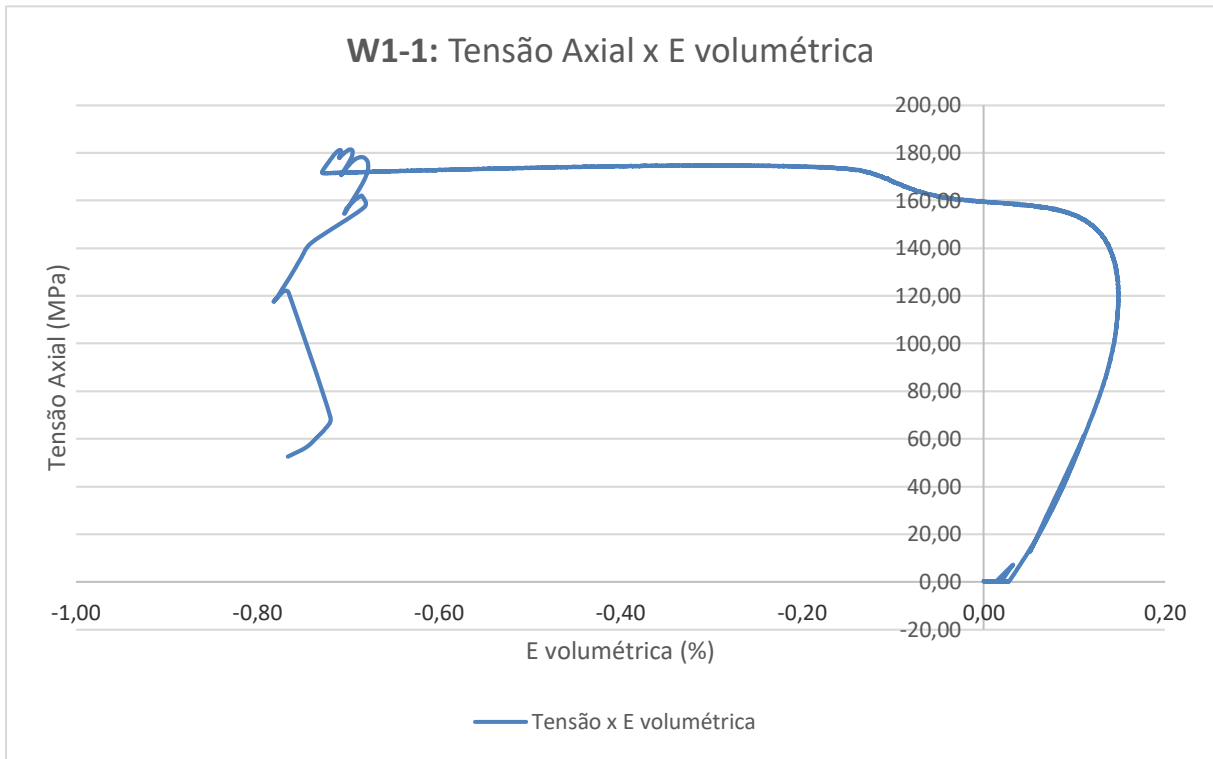
**Gráfico 8:** Tensão desviadora x deformação axial para W3-13.



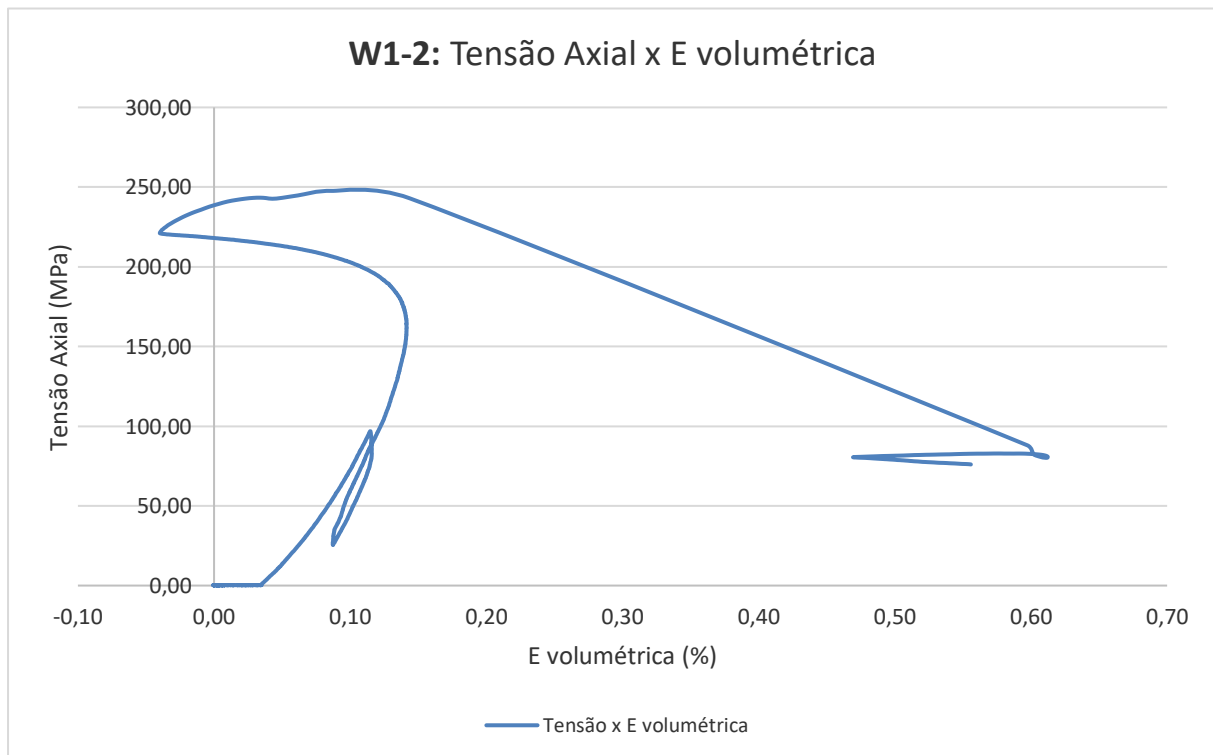
**Gráfico 9:** Tensão desviadora x deformação axial para W3-9.

### 5.3 DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA x DEFORMAÇÃO AXIAL

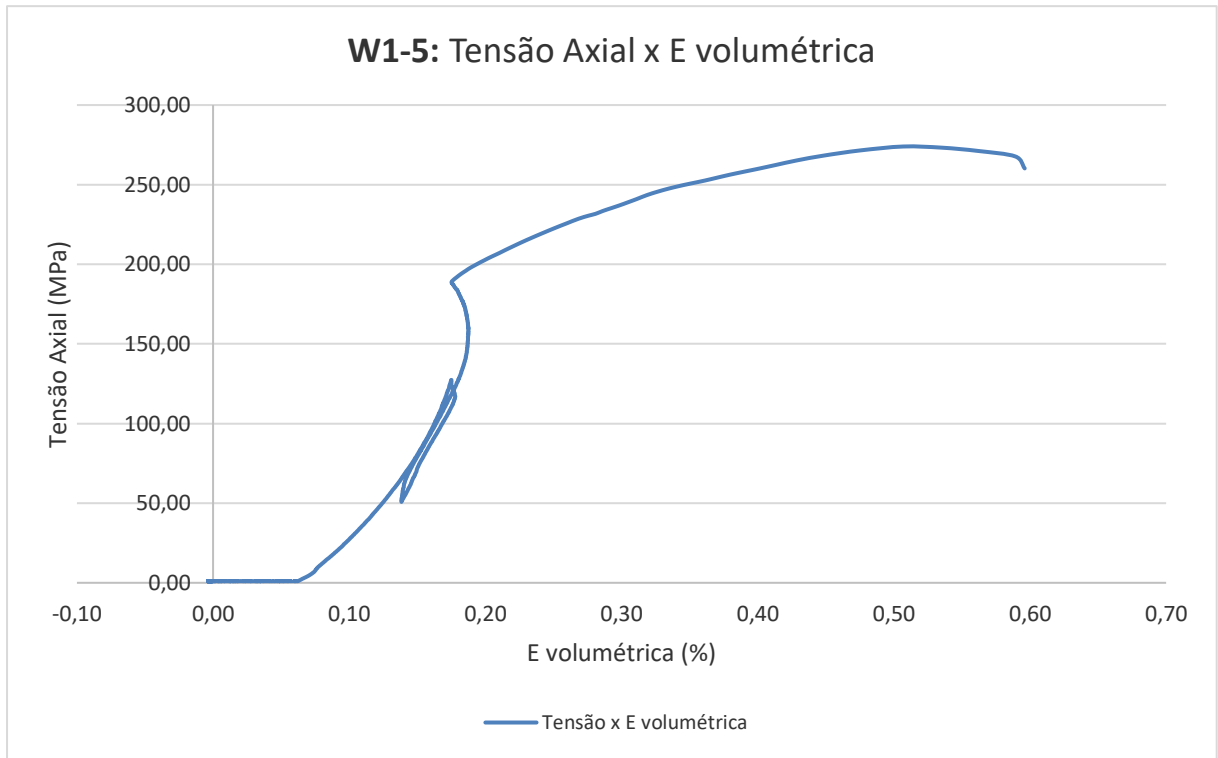
Os Gráficos 10 a 18 demonstram as curvas da deformação volumétrica x deformação axial obtidas nos níveis W1, W2 e W3.



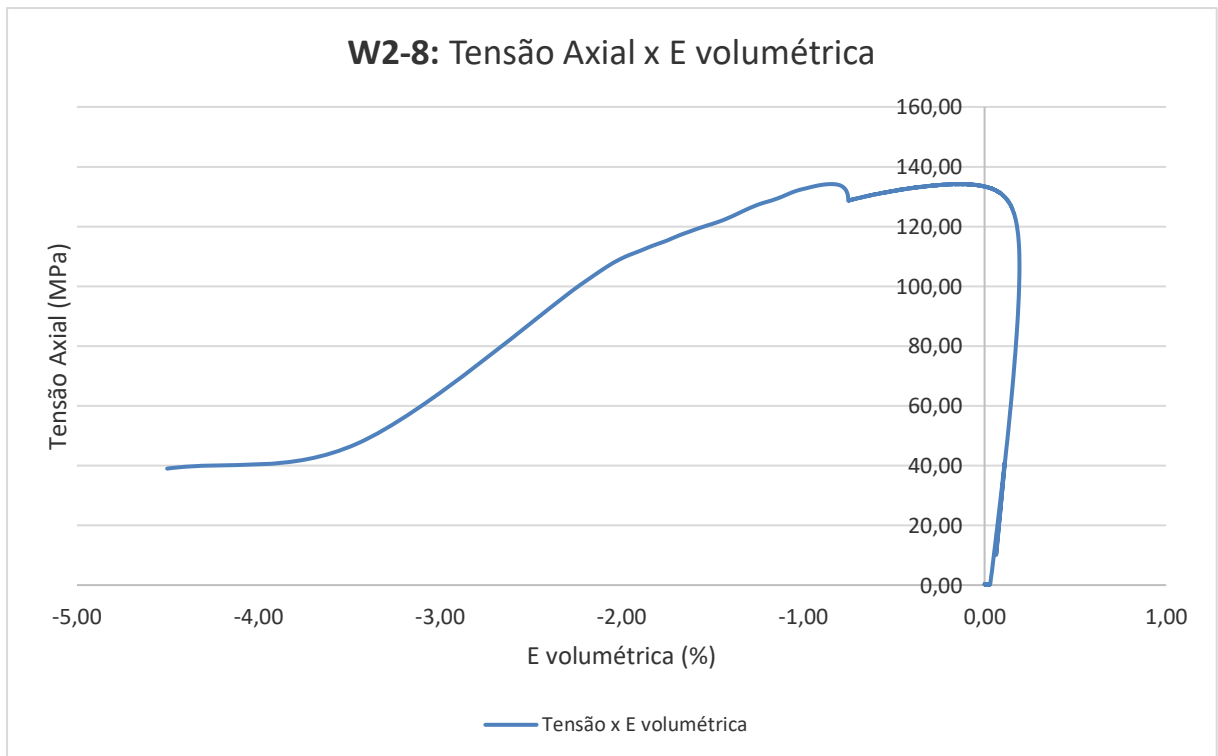
**Gráfico 10:** Deformação volumétrica x deformação axial para W1-1.



**Gráfico 11:** Deformação volumétrica x deformação axial para W1-2.

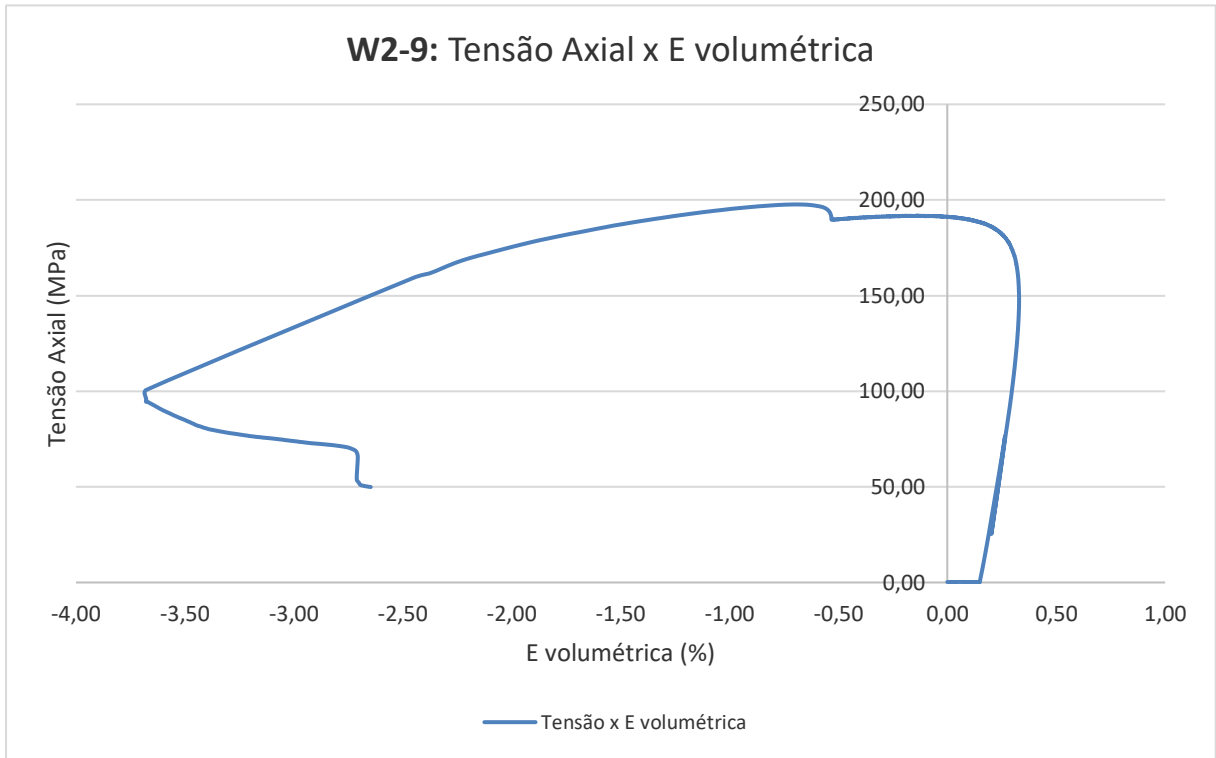


**Gráfico 12:** Deformação volumétrica x deformação axial para W1-5.

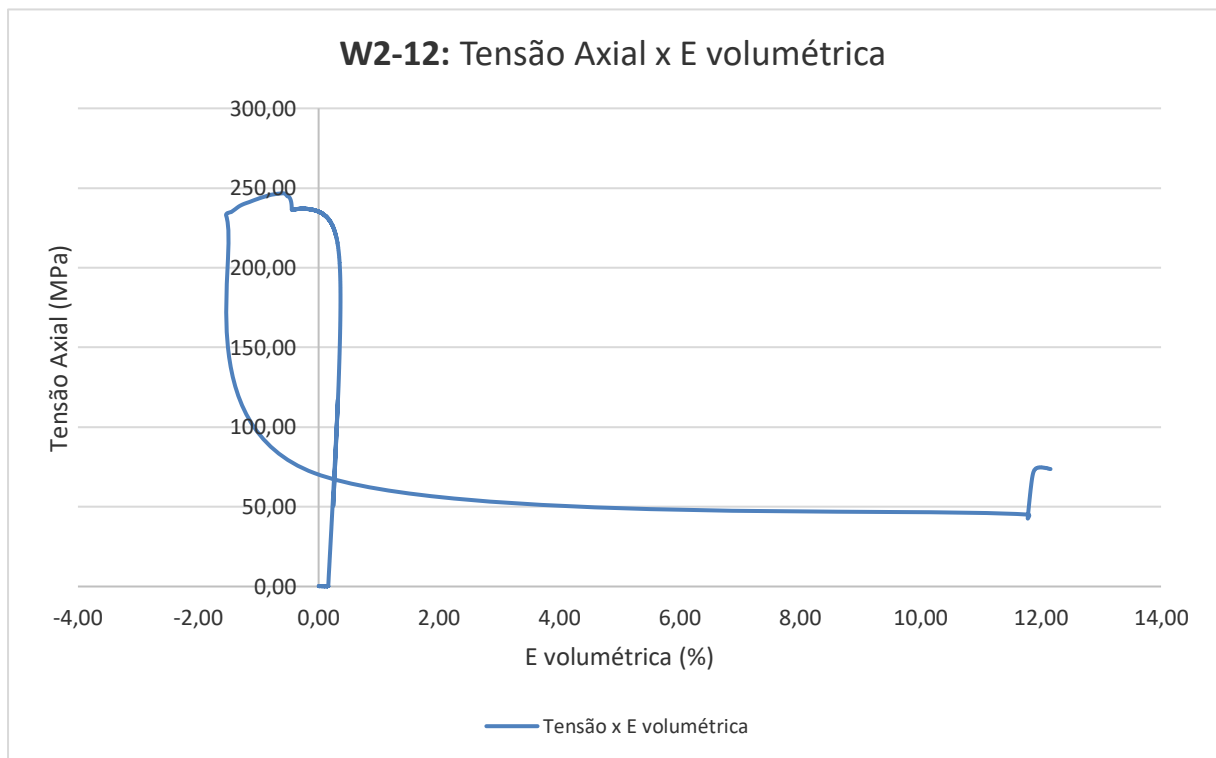


**Gráfico 13:** Deformação volumétrica x deformação axial para W2-8.

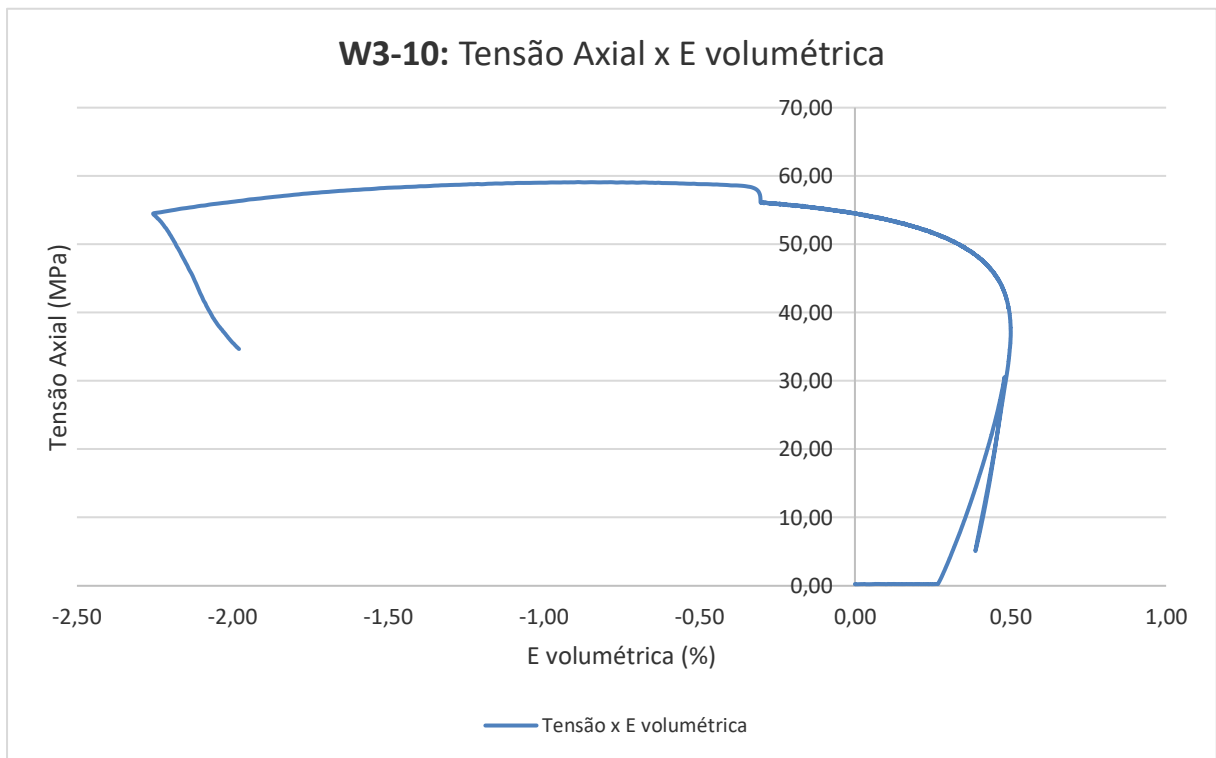




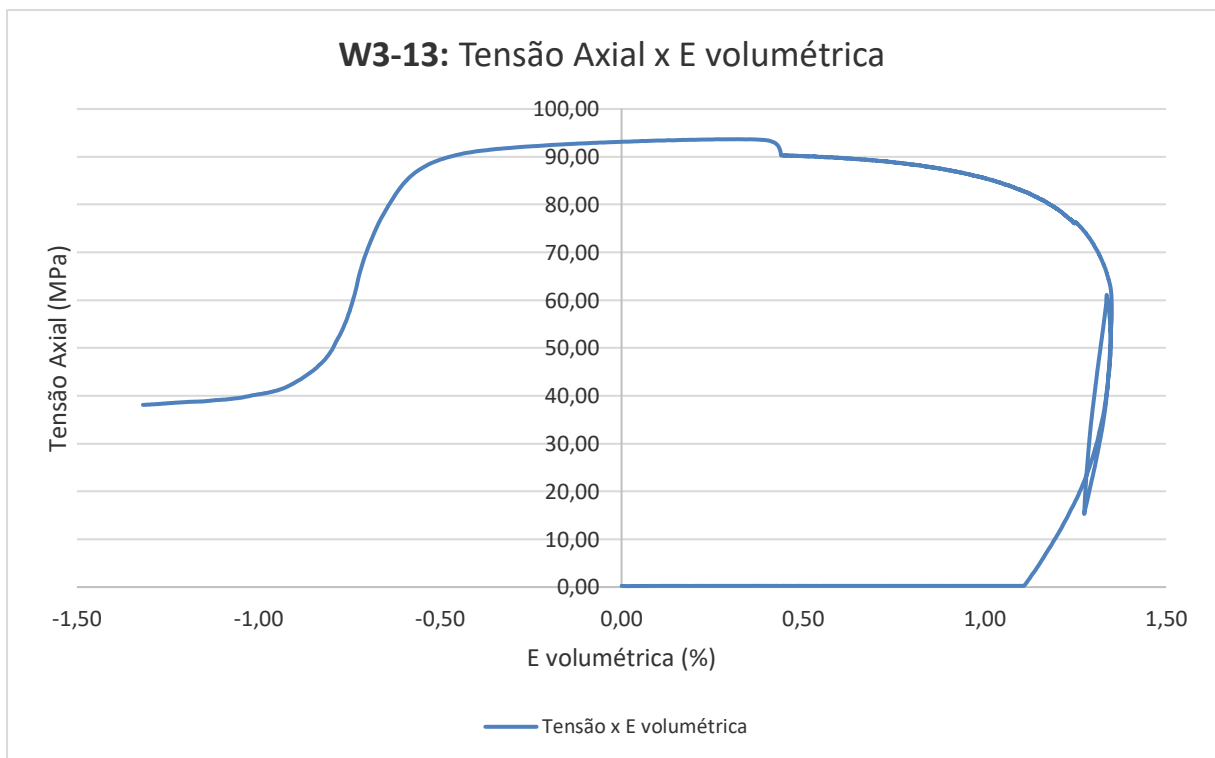
**Gráfico 14:** Deformação volumétrica x deformação axial para W2-9.



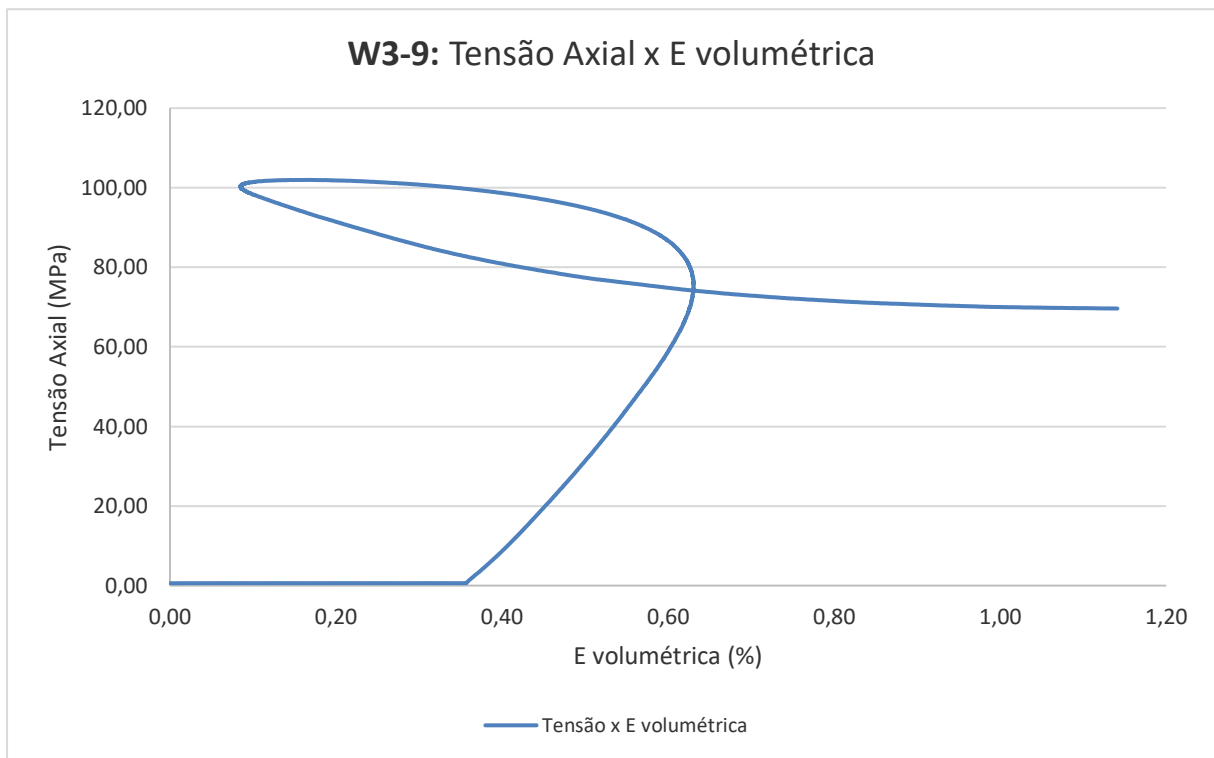
**Gráfico 15:** Deformação volumétrica x deformação axial para W2-12.



**Gráfico 16:** Deformação volumétrica x deformação axial para W3-10.



**Gráfico 17:** Deformação volumétrica x deformação axial para W3-13.



**Gráfico 18:** Deformação volumétrica x deformação axial para W3-9.

#### 5.4 COMPRESSÃO TRIAXIAL x UNIAXIAL

JAQUES (2019) realizou ensaios de compressão uniaxial para as mesmas amostras de granitos estudadas neste trabalho, sendo de grande utilidade para efeito comparativo das propriedades geomecânicas desta rocha. A Tabela 11 correlaciona os valores de resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e a tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) obtida neste trabalho.

**Tabela 11:** Correlação compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e tensão desviadora ( $\sigma_d$ )

|    | $\sigma_c$ (MPa) | $\sigma_d$ (MPa) |
|----|------------------|------------------|
|    | <b>Méd.</b>      | <b>Méd.</b>      |
| W1 | 160.58           | 460,14           |
| W2 | 98.10            | 231,99           |
| W3 | 30.48            | 166,72           |

Fonte: adaptado de JAQUES (2019).

Podemos observar que para os ensaios triaxiais a tensão desviadora varia pouco entre os níveis W1 e W2, mas quando se atinge o nível de intemperismo W3 a rocha se rompe com

muito mais facilidade, devido a sua baixa resistência. Assim, o valor da tensão desviadora decresce com o aumento do intemperismo. Segundo JAQUES (2019) a resistência à compressão uniaxial foi a que apresentou maior variação com o intemperismo, principalmente entre os níveis iniciais, W1 e W2, o que permite concluir que esta propriedade é fortemente influenciada pelo intemperismo. O valor de  $\sigma_c$  decresce com o aumento do grau de intemperismo.

Segundo ERSOY e ACAR (2016), no caso do granito estudado, o seu comportamento mecânico era mais influenciado pela textura da rocha do que pela sua composição mineralógica. De acordo estes autores, ainda que quartzo e feldspatos alcalinos fossem individualmente competentes fisicamente, devido à sua dureza e resistência ao intemperismo, o aumento no percentual de ocorrência destes minerais entre amostras de um mesmo litotipo pode aumentar parcialmente a resistência da rocha.

De acordo com JAQUES (2019), contrariando a expectativa de ERSOY e ACAR (2016), o aumento do teor de quartzo e redução de plagioclásio, não implicou igualmente no aumento da resistência da rocha.

ERSOY e ACAR (2016), constataram também que a textura equigranular do granito estudado, acabou por reduzir a resistência da rocha por uma razão simples e coerente. Os minerais em uma rocha equigranular tem tamanhos mais ou menos parecidos, porém cada mineral apresenta uma resistência (dureza) diferente e, ao receber a tensão aplicada esta também tenderá a se distribuir de maneira mais ou menos igual, o que acaba por fazer com que a resistência da rocha seja controlada pelos minerais menos resistentes, ou seja, o elo mais fraco da matriz.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa uma caracterização de perfis de intemperismo quanto à sua característica geomecânica de sua matriz permitiu produzir um referencial para os granitos da região de Cachoeiro do Itapemirim, principalmente utilizando os resultados dos ensaios de compressão triaxiais necessários para complementar a tese de doutorado de JAQUES (2019). As principais conclusões são descritas a seguir:

- 1) A resistência à compressão triaxial para o granito caracteriza a competência de sua matriz enquanto material na condição sã para a engenharia, tendo em vista que não apresenta grande influência de descontinuidades nesta escala. A tensão varia pouco entre os níveis W1 e W2, se rompendo com muito mais facilidade no W3.
- 2) Com base em outros estudos envolvendo este projeto, o comportamento mecânico do granito estudado era mais influenciado pela textura da rocha do que pela sua composição mineralógica. O aumento do teor de quartzo e redução de plagioclásio, não implicou igualmente no aumento da resistência da rocha. A textura equigranular do granito estudado, acabou por reduzir a resistência da rocha por uma razão simples e coerente.
- 3) Os resultados obtidos neste trabalho servem de *background* para futuras pesquisas acadêmicas, obras de engenharia e mineração. É importante que se realizem mais ensaios de compressão triaxial, principalmente nos níveis de intemperismo que demonstraram dificuldade na confecção dos corpos-de-prova, Assim iremos obter um resultado completo dos perfis de alteração dos granitos, podendo ser úteis economicamente para a indústria de rochas ornamentais no município de Cachoeiro de Itapemirim – ES.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAD, S.V.A.N.K. *et al.* **Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design.** *Engineering Geology*, v. 200. 2016.
- Alavi Nezhad Khalil Abad, S.V., Mohamad, E.T., and Komoo, I. (2014). **Dominant weathering profiles of granite in southern Peninsular Malaysia.** *Engineering Geology* 183, 208–215.
- ALKMIM, F.F., PEDROSA-SOARES, A.C., ... CRUZ, S.C. P., 2013. **Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo ocidental.**
- ALMEIDA, F. F. M. **O Cráton do São Francisco.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 349–364, 1977.
- ALMEIDA, F.F.M de “**O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco**”. In: Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais, v.1, Salvador, 1979. Anais..., Salvador, Soc. Bras. De Geol./Coord. Prod. Min., 1981. P. 1-10.
- CERYAN, S., TUDES, S., and CERYAN, N. (2008). **A new quantitative weathering classification for igneous rocks.** *Environmental Geology* 55, 1319–1336.
- DEARMAN, W. R. State of weathering: the search for a rational approach. **Engineering Geology Special Publication**, v.2, 1986.
- DEARMAN, W. R.; BAYNES, F. J.; IRFAN, T. Y. Engineering grading of weathered granite. **Engineering Geology**, v. 12, p. 345-374, 1978.
- DEARMAN, W.R.; BAYNES, F.J.; IRFAN, T.Y. **Engineering Grading of Weathered Granite.** *Engineering Geology*, v. 12. 1976.
- DEARMAN, W.R. **Weathering Classification in the Characterisation of Rock for Engineering Purpose in British Practice.** *Engineering Geology*, n. 9. 1974.
- DEERE D.U., HENDRON A.J., PATTON F.D., CORDING E.J. **Design of surface and near surface construction in rock** *Proceedings of the 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics.* Failure and Breakage of Rock, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York. 1967
- DEWANDEL, B. *et al.* **A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering.** *Journal of Hydrology*, v. 330. 2016.
- ERSOY, H.; ACAR, S. **Influences of petrographic and textural properties on the strength of very strong granitic rocks.** *Environmental Earth Science*, v. 75, 2016
- HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A.C., ... JANASI, V.de A., 2004. **Província Mantiqueira. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida** 203–234.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY (IAEG). **Rock and Soil Description and Classification for Engineering Geology Mapping.** 1981.
- ISRM (1972): **Suggested methods of determining the point load strength index.** ISRM Committee on Laboratory Tests.

JQUES, D. **Caracterização morfológica, mineralógica e geomecânica de perfis de intemperismo de rochas graníticas em clima tropical.**2019.137f. Tese de Doutorado (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019 [Orientador: Prof.Dr. Eduardo Antonio Gomes Marques]

LITTLE, A. L. Laterites. **Proc. Asian Reg. Conf. Soil Mech. Found Engng**, 3rd Haifa, n.2, p. 61-71, 1967.

LITTLE, A. L. **The engineering classification of residual tropical soils.** Proc. Intern. Conf. Soil Mech. & Found. Engng, 7th Mexico, n.1, p. 1-10, 1969.

NEWBERY, J. Engineering geology in the investigation and construction of the Batang Padang hydroelectric scheme, Malaysia. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 3, p. 151-181, 1971.

MESQUITA, G. N.C. **Condicionantes Geológicos Relacionados à Alteração das Propriedades Petrográficas nos Granitos do Município de Cachoeiro de Itapemirim – ES.** 2019.74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2019 [Orientador: Prof.Dr. Eurípedes do Amaral Vargas Jr]

MOMENI, A.A., KHANLARI, G.R., HEIDARI, M., SEPAHI, A.A., and BAZVAND, E. (2015). **New engineering geological weathering classifications for granitoid rocks.** Engineering Geology 185, 43–51.

MOYE, D. **Engineering Geology for the Snowy Mountais Scheme.** Engineering Geology. 1955.

OLIVEIRA & BRITO. **Geologia de Engenharia.** ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia). 1998.

OLLIER, C.D. **Very deep weathering and related landslides.** Engineering Geology Special Publications, v.23. 2010.

RUXTON, B.P.; BERRY, L. **Weathering of Granite and Associated Erosional Features in Hong Kong.** Bulletin of the Geological Society of America, v. 68. 1957

VARGAS Jr., E. A.; NUNES, A. L. L. S. **Noções de mecânica das rochas**, Rio de Janeiro: PUC/RJ, 1992.191 p (Notas de aula).

VASCONCELLOS, V.K. (2011). Instituto de Geociências **“APLICAÇÃO DO MODELO ELASTOPLÁSTICO DE LADE KIM A UM PERFIL DE INTEMPERISMO DE LEPTINITO”** Tese de Doutorado Vanessa Kfuri Vasconcelos.

VIEIRA, V.S. **Programa de Levantamento Geológicos Básicos do Brasil;** Projeto Cachoeiro de Itapemirim; Carta Geológica, Carta Metalogenética/Previsional, Folha Cachoeiro de Itapemirim SF.24-V-A, Escala 1:250.000, Estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Minas gerais, DNPM/CPRM 1997.

WIEDEMANN-LEONARDOS C. M., LUDKA I. P., DE MEDEIROS S. R., MENDES J. C., COSTA-DE-MOURA J. **Arquitetura de Plútons Zonados da Faixa Araçuaí-Ribeira.** geonomos.v8i1.145 2001.