

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

DANIEL SILVA JAQUES

**CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA, MINERALÓGICA E GEOMECÂNICA DE
PERFIS DE INTEMPERISMO DE ROCHAS GRANÍTICAS EM CLIMA TROPICAL**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

DANIEL SILVA JAQUES

**CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA, MINERALÓGICA E GEOMECÂNICA DE
PERFIS DE INTEMPERISMO DE ROCHAS GRANÍTICAS EM CLIMA TROPICAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil para obtenção do
título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2019**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Jaques, Daniel Silva, 1985-

J36c
2019

Caracterização morfológica, mineralógica e geomecânica de perfis de intemperismo de rochas graníticas em clima tropical / Daniel Silva Jaques. – Viçosa, MG, 2019.

137 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 132-137.

1. Mecânica de rochas. 2. Sienogranito. 3. Intemperismo. 4. Trópicos - Clima. 5. Corestones. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

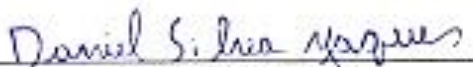
CDD 22. ed. 624.15132

DANIEL SILVA JAQUES

**CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA, MINERALÓGICA E GEOMECÂNICA DE
PERFIS DE INTEMPERISMO DE ROCHAS GRANÍTICAS EM CLIMA TROPICAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de julho de 2019.


Daniel Silva Jaques


Eduardo Antonio Gomes Marques
(Orientador)

RESUMO

JAQUES, Daniel Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019. **Caracterização morfológica, mineralógica e geomecânica de perfis de intemperismo de rochas graníticas em clima tropical.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Diferentes projetos de engenharia podem vir a ser desenvolvidos em zonas de transição dos materiais rochosos os quais, em função do intemperismo, podem apresentar grande variação de suas propriedades devendo estas serem detalhadamente investigadas e consideradas pelo engenheiro. Neste sentido, considerando ser a região de Cachoeiro do Itapemirim, no sudeste brasileiro, uma área com grande influência do intemperismo sobre os maciços rochosos graníticos que em sua maioria lá ocorrem, a presente pesquisa propôs-se a detalhar perfis de intemperismo de um sienogranito, por meio de sua completa caracterização a qual compreendeu a interpretação e descrição da sua morfologia, bem como dos seus processos evolutivos predominantes, suas características petrográficas e o estudo sobre a variação das suas propriedades de engenharia em função da variação do grau de intemperismo da matriz rochosa. Foram realizados levantamentos de campo para caracterização, descrição morfológica e coleta de amostras da rocha intacta de cinco perfis de intemperismo de sienogranito, nas imediações do município de Cachoeiro do Itapemirim, todos condicionados à agentes intempéricos predominantemente controlados pelo clima tropical brasileiro. Os resultados demonstram que as discontinuidades e a dinâmica de denudação do relevo, condicionada à geomorfologia e ao clima tropical, são os principais controladores, em escala de maciço, do intemperismo nos perfis avaliados, produzindo como feição mais marcante os *corestones* envoltos por solo residual. Em nível de matriz, a descrição de lâminas petrográficas da rocha em seus diferentes níveis de intemperismo aponta as microfissuras e a alteração química dos minerais como os principais controladores da decomposição e desfragmentação da rocha. Os testes de laboratório mostram que o sienogranito na condição de rocha sã é muito competente enquanto material de engenharia, porém, à medida que avança o intemperismo sobre a matriz, perde consideravelmente esta capacidade apresentando grande variabilidade em suas propriedades de engenharia, sobretudo em sua porosidade e sua resistência à compressão uniaxial com a primeira aumentando 51 vezes e a segunda diminuindo 99.0 % entre a condição sã e a rocha extremamente intemperizada. A partir dos dados de caracterização das propriedades de engenharia foram propostas correlações para o sienogranito sendo estas, em geral, bastante significativas, com o coeficiente de correlação

(R2) variando entre 0.88 e 0.99. Correlações apresentadas por outros autores em pesquisas com rochas graníticas foram testadas quanto à sua aplicabilidade para estimar os valores das propriedades do sienogranito e os resultados foram classificados demonstrando que 65 % destas correlações não se aplicam muito bem ao sienogranito, de acordo com o critério adotado.

Palavras-chave: Sienogranito. Perfil de intemperismo. Corestones. Clima tropical. Propriedades Geomecânicas.

ABSTRACT

JAIQUES, Daniel Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2019. **Morphological, mineralogical and geomechanical characterization of weathering profiles of granitic rocks in tropical climate.** Adviser: Eduardo Antonio Gomes Marques.

Different engineering projects can be developed in the transition zones of rock materials. As the properties of these areas can present great variations due to weathering, they should be thoroughly investigated by engineers. Considering the region of Cachoeiro de Itapemirim, in the southeast of Brazil, contains granitic rock masses with great influence from weathering, this present research aimed to investigate the weathering profiles of a syenogranite rock, through its complete characterization. This includes discussion and the description of its morphology, as well as its dominant evolutionary processes, its petrographic characteristics and the study of the variation in its engineering properties as a result of the different degrees of weathering of the rock matrix. Field surveys were carried out for characterization, morphological description and sampling of intact rock of five weathering profiles of syenogranite rock in the Cachoeiro de Itapemirim region, under the Brazilian tropical climate. The results showed that the discontinuities and the denudation dynamics of the relief are influenced by the geomorphology and the tropical climate. These include the main massive scale controllers of weathering in the evaluated profiles, which leads to the production of corestones surrounded by residual soil. At the matrix level, the description of rock petrographic slides at their different degrees of weathering showed that the microcracks and chemical changes of the minerals are the main controllers of the rock decomposition and defragmentation. Laboratory tests showed that the fresh syenogranite rock has great use as engineering material. However, it can considerably lose this ability as a result of the variation in its engineering properties caused by the progression of the weathering on the matrix. The main variations in its properties were mainly shown by porosity levels being 51 times higher and a decrease in uniaxial compressive strength of 99% from the healthy rock to the highly weathered one. Correlations between the engineering properties of the syenogranite rock were performed and were generally very significant, presenting correlation coefficients (R_2) ranging from 0.88 to 0.99. The correlations reported by other authors on the study of granitic rocks were tested for their applicability to estimate the values of syenogranite rock properties. The results showed that 65% of these correlations do not apply very well to the syenogranite rock, according to the criteria adopted.

Keywords: Syenogranite. Weathering Profile. Corestone. Tropical Climate. Geomechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 - Perfil de intemperismo típico em granitos de regiões tropicais..... | 21 |
| Figura 2 - a) blocos confeccionados manualmente e pintados com padrão para aplicação da metodologia DIC; b) arranjo do ensaio de compressão uniaxial com filmagem para aplicação de DIC; d) arranjo do ensaio brasileiro de tração indireta; e) instrumentação de corpo-de-prova com extensômetros axiais e circunferencial para medida de deformação em ensaio de compressão uniaxial. | 51 |
| Figura 3 - Localização de Cachoeiro de Itapemirim e dos perfis de intemperismo (P1, P2, P3, P4 e P5) ora investigados, em relação ao contexto litológico | 54 |
| Figura 4 - Aspecto geral do perfil 1, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha). | 58 |
| Figura 5 - Aspecto geral do perfil 2, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha). | 59 |
| Figura 6 - Aspecto geral do perfil 3, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha). | 60 |
| Figura 7 - Aspecto geral do perfil 4, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha). | 61 |
| Figura 8 - Aspecto geral do perfil 5, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linha branca) e demarcações das descontinuidades (linha vermelha). | 622 |
| Figura 9 - Aspectos do corestone do perfil 3, em diferentes ângulos..... | 643 |
| Figura 10 - Camadas concêntricas de alteração esferoidal observadas no corestone do perfil 3, com visível transição gradativa. | 64 |
| Figura 11 - Valores de Imp para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo. | 73 |
| Figura 12 - Valores de Imf (%) para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo. | 75 |
| Figura 13 - Variação de Imp e Imf com o avanço do intemperismo. | 76 |
| Figura 14 - Variação da massa específica seca do sienogranito conforme o grau de intemperismo. | 799 |
| Figura 15 - Médias e faixas de valores de γ_d para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo. | 79 |
| Figura 16 – Evolução da porosidade efetiva com o aumento do intemperismo para o sienogranito. | 81 |
| Figura 17 - Médias e faixas de valores de porosidade efetiva para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo. | 82 |

| | |
|--|--------|
| Figura 18 - Variação da capacidade de absorção com o intemperismo para o sienogranito | 83 |
| Figura 19 - Variação do índice de vazios com o intemperismo no sienogranito..... | 83 |
| Figura 20 - Evolução das propriedades índice do sienogranito com o avanço do intemperismo. | 84 |
| Figura 21 - Variação dos valores de $I_{s(50)}$ de acordo com o grau de intemperismo. | 85 |
| Figura 22 - Médias e faixas de valores de $I_{s(50)}$ para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo. | 87 |
| Figura 23 - Variação de V_{PL} com o grau de intemperismo para o sienogranito..... | 88 |
| Figura 24 - Médias e faixas de valores de V_{PL} para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo. | 89 |
| Figura 25 - Relação entre as propriedades V_{PL} , n , Imp e Imf para o sienogranito. | 90 |
| Figura 26 - Médias e faixas de valores de Q para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo. | 92 |
| Figura 27 - Médias e faixas de valores de Q para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo. | 92 |
| Figura 28 - Variação dos valores de σ_c para o sienogranito, por grau de intemperismo. | 95 |
| Figura 29 - Comparação e relação entre σ_c e outras propriedades do sienogranito..... | 98 |
| Figura 30 - Médias e faixas de valores de σ_c para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo. | 99 |
| Figura 31 - Variação dos valores de σ_t e da relação σ_t/σ_c para o sienogranito em seus níveis de intemperismo. | 110000 |
| Figura 32- Médias e faixas de valores de σ_t para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo. | 101 |
| Figura 33 - Aplicação do método DIC às imagens de gravação do teste de compressão uniaxial em blocos do sienogranito W4: a) mapa de deformação da superfície correlacionada pelo padrão de pintura da amostra, detalhando a propagação de microfissura; b) mapa de deformação com zonas quentes correspondendo à maior deformação; c) mapa da superfície correlacionável, em transparência, com extensômetros; d) mapa de deformação com extensômetros axiais aplicados..... | 103 |
| Figura 34 - Variação dos valores de E_m , por grau de intemperismo, para o sienogranito..... | 104 |
| Figura 35 - Médias e faixas de valores de E_m para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo. | 105 |
| Figura 36 - Variação dos valores de Poisson com o intemperismo para o sienogranito. | 107 |

| | |
|---|-------|
| Figura 37- Médias e faixas de valores de v para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo. | 1088 |
| Figura 38 - Curvas tensão vs. deformação (axial e circunferencial) para os níveis de intemperismo W1, W2 e W3 do sienogranito. | 11010 |
| Figura 39 - Curvas de correlação γ_d vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos..... | 112 |
| Figura 40 - Curvas de correlação VPL vs. γ_d para o sienogranito e outros trabalhos | 113 |
| Figura 41 - Curvas de correlação V_{PL} vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos..... | 114 |
| Figura 42 - Curvas de correlação $I_{S(50)}$ vs. V_{PL} para o sienogranito e outros trabalhos..... | 115 |
| Figura 43 - Curvas de correlação Q vs. V_{PL} para o sienogranito e outros trabalhos. | 117 |
| Figura 44 - Curvas de correlação n_e vs. Q para o sienogranito e outros trabalhos | 118 |
| Figura 45 - Curvas de correlação γ_d vs. Q para o sienogranito e outros trabalhos. | 119 |
| Figura 46 - Curvas de correlação Q vs. $I_{S(50)}$ para o sienogranito e outros trabalhos..... | 120 |
| Figura 47 - Curvas de correlação $I_{S(50)}$ vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos. | 121 |
| Figura 48 - Curvas de correlação σ_c vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos | 122 |
| Figura 49 - Curvas de correlação σ_t vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos..... | 123 |
| Figura 50 - Curvas de correlação σ_c vs. VPL para o sienogranito e outros trabalhos | 1255 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Divisão proposta por Moye (1955) para o grau de intemperismo das rochas graníticas, baseado no estudo de granitos na Austrália. | 24 |
| Tabela 2 - Classificação do grau intemperismo de acordo com o percentual de rocha maciça. (Ruxton & Berry, 1957) | 27 |
| Tabela 3 - Classificação do grau de intemperismo para rochas graníticas, modificado por Little (1969) pós Moye (1955). | 28 |
| Tabela 4 - Classificação do intemperismo quanto às alterações físicas. (Dearman, 1974)..... | 32 |
| Tabela 5 - Classificação do intemperismo quanto à decomposição química. (Dearman, 1974) | 33 |
| Tabela 6 - Classificação do intemperismo quanto à dissolução. (Dearman, 1974)..... | 33 |
| Tabela 7 - Descrição e classificação do grau de alteração da matriz. (Dearman, 1976)..... | 35 |
| Tabela 8 - Escala do grau de intemperismo do maciço rochoso. (Dearman, 1976)..... | 35 |
| Tabela 9 - Sistema de classificação do intemperismo proposto pela ISRM (1978) para maciço e matriz rochosa..... | 36 |
| Tabela 10 - Variação de algumas propriedades de engenharia com o grau de intemperismo de granitos do Porto, Portugal. (Begonha & Braga, 2002) | 39 |
| Tabela 11 - Elementos descritores do maciço e da matriz rochosa para caracterização dos perfis de intemperismo estudados..... | 44 |
| Tabela 12 - Testes de laboratório para caracterização mineralógica, física e geomecânica da matriz rochosa..... | 45 |
| Tabela 13 - Escopo da descrição das lâminas petrográficas do sienogranito em seus diferentes níveis de intemperismo..... | 46 |
| Tabela 14- Parâmetros letais estabelecidos para a condução do teste de compressão simples com medida de deformação axial e circunferencial, conforme o grau de intemperismo da rocha. | 50 |
| Tabela 15 - Enquadramento do sienogranito quanto aos níveis de intemperismo baseado na metodologia da ISRM (1978)..... | 55 |
| Tabela 16 - Cadastro de testes da matriz para simples reconhecimento e descrição do sienogranito quanto à sua coerência. | 57 |
| Tabela 17 - Descrição de cada uma das camadas de intemperismo observadas no corestone da Figura 12, localmente. | 65 |
| Tabela 18- Características dos principais elementos descritores dos perfis de intemperismo estudados, em escala de maciço. | 66 |

| | |
|--|------|
| Tabela 19 – Modal de composição mineralógica do sienogranito, em %..... | 67 |
| Tabela 20 - Descrição de aspectos petrográficos do sienogranito nos diferentes níveis de intemperismo..... | 68 |
| Tabela 21 - Valores de Índices petrográficos para o sienogranito..... | 70 |
| Tabela 22 - Valores de índices físicos avaliados para o sienogranito..... | 77 |
| Tabela 23 - Valores obtidos nos testes para determinação das propriedades-índices do sienogranito, por grau de intemperismo..... | 85 |
| Tabela 24– Propriedades de resistência do sienogranito, suas variações e quantitativo de testes realizados..... | 94 |
| Tabela 25- Valores das propriedades elásticas do sienogranito e quantitativo de testes realizados por grau de intemperismo..... | 102 |
| Tabela 26– Critério para determinação da aplicabilidade de correlações de outros trabalhos ao sienogranito..... | 125 |
| Tabela 27– Correlações obtidas e testadas para o sienogranito comm suas respectivas classificações..... | 1256 |

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 - Esquema para classificação do intemperismo, desenvolvido para testemunhos de sondagem e diversos litotipos. (The Logging..., 1970) 30
- Quadro 2 - Esquema simplificado para classificação do intemperismo, aplicável a diferentes litotipos. (The Preparation..., 1970)..... 31
- Quadro 3 - Fotos ao microscópio petrográfico, com aumento de 5 x a nicóis cruzado e descruzado, para cada grau de intemperismo do sienogranito, destacando seus constituintes minerais e estruturas verificadas, bem como processos de intemperismo. 69

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Objetivos | 16 |
| 1.2 | Justificativa | 16 |
| 2 | CARACTERIZAÇÃO DO TEMA | 18 |
| 2.1 | Intemperismo e seus Processos | 18 |
| 2.2 | Intemperismo em Granitos..... | 19 |
| 2.3 | Grau de Intemperismo – Classificações | 22 |
| 2.4 | Intemperismo e as propriedades de engenharia..... | 36 |
| 2.5 | Índices petrográficos..... | 42 |
| 3 | METODOLOGIA | 44 |
| 3.1. | Levantamentos de Campo | 44 |
| 3.2. | Testes de Laboratório | 45 |
| 3.3. | Interpretação dos resultados e correlações..... | 52 |
| 4 | LEVANTAMENTOS DE CAMPO | 53 |
| 4.1. | Área de estudo | 53 |
| 5 | CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA | 55 |
| 6 | CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA | 67 |
| 6.1. | Caracterização petrográfica..... | 67 |
| 7 | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E GEOMECÂNICA | 77 |
| 7.1. | Índices Físicos | 77 |
| 7.2. | Propriedades índice..... | 84 |
| 7.3. | Propriedades geomecânicas..... | 93 |
| 7.3.1. | <i>Propriedades de resistência</i> | 94 |
| 7.1.1. | <i>Propriedades elásticas</i> | 101 |
| 7.1.2. | <i>Comportamento Tensão vs. Deformação</i> | 108 |

| | |
|---|------------|
| 7.3. Correlação das propriedades de engenharia | 111 |
| 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 128 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 132 |

1 INTRODUÇÃO

Este projeto, desenvolvido no programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV) surgiu a partir do interesse em perfis de intemperismo de rochas graníticas e o comportamento geomecânico de sua matriz, algo que pouco vem sendo investigado no Brasil, sendo limitado o número de estudos que aprofundaram este tema, em especial em relação à rochas graníticas.

Para preencher esta lacuna e contribuir com pesquisas sobre este tema foi escolhida como área para investigação de perfis de intemperismo de um sienogranito a região do município de Cachoeiro de Itapemirim, no Espírito Santo, onde a litologia regional é dominada por rochas graníticas, e na qual encontram-se várias jazidas de rochas ornamentais destes materiais.

No início deste projeto de pesquisa acreditava-se na possibilidade de encontrar, a partir dos levantamentos de campo, perfis contínuos de intemperismo, que apresentassem todos os níveis de intemperismo e que fossem acessíveis tecnicamente para a realização dos trabalhos.

Contudo, no decorrer da investigação, logo chegou-se à conclusão de que não seria possível encontrar este perfil idealizado. Na maioria das vezes porque eles não eram contínuos e, normalmente, os contatos eram abruptos. Devido a isso, optou-se por, ainda interessado nas características morfológicas e geomecânicas destes materiais, analisar mais de um perfil de intemperismo do sienogranito, num raio de aproximadamente doze quilômetros (12 km), de uma mesma formação geológica, sendo esta escolha mais interessante pois, desta maneira, também foi possível identificar uma gama maior de variações da matriz quanto ao seu grau de intemperismo e das diferentes características morfologia dos perfis de intemperismo.

Este estudo apresenta, portanto, os resultados da caracterização morfológica dos perfis de intemperismo de sienogranito em clima tropical e uma detalhada caracterização de sua matriz quanto às suas propriedades mineralógicas, físicas e geomecânicas.

1.1 Objetivos

O presente pesquisa tem por objetivo principal a identificação e completa caracterização morfológica de perfis de intemperismo de um sienogranito e das propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas de sua matriz em diferentes níveis de intemperismo condicionados à uma região de clima tropical.

Como objetivos secundários e também necessários à integralização do primeiro, enumera-se:

- 1) Realizar uma extensa revisão bibliográfica para atualização de conceitos a respeito dos critérios para classificar as rochas, sobretudo granitos, quanto ao seu grau de intemperismo;
- 2) Comparar resultados da caracterização mineralógica, física e geomecânica do sienogranito com o observado na literatura para granitos de outras localidades pelo mundo identificando semelhanças e divergências entre estes em função de suas especificidades e condicionantes climáticos.
- 3) Estabelecer correlações entre as propriedades mineralógicas, físicas e geomecânicas para o sienogranito, em seus diferentes níveis de intemperismo;
- 4) Comparar e classificar diferentes correlações para granitos descritas na literatura quanto à sua aplicabilidade para estimar os valores das propriedades de engenharia observados para o sienogranito.

1.2 Justificativa

A escolha do tema e, portanto, deste projeto de pesquisa em nível de Doutorado, justifica-se pelas seguintes motivações:

- 1) Verificou-se, após extensa revisão bibliográfica, a baixa ocorrência deste tipo de estudo no Brasil para, especificamente, rochas graníticas de clima tropical, sobretudo no estado do Espírito Santo;
- 2) Este estudo possui, além da contribuição teórica e científica, aplicação prática, dado que muitos problemas de geologia de engenharia e geotecnia em projetos de escavação, fundações e estabilização de taludes estão relacionados à variação das propriedades físicas e mecânicas encontradas nos materiais de transição que compõem os perfis de intemperismo, quer sejam rasos ou profundos.

- 3) A região de Cachoeiro do Itapemirim possui, em seu arcabouço geológico, dominância de rochas graníticas, em diferentes níveis de intemperismo, ocorrendo em afloramentos, encostas, taludes de cortes e nas cavas de mineradoras de rochas ornamentais. Neste sentido, espera-se que os dados obtidos neste projeto de pesquisa possam ser capazes de subsidiar informações preliminares para simples reconhecimento e previsão das características destes materiais quando solicitados por algum projeto de engenharia.
- 4) Muitas correlações entre propriedades de engenharia das rochas graníticas merecem ser testadas para se verificar a sua aplicabilidade quando não se dispõe de meios diretos para sua medida. Neste sentido, este trabalho também pode contribuir ao estabelecer um critério simples para avaliar a aplicabilidade de correlações de outros trabalhos ao material que se investiga.

2 CARACTERIZAÇÃO DO TEMA

2.1 Intemperismo e seus processos

O intemperismo, de modo geral, é definido como um estado de transição do material rochoso devido à necessidade de se adequar às novas condições ambientais, diferentes das existentes no seu ambiente original de formação. É um processo que envolve a transformação dos componentes minerais e desestruturação do material devido à ação física, química e biológica.

O intemperismo físico é um fenômeno chave aos processos críticos de modificação e evolução global da paisagem em todos os ambientes (ALDRED, 2016). Seus mecanismos de ação são, basicamente, a oscilação térmica, o efeito do congelamento nas fendas rochosas, a ação mecânica da água em superfície, nas descontinuidades e nos poros, e, ocasionalmente, os movimentos de massa, devido ao seu poder de arraste e abrasão. Este tipo de intemperismo provoca o desgaste físico do material rochoso levando-o à desagregação sendo, por este motivo, muitas vezes, considerado como precursor da ação intempérica de ordem química.

Na medida em que a superfície de contato do material rochoso aumenta, em decorrência, principalmente, do intemperismo físico, ocorre também o intemperismo químico. Este, por sua vez, de acordo com Marques (1998), atua na decomposição química dos minerais constituintes das rochas em minerais secundários, estáveis ou não. Ainda de acordo com Marques (1998), na escala de tempo de vida útil de uma obra de engenharia, as reações dominantes neste processo são a oxidação/redução e solução.

As rochas, enquanto material na engenharia, podem apresentar grande variação nas suas propriedades físico-mecânicas, nomeadamente a sua resistência, deformabilidade e permeabilidade. De acordo com Dearman (1974) ao longo de sua história geológica a rocha sofrerá variações destas propriedades físico-mecânicas devido, principalmente, à alteração intempérica a qual é, naturalmente, uma fase preparatória dos processos de denudação do relevo, e que irá se processar tanto na rocha intacta (matriz) quanto nas descontinuidades do maciço.

Para Dearman (1974), o termo intemperismo é resultado da confluência de seis fatores: estrutura da rocha, água subterrânea, clima, tempo, topografia e organismos. Em relação ao tempo, a formação completa de um perfil de intemperismo levará muito mais do

que a escala de tempo humana de observação poderia acompanhar. No entanto, muitas modificações produzidas pelas atividades humanas, sobretudo as de engenharia, podem implicar em mudanças de velocidade e nas características dos processos envolvidos. Neste caso, é importante avaliar a durabilidade e alterabilidade das rochas quando submetidas à condições antrópicas.

Este autor ainda ressalta que os termos Intemperismo e Alteração aparecem em diferentes sistemas, mas sem uma definição clara de suas diferenças. Porém, pode-se inferir que ambos, dissolução e conversão de silicatos em argilominerais, definem implicitamente estes termos. Em outras palavras, estes termos são sinônimos quando analisados sob a ótica do intemperismo químico.

Apesar de reconhecidos (Cockell et al., 2013; Kanzaki e Kump, 2017) os mecanismos de ação biológica sobre as rochas, não serão abordados, pois este trabalho está direcionado para os efeitos do intemperismo sobre as propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas do granito e, neste sentido, a ação intempérica promovida por organismos na área de estudo não é relevante, dada a sua extensão limitada à superfície do material quando ocorre.

2.2 Intemperismo em granitos

De acordo com Abad et al. (2016), em condições climáticas tropicais os maciços rochosos tendem a sofrer profundas alterações, as quais resultam em espessos perfis de intemperismo, com diferentes zonas de alteração e características complexas, devendo estas serem estudadas detalhadamente para o desenvolvimento de projetos nestas condições.

Existem na literatura diversos trabalhos (Dearman, 1974; Baynes e Dearman, 1978; Begonha e Braga, 2002; Braga et al., 2002; Lan et al., 2003; Lacerda, 2007; Ceryan, 2008; Basu et al., 2009; Ollier, 2010; Dagdelenler et al., 2011; Khanlari et al., 2012; Khanlari e Naseri, 2016; Rodbell et al., 2012; Fort et al., 2013; Gong et al., 2013; Heidari et al., 2013; Perri et al., 2013; Abad et al., 2014; 2016; Chiu e Charles, 2014; Miranda et al., 2014; Borreli et al., 2015, 2018; Momeni et al., 2015, 2017; Dewandel et al., 2016; Liu et al., 2016; Arias et al., 2016; Scarciglia et al., 2016; Kajdas et al., 2017; Migón, 2018), com diferentes objetivos, abordando os processos de intemperismo em granitos.

Abad et al. (2016) propuseram, baseado em um estudo extensivo com observação e análise de parâmetros geológicos e estruturais, um perfil de intemperismo típico para granitos

de clima tropical na Malásia. Este estudo diferencia-se, segundo os autores, por não ignorar na diferenciação das zonas de intemperismo a existência de blocos de rocha (*corestones*) envoltos por massas de solo, os quais são comumente encontrados em perfis de granito e influenciam seu comportamento do ponto de vista geotécnico

Algo muito comum nos perfis de intemperismo de granito é que sua sequência normalmente é descontínua, sua heterogeneidade se estende vertical e horizontalmente e, apesar da tendência a serem espessos em regiões tropicais, essa espessura pode variar bastante (BRAGA et al., 2002).

Dearman (1974), também relata que as transições entre graus de intemperismo em granitos frequentemente são abruptas. Nos gnaisses por exemplo, essas transições são mais graduais sendo comum, muitas vezes, a alternância e surgimento de um mesmo nível de intemperismo mais de uma vez à medida que se aprofunda o perfil, o que sugere que muitas vezes as estruturas podem estar controlando o intemperismo em alguns pontos específicos do perfil.

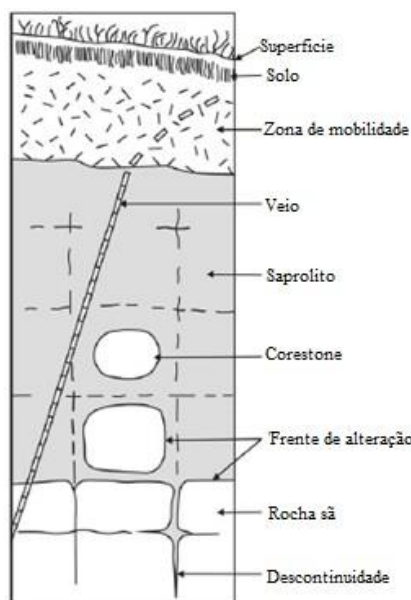
Ollier (2010) propõe um perfil típico (Figura 1) para materiais de alteração em maciços graníticos, no qual destaca-se o desenvolvimento pretérito de juntas de alívio e fraturas subverticais como deflagradores do avanço do intemperismo químico em profundidade, delimitando zonas de alteração bem distintas e feições típicas e comumente presentes nos perfis destes materiais pelo mundo.

Os perfis de intemperismo em granitos de regiões tropicais apresentam, de acordo com Dewandel et al. (2016), portanto, a seguinte sequência geral do topo para a base (mais profunda): 1. uma camada pouco espessa de solo seguida ou não de um regolito com alguma laterização; 2. uma camada espessa de saprolito com presença de uma rede de discontinuidades (normalmente juntas e fraturas) sub-horizontais e subverticais, pouco abertas, podendo conter algum material de preenchimento, além de *corestones* delimitados por essas redes; 3. uma camada de rocha parcial ou totalmente sã, porém fissurada, podendo conter algum material de preenchimento nestas; 4. e, finalmente, a rocha sã, inalterada, e sem fissuras.

De todos os elementos presentes em um perfil de intemperismo de granito, o mais emblemático, frequente e que, neste caso, merece a devida atenção dada a sua peculiar

transformação é o *corestone*. Estes blocos ou massas de rocha envoltos por uma massa de solo que, pode-se dizer, possuem sua própria sequência de intemperismo.

Figura 1 - Perfil de intemperismo típico em granitos de regiões tropicais.



Fonte: Ollier, 2010.

A sua forma abaulada, em lógica, deve-se aos mecanismos de propagação geral do intemperismo, anteriormente relatado, pela rede de fraturas e juntas sub-horizontais e subverticais que primeiro delimitam os blocos, e à maior velocidade e facilidade com que as arestas destes se alteram e se fragmentam em detrimento das faces.

Nestes elementos as alterações distribuem-se radialmente ao seu núcleo normalmente de rocha sã, intensificando-se do seu interior para as camadas mais externas, resultando em camadas concêntricas de diferentes graus de intemperismo e que apresentam uma fragmentação característica, a alteração ou esfoliação esferoidal.

Neste sentido, quando se observa vários *corestones* em um perfil de intemperismo de granito, é razoável reconstruir o aspecto passado do maciço rochoso sugerindo uma rede de juntas e fraturas espaçadas e persistentes se interceptando e delimitando estes blocos que, no processo natural de intemperismo, foram abaulados devido à maior intensidade do intemperismo nas suas arestas em comparação com o bloco todo.

Ruxton & Berry (1957) também deram destaque para esta feição em seu trabalho detalhando as mudanças químicas e mecânicas que se processam nos *corestones* durante seus estágios de intemperismo.

2.3 Grau de intemperismo – Classificações

Os primeiros métodos para classificação de uma rocha quanto ao seu grau de intemperismo foram apresentados em meados do século passado (Moye, 1955; Ruxton e Berry, 1957; Little, 1967, 1969; Newbery, 1971; The logging..., 1970; The preparation... 1972; Dearman, 1974, 1976; Dearman et al., 1978; ISRM, 1978; IAEG, 1981; dentre outros). Muitos destes métodos, tornaram-se preferenciais ao longo dos anos devido ao seu uso frequente e ainda assertivo para diversos litotipos em diferentes condições ambientais. No entanto, isso não impediu que novas classificações e ajustes aos métodos já consagrados fossem desenvolvidos em diversos outros trabalhos pelo mundo (Dearman, 1986, 1995; Martin e Hencher, 1986; Ceryan et al., 2008; Heidari et al., 2013).

Segundo Gouldie (2016), a caracterização de diferentes graus de intemperismo por meio de ensaios de resistência aliados ao estudo petrográfico da rocha também podem fornecer um método de classificação do intemperismo que não seja meramente qualitativo, baseado em descrição visual. Alguns estudos, como o de Heidari et al. (2013) que utiliza de índices quantitativos para acessar o grau de alteração da rocha, atestam essa possibilidade e vem contribuindo para a diversificação dos critérios de classificação de diferentes materiais quanto ao seu grau de intemperismo.

Moye (1955), em seu trabalho, foi um dos pioneiros a apresentar estudos do intemperismo das rochas com vistas a elaborar um esquema de classificação do grau intempérico destas, a partir do estudo de perfis de intemperismo de granitos na Austrália. A proposta de Moye foi desenvolvida para que durante a etapa de investigação de campo, diferentes engenheiros pudessem convergir e ser mais consistentes ao descrever os diferentes graus de intemperismo das rochas em afloramentos, escavações e em testemunhos de sondagem e que ainda tivessem indicações das propriedades de engenharia destes materiais.

De acordo com Moye (1955) a determinação da extensão do intemperismo, da sua natureza e da variação das propriedades de engenharia das rochas neste processo constitui um dos problemas mais frequentes e importantes em projetos de engenharia. Além disso, este autor lembra que, de modo geral, o intemperismo não ocorre de maneira uniformemente

distribuída ao longo de uma área e que seu desenvolvimento dependerá de importantes fatores como o tipo de rocha, as estruturas geológicas existentes e dos processos erosivos que acometem a área.

Para granitos, Moye (1955) afirma que o intemperismo destes materiais normalmente tem um padrão regular de desenvolvimento e isso, de certo modo, permite uma avaliação mais consistente dos seus níveis de intemperismo. A alteração neste caso é principalmente química, reconhecida pela decomposição e transformação dos feldspatos em argilominerais, alteração da biotita, descoloração marrom em toda a fábrica do material devido à limonita, e uma tendência de desprendimento de grãos minerais individualmente, resultando em redução da sua resistência quando comparada com a rocha sã.

Baseado em uma análise tátil-visual das características mineralógicas e físicas e em experiência acumulada, Moye (1955) discriminou seis classes para identificação e descrição do estágio de intemperismo dos granitos (Tabela 1): solo granítico, granito completamente intemperizado, granito muito intemperizado, granito moderadamente intemperizado, granito levemente intemperizado e granito fresco (ou são).

Na engenharia comum a rocha completamente e muito intemperizada seriam referidas simplesmente como solo, e a escavação nelas como escavação de terra; já o granito levemente intemperizado seria sempre referido simplesmente como granito, mas para o granito moderadamente intemperizado a engenharia comum muitas vezes encontraria dificuldades para classificá-lo.

De acordo com o próprio Moye (1955), a classificação do grau de intemperismo proposto especificamente para granitos pode, com as modificações apropriadas, ser aplicável também a outros tipos de rochas ígneas nas quais também seja predominante o intemperismo químico.

Moye (1955) lembra que, além da composição da rocha, o intemperismo dependerá também da estrutura geológica local. A alteração será mais intensa e atingirá profundidades maiores quando a rocha tiver sido acometida por falhas e possuir juntas mais próximas que o normal.

Tabela 1 - Divisão proposta por Moye (1955) para o grau de intemperismo das rochas graníticas, baseado no estudo de granitos na Austrália.

| 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. |

Fonte: Moye, 1955.

Tabela 1 - Divisão proposta por Moye (1955) para o grau de intemperismo das rochas graníticas, baseado no estudo de granitos na Austrália. (continuação).

| Classificação | Definição | Propriedades de Engenharia |
|----------------------------|---|--|
| 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. | |

Fonte: Moye, 1955.

Outra consideração importante feita por Moye (1955) é a necessidade de se fazer o estudo do histórico erosivo e da topografia do local, uma vez que os processos erosivos podem remover rapidamente as camadas mais superficiais do perfil de intemperismo expondo as camadas seguintes.

Ruxton e Berry (1957) estudaram espessos perfis de intemperismo de granito encontrados em Hong Kong, alguns com mais de 60 metros de profundidade. Descreveram que os horizontes superficiais A e B normalmente são pouco espessos, da ordem de apenas alguns metros, mas que é num horizonte C, muito espesso, que se encontra o perfil de intemperismo do granito e para o qual foram delimitadas quatro zonas de intemperismo aproximadamente paralelas à superfície. A divisão proposta por Ruxton e Berry (1957) foi baseada na avaliação do percentual de material sólido, ou razão rocha/solo, e das condições da massa residual decomposta. As variações locais existentes nestes perfis devem-se à declividade, à percolação de água subsuperficial, vegetação, estrutura e composição do granito. Já as modificações generalizadas são resultado da variação climática e geomorfológica ao longo do tempo.

Os estudos de Ruxton e Berry (1957) mostram que os espessos perfis foram desenvolvidos em relevo suave. Porém, a dissecação diferencial do relevo produziu perfis com características diferentes, muitas vezes devido ao controle exercido por estruturas geológicas.

Apesar de ser comum pedólogos classificarem e subdividirem estes perfis apenas em horizontes superficiais A e B e horizonte residual C, Ruxton e Berry (1957) já entendiam que este último horizonte deveria ser objeto de maior detalhamento, sobretudo do ponto de vista geológico, não devendo ser reduzido a uma classe única e de igual comportamento ao longo de toda sua extensão vertical. Para os autores, sempre que houver um perfil de intemperismo espesso, torna-se necessário avaliar e classificar suas diferentes seções.

Nos perfis de intemperismo de rochas graníticas estudados por estes autores observou-se uma sequência vertical muito típica, apresentando como característica marcante a presença de *corestones* e uma gradação da rocha maciça (intacta) para rocha decomposta da base para o topo dos perfis, definindo uma razão rocha maciça / rocha decomposta decrescente.

A partir de suas observações acerca de exposições naturais e artificiais de granitos, Ruxton e Berry (1957) propuseram uma classificação do grau de intemperismo destes materiais, baseado, principalmente, nos percentuais de rocha maciça existente em cada faixa, conforme Tabela 2.

A classificação proposta por Ruxton e Berry (1957) foi importante pois, além da abordagem científica, trouxe uma aplicação prática para a engenharia.

Little (1967), sugeriu que a classificação proposta por Moye (1955) poderia ser aplicável para outros perfis de intemperismo para além do clima temperado e ainda aplicou à esta classificação uma modificação substituindo as classes de intemperismo por números de grau de intemperismo variando de I (Rocha Sã) até VI (Solo Residual), seguindo uma lógica (ordem) geológica do material inalterado na base para o mais alterado no topo do perfil.

Posteriormente, Little (1969) faria mais uma modificação no esquema proposto por Moye (1955) introduzindo um parâmetro já proposto por Ruxton e Berry (1957), a razão rocha/solo, resultando em um esquema de classificação (Tabela 3) baseado neste parâmetro, no grau de descoloração da rocha, na permanência ou não da textura original do granito, na sua desintegração pelas mãos e sua recuperação em sondagens rotativas.

Tabela 2 - Classificação do grau intemperismo de acordo com o percentual de rocha maciça.

| 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 |

Fonte: Ruxton e Berry, 1957.

Knill et al. (1970) propuseram uma classificação do intemperismo, baseada em Moye (1955), a ser utilizada especificamente em testemunhos de sondagem, com adaptações que também a tornavam aplicável para uma gama maior de litotipos.

Para Newbery (1970) uma das maiores dificuldades na equalização de um sistema de classificação do intemperismo está relacionada ao fato de diferentes rochas responderem de maneira diferente ao intemperismo. Além disso, um sistema de classificação pode não ser aplicável para um mesmo litotipo, de diferentes regiões, devido às variações do perfil em função das diferentes condições ambientais e endógenas envolvidas nos processos de intemperismo. Este autor, por exemplo, apresentou uma classificação para granitos alterados provenientes da Malásia que não apresentavam *corestones* e alteração esferoidal tal como os granitos descritos por Moye (1955) e Ruxton e Berry (1957).

Tabela 3 - Classificação do grau de intemperismo para rochas graníticas, modificado por Little (1969) pós Moye (1955).

| Classe | Grau de Decomposição | Reconhecimento de Campo | Propriedades de Engenharia |
|--------|-----------------------------|---|---|
| VI | Solo | Textura totalmente destruída. Camada superficial contém matéria orgânica e raízes de plantas. | Inadequado para fundações importantes. Instável em taludes quando está sem cobertura vegetal. |
| V | Completamente Intemperizado | A rocha está completamente decomposta, mas a sua textura ainda é reconhecível. Em litotipos graníticos os feldspatos apresentam-se completamente decompostos em argilominerais. Não é possível recuperar testemunhos por sondagem rotativa. | Pode ser escavado pelas mãos ou desmontado sem o uso de explosivos. Inadequado para fundação de barragens de concreto ou grandes estruturas. Talvez aplicável para fundação de barragem de terra e preenchimento da mesma. Instável para cortes muito íngremes. Requer proteção contra erosão. |
| IV | Muito Intemperizado | A rocha está enfraquecida a uma condição em que pedaços maiores podem ser quebrados pelas mãos. Porém, com o devido cuidado, podem ser recuperados os testemunhos de sondagem rotativa. | Similar à Classe V. Dificilmente aplicável para fundação de barragens de concreto. A presença de blocos envoltos por material mais alterado pode induzir à uma percepção errônea da competência do material para fundação de grandes estruturas. |
| III | Moderadamente Intemperizado | Considerável alteração ao longo da rocha. Apresenta alguma resistência que a impede de ser quebrada pelas mãos. Comumente apresenta uma descoloração/manchas devido à limonita. Razão rocha/solo pode variar de 50% a 90%. | Escavado com dificuldade sem explosivos. Pode ser esmagado pelos trilhos de uma escavadeira. Aplicável para fundação de pequenas estruturas de concreto e barragens de enrocamento. Talvez possa ser utilizado como camada semipermeável. Estabilidade em taludes dependerá das características das estruturas, especialmente a atitude das juntas. |
| II | Levemente Intemperizado | Visível alteração ao longo de boa parte da fábrica, com leve descoloração/manchas pela limonita. Alguma decomposição dos feldspatos para os granitos. A resistência aproxima-se da Rocha Sã. Mais que 90 % é rocha. | Requer o uso de explosivos para ser escavado. Aplicável para fundação de barragens de concreto. Elevada permeabilidade ao longo das juntas abertas. Normalmente mais permeável que as zonas acima e abaixo. Questionável como agregado para concreto. |
| I | Rocha Sã | Rocha sã, podendo apresentar alguma leve descoloração/mancha somente no interior das juntas. | Manchas/descoloração indicam percolação de água ao longo das juntas; blocos individuais podem estar soltos devido a detonação e/ou alívio de tensões o que demandará suporte em túneis e outras escavações. |

Fonte: Little, 1969.

A classificação proposta por Newberry (1970) é uma adaptação daquela usada por Moye (1955). A principal diferença entre elas reside no fato de que nos granitos das montanhas nevadas da Austrália, Moye assinala o reconhecimento da fábrica da rocha na classe denominada “completamente intemperizado”, enquanto para os granitos da região de

clima equatorial da Malásia, Newbery (1971) descreve a ausência total da “fábrica” na matriz rochosa nesta mesma classe (VI).

Atribuiu-se ao microfraturamento ou microfissuramento proeminente nesses granitos a razão para a não formação de *corestones*, devido à facilidade com que a água subterrânea, como agente de intemperismo químico, atuou de maneira intensa na decomposição dos maciços. Por outro lado, tal como na maioria dos estudos, verificou-se que a decomposição de feldspatos e biotitas também era o principal mecanismo ou processo no intemperismo do granito.

O grupo de estudos *The Logging...* (1970) em seu relatório para interpretação de testemunhos de sondagem para fins de engenharia, no Reino Unido, publicou um esquema (Quadro 1) baseado no sistema de Moye (1955) mas que fora adaptado para uma faixa maior de litotipos além do granito, com a inclusão de subclasses, e para que a análise pudesse ser, pela primeira vez, baseada em ambos: rocha e maciço rochoso.

Pelo Quadro 1, nota-se que este sistema usa as características do material rocha como: a existência ou não de alteração do material, a friabilidade e a manutenção ou não da textura original. Já para o maciço rochoso são analisados os aspectos como: a extensão da alteração (se ela se restringe às superfícies das discontinuidades ou se prolonga para o maciço rochoso), o grau de decomposição e a preservação ou não das estruturas geológicas.

Ainda no Reino Unido, em outro relatório do grupo de estudos *The Preparation...* (1972) sobre a elaboração de mapas e projetos em geologia de engenharia, foi realizada uma simplificação do sistema apresentado em *The Logging...* (1970) suprimindo a subclasse IB – Fracamente intemperizado, ficando apenas o simples I – Rocha Sã. Os termos descritivos restantes eram iguais, mas as feições de diagnóstico eram diferentes. Ao todo, esta simplificação resumiu a classificação do intemperismo a partir de três propriedades do material rocha (cor, resistência e a fábrica da matriz) e três aspectos do maciço rochoso (descontinuidades, alcance/penetração da descoloração, e a presença de *corestones*), conforme Quadro 2.

Quadro 1 - Esquema para classificação do intemperismo, desenvolvido para testemunhos de sondagem e diversos litotipos.

| Termo | Símbolo | Diagnóstico de Feições | | | | | |
|------------------------|---------|----------------------------------|----------------------|--------------------|---|--|------------------------|
| | | Material | | | Maciço Rochoso | | |
| São ou Inalterado | IA | Sem sinais visíveis de alteração | Não é friável | Textura preservada | Sem sinais visíveis de alteração | | Estruturas preservadas |
| Fracamente Alterado | IB | | | | Alteração restrita às superfícies das descontinuidades principais | | |
| Levemente Alterado | II | Leve alteração | | | Alterações penetram por todas as descontinuidades abertas | | |
| Moderadamente Alterado | III | Alterado | | | Friável | | |
| Muito Alterado | IV | | Parcialmente friável | | | | |
| Completamente Alterado | V | | | | | | |
| Solo Residual | VI | | | | | | Estruturas destruídas |

Fonte: *The Logging...*, 1970.

Dearman (1974, 1976, 1986, 1995) foi um dos pesquisadores mais ativos dentre os que se dedicaram, no século passado, ao estudo dos perfis de intemperismo, sobretudo de granitos, propondo e ajustando ao longo do tempo diversos esquemas para classificação do grau de intemperismo da matriz da rocha e dos maciços rochosos.

Para Dearman (1974) um sistema de classificação do intemperismo deveria envolver a caracterização de ambos, estágios de intemperismo e graus de intemperismo, e com uma terminologia específica para a geologia de engenharia. Conforme apresenta-se nas Tabelas 4, 5 e 6, este autor considerou que a classificação do intemperismo para propósitos de engenharia baseia-se no reconhecimento dos efeitos da decomposição química, desintegração física, e a solubilização (quando couber) nos diferentes estágios do intemperismo do material rocha (matriz) e sua distribuição ao longo do maciço rochoso. Juntos, e com a inferência da resistência, estas características permitiriam realizar uma classificação qualitativa dos diferentes níveis de intemperismo existentes nos litotipos.

Quadro 2 - Esquema simplificado para classificação do intemperismo, aplicável a diferentes litotipos.

| Termo | Classe | Diagnóstico de Feições | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|------------------------|--|--|-------|---|---|--|--|
| | | Material | | | | Maciço Rochoso | | | |
| São ou Inalterado | I | Sem descoloração | Sem perda de resistência | | | | Sem descoloração | | |
| Levemente e intemperizado | II | | Visivelmente não é menos resistente que a rocha sã | | Rocha | Descontinuidades podem estar abertas, e suas superfícies descoloridas | Ligeira penetração da descoloração para dentro das descontinuidades | | |
| Moderadamente intemperizado | III | Descolorido | Visivelmente menos resistente que a rocha sã | | | | Descoloração já penetrou nas descontinuidades | | |
| Muito intemperizado | IV | | <i>Fabric</i> da rocha próximo às descontinuidades pode estar alterado | | | Alterações já penetram em profundidade | <i>Corestones</i> podem estar presentes | | |
| Completamente intemperizado | V | | <i>Fabric</i> em sua maior parte ainda está preservado | | Solo | | Ocasionalmente pequenos <i>corestones</i> | | |
| Solo Residual | VI | | <i>Fabric</i> completamente destruído | | | | | | |

Fonte: *The preparation...*, 1970.

Neste sistema, percebe-se que as alterações e decomposição química típicas podem ser avaliadas visualmente pelas feições resultantes deste processo. A desintegração física envolve a análise das descontinuidades abertas e que podem ser acompanhadas pela formação de novas descontinuidades, esfoliação/alteração esferoidal e desintegração granular. Enquanto a dissolução, quando é um processo existente num determinado litotipo, pode ser avaliada para o maciço rochoso pela observação de campo e medições, enquanto que para a rocha como material, individualmente, deve ser feita uma avaliação pautada por ensaios de laboratório para determinação da sua porosidade.

Tabela 4 - Classificação do intemperismo quanto às alterações físicas.

| 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. |

Fonte: Dearman, 1974.

Tabela 5 - Classificação do intemperismo quanto à decomposição química.

| 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. |

Fonte: Dearman, 1974.

Tabela 6 - Classificação do intemperismo quanto à dissolução.

| 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. |

Fonte: Dearman, 1974.

Dearman (1976) fez uma revisão de alguns esquemas de classificação já discutidos, nomeadamente os propostos por Moye (1955), *The Logging...* (1970) e *The Preparation...* (1972), e, baseado nestes, propôs algumas reformulações.

Em *The Logging...* (1970), Dearman (1976) discutiu as definições e significado prático de alguns termos utilizados naquele esquema de classificação do intemperismo e, baseado nisso, propôs uma reformulação daquele sistema, simplificando-o a uma análise baseada unicamente na presença ou não de descoloração, solo e da textura original da rocha.

Para chegar a este esquema, Dearman (1976) teve de se pautar nas definições dos termos Friável (*Friable*), Decomposto (*Decomposed*) e Alteração (*Weathering*), apresentados por Gary et al. (1972).

Neste caso Dearman (1976) concluiu que o uso do termo ou parâmetro friabilidade implicaria em determinar, de fato, se o material é solo (friável) ou rocha (não friável), podendo-se usar o termo parcialmente friável para indicar a presença de ambos. A partir desta compreensão ficaria claro que os termos “alterado” e “decomposto” dependeriam do grau de friabilidade, ou seja, quando o material não é friável, ele estaria em um estágio de alteração, no qual o efeito principal seria a progressiva descoloração. Por outro lado, se friável, o material já estaria, além de descolorido, em um estágio de decomposição, parcial ou total, à condição de solo.

No sistema proposto em *The Preparation...* (1972), Dearman (1976) considerou haver inconsistências como a falta de definição dos termos usados. Neste sentido, propôs também uma simplificação deste esquema de classificação do intemperismo

Como produto final desta revisão, Dearman (1976) ainda publicou dois esquemas preferíveis para a classificação do intemperismo. Um baseado na descrição do grau de intemperismo da rocha enquanto material individual, e outro para a descrição do estado de intemperismo do maciço rochoso, apresentados, respectivamente, nas Tabelas 7 e 8, e que podem ser utilizados para diferentes litotipos e ajustados para atender a particularidades.

O primeiro (Tabela 7) é baseado nas mudanças associadas às alterações mecânicas (ou físicas) e químicas. Dearman (1976), ressalta que subdivisões como, por exemplo, “parcialmente descolorido” e “levemente decomposto” podem ser utilizadas sempre que necessário para complementar a descrição do material.

Neste segundo esquema o perfil de intemperismo na escala do maciço rochoso pode ser descrito, portanto, com base nos graus de intemperismo dos materiais que o compõe e pelo efeito destas alterações nas suas descontinuidades. Neste caso, os parâmetros utilizados no

método são o grau de descoloração, a razão rocha/solo e a preservação da textura original da rocha.

Tabela 7 - Descrição e classificação do grau de alteração da matriz.

| Termo | Descrição |
|--------------|---|
| Fresco | Sem sinais visíveis de alteração |
| Descolorido | A cor original da rocha sã 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 Fábrica ainda está intacta, mas algum ou todos os grãos minerais estão decompostos. |
| Desintegrado | A rocha está alterada à condição de solo em que a Fábrica ainda está intacta. A rocha é friável, mas os grãos minerais não estão decompostos. |

Fonte: Dearman, 1976.

Tabela 8 - Escala do grau de intemperismo do maciço rochoso.

| 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. |

Fonte: Dearman, 1976.

Fica claro, pela revisão de *The Logging...* (1970) e *The Preparation...* (1972) por Dearman (1976) e pelas suas próprias proposições, que ambos, rocha e maciço rochoso, devem ter seus aspectos considerados em um sistema de classificação do intemperismo.

Neste sentido, a *International Society For Rock Mechanics* (ISRM) publicou em 1978 (ISRM, 1978) um sistema que, até hoje, é um dos mais difundidos no mundo inteiro, sendo muito aplicável até hoje. Sua principal característica foi reunir em um único sistema todos os

elementos qualitativos descritores mais observados pelos sistemas anteriores adaptando-os para uma classificação que abrange características do maciço e da matriz rochosa, sendo, basicamente pautada na análise táctil-visual para inspeção de descoloração das descontinuidades, alteração de biotita e feldspatos, sinais de oxidação, razão rocha/solo, presença de *corestones*, estado de preservação da estrutura do maciço e a desintegração da matriz. Conforme Tabela 9, a ISRM (1978), categorizou o intemperismo das rochas em seis classes ou graus de intemperismo.

Tabela 9 - Sistema de classificação do intemperismo proposto para maciço e matriz rochosa.

| TERMO | DESCRIÇÃO | CLASSE |
|-----------------------------|--|---------------|
| 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.

2.4 Intemperismo e as propriedades de engenharia

Apesar de existirem muitos trabalhos sobre perfis de intemperismo de granitos pelo mundo, é reduzido o número destes (Newbery, 1971; Baynes e Dearman, 1978; Irfan e Dearman, 1978; Lumb, 1983; Gupta e Rao, 1998; Begonha e Braga, 2002; Lan et al., 2003;

Ceryan et al., 2008; Basu et al., 2009; Dagdelenler, 2011; Khanlari et al., 2012; Khanlari e Naseri, 2016; Fort et al., 2013; Heidari et al., 2013; Chiu e Charles, 2014; Iok-Tong et al., 2015; Momeni et al., 2015, 2017; Arias et al., 2016; Salim et al., 2017, dentre outros) que se dedicaram à caracterização das propriedades de engenharia de suas matrizes, sobretudo para aqueles situados no Brasil.

A caracterização da matriz rochosa para engenharia compreende o estudo das propriedades mineralógicas, físicas e geomecânicas do material rocha, suas relações e suas variações, as quais podem estar ligadas à dinâmica natural dos processos de transformação ou às modificações induzidas através de fatores externos como, por exemplo, os projetos de engenharia.

Em projetos de engenharia a ocorrência de zonas de transição tem sido relatada (Lacerda, 2007; Ollier, 2010; Gurocak e Yalcin, 2016) como fator de desenvolvimento de diferentes problemas geotécnicos devido à influência deste processo nas propriedades geomecânicas, sobretudo a resistência, deformação e permeabilidade dos maciços rochosos.

O trabalho de Baynes e Dearman (1978) foi um dos primeiros a investigar a influência do intemperismo nas propriedades de engenharia dos granitos a partir de um estudo em nível microscópico. Neste caso, as mudanças nas propriedades geomecânicas foram atribuídas ao microfraturamento, à abertura dos contatos entre os grãos e ao aumento da porosidade intragranular induzidos pelo intemperismo. Foram analisados estes efeitos sobre, principalmente, a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade de um granito extremamente intemperizado e considerado como solo fracamente cimentado sob a ótica da engenharia.

Neste trabalho foram realizados ensaios triaxiais para dois corpos-de-prova do granito de Hingston Down, Inglaterra, na condição de solo fracamente cimentado. Para investigar a relação entre a microfábrica, bem como outras características microscópicas, e a resistência e deformabilidade, foram realizadas análises de imagens SEM (*Scanning Electron Microscopy*). A obtenção de um modelo simples da microfábrica a partir das imagens SEM pôde indicar que o decréscimo na resistência, no módulo de Young e na massa específica e o aumento da porosidade e permeabilidade refletem as microfraturas, as aberturas entre grãos e o aumento da porosidade intragranular dos feldspatos devido ao intemperismo. Estes mesmos efeitos

causam uma diminuição da componente coesão, mas não na componente friccional da resistência ao cisalhamento do material estudado.

Granitos de Hong Kong estudados por Lumb (1983) foram avaliados do ponto de vista de seu comportamento geomecânico quando em processo de decomposição. Este trabalho ateu-se, sobretudo, à avaliação da influência do grau de intemperismo da rocha sobre a resistência e a elasticidade da mesma desde a condição sã até à de rocha muito decomposta. O grau de decomposição do material foi avaliado e relacionado com o RQD (*Rock Quality Designation*), a porosidade aparente, velocidade de propagação de ondas e o índice de resistência à compressão puntiforme. Estes dois últimos foram utilizados para estimar o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão uniaxial, respectivamente.

Os resultados deste trabalho mostraram que a resistência e a elasticidade para o granito estudado decaem de maneira proporcional ao aumento do grau de decomposição do material. O autor alerta que a classificação apenas qualitativa do grau de decomposição pode ser, por vezes, imprecisa, já que para materiais de graus de decomposição diferentes houve sobreposição de valores de resistência e deformação. De acordo com o autor, o RQD e a velocidade ultrassônica de propagação de ondas não foram tão úteis como se esperava para acessar o grau de decomposição, mas a velocidade ultrassônica pode dar uma estimativa confiável do módulo de elasticidade inicial do material, independentemente do grau de decomposição da rocha. Em relação à porosidade aparente, verificou-se que para valores entre 2.0 (dois) e 5 (cinco) %, a resistência da rocha sã não é influenciada, mas para a rocha decomposta a resistência diminui exponencialmente.

Begonha e Braga (2002) realizaram a caracterização das propriedades mineralógicas, químicas, geotécnicas e de engenharia de dezesseis perfis de granitos do Porto, Portugal, para investigar como estas eram influenciadas e se comportavam nos diferentes níveis de intemperismo identificados (W1, W2, W3 e W3/W4). Neste trabalho, as propriedades de engenharia avaliadas em centenas de corpos-de-prova de rocha sã, rocha intemperizada e saprolito foram: a granulometria e plasticidade (apenas para os saprolitos), massa específica seca (γ_d), a porosidade efetiva (n_e), porosidade total (n), a velocidade de propagação de ondas (V_{PL}), a resistência à compressão uniaxial (σ_c), módulo de elasticidade (E) e deformação na ruptura (ϵ).

Tal como em Lumb (1983), Begonha e Braga (2002) verificaram um decréscimo contínuo e significativo nos valores de massa específica, velocidade ultrasônica, resistência uniaxial e módulo de elasticidade com o aumento do grau de intemperismo da rocha, enquanto a porosidade total, efetiva e a deformação aumentaram. Interessante observação feita pelos autores foi o fato de que na transição de rocha sã para rocha levemente intemperizada, não houve um decréscimo pronunciado da resistência e do módulo de elasticidade e, portanto, não foi a alteração quem influenciou este leve decréscimo, mas sim uma rede de microfissuras pré-existentes neste granito, resultante de processos pós magmáticos tardios.

Todos os parâmetros estudados, com exceção do coeficiente de Hirschwald ou S_{48} (parâmetro que mede a razão entre a porosidade efetiva e a porosidade total) e a deformação na ruptura, conforme Tabela 10, apresentaram uma significativa variação de acordo com o grau de intemperismo da rocha.

Tabela 10 - Variação de algumas propriedades de engenharia com o grau de intemperismo de granitos do Porto, Portugal.

| Propriedades e Parâmetros | Rocha sã | | Rocha alterada | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | W1 | | W2 | | W3 | | W3/W4 | |
| | Intervalo de variação | <i>nc</i> * | Intervalo de variação | <i>nc</i> | Intervalo de variação | <i>nc</i> | Intervalo de variação | <i>nc</i> |
| n (%) | 0.72– 1.14 | 18 | 1.59–2.0 | 10 | 2.41– 3.94 | 32 | - | - |
| n_e (%) | 0.52– 1.00 | 25 | 1.48–1.90 | 13 | 2.12– 7.46 | 11 6 | 7.79– 10.77 | 13 |
| S_{48} (%) | 68– 99 | 18 | 78– 93 | 10 | 78–91 | 32 | - | - |
| γ_d (g/cm ³) | 2.62– 2.65 | 25 | 2.60–2.62 | 13 | 2.42– 2.60 | 11 6 | 2.34– 2.41 | 13 |
| V_{PL} (m.s ⁻¹) | 5370– 6420 | 25 | 3670–5450 | 13 | 1600– 4740 | 99 | 1300– 1880 | 13 |
| σ_c (MPa) | 130.6–157.0 | 5 | 96.6–132.7 3 | 3 | 60.0– 135.2 | 40 | 20.2– 29.4 | 7 |
| E (GPa) | 14.67–22.90 | 7 | 9.96–12.45 | 3 | 5.03– 12.89 | 40 | 1.04– 1.74 | 7 |
| ε | 3 11.2– 12.0 | 5 | 11.5– 13.0 | 3 | 9.9– 14.8 | 40 | 13.9– 17.1 | 7 |

Fonte: Begonha e Braga, 2002.

*(*nc*) – número de corpos-de-prova ensaiados.

Comparativamente, os autores verificaram que os valores médios de γ_d , V_{PL} , σ_c e E, para a rocha sã (W1) são, respectivamente, 1.1, 3.9, 6.1 e 13.0 vezes maiores que os valores médios obtidos para a rocha mais alterada (W3/W4). Por outro lado, os valores médios de n_e e ε para a rocha mais intemperizada são, respectivamente, 13.6 e 1,4 vezes maior que para a

rocha sã. Para os autores estes resultados sugerem que n_e , V_{PL} , σ_c e E são fortemente influenciados pelo intemperismo enquanto ε é moderadamente influenciado e γ_d é fracamente influenciado pelo intemperismo da rocha.

Ao analisar correlações entre os parâmetros estudados, Begonha e Braga (2002) concluíram que:

1. A forte correlação linear entre a porosidade efetiva e a total indicou que o percentual de vazios acessíveis pela água é mais ou menos constante e, por este motivo, o coeficiente de Hirschwald não apresentou significativa variação durante os diferentes níveis do intemperismo.
2. A forte correlação linear entre a porosidade efetiva e a densidade seca do material, confirmou que os valores de ambos os parâmetros são controlados pela quantidade de vazios devido à lixiviação química dos minerais no processo de alteração.
3. As correlações mostraram que as principais variações na velocidade ultrasônica, na resistência à compressão uniaxial e no módulo de elasticidade com a porosidade efetiva e com a densidade seca ocorrem bem no início dos processos de intemperismo do granito (Entre rocha sã e rocha levemente intemperizada).
4. A sensibilidade dos parâmetros V_{PL} , σ_c e E no começo do processo de intemperismo deve-se ao surgimento de microfraturas no granito levemente intemperizado.
5. A porosidade efetiva da rocha intemperizada mostrou ser a propriedade mais sensível aos processos intempéricos. Esta propriedade foi considerada pelos autores como a propriedade índice mais importante para o estudo dos granitos alterados do Porto, por vários motivos: é facilmente determinada, apresentou uma grande faixa ou intervalo de variação com a variação do grau de alteração, e é uma propriedade que apresentou fortes correlações com a maioria dos outros parâmetros físicos sendo, portanto, a propriedade índice mais importante e confiável para estimar outros parâmetros físicos. A segunda propriedade mais importante e que forneceu boas correlações foi o peso específico.

Lan et al. (2003) apresentaram e discutiram uma compilação de dados de características geológicas e de engenharia para os materiais componentes dos perfis de intemperismo de granitos no Sul da China com o objetivo de prover informações e dados mais confiáveis para a avaliação da estabilidade dos taludes nos perfis transicionais destes materiais.

De acordo com estes autores, nestes perfis ocorrem até cinco graus de intemperismo do material. Porém, ficou claro nesta revisão que os estudos das propriedades de geologia de engenharia dos perfis de granito estão concentrados nas zonas de rocha completamente e muito intemperizada, sendo insuficiente para as zonas de rocha moderada e levemente intemperizada. Ainda assim, são dados consistentes e importantes na medida em que os maiores problemas de estabilidade e movimento de massa na região ocorrem exatamente nestes domínios.

Os granitos completamente alterados, de acordo com Lan et al. (2003) apresentam, em geral, como características geotécnicas principais o baixo teor de umidade, baixa plasticidade, médio índice de vazios (0.36 – 1.29), baixa deformabilidade e média compressibilidade. Tanto o granito completamente como o muito intemperizado apresentam uma elevada resistência ao cisalhamento direto. Porém, a resistência uniaxial obedece à lógica geomecânica do decréscimo à medida em que aumenta o grau de intemperismo. Após saturação por água nestes materiais a resistência cai drasticamente e a deformação pode aumentar até 30.0 %. O índice de vazios aumenta com a profundidade, ou seja, com a diminuição do grau de intemperismo. Porém, a permeabilidade nestes perfis de alteração pode aumentar ou diminuir com a profundidade, dependendo dos minerais presentes e do grau de lixiviação dos mesmos.

No que diz respeito às propriedades de engenharia, Lan et al. (2003) também verificaram que o peso específico é um índice que reflete não somente o peso das massas, mas também as propriedades físicas e mecânicas dos perfis de intemperismo do granito, pois apresenta uma relação intrínseca com os todos os outros índices. Por meio de equações lineares, correlacionaram o peso específico (γ) com outros índices físicos: gravidade específica (G_s), porosidade (n), capacidade de absorção (α) e o teor de umidade de saturação (w). Enquanto as correlações entre o peso específico e algumas das propriedades geomecânicas como o módulo de elasticidade (E), coeficiente de atrito (f), coeficiente de Poisson (ν), resistência à compressão uniaxial seca (σ_c) e saturada (σ_{cd}), apresentaram um comportamento exponencial.

Basu et al. (2009) dedicaram-se a investigar índices quantitativos que pudessem ser relacionados aos graus de intemperismo definidos em sistemas baseados em análise unicamente qualitativa conferindo, assim, uma menor subjetividade no momento de discriminar os diferentes níveis de intemperismo e valores típicos das propriedades de

engenharia de rochas graníticas (Complexo Itu) situadas na região do projeto da hidrelétrica de Porto Góes, Sudeste do Brasil.

Dentre suas conclusões Basu et al. (2009) verificaram que a grande variação de valores de resistência uniaxial da rocha são estudada (214 – 153 MPa) está diretamente relacionado com microfissuras existentes e o percentual de biotita no material. Para os demais graus de intemperismo a resistência uniaxial e o módulo de elasticidade seguiram a mesma tendência apresentada na maioria dos estudos anteriores em que o decréscimo destas propriedades e o aumento do coeficiente de Poisson ocorrem à medida em que a intensidade do intemperismo é maior.

Em geral os trabalhos de pesquisa no mundo sobre as variações das propriedades de engenharia de granitos em função do intemperismo, verificados na literatura, demonstram que independentemente da condição climática ou de fatores endógenos, a principal tendência é de que massa específica, propriedades índice e propriedades de resistência diminuam enquanto porosidade e a deformabilidade aumentam seus valores com o aumento do nível de intemperismo.

2.5 Índices petrográficos

De acordo com Irfan e Dearman (1978a) irão influenciar no comportamento de um determinado material rochoso para engenharia: a composição mineral e os produtos de intemperismo, a estrutura e a textura dos grãos minerais, os tipos e quantidades de microfissuras, os tipos de preenchimento das microfissuras e a anisotropia se presente. Estas são propriedades petrográficas da rocha e que podem, juntas, caracterizar o estágio de intemperismo do material. Neste sentido, estudando as propriedades petrográficas dos granitos de Hingston Down, na Inglaterra, e baseando-se em trabalhos anteriores, Irfan e Dearman (1978a) propuseram dois índices petrográficos para caracterizar os estágios sucessivos de intemperismo de granitos. O primeiro, denominado de Índice Micropetrográfico (Imp) está associado à decomposição química dos minerais primários em minerais secundários e é obtido pela razão entre o quantitativo, percentual, de minerais são e minerais alterados. O segundo, o Índice de Microfissuramento (Imf), está relacionado às modificações físicas da rocha em nível microscópico e, portanto, leva em consideração todas as microfissuras e vazios decorrentes do intemperismo físico. Para obter ambos os índices é

necessário realizar a descrição de lâminas petrográficas do material a ser estudado em seus diferentes níveis de intemperismo.

O índice micropetrográfico é obtido a partir da razão entre o percentual, observado em lâmina petrográfica, de minerais sãos (primários) e minerais alterados (secundários) mais os poros e microfissuras produzidos pela alteração. Irfan e Dearman (1978a) lembram que o Imp poderá ser utilizado para caracterizar o estado de alteração da rocha, independentemente da alteração resultar de solubilização ou hidrotermalismo.

Para obtenção do índice de microfissuramento devem ser quantificadas, em valores absolutos e de maneira simples, todas as microfissuras e vazios que interceptarem linhas (perfis) longitudinalmente traçadas na lâmina petrográfica, em quantidade representativa. O observador deverá contar quantas destas microfissuras interceptam cada uma das linhas e, posteriormente, fazer uma média do valor absoluto entre as linhas. Usualmente, traçam-se no mínimo 3 a 5 linhas longitudinais à lâmina petrográfica. Devem ser consideradas, de acordo com Irfan e Dearman, como microfissuras: as bordas oxidadas dos grãos minerais, as bordas abertas (espaçadas), as microtrincas oxidadas, as microtrincas sem preenchimento ou parcialmente preenchidas, as microtrincas transgranulares não preenchidas e os poros. O método original, proposto por Irfan e Dearman (1978a) sugere que o índice de microfissuramento corresponda ao valor médio das microfissuras contabilizadas a cada 10 (dez) milímetros de uma linha transversal à lâmina petrográfica.

3 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa dividiu-se em três etapas: levantamentos de campo, testes de laboratório e, por último, interpretação e correlação dos dados obtidos.

3.1. Levantamentos de campo

Os levantamentos de campo iniciaram no primeiro semestre de 2018 quando houve a primeira visita, de simples reconhecimento, na região periférica ao município de Cachoeiro do Itapemirim, com caminhar em busca de afloramentos e taludes de corte em minerações e estradas, para determinar os perfis de intemperismo do sienogranito mais significativos, com maior número possível de graus de intemperismo desenvolvidos e com acessibilidade para execução do trabalho de pesquisa. Ao fim deste estágio foram determinados cinco perfis de intemperismo e delimitada a área de estudo deste projeto de pesquisa.

Em uma segunda visita à área de estudo foi realizada a descrição morfológica dos perfis de intemperismo selecionados contemplando as características descritas na Tabela 11.

Tabela 11 - Elementos descritores do maciço e da matriz rochosa para caracterização dos perfis de intemperismo estudados.

| Maciço | Matriz |
|--|---|
| -Tipo de perfil e cobertura | - Som e resistência ao golpe do martelo |
| - Profundidade do perfil | - Sinais de alteração (descoloração, oxidação, etc.) |
| - Zoneamento por grau de intemperismo | - Estado dos grãos (embricamento) |
| - Descontinuidades (direção, espaçamento, abertura, preenchimento, frequência) | - Resistência e coerência ao golpe do martelo geológico |
| - Presença de <i>corestones</i> (tamanho e forma) | |
| - Razão entre rocha e solo ou <i>Rock Soil Ratio</i> (RSR) | |

Fonte: O autor.

O terceiro estágio, consistiu em nova visita às áreas de estudo para coleta de blocos da matriz rochosa, em todos os níveis de intemperismo identificados pela caracterização morfológica, para a realização de testes de laboratório e encaminhamento de amostras de mão para a confecção de lâminas petrográficas.

Após extensa revisão bibliográfica, optou-se por utilizar como sistema de classificação do intemperismo nesta pesquisa aquele proposto pela ISRM (1978) por melhor descrever e compatibilizar as características de maciço e matriz rochosa na determinação do nível ou grau de intemperismo da rocha. Portanto, a partir deste momento, serão utilizadas neste trabalho 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).

3.2. Testes de laboratório

A partir da amostragem de blocos da matriz rochosa em campo foram determinados os testes que seriam necessários para se proceder à caracterização mineralógica, física e geomecânica do sienogranito. Estes testes bem como suas diretrizes e local de realização são descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Testes de laboratório para caracterização mineralógica, física e geomecânica da matriz rochosa.

| Teste | Local | Equipamentos | Diretriz |
|-------------------------------------|-------------|---|-------------------------------------|
| Descrição micropetrográfica | Particular | Microscópio petrográfico | Le Matrie et al. (2002) |
| Índices físicos | UFV | Dessecador, bomba a vácuo, balança e estufa | ISRM (2007) |
| Resistência à compressão puntiforme | UFV | PLT Controls | ISRM (2007) |
| Velocidade sônica | UFV | Pundit | ISRM (2007) |
| Martelo de Schmidt | UFV | Proceq RockSchmidt | ISRM (2007), ASTM D5873 (2014) |
| Resistência à compressão uniaxial | UFV, PUC-RJ | Prensa simples EMIC; Prensa triaxial MTS 815. | ISRM (2007), ASTM C170/C170M (2017) |
| Deformação | PUC-RJ | Prensa triaxial MTS 815 | ISRM (2007) |
| Resistência à tração | UFV, PUC-RJ | Prensa simples MTS | ISRM (2007) |

Fonte: O autor.

1*: *American Society for Testing and Materials (ASTM)*

Para a caracterização mineralógica foram confeccionadas em laboratório especializado lâminas petrográficas, em duplicata, para cada nível de intemperismo do sienogranito. Estas

foram enviadas para serviço terceirizado no qual procedeu-se à descrição em microscópio petrográfico para obtenção dos dados listados na Tabela 13.

Na descrição petrográfica a contagem modal, das microfissuras e da proporção entre minerais são e alterados foi obtida a partir da média de observação de 10 (dez) visadas, com aumentos de 5x, 10x e 20x a nicois cruzado e descruzado.

Tabela 13 - Escopo da descrição das lâminas petrográficas do sienogranito em seus diferentes níveis de intemperismo.

| Dado | Diretriz |
|-------------------------------|-------------------------|
| Modal mineralógico | - |
| Classificação da rocha | Le Matrie et al. (2002) |
| % de minerais são e alterados | Irfan e Dearman (1978a) |
| Nº de microfissuras | Irfan e Dearman (1978a) |
| Aspectos texturais | - |
| Aspectos estruturais | - |
| Processos de intemperismo | - |

Fonte: O autor.

A contagem das microfissuras atendeu ao disposto em Irfan e Dearman (1978a), sendo contabilizadas em 3 perfis de 20 mm traçados nas lâminas, todas as microfissuras produzidas pelo intemperismo, calculando-se ao fim a média entre os perfis para cada lâmina. Esta contagem permitiu encontrar o valor do índice de microfissuramento (Imf) para o sienogranito em cada nível de intemperismo. Contudo, para que fosse possível comparar os valores deste índice com os resultados de outros trabalhos foi necessário estabelecer a intensidade de microfissuramento (Imf_i), em porcentagem, que consiste na divisão do número médio de microfissuras verificadas em cada grau de intemperismo pelo valor da soma das microfissuras de intemperismo observadas nas lâminas de todos os graus de intemperismo avaliados.

A razão entre os percentuais de minerais são e alterados para cada lâmina também foi calculado e o índice micropetrográfico (Imp), proposto por Irfan e Dearman (1978a), foi obtido para cada um dos níveis de intemperismo da rocha.

A etapa de caracterização das propriedades físicas da rocha foi realizada no laboratório de mecânica das rochas da Universidade Federal de Viçosa - UFV, e consistiu na aplicação do método de saturação e flutuabilidade, padronizado pela ISRM (2007), para obtenção de índices físicos a partir de fragmentos dos materiais estudados, sendo essas propriedades: a

massa específica seca (γ_d), porosidade aparente ou efetiva (n_e), capacidade de absorção (α) e o índice de vazios (e).

Previamente aos ensaios para determinação das propriedades índice, de resistência e deformabilidade da rocha, realizou-se 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 ao diâmetro NX (54 mm) sendo sua base e topo retificadas para garantir que estivessem lisas, livres de ondulações e paralelas, tudo conforme as recomendações da ISRM (2007). Contudo, este procedimento se limitou ao sienogranito 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 cilíndricos, sendo este fato, inclusive, um critério de descrição da matriz.

A partir dos corpos-de-prova devidamente preparados, foram realizados testes para obtenção de propriedades índice, nomeadamente a resistência à compressão puntiforme ou índice de resistência à carga pontual ($I_{s(50)}$), a velocidade de propagação de ondas longitudinais (V_{PL}) e o valor Q de rebote do martelo de Schmidt. O primeiro foi obtido em teste destrutivo em máquina de compressão puntiforme portátil. Para a V_{PL} e Q, testes não destrutivos foram executados utilizando-se do equipamento Pundit para o primeiro e do martelo de Schmidt para o segundo.

Na compressão puntiforme, conforme a ISRM (2007), devem ser testados pelo menos 10 corpos-de-prova axial ou diametralmente, respeitando-se a relação altura (H) /diâmetro (D) e, ao final do procedimento, devem ser eliminados os dois maiores e os dois menores valores de $I_{s(50)}$ procedendo-se à média dos valores restantes.

Para o ensaio não destrutivo de determinação da V_{PL} , dois transdutores, um emissor e outro receptor são acoplados ao topo e base do CP cilíndrico fazendo passar por este uma onda longitudinal com frequência de 54 Hertz (Hz), de acordo com a ISRM (2007). A V_{PL} corresponderá à relação entre o comprimento do corpo-de-prova e o tempo gasto pela onda longitudinal para atravessá-lo de um transdutor ao outro, em metros por segundo (m/s). Para os materiais nos níveis de intemperismo W4 e W5, o ensaio foi realizado em blocos moldados por meio de trabalho de escavação e acabamento manuais.

O teste para medição da resistência ou dureza de Schmidt também é considerado um teste não destrutivo já que, macroscopicamente, não produz perturbações estruturais na rocha. Sua utilização é padronizada pela ISRM (2007) e pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (ASTM, 2014), consistindo o método na aplicação de uma energia de impacto sobre o corpo-de-prova e com gravação pelo próprio instrumento do valor de rebote, exclusivamente dependente das propriedades elásticas da rocha. Recomenda-se (ISRM, 2007) que sejam realizados pelo menos 20 impactos sobre o corpo-de-prova, podendo este ser cilíndrico ou em formato de bloco desde que esteja seguramente bem apoiado em uma base rígida pra que não haja interferência de vibrações e ressaltos durante a aplicação do êmbolo do martelo. Além disso, deve ser respeitado um distanciamento mínimo, de igual diâmetro da cabeça do martelo, entre os pontos de aplicação. No presente estudo, o teste do martelo de Schmidt foi realizado em corpos-de-prova cilíndricos para a rocha nos níveis de intemperismo W1 a W3 e em blocos maiores para a rocha já em estado avançado de intemperismo, níveis W4 e W5, dada a impossibilidade de extrair CPs cilíndricos deste material em função da sua friabilidade.

A resistência à compressão uniaxial para a rocha nos níveis intempéricos W1 a W3 seguiu as recomendações da ISRM (2007), enquanto para os níveis W4 e W5 seguiu a ASTM (2017), já que esta flexibilizada a realização do ensaio para corpos-de-prova em formato de bloco, o que foi um facilitador, uma vez que, manualmente, foi possível moldar CPs num formato aproximadamente cúbico e dentro das dimensões exigidas por esta norma. Os ensaios de resistência à compressão uniaxial simples, para obtenção do valor de σ_c , foram realizados a uma taxa de carregamento axial constante de 0.25 MPa/s, cerca de quatro vezes menor que a máxima taxa recomendada pela ISRM (2007) neste tipo de teste. Para os corpos-de-prova cúbicos, uma de suas superfícies foi pintada com um padrão característico, conforme Figura 2a, para que, durante o ensaio de compressão se fizesse uma filmagem focada nesta superfície (Figura 2b), como forma de tentar aplicar uma correlação digital por imagem ou *Digital Image Correlation* (DIC) entre o padrão de pintura e a deformação da superfície, na tentativa de se estimar para estes materiais mais frágeis o seu módulo de elasticidade.

A resistência à tração foi obtida pelo método brasileiro ou tração indireta, com recomendações dadas pela ISRM (2007). O arranjo típico obtido para estes ensaios é apresentado na Figura 2c. Foram confeccionados discos da rocha em estudo com relação H/D de 0.5. Para os níveis W1 a W3 os discos foram produzidos a partir do trabalho de serra e retificação dos CPs cilíndricos oriundos da extração mecânica, enquanto para os níveis W4 e

W5, os discos foram obtido por meio de moldagem com escavação e acabamento manuais. Neste ensaio a aplicação de tensão em uma faixa restrita do disco, posto diametralmente, ocorre devido ao uso de um mordente padronizado no método brasileiro, conforme Figura 2c, o qual melhor induz o corpo-de-prova à ruptura por tração.

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 uniaxial 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 2d. 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 o CP a ciclos sucessivos de 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. Portanto, nos ensaios para determinação da curva tensão vs. deformação foram realizados três ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento. Como critério, estabeleceu-se que os ciclos de carregamento sucessivos correspondessem a 40 %, 50 % e 60% da tensão máxima resistida para a rocha em cada grau de intemperismo (verificada em ensaio simples de compressão uniaxial), enquanto os descarregamentos ocorressem sempre até 10 % desta mesma tensão máxima, conforme parâmetros listados na Tabela 14. Ao final do terceiro 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.

Tabela 14 - Parâmetros estabelecidos para a condução do teste de compressão simples com medida de deformação axial e circunferencial, conforme o grau de intemperismo da rocha.

| | ^{1*} GI: | W1 | W2 | W3 |
|------------------------------------|-------------------------|-------|------|------|
| | % da ^{2*} Frup | | | |
| Carregamentos (kN) | 40% | 71.5 | 57 | 16.3 |
| | 50% | 89.4 | 71.3 | 20.4 |
| | 60% | 107.2 | 85.6 | 24.5 |
| Descarregamento (kN) | % da Frup | | | |
| | 10% | 17.9 | 14.3 | 4.1 |
| Taxa de carregamento | kN/s | 0.3 | | |
| | MPa/s | 0.168 | | |
| Taxa de deformação circunferencial | mm/s | 0.015 | | |

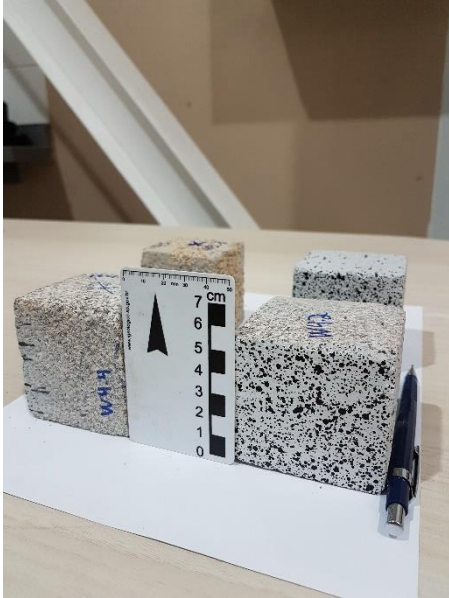
Fonte: O autor.

^{1*} – GI: Grau de intemperismo, conforme ISRM (1978); ^{2*} – Frup: Força máxima na ruptura verificada em ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Ressalta-se que, após cálculos e testes preliminares, foi definida uma taxa de carregamento fixa para os três ciclos de carregamento e descarregamento, que fosse aplicável aos três níveis de intemperismo, de modo a otimizar o ensaio, respeitando o limite máximo recomendado pela ISRM (2007) de 1 MPa.

Para cálculo das constantes elásticas adotou-se a metodologia proposta pela ISRM (2007). Neste método o módulo de elasticidade médio (E_m) da rocha é calculado a partir da inclinação da porção mais ou menos linear da curva tensão deformação nos trechos de carregamento, desprezando-se o primeiro carregamento e considerando-se que os ciclos se iniciam a partir do primeiro descarregamento. O coeficiente de Poisson é determinado a partir da razão entre o módulo de elasticidade e a inclinação da porção mais ou menos linear da curva tensão vs. deformação circunferencial.

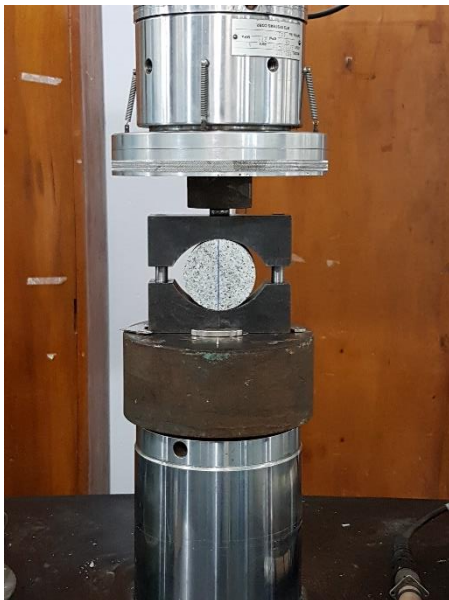
Figura 2 - a) blocos confeccionados manualmente e pintados com padrão para aplicação da metodologia DIC; b) arranjo do ensaio de compressão uniaxial com filmagem para aplicação de DIC; c) arranjo do ensaio brasileiro de tração indireta; d) instrumentação de corpo-de-prova com extensômetros axiais e circunferencial para medida de deformação em ensaio de compressão uniaxial.



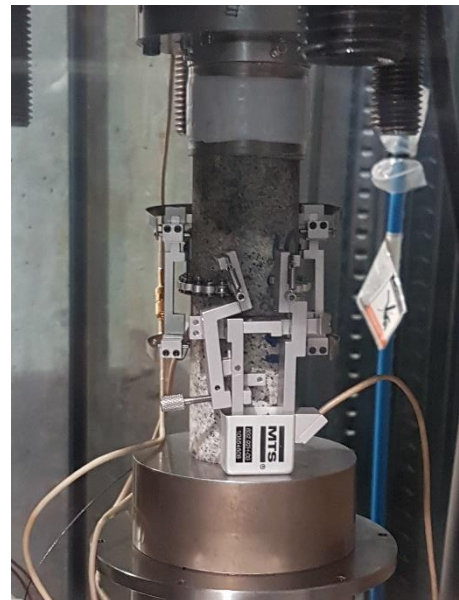
a



b



c



d

Fonte: O autor

3.3. Interpretação dos resultados e correlações

Finalizadas as caracterizações e análises em campo e laboratório e estando de posse dos resultados, as propriedades mineralógicas, físicas e geomecânicas da rocha foram detalhadamente discutidos e comparados com o observado na literatura para outras pesquisas abrangendo rochas graníticas pelo mundo.

As propriedades de engenharia mais relevantes à caracterização da matriz rochosa, foram correlacionadas e suas propostas comparadas à correlações apresentadas por outros autores. Além disso, várias correlações propostas na literatura foram testadas para estimar os valores das propriedades de engenharia da rocha objeto deste estudo propondo-se, ao final, uma classificação para cada correlação quanto à sua aplicabilidade para estimar as propriedades de engenharia observadas.

4 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

4.1. Área de estudo

Os cinco perfis de intemperismo caracterizados nesta pesquisa estão localizados na região do município de Cachoeiro de Itapemirim, estado do Espírito Santo, dentro de um raio de 30 Km a partir da sede deste município.

Geotectonicamente a região de Cachoeiro de Itapemirim insere-se no Orógeno Araçuaí compreendendo uma área dominada por rochas graníticas e metamórficas que bordeja a margem sudeste do Cráton São Francisco (Almeida, 1977). A grande maioria das rochas da área de estudo, a nível regional, estão incluídas na Suíte Santa Angélica e no Complexo Paraíba do Sul.

O perfil 1 está inserido (Figura 3) na porção sul do domínio interno do Orógeno Araçuaí, caracterizado por rochas granitoides sin a pós colisionais. (OLIVEIRA et al., 2018).

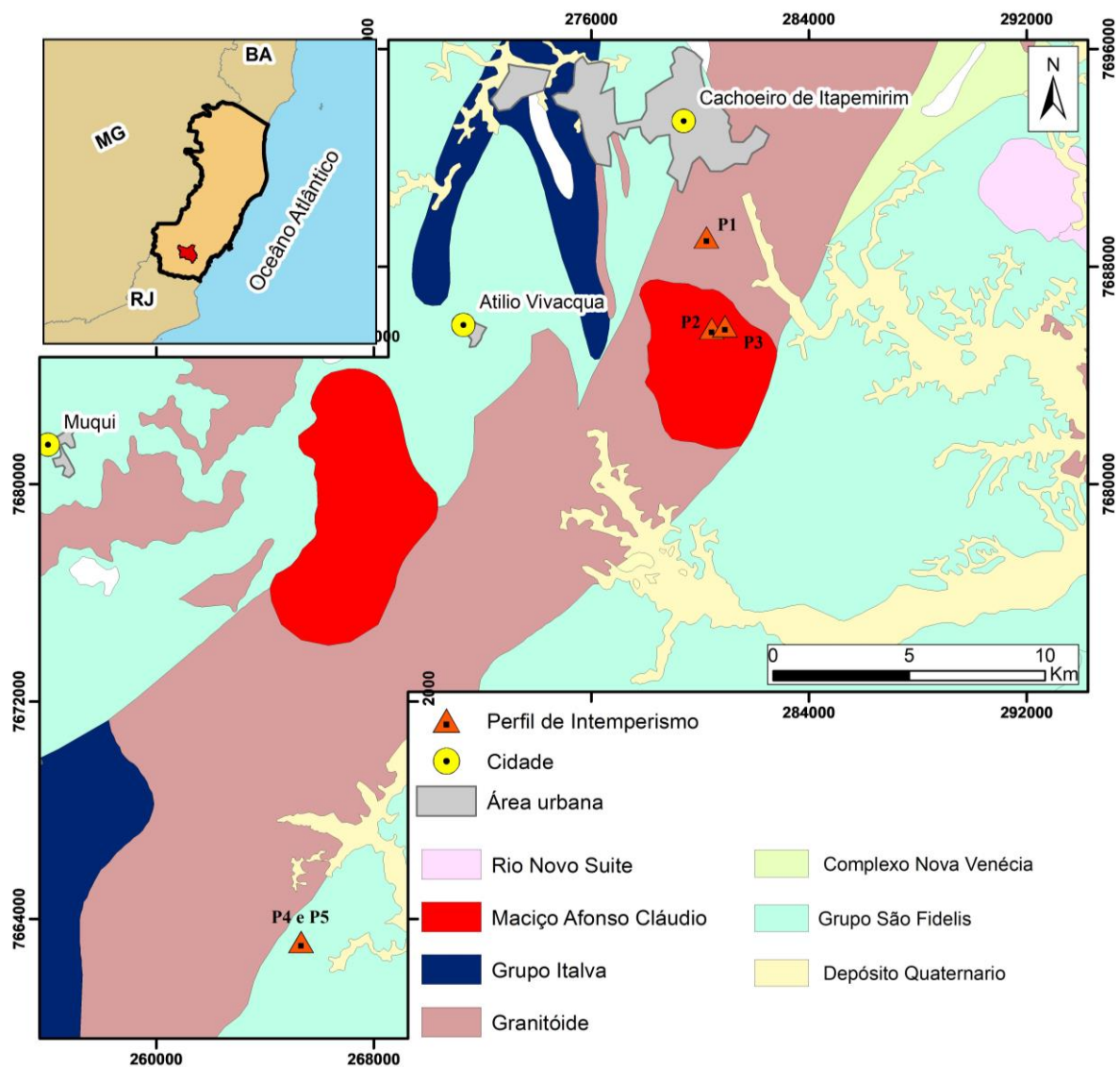
Os perfis 2 e 3, conforme Figura 3, fazem parte do Maciço Intrusivo Afonso Cláudio (MIAC), localizado na região serrana do estado do Espírito Santo, o qual caracteriza-se por ser um corpo ígneo intrusivo de formato circular com aproximadamente 73 km² de área, sendo um representante dos granitoides pós colisionais ou supersuíte G5 do Orógeno Araçuaí (VIEIRA e MENEZES, 2015). Recentemente, o mapeamento realizado por Oliveira et al. (2018a) na escala 1:25.000 detalhou ser o MIAC compreendido por 4 litologias predominantes (monzogranito, monzodiorito, quartzo monzonito e sienogranito) bordeadas por encaixantes de gnaisses aluminosos.

Os perfis 4 e 5 (Figura 3), possivelmente estão inseridos no Grupo São Fidélis, unidade pertencente ao Complexo Paraíba do Sul, caracterizada pela ocorrência principal de rochas metassedimentares cortadas por granitoides (NOGUERIA et al., 2012). Estes perfis encontram-se muito próximos do contato entre os granitoides citados por Oliveira et al. (2018) e as rochas metassedimentares do Grupo São Fidelis, não sendo possível precisar, devido à escala do mapeamento geológico disponível, a sua exata posição espacial dentro do contexto litológico da área de estudo.

A área de estudo, geomorfologicamente, apresenta diferentes características originadas por eventos tectono-estruturais, tipo litológico e fatores paleoclimáticos. A leste de Cachoeiro de Itapemirim ocorre uma área elevada onde predominam colinas e cristas que

evoluíram através da dissecação fluvial de rochas gnáissicas e quartzíticas. A oeste dessa região ocorre um domínio de topografia elevada correspondendo a uma área de predominância de rochas granitoides e gnáissicas com ocorrência de pontões que evoluíram por processos de erosão diferencial e deslocamento concêntricos. Nesta área que está localizada a Suíte Intrusiva Santa Angélica que gera ressaltos topográficos com ocorrência de vales estreitos, fortemente encaixados, e vertentes abruptas, onde ocorrem campos de blocos de rochas e matacões. (VIEIRA, 1997).

Figura 3 – Localização de Cachoeiro de Itapemirim e dos perfis de intemperismo (P1, P2, P3, P4 e P5) ora investigados, em relação ao contexto litológico.



Fonte: O autor.

5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

Para o sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim foi observado, no conjunto de todos os perfis e a partir da avaliação táctil-visual feita na amostragem realizada, que ocorrem em diferentes momentos e locais todos os níveis de intemperismo diferenciados pelo método proposto pela ISRM (1978). Há de se destacar que esse enquadramento quanto à classe de intemperismo pela proposta da ISRM, assim como em muitas das demais metodologias qualitativas revisadas até aqui, pode levar, por vezes, à diferenças de classificação entre observadores dada a percepção e experiência de cada um. Porém, em geral, diferentes pesquisadores a partir da análise do mesmo material tendem a convergir nesta delimitação das classes de intemperismo. O enquadramento proposto para o sienogranito quanto aos seus níveis de intemperismo observados em campo é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Enquadramento do sienogranito quanto aos níveis de intemperismo.

| TERMO | DESCRIÇÃO | ^{1*} GI |
|-----------------------------|---|------------------|
| SÃO | Nenhum sinal visível de alteração da matriz; em escala macro as discontinuidades não apresentam descoloração, porém ao microscópio observa-se leve descoloração de biotita. | W1 |
| LEVEMENTE INTEMPERIZADO | Macroscopicamente observa-se descoloração por toda a matriz da rocha e sinais de alteração de feldspatos e biotitas. Esta última apresenta sinais de oxidação. As discontinuidades apresentam descoloração | W2 |
| MODERADAMENTE INTEMPERIZADO | Menos da metade da matriz da rocha está decomposta e, ou, desintegrada à condição de solo. No maciço ocorre rocha sã e materiais muito descoloridos que, juntos, formam um arcabouço descontínuo, heterogêneo e com <i>corestones</i> . | W3 |
| MUITO INTEMPERIZADO | Mais da metade da matriz da rocha está decomposta, alterada, porém não na condição de solos. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo, heterogêneo e com <i>corestones</i> . | W4 |
| COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO | Toda a matriz da rocha está decomposta mas nem toda ela 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 da matriz da rocha está destruída. Há grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado. | W6 |

Fonte: ISRM, 1978.

1* - GI: Grau de intemperismo

Vale ressaltar que apesar de existirem os materiais intermediários entre os níveis de intemperismo em escala de maciço, não foi possível fazer a amostragem destes e, por consequência, enquadrá-los pela metodologia da ISRM (1978), dado que muitas vezes possuíam pequena espessura ou se encontravam em meio a transições abruptas. Essas transições entre níveis de intemperismo ficam mais nítidas nas diferentes camadas concêntricas, ainda que pouco espessas, que se desdobram na alteração esferoidal sobre os *corestones*, para os quais se propõe adiante uma discussão mais elaborada, dada a sua importância como elemento sempre presente nos perfis observados.

Na Tabela 16 apresenta-se também dados de teste da matriz para cada classe de intemperismo identificada, baseado no uso de ferramentas simples como o martelo geológico e um canivete. Este tipo de informação pode ser útil para uma rápida determinação e delimitação, *in loco*, dos materiais quanto ao seu estado de intemperismo juntamente com as características tátil-visuais descritas na Tabela 15.

A caracterização morfológica compreendeu os elementos que compõem geometricamente os perfis de intemperismo do sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim bem como os tipos de materiais, a delimitação de camadas e ou setores de aspecto físico semelhante, a descrição dos materiais quanto ao seu nível de intemperismo e propriedades reconhecíveis por meio de simples análise tátil-visual.

Os resultados mostram, em geral, que o desenvolvimento dos perfis de intemperismo ora investigados é fortemente controlado pelas estruturas geológicas (juntas e fraturas) e pela contínua exposição das camadas subsuperficiais aos agentes intempéricos devido à acelerada dinâmica, no tempo geológico, da modificação do relevo pela erosão e o transporte dos materiais superficiais. Essa velocidade de denudação do relevo pode ser atribuída, principalmente, à geomorfologia local, caracterizada por topografia acidentada e vales fortemente encaixados, e à elevada precipitação média anual na área de estudo, de 1083.6 milímetros por ano de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019).

Tabela 16 - Cadastro de testes da matriz para simples reconhecimento e descrição do sienogranto quanto à sua coerência.

| GI | Som do martelo | Aspecto dos minerais | Estado dos grãos | Fragilidade da Matriz |
|----|------------------------|--|---|--|
| W1 | Claro, agudo melodioso | Brilho e preservado; sem descoloração. | Extremamente embricados. | Com muita dificuldade solta lascas milimétricas ao golpe do martelo; testemunhos recuperáveis por extrator. |
| W2 | Claro agudo | Leve descoloração; sinais de oxidação. | Muito embricados; com muita dificuldade de arrançar-se grãos de biotita e feldspato por canivete. | Com dificuldade o golpe do martelo produz lascas milimétricas a centimétricas; testemunhos recuperáveis por extrator. |
| W3 | Abafado | Descoloração visível em toda a matriz; feldspatos e biotita alterados | Com alguma dificuldade é possível arrancar todos os grãos com canivete. | Com alguma dificuldade o golpe do martelo produz pedaços centimétricos; testemunhos recuperáveis por extrator podem apresentar alguma perda de grão. |
| W4 | Muito abafado | Muito descolorido; início de argilização. | Todos os grãos podem ser arrancados com alguma dificuldade pela unha. | Escarificável ao canivete; com alguma dificuldade pode ser desfragmentado pelas mãos; testemunho não é recuperável via extrator a úmido. |
| W5 | Abafado para oco | Totalmente descolorido, com tons de laranja e avermelhado; sinais de lixiviação. | Todos os grãos são arrancados facilmente pela unha. | Facilmente fragmentado pelas mãos e em água; não é possível recuperar testemunhos por extração mecânica. |

A seguir, são discutidos os aspectos gerais de cada um dos perfis de intemperismo caracterizados, destacando-se feições morfológicas e a distribuição das classes de intemperismo, de acordo com as Figuras 4 a 9.

Perfil 1

Tipo de ocorrência: Encosta; Talude de Corte e Afloramento

Figura 4 - Aspecto geral do perfil 1, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linhas brancas) e demarcações das discontinuidades (linhas vermelhas).



Fonte: O autor.

A rocha é um sienogranito. O perfil não segue uma sequência contínua e lógica de intemperismo vertical nem horizontalmente; ocorrem pelo menos cinco níveis de intemperismo (W1, W2, W3, W4 e W6); existe uma camada de solo (3 - 4 metros de espessura) bem desenvolvido com existência de cobertura vegetal de sistema radicular raso; a faixa de rocha alterada, imediatamente abaixo do solo, possui entre 2 e 3 m (metros); o saprolito espesso varia de 2 a 5 m; a rocha fresca inicia a uma profundidade entre 7 e 12 m do topo do perfil; as feições mais comuns no saprolito são os *corestones* os quais possuem o maior lado variando entre 1 e 8 metros e razão rocha/solo entre 0.6 e 0.8. Dentre todos os perfis estudados é o único que apresenta algumas discontinuidades com paredes preservadas, sendo em sua maior parte subparalelas ao relevo, sugerindo serem juntas de alívio, com material de preenchimento arenoso, cimentante, na discontinuidade principal; a fábrica e

textura estão preservados ao longo de todo o saprolito e destruídos na camada de solo; a rocha são ocorre em maior parte como núcleo espesso dos *corestones*; as demais classes de intemperismo ocorrem nas bordas dos *corestones*, em espessuras que variam de 1 a 15 centímetros (cm); na descontinuidade principal, a abertura varia de 3 a 7 cm.

Perfil 2:

Tipo de ocorrência: talude de corte e afloramentos.

Figura 5 - Aspecto geral do perfil 2, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linhas brancas) e demarcações das descontinuidades (linhas vermelhas).



Fonte: O autor.

A rocha é um sienogranito. O perfil esboça uma sequência de intemperismo totalmente difusa horizontal e verticalmente; razão rocha/solo entre 0.7 e 0.8; apresenta camada de solo residual jovem de 1 a 2 m de espessura, com um sistema radicular raso (porém mais profundo do que aquele encontrado no perfil 1) e uma vegetação arbustiva de pequeno porte; a rocha no grau de intemperismo W5 ainda mantém sua textura original, porém a fabrica não é facilmente reconhecível; abaixo do solo uma camada de 2 a 4 metros de rocha intemperizada contem blocos em grau de intemperismo variado (W4, W5 e W6); os *corestones* novamente são as feições mais abundantes, variando sua maior dimensão entre 1 e 10 metros; o espaçamento entre os *corestones* sugere a existência de fraturas e juntas com espaçamento variando de 1 a 4 metros e abertura de 3 a 90 centímetros (cm); nos *corestones* seccionados é perceptível o desenvolvimento de camadas externas em pelo menos dois graus de intemperismo maiores que o núcleo fresco; é visível a esfoliação ou alteração esferoidal em todos os *corestones*.

Perfil 3:

Tipo de ocorrência: talude de corte

Figura 6 - Aspecto geral do perfil 3, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linhas brancas) e demarcações das descontinuidades (linhas vermelhas).



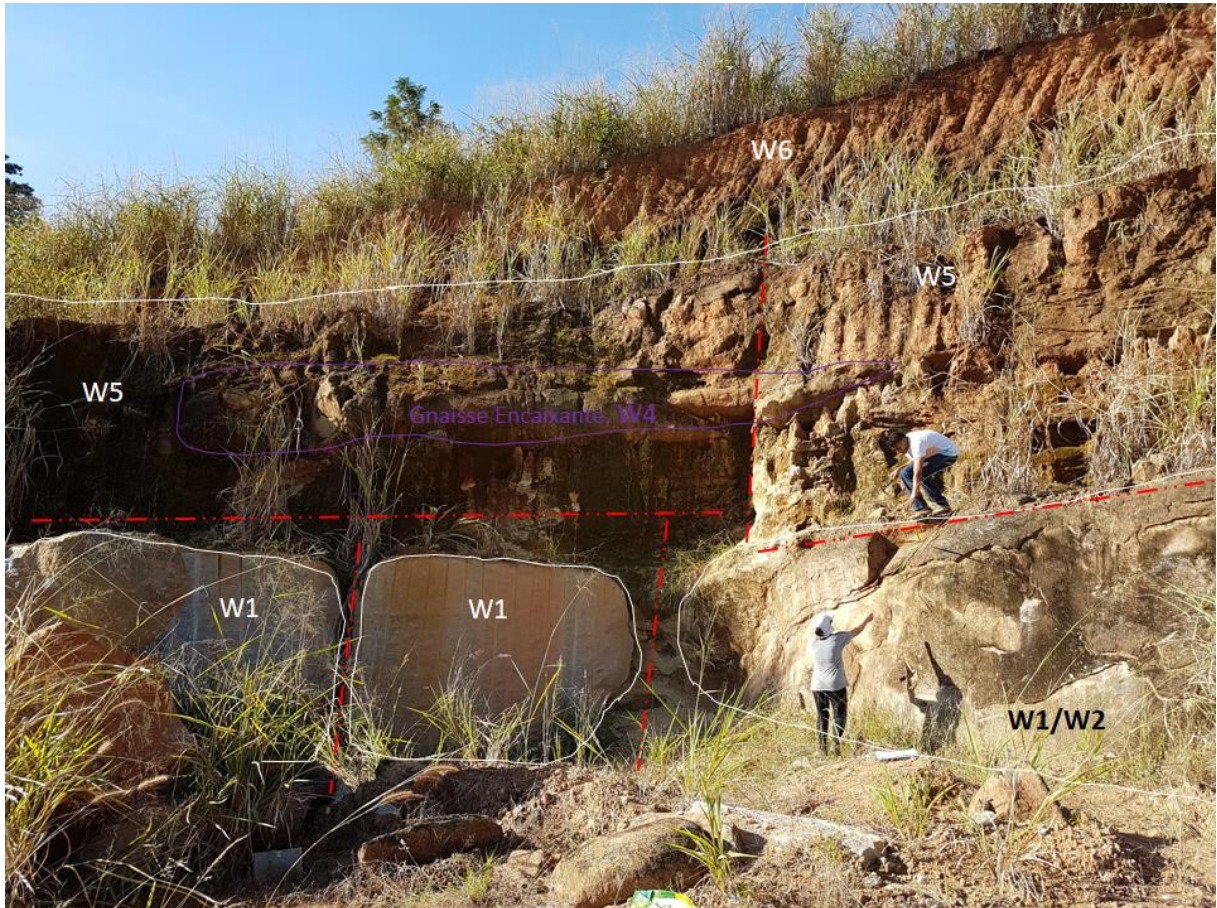
Fonte: O autor.

A rocha é um sienogranito. Há uma descontinuidade separando o saprolito da rocha sã (inalterada), na base do perfil, sugerindo um controle local do intemperismo por esta estrutura; as mudanças no grau de intemperismo são abruptas; a rocha sã (W1) faz contato, sem transição gradual, com a rocha extremamente intemperizada a solo residual; a camada de solo envolvendo os *corestones* varia de 1 a 9 m de espessura; presença de sistema radicular de até 2 m de profundidade a partir superfície do terreno; a camada de rocha extremamente intemperizada (W5) tem espessura de 3 m, sua textura está praticamente toda destruída; transição entre saprolito e solo residual é descontínua; presença de *corestones* com alteração esferoidal evidente, com dimensões variando de 2 a 15 m; a distribuição dos *corestones* sugere uma rede de descontinuidades paralelas ora verticalmente ora horizontalmente; razão rocha/solo entre 0,5 e 0,6; ocorrem, neste arcabouço descontínuo, materiais nos graus de intemperismo W1, W2, W5 e W6.

Perfil 4:

Tipo de ocorrência: encosta e talude de corte

Figura 7- Aspecto geral do perfil 4, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linhas brancas) e demarcações das discontinuidades (linhas vermelhas).



Fonte: O autor

A rocha é um sienogranito; ocorrem transições abruptas no saprolito; camada de solo residual (W6) varia de 1 a 2 m com cobertura vegetal rasteira e sistema radicular de baixa penetração (menos que 30 cm); abaixo segue uma camada da rocha encaixante (possivelmente Gnaíse ou Migmatito) extremamente intemperizada (W5), mas com foliação preservada, de 2 a 3 m de espessura; em seguida tem-se o saprolito de até 3 m de espessura com presença de *corestones* (de 3 a 6 m) cujo grau de intemperismo varia entre W1 e W2; razão rocha/solo entre 0.4 e 0.5; as discontinuidades principais correspondem à rede fraturas e juntas entre os *corestones* e que agora encontram-se preenchidas por solo residual.

Perfil 5:

Tipo de ocorrência: talude de corte e afloramento

Figura 8 - Aspecto geral do perfil 5, com delimitações quanto ao grau de intemperismo (linhas brancas) e demarcações das discontinuidades (linhas vermelhas).



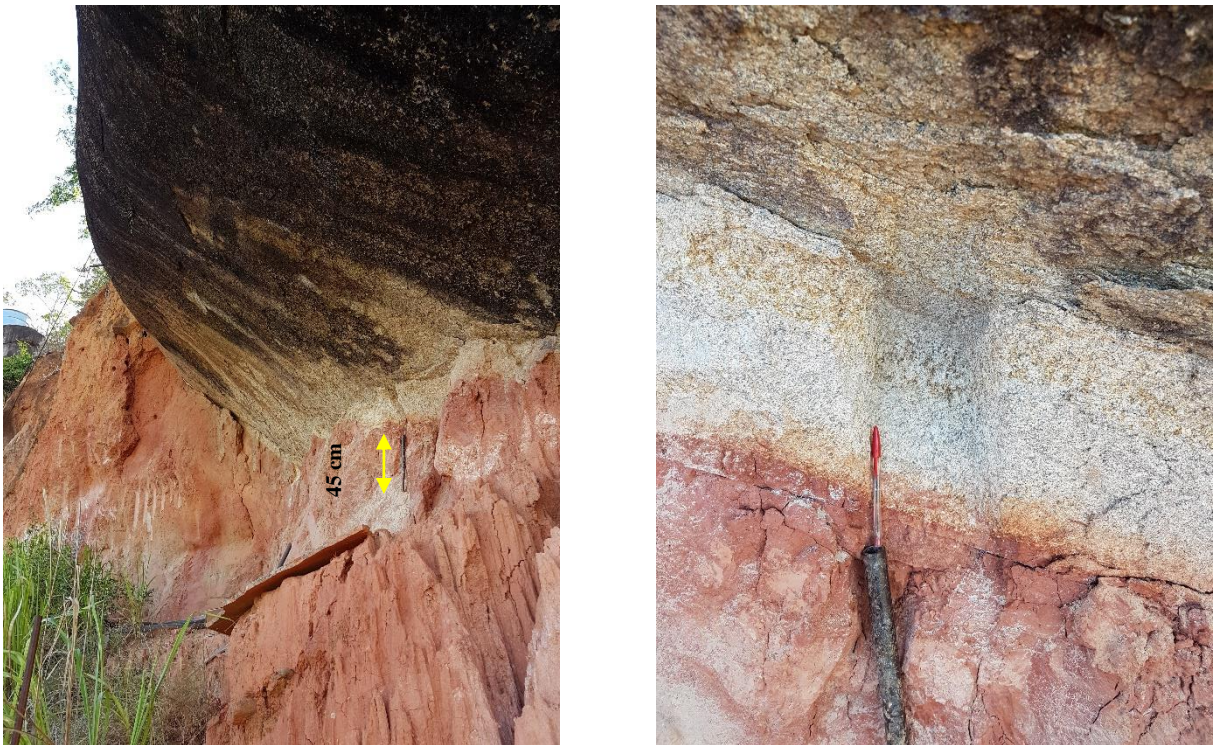
Fonte: O autor.

A rocha é um sienogranito; o intemperismo distribui-se de maneira heterogênea horizontal e verticalmente; as transições são abruptas; camada de solo residual (W6) estende-se da superfície até no máximo 13 m de profundidade variando muito sua espessura horizontalmente; entre os *corestones* preenchem as juntas um material ora muito alterado (solo residual) ora fragmentado (possíveis detritos rolados em função do corte do talude); os *corestones*, são proeminentes, suas dimensões variam de 3 a 22 m e apresentam alteração esferoidal com camadas (entre 5 e 10 cm de espessura) de material mais alterado que o núcleo em rocha sã; razão rocha/solo entre 0.8 e 0.9.

Dentre as feições morfológicas observadas, os *corestones* destacam-se como elemento mais característico dos perfis de intemperismo estudados. Como já foi discutido, os

corestones surgem a partir do intemperismo diferencial em arestas de blocos delimitados por juntas verticais e horizontais, sofrendo abaulamento e posteriormente um deslocamento concêntrico devido ao intemperismo se processar de maneira mais uniforme por toda a matriz do bloco, caracterizando a alteração esferoidal. Em alguns dos perfis estudados estas feições foram observadas com detalhe em escala de matriz verificando-se que, quanto mais abaulado é o material mais bem definida é a gradação das transições entre os diferentes níveis de intemperismo observados nas camadas concêntricas de alteração esferoidal. A Figura 9 mostra um dos *corestones* do perfil 3 em diferentes ângulos e a Figura 10 mostra em detalhe a gradação do intemperismo em seu interior, ao longo de suas camadas concêntricas.

Figura 9 - Aspectos do corestone do perfil 3, em diferentes ângulos.

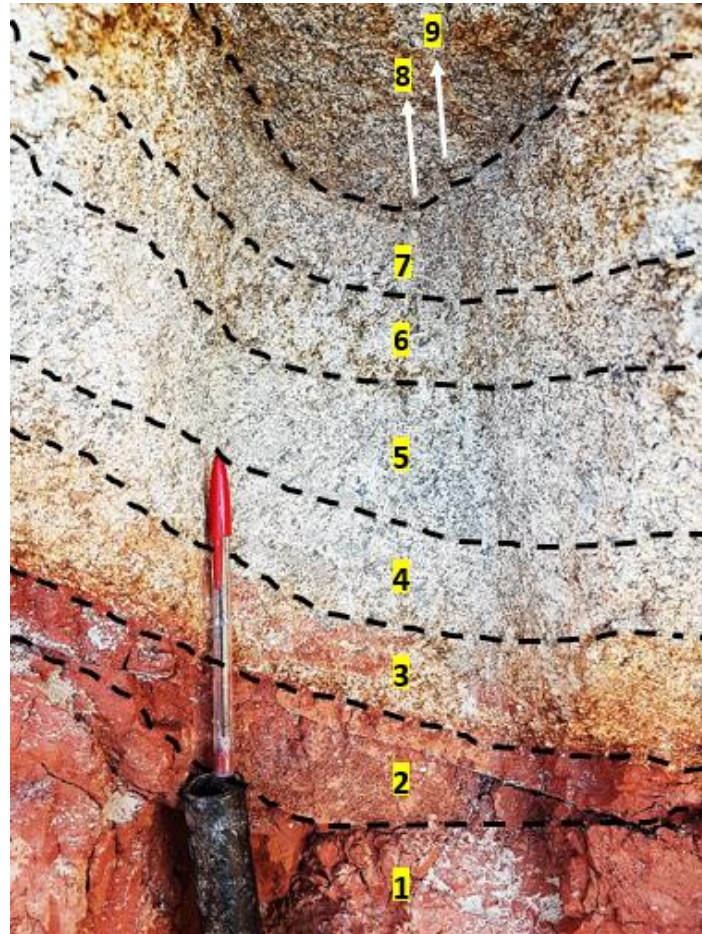


Fonte: O autor.

Analisando estas camadas da Figura 10 quanto à intensidade de descoloração da matriz, alteração de feldspatos e biotita e facilidade de arrancamento dos grãos ao canivete e unha, propôs-se uma delimitação destas transições quanto aos prováveis graus de intemperismo em que se encontram, conforme Tabela 17. Contudo, devido à limitada espessura de cada uma dessas camadas transicionais, não foi possível coletar amostras para realização de testes de laboratório. Por essa razão, deixa-se aqui a sugestão para que as propriedades mecânicas dos *corestones* em suas diferentes camadas de alteração esferoidal sejam objeto de estudo futuro,

dado que são estas feições as que, possivelmente, à um esforço solicitante, suportarão as maiores tensões aplicadas quando comparado ao restante do maciço, uma vez que na maioria dos perfis de intemperismo estudados este constitui-se basicamente por *corestones* e solo residual na profundidade de interesse para projetos de engenharia de subsuperfície.

Figura 10 - Camadas concêntricas de alteração esferoïdal observadas no corestone do perfil 3, com visível transição gradativa.



Fonte: O autor

Por serem as características mais importantes e que melhor descrevem os perfis de intemperismo estudados na escala de maciço rochoso, apresenta-se na Tabela 18 um breve resumo sobre as discontinuidades, os corestones (feição mais marcante nos perfis) e a razão rocha solo ou RSR (*Rock Soil Ratio*) observados em cada perfil individualmente, com base na metodologia adotada por Abad et al. (2016).

Tabela 17 - Descrição de cada uma das camadas de intemperismo observadas no corestone da Figura 10, localmente.

| Camada | Espessura (cm) | Descrição | ^{1*} GI |
|--------|----------------|--|------------------|
| 1 | > 100.0 | Solo residual; matriz completamente destruída e decomposta; coloração avermelhada para ferrugem; nota-se, raramente, algum material orgânico. | W6 |
| 2 | 4.0 - 6.0 | Transição entre solo residual e rocha extremamente intemperizada; a matriz está praticamente toda decomposta à condição de solo; algumas poucas estruturas da matriz estão preservadas. | W5/W6 |
| 3 | 3.0 - 4.0 | Rocha extremamente intemperizada; os grãos se desprendem com o passar da unha; boa parte dos grãos de quartzo estão preservados; demais minerais estão muito a completamente alterados. | W5 |
| 4 | 3.0 - 4.0 | Transição entre rocha extremamente intemperizada e rocha muito intemperizada; os grãos são facilmente arrancados da matriz com o passar da unha; feldspatos e biotita estão muito alterados. | W4/W5 |
| 5 | 4.0 - 7.0 | Rocha muito intemperizada; os grãos se desprendem com alguma dificuldade ao passar da unha; facilmente escarificável por canivete; feldspatos (mais intensamente) e biotitas seguem se alterando; a matriz está totalmente descolorida. | W4 |
| 6 | 6.0 - 8.0 | Transição entre rocha muito intemperizada e moderadamente intemperizada; com dificuldade arranca-se alguns grãos ao passar da unha; escarificável por canivete; feldspatos e biotitas seguem se alterando; a matriz está totalmente descolorida. | W3/W4 |
| 7 | 2.0 - 5.0 | Rocha moderadamente intemperizada; dificilmente arranca-se algum grão com o passar da unha; com muita dificuldade é escarificada por canivete; visível descoloração com aspecto de oxidação; entre 80 e 90 % da matriz está descolorida; feldspatos muito alterados; a maior parte da biotita está se alterando. | W3 |
| 8 | 5.0 - 10.0 | Rocha levemente intemperizada; a descoloração se estende entre 60 e 80 % da matriz; com alguma dificuldade produz-se riscos por canivete; feldspatos estão se alterando; biotitas estão pouco alteradas. | W2 |
| 9 | > 100.0 | Rocha sã; não é possível arrancar grãos com canivete; descoloração praticamente inexistente; brilho dos minerais está em sua maior parte preservado; apenas feldspatos apresentam algum leve sinal de alteração. | W1 |

Fonte: O autor.

^{1*} - GI: Grau de Intemperismo (ISRM, 1978).

Tabela 18 - Características dos principais elementos descritores dos perfis de intemperismo estudados, em escala de maciço.

| Perfil | Juntas | | | | | | Corestones | | RSR |
|--------|-----------------------|---|---|--------------------|------------------|-----------------------------|----------------|---------------------|-----------|
| | ^{1*} Direção | | | Espaçamento (m) | Abertura (cm) | ^{2*} Preenchimento | Tamanho (m) | ^{3*} Forma | |
| | V | H | I | | | | | | |
| 1 | 3 | 5 | 2 | 0.8 - 9 | 3 - 7 | Ar | 1 - 8 | A | 0.6 - 0.8 |
| 2 | 7 | 6 | 4 | 1 - 4 | 3 - 90 | Sl | 1 - 10 | R, A | 0.7 - 0.8 |
| 3 | 5 | 3 | 2 | 0.9 - 9 | 5 - 500 | Sl | 2 - 15 | R, A | 0.5 - 0.6 |
| 4 | 3 | 2 | 0 | 4 - 5 | 5 - 80 | Sl | 3 - 6 | R, A | 0.4 - 0.5 |
| 5 | 4 | 2 | 2 | 2 - 12 | 2 - 200 | Sl | 3 - 22 | A | 0.8 - 0.9 |

Fonte: O autor.

1* - Número de juntas por direção, sendo V – vertical, H – horizontal e I - inclinada; 2* - Tipos de preenchimento sendo Ar – arenoso e Sl – solo; 3* - Forma dos *corestones* sendo R- redonda e A – angular.

Uma observação muito importante a se fazer neste momento é a de que em todos os perfis caracterizados constata-se uma clara influência das atividades antrópicas, principalmente a atividade econômica de exploração de rochas ornamentais, na configuração geométrica destes perfis. Contudo, não é possível afirmar, nem mesmo quantificar, como isso pode ter influenciado na maior ou menor velocidade com que o intemperismo vem modificando os maciços rochosos naturais da região.

6 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

6.1. Caracterização petrográfica

A partir do modal obtido na descrição de lâminas petrográficas, conforme Tabela 19, para cada um dos níveis de intemperismo confirmou-se que a rocha objeto deste estudo é um sienogranito, baseado no sistema de classificação de Le Matrie et al. (2002).

Tabela 19 – Modal de composição mineralógica do sienogranito, em %.

| ¹ GI | Qtz | Pl | Mc | Bt | Ttn | Apt | Op | Zr | All | Cbt | Mus | Ser | Arg | Cl |
|-----------------|-----|----|----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| W1 | 17 | 17 | 49 | 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | - | 1 |
| W2 | 20 | 15 | 48 | 9 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | - | 2 | 2 | - | - |
| W3 | 20 | 12 | 42 | 9 | - | 0 | 2 | 0 | 0 | - | 2 | 8 | 6 | - |
| W4 | 15 | 12 | 46 | 9 | - | 0 | 3 | 0 | 0 | - | 3 | 5 | 7 | - |
| W5 | 14 | 7 | 33 | 10 | - | 0 | 2 | 1 | 0 | - | 2 | 13 | 18 | - |

Fonte: O autor.

*1 – Grau de Intemperismo (ISRM, 1978); Qtz – Quartzo, Pl – Plagioclásio, Mc – Microclina, Bt – Biotita, Ttn – Titanita, Apt – Apatita, Op – Mineraias opacos, Zr – Zircão, All – Allanita, Cbt – Carbonato, Mus – Muscovita, Ser – Sericita, Arg – Argilominerais, Cl – Clorita.

Pela interpretação das lâminas foi possível detalhar os aspectos texturais e estruturais do sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim e identificar os processos que ocorrem à medida em que avança o intemperismo sobre a rocha. Estes processos de evolução mineralógica da rocha encontram-se resumidamente descritos na Tabela 20. No Quadro 3 aponta-se as fotos tiradas ao microscópio para algumas feições petrográficas observadas bem como evidências de alguns dos processos de intemperismo relatados.

Em geral, a textura do sienogranito é equigranular, com granulação variando de fina a média (0.25 a 4.0 mm) e, localmente, porfirítica, com pórfiros de granulação grossa variando de 5.0 a 9.0 mm para a rocha sã, enquanto nos demais níveis de intemperismo (W2 a W5) estes pórfiros locais possuem granulação média, variando de 4.0 a 5.0 mm.

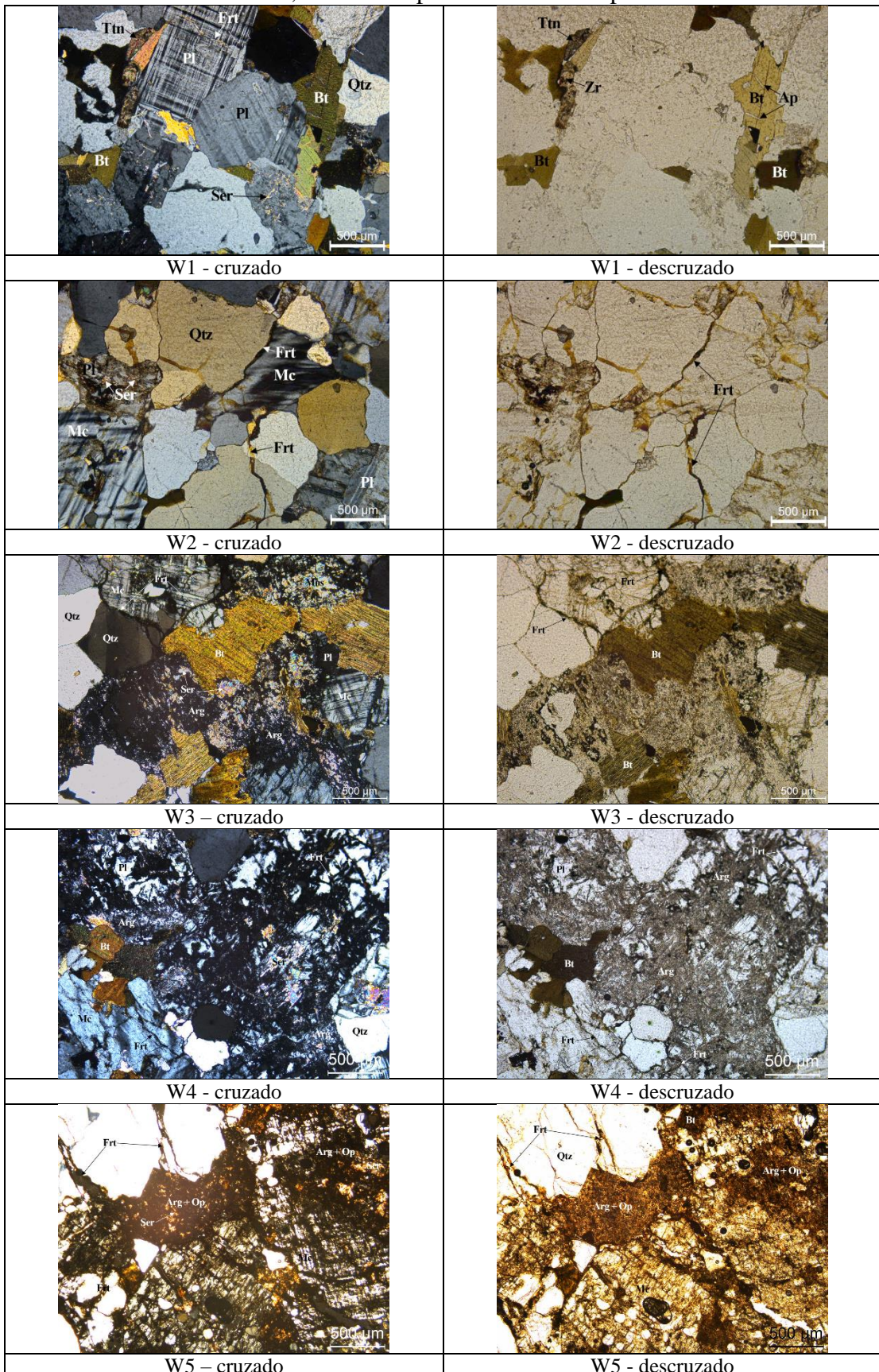
A descoloração da rocha é progressiva, acentuando-se a partir de W2 para W3, quando o intemperismo químico avança em detrimento do intemperismo físico. Este último é predominante apenas no estágio inicial de intemperismo, evidenciado principalmente pela abertura de microfissuras já existentes e o surgimento de novas microfissuras de W1 para W2. Portanto, fica caracterizado que mecanismos físicos predominam no início do intemperismo e, quando a rocha está na condição de médio intemperismo (W3), as alterações físicas tornam-se menos intensas ao passo que aumenta o controle do intemperismo da rocha pela decomposição química promovida, principalmente, pela água nas microfissuras, poros e ao

longo de algumas bordas de contato entre os grãos minerais que já encontram-se abertas devido à perda de da ligação entre estes.

Tabela 20 - Descrição de aspectos petrográficos do sienogranito nos diferentes níveis de intemperismo.

| 1*GI | Características estruturais e de intemperismo |
|------|--|
| W1 | Plagioclásio e microclina estão se alterando para sericita, muscovita e carbonatos (somente cristais de plagioclásio); ocorre algum preenchimento de fraturas e espaços de cristais de plagioclásio e microclina por carbonatos; alguns cristais de feldspato se alteram para sericita e de biotita para clorita; intemperismo produziu poucas e pequenas fraturas que, por vezes, encontram-se preenchidas por sericita e carbonato. |
| W2 | Plagioclásio e microclina estão se alterando para sericita e muscovita; alguns cristais de feldspato se alteram para sericita; não se observa biotita alterando para clorita, tal como em W1; intemperismo produziu poucas e pequenas fraturas, porém maiores que em W1, e aparentemente preenchidas por óxidos vermelhos e sericita (menos que em W1); apesar de mais escassos que em W1, cristais de titanita agora ocorrem quebrados e alterados. |
| W3 | Plagioclásio já se encontra muito alterado para sericita; microclina segue alterando para muscovita; cristais de feldspatos também já estão bastante alterados para sericita, muscovita e, possivelmente, para argilas; possivelmente os cristais desse tipo mais alterados são os de plagioclásio, que se tornaram mais escassos que em W1 e W2; apesar de não estarem mais se alterando para clorita, as biotitas começaram a se substituir; minerais opacos estão sendo substituídos por óxidos avermelhados; alguns cristais de quartzo apresentam extinção ondulante; já é possível identificar poros internos aos cristais mais alterados e nos contatos entre eles; as fraturas ocorrem em maior quantidade que em W2, porém não são muito grandes, com algumas se expandindo e cortando mais de um cristal; algumas poucas fraturas menores estão preenchidas por óxidos avermelhados e sericitas. |
| W4 | Possui menos plagioclásios alterados que nos níveis de intemperismo anteriores e, aparentemente, estão menos intemperizados que em W5; cristais de feldspatos também já estão bastante alterados para sericita, muscovita e argilominerais; os cristais de microclina também estão alterados (principalmente para muscovita), porém em menor grau que os cristais de plagioclásio e menos alterados que em W5; biotitas e minerais opacos, aparentemente, começaram a se substituir por óxidos avermelhados; existem fraturas em quantidade semelhante a W3 e W5, porém as fraturas aparentemente ocorrem contornando os cristais, como consequência do intemperismo; estas fraturas também são menos desenvolvidas que na lâmina W5; algumas fraturas são preenchidas por óxidos avermelhados e sericitas; algumas poucas fraturas são aparentemente preenchidas por argilas. |
| W5 | Plagioclásio já está muito alterado para micas e argilas e sua identificação em lâmina já tornou-se muito difícil devido ao seu avançado grau de intemperismo; muitos cristais de feldspato estão alterados para sericita (principalmente) e muscovita; os cristais de microclina já estão bem alterados, porém em menor grau que os cristais de plagioclásio e mais alterados que em W3; biotita está se substituindo por óxidos avermelhados; existem muitas fraturas interna aos cristais, com algumas se expandindo e cortando mais de um cristal. Existem mais fraturas que na lâmina W2 e W3, porém em número similar à W4; algumas fraturas são preenchidas por óxidos avermelhados e sericitas; algumas poucas fraturas são aparentemente preenchidas por argilas. |

Quadro 3 - Fotos ao microscópio petrográfico, com aumento de 5 x a nicóis cruzado e descruzado, para cada grau de intemperismo do sienogranito, destacando seus constituintes minerais e estruturas verificadas, bem como processos de intemperismo.



A descoloração da rocha é progressiva, acentuando-se a partir de W2 para W3, quando o intemperismo químico avança em detrimento do intemperismo físico. Este último é predominante apenas no estágio inicial de intemperismo, evidenciado principalmente pela abertura de microfissuras já existentes e o surgimento de novas microfissuras de W1 para W2. Portanto, fica caracterizado que mecanismos físicos predominam no início do intemperismo e, quando a rocha está na condição de médio intemperismo (W3), as alterações físicas tornam-se menos intensas ao passo que aumenta o controle do intemperismo da rocha pela decomposição química promovida, principalmente, pela água nas microfissuras, poros e ao longo de algumas bordas de contato entre os grãos minerais que já encontram-se abertas devido à perda de ligação entre estes.

Alguns índices petrográficos, obtidos a partir da simples análise de lâminas petrográficas, podem ser úteis para prever o grau de intemperismo do material bem como estimar, a partir de correlações, algumas propriedades físicas e mecânicas das rochas. Neste sentido, para o sienogranito, apresenta-se na Tabela 21 os valores obtidos para alguns destes índices petrográficos, nomeadamente o Índice Micropetrográfico (Imp) e o Índice de microfissuramento (Imf) propostos por Irfan e Dearman (1978), a razão Quartzo/Feldspato (Q/F) por Ruhe (1956) e o Índice de decomposição (Xd) apresentado em Lumb (1962).

Tabela 21 - Valores de Índices petrográficos para o sienogranito.

| ¹ GI | Imp | Imf | Imf _i (%) | Q/F | Xd |
|-----------------|------|------|----------------------|------|-------|
| W1 | 32.3 | 4.0 | 3.2 | 0.26 | 0.000 |
| W2 | 32.3 | 5.7 | 4.5 | 0.32 | 0.081 |
| W3 | 4.6 | 9.7 | 7.7 | 0.37 | 0.152 |
| W4 | 2.1 | 12.0 | 9.6 | 0.26 | 0.001 |
| W5 | 2.1 | 10.3 | 8.3 | 0.35 | 0.124 |

¹* GI - Grau de Intemperismo;

Os valores observados para os índices Q/F e Xd no início do intemperismo até a rocha medianamente intemperizada (W3) apresentam um comportamento crescente, refletindo a resistência do quartzo frente aos feldspatos (Plagioclásio e Microclina) neste estágio ocorrendo, em proporção na lâmina, um aumento de 3.0 % e uma diminuição de 12.0 % para quartzo e feldspatos, respectivamente, entre os níveis de intemperismo W1 e W3. Ao contrário de Khanlari et al. (2012), o aumento destes índices não foi contínuo, havendo uma diminuição em W4 seguida de um aumento em W5 para um valor próximo daquele observado em W3. O que pode justificar isso, ao se analisar o modal para o sienogranito bem como os processos de intemperismo predominantes em W4 é o fato de que neste nível de

intemperismo, em lâmina, a contagem aponta um aumento dos feldspatos em 4.0 % ao passo que o quartzo diminuiu em 5.0 % de W3 para W4. Além disso, plagioclásio e microclina apresentam-se menos alterados em W4 quando comparados ao observado na lâmina do sienogranito W3, podendo ter ocorrido algum equilíbrio destes minerais nestes condições de intemperismo, influenciado talvez pela variação climática (o que demandaria um estudo mais aprofundado para se investigar esta possível influência climática temporal) não se alterando mais na mesma velocidade com que se alteravam em W3. Contudo, em W5, ambos os feldspatos voltam a sofrer grande alteração química com o plagioclásio se alterando, principalmente, para micas e argilas, enquanto o quartzo permaneceu sem se alterar, apenas aumentando seu microfraturamento devido ao alívio das pressões em suas bordas pelo enfraquecimento da ligação dos minerais e consequente desagregação.

O índice micropetrográfico tem por objetivo discriminar sucessivos estágios de intemperismo a partir da simples relação entre o percentual de minerais são e minerais alterados, obtido a partir da contagem modal em lâmina petrográfica. Portanto, irá refletir os estágios de alteração química sobre o material. Quanto menor for seu valor, maior é o grau de intemperismo químico, mais minerais primários se alteraram para secundários. Como já vem sendo discutido, para os níveis intempéricos W1 e W2 do sienogranito são praticamente desprezíveis as mudanças de ordem química aos olhos do observador em lâmina petrográfica, não havendo variação na contagem modal para o percentual de minerais são e alterados.

De acordo com a Tabela 20 não há variação do Imp neste estágio inicial do intemperismo, permanecendo uma relação minerais são/minerais alterados de 97.0%/3.0%. Isso não significa que não há diferença entre o nível de intemperismo ou que deveriam ter a mesma classificação aquilo que até aqui se chamou de W1 e W2 pois, apesar de não haver variação no Imp, há variação na contagem modal para um mesmo mineral, porém mantendo-se a proporção da razão entre minerais são e alterados e, além disso, existem as mudanças de ordem física entre estes dois níveis. Ainda sobre as poucas mudanças químicas nesse estágio inicial de intemperismo, o índice mais confiável, tanto micro quanto macroscopicamente, é a visível descoloração de W1 para W2, devido à discreta alteração inicial de biotita e feldspatos. Posteriormente, ocorre uma queda expressiva no Imp, diminuindo 93.0% de W2 para W4, denotando a intensidade das alterações químicas nesta faixa do intemperismo sobre o sienogranito. Quando a maior parte dos minerais já se transformou em minerais mais estáveis às novas condições ambientais o valor do Imp volta a estabilizar, entre W4 e W5,

indicando que o material está adaptado a estas novas condições e que grande parte dos minerais (32%) já estão decompostos.

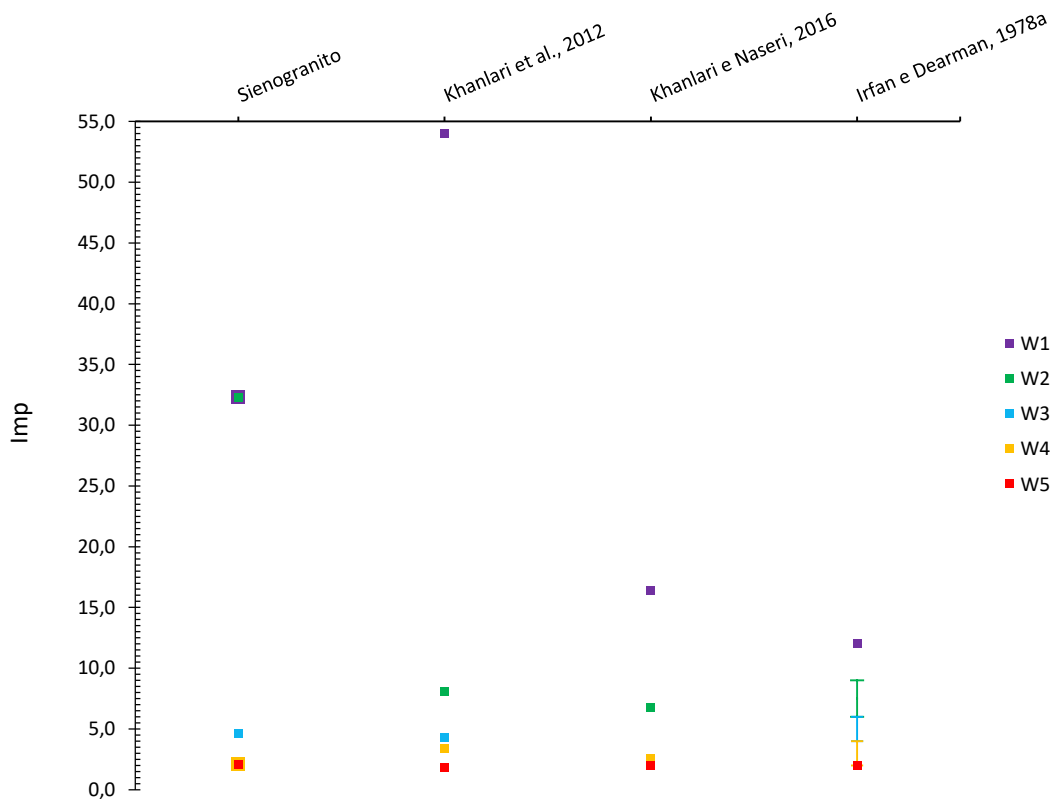
Quando comparado a outros trabalhos (Figura 11) o sienogranito e aquele estudado em Khanlari et al. (2012) foram mais resistentes às mudanças químicas no primeiro estágio de intemperismo (W1), apresentando um elevado valor de Imp, respectivamente 32.3 e 54.0. Porém, na transição para o segundo nível de intemperismo (W2), enquanto em Khanlari et al. (2012) os minerais são rapidamente desestabilizados e transformados em minerais secundários, no sienogranito o valor de Imp não varia, sendo um claro indicativo de que no estágio inicial de intemperismo deste material (W1 e W2) o intemperismo químico é pouco atuante, ocorrendo apenas alguma alteração de biotita e feldspato para clorita e sericita respectivamente, de acordo com a descrição das lâminas petrográficas. Enquanto em Khanlari e Naseri (2016) e Irfan e Dearman (1978a), as transformações minerais já estavam aceleradas na rocha sã, somente a partir do nível W3 as maiores mudanças na composição mineralógica do granito Cachoeiro ocorrem e nos níveis subsequentes aproxima-se dos valores dos demais autores estabilizando sua nova composição mineral.

O índice de microfissuramento consiste na contagem, em valor absoluto, do número de microfissuras e demais vazios que surgiram ou que foram modificados por ação intempérica. Originalmente (Irfan e Dearman, 1978a) a contagem deve ser feita ao longo de perfis de 10 (dez) milímetros traçados em lâminas petrográficas, procedendo-se a um valor médio para cada lâmina. Contudo, pela própria experiência, o observador pode trabalhar com perfis de outros tamanhos e, por este motivo, os resultados para este índice de alteração podem ser apresentados na forma de intensidade de microfissuramento (Imf_i), em porcentagem, para que seja factível a comparação entre diferentes autores dado a arbitrariedade de cada um quanto ao tamanho do perfil adotado. Neste caso e para este trabalho, a intensidade de microfissuramento foi calculada a partir da razão entre o número de microfissuras observadas no perfil e o número total de microfissuras observadas em todas as lâminas. Por este mesmo procedimento, os dados apresentados por Khanlari e Naseri. (2016) foram modificados a fim de se prover uma comparação com este trabalho.

Em valores absolutos (Tabela 15), o índice de microfissuramento (Imf) obtido para o sienogranito demonstra que existe um aumento progressivo do microfissuramento com o aumento do grau de intemperismo até W4, com o maior aumento, nesta ascensão, de W2 para W3 (70.0 %). Por outro lado, de W4 para W5, observa-se uma diminuição do Imf que pode

estar relacionada a duas possibilidades. Primeiro, ao arrancamento dos grãos minerais durante o processo de laminação da rocha que, nesta condição (W5), já é muito friável (solo), podendo mascarar a contagem real. E outra possibilidade a ser considerada é a de que a identificação das microfissuras assim como a de alguns minerais foi dificultada devido ao avançado estágio de alteração do material, podendo ter ocorrido, tal como verificado por Basu et al. (2009), uma camuflagem ao observador em microscópio da real densidade de fissuramento devido, principalmente, às argilas agora em maiores domínios da lâmina.

Figura 11 - Valores de Imp para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

No estágio inicial de intemperismo, de W1 para W2, apesar de ter ocorrido o menor aumento na contagem de microfissuras (42.5%), como já mencionado, entende-se que esta variação pode ter relação direta com as variações de algumas das propriedades de engenharia entre estes dois níveis de intemperismo, nomeadamente aquelas que traduzem o comportamento mecânico do material e, por este motivo, sua discussão será retomada adiante. Vale salientar que, ainda que seja um índice de intemperismo amplamente utilizado, o Imp possui, por vezes, caráter subjetivo devido à experiência do observador para a contagem e

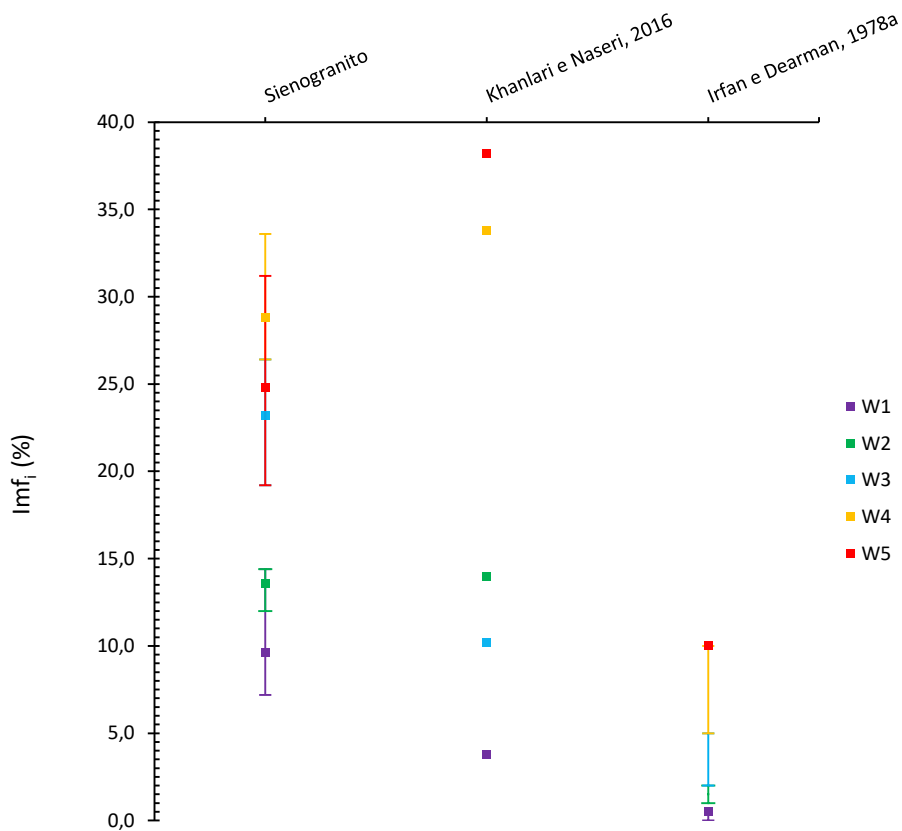
distinção das microfissuras, além do fato da dimensão e quantidade de lâminas avaliadas eventualmente não serem representativas da matriz de modo geral.

A descrição da lâmina petrográfica correspondente ao sienogranito extremamente intemperizado (W5) revela que existem incontáveis fissuras nos grãos da rocha, facilmente identificáveis nas fotos apresentadas no Quadro 3, por vezes atravessando mais de um mineral. Contudo, ao traçar o perfil para determinação do Imf_i , foram contabilizadas apenas aquelas que apresentavam clara evidência de serem produto do intemperismo, no caso as que estavam preenchidas ou que eram mais espessas no comparativo com a lâmina toda. Ainda assim, o desbastamento durante a laminação e o alto nível de alteração podem ter camuflado em partes a contagem destas microfissuras de intemperismo.

Ao analisar o gráfico da Figura 12 fica evidente que tanto para o sienogranito quanto para os granitos estudados por Khanlari e Naseri (2016) e Irfan e Dearman (1978a) a intensidade de microfissuramento aumenta com o intemperismo. Quando se compara estes trabalhos pela ótica das condições climáticas, intuitivamente, era de se esperar que os valores de intensidade de microfissuramento entre o sienogranito e o granito iraniano estudado por Khanlari e Naseri (2016) não apresentassem tamanha diferença, sendo este último 14.8 % e 35.1 % mais fissurado para W4 e W5, respectivamente.

Apesar de estar em uma região de clima subtropical, na área de estudo de Khanlari e Naseri (2016) verificou-se que o granito pouco se altera frente às condições climáticas, sendo o intemperismo mais fortemente influenciado pelas mudanças físicas e químicas decorrentes de atividades tectônicas e hidrotermais respectivamente. Portanto, a tectônica justifica os altos valores de microfissuramento do granito iraniano quando comparado ao sienogranito, principalmente para os níveis mais avançados de intemperismo. Em comparação ao trabalho de Irfan e Dearman (1978a) os valores médios de Imf_i para o sienogranito são sempre maiores do que os valores observados para o granito inglês demonstrando como os processos de intemperismo físico e químico em conjunto podem produzir mais transformações nas rochas de climas tropicais em relação às de clima temperado. Neste caso, o sienogranito chega a ter uma intensidade de microfissuramento 94.88 %, 89.0 %, 87.1 %, 75.7 % e 59.7 % vezes maior que a do granito estudado por Irfan e Dearman (1978a) para, respectivamente, W1, W2, W3, W4 e W5.

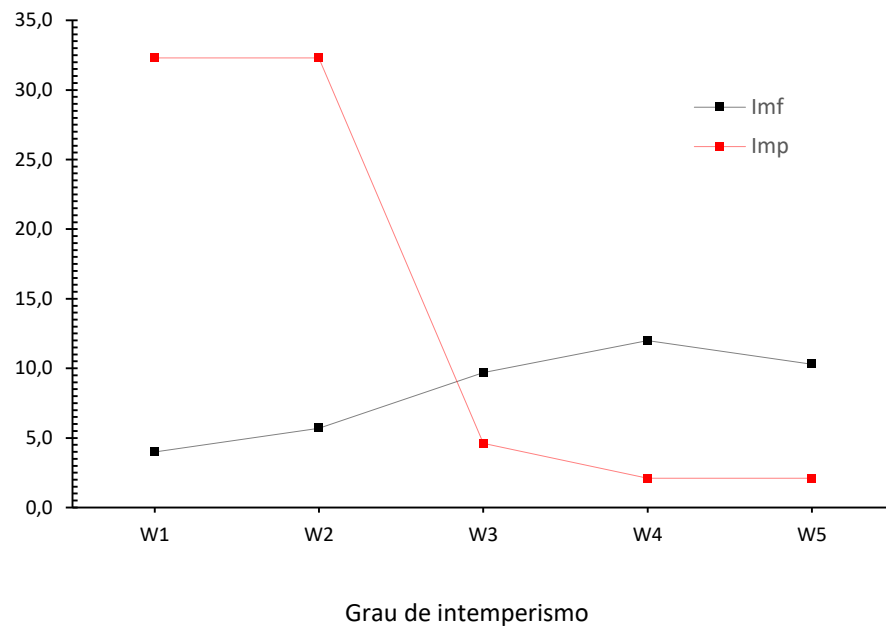
Figura 12 - Valores de Imf_i (%) para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

Na comparação entre os índices petrográficos de intemperismo e suas variações para os diferentes níveis de intemperismo do sienogranito, conforme gráfico ilustrado na Figura 13, e tendo em vista que Imp e Imf traduzem, em escala microscópica, respectivamente, as mudanças químicas e físicas promovidas pelo intemperismo, rapidamente percebe-se uma relação entres estes índices. Ao passo que a decomposição química aumenta, também aumentam a desintegração do material. Porém, esta última em menor proporção ou velocidade quando comparada àquela. As maiores variações em Imp e Imf são, respectivamente, de 70,0 % (aumento) e 85,0 % (diminuição) na transição da rocha levemente (W2) para moderadamente intemperizada (W3), denotando a maior sensibilidade do sienogranito para o intemperismo químico a partir deste nível de intemperismo.

Figura 13 - Variação de Imp e Imf com o avanço do intemperismo.



Fonte: O autor

7 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E GEOMECÂNICA

A seguir, apresenta-se uma discussão sobre as propriedades de engenharia do sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim, acompanhada de uma breve comparação com os valores coletados da literatura para outros trabalhos pelo mundo envolvendo rochas graníticas em diferentes níveis de intemperismo. Nesta discussão, para maior clareza e organização, as propriedades de engenharia foram agrupadas em índices físicos, propriedades índice e, por fim, propriedades geomecânicas.

7.1. Índices físicos

Os índices físicos representam propriedades físicas da rocha exclusivamente dependentes da sua composição mineral e da sua estrutura e que são facilmente obtidos a partir de simples ensaios padronizados para quantificar a matriz rochosa. Seu conhecimento é fundamental para a elaboração de projetos de engenharia que interna ou externamente submeterão a rocha à novas condições ambientais, tendo em vista que estas propriedades influenciarão diretamente o seu comportamento mecânico. Além disso, investigar as variações destas propriedades significa tentar entender também os processos naturais que, ao longo do tempo geológico, foram fundamentais para a evolução natural da rocha. Neste sentido, os índices físicos mais importantes e que neste trabalho foram avaliados para cinco níveis de intemperismo do sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim são a sua massa específica seca (γ_d), porosidade efetiva ou aparente (n_e), capacidade de absorção (α) e seu índice de vazios (e). Os valores de índices físicos observados para o sienogranito são (W1) à condição de rocha extremamente intemperizada (W5) são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores de índices físicos avaliados para o sienogranito.

| GI | γ_d (g/cm ³) | n_e (%) | α (%) | e |
|----|---------------------------------|-----------|--------------|-------|
| W1 | 2.67 | 0.80 | 0.30 | 0.008 |
| W2 | 2.62 | 1.83 | 0.70 | 0.019 |
| W3 | 2.41 | 9.11 | 3.79 | 0.100 |
| W4 | 1.85 | 29.95 | 16.16 | 0.428 |
| W5 | 1.58 | 41.12 | 25.97 | 0.698 |

Fonte: O autor

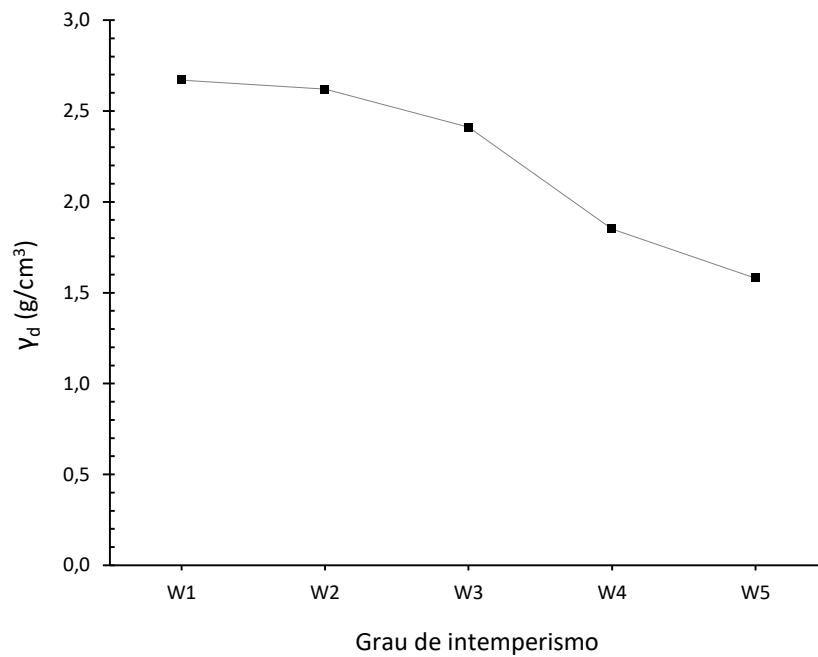
Diferentes minerais possuem composição química e arranjos cristalinos diferentes e, portanto, é natural que apresentem diferentes massas específicas, dureza e diferentes respostas às novas condições que os intemperismos químico e físico os impõem naturalmente com o tempo. Sendo a rocha um agregado natural de minerais, a massa específica da matriz rochosa

é uma propriedade física que irá refletir a sua composição mineral e as condições em que se encontram cada uma das fases sólidas. Desta maneira, analisando o gráfico da Figura 14 é possível afirmar que a sequência de variação da massa específica seca com o nível de intemperismo para os materiais estudados está coerente pois, ao passo que aumenta o intemperismo, decai o valor desta propriedade para o sienogranito.

Ainda que em valores absolutos a variação de γ_d pareça pequena, ela traduz muito bem um comportamento esperado para o material, com uma ressalva importante à sua variação a partir do nível W3. Como perceptível no referido gráfico, o decréscimo da massa específica seca em relação à rocha sã é mais sutil de W1 para W2 (1.9 %) e mais pronunciado a partir de W3, com variações de 10.0, 31.0 e 41.0 % em relação a W1 para, respectivamente, W3, W4 e W5. Isso pode ser explicado a partir da interpretação das lâminas petrográficas destes materiais em que ficou evidente que nos estágios iniciais de intemperismo (W1 e W2) ocorre um reduzido intemperismo físico, representado por um pequeno aumento do microfissuramento, e muito pouca ou quase nenhuma alteração química, enquanto nos estágios seguintes prevalecem as mudanças na composição química e, portanto, mineralógica, frente ao intemperismo físico, justificando, portanto, a maior variação da massa específica seca neste ramo (W3 a W5) da curva.

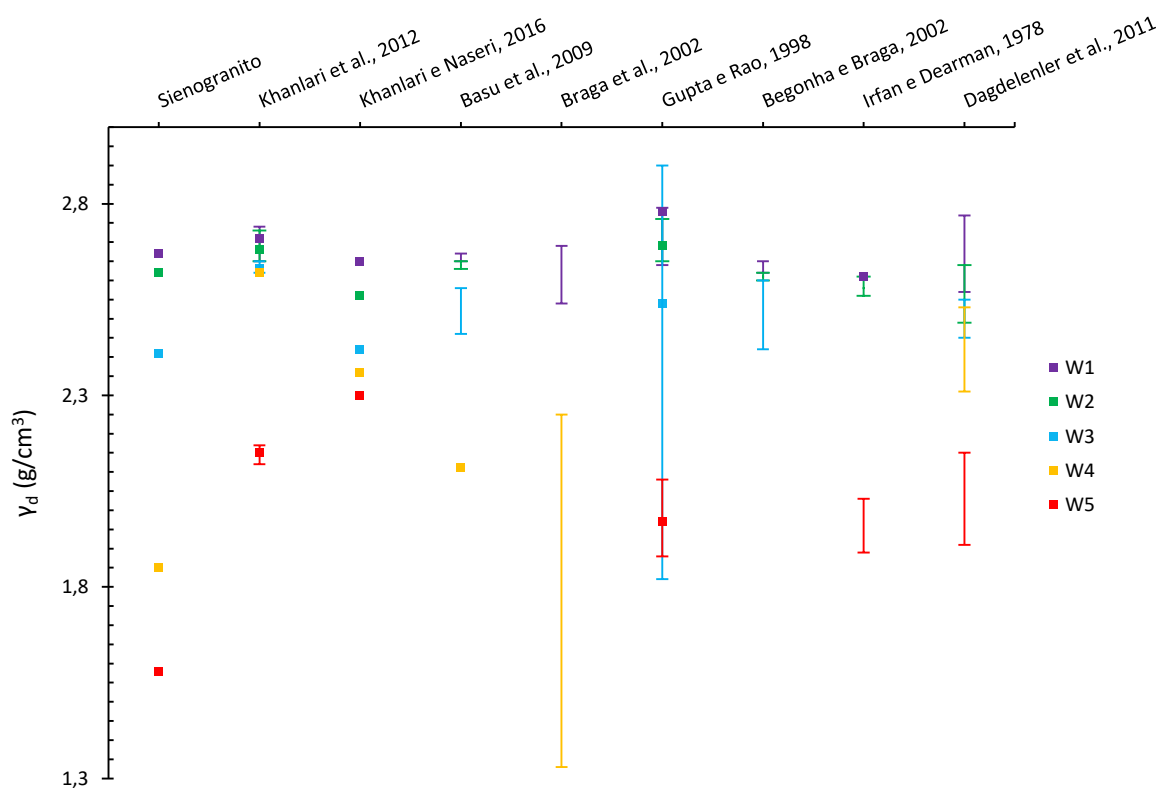
Comparativamente, pela Figura 15, pode-se dizer que os valores absolutos de γ_d deste trabalho, em geral, se aproximam de alguns resultados de outros trabalhos pelo mundo em clima tropical e temperado. Para o granito são, granito levemente intemperizado e moderadamente intemperizado aproxima-se dos resultados dos autores comparados mas, em especial, aproxima-se muito dos valores obtidos por Khanlari et al. (2012) e de Basu et al. (2009) respectivamente para granitos do Irã e do Brasil (interior do estado de São Paulo), ambos de regiões de clima tropical. Contudo, para W4 o resultado obtido está contido apenas na faixa de valores observados por Braga et al. (2002) para granitos do Porto, Portugal. Já o sienogranito W5 de Cachoeiro é, dentre os demais, aquele que aparentemente sofreu maior perda de massa e maior variação desta (41.0%) em relação a W1, ao passo que, comparativamente, a menor variação de um granito W1 para W5 foi de apenas 13.0 % em Khanlari e Naseri (2016).

Figura 14 - Variação da massa específica seca do sienogranito conforme o grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

Figura 15 - Médias e faixas de valores de γ_d para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo.

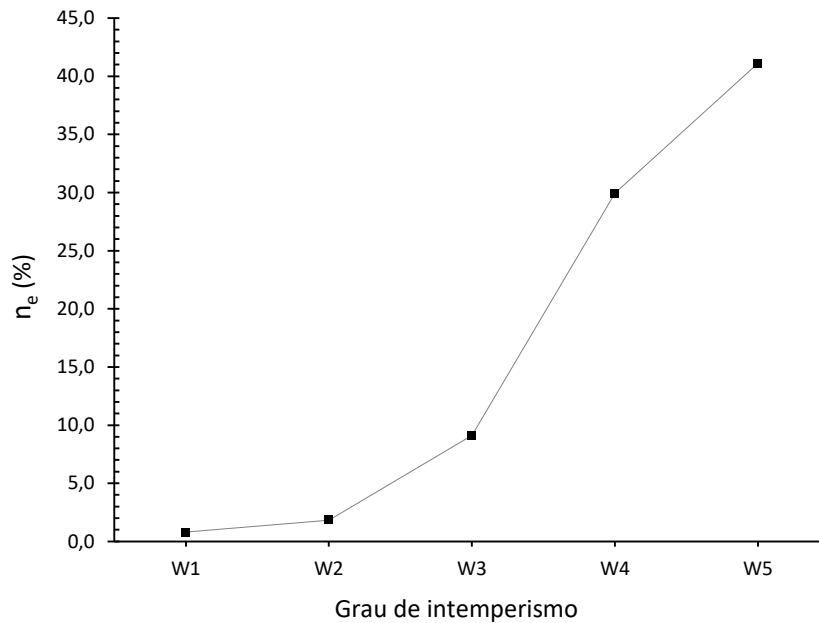


Fonte: O autor

Em geral as rochas apresentam duas fases bem distintas, os sólidos (minerais) e os vazios, sendo estes, por vezes, tratados apenas pelo termo descontinuidades. Quando presente, a umidade torna-se a terceira fase, a líquida. Neste trabalho, entende-se por vazios a soma de poros intergranulares, intragranulares e as microfissuras da rocha. Os dois primeiros normalmente estão associados à gênese da rocha enquanto o terceiro, além dos processos de gênese, pode advir também da evolução geológico-mecânica do material ao longo do tempo e em função de diferentes características, dentre elas o histórico ou *background* de tensões atuantes que, com certeza, foi determinante para o fechamento, abertura e propagação de novas fissuras e poros. Tendo em vista estas observações, é importante dizer que neste trabalho, para a determinação da porosidade, foram considerados apenas os vazios intercomunicáveis (normalmente os poros intergranulares e algumas microfissuras), acessados pelas técnicas sugeridas pela ISRM (2007), através de relações para a massa de água em ensaio de saturação e fluabilidade. Portanto, trata-se de uma porosidade aparente ou efetivamente conectada, por desprezar os vazios não comunicáveis, sendo ora tratada apenas por porosidade efetiva (n_e) na medida em que todos os poros interconectados foram saturados.

Considerando estas observações e pelos dados apresentados no gráfico da Figura 16, pode-se dizer que a porosidade aumenta com o intemperismo para o sienogranito. Assim como verificado para a massa específica, a sensibilidade deste parâmetro aumenta muito a partir do nível W3. No estágio inicial de intemperismo a porosidade, ainda que muito baixa, aumenta 128 % de W1 para W2, saindo de 0.8 para 1.83 % respectivamente, sendo um indicativo de aumento do tamanho e quantidade de microfissuras, tal como se verifica em lâmina petrográfica, mas sem elevar tanto a porosidade como ocorre de W3 a W5, quando o intemperismo químico predomina e torna-se o principal agente no aumento dos poros e abertura de fissuras devido ao enfraquecimento das ligações entre os minerais. No estágio final do intemperismo, entre W4 e W5, pode-se dizer que a elevação da porosidade praticamente não é mais influenciada pelo microfissuramento (Imf) ou pela extensão da alteração química (Imp), sendo, possivelmente, a perda de ligação e abertura das bordas entre grãos e a lixiviação de feldspatos e biotita as causas mais prováveis da elevação da porosidade ao seu valor máximo em W5, resultando em uma matriz fracamente embriada de grãos de quartzo.

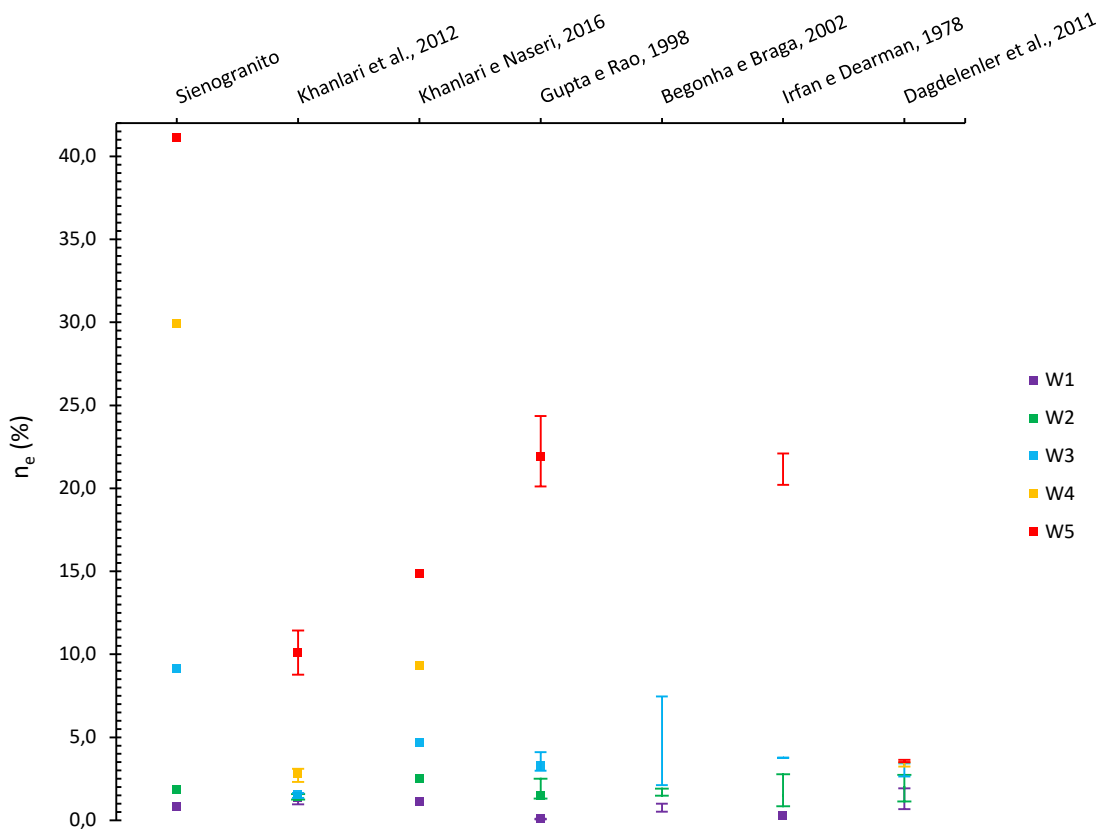
Figura 16 – Evolução da porosidade efetiva com o aumento do intemperismo para o sienogranito.



Fonte: O autor.

A respeito dos valores de porosidade comparados pelo gráfico da Figura 17, importa observar que os maiores valores e variações foram registrados exatamente para trabalhos (Gupta e Rao, 1998 e Khanlari e Naseri, 2016) nos quais a rocha granítica está condicionada às intempéries promovidas por agentes de clima tropical ou subtropical, reforçando mais uma vez a tendência e caráter controlador deste tipo de clima sobre os processos de intemperismo. Para o granito nos níveis de alteração W1 e W2, neste e nos demais trabalhos, verifica-se que, independentemente do tipo de clima ao qual está submetido o material, a porosidade ainda é muito baixa e pouco varia quando comparada às variações registradas a partir do nível W3. A partir deste nível é que surgem as maiores variações em todos os trabalhos comparados. A elevada porosidade da rocha extremamente intemperizada (W5) é praticamente duas vezes maior que o segundo maior valor médio (21.92 %) para este mesmo nível de intemperismo, observado em Gupta e Rao (1998), denotando, mais uma vez, a forte influência do intemperismo químico sobre o sienogranito neste estágio de decomposição da rocha.

Figura 17 - Médias e faixas de valores de porosidade efetiva para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo.



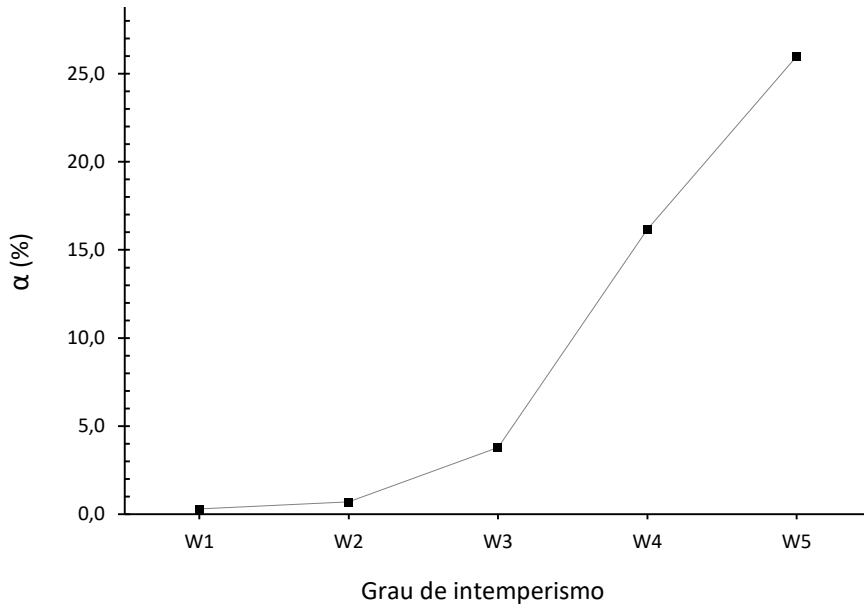
Fonte: O autor.

Capacidade de absorção e índice de vazios, conforme gráficos das Figuras 18 e 19, também se elevam progressivamente com o aumento do nível de intemperismo do sienogranito. Como são duas propriedades intimamente relacionadas à porosidade, apresentam um comportamento semelhante àquela, com baixas variações no estágio inicial de intemperismo e aumento mais acentuado a partir da rocha moderadamente intemperizada (W3).

Comparando-se massa específica, porosidade e capacidade de absorção, os principais índices físicos para o sienogranito, conforme gráfico da Figura 20, fica nítida a relação entre estes, sendo a porosidade a mais sensível ao intemperismo dentre os três, tornando-se 51 vezes maior para a rocha extremamente intemperizada quando comparada ao seu valor inicial para a rocha sã. Observa-se que a partir de W4 a elevação da capacidade de absorção torna-se, proporcionalmente, igual ao aumento da porosidade, sugerindo que novos vazios ou o aumento dos já existentes sejam igualmente passíveis de reter a água. A massa específica é o

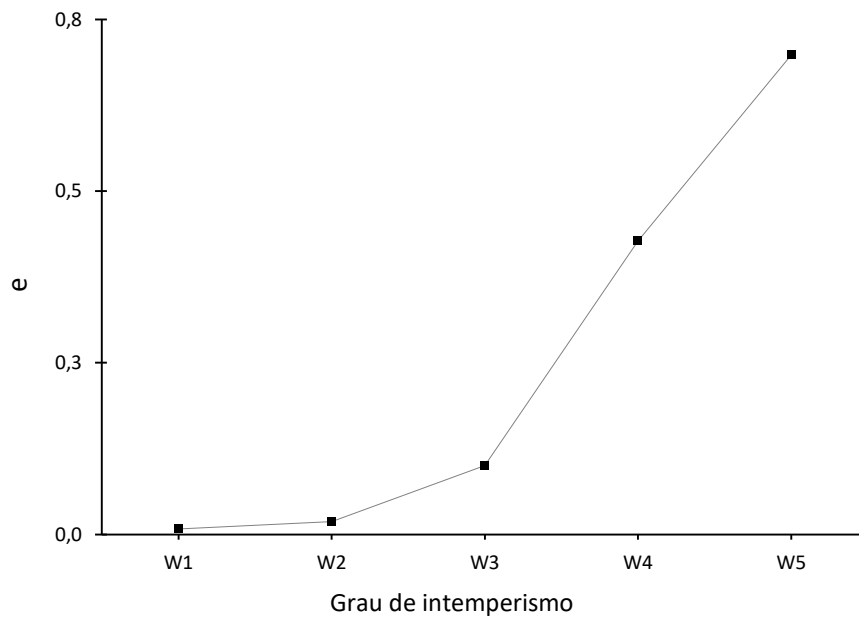
índice físico menos sensível às mudanças intempéricas. Contudo, pequenas variações nessa propriedade podem influenciar grandes mudanças na porosidade e em outras propriedades do sienogranito, as quais serão discutidas posteriormente.

Figura 18 - Variação da capacidade de absorção com o intemperismo para o sienogranito



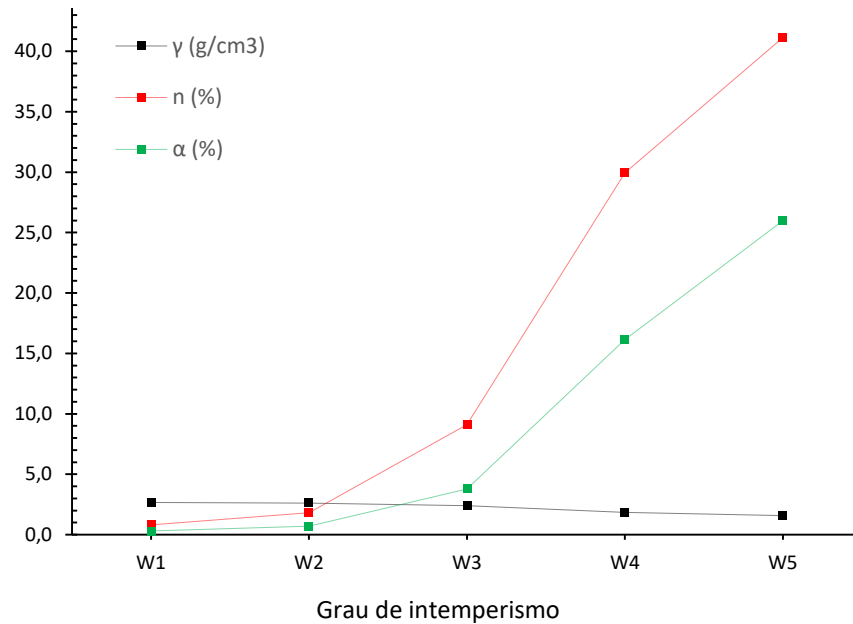
Fonte: O autor.

Figura 19 - Variação do índice de vazios com o intemperismo no sienogranito



Fonte: O autor.

Figura 20 - Evolução das propriedades índice do sienogranito com o avanço do intemperismo.



Fonte: O autor.

7.2. Propriedades índice

As propriedades índices são utilizadas, principalmente, para se obter uma estimativa inicial do comportamento mecânico da rocha a partir de comparação e ou correlação de seus valores com aqueles das propriedades que governam a resistência e deformabilidade do material. Além disso, são propriedades que, indiretamente, refletem a estrutura, a composição e a trama da rocha, servindo para quantificar, portanto, sua matriz. São amplamente utilizadas dada a facilidade em sua obtenção, normalmente fazendo-se o uso de equipamentos portáteis, de leitura dinâmica e baixo custo.

Para o sienogranito foram avaliados o índice de resistência à compressão puntiforme ($I_{s(50)}$), a velocidade de propagação de ondas longitudinais (V_{PL}) e o valor Q do rebote do martelo de Schmidt, em todos os níveis de intemperismo constatados para a matriz rochosa, conforme dados da Tabela 23.

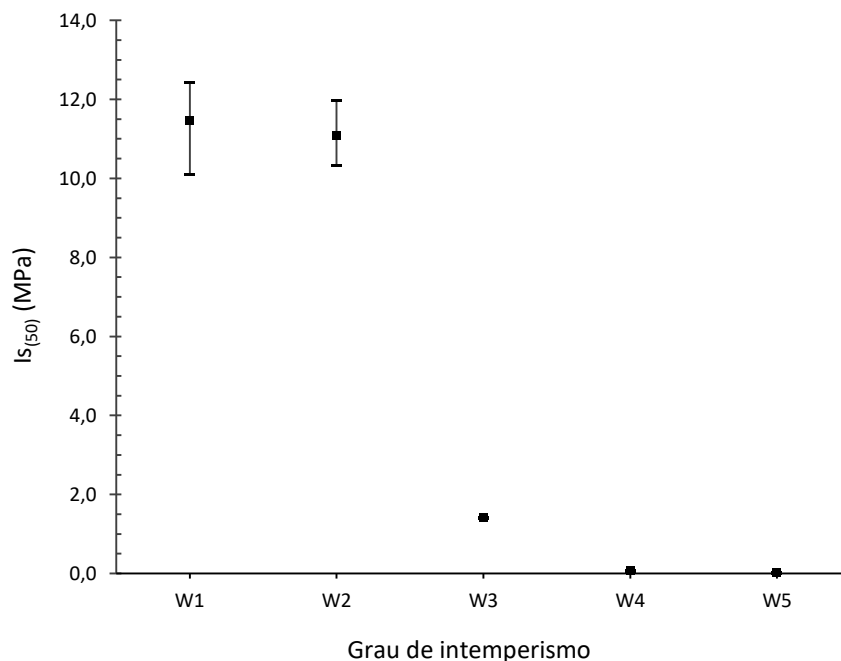
No gráfico da Figura 21, apresenta-se os intervalos e médias de valores de $I_{s(50)}$ obtidos para cada um dos níveis de intemperismo do sienogranito. Ao analisar este gráfico, a primeira constatação que poderia ser feita é a de que, dada a ligeira redução de apenas 0,37 MPa entre os níveis de intemperismo W1 e W2, possivelmente estes materiais apresentariam

comportamento mecânico semelhante. Contudo, como será discutido posteriormente, essa baixa variação pode ou não ser esperada também na resistência à compressão uniaxial e demais propriedades geomecânicas, a depender de alguns fatores, dentre eles a possibilidade do problema do efeito de escala. Além da ligeira diferença na média da resistência à compressão puntiforme no estágio inicial de intemperismo, observa-se também que houve sobreposição para toda a faixa de valores de $I_{S(50)}$ de W2 com o intervalo de dados de W1, reforçando mais uma vez que, de fato, em termos pontuais a resistência entre estes materiais muito pouco varia e isso pode ter relação com o fato de que, como já foi demonstrado, o intemperismo químico e físico não provocaram mudanças significativas nos minerais que pudessem justificar uma perda de resistência.

Tabela 23 - Valores obtidos nos testes para determinação das propriedades índice do sienogranito, por grau de intemperismo.

| GI | $I_{S(50)}$ (MPa) | | | | V_{PL} (m/s) | | | | Q | | | |
|----|-------------------|-------|-------|----|----------------|------|------|----|------|------|------|----|
| | Mín. | Máx. | Méd. | Nº | Mín. | Máx. | Méd. | Nº | Mín. | Máx. | Méd. | Nº |
| W1 | 10.11 | 12.44 | 11.46 | 6 | 4824 | 5045 | 4950 | 11 | 57.9 | 62.6 | 60.5 | 20 |
| W2 | 10.34 | 11.97 | 11.09 | 6 | 4616 | 5074 | 4639 | 10 | 57.0 | 63.2 | 60.3 | 20 |
| W3 | 1.39 | 1.43 | 1.42 | 6 | 1419 | 2715 | 2055 | 10 | 26.5 | 42.0 | 35.0 | 10 |
| W4 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 6 | 808 | 960 | 854 | 5 | 14.0 | 25.0 | 18.0 | 10 |
| W5 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 7 | 372 | 593 | 488 | 5 | 12.0 | 15.5 | 13.8 | 10 |

Figura 21 – Variação dos valores de $I_{S(50)}$ de acordo com o grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

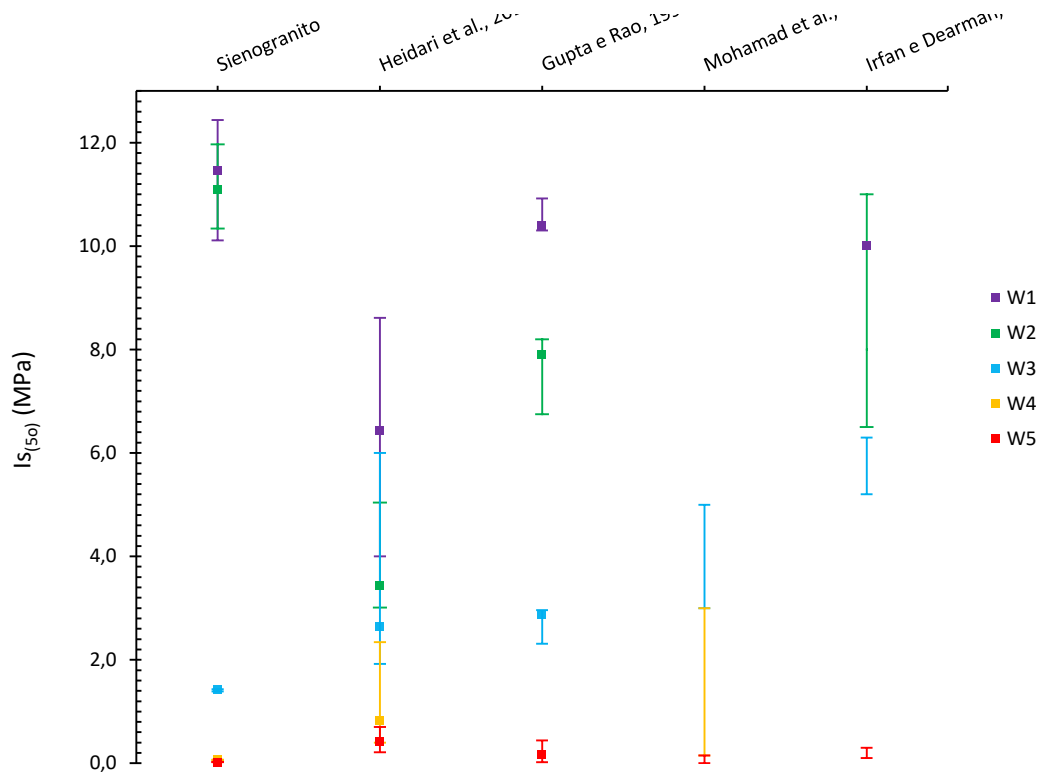
Ocorre que na compressão pontual, a resistência pode não variar significativamente de W1 para W2 porque os defeitos resultantes do intemperismo físico neste tipo de compressão podem não ter sido influentes para variação da resistência, dada a pontualidade de aplicação de carga, em que o desenvolvimento de microfissuras incipientes não implica em uma redução elevada de resistência. Esse comportamento é usualmente diferente daquele observado para a compressão uniaxial, em que a tensão aplicada propaga-se por toda a superfície de contato do corpo-de-prova (CP) com a placa de compressão, alcançando, inclusive, os defeitos ou microfissuras mais internas do CP, as quais podem ter papel fundamental na perda ou ganho de resistência. Portanto, pode haver uma limitação do método da compressão puntiforme no que diz respeito à sua sensibilidade às microestruturas da rocha. Algo que poderia ser objeto de uma avaliação detalhada em trabalhos futuros.

Nos níveis de intemperismo seguintes, o valor de $I_{S(50)}$ tem uma diminuição considerável, com uma perda de aproximadamente 88.0 % de resistência à compressão puntiforme de W1 para W3, podendo esta ser explicada pelo avanço da decomposição química neste estágio, evidenciada em lâmina petrográfica. Nos níveis de maior intensidade do intemperismo o sienogranito apresentou baixíssima resistência puntiforme, com uma diferença de apenas 0.05 MPa de W4 para W5. Apesar da queda de resistência à compressão puntiforme entre estes níveis ser de aproximadamente 71,0 % pode-se afirmar, com segurança, ao contrário do verificado em W1 e W2, que em termos de resistência mecânica ambos os materiais se comportam de modo semelhante, sendo muito frágeis e friáveis pois, além de ser uma variação que em valor absoluto pouco significa por já ser uma resistência puntiforme muito baixa, a própria análise tátil-visual demonstra que com uma ligeira diferença de pressão dos dedos é possível fragmentar o sienogranito W4 e W5 igualmente.

Para o sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim existe uma lacuna muito grande nos valores de $I_{S(50)}$ entre os níveis de intemperismo W2 e W3, algo não observado em Heidari et al. (2013) e Irfan e Dearman (1978), porém próximo do verificado por Gupta e Rao (1998), de acordo com os dados representados na Figura 22. Na área de estudo deste último autor, as condições climáticas são tropicais e, tal como verificado para o sienogranito, apesar dos perfis de intemperismo neste tipo de clima tenderem a ser mais bem desenvolvidos que aqueles em clima temperado, as transições entre os diferentes níveis são, muitas vezes, abruptas, sendo difícil delimitar e recuperar *in situ*, no maço rochoso, amostras de rocha intacta entre os níveis transicionais de intemperismo, o que, por consequência, pode resultar na ausência dos valores de algumas propriedades de engenharia nestas transições. Dentre os trabalhos

comparados, o sienogranito foi também o que apresentou valores mais extremos, tendo registrado o maior e o menor valor médio de $I_{s(50)}$ para, respectivamente, a rocha sã e a rocha extremamente intemperizada.

Figura 22 - Médias e faixas de valores de $I_{s(50)}$ para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

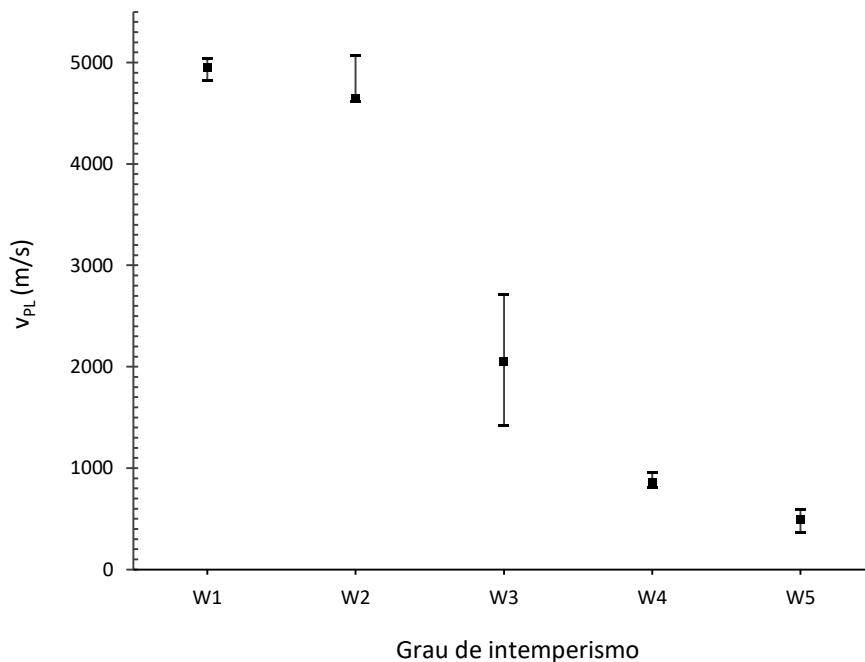
A maior ou menor velocidade com que uma onda longitudinal emitida atravessará um sólido tem íntima relação com a sua composição e estrutura. Para a matriz rochosa, a velocidade de propagação de ondas longitudinais dependerá, portanto, da sua mineralogia, das microfissuras e poros e, conseqüentemente, das suas propriedades elásticas.

Tendo em vista que com o avanço do intemperismo as rochas sofrem modificações na sua estrutura e na sua composição mineralógica, é natural que a velocidade de propagação de ondas venha a variar nas distintas fases de decomposição do material. Ao se observar a faixa de valores e médias da velocidade de propagação de ondas longitudinais (V_{PL}) no gráfico da Figura 23, nota-se que esta propriedade índice pouco varia de W1 para W2, com um decréscimo de apenas 6,0 %, já que de um para o outro nível é muito incipiente a alteração

mineralógica e o aumento da quantidade de microfissuras. Esse comportamento está em consonância com o observado em lâmina e nos índices físicos discutidos anteriormente, assim como, também, com os resultados de compressão puntiforme. De modo contrário, a expressiva redução de V_{PL} de W3 a W5, pode ser explicada pelas alterações químicas neste estágio que já transformam boa parte dos minerais primários em secundários (Imp chega a 4.6 e 2.1 para W3 e W5, respectivamente), e pela abertura e propagação das microfissuras, ainda que esta modificação física ocorra em menor escala quando comparada às mudanças químicas nesta fase. De novo, esse comportamento confirma o discutido anteriormente para as lâminas petrográficas, índices físicos e compressão puntiforme.

No nível mais avançado do intemperismo (W5) a V_{PL} , em seu menor valor registrado, chega a ser 13 vezes menor que o maior valor observado para a rocha sã. Em geral, a velocidade de propagação de ondas diminui com ao aumento do grau de intemperismo do sienogranito, havendo sobreposição de valores na fase inicial do intemperismo e um decréscimo mais uniforme nos estágios de maior alteração. Tal como para o valor Q do martelo de Schmidt, em W3 ocorre a maior variação nos valores de V_{PL} , indo de 1419.0 a 2715.0 m/s.

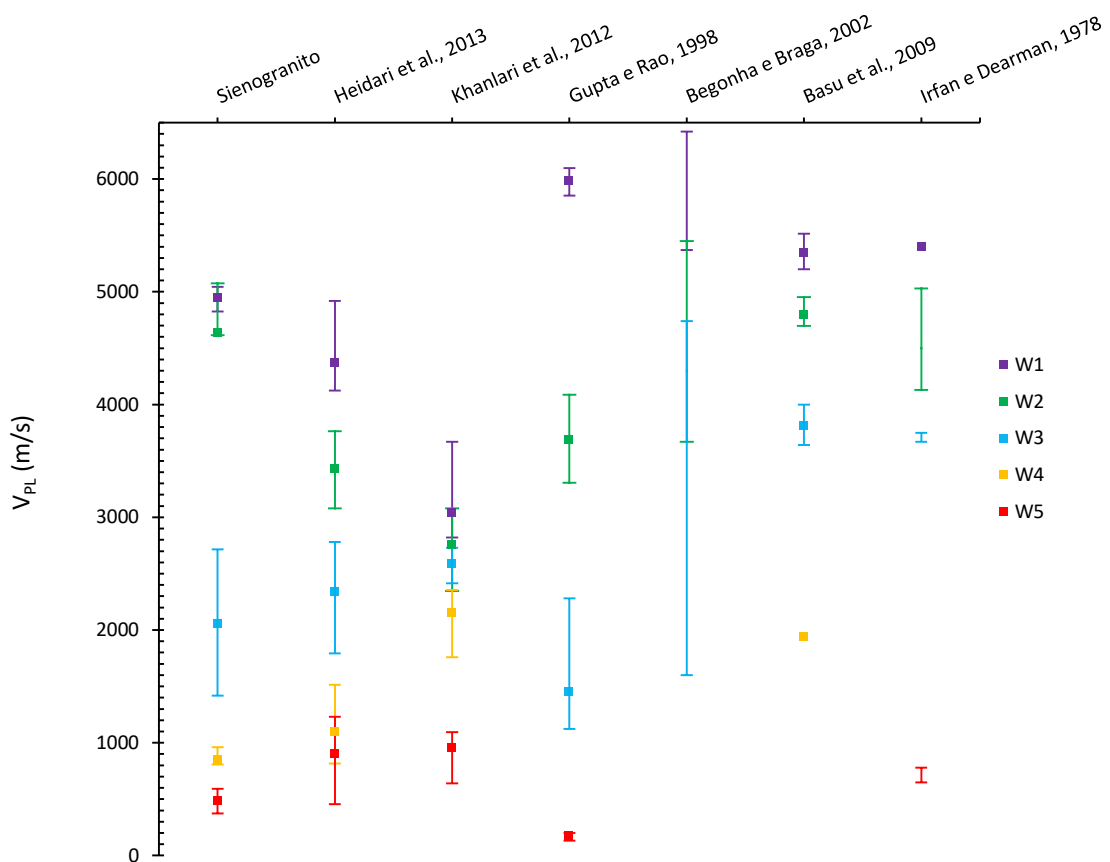
Figura 23 - Variação de V_{PL} com o grau de intemperismo para o sienogranito



Fonte: O autor.

De acordo com o gráfico da Figura 24, o comportamento da velocidade de propagação de ondas em função do grau de intemperismo no sienogranito se aproxima mais do verificado em Heidari et al. (2013), com uma diferenciação um pouco mais elevada no nível W2, sendo o valor médio em Heidari et al. (2013) 25.0 % menor. No entanto, somente em Begonha e Braga (2002) e Khanlari et al. (2012) também houve sobreposição de valores de V_{PL} no estágio inicial de intemperismo (W1 e W2). Em geral, V_{PL} decresce com o aumento do grau de intemperismo e, na maioria dos trabalhos comparados, as maiores variações desta propriedade índice ocorrem para a rocha moderadamente intemperizada (W3). Percebe-se também que os valores médios de V_{PL} tendem a convergir no estágio de máxima decomposição (W5) ficando abaixo de 1000 m/s em todos os granitos dos diferentes trabalhos comparados. Em concordância com Heidari et al. (2013) ligações entre argilominerais que passam à constituir, respectivamente, 7.0 % e 18.0 % da composição do sienogranito nestes níveis.

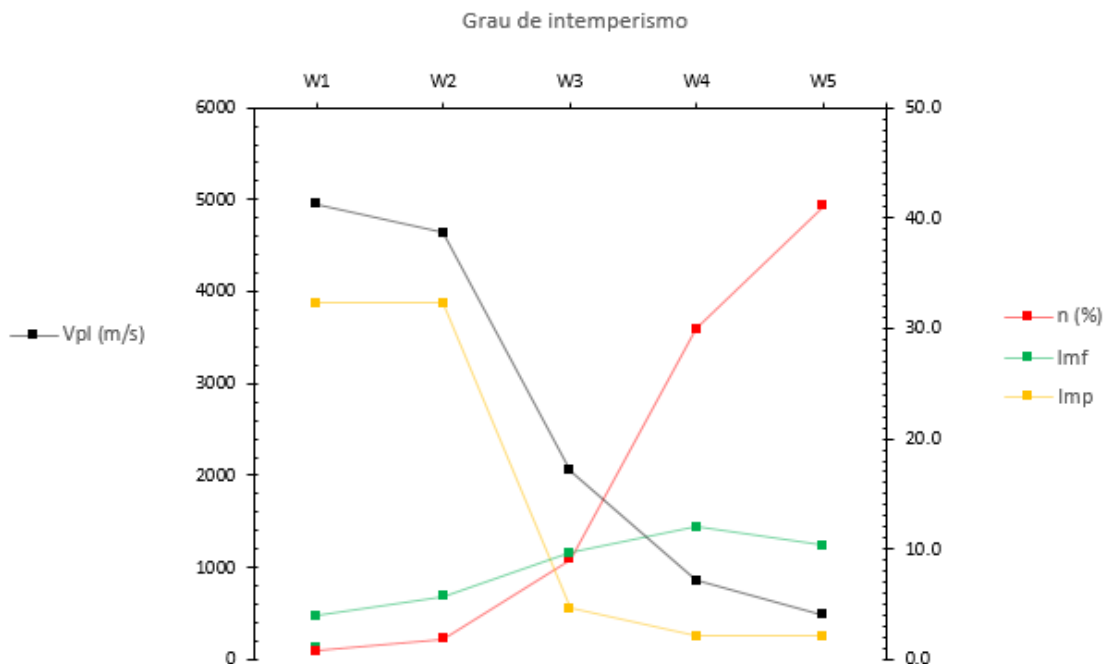
Figura 24 - Médias e faixas de valores de V_{PL} para o sienogranito e rochas graníticas de outros trabalhos, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

Existe uma relação clara entre V_{PL} , Imp , Imf , e a porosidade, conforme Figura 25. No início do intemperismo (W1 e W2) a variação da porosidade é ínfima e está relacionada, principalmente, à abertura e aumento do número de microfissuras em W2, conforme verificado em lâmina petrográfica e de acordo com o índice de microfissuramento. Ainda assim, essa sutil elevação dos vazios foi, possivelmente, o principal fator a provocar uma redução de 6.0 % na velocidade de propagação de ondas. Em linhas gerais o declínio da V_{PL} continua sendo acompanhado pelo incremento da porosidade. Contudo, há de se destacar que de W2 a W4, além da porosidade, tem importante contribuição para a diminuição da V_{PL} nestes níveis a alteração química evidenciada pelo índice micropetrográfico o qual, ao diminuir consideravelmente, indica que a matriz já não possui a mesma composição e, portanto, para os novos minerais (secundários) a velocidade de transmissão das ondas longitudinais já não será a mesma. Portanto, V_{PL} depende não apenas dos vazios da rocha, mas também da sua composição mineralógica e estado de alteração.

Figura 25 - Relação entre as propriedades V_{PL} , n , Imp e Imf para o sienogranito.



Fonte: O autor.

Considerado uma propriedade índice, o valor Q do rebote do martelo de Schmidt é amplamente utilizado na engenharia para se proceder à caracterização geotécnica inicial, a partir de estimativas de resistência através de suas correlações com outras propriedades de engenharia. Contudo, como lembra a ASTM (2014), os resultados deste método não devem

substituir os parâmetros de entrada dos projetos de engenharia os quais, para este fim, devem ser obtidos dos ensaios de determinação direta.

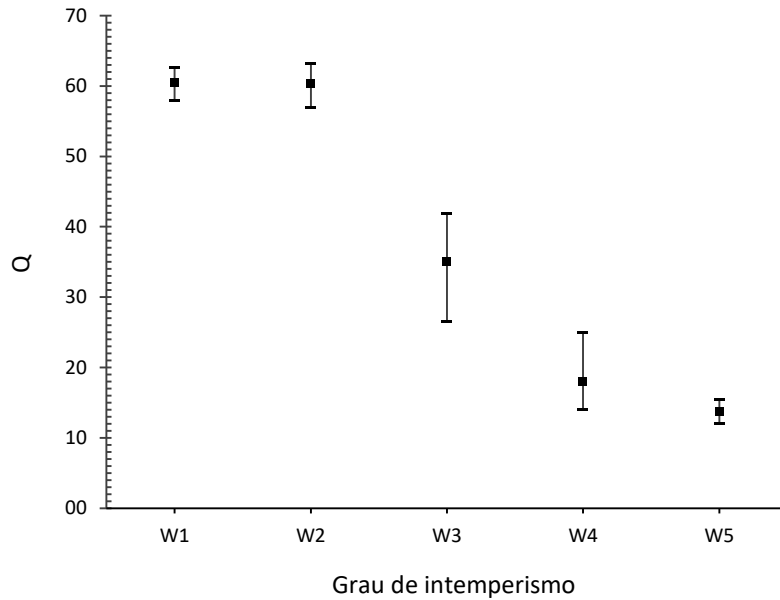
Em geral, os valores do rebote do martelo de Schmidt para o sienogranito decrescem com o aumento do intemperismo, conforme verifica-se pelo gráfico da Figura 26, ocorrendo algumas sobreposições de valores principalmente no início e no maior grau do intemperismo. No estágio inicial do intemperismo ocorre uma grande sobreposição dos valores do rebote do martelo de Schmidt entre os níveis intempéricos W1 e W2, com uma sutil e praticamente insignificante (0.3 %) diminuição no valor Q entre estes, corroborando para a mesma hipótese levantada para os valores de resistência à compressão puntiforme nestes mesmos níveis intempéricos de que neste estágio não há sensibilidade à eventuais alterações químicas e, devido ao efeito de escala, para as alterações físicas (microfissuras), que justifique uma variação maior dos valores médios de Q.

Além disso, Basu et al. (2009) também observou, através de experimento relatado, que a energia de impacto do martelo rapidamente é dissipada ao longo dos limites dos grãos, não havendo grande influência das microfissuras mais internas ao ponto de impacto do martelo na variação do valor Q. Nos níveis de intemperismo maiores a dureza ao golpe do martelo de Schmidt diminui progressivamente reduzindo 49.0 % e 28.0 % entre os níveis W3-W4 e W4-W5, respectivamente, estágio este sob clara influência do intemperismo químico na perda de resistência do material.

Em outros trabalhos verificados, conforme a Figura 27, os valores Q do martelo de Schmidt também decrescem com o aumento do intemperismo, ocorrendo sobreposição também nos valores de Irfan e Dearman (1978) para W1 e W2. Para Gupta e Rao (1998), os valores decrescem de maneira mais progressiva, com intervalos sem sobreposição. A maior variação nos valores de Q ocorre para o sienogranito moderadamente intemperizado, indo de 26.5 a 42.0, podendo esta ser associada ao fato de que é neste nível de intemperismo que aceleram as transformações químicas dos minerais, porém não de maneira uniforme sobre todos os grãos da matriz, conforme observado em lâmina petrográfica, podendo variar a resistência dos minerais em cada ponto de impacto do martelo, tal como verificou Basu et al. (2009). Dentre as médias comparadas, os valores Q para o sienogranito nos níveis de maior sensibilidade desta propriedade índice ao intemperismo, respectivamente W3 e W4, se aproxima mais dos valores encontrados por Mohamad et al. (2016), no qual também se

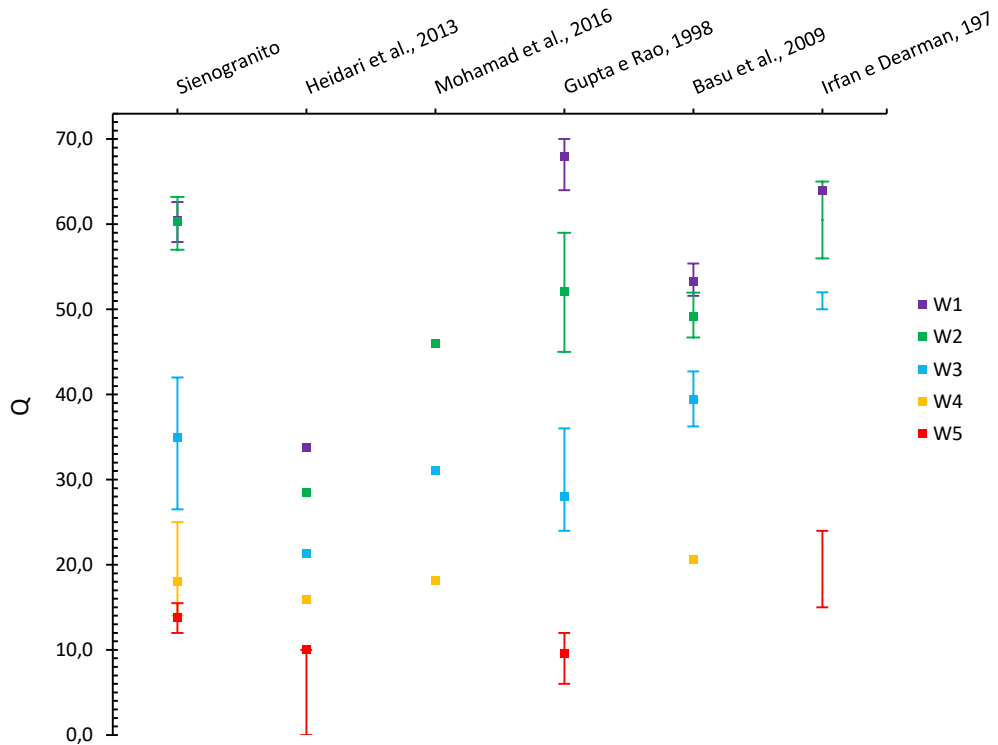
verificou forte influência do intemperismo químico, controlado pelo clima tropical Indiano, para estes dois níveis de intemperismo.

Figura 26 - Médias e faixas de valores de Q para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

Figura 27 - Médias e faixas de valores de Q para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo.



Fonte: O Autor.

7.3. Propriedades geomecânicas

As propriedades geomecânicas descrevem as variações de resistência e deformação do material rocha em condições naturais, pelo tempo geológico, e sob solicitação 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 descontinuidades e o maciço rochoso. Neste trabalho, contudo, a caracterização geomecânica é focada na matriz rochosa em seus diferentes níveis de intemperismo. Isso pode ser justificado na constatação de que, como descrito na caracterização morfológica dos perfis de intemperismo do sienogranito, a grande maioria das descontinuidades observáveis em escala de maciço nos perfis são exatamente aquelas cujas paredes foram consideravelmente abertas, decompostas e preenchidas largamente por solo residual não sendo, portanto, um elemento que exercerá o controle mecânico do maciço, mas que foi fundamental para o desenvolvimento do perfil de intemperismo até a sua configuração atual. Raramente se observou alguma descontinuidade que pudesse, pelas suas características, exercer alguma influência no comportamento mecânico destes perfis avaliados.

Pode-se dizer, portanto, que em termos de resistência e deformação, para os perfis de intemperismo estudados, exercerão maior controle sobre o comportamento mecânico do maciço a matriz rochosa, os *corestones*, individualmente, e, claro, a massa de solo, principalmente nos perfis 2, 3 e 4, onde esta última se faz mais presente e, para fins de projetos de engenharia, deverá ser melhor caracterizada. Contudo, não é objeto deste trabalho a investigação da mecânica dos solos, restringindo-se a sua contribuição à mecânica das rochas componentes dos perfis de intemperismo estudados.

Para o sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim foram avaliadas e assim agrupadas as seguintes propriedades geomecânicas:

- 1) Propriedades de resistência: resistência à compressão uniaxial (σ_c) e resistência à tração (σ_t);
- 2) Propriedades elásticas: módulo de elasticidade médio (E_m) e coeficiente de Poisson (ν).

7.3.1. Propriedades de resistência

Os valores de resistência à compressão uniaxial (σ_c) e resistência à tração (σ_t) obtidos em testes padronizados pela ISRM (2007), para o sienogranito W1 a W3, e ASTM (2017), para o sienogranito W4 e W5, bem como suas variações e o número de testes realizados encontram-se resumidos na Tabela 24.

Tabela 24 - Propriedades de resistência do sienogranito, suas variações e quantitativo de testes realizados.

| 1*GI | σ_c (MPa) | | | | σ_t (MPa) | | | |
|------|------------------|--------|--------|----|------------------|-------|------|----|
| | Mín. | Máx. | Méd. | Nº | Mín. | Máx. | Méd. | Nº |
| W1 | 157.26 | 163.63 | 160.58 | 4 | 8.80 | 10.68 | 9.74 | 12 |
| W2 | 86.41 | 105.02 | 98.10 | 5 | 7.12 | 11.65 | 9.26 | 12 |
| W3 | 26.73 | 32.60 | 30.48 | 5 | 1.59 | 3.45 | 2.79 | 12 |
| W4 | 12.46 | 18.40 | 15.87 | 4 | 0.80 | 0.95 | 0.85 | 3 |
| W5 | 0.90 | 1.46 | 1.18 | 2 | 0.07 | 0.43 | 0.19 | 6 |

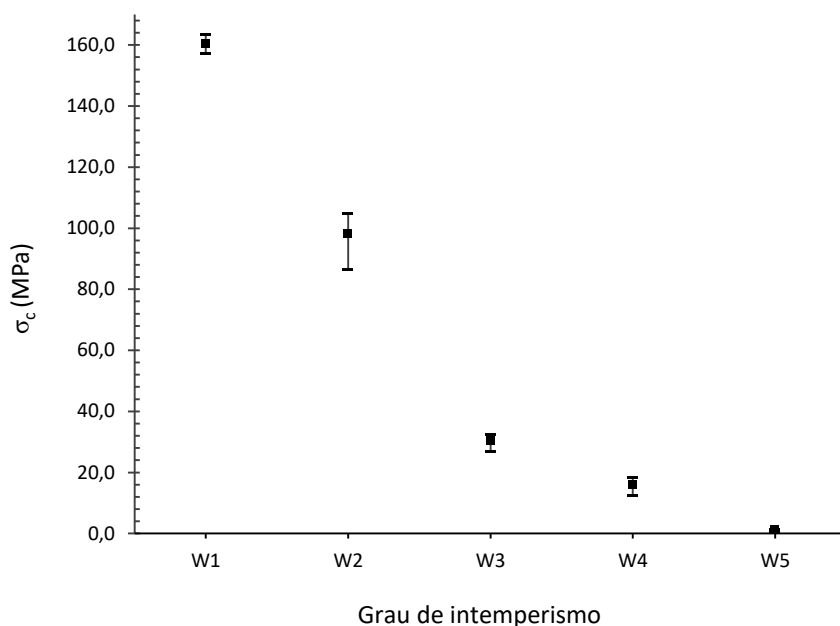
Fonte: O autor.

1* - GI: Grau de Intemperismo (ISRM, 1978).

Dentre as propriedades de engenharia, a resistência à compressão uniaxial foi a que apresentou maior variação com o intemperismo, principalmente entre os níveis iniciais, W1 e W2, conforme gráfico da Figura 28, contrariando o observado na maioria das demais propriedades (γ_d , n_e , $I_{s(50)}$, V_{PL} , Q , σ_t e E) do sienogranito, o que permite adiantar que esta propriedade é fortemente influenciada pelo intemperismo. O valor de σ_c decresce com o aumento do grau de intemperismo diminuindo 39.0%, 69.0%, 48.0% e 93.0% entre, respectivamente, os níveis W1-W2, W2-W3, W3-W4 e W4-W5. Na condição de rocha extremamente intemperizada (W5) o granito já perdeu 99.0 % da sua resistência inicial (160.58 MPa em W1).

Por ter sido muito expressiva a diminuição de σ_c de W1 para W2, (Figura 28) não acompanhando o observado até aqui para outras propriedades merece maior atenção e discussão este comportamento. Na tentativa de entender o que pode ter ocorrido, todos os resultados das propriedades mais importantes foram comparados, graficamente, na Figura 31, e, após a consulta a diversos trabalhos foram levantadas algumas hipóteses. Ainda que em W2 o material apresente um teor maior de quartzo e um pouco mais de microfissuras preenchidas por óxidos de ferro, o qual pode atuar como agente cimentante, a resistência, ao contrário do esperado para esta condição, não aumentou nem permaneceu próxima da verificada em W1.

Figura 28 – Variação dos valores de σ_c para o sienogranito, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

Essa constatação foi observada também por Ersoy e Acar (2016) os quais, após análise detalhada de 165 lâminas petrográficas e comparação com os valores de σ_c para granitos da região nordeste da Turquia, perceberam que, 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. Contudo, contrariando a expectativa, em seu trabalho o aumento do teor de quartzo e redução de plagioclásio, tal como ocorre para o sienogranito com o quartzo de W1 para W2 indo de 17,0 % a 20,0 % enquanto o plagioclásio reduz de 17,0 % para 15,0 %, não implicou igualmente no aumento da resistência da rocha. Através da petrografia Ersoy e Acar (2016) chegaram a duas conclusões para explicar as variações para menos no valor de σ_c . Para eles, apesar de ser um mineral rígido e com alto grau de elasticidade, neste caso, o quartzo não manteve estruturada toda a matriz pois, ao invés disso, ao receber a tensão aplicada, devido à sua rigidez e resistência diferenciada, acabou por pressionar os minerais ao seu redor, de menor resistência e já com alguma alteração, fraturando-os e contribuindo para a perda de resistência da rocha devido à propagação destas fraturas pela matriz. A outra constatação feita naquele trabalho foi a de que

a textura equigranular do granito estudado, tal qual a do sienogranito, 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.

Ao analisar a petrografia em lâmina percebe-se que o sienogranito possui os mesmos pré-condicionantes do granito da Turquia, corroborando com a hipótese de que a queda na resistência de W1 para W2 também tenha relação direta com a composição e textura da rocha. Além disso, verificou-se que o módulo de elasticidade de W1 para W2 pouco varia, tendo uma queda de apenas 4.0 %, levando a crer que, de fato, pode o quartzo ter sustentado a rigidez da matriz no estágio inicial de carregamento de W2 no ensaio, porém, provocando o fraturamento ao seu redor. Isso também poderia explicar porque a máxima deformação axial em W2 foi maior que em W1, conforme gráfico da Figura 29, pois, verificada esta hipótese faria sentido que, ao invés de admitir maior deformação que em W1, na verdade, o quartzo teria induzido a um comportamento mais frágil do material em W2, contribuindo para a sua ruptura precoce. Esta é a primeira hipótese para este comportamento de σ_c no sienogranito levemente intemperizado.

A segunda hipótese está relacionada ao problema do efeito de escala ao se tentar explicar este comportamento de σ_c para o sienogranito utilizando-se da interpretação de lâminas petrográficas. Neste caso, dada a baixa e pontual amostragem da lâmina quando comparada ao volume do corpo-de-prova ensaiado, além da subjetividade inerente ao cálculo do índice I_{mf} , pode ter ocorrido desta análise do microfissuramento ter sido subestimada. Em outras palavras, existe a possibilidade do grau de microfissuramento real do granito W2 ensaiado ter sido muito maior que aquele observado em lâmina, podendo estas descontinuidades terem sido fundamentais para a considerável perda de resistência de W1 para W2.

A terceira possibilidade é a de que, considerando a interpretação petrográfica como coerente, a variação das propriedades de engenharia de W1 para W2, pouco ou nada tenham a ver com a alteração química da matriz, mas sim com as microfissuras do material que, apesar do pouco aumento em sua quantidade, tamanho e abertura de W1 para W2, foi suficiente para controlar o comportamento mecânico da rocha que, neste caso, perdeu considerável

resistência, apesar de manter sua rigidez (52.0 GPa) próxima à de W1 (55.3 GPa), estando este fato possivelmente relacionado à cimentação de microfissuras por óxidos de ferro e ao aumento do teor de quartzo em W2, contrariando Ersoy e Acar (2016).

Por fim, a quarta hipótese contraria toda a discussão anterior ao se considerar que, sob outra ótica, ao invés de W2 ter apresentado uma queda abrupta de resistência, na verdade W1 quem apresentou uma resistência acima do esperado. Isso pode ter validade se considerarmos que os valores da resistência a compressão uniaxial para W2 estão congruentes com Heidari et al. (2013), Begonha e Braga (2002) e Gupta e Rao (1998) neste mesmo nível de intemperismo e, além disso, como verificado ao microscópio, W1 apresenta preenchimento por carbonatos nas microfissuras, o que pode justificar a sua resistência média ser 64.0 % maior do que a de W2. Contudo, esta hipótese não explicaria bem o porquê da taxa de deformação diminuir de W1 para W2.

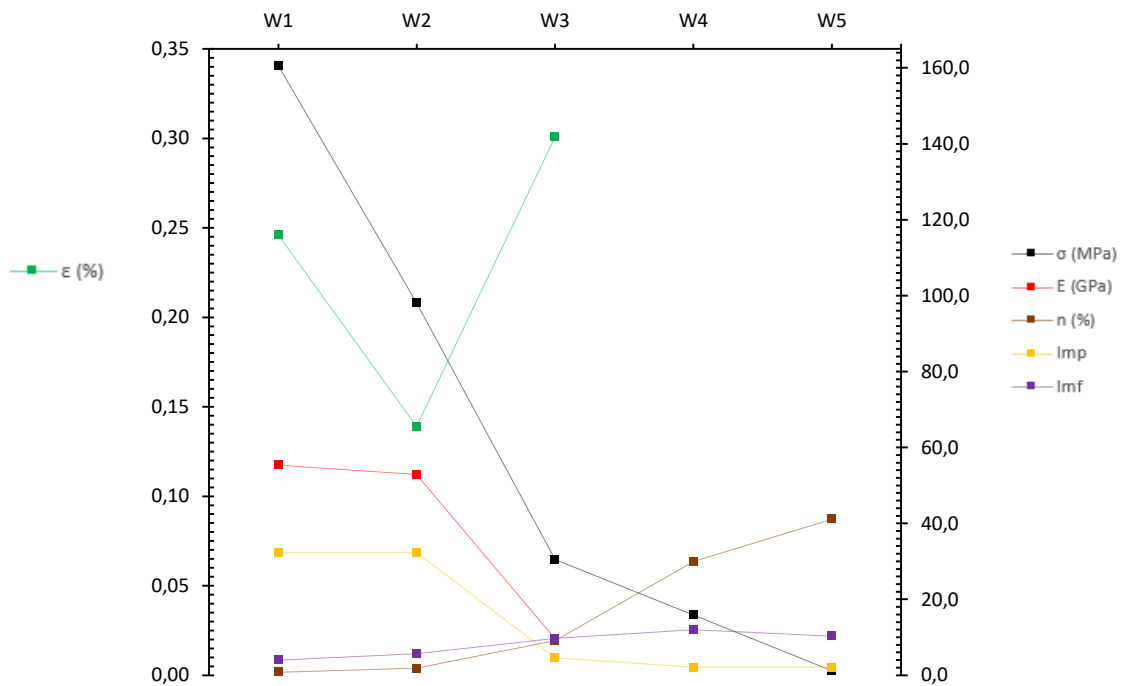
Para ser conclusivo sobre o comportamento do sienogranito em termos de sua resistência à compressão uniaxial para a rocha levemente intemperizada seria necessário um estudo mais aprofundado dos fatores mencionados em cada uma das hipóteses levantadas, o que, neste momento, não é o foco deste trabalho, podendo ficar como sugestão para trabalhos futuros uma investigação mais aprimorada sobre a influência e comportamento da microfabrica e microfissuras durante a compressão uniaxial.

Considerando os cinco graus de intemperismo avaliados, os valores de σ_c para o sienogranito se aproximam mais dos valores de Heidari et al. (2013), conforme gráfico da Figura 30. O valor médio de σ_c para o sienogranito na condição sã aponta que ele é o segundo mais competente neste quesito, sendo apenas 14.0 % menor que aquele avaliado por Basu et al. (2009), também no sudeste brasileiro. Na condição de médio a alto grau de intemperismo (W3 a W5) o sienogranito também se aproxima dos valores verificados por Dagdelenler et al. (2011), contudo é, dentre todos os trabalhos comparados, o que apresenta menor resistência nestas mesmas faixas de intemperismo.

Assim como em Gupta e Rao (1998), os valores de σ_c apresentaram um decréscimo abrupto entre os níveis de intemperismo, existindo, conforme Figura 30, grandes lacunas entre os intervalos e médias de dados que, como salienta aqueles autores, estão relacionados à ausência de materiais transicionais na amostragem, muitas vezes devido ao caráter abrupto dos contatos entre materiais de diferentes níveis de intemperismo verificados em campo. Em

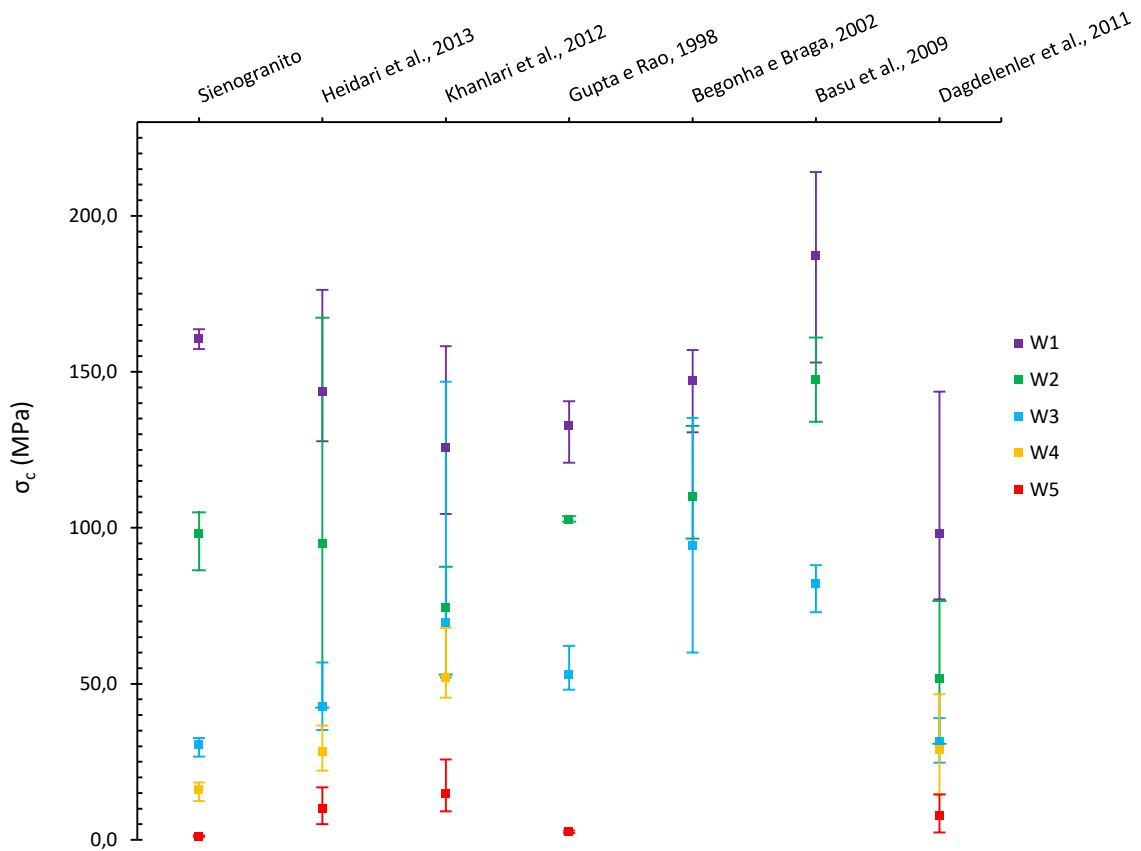
geral, os valores médios de σ_c decrescem com o aumento do grau de intemperismo, porém verifica-se que houve grande sobreposição nos intervalos de dados nos estágios iniciais e ao médio grau de intemperismo nos trabalhos de Heidari et al. (2013), Khanlari et al. (2012) e Begonha e Braga (2002), o que, segundo Basu et al. (2009) pode estar relacionado ao processo de evolução da microfábrica da rocha com o avanço do intemperismo que, no início, ainda não apresenta delimitações bem definidas entre as transições de níveis de intemperismo. Estes mesmos autores observaram que a maior variação relativa da resistência à compressão uniaxial no granito estudado ocorre entre os níveis de intemperismo W2 e W3, correspondendo a aproximadamente 44.0 %, tal como no sienogranito em que a redução de σ_c entre estes níveis foi de 69.0 %.

Figura 29 - Comparação e relação entre σ_c e outras propriedades do sienogranito.



Fonte: O autor.

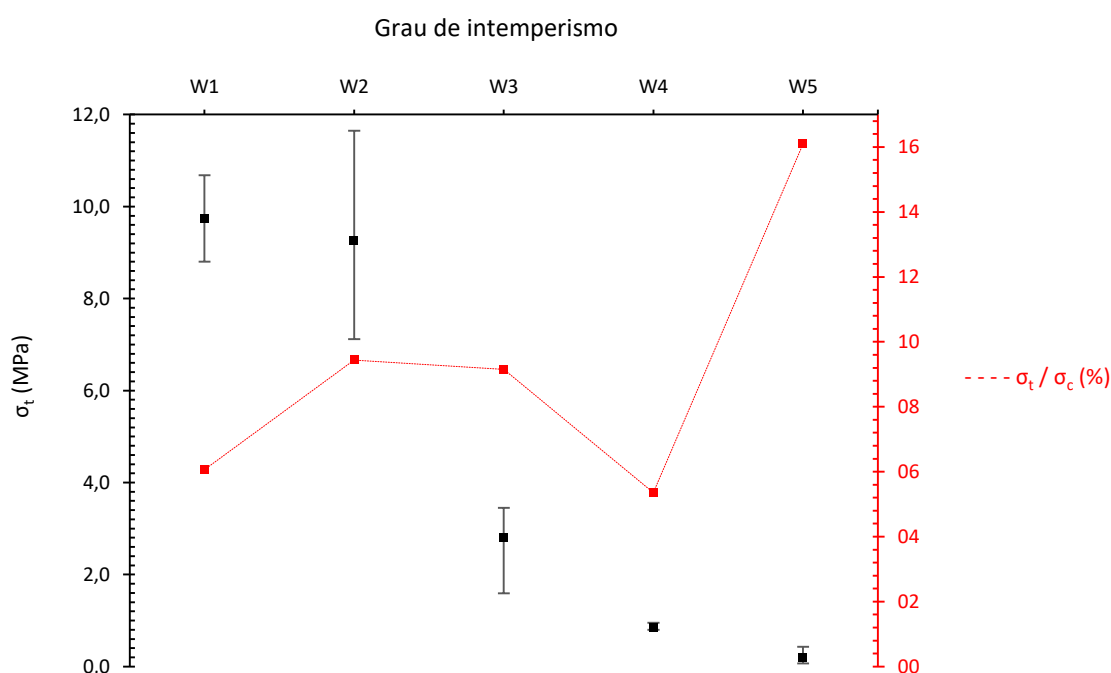
Figura 30 - Médias e faixas de valores de σ_c para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

A resistência à tração (σ_t) para o sienogranito decai com o aumento do intemperismo, sendo menos sensível no estágio inicial, com uma diminuição de apenas 4.9 % de W1 para W2. Percebe-se também, pela Figura 31, que houve grande sobreposição de valores entre estes níveis, estando toda a faixa de valores para W1 contida no intervalo de dados para W2, porém este último apresentando maior dispersão. A diminuição mais acentuada, de 70.0 %, foi registrada entre os níveis W2 e W3, exatamente quando o tipo de intemperismo predominante modifica-se, passando o químico a ser mais proeminente. A variação da resistência média à tração entre a rocha sã e a rocha extremamente intemperizada correspondeu a uma diminuição de 98.0 % entre estes níveis. Comparada à resistência a compressão uniaxial, a resistência à tração corresponde a 6.1 %, 9.4 %, 9.2 %, 5.4 % e 16.1 % do valor daquela para, respectivamente, W1, W2, W3, W4 e W5.

Figura 31 - Variação dos valores de σ_t e da relação σ_t/σ_c para o sienogranito em seus níveis de intemperismo.

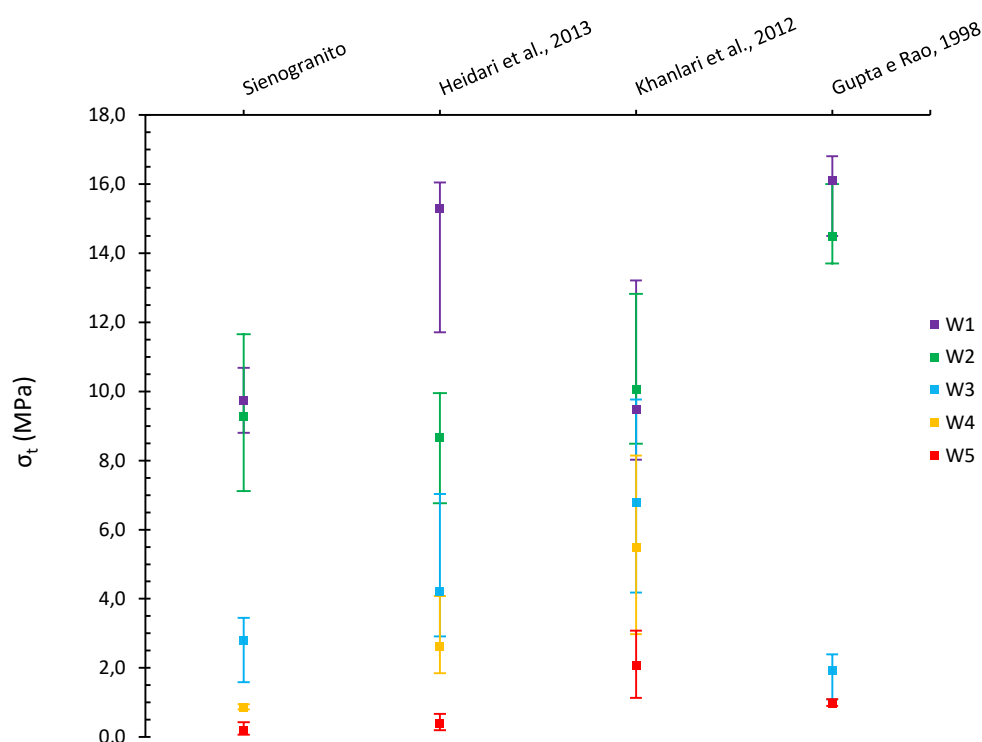


Fonte: O autor.

Comparada a outros trabalhos, conforme análise das Figuras 30 e 32, enquanto a relação σ_t/σ_c para o sienogranito variou entre 6.1 % e 16.1 %, nos granitos avaliados por Heidari et al. (2013), Khanlari et al. (2012) e Gupta e Rao (1998) as variações registradas para esta relação foram, respectivamente, 4.0 % a 10.7 %, 7.6 % a 14.0 % e 3.6 % a 38.2 % demonstrando que, apesar de haver na engenharia uma expectativa empírica de que a resistência à tração corresponda, em média, a aproximadamente 10.0 % da resistência à compressão uniaxial, é recomendável que este valor de consenso seja utilizado apenas para estimativa inicial da propriedade, não devendo este dado ser adotado como parâmetro de projeto tendo em vista a sua considerável variação. Considerando apenas a média dos valores para a relação σ_t/σ_c , o sienogranito é o que mais se aproxima deste valor médio, com o valor de σ_t correspondendo a, aproximadamente, 9.2 % de σ_c , enquanto em Heidari et al. (2013), Khanlari et al. (2012) e Gupta e Rao (1998) estas médias são, respectivamente, 8.6 %, 11.1 % e 17.0 %.

Em geral, a resistência à tração, tal como no sienogranito, diminui com o intemperismo nos trabalhos comparados ao gráfico da Figura 32. Observa-se que em Khanlari et al. (2012) o valor médio de σ_t em W2 foi ligeiramente maior que para a rocha sã, precisamente 0.55 MPa a mais, contudo o maior valor de resistência foi registrado no intervalo de dados para W1. Baseado nestes trabalhos da Figura 32, pode-se dizer ser comum a sobreposição e aproximação da resistência à tração no estágio inicial do intemperismo não havendo, portanto, grande sensibilidade desta propriedade ao intemperismo nesta fase.

Figura 32 - Médias e faixas de valores de σ_t para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

7.1.1. Propriedades elásticas

As propriedades elásticas de uma rocha são fundamentais à engenharia pois seu conhecimento permitirá prever e entender o comportamento deformacional esperado para a rocha quando o campo de tensões atuantes variar. Para compreender as características de deformação do sienogranito fez-se necessário a realização de testes de compressão uniaxial acompanhados de instrumentação para obtenção dos valores de deformação axial (ϵ_a) e circunferencial (ϵ_c) e, conseqüentemente, das constantes elásticas de proporcionalidade, o

módulo de elasticidade médio (E_m) e o coeficiente de Poisson (ν). Os valores das propriedades elásticas para o sienogranito encontram-se resumidas na Tabela 25.

Não foi possível realizar o ensaio de compressão uniaxial com medida de deformação nos moldes padronizados pela ISRM (2007) para os sienogranitos W4 e W5 já que, segundo este referencial, para o ensaio é necessário que os corpos-de-prova sejam cilíndricos e estejam com suas bases lisas, planas e paralelas, e suas geratrizes livres de irregularidades como ondulações. Por sua condição bastante friável, as amostras do sienogranito W4 e W5 não permitiram a extração e retificação de corpos-de-prova nestes padrões recomendados.

Contudo, em caráter experimental e seguindo as dimensões recomendadas pela ASTM (2017) para o ensaio de compressão uniaxial, pode-se confeccionar 2 (dois) corpos-de-prova do sienogranito W4 e W5 em formato prismático e estimar a sua deformação axial através de utilização da metodologia DIC, na qual emprega-se a filmagem do ensaio de compressão simples e tratamento destas imagens no software *GOM Correlate* da GOM COMPANY (2018), gerando mapas de deformação, conforme Figura 33, para os quais o software permite a aplicação de extensômetros virtuais e tomada dos valores de deslocamento, o que, por sua vez, pode ser utilizado para estimar a deformação, já que o tempo de carregamento e de filmagem foram sincronizados.

Tabela 25- Valores de deformação e das propriedades elásticas do sienogranito além do número de testes (Nº) por grau de intemperismo.

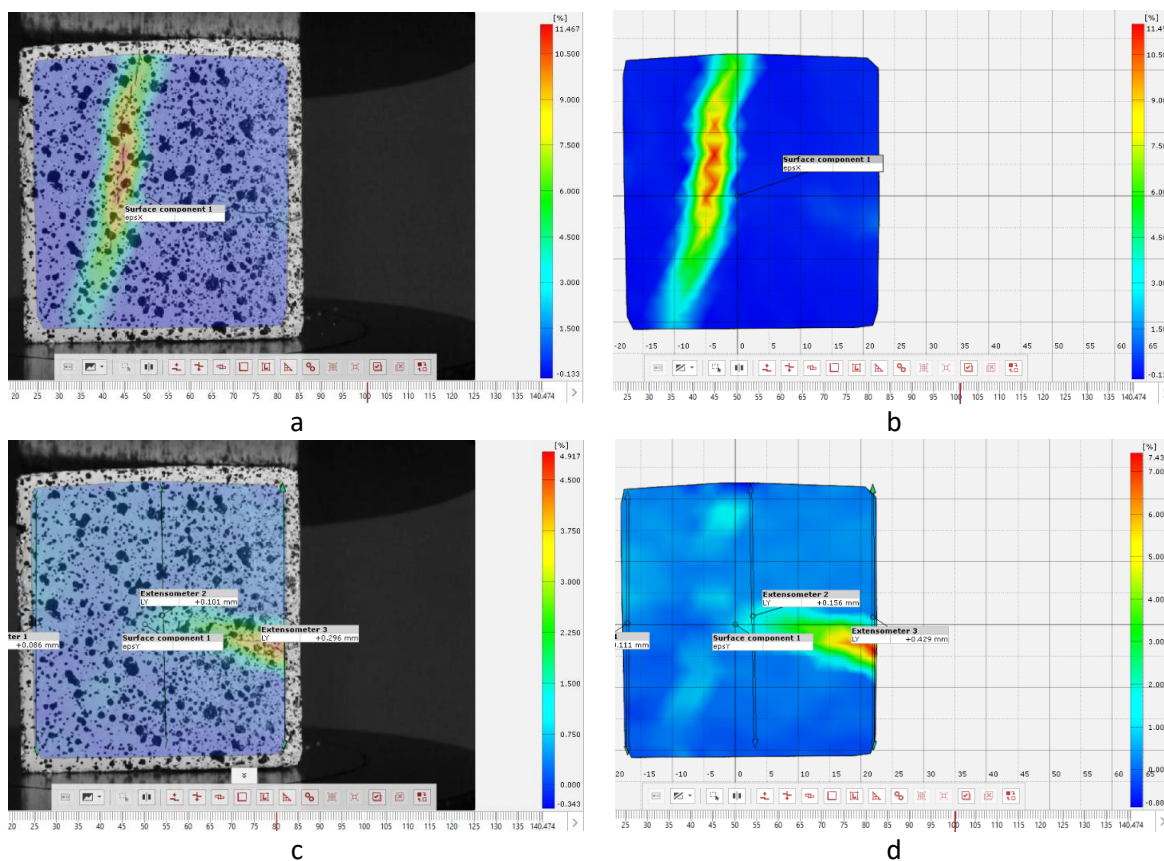
| GI | ^{1*} $\epsilon_{a,max}$ (%) | | | | ^{2*} $\epsilon_{c,max}$ (%) | | | | E (GPa) | | | | ν | | | |
|----|--------------------------------------|-------|-------|----|--------------------------------------|-------|-------|----|---------|-------|-------|----|-------|------|------|----|
| | Mín. | Máx. | Méd. | Nº | Mín. | Máx. | Méd. | Nº | Mín. | Máx. | Méd. | Nº | Mín. | Máx. | Méd. | Nº |
| W1 | 0.217 | 0.275 | 0.246 | 2 | 0.085 | 0.139 | 0.112 | 2 | 54.20 | 56.50 | 55.35 | 2 | 0.31 | 0.33 | 0.32 | 2 |
| W2 | 0.116 | 0.162 | 0.139 | 2 | 0.022 | 0.006 | 0.014 | 2 | 52.10 | 53.70 | 52.90 | 2 | 0.02 | 0.15 | 0.09 | 2 |
| W3 | 0.283 | 0.318 | 0.300 | 2 | 0.039 | 0.018 | 0.029 | 2 | 9.50 | 9.50 | 9.50 | 2 | 0.01 | 0.10 | 0.06 | 2 |
| W4 | - | - | 0.178 | 1 | - | - | - | - | - | - | 3.35 | 1 | - | - | - | - |
| W5 | - | - | 0.049 | 1 | - | - | - | - | - | - | 0.84 | 1 | - | - | - | - |

Fonte: O autor.

^{1*} - Deformação axial máxima no campo elástico; ^{2*} - Deformação circunferencial máxima no campo elástico.

Para toda rocha, em cada nível de intemperismo, existe uma constante de proporcionalidade ou constante elástica que descreve a magnitude da tensão aplicada para produzir determinada deformação no campo elástico, denominada módulo de elasticidade ou módulo de Young (FIORI, 2014). A partir da curva tensão vs. deformação axial, foi possível determinar os valores do módulo de elasticidade para o sienogranito.

Figura 33 – Aplicação do método DIC às imagens de gravação do teste de compressão uniaxial em blocos do sienogranito W4: a) mapa de deformação da superfície correlacionada pelo padrão de pintura da amostra, detalhando a propagação de microfissura; b) mapa de deformação com zonas quentes correspondendo à maior deformação; c) mapa da superfície correlacionável, em transparência, com extensômetros; d) mapa de deformação com extensômetros axiais aplicados.



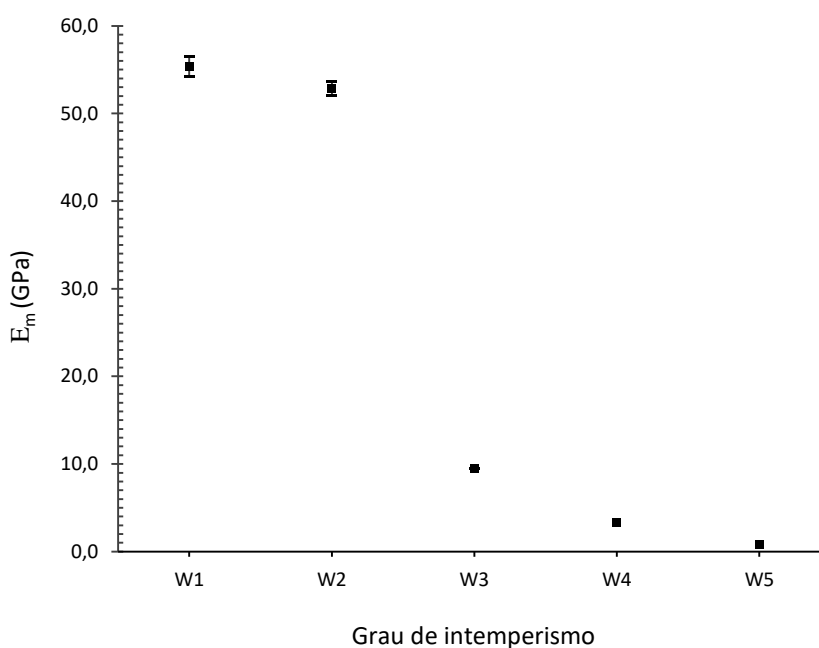
Fonte: O autor.

Conforme Figura 34, verifica-se que os valores da constante de proporcionalidade entre tensão e deformação para o sienogranito nas condições de rocha sã e levemente intemperizada são muito próximos e, comparativamente, assim como em Basu et al. (2009), muito elevados em relação ao observado em outros trabalhos (Heidari et al., 2013; Gupta e Rao, 2000; Begonha e Braga, 2002; Irfan e Dearman, 1978), para os quais as variações do módulo são apresentadas no gráfico da Figura 35.

Por outro lado, se o módulo decresce muito pouco com o aumento do intemperismo de W1 para W2 indo de 55.35 GPa para 52.90 GPa, já para a rocha medianamente intemperizada a diminuição dessa constante em relação a W1 chega a 83.0 %, demonstrando que, pelo menos no campo elástico, a alteração química dos minerais com o início da argilização (6.0 % em lâmina) responde em grande parte pela redução da rigidez do material, tendo sido

observado este mesmo efeito nos granitos avaliados por Basu et al. (2009) e Gupta e Rao (2000). Somado a isso, pode-se considerar que também contribuiu para essa grande diminuição do módulo de elasticidade o aumento do microfissuramento e o enfraquecimento das ligações entre os grãos minerais. No nível de intemperismo W4, a rocha já perdeu consideravelmente a sua rigidez, tendo ainda alguma sustentação em função, principalmente, dos grãos de quartzo que persistem com poucas alterações. Na máxima intemperização do sienogranito, em W4 e W5, os valores de E_m correspondem, respectivamente, a apenas 6.0 % e 1.5 % da rigidez inicial da rocha, demonstrando que à tensões correspondentes a estes percentuais da tensão máxima de W1, no campo elástico provavelmente W4 e W5 já estariam sofrendo deformação plástica.

Figura 34 - Variação dos valores de E_m , por grau de intemperismo, para o sienogranito.

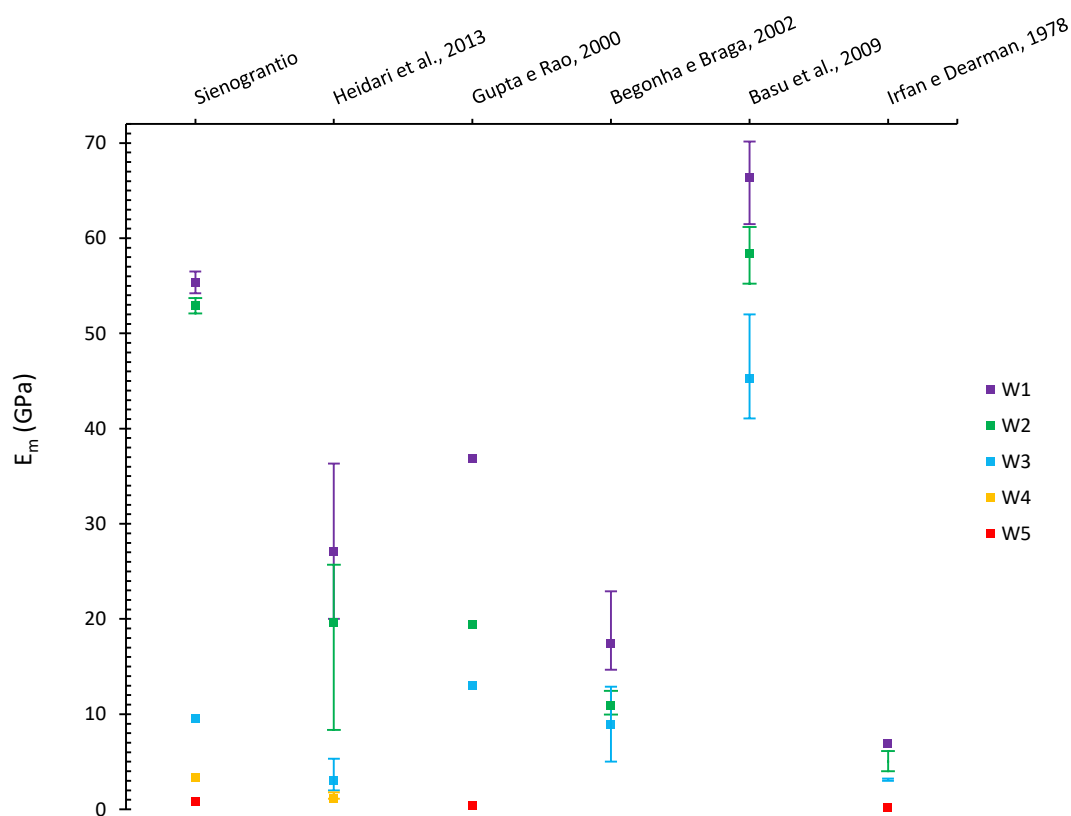


Fonte: O autor.

Dentre os trabalhos tomados como referência, de acordo com a Figura 35, aquele realizado por Basu et al. (2009) é o que melhor se aproxima dos valores de módulo de elasticidade para o sienogranito no estágio inicial de intemperismo, sendo o valor médio do módulo obtido por Basu et al. (2009) 20.0 % e 10.4 % maior para W1 e W2, respectivamente. Pode-se dizer que no estágio inicial do intemperismo ambos granitos apresentam grande rigidez, sendo necessário uma aplicação de tensão muito maior para produzir uma mesma deformação quando comparados ao demais trabalhos. Com exceção do valor obtido por Basu

et al. (2009), todos os demais trabalhos convergem para um mesmo valor de E_m na condição de rocha medianamente intemperizada, variando entre 2.99 e 12.99 GPa. Em geral, as pesquisas comparadas na Figura 35 demonstram a tendência do módulo de elasticidade diminuir com o aumento do grau de intemperismo, porém cada qual com uma sensibilidade bem variada a este processo. A maior variação registrada entre fases distintas do intemperismo foi no trabalho de Gupta e Rao (2000) com uma diminuição de aproximadamente 99.0 % da rigidez do granito entre os níveis de intemperismo W1 e W5, indo de 36.84 a 0.36 GPa.

Figura 35 - Médias e faixas de valores de E_m para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

No campo elástico as deformações ortogonais do material ocorrem de modo proporcional. A esta proporcionalidade verificada pela razão entre deformação lateral e longitudinal dá-se o nome de coeficiente de Poisson (ν), constante elástica dos materiais que se comportam isotropicamente. Em geral, segundo Fossen (2012), a maioria das rochas apresenta valores de ν entre 0.2 e 0.33.

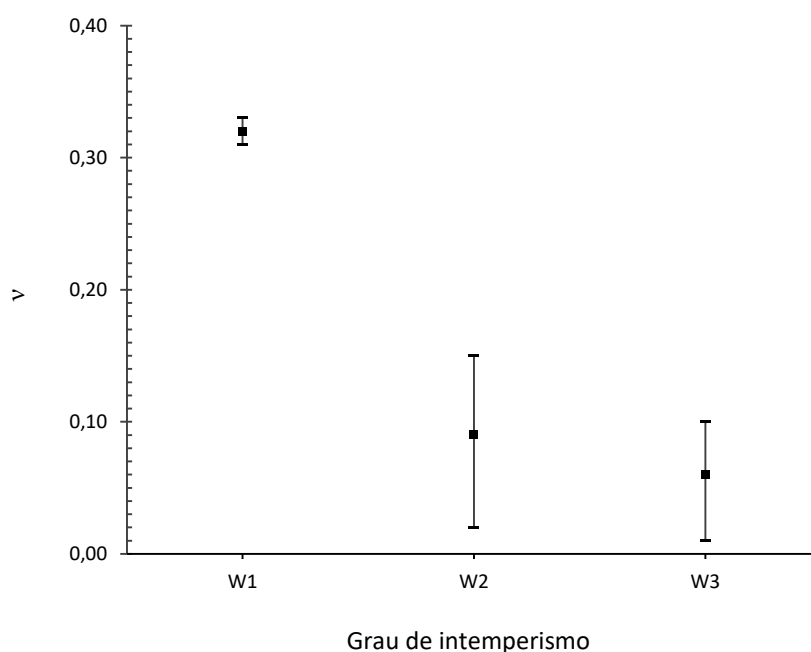
Não foi possível obter este coeficiente para o sienogranito nos graus de intemperismo W4 e W5 dadas as dificuldades de se moldar corpos-de-prova com as especificações geométricas adequadas à solicitação da ISRM (2007). Para esta constante, nem mesmo a metodologia DIC utilizada para estimar a deformação axial foi aplicável para estimar a deformação lateral pois, ao contrário daquela, esta deformação no visual variou consideravelmente entre as faces dos blocos prismáticos de W4 e W5, não sendo, portanto, confiável estimar a deformação lateral a partir do mapa de deformação de apenas uma superfície.

Para o sienogranito verifica-se (Figura 36) que os valores de ν , em média, diminuem com o avanço do intemperismo até a rocha moderadamente intemperizada, decaindo de 0.32 a 0.06, de W1 a W3, respectivamente. Entre os níveis W2 e W3 a variação é muito baixa, havendo, inclusive, sobreposição do intervalo de dados. Ocorre que, ao se comparar os valores da taxa máxima de deformação axial ($\epsilon_{a,max}$) e circunferencial ($\epsilon_{c,max}$) no campo elástico, conforme Tabela 25, apesar de em ambas as direções a deformação ter sido maior em W3 (respectivamente 107.14 % e 115.80 % maiores que em W2) este aumento foi apenas 8.0 % maior para a deformação axial quando comparada à circunferencial, contribuindo para que, proporcionalmente, o coeficiente de Poisson entre estes níveis de intemperismo variasse muito pouco, ainda que W3 tivesse uma deformação maior.

Entre W1 e W2 já se observa um distanciamento maior de Poisson, pois a taxa de deformação circunferencial em W1 é sete vezes maior que em W2, ao passo que, axialmente esta variação é bem menor, tendo W2 deformado apenas 0.43 vezes menos que W1, sendo esta a razão para que Poisson seja bem maior em W1. O comportamento deformacional do sienogranito quando carregado demonstra que o coeficiente de Poisson para esta rocha é muito sensível às deformações axiais já que as deformações circunferenciais nos três primeiros níveis de intemperismo são muito baixas e muito menores do que aquelas. Contudo, a deformação axial no sienogranito apesar de mostrar uma tendência de ascensão (Tabela 25) não aumenta de maneira contínua, havendo uma diminuição da taxa de deformação em W2, podendo isso estar relacionado à observação, em lâminas petrográfica, de que neste nível de intemperismo existem fissuras preenchidas por óxidos de ferros e que houve um aumento relativo do percentual de quartzo na matriz o que, por sua vez, poderia ter refletido na capacidade de W2 se deformar no sentido do carregamento, mantendo sua rigidez (módulo de elasticidade) axial muito próxima daquela verificada em W1.

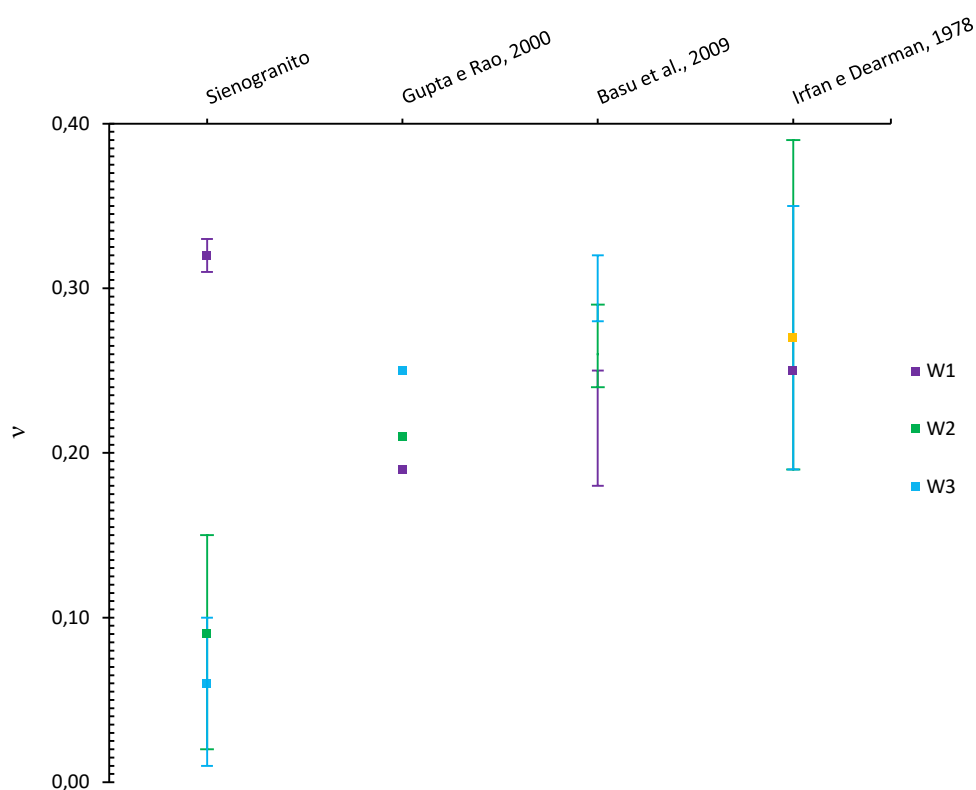
Contrariando a tendência observada em Gupta e Rao (2000) e Basu et al. (2009), conforme gráfico da Figura 37, os valores de Poisson para o sienogranito decrescem com o aumento do intemperismo, uma tendência ora observada também por Irfan e Dearman (1978) para os graus de intemperismo W2 e W3. O sienogranito na condição sã apresenta o maior valor de ν dentre os outros granitos comparados, podendo esta constatação estar relacionada ao seu baixo índice de microfissuramento e à condição intacta do arranjo e bordas dos grãos minerais.

Figura 36 – Variação dos valores de Poisson com o intemperismo para o sienogranito.



Fonte: O autor.

Figura 37 - Médias e faixas de valores de ν para o sienogranito e outras rochas graníticas, por grau de intemperismo.



Fonte: O autor.

7.1.2. Comportamento Tensão vs. Deformação

De acordo com Fiori (2014), as rochas apresentam um comportamento genérico em seu diagrama de tensão vs. deformação ocorrendo três fases bem distintas: o campo elástico, o campo plástico e o ponto de máxima resistência ou ponto de ruptura.

No início a curva tensão vs. deformação tende a ser mais inclinada e apresenta um comportamento mais ou menos linear, denotando que a aplicação de tensão é proporcionalmente correspondida por uma deformação do material no campo elástico. Neste, a principal característica da rocha é a sua capacidade de, ao cessar o carregamento, recuperar sua forma e volume inicial.

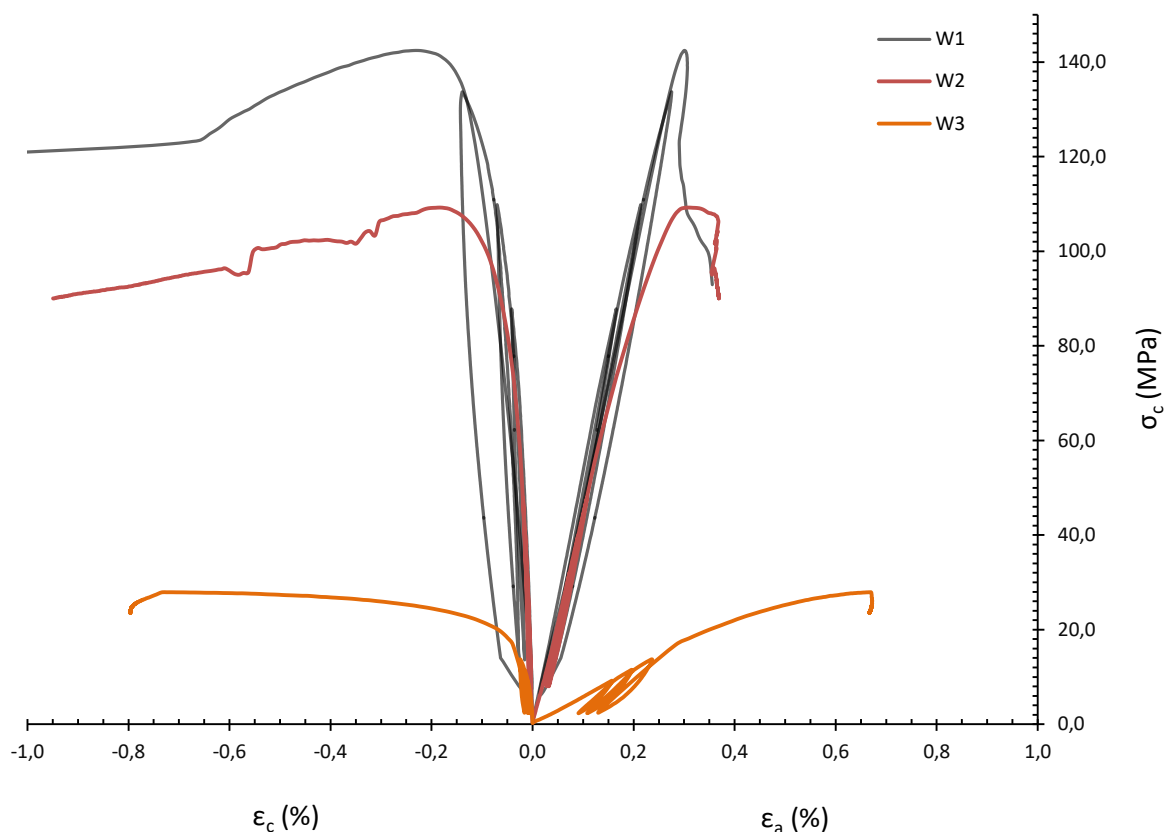
Em um determinado nível de tensão, normalmente assinalado pela mudança abrupta da inclinação da curva tensão vs. deformação, a rocha perde a sua elasticidade adentrando no campo plástico, no qual suas deformações agora serão permanentes.

Se o carregamento prosseguir, após deformar plasticamente a rocha atingirá o limite plástico ou ponto de ruptura, também denominado de pico de resistência, caracterizado pelo ponto de máxima tensão admissível ou resistência máxima da rocha, podendo ou não apresentar ainda uma deformação e uma resistência residual no pós pico.

As rochas podem apresentar dois tipos característicos de comportamento, frágil ou dúctil, podendo esta tendência 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.

Após três ciclos de carregamento e descarregamento para obtenção do módulo de elasticidade o *script* elaborado permitiu que o incremento de força no carregamento final passasse a ser controlado pela taxa deformação circunferencial, seguindo o sugerido pela ISRM (2007), para que fosse possível obter a curva tensão vs. deformação para os corpos-de-prova do sienogranito nos graus de intemperismo W1, W2 e W3, conforme Figura 38. Ressalta-se que para compor a Figura 38 foi selecionada apenas uma curva tensão vs. deformação dentre as duas obtidas para cada grau de intemperismo, dando-se preferência àquela em que o pós pico foi melhor delineado e os ciclos de carregamento e descarregamento foram completos.

Figura 38 – Curvas tensão vs. deformação (axial e circunferencial) para os níveis de intemperismo W1, W2 e W3 do sienogranito.



Fonte: O autor.

De acordo com as curvas tensão vs. deformação, pode-se afirmar que o sienogranito apresenta um comportamento frágil quando está na condição sã (W1) e levemente intemperizado (W2). Apesar de não ser prudente concluir sobre a classificação de W3, dado que o pós pico neste nível de intemperismo não foi totalmente delineado, pode-se dizer que, pela trajetória inicial da curva, parece haver, também, uma tendência à um comportamento frágil deste material.

Em geral, as deformações sofridas pelo sienogranito no estágio inicial do intemperismo (W1 e W2) tanto axial quanto circunferencialmente são muito baixas. Por outro lado, em W3 o limite elástico é atingido rapidamente a aproximadamente 18 MPa e, neste nível de tensão, a sua deformação já é pelo menos 6 vezes maior que as deformações em W1 e W2. Uma observação interessante é que, apesar de possuírem uma resistência máxima média bem distinta, W1 e W2 convergem em resistência residual e deformação no pós pico, podendo isto ser explicado pelo fato de que após a ruptura já se desenvolveram microfissuras não

havendo mais um controle diferencial da resistência e deformação entre estes dois níveis de intemperismo.

Para os sienogranitos nos graus de intemperismo W4 e W5 as curvas tensão vs. deformação obtidas utilizando-se da metodologia DIC durante a compressão uniaxial não foram representativas do comportamento do material nos estágios inicial e de pós pico da curva, não sendo, por esta razão, avaliadas em conjunto com as curvas obtidas por métodos consagrados de ensaio nos quais, para a representatividade da curva tensão vs. deformação, são fundamentais a rigidez da máquina, a instrumentação adequada do espécime e um preciso controle das taxas de carregamento e deformação.

Ao observar o gráfico da Figura 38 é fácil identificar, pela inclinação das porções aproximadamente lineares da curva tensão vs. deformação, que nos ciclos de carregamento o módulo de elasticidade para W1 e W2 pouco varia enquanto para W3 a rocha perde consideravelmente sua capacidade de resistir à tensões baixas à medida que sofre deformação.

7.3. Correlação das propriedades de engenharia

Caracterizados quali e quantitativamente os perfis de intemperismo do sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim, torna-se interessante também avaliar possíveis correlações entre suas propriedades de engenharia e a como se comportam correlações obtidas na literatura para estimar os valores observados nesta pesquisa.

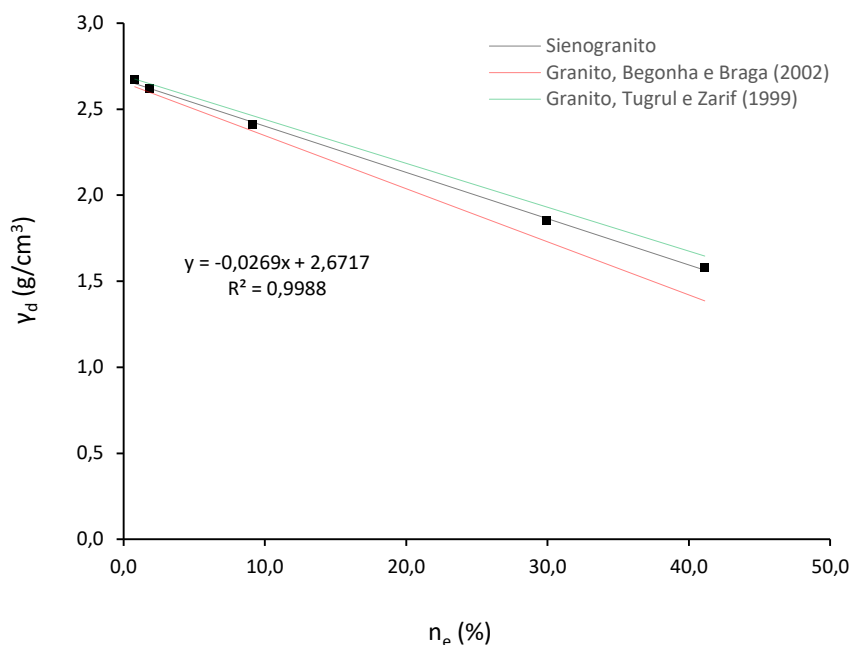
As correlações, quando válidas, representativas, podem ser utilizadas para estimar (se conhecido o valor da variável independente) os valores de propriedades de engenharia da rocha ou do maciço rochoso quando não se dispõe de meios para obtenção direta destas medidas. Contudo, como será discutido neste item, é de grande importância verificar a aplicabilidade destas correlações, principalmente aquelas obtidas a partir da literatura, dadas as especificidades do material que se deseja quantificar.

Neste sentido, serão apresentadas as correlações obtidas através dos valores observados para o sienogranito e, além disso, serão testadas correlações encontradas na literatura, procedendo-se, ao final desta discussão, a uma proposta de classificação destas correlações quanto à sua aplicabilidade para estimar valores de propriedades de engenharia do sienogranito.

1) γ_d vs. n_e :

Em geral o valor de correlação para massa específica seca e porosidade efetiva para o Sienogranito demonstra evidente relação linear entre estas duas propriedades, conforme Figura 39. Pode-se dizer que pequenas variações em γ_d resultam, a partir do sienogranito levemente intemperizado (W2), em consideráveis variações da porosidade, ratificando, portanto, a sensibilidade desta propriedade à massa específica quando se trata da rocha alterada. Devido à baixa intensidade e pouca diferença do intemperismo entre W1 e W2, pode-se dizer que esta correlação é menos sensível para o sienogranito neste estágio inicial da atividade intempérica. As correlações propostas por Begonha e Braga (2002) e Tugrul e Zarif (1999) se aproximam bastante para o sienogranito, com o primeiro subestimando o sienogranito em no máximo 1.5 % para valores entre W1 e W3 e em 6.4 % a 12.3 % dos valores obtidos para, respectivamente, W5 e W6. Já o segundo sempre superestima os valores do sienogranito porém variando muito pouco, de 0.2 % (W1) a 4.3 % (W5), sendo, portanto, dentre as duas correlações postas em comparação a que melhor se aplicaria ao sienogranito.

Figura 39 - Curvas de correlação γ_d vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos.

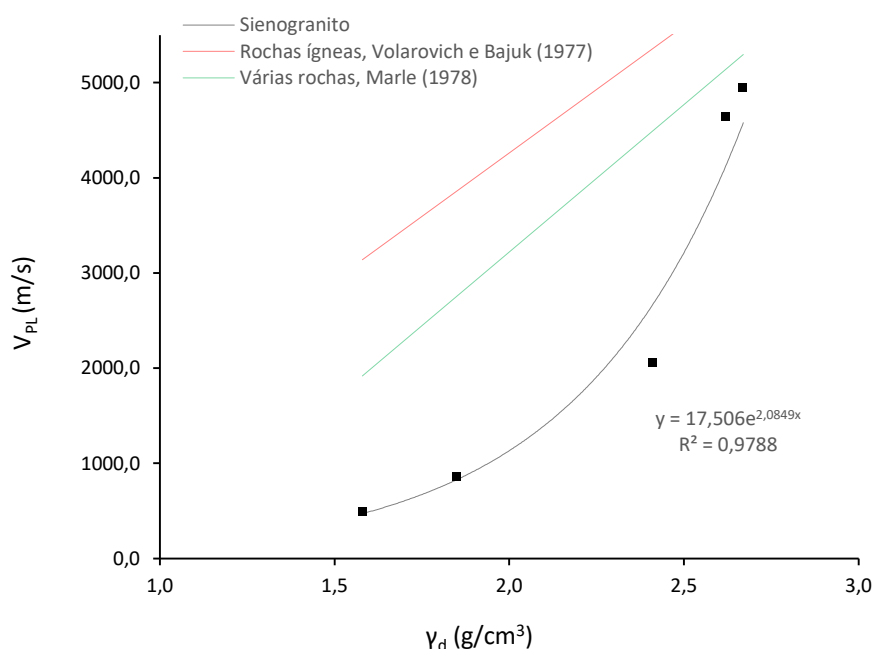


Fonte: O autor

2) $V_{PL} \times \gamma_d$:

Os valores de V_{PL} decrescem exponencialmente (Figura 40) com a diminuição da massa específica seca do sienogranito ao avançar o grau de intemperismo da rocha, em geral com a velocidade de propagação de ondas sofrendo grandes variações quando comparada, proporcionalmente, às variações em γ_d , sendo a maior destas entre os graus de intemperismo W2 e W3 quando γ_d diminui aproximadamente 8.0 % enquanto a V_{PL} diminui aproximadamente 55.7 %. As correlações propostas por Volarovich e Bajuk (1977) e Marle (1978) não são consideradas significativas para o sienogranito dado que, com exceção do valor estimado pela correlação de Marle (1978) para W1, todos os demais valores preditos superestimam os valores de V_{PL} do sienogranito em mais de 10.0 %, podendo chegar a 543.0 % do valor real.

Figura 40 - Curvas de correlação V_{PL} vs. γ_d para o sienogranito e outros trabalhos



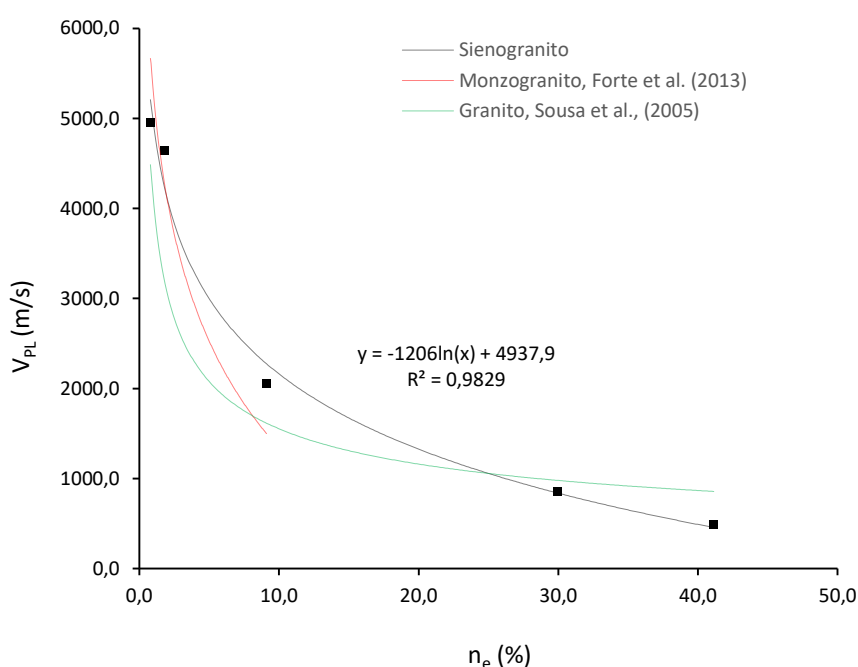
Fonte: O autor.

3) V_{PL} vs. n_e :

Como lembrado por Goodman (1989), a V_{PL} é uma propriedade índice exclusivamente dependente da massa específica e propriedades elásticas do material. Contudo, sabe-se que as ondas se propagam em meio sólido e, desta maneira, é de se esperar que o aumento da porosidade em uma rocha também interfira nesta propriedade-índice já que seu aumento implica diretamente na variação da massa específica como demonstrado na correlação γ_d vs. n_e para o sienogranito. Portanto, existe uma correlação entre V_{PL} e n_e em que, à medida que

aumentam os vazios intercomunicáveis do sienogranito, em consequência do avanço do intemperismo, diminui a velocidade de propagação de ondas longitudinais no mesmo. Essa correlação, pela forma como se distribuem (Figura 41) os dados combinados dos pares coordenados, apresenta um comportamento melhor representado por uma curva logarítmica. Como verificado, as correlações propostas por Fort et al. (2013) e Sousa et al. (2005) não são recomendadas para estimativa de V_{PL} para o sienogranito, pois nos últimos níveis de intemperismo a primeira subestima V_{PL} entre 27.0 % e 322.0 %, enquanto a segunda superestima esta propriedade em até 75.0 %.

Figura 41 - Curvas de correlação V_{PL} vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos.



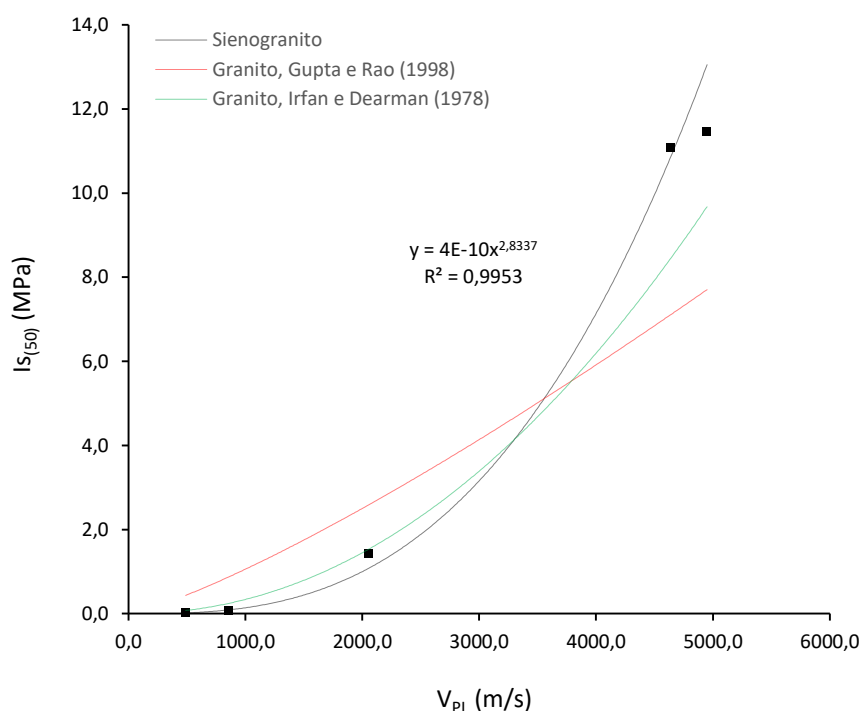
Fonte: O autor.

4) $I_{S(50)}$ vs. V_{PL} :

Pode-se dizer que a correlação (Figura 42) obtida entre a velocidade de propagação de ondas e o índice de resistência à compressão puntiforme para o sienogranito é mais realista para o estágios inicial (W1 a W2) e final do intemperismo (W4 a W5), e menos confiável entre a rocha mediana e muito intemperizada, dada a significativa queda no valor de $I_{S(50)}$ não acompanhado proporcionalmente pela V_{PL} . Para o granito estudado por Gupta e Rao (1998), estas propriedades tem uma relação mais linear não sendo, portanto, indicada para estimar $I_{S(50)}$ para o sienogranito, tendo em vista que a correlação obtida por estes autores podem

resultar em valores até 35.9 % menores, se perdendo totalmente dos valores reais observados. Ainda que em menor valor, a correlação proposta por Irfan e Dearman (1978) também subestima os valores de $I_{s(50)}$ para o sienogranito, podendo chegar a 23.8 % menos de resistência puntiforme. Em geral, não se recomenda a utilização destas duas correlações para o sienogranito de W1 a W2. Para a os níveis mais avançados do intemperismo, W4 a W5, ambas as correlações superestimam consideravelmente os valores do sienogranito. Apenas para W3, utilizando a correlação proposta por Irfan e Dearman se observa alguma aproximação para o sienogranito com esta correlação superestimando em apenas 8.0 % o seu valor do índice de resistência à compressão puntiforme neste nível.

Figura 42 - Curvas de correlação $I_{s(50)}$ vs. V_{PL} para o sienogranito e outros trabalhos.



Fonte: O autor.

5) Q vs. V_{PL} :

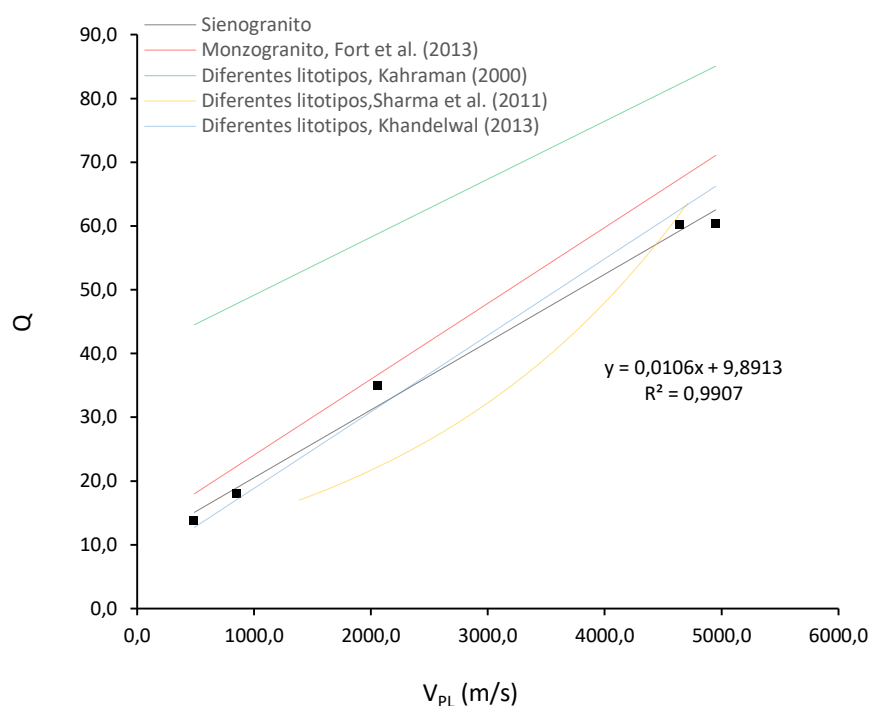
De acordo os dados da Figura 43 existe uma forte correlação entre o valor Q de Schmidt e a velocidade de propagação de ondas para o sienogranito, com os valores destas duas propriedades índice decaindo de maneira mais ou menos proporcional com o avanço do intemperismo de W1 a W4, perdendo um pouco essa linearidade de W4 para W5 apenas, onde a diminuição, entre estes níveis, é de 72.0 % em Q e de 57.1 % em V_{PL} o que, por sua vez,

pode estar relacionado às diferenças na sensibilidade de detecção dos equipamentos de ensaio para amostras muito friáveis. De acordo com a ASTM (2014) a aferição do valor Q em rochas com valores de UCS muito baixos (< 1.0 MPa), estando o sienogranito W5 muito próximo disso (1.88 MPa), podem não ser realistas.

Em geral, pode-se afirmar que as variações em Q são bem descritas pelas variações no valor de V_{PL} e vice-versa. Dentre algumas das inúmeras correlações apresentadas na literatura, aquela proposta por Khandelwal (2013) a partir de varios litotipos, dentre eles algumas rochas graníticas, é a que melhor se aplica ao sienogranito, apresentando um erro máximo de 9.9 %, para menos, ao estimar o valor de Q para o sienogranito W3.

A correlação apresentada por Kahraman (2001) não se aplica bem ao sienogranito, chegando a ser 222.0 % maior que o valor Q obtido diretamente por ensaio no presente estudo. Já a correlação proposta por Sharma et al. (2011), se aplica apenas para o estágio inicial de intemperismo, desviando significativamente de W3 até a rocha extremamente intemperizada, chegando a resultar em um valor de V_{PL} 184.2 % maior do que aquele verificado para o sienogranito W5. Apesar de superestimar os valores de Q do sienogranito, principalmente no início e no estágio avançado de intemperismo, a correlação proposta por Fort et al. (2013) é a que mais se aproxima do valor Q para esta rocha na condição de moderado intemperismo (W3). Dentre as correlações avaliadas, sugere-se utilizar apenas aquela proposta por Khandelwal (2013).

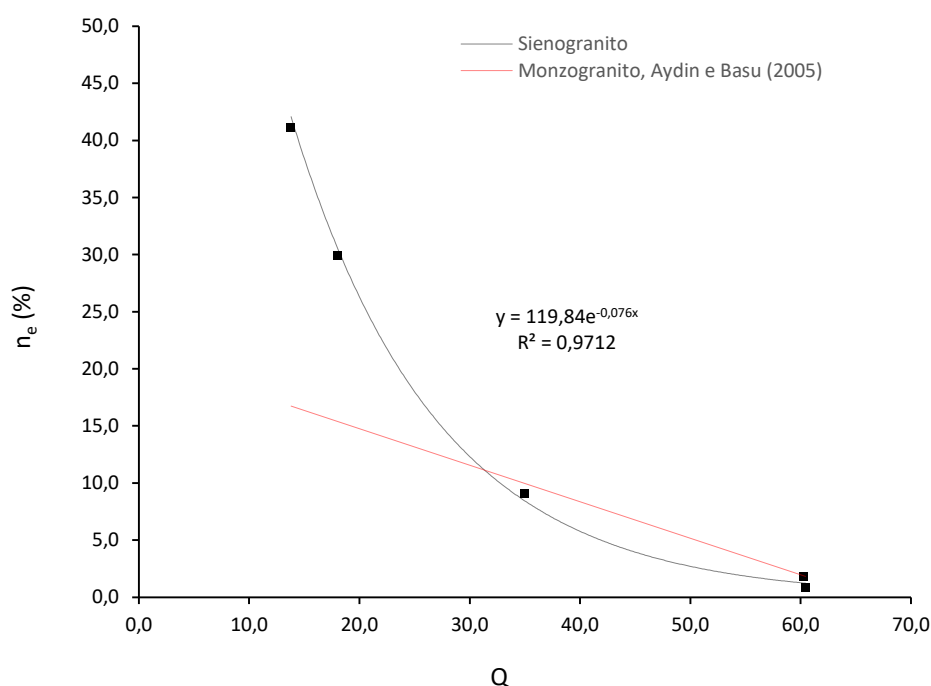
Figura 43 - Curvas de correlação Q vs. V_{PL} para o sienogranito e outros trabalhos.



Fonte: O autor.

6) n_e vs Q:

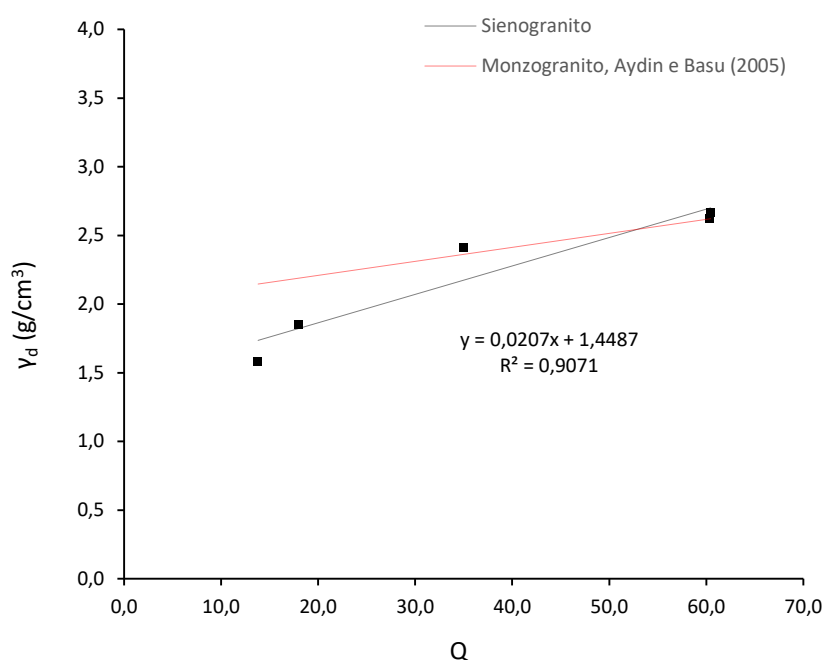
O valor Q do rebote de Schmidt diminui com o aumento da porosidade para o sienogranito (Figura 44), contudo esta variação em Q pode ser influenciada pela porosidade apenas a partir da rocha levemente intemperizada pois, apesar da porosidade ter aumentando 128,0 % (ainda assim sendo muito baixa), o valor Q diminuiu apenas 0.3 % entre os níveis W1 e W2. Em geral, pode-se dizer que a correlação $n_e \times Q$ para o sienogranito se torna forte a partir da rocha levemente intemperizada até o maior grau de intemperismo. A correlação obtida por Aydın e Basu (2005) exibe um comportamento linear entre estas propriedades para o monzogranito de Hong Kong, não sendo, em geral, aplicável ao sienogranito, já que comportamento deste descreve uma correlação exponencial. Apenas para a rocha W2 poder-se-ia utilizar a correlação daqueles autores, dado que neste nível de intemperismo ela superestima o valor da porosidade em apenas 1.5 % enquanto para rocha são e moderadamente alterada superestima 126.5 % e 9.4 %, respectivamente, e para a rocha muito e extremamente alterada subestima em 48.6 % e 59.3 %, respectivamente.

Figura 44 - Curvas de correlação n_e vs. Q para o sienogranito e outros trabalhos

Fonte: O autor

7) γ_d vs. Q :

Existe correlação entre γ_d e Q para o sienogranito sendo esta mais forte nos estágios inicial e avançado do intemperismo, dado que em W3 e, possivelmente, nas transições W2/W3 a W3/W4, a julgar pela dispersão dos valores em torno da linha de tendência da Figura 45, ocorre um desvio maior na proporcionalidade com que estas duas propriedades variam. A diminuição da massa específica seca é acompanhada da redução no valor Q , sendo bem discreta essa diminuição de W1 para W2 em ambas as propriedades, 1.8 % e 0.3 % em γ_d e Q , respectivamente. A correlação proposta por Aydin e Basu (2005) estima bem a massa específica seca do sienogranito são até a rocha moderadamente intemperizada, sendo a maior variação de γ_d entre W1 e W3 de apenas 2.0 %, para menos, exatamente em W3. A partir deste nível de intemperismo, a correlação obtida para o monzogranito se perde dos valores medidos para o sienogranito.

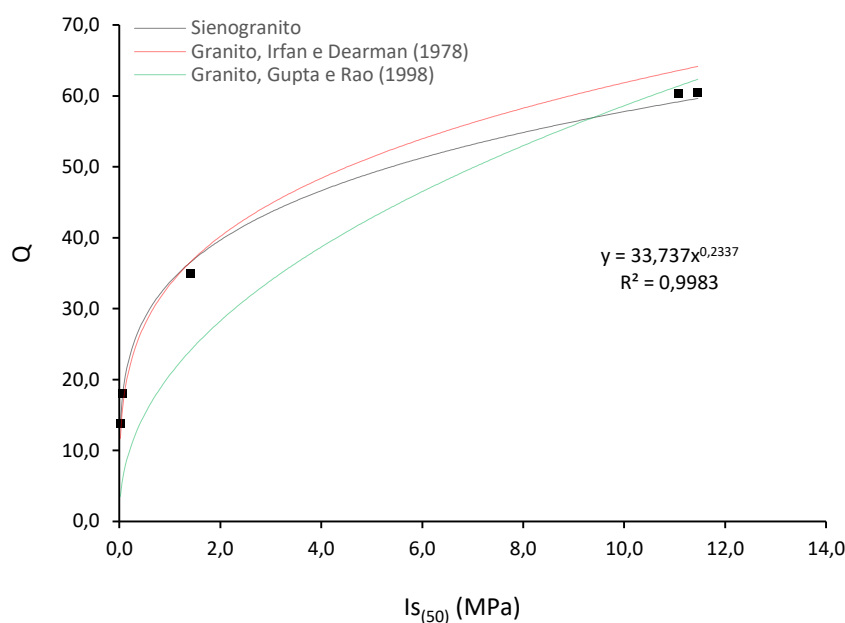
Figura 45 - Curvas de correlação γ_d vs. Q para o sienogranito e outros trabalhos.

Fonte: O autor.

8) Q vs. $I_{S(50)}$:

Entre o índice $I_{S(50)}$ e o valor Q do martelo de Schmidt a curva apresentada na Figura 46 para os dados do sienogranito demonstra que no início do intemperismo há alguma relação linear, mas que essa se perde a partir da rocha moderadamente intemperizada, ocorrendo grandes variações do valor de Q para pequenas mudanças no valor de $I_{S(50)}$ provocando um declínio acentuado da curva Q vs. $I_{S(50)}$, caracterizando uma correlação representada por uma potenciação. Este comportamento também foi verificado pelas correlações propostas por Irfan e Dearman (1978) e Gupta e Rao (1998). Dentre estas duas, a de 1978 melhor se aplica ao sienogranito, pois subestima o valor Q em no máximo 15.2 %, para W5, enquanto para aquela proposta por Gupta e Rao o valor estimado chega a ser 74.6 % menor. Contudo, nota-se que para o estágio inicial de intemperismo (W1 a W2) a proposta de Gupta e Rao é ligeiramente mais assertiva para o sienogranito pois superestima o valor de Q em apenas 3.1 % e 1.9 % para W1 e W2, respectivamente, ao passo que usando a correlação de Irfan e Dearman estes números são 6.1 % e 5.5 %, respectivamente.

Figura 46 - Curvas de correlação Q vs. $I_{S(50)}$ para o sienogranito e outros trabalhos.



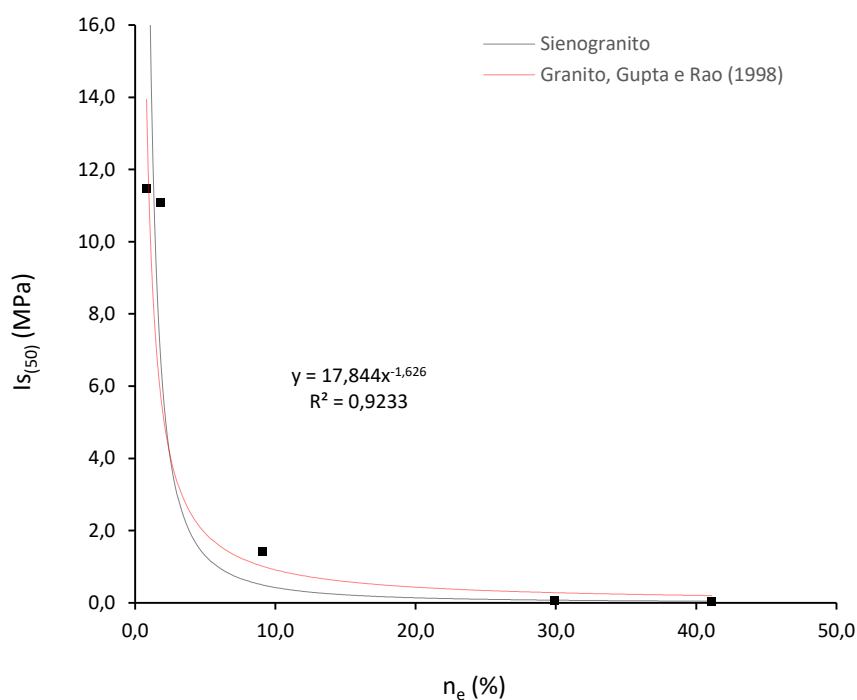
Fonte: O autor.

9) $I_{S(50)}$ vs. n_e :

Tanto para o sienogranito como em Gupta e Rao (1998), conforme Figura 47, os valores de $I_{S(50)}$ decrescem à medida que a porosidade aumenta com o avanço do grau de intemperismo, caracterizando uma relação exponencial negativa entre estas propriedades. Para o sienogranito, nos estágios inicial e final do intemperismo as variações da porosidade produzem pequenas variações no valor de $I_{S(50)}$. Novamente, é no início da transição entre rocha pouco intemperizada (W2) e a rocha muito intemperizada (W4) que a resistência demonstra grande sensibilidade à variação da porosidade, ocorrendo uma perda de aproximadamente 99,0 % para o sienogranito enquanto a porosidade aumenta aproximadamente 15 vezes. Apesar dos valores de $I_{S(50)}$ nas condições avançadas de intemperismo (W4 e W5) serem superestimados pela correlação de Gupta e Rao em 298,0 % e 889,3 % para W4 e W5, respectivamente, em termos de comportamento mecânico em ambos os níveis de intemperismo estes valores indicam que o material já está em uma condição extremamente friável e, portanto, se comportaria de maneira semelhante dada a sua reduzida resistência. Contudo, entre a rocha sã e medianamente intemperizada, a correlação proposta por Gupta e Rao ora superestima em 21,6 % o valor de $I_{S(50)}$ para W1 e ora subestima esta propriedade em 48,6 % e 29,0 % para W2 e W3, respectivamente. Portanto,

não se recomenda, em geral, a utilização da correlação entre $I_{s(50)}$ e n_e destes autores como forma de acessar os valores destas propriedades para o sienogranito

Figura 47 - Curvas de correlação $I_{s(50)}$ vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos.



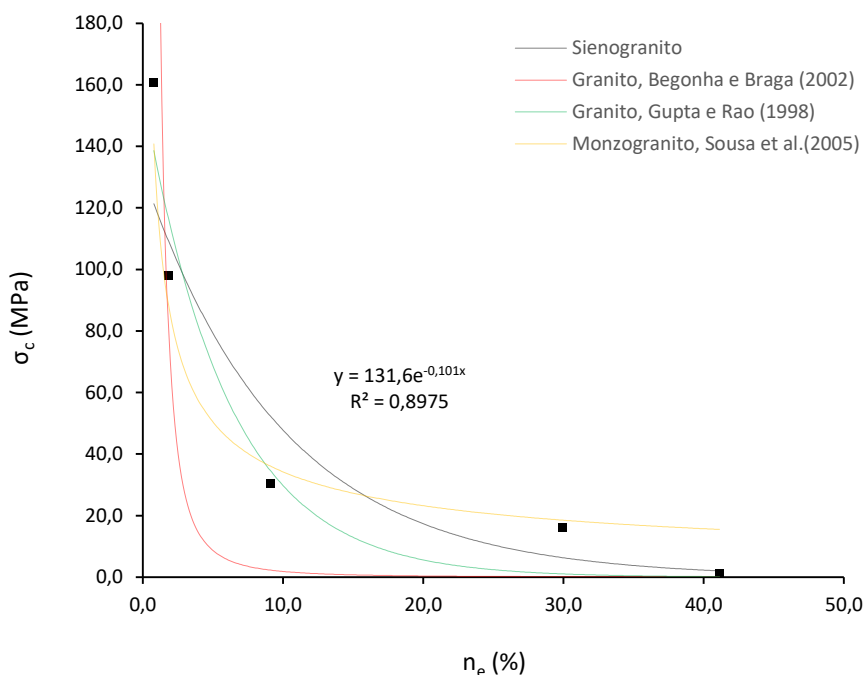
Fonte: O autor

10) σ_c vs. n_e :

Porosidade efetiva e resistência à compressão uniaxial apresentam um comportamento inverso à medida que aumenta a intensidade do intemperismo, ocorrendo um aumento da porosidade enquanto diminui a σ_c (Figura 48). Observa-se que para o sienogranito essa relação inversa não é proporcional e, portanto, sua correlação não é linear. Ocorre que pequena variação da porosidade no estágio inicial de intemperismo (W1 a W2) é acompanhada de grande perda de resistência. Contudo, existem outros elementos que podem ter sido influentes para a perda de resistência neste estágio, como por exemplo o microfissuramento dos grãos minerais da rocha, além da variação em sua composição e textura. Apenas de W4 para W5 a diminuição da σ_c é mais rápida que o aumento da porosidade, enquanto esta última aumenta 37,0 % aquela diminui 92,5 %, indo de 15,87 para 1,18 MPa. Isso demonstra que de W1 a W4 a porosidade foi mais sensível ao intemperismo do que σ_c . Nenhuma das três correlações testadas, Begonha e Braga (2002), Gupta e Rao (1998) e Sousa et al. (2005), foram suficientes

para estimar a resistência à compressão uniaxial do sienogranito a partir da porosidade efetiva, uma vez que de todas somente em um nível de intemperismo o valor estimado obteve um erro menor que 10.0 %.

Figura 48 - Curvas de correlação σ_c vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos



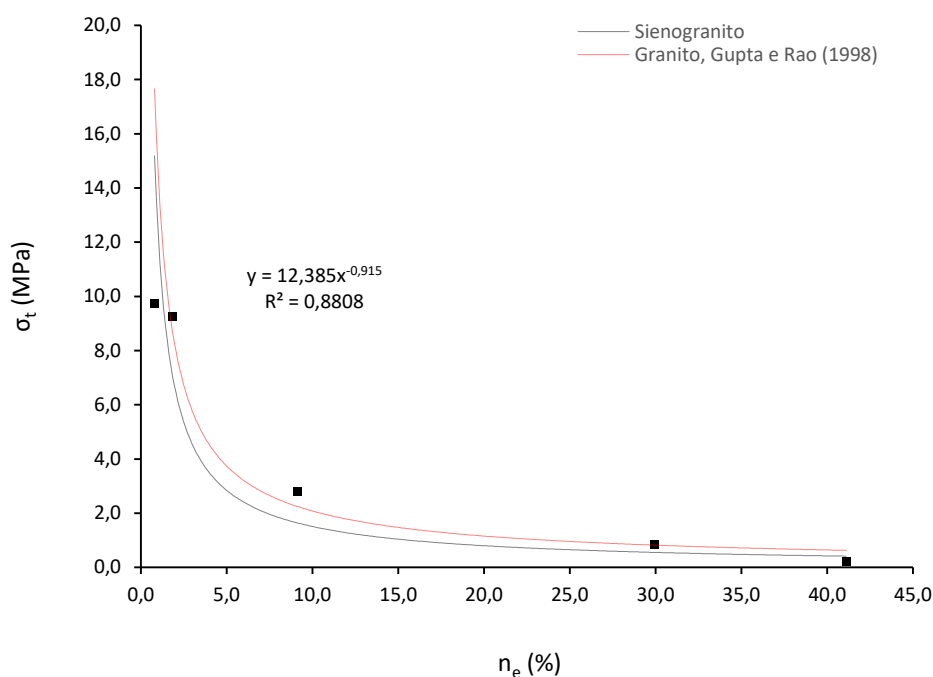
Fonte: O autor.

11) σ_t vs. n_e :

A resistência à tração para o sienogranito também diminui com o aumento da porosidade à medida em que aumenta o intemperismo (Figura 49). Contudo, no estágio inicial do intemperismo, o aumento da porosidade pouco ou em nada influencia σ_t . As maiores variações de σ_t assim como da porosidade ocorrem nos estágios seguintes do intemperismo entre a rocha levemente intemperizada (W2) e a rocha extremamente intemperizada (W5) com uma redução de 97.9 % na resistência à tração enquanto a porosidade aumenta aproximadamente 22 vezes. Para o sienogranito a porosidade efetiva aumenta mais rapidamente que a resistência à tração, em todos os níveis de intemperismo, não apresentando portanto comportamento linear mas sim de potenciação para a correlação entre estas propriedades. Apesar da correlação derivada do trabalho de Gupta e Rao (1998) se aproximar do valor observado para o sienogranito em W2 e W3, subestimando-o em 5.4 % e 3.4 %, respectivamente, há grande extrapolação desta correlação para prever o valor de σ_t quando se trata da rocha nos níveis de intemperismo W1, W3 e W5. Para este último, a correlação de

Gupta e Rao superestima a resistência a tração tornando-a pelo menos 3 vezes maior que o observado sendo, portanto, pouco aplicável a sua utilização.

Figura 49 - Curvas de correlação σ_t vs. n_e para o sienogranito e outros trabalhos



Fonte: O autor.

12) σ_c vs. V_{PL} :

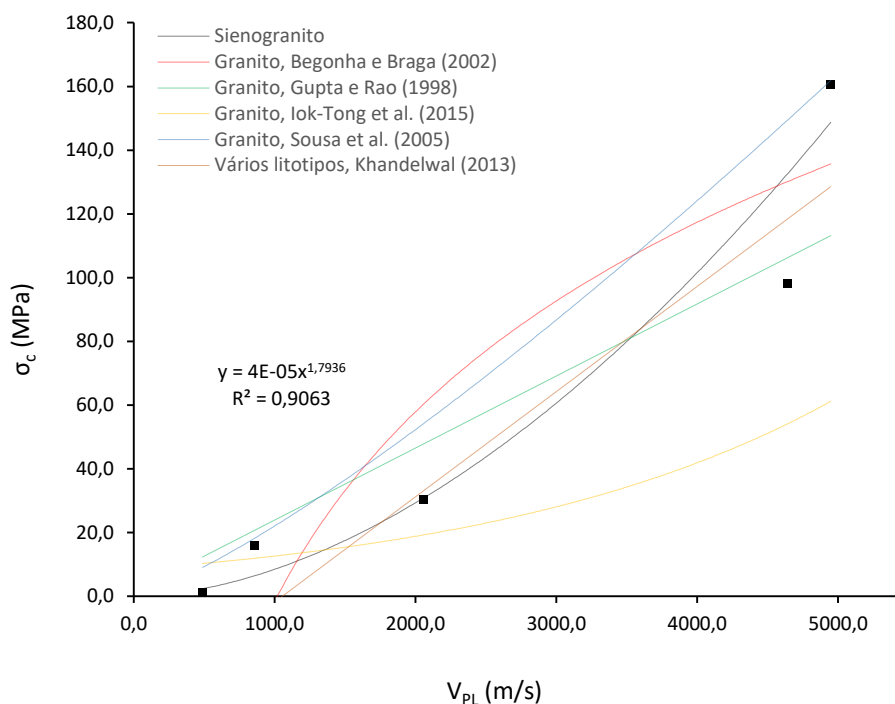
Entre a resistência à compressão uniaxial e a velocidade de propagação de ondas observa-se que ambas diminuem conforme avança o intemperismo. No início, de W1 para W2, e no estágio final, de W4 para W5, do intemperismo para o sienogranito ocorrem diminuições percentuais maiores nos valores de σ_c em relação a V_{PL} . Se recapitularmos os valores de módulo de elasticidade médio e massa específica seca observados para o sienogranito, também veremos que muito pouco estas propriedades variaram de W1 para W2 e, se tal como mencionou Goodman (1989), a V_{PL} é exclusivamente dependente destas propriedades, faz sentido que ela tenha sofrido uma diminuição de apenas 6,0 % de W1 para W2. Porém a σ_c não acompanhou essa lógica e, por isso, pode-se afirmar que, para o sienogranito a V_{PL} não deve ser considerada uma propriedade-índice confiável para estimar o valor σ_c da rocha levemente intemperizada (W2) e que, além disso, confirma-se aqui, por estas deduções, que pouco ou nada a perda de 39,0 % de resistência a compressão uniaxial

tenha sido influenciada pelas variações no módulo de elasticidade ou massa específica na transição inicial do intemperismo, de W1 para W2. Existem na literatura inúmeras correlações para se estimar σ_c da rocha em função do valor observado para V_{PL} . Contudo, é importante que se tenha muita cautela ao utilizar estas correlações pois, conforme verificado neste trabalho, das cinco correlações aqui testadas (Figura 50), Begonha e Braga (2002), Gupta e Rao (1998), Iok-Tong et al. (2005), Sousa et al. (2005) e Khandelwal (2013), nenhuma foi suficiente para estimar σ_c com menos de 10.0 % de erro para o valor observado em pelo menos dois níveis de intemperismo. Além disso, as correlações propostas por Begonha e Braga (2002) e Khandelwal (2013) se perdem totalmente a partir da rocha muito intemperizada (W4) retornando valores negativos para σ_c . Outra observação importante é que todas elas subestimam a considerável variação de σ_c de W1 para W2 observada neste trabalho. Apesar de não se recomendar a utilização destas correlações para o sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim, talvez, apenas para a rocha sã, poder-se-ia utilizar a correlação de Sousa et al. (2005) que, apenas nesta classe de intemperismo, apresentou um erro de apenas 0.8 %.

Ressalta-se aqui que, apesar do conjunto amostral que definiu estas correlações não ser amplo em termos do quantitativo e repetição de testes, as correlações para o sienogranito são significativas na medida em que representam todo o perfil de intemperismo do material, algo não muito frequente na literatura.

Para o sienogranito, considerando o coeficiente de correlação R^2 , foi determinada a seguinte classificação da significância de suas correlações: R^2 maior ou igual a 0.95 – muito significativa; R^2 maior ou igual a 0.90 e menor que 0.95 – significativa; R^2 menor que 0.90 - pouco significativa.

Para classificar as correlações propostas por outros autores em termos de sua aplicabilidade para estimar os valores das propriedades de engenharia do sienogranito, foi estabelecido um critério baseado na quantificação do erro percentual, para mais ou para menos, do valor estimado em relação ao valor observado, conforme Tabela 26. Todas as correlações obtidas para o sienogranito bem como as de outros trabalhos utilizadas nesta pesquisa, com suas respectivas classificações, estão resumidas na Tabela 27.

Figura 50 - Curvas de correlação σ_c vs. V_{PL} para o sienogranito e outros trabalhos

Fonte: O autor.

Tabela 26 – Critério para determinação da aplicabilidade de correlações de outros trabalhos ao sienogranito.

| Classificação | Critério |
|-------------------------|---|
| Seguramente aplicável | Em todos os níveis de intemperismo, um erro máximo de 5.0 %. |
| Fortemente aplicável | Em pelo menos 4 graus de intemperismo, um erro máximo de 5.0 %. |
| Muito aplicável | Em 3 níveis de intemperismo um erro máximo de 5.0 % e em pelo menos 1 nível dos demais, um erro máximo de 10.0 %. |
| Bem aplicável | Em pelo menos 4 níveis de intemperismo um erro máximo de 10.0 %. |
| Aplicável com restrição | Em pelo menos 3 graus de intemperismo, um erro máximo de 10.0 %. |
| Muito pouco aplicável | Em pelo menos 2 graus de intemperismo, um erro máximo de 10.0 %. |
| Não recomendada | Se em nenhum ou somente um grau de intemperismo houver um erro máximo de 10.0 %. |

Fonte: O autor.

Tabela 27 – Correlações obtidas e testadas para o sienogranito com suas respectivas classificações.

| Prop. | Autor | Litotipo | Correlação | R ² | Classificação |
|---------------------------|------------------------|----------------------|---|----------------|----------------------------|
| $\gamma \times n$ | Este trabalho | Sienogranito | $\gamma = 2.6717 - 0.0269 n$ | 0.99 | Muito significativa |
| | Begonha e Braga (2002) | Granito | $\gamma = 2.6562 - 0.0309 n$ | 0.99 | Muito aplicável |
| | Tugrul e Zarif (1999) | Granito | $\gamma = 2.695 - 0.0254 n$ | 0.74 | Seguramente aplicável |
| $IS_{(50)} \times V_{PL}$ | Este trabalho | Sienogranito | $IS_{50} = 4 \cdot 10^{-10} V_{PL}^{2.8337}$ | 0.99 | Muito significativa |
| | Gupta e Rao (1998) | Granito | $IS_{(50)} = 0,0002 V_{PL}^{1,2412}$ | 0.99 | Não recomendada |
| | Irfan e Dearman (1978) | Granito | $IS_{(50)} = 1.16 \cdot 10^{-7} V_{PL}^{2,095}$ | 0.99 | Não recomendada |
| $Q \times V_{PL}$ | Este trabalho | Sienogranito | $Q = 9.8913 + 0.0106 V_{PL}$ | 0.99 | Muito significativa |
| | Fort et al. (2013) | Monogranito | $Q = 12.17 + 0.0119 V_{PL}$ | 0.79 | Não recomendada |
| | Kahraman (2001) | Diferentes litotipos | $Q = 40.09 + 9.09 \cdot 10^{-3} V_{PL}$ | 0.69 | Não recomendada |
| | Sharma et al. (2011) | Diferentes litotipos | $V_{PL} = 966.22 e^{0.0262 Q}$ | 0.95 | Muito pouco aplicável |
| | Khandelwal (2013) | Diferentes litotipos | $Q = 6.849 + 0.012 V_{PL}$ | 0.96 | Bem aplicável |
| $Q \times IS_{(50)}$ | Este trabalho | Sienogranito | $Q = 33.737 IS_{(50)}^{0.2337}$ | 0.998 | Muito significativa |
| | Irfan e Dearman (1978) | Granito | $Q = 33.779 IS_{(50)}^{0.268}$ | 0.99 | Bem aplicável |
| | Gupta e Rao (1998) | Granito | $Q = 20.649 IS_{(50)}^{0.4532}$ | 0.97 | Muito pouco aplicável |
| $IS_{(50)} \times n$ | Este trabalho | Sienogranito | $IS_{(50)} = 17.844 n^{-1.626}$ | 0.92 | Significativa |
| | Gupta e Rao (1998) | Granito | $IS_{(50)} = 10.953 n^{-1.08}$ | 0.82 | Não recomendada |
| $n \times Q$ | Este trabalho | Sienogranito | $n = 119.84 e^{-0.076 Q}$ | 0.97 | Muito significativa |
| | Aydin e Basu (2005) | Monzogranito | $n = 21.153 - 0.3199 Q$ | 0.81 | Muito pouco aplicável |
| $\gamma \times Q$ | Este trabalho | Sienogranito | $\gamma = 1.4487 + 0.0207 Q$ | 0.91 | Significativa |
| | Aydin e Basu (2005) | Monzogranito | $\gamma = 2.0044 + 0.0102 Q$ | 0.84 | Bem aplicável |
| $V_{PL} \times n$ | Este trabalho | Sienogranito | $V_{PL} = 4937.9 - 1206 \ln n$ | 0.98 | Muito significativa |
| | Fort et al. (2013) | Monzogranito | $V_{PL} = 5282.68 - 1713.0167 \ln n$ | 0.89 | Não recomendada |

Tabela 37 – Correlações obtidas e testadas para o sienogranito com suas respectivas classificações. **(continuação).**

| Prop. | Autor | Litotipo | Correlação | R ² | Classificação |
|--------------------------|---------------------------|------------------|--|----------------|----------------------------|
| | Sousa et al. (2005) | Granito | $V_{PL} = 4083.4 n^{-0.42}$ | 0.79 | Não recomendada |
| $V_{PL} \times \gamma$ | Este trabalho | Sienogranito | $V_{PL} = 17.506 e^{2.0849 \gamma}$ | 0.98 | Muito significativa |
| | Volarovich e Bajuk (1977) | Rochas ígneas | $V_{PL} = (2.67 \gamma - 0.08) \cdot 10^3$ | - | Não recomendada |
| | Marle (1978) | Várias rochas | $V_{PL} = (3.1 \gamma - 2.98) \cdot 10^3$ | - | Não recomendada |
| $\sigma_c \times n$ | Este trabalho | Sienogranito | $\sigma_c = 131.6 e^{-0.101 n}$ | 0.90 | Pouco significativa |
| | Begonha e Braga (2002) | Granito | $\sigma_c = 184.9028 \cdot 0.7952^n$ | 0.93 | Não recomendada |
| | Gupta e Rao (1998) | Granito | $\sigma_c = 158.36 e^{-0.167 n}$ | 0.99 | Não recomendada |
| | Sousa et al. (2005) | Monzogranito | $\sigma_c = 124.28 n^{-0.56}$ | 0.65 | Não recomendada |
| $\sigma_t \times n$ | Este trabalho | Sienogranito | $\sigma_t = 12.385 n^{-0.915}$ | 0.88 | Pouco significativa |
| | Gupta e Rao (1998) | Granito | $\sigma_t = 14.615 n^{-0.847}$ | 0.90 | Muito pouco aplicável |
| $\sigma_c \times V_{PL}$ | Este trabalho | Sienogranito | $\sigma_c = 4 \cdot 10^{-5} V_{PL}^{1.7939}$ | 0.91 | Significativa |
| | Begonha e Braga (2002) | Granito | $\sigma_c = 85.8524 \ln V_{PL} - 594.7097$ | 0.91 | Não recomendada |
| | Gupta e Rao (1998) | Granito | $\sigma_c = 1.3094 + 0.0226 V_{PL}$ | 0.98 | Não recomendada |
| | Iok-Tong et al. (2015) | Granito | $\sigma_c = 8.45 e^{0.0004 V_{PL}}$ | - | Não recomendada |
| | Sousa et al. (2005) | Granito | $\sigma_c = 0.004 V_{PL}^{1.247}$ | 0.72 | Não recomendada |
| | Khandelwal (2013) | Vários litotipos | $\sigma_c = 0.033 V_{PL} - 34.83$ | 0.87 | Não recomendada |

Fonte: O autor.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente pesquisa uma abrangente caracterização de perfis de intemperismo quanto à sua morfologia e as características mineralógicas, físicas e geomecânicas de sua matriz permitiu produzir um referencial para o sienogranito da região de Cachoeiro do Itapemirim. Deste trabalho, as principais conclusões e considerações são enumeradas a seguir:

- 1) A morfologia dos maciços rochosos da área de estudo evoluiu para a sua condição atual devido, principalmente, à rede de descontinuidades horizontais e verticais que se desenvolveram no passado, a partir dos processos naturais de modelagem do relevo e consequente alívio de tensões, permitindo o avanço, em profundidade, de processos de alteração química os quais se estenderam por todo o maciço e produziram significativas modificações, tornando-os, em sua maioria, perfis de intemperismo compostos por *corestones*, envoltos por um solo residual.
- 2) No tempo presente, pode-se afirmar que a dinâmica natural de denudação do relevo, a exposição das camadas subsuperficiais aos processos de erosão e transporte, com influência das atividades antrópicas, e o contínuo desenvolvimento, no tempo geológico, de descontinuidades nos maciços rochosos somado às condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento do intemperismo químico em profundidade, são os mecanismos que governam o intemperismo dos maciços de sienogranito na região.
- 3) Dentre os elementos de descrição morfológica dos perfis de intemperismo do sienogranito, aqueles que melhor o descrevem são a sua rede de descontinuidades, a ocorrência, tamanho e forma dos *corestones*, e a razão rocha/solo.
- 4) Dentre as feições morfológicas, a mais característica à maioria dos perfis avaliados são os *corestones*, para os quais recomenda-se aqui um trabalho futuro que possa aprofundar as questões relacionadas ao comportamento geomecânico destas peculiares massas de rocha, individualmente, devido ao seu mecanismo de desenvolvimento do intemperismo diferenciar-se do observado para o maciço rochoso como um todo.

- 5) Em escala de matriz, controlam as transformações do sienogranito as microfissuras no estágio inicial do intemperismo e, a partir da rocha levemente intemperizada, a alterabilidade de cada mineral individualmente, destacando-se a decomposição de feldspatos e biotitas como principal processo de intemperismo químico.
- 6) Verificou-se que a descrição petrográfica é fundamental para compreensão dos processos de decomposição e fragmentação da matriz, sendo os índices petrográficos derivados desta descrição muito úteis e recomendados para avaliar a influência das transformações microscópicas sobre a variação de suas propriedades de engenharia.
- 7) Dentre as propriedades do sienogranito que refletem sua composição, textura e estrutura constatou-se que a porosidade é a mais sensível ao intemperismo e que pequenas variações da massa específica, apesar de não ser uma propriedade tão sensível ao intemperismo, em valor absoluto, tem grande influência em outras propriedades de engenharia desta rocha.
- 8) As propriedades índice do sienogranito variam muito pouco no estágio inicial de intemperismo, demonstrando serem mais sensíveis ao intemperismo químico o qual, a partir da rocha moderadamente intemperizada, provoca grandes variações em seus valores.
- 9) A resistência à compressão uniaxial para o sienogranito bem como seu elevado módulo de elasticidade 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.
- 10) Por outro lado, dada a sua expressiva variação, a resistência a compressão uniaxial mostra-se como a propriedade geomecânica mais sensível dentre as demais e, deve ser objeto de trabalhos futuros para se investigar e ser conclusivo a respeito da sua variação entre os níveis de intemperismo W1 e W2, já que esta não foi acompanhada, como era de se esperar, de grandes variações em outras propriedades de resistência e deformabilidade.

- 11) O sienogranito, em geral, apresenta um comportamento frágil do ponto de vista da sua resistência residual e capacidade de sofrer deformação após ruptura, sendo, portanto, indicado trabalhos mais aprofundados sobre a variação de suas propriedades de resistência e deformação com a variação do estado de tensões.
- 12) Os resultados dos testes para obtenção das propriedades de deformação do sienogranito W4 e W5 demonstraram que a metodologia DIC aplicada ao sienogranito com esta finalidade tem limitações e potenciais, devendo sua utilização ser objeto de pesquisa em trabalhos futuros, podendo indicar sua validade e disponibilidade futura como ferramenta para avaliação de propriedades de deformação das rochas. Contudo, para estimar a deformação axial e o módulo, ainda que com uma imprecisão inerente, resultou em valores coerentes e próximos da literatura. Por outro lado, a utilização do DIC não se mostra aplicável para estimar a deformação lateral quando apenas uma superfície do corpo-de-prova é filmada. Para trabalhos futuros sugere-se realizar a filmagem simultânea de duas ou mais faces de corpos-de-prova prismáticos durante compressão uniaxial e avaliar em conjunto os dados coletados.
- 13) Comparadas todas as propriedades de engenharia observadas para o sienogranito de Cachoeiro de Itapemirim com diferentes trabalhos que também abordaram intemperismo em granitos, percebe-se que existe mais aproximação dos resultados dos valores de índices físicos entre estes trabalhos para os dois primeiros níveis de intemperismo (W1 e W2); enquanto, para as propriedades índice e geomecânicas, em geral, os resultados tendem a se aproximar nos níveis W3 e W4 e, além disso, é nestes níveis que se verifica as maiores variações destas propriedades para a maioria dos trabalhos.
- 14) Em geral, as correlações obtidas para o sienogranito se comportam bem, apresentando bons coeficientes de correlação, demonstrando haver relação entre suas propriedades. Das 12 correlações apresentadas 7 foram classificadas como muito significativas, por obter um coeficiente R^2 maior que 0.95, sendo muito representativas das propriedades da rocha em todos os níveis de intemperismo avaliados.

- 15) De acordo com o critério proposto, dentre as 26 correlações de outros autores testadas para estimar as propriedades de engenharia do sienogranito, 17 foram classificadas como não recomendadas, demonstrando que é necessário ter cuidado ao se escolher e utilizar um correlação para estimar propriedades de engenharia, devendo o usuário, como sugestão, sempre testar mais de uma opção em busca da que melhor se aplique para as reais condições da rocha que está sendo avaliada.

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, p. 94-103, 2016.
- ABAD, S. V. A. N. K.; MOHARMAD, E.T.; KOMOO, I. Dominant weathering profiles of granite in southern Peninsular Malaysia. **Engineering Geology**, v. 183, p. 208-2015, 2014.
- ALDRED, J. *et al.* The influence of solar-induced thermal stresses on the mechanical weathering of rocks in humid mid-latitudes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, p. 603-614, 2016.
- ALMEIDA, F. F. O Cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C170/C170M: standard test method for compressive strength of dimension stone**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5873: standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2014.
- ARIAS, D. *et al.* Deep weathering of granitic rocks: A case of tunnelling in NW Spain. **Catena**, v. 137, p. 572-580, 2016.
- AYDIN, A.; BASU, A.; The Schmidt hammer in rock material characterization. **Engineering Geology**, v. 81, p. 1-14, 2005.
- BASU, A.; CELESTINO, T. B.; BORTOLUCCI, A. A. Evaluation of rock mechanical behaviors under uniaxial compression with reference to assessed weathering grades. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 42, p. 73-93, 2009.
- BAYNES, F. J.; DEARMAN, W. R. The relationship between the microfabric and the engineering properties of weathered granite. **Engineering Geology**, n.18, p. 191-197, 1978.
- BEGONHA, A.; BRAGA, M. A. S. Weathering of Oporto granite: geotechnical and physical properties. **Catena**, v. 49, p. 57-76, 2002.
- BORRELLI, L. *et al.* Weathering grade in granitoid rocks: the San Giovanni in fiore area (Calabria, Italy). **Journal of Maps**, v. 12, n.2, p. 260-276, 2015.
- BORRELLI, L.; CIURLEO, M.; GULLÀ, G. Shallow landslide susceptibility assessment in granitic rocks using GIS-based statistical methods: the contribution of the weathering grade map. **Landslides**, v. 15, n. 6, 2018.
- BRAGA, M. A. S.; PAQUET, H.; BEGONHA, A. Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization. **Catena**, v. 49, p. 41-56, 2002.
- CERYAN. S.; TUDES, S.; CERYAN, N. A new quantitative weathering classification for igneous rocks. **Environ. Geol.**, v. 55, p. 1319-1336, 2008.

CHIU, C. F.; CHARLES, W. W. N. G. Relationships between chemical weathering indices and physical and mechanical properties of decomposed granite. **Engineering Geology**, v. 179, p. 76-89, 2014.

COCKELL, C. S.; KELLY, L. C.; MARTEINSSON, V. Actinobacteria: an ancient phylum active in volcanic rock weathering. **Geomicrobiology Journal**, v. 30, n. 8, p. 706-720, 2013.

DAGDELENLER, G.; SEZER, E. A.; GOKCEOGLU, C. Some non-linear models to predict the weathering degrees of a granitic rock from physical and mechanical parameters. **Expert Systems with Applications**, v.38, p. 7476-7485, 2011.

DEARMAN, W. R. Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the BS5930:1981 proposals. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 28, p. 267-276, 1995.

DEARMAN, W. R. State of weathering: the search for a rational approach. **Engineering Geology Special Publication**, v.2, 1986.

DEARMAN, W. R. Weathering classification in the characterisation of rock for engineering purpose in british practice. **Engineering Geology**, n. 9, p. 33-42, 1974.

DEARMAN, W. R. Weathering classification in the characterization of rock: a revision. **Bull of the Int. Assoc. of Engineering Geology**, v. 13, p. 123-127, 1976.

DEARMAN, W. R.; BAYNES, F. J.; IRFAN, T. Y. Engineering grading of weathered granite. **Engineering Geology**, v. 12, p. 345-374, 1978.

DEWANDEL, B. *et al.* A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. **Journal of Hidrology**, v. 330, p. 260-284, 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

FORT, R.; BUERGO, M. A.; PEREZ-MONSERRAT, E. M. Non-destructive testing for the assessment of granite decay in heritage structures compared to quarry stone. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 61, p. 296-305, 2013.

FOSSSEN, H. **Geologia Estrutural**. 2. ed. Oficina de Textos. 2012. 537 p.

GARY, M; McAFEE Jr., R.; WOLF, C. L. **Glossary of geology**. American Geological Institute, Washington, D.C. 805 p.

GOM COMPANY. **GOM Correlate: evaluation software for 3D testing**. Disponível em: <https://www.gom-correlate.com/en/download.php>. Acesso em: 13 nov. 2018.

GONG, Q. *et al.* Element behaviors due to rock weathering and its implication to geochemical anomaly recognition: a case study on Linglong biotite granite in Jiaodong peninsula, China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 128, p. 14-24, 2013.

GOUDIE, A. S. Quantification of rock control in geomorphology. **Earth-Science Reviews**, v. 159, p. 374-387, 2016.

GUPTA, A. S.; RAO, K. S. Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. **Bull. Eng. Geol. Env.**, v. 57, p. 161-172, 1998.

GUPTA, A. S.; RAO, K. S. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compressive state. **Engineering Geology**, v. 56, p. 257-274, 2000.

GUROCAK, Z.; YALCIN, E. Excavatability and the effect of weathering degree on the excavatability of rock masses: an example from Eastern Turkey. **Journal of African Earth Sciences**, v. 118, p. 1-11, 2016.

HEIDARI, M.; MOMENI, A. A.; NASERI, F. New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters. **Engineering Geology**, v. 166, p. 65-73, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Dados meteorológicos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 20 abr. 2019.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. Rock and soil description and classification for engineering geology mapping. **Bull of the Int. Assoc. of Engineering Geology**, n. 24, p. 235-274, 1981.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested methods for the quantitative description of discontinues in rock masses. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.** v. 15, n. 6, p. 319-368, 1978.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. **The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006**. Ankara, Turkey, 2007. 628 p.

IOK-TONG, N.; KA-VEENG, Y.; CHI-HOU, L. Predictive model for uniaxial compressive strength for Grade III granitic rocks from Macao. **Engineering Geology**, v. 199, p. 28-37, 2015.

IRFAN, T. Y.; DEARMAN, W. Engineering Classification and index properties of a weathered granite. **International Association of Engineering Geology**, n. 17, p. 79-90, 1978.

IRFAN, T. Y.; DEARMAN, W. The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, v. 11, p. 233-244, 1978a.

KAJDAS, B.; MICHALIK, M. J.; MIGÓN, P. Mechanisms of granite alteration into grus, Karkonosze granite, SW Poland. **Catena**, v. 150, p. 230-245, 2017.

KANZAKI, Y.; KUMP, L. R. Biotic effects on oxygen consumption during weathering: implications for the second rise of oxygen. **Geology**, v. 45, n. 7, p. 611-614, 2017.

KHANDELWAL, M. Correlating P-wave velocity with the physico-mechanical properties of different rocks. **Pure and Applied Geophysics**, v. 170, p. 507-514, 2013.

KHANLARI, G. R.; HEIDARI, M.; MOMENI, A. A. Assessment of weathering processes effect on engineering properties of Alvand granitic rocks (west of Iran), based on weathering indices. **Environmental Earth Science**, v. 67, p. 713-725, 2012.

- KHANLARI, G. R.; NASERI, F. Investigation of physical deterioration of Malayer granitic rocks using a new weathering coefficient (K_r). **Environmental Earth Science**, v. 75, p. 1-14, 2016.
- KHARAMAN, S. A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number. **Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 38, p. 729-733, 2001.
- LACERDA, W. A. Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: field and laboratory observations. **Geomorphology**, v. 87, p. 104-119, 2007.
- LAN, H. X. *et al.* Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China. **Journal of Asian Earth Sciences**, v.21, p. 353-364, 2003.
- LE MAITRE, R. W (ed.). **Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 236 p.
- 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.
- LIU, W. *et al.* Deep weathering along a granite ridgeline in a subtropical climate. **Chemical Geology**, v. 427, p. 17-34, 2016.
- LUMB, P. Engineering properties of fresh and decomposed igneous rocks from Hong Kong. **Engineering Geology**, v. 19, p. 81-94, 1983.
- LUMB, P. The properties of decomposed granite. **Géotechnique**, v. 12, n. 3, p. 226-243, 1962.
- MARLE, C. Geophysik und subsequenter Vulkanismus: dargestellt am Beispiel des NW-sächsischen vulkanit komplexes. Thesis, Universität Leipzig, 1978.
- MARQUES, E. A. G. **Caracterização geomecânica de um perfil de intemperismo em kinzigito**. 1998. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- MARTIM, R. P.; HENCHER, S. R. Principles for description and classification of weathered rock for engineering purposes. **Engineering Geology Special Publication**, n. 2, 1986.
- MIGON, P.; WOO, K-S.; KASPRZAK, M. Landform recognition in granite mountains in East Asia (Seoraksan, Republic of Korea, and Huangshan and Sanqingshan, China): a contribution os geomorphology to the Unesco world heritage. **Quaestiones Geographicae**, v. 37, n. 1, p. 103-114, 2018
- MIRANDA, T.; RIBEIRO, S. L.; TINOCO, J. Updating of the hierarchical rock mass rating (HRMR) system and a new subsystem developed for weathered granite formations International **Journal of Mining Science and Technology**, v. 24, p. 769-775, 2014.

MOHAMAD, E. T. *et al.* Effects of moisture content on the strength of tropically weathered granite from Malaysia. **Bull. Eng. Geol. Environ.**, v. 75, p. 369-390, 2016.

MOMENI, A. *et al.* New engineering geological weathering classifications for granitoid rocks. **Engineering Geology**, v. 185, p. 43-51, 2015.

MOMENI, A. *et al.* The effect of weathering on durability and deformability properties of granitoid rocks. **Bull. Eng. Geol. Environ.**, v. 76, p. 1037-1049, 2017.

MOYE, D. Engineering geology for the Snowy Mountains scheme. **Journal of the Institution of Engineers of Australia**, v. 27, p. 281-299, 1955.

NEWBERRY, 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.

NOGUEIRA, J. R. *et al.* Geologia e recursos minerais da folha São Fidelis SF.24-V-C-IV, estado do Rio de Janeiro escala 1:100,000. CPRM, Belo Horizonte, 2015.

OLIVEIRA, F. B. *et al.* Mapeamento Geológico e Geologia Regional, first edition, v1. CAUFES, Alegre, Espírito Santo, 2018. <http://www.geologia.ufes.br/e-book> (accessed 18 July 2019).

OLIVEIRA, F. B. *et al.* Mapeamento Geológico e Geologia Regional, first edition, v2. CAUFES, Alegre, Espírito Santo, 2018a. <http://www.geologia.ufes.br/e-book> (accessed 18 July 2019).

OLLIER, C. D. Very deep weathering and related landslides. **Engineering Geology Special Publications**, v.23, p. 5-14, 2010.

PERRI, F. *et al.* Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). **Catena**, v. 113, p. 325-340, 2013.

RODBELL, D. T. *et al.* Development of unusual rock weathering features in the Cordillera Blanca, Peru. **Quaternary Research**, v. 77, p. 149-158, 2012.

RUHE, R. V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. **Soil Science**, v. 82, p. 441-455, 1956. 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.

RUXTON, B. P.; BERRY, L. Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 68, p. 1263-1292, 1957.

SALIM, N. A. B. M.; MOHAMED, Z.; BERHAN, M. N. Stress ratio effect on fatigue life of tropically weathered rock. **Bull. Eng. Geol. Environ.**, <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1181-6>, 2017.

SCARCIGLIA, F. *et al.* Weathering profiles in granitoid rocks of the Sila Massif uplands, Calabria, southern Italy: new insights into their formation processes and rates. **Sedimentary Geology**, v. 336, p. 46-67, 2016.

SHARMA, P. K.; KHANDELWAL, M.; SINGH, T. N. A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability and P-wave velocity. **Int. J. Earth Sci.**, v. 100, p. 189-195, 2011.

SOUSA, L. M. O. *et al.* Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. **Engineering Geology**, v. 77, p. 153-168, 2005.

THE LOGGING of rock cores for engineering purposes. **Quartely Journal of Engineering Geology**, v. 3, p. 1-24, 1970.

THE PREPARATION of maps and plans in terms of engineering geology. **Quartely Journal of Engineering Geology**, v. 5, p. 295-382, 1972.

TUGRUL, A.; ZARIF, I. H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. **Engineering Geology**, v. 51, p. 303-317, 1999.

VIEIRA V. S. **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Cachoeiro do Itapemirim, Folha SF.24-V-A. Escala 1:250.000.** Brasília: DNPM/CPRM, 1997. 99 p.

VIEIRA V. S.; MENEZES, R.G. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais.** Belo Horizonte: CPRM, 2015. 289 p.

VOLAROVICH, M. P., BAJUK, E. I. Elastic properties of rocks. **Nakova dumka**, Kiev, p. 43-49, 1977.