



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**RENATA DE OLIVEIRA LOPES**

**ESTUDO DA REMEDIAÇÃO DE ALTERABILIDADES NOS PRINCIPAIS  
QUARTZITOS ORNAMENTAIS DO CEARÁ**

**FORTALEZA**

**2025**

RENATA DE OLIVEIRA LOPES

ESTUDO DA REMEDIAÇÃO DE ALTERABILIDADES NOS PRINCIPAIS QUARTZITOS  
ORNAMENTAIS DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre(a) em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Irani Clezar Mattos.

FORTALEZA

2025

RENATA DE OLIVEIRA LOPES

ESTUDO DA REMEDIAÇÃO DE ALTERABILIDADES NOS PRINCIPAIS QUARTZITOS  
ORNAMENTAIS DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre(a) em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em: 31/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Irani Clezar Mattos (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Antonio Leal Neto - UFC  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr<sup>a</sup> Nuria Fernández Castro  
Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)

A minha irmã, Giovanna.

## AGRADECIMENTOS

À Instituição FUNCAP pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio durante 18 meses.

Ao Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Irani Clezar Mattos pela orientação e auxílio na realização do trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

A meus pais e minha irmã, Giovanna, por torcerem por mim, ainda que muitas das vezes eu não consiga estar presente, nem me manter sã durante o processo, obrigada.

A minha musa inspiradora, Beyoncé, pelo exemplo e pelas canções. Em especial a frase: *“Gosto de pensar que nasci para algo extraordinário”* tal que me toca profundamente a dar o melhor de mim em todos os momentos.

A minha melhor amiga, Catarina, pela amizade de longa data que ultrapassam às barreiras da universidade, sem seu apoio às coisas seriam bem menos recompensadoras, obrigada.

Aos meus demais amigos queridos, que me amam de longe, se preocupam comigo e fazem questão de se manterem vivos em meu coração, em especial: Naara, pela incontável parte nos esforços que faço para ser uma pessoa melhor, admiração e carinho.

Aos professores da pós-graduação que me acompanharam, inspiraram e guiaram nesse processo, em especial, Prof.<sup>a</sup> Karen e Prof.<sup>a</sup> Rita pelos aperfeiçoamentos fundamentais.

Ao departamento de Geologia da UFC pelo apoio durante os 48 meses de execução da pesquisa.

A coordenação do programa de Pós graduação em Geologia pelo suporte oferecido durante o curso de mestrado acadêmico.

Ao LME-Laboratório de Microscopia Eletrônica pela estrutura física e tecnológica, imprescindível para a realização dos experimentos e análises de brilho e colorimetria, MEV e registro das fotos com a lupa para melhor visualização das amostras.

A todos os funcionários e técnicos que compõem o DEGEO e o PPGG, sem os quais muito não seria viável, em especial Joel pela amizade e o apoio nos procedimentos metodológicos.

Ao LAGETEC pelo apoio durante a realização dos experimentos dos índices físicos. Como também, ao NUTEC pelo apoio técnico na preparação das amostras e

realização dos experimentos não destrutivos de Ultrassom.

A todos aqueles que acreditam nas geociências, em especial aos geógrafos e pesquisadores das ciências da Terra em geral, obrigada por continuarem apaixonado-se pela causa. Pois sem paixão não há ciência.

Agradeço aos meus alunos de estágio docente, por me manterem em constante estado de aperfeiçoamento. Fez total diferença em minha preparação para futuras experiências docentes dentro e fora do ensino superior.

“Mesmo uma pedra no campo, quando olhada  
com reverência, revela a eternidade”

(Saigyō *Hōshi*, 1997.)

## RESUMO

A crescente demanda por materiais naturais de alta resistência e estética diferenciada impulsionou o uso de quartzitos ornamentais brasileiros na construção civil. Entretanto, a performance desses materiais frente a agentes químicos de uso cotidiano, especialmente em ambientes domésticos, ainda carece de estudos detalhados. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo investigar a alterabilidade físico-química de três variedades comerciais de quartzito do Ceará — Perla Santana, Cristallo Pink e Taj Mahal —, focando nos processos de degradação estética e na eficácia de métodos de remediação. A metodologia adotada foi multidisciplinar, envolvendo ensaios normatizados (brilho, porosidade, densidade e absorção), análises físico estruturais (PUNDIT e MEV/EDS) e testes de aplicação e remoção de agentes químicos (KOH, HCl, NaCl, hipoclorito, tintas, entre outros). As amostras foram inicialmente polidas de forma padronizada e, em seguida, submetidas à ação controlada dos reagentes por períodos variados, simulando diferentes cenários de uso e exposição. Nos ensaios de brilho, realizados com glossímetro a 60°, o KOH provocou as maiores perdas, superiores a 16% em algumas amostras, especialmente no Cristallo Pink. O hipoclorito de sódio apresentou impacto visual quase nulo, indicando comportamento superficial diferenciado. As análises colorimétricas na escala CIELAB mostraram variações significativas nos parâmetros L\*, a\* e b\*, com  $\Delta E$  superiores a 3, valor perceptível ao olho humano. A análise estrutural pelo ensaio PUNDIT evidenciou correlação entre a velocidade de propagação de ondas e a integridade microestrutural. Zonas compactas e pouco alteradas apresentaram velocidades acima de 4000 m/s, enquanto valores inferiores a 2500 m/s indicaram microfissuras e heterogeneidade interna. As análises em MEV revelaram estruturas escamosas, lâminas orientadas e preenchimento de fraturas por minerais secundários, como caulinita e micas, enquanto o EDS confirmou altos teores de alumínio e potássio, compatíveis com muscovita e feldspatos alterados. Na etapa de remediação, testaram-se saponáceo, ácido cítrico, bicarbonato de sódio, vinagre e suco de limão. As manchas orgânicas responderam melhor aos ácidos orgânicos, e o saponáceo foi eficaz na remoção de tintas. A profundidade da mancha e o tempo de exposição ao reagente agressor foram determinantes na eficácia da limpeza. Os resultados indicam forte relação entre porosidade, microfissuramento e suscetibilidade à alteração estética. Rochas com maior porosidade apresentaram maiores perdas de brilho e alterações colorimétricas, sugerindo que a conectividade dos poros facilita a penetração de agentes agressivos. Assim, a resistência química dos quartzitos não depende apenas da composição mineralógica, mas também da integridade física, granulometria, orientação das foliações e grau de compactação.

Conclui-se que a abordagem integrada adotada fornece avaliação técnica robusta sobre a durabilidade estética dos quartzitos cearenses em uso doméstico, oferecendo subsídios para o setor de rochas ornamentais. Como perspectivas futuras, recomenda-se a aplicação de DRX, tomografia de raios-X e envelhecimento acelerado para aprofundar a compreensão da evolução dessas rochas em diferentes condições de uso.

**Palavras-chave:** rochas ornamentais; quartzito; alterabilidade.

## ABSTRACT

The growing demand for natural materials with high strength and distinctive aesthetics has driven the use of Brazilian ornamental quartzites in the construction industry. However, the performance of these materials when exposed to everyday chemical agents, particularly in domestic environments, still requires detailed investigation. In this context, the present research aimed to investigate the physicochemical alterability of three commercial varieties of quartzite from Ceará — Perla Santana, Cristallo Pink, and Taj Mahal — focusing on aesthetic degradation processes and the effectiveness of remediation methods. The methodology adopted was multidisciplinary, involving standardized tests (gloss, porosity, density, and absorption), physico-structural analyses (PUNDIT and SEM/EDS), and application/removal tests with chemical agents (KOH, HCl, NaCl, sodium hypochlorite, paints, among others). Samples were initially polished in a standardized manner and subsequently subjected to the controlled action of reagents over varying periods, simulating different scenarios of use and exposure. In gloss measurements, performed with a 60° glossmeter, KOH caused the greatest losses, exceeding 16% in some samples, particularly in Cristallo Pink. Sodium hypochlorite produced an almost negligible visual impact, indicating a distinct surface behavior. Colorimetric analyses in the CIELAB scale revealed significant variations in the L, a, and b\* parameters, with  $\Delta E$  values exceeding 3, a threshold perceptible to the human eye. Structural analysis by PUNDIT testing demonstrated a correlation between wave propagation velocity and microstructural integrity. Compact and minimally altered zones exhibited velocities above 4000 m/s, whereas values below 2500 m/s indicated microcracks and internal heterogeneity. SEM analyses revealed scaly structures, oriented laminae, and fracture filling by secondary minerals such as kaolinite and micas, while EDS confirmed high aluminum and potassium contents consistent with muscovite and altered feldspars. In the remediation stage, scouring powder, citric acid, sodium bicarbonate, vinegar, and lemon juice were tested. Organic stains responded more effectively to organic acids, and scouring powder proved effective in removing paints. Stain depth and exposure time to aggressive reagents were decisive factors in cleaning efficiency. The results indicate a strong relationship between porosity, microcracking, and susceptibility to aesthetic alteration. Rocks with higher porosity exhibited greater gloss losses and colorimetric changes, suggesting that pore connectivity facilitates the penetration of aggressive agents. Thus, the chemical resistance of quartzites depends not only on mineralogical composition but also on physical integrity, grain size distribution, foliation orientation, and degree of compaction. It is concluded that the integrated approach adopted

provides a robust technical assessment of the aesthetic durability of quartzites from Ceará in domestic applications, offering valuable insights for the ornamental stone sector. For future perspectives, the application of XRD, X-ray tomography, and accelerated aging tests is recommended to deepen the understanding of the evolution of these rocks under different usage conditions. .

**Keywords:** ornamental rocks; quartzite; alterability .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de Localização do município de Independência-CE.....	29
Figura 2 – Mapa geológico da área requerida do Quartzito Cristalino Pink, indicando os pontos georreferenciados e os furos de sondagem realizados durante a fase de pesquisa mineral.....	30
Figura 3 – Mapa Geológico do município de Santana do Acaraú-CE.....	32
Figura 4 – Mapa Geológico regional da Serra do Mucuripe-CE.....	33
Figura 5 – Mapa Geológico do município de Uruoca-CE.....	35
Figura 6 – Extração do Quartzito Taj Mahal na pedreira.....	36
Figura 7 – Imagem das etapas metodológicas utilizadas para análise das rochas: A- Medição de Cor; B-Repartição de quadrantes e fixação de canos de PVC; C- Ataque Químico; D- Ensaio não destrutivo de ultrassom; E-Preparação dos agentes manchantes; F- Aplicação de agentes Limpantes.....	38
Figura 8 – Procedimento de pesagem das massas submersas e saturada.....	40
Figura 9 – Procedimento realizado no NUTEC com aparelho PUNDIT 2000. A esquerda os corpos de prova que foram medidos e direita a utilização do equipamento.....	42
Figura 10– Corpos de provas ordenadas para medição superficial. Quartzito Taj Mahal: cinza de tom quente, contraste baixo, polido e resinado, com quadrantes delimitados. Perla Santana: cinza claro com porções esbranquiçadas, tom frio, polido e resinado. Cristalino Pink: branco com leve tonalidade enferrujada pontual, polido e resinado.....	43
Figura 11– Aferição de cor e luminosidade com o colorímetro em contato com a superfície da amostra de Quartzito Taj Mahal. Placas delimitadas por quadrantes e círculos de referência para os aros de PVC. À direita, tela do computador exibindo a disposição dos dados coletados em tabela para quantificação.....	44
Figura 12– A-Etapas do ensaio de manchamentos prontos para aplicação na superfície da rocha . B– Amostras com canos de PVC para aplicação dos agentes manchantes. C– Amostras com agentes manchantes aplicados dentro da área delimitada pelo cano de PVC, cobertas com placas de Petri limpas e	47

	secas. D– Amostra preparada para o intervalo de 24 horas com óleo de cozinha. E– Amostra com agente manchante aplicado (suco de uva). F– Amostra com agente manchante aplicado (vinho).....	
Figura 13–	Lâminas petrográficas do quartzito Taj Mahal.....	51
Figura 14–	Densidade relativa das três variedades de quartzitos.....	54
Figura 15–	Porosidade aparente dos quartzitos em (%)......	55
Figura 16–	Absorção de água das amostras em quartzitos.....	55
Figura 17–	Espectro 1 do quartzito Perla Santana- ensaios de MEV.....	57
Figura 18–	Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 2) do quartzito Perla Santana.....	58
Figura 19–	Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 4) do quartzito Perla Santana.....	59
Figura 20–	Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 5) do quartzito Perla Santana.....	60
Figura 21–	Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 6) do quartzito Perla Santana.....	61
Figura 22–	Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Eflorescência) do quartzito Perla Santana.....	63
Figura 23–	Esquema do processo de eflorescência em rochas ornamentais, evidenciando a ascensão de sais dissolvidos por capilaridade e posterior precipitação na superfície.....	64
Figura 24–	Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Caulinita e Mica) do quartzito Perla Santana.....	65
Figura 25–	Dados de Microscopia Eletrônica de Varredura. A-Potássio destacado (K); B-Titânio destacado (TiO <sub>2</sub> ); C-Silício destacado (SiO <sub>2</sub> ).....	66
Figura 26–	1º Quadrante da amostra 1 Taj Mahal atacado com ácido clorídrico 3%. (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm.....	67
Figura 27–	2º Quadrante amostra 1 quartzito Taj Mahal atacada com ácido clorídrico 18% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada	

	imagem=3,3 cm).....	69
Figura 28-	3º Quadrante Da Amostra 1 Do Quartzito Taj Mahal Atacado Com KOH 30 g/l (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).....	71
Figura 29-	4º Quadrante, Quartzito Taj Mahal atacado com KOH 100 g/l (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).	73
Figura 30-	1º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com Ácido Clorídrico 3% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).....	76
Figura 31	2º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com Ácido Clorídrico 18% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1mm; largura de cada imagem=3,3cm).....	78
Figura 32-	3º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com Ácido Clorídrico 18% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1mm; largura de cada imagem=3,3cm).....	80
Figura 33-	4º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com KOH 30 g/L (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm)	82
Figura 34	-Dados de Microscopia Eletrônica de Varredura. A-Potássio destacado (K); B-Titâneo destacado (TiO <sub>2</sub> ); C-Silício destacado (SiO <sub>2</sub> ).....	84
Figura 35-	Cavidade alongada preenchida com matriz predominante quartzosa.....	85
Figura 36-	Cavidade alongada identificada na amostra de quartzito Cristalino Pink.....	86
Figura 37-	Zonas de fragilidade com sinais de relaxamento diagenético.....	87
Figura 38-	Inclusão brilhante de possível Ilmenita e Rutilo.....	88
Figura 39-	Óxido de ferro identificado no Taj Mahal.....	89
Figura 40-	Cavidade com sais composta por cloro (Cl), sódio (Na) e potássio (K).....	90
Figura 41-	Fraturas na matriz quartzosa pura.....	91
Figura 42-	Fraturas parcialmente preenchidas com materiais densos e brilhantes.....	91
Figura 43-	Indícios de monazita associada à cristalização tardia.....	92
Figura 44-	Fraturas periféricas associadas a recristalização local.....	93
Figura 45-	Fraturas interconectadas e ramificadas com indícios de oxidação local.....	93
Figura 46-	Observação e descrição das fraturas na superfície das amostras.....	94

Figura 47-	Velocidade da onda propagada no quartzito Taj Mahal.....	98
Figura 48-	Velocidade da onda propagada no quartzito Perla Santana.....	99
Figura 49-	Velocidade da onda propagada no quartzito Cristallo Pink.....	100
Figura 50-	Variação média da perda de brilho (dos três quartzitos) no ataque químico...	103
Figura 51-	Dados de colorimetria do quartzito Perla Santana após o ataque químico.....	104
Figura 52-	Quartzito Cristallo Pink antes e após ataque químico com HCl a 3%.....	105
Figura 53-	Dados de colorimetria do quartzito Cristallo Pink Após o ataque químico.....	106
Figura 54-	Dados de colorimetria do Quartzito Taj Mahal após o ataque químico.....	107
Figura 55-	Imagem do quartzito taj mahal após a coloração azul na superfície da amostra.....	109
Figura 56-	Experimento do ensaio de ataque químico com KOH 30% no quartzito taj mahal.....	109
Figura 57-	Corpos de prova submetidos aos agentes manchantes. Aplicação de suco de uva industrializado, Coca-Cola, vinagre de álcool e café solúvel em placas de quartzito, com repouso de 24 horas. O manchamento não requer o uso de cano de PVC.....	111
Figura 58-	Dados de resistência ao manchamento do quartzito Cristallo Pink após a limpeza.....	112
Figura 59-	Dados de resistência ao manchamento do quartzito Perla Santana após a limpeza.....	113
Figura 60-	Dados de colorimetria em relação à resistência ao manchamento.....	113
Figura 61-	Ação do Limpante Bicarbonato no quartzito Perla Santana após o ataque químico.....	115
Figura 62-	Ação do Limpante Saponáceo no quartzito Perla Santana após o ataque químico.....	116
Figura 63-	Ação do Limpante Água Morna no quartzito Perla Santana após o ataque químico.....	117
Figura 64-	Ação do Limpante Água +HCL 18% no quartzito Perla Santana após o ataque químico.....	117

Figura 65- Ação do Limpante Água + detergente no quartzito Perla Santana após o ataque químico..... 118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exportação das rochas ornamentais no Ceará em 2024.....	22
Tabela 2 – Fases do procedimento de lavra das rochas ornamentais.....	25
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens de cada método de lavra.....	26
Tabela 4 – Produtos simulados pelos reagentes, os reagentes, suas fórmulas e seus 39 respectivos tempos de atuação de acordo com a norma ABNT NBR 16596 (ABNT, 2017).....	46
Tabela 5 – Classificação das manchas observadas nos ensaios de ataque químico e manchamento de acordo com a ABNT NBR 13.813/1997.....	48
Tabela 6 – Índices físicos dos quartzitos: Perla Santana, Cristallo Pink e Taj Mahal.....	53
Tabela 7 – Catalogação e identificação das amostras processadas no MEV.....	56
Tabela 8 – Principais elementos químicos identificados com os compostos destacados para interpretação geológica.....	62
Tabela 9 – Descritivo da macroanálise de fraturas superficiais das placas. (2º quadrante) Taj Mahal.....	70
Tabela 10– Descritivo da macroanálise de fraturas superficiais das placas. (3º quadrante) Taj Mahal.....	72
Tabela 11– Descrição 4º quadrante Taj Mahal.....	74
Tabela 12– Sínteses de dados da macroanálise de fissuras na Amostra 1 do Taj Mahal.....	74
Tabela 13– Descrição técnica (1º quadrante) Perla Santana.....	75
Tabela 14– Descrição técnica (2º quadrante) Perla Santana.....	77
Tabela 15– Descrição técnica (3º quadrante) Perla Santana.....	79
Tabela 16– Descrição técnica (4º quadrante) Perla Santana.....	81
Tabela 17 Sínteses de dados da macroanálise de fissuras na Amostra 1 do Perla Santana.....	83
Tabela 18– Critérios adotados para a macroanálise das fissuras.....	95
Tabela 19– Descritivo da macroanálise de fraturas superficiais das placas. (1º quadrante) Taj Mahal.....	96
Tabela 20– Medidas obtidas no ensaio de ultrassom ( Taj Mahal).....	97
Tabela 21– Medidas obtidas no ensaio de ultrassom ( Perla Santana).....	98
Tabela 22– Resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Cristallo	99

	Pink) .....	
Tabela 23-	Dados de brilho superficial do quartzito Perla Santana antes e após o ataque químico com 10 reagentes de acordo com a NBR 16596 (ABNT, 2017) .....	101
Tabela 24-	Dados de brilho superficial do quartzito Cristalino Pink antes e após o ataque químico com 10 reagentes de acordo com a NBR 16596 (ABNT, 2017).....	102
Tabela 25-	Dados de brilho superficial do quartzito Taj Mahal antes e após o ataque químico com 10 reagentes de acordo com a NBR 16596 (ABNT, 2017).....	102
Tabela 26-	Efeitos dos agentes limpantes na remediação da variação de cor.....	114
Tabela 27-	Efeito dos agentes limpantes na remediação da perda de brilho o quanto os quartzitos se aproximaram do brilho original.....	119

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Rochas Ornamentais: “Do passado ao presente” Evolução da Exploração.....</b>	<b>24</b>
2.1.1	<i>Rochas Ornamentais: Características do Quartzito Cearense.....</i>	27
2.1.1.1	<i>Contexto geológico dos quartzitos.....</i>	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>37</b>
3.1.1	<i>Métodos.....</i>	37
3.2.1	<i>Análise Petrográfica.....</i>	39
3.2.2	<i>Índices Físicos.....</i>	39
3.2.3	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV.....</i>	41
3.2.4	<i>Macroanálise de Fissuras.....</i>	41
3.2.5	<i>Ensaio de velocidade de propagação das ondas Ultrassônicas.....</i>	42
3.2.6	<i>Ensaio de brilho superficial .....</i>	43
3.2.7	<i>Ensaio de Colorimetria.....</i>	44
3.2.8	<i>Ataque Químico.....</i>	45
3.2.9	<i>Ensaio de Manchamento.....</i>	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>49</b>
4.1	<b>Descrição microscópica dos Quartzitos.....</b>	<b>49</b>
4.1.1	<i>Quartzito Taj Mahal.....</i>	49
4.1.2	<i>Quartzito Perla Santana.....</i>	52
4.2	<i>Ensaio de Índices Físicos.....</i>	53
4.3	<i>Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura.....</i>	56
4.4	<b>Análise Morfológica por MEV no Quartzito Cristallo Pink.....</b>	<b>85</b>
4.4.1	<i>Cavidade preenchida com matriz quartzosa.....</i>	85
4.5	<b>Análise Morfológica por MEV no Quartzito Taj Mahal.....</b>	<b>88</b>
4.5.1	<i>Espectro A – Inclusão titanífera.....</i>	88
4.6	<b>Análise de Fissuras Após o ensaio de Ataque Químico.....</b>	<b>94</b>

<b>4.7</b>	<b>Ensaio de propagação de velocidade das ondas(Ultrassom).....</b>	<b>99</b>
<b>4.8</b>	<b>Análise de brilho superficial.....</b>	<b>97</b>
<b>4.9</b>	<b>Ensaio de Colorimetria.....</b>	<b>106</b>
<b>4.10</b>	<b>Ensaio de Ataque Químico.....</b>	<b>110</b>
<b>4.11</b>	<b>Efeitos do manchamento na superfície dos Quartzitos.....</b>	<b>113</b>
<b>4.12</b>	<b>Ação limpante e recuperabilidade .....</b>	<b>117</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>122</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>126</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário econômico cearense atual, os quartzitos protagonizam o mercado das rochas ornamentais pela sua beleza e resistência. Fato que, por serem elementos naturais, estão sujeitos a alterações pós-magmáticas, quando o seu sistema busca pelo equilíbrio físico-químico com o meio ambiente logo depois da cristalização do magma.

Os arranjos cristalinos que compõem a rocha passaram por transformações metassomáticas, por vezes em condições de hidrotermalismo que consiste na interação dos minerais com fluídos que circulam através de fraturas ou poros das rochas. Nesse contexto, os minerais “originais” são parcialmente ou totalmente substituídos por novos minerais, por exemplo, fluidos ricos em sílica permeiam pela rocha, dissolvendo os minerais e introduzindo sílica no sistema, dando origem às rochas silicáticas, como o Quartzito, o qual pode ser formado a partir dos arenitos, AIRES-BARROS (1991).

O material de origem dos quartzitos têm composição basicamente de quartzo, além de ser uma rocha metamórfica que lhe confere alta resistência físico-mecânica. Espera-se desse material um arranjo mineral simples quanto a variedade de componentes. Apesar disso, os minerais acessórios que podem acompanhar o pacote de arenito, como feldspatos, micas e outros aluminossilicatos, os quais propiciam os modos de alteração, como a sericitização: formação de micas ( $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ ) e a caulinitização (formação de caulinita) ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), AIRES-BARROS (1991).

Essas alterações comprometem a coesão interna da rocha, tornando-a mais suscetível à degradação físico-química, o que representa um fator limitante para aplicações ornamentais ou estruturais quando tais rochas passam pelo processo de beneficiamento. Por conta da alta demanda, é de grande importância garantir que o material retirado da jazida seja adequadamente protegido.

Na presente pesquisa foram selecionados os 3 quartzitos cearenses mais comercializados na região, em específico, do noroeste do Estado do Ceará que pertencem à formação geológica São Joaquim, situada na compartimentação tectônica DCC-Domínio Ceará Central (CLAUDINO-SALES, 2018). Tais quartzitos recebem os nomes comerciais: Perla Santana, Cristallo Pink e Taj Mahal. Os quais têm a mineralogia composta predominantemente por quartzo, podendo ter ocorrências de material argiloso preenchendo suas fraturas, em quantidades menores há muscovita, sericita e caulinita afirma Santos et al., 2017.

Em decorrência disso, a superfície é preparada para que os canais de espaços vazios sejam preenchidos pelo polimento e resina baseada em carbono, cloro e fósforo, Frascá, 2002. A produção cearense de rochas ornamentais em 2002 foi de 250.000 toneladas, correspondendo a 4,2% da produção brasileira e 28% da produção do Nordeste. Deste total, 76% corresponde às rochas silicáticas (granitos e quartzitos) e 24% aos calcários. O beneficiamento de rochas ornamentais no Ceará gera produção mensal em torno de 98.000 m<sup>2</sup> de chapas e ladrilhos. Este segmento ocupa a segunda posição no nordeste brasileiro, com as empresas GRANOS e IMARF representando 42% da capacidade instalada do Estado (Roberto *et al.*, 2005).

Fernandes (2004) considera que o Ceará surgiu de modo mais importante no mercado nacional a partir de 1994, com as principais jazidas de rochas graníticas (85% da extração), situadas principalmente na porção norte-nordeste e central do Estado. Em 2015 os quartzitos, também da porção norte-nordeste, já aparecem sendo comercializados em blocos. Na parte sul localizam-se as jazidas de calcário laminado (Pedra Cariri) e a leste, as extrações de calcário maciço da Chapada do Apodi.

O faturamento das exportações cearenses praticamente dobrou nos últimos três anos. Em 2014, as exportações de material bruto atingiram US\$12,2 milhões, contribuindo para posicionar o Ceará como o segundo maior exportador de rochas do Nordeste, atrás da Bahia. Tal dinâmica é justificada pela variedade de matérias-primas e grande apelo comercial atribuído. Em termos organizacionais “Precisamos estancar os gargalos que impedem o nosso pleno crescimento, pois essa é uma área de oportunidades monumentais e representa uma importante seara para o Estado cearense”, segundo o diretor do SIMAGRAN-CE, (RODRIGUES, 2025).

Já em 2024, mesmo com um volume físico de exportação menor a previsão é encerrar o ano com 50 mil toneladas exportadas via Porto do Pecém observa-se uma reconfiguração estratégica do setor. Países como Estados Unidos, França, Bélgica e China demonstram crescente interesse na importação desses blocos para uso na construção civil, evidenciando o desempenho comercial e performance das rochas cearenses no mercado global.

Segundo Carlos Rubens Araújo, presidente do Sindicato da Indústria de Mármore e Granitos do Estado do Ceará, RODRIGUES (2025), a participação do setor nas exportações cearenses é atualmente de 3,5%, com projeções de crescimento para mais de 7% caso haja estímulos adequados. Além do potencial econômico, o setor também desempenha papel relevante no desenvolvimento regional, gerando empregos no interior, movimentando o comércio local e contribuindo com a arrecadação fiscal do Estado.

No que se refere às prerrogativas ambientais que envolvem a extração de rochas ornamentais, os impactos dividem opiniões. Porém é importante ressaltar que as atividades se localizam de forma pontual e que de acordo com os requisitos legais e a devida fiscalização há possibilidade de desenvolvimento das atividades de maneira plena e segura.

Assim, observa-se que, ao longo das últimas duas décadas, o setor de rochas ornamentais do Ceará evoluiu de um modelo predominantemente voltado ao volume e à produção bruta para uma dinâmica mais qualificada e estratégica, voltada ao mercado internacional e à valorização de suas riquezas geológicas exclusivas. Essa transição reforça a importância do planejamento, da inovação e do cumprimento das normas ambientais, que são fatores essenciais para o fortalecimento sustentável dessa cadeia produtiva no estado.

A exportação atual está mais focada em produtos com maior valor agregado, como as pedras naturais de alto padrão, com destaque para a pedra Taj Mahal, reconhecida internacionalmente como a mais cobiçada do mundo e cuja extração é exclusiva do território cearense. Como mostra a tabela 1 a seguir, no que tange à distribuição espacial das exportações de rochas ornamentais no Ceará, em destaque para a variação considerada de 2023 para 2024 de acordo com os dados divulgados pela COMEX Stat 2024.

Tabela 1 – Exportações de Rochas Ornamentais do Ceará em 2024

<b>Município</b>	<b>Volume da exportação (t)</b>	<b>Valor da exportação (R\$)</b>	<b>Participação nas exportações de Rochas ornamentais no Ceará</b>	<b>Variação 2023-24</b>
Uruoca	16,2 mil t	42.993.000,00	32%	alta de 7%
Santa Quitéria	14 mil t	36.006.000,00	26%	alta de 128%
Caucaia	7,3 mil t	33.711.000,00	25%	queda de 6%
Massapê	2,4 mil t	8.925.000,00	7%	alta de 45%
Santana do Acaraú	1,4 mil t	5.059.200,00	4%	queda de 6%
Outros Municípios	3 mil t	9.690.000,00	7%	alta de 4%

Fonte: Adaptada e traduzida de COMEX Stat 2024.

Face ao exposto, o presente trabalho tem por objetivo correlacionar a mineralogia da rocha com os efeitos danosos da exposição aos agentes externos, as alterabilidades, também denominadas patologias, como comprometimento do brilho e da cor visível, oxidação e manchamento que afetam a função estética da rocha e podem ocorrer durante a mineração e no cotidiano, AIRES BARROS (1991).

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram realizadas simulações laboratoriais conforme estabelecidas em norma para análise de rochas. O ensaio de

Ataque Químico, por exemplo, é orientado pela NBR 16596 (ABNT, 2015A), no qual aplicam-se diferentes reagentes que se aproximam quimicamente de produtos utilizados pelo consumidor final. Com isso, o contato superficial da amostra com a substância aplicada permite a observação visual imediata do efeito causado, desde as menos agressivas até as que poderiam comprometer totalmente a aparência e funcionalidade dos quartzitos

Tais metodologias foram muito importantes para identificar os tipos de aplicações direcionadas para as rochas quartzíticas através da análise do grau de resistência, de alterabilidade, correlacionando com dados de petrografia e resistências físico-mecânicas. Quantificando-os para considerar fatores consistentes que permitam identificar os agentes mais danosos e por sua vez, os limpantes de maior efetividade na recuperação das rochas.

A atuação preventiva contra a alterabilidade é a correta especificação mineralógica, através de informações relacionadas às suas características de desempenho (MATTOS, 2020). No entanto, as normas que indicam os procedimentos e oferecem os parâmetros para esse fim não são especificamente programadas para o quartzito. Portanto, o comportamento das rochas sob inúmeros esforços às quais estão expostas está condicionado às suas características mineralógicas, estruturais, texturais, físico-mecânicas e geoquímicas.

O comprometimento das características estéticas pode ocasionar diminuição no uso das rochas fazendo necessário o uso de materiais alternativos, prejudicando setores de produção e extração, MESQUITA (2002).

Ressalta-se, portanto, a necessidade de estudos direcionados às patologias mais frequentes das rochas ornamentais cearenses, visando definir suas características intrínsecas (mineralogia, resistência, alterabilidade). Esse estudo possibilitará a cada material pétreo, melhor adequação quanto à sua utilização, além de identificar métodos de recuperação das principais patologias, prevenindo e/ou minimizando problemas detectados.

Apesar de ressaltar sua usabilidade, é importante destacar a necessidade de readaptar não apenas os experimentos, mas também o tratamento de dados, com base em estudos anteriores que se dedicaram a avaliar a alterabilidade em diferentes tipos de rochas, principalmente calcário, rochas metamórficas (mármore) e ígneas (granito).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresenta-se o conjunto das referências utilizadas para a fundamentação teórica em relação aos quartzitos cearenses dialogando as ideias principais com uma linha temporal que conecta o passado com o presente, destacando a evolução ao longo do tempo na forma como as rochas ornamentais têm sido exploradas e valorizadas.

O quartzito é uma rocha metamórfica composta principalmente por cristais de quartzo, que é composto dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), que consiste em um dos minerais mais comuns de serem encontrados na crosta terrestre. Sendo classificado como silicato de dureza 7 na escala de Mohs, segundo Santos et al., (2017). O quartzito é uma rocha metamórfica que se forma a partir da areia quartzítica, a qual é submetida à extrema pressão e calor.

Dentre as suas características mineralógicas, o quartzo possui brilho vítreo e pode ser encontrado em diferentes cores, usado amplamente na indústria devido às suas propriedades dentre elas, a piezoelectricidade (consegue gerar eletricidade sob pressão), termoluminescência (emite luz ao aquecê-lo) e fluorescência (emite luz sob radiação). Por conta de sua pureza e alta resistência ao calor, é utilizado como matéria prima na indústria do vidro, cerâmica e refratários.

Na construção civil, pode ser utilizado como carga e misturado em argamassas, cimento e concreto na indústria química como catalisador em reações químicas. Por isso, tem relevância na área de tecnologia, sendo procurado também pela questão estética e usado como ornamentação de joias e decoração.

### 2.1 Rochas Ornamentais: “Do passado ao presente” Evolução da Exploração.

Remontando aos primórdios da civilização, as rochas ornamentais têm exercido um fascínio único sobre a humanidade. Ao longo dos séculos, essa fascinação transcende fronteiras geográficas e culturais, moldando paisagens urbanas, obras de arte e espaços de convivência. Tais que, podem ser lidas na sociedade como um símbolo de luxo, poder aquisitivo, elegância e requinte desde a atribuição de mármore, quartzitos e pedras preciosas no ofício da arte (VIDAL, 2013). Dado que as rochas ornamentais, dentre outras finalidades, tendem a ser utilizadas em pavimentações internas, bancadas, tetos, escadas, revestimento de banheiros, sopés, mesas e fachadas. Por sua beleza e aparência, as peças polidas oferecem uma durabilidade e harmonia com a estética dos ambientes, conferindo um alto valor agregado no mercado. Embora que o valor agregado às peças refere-se também aos custos de extração, exportação, transporte e beneficiamento (VIDAL, 2013).

Em decorrência disso, o aprimoramento das técnicas de exploração se construiu principalmente com o trabalho das mineradoras em escolher o melhor método de acordo com o contexto geológico local, as condições de segurança no trabalho se ampliaram também para que a integridade física dos trabalhadores fosse garantida e a produção na mina seguisse uma dinâmica favorável ao escoamento de resíduos e retirada de blocos.

Como pode ser observado na tabela 2 a mineração em si, é composta por etapas precedentes desde a sua prospecção mineral até a lavra propriamente dita, de maneira que é muito importante levantar o máximo de dados possíveis da litologia, dos lineamentos do afloramento.

Tabela 2– Fases do procedimento de lavra das rochas ornamentais.

Fase	Descrição das atividades
Prospecção Mineral	Trabalho laboratorial de localização e identificação da ocorrência P mineral, etapa que antecede o trabalho de campo para mapeamento das rochas ornamentais.
Pesquisa Mineral	Diagnóstico do potencial da jazida, os dados obtidos nessa etapa contribuem com o melhor planejamento das próximas ações.
Lavra	Fase de execução da extração, nessa as metodologias são aplicadas de acordo com o que foi percebido nas duas fases anteriores. Levando em consideração os objetivos logísticos e a litologia da jazida.
Mitigação de Impactos	Após a exploração das rochas ornamentais, realiza-se um estudo de passivos e impactos ambientais, a fim de mitigar e compensá-los.

Fonte: Adaptado de VIDAL, 2013.

Face ao exposto destaca-se que a implementação de uma unidade minerária requer o estudo e planejamento de diversos fatores decisivos, especificamente para rochas ornamentais deve ocorrer de maneira sistemática, a qual possa contemplar tanto a geologia regional como outros, por exemplo, a disponibilidade hídrica, profundidade dos solos, infraestrutura para acesso e transporte do material.

Ao aproximar-se dessas informações será possível selecionar tecnologias adequadas e técnicas de gestão dos resíduos produzidos, minimizando perdas de material e garantindo o aumento da sustentabilidade da exploração. Em sequência na tabela 3 os principais métodos de lavra utilizados para exploração de rochas ornamentais no Brasil, suas vantagens e desvantagens associadas para cada tipo.

Tabela 3–Vantagens e desvantagens de cada método de lavra.

<b>Modalidade</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Problemas de execução</b>
Á céu aberto	Mais aplicado;	Grandes Excesso de Material	Perda Indesejada Blocos em superfície; desmonte; Fraturamento decorrente de explosivos; elevado;
Subterrânea	Alcança jazidas com grandes profundidades	Menos comum; Dificuldade de acesso; Blocos de tamanho inadequado;	Risco de colapso nas galerias; Ventilação inadequada; possível perda de qualidade em decorrência de umidade;
Fio diamantado	Muita Precisão de corte	Blocos com dimensões não padronizadas; Alta demanda de água;	Muitos resíduos; Desgaste do fio

Fonte: Adaptado de VIDAL, 2013.

Podendo causar danos às rochas, e a extração com artefatos explosivos pode resultar em fragmentos menores, que não são aproveitáveis comercialmente. Cada método de lavra apresenta desafios específicos em termos de perda de material, influenciando diretamente a eficiência e a viabilidade econômica da extração de rochas ornamentais.

Nota-se que a evolução da legislação minerária e a implementação de normas de segurança têm sido essenciais para reduzir os riscos associados à lavra de rochas ornamentais. No entanto, a ocorrência de acidentes graves destaca a necessidade contínua de fiscalização rigorosa e de adesão a práticas seguras. Visto que havia uma recorrente necessidade de modernização das técnicas de extração, o treinamento contínuo dos trabalhadores e o uso de tecnologias de monitoramento foram empregadas a fim de contribuir para uma indústria minerária que almeja trabalhar cada dia mais segura e sustentável no Brasil.

De acordo com o Código de Mineração brasileiro, instituído pelo Decreto-Lei nº 227 de 1967, estabelece as diretrizes para a exploração mineral no país. Este código tem passado por várias alterações para se adequar às novas demandas de segurança, sustentabilidade e transparência. Criação da Agência Nacional de Mineração (ANM): Em 2017, a criação da ANM substituiu o antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). A ANM tem como objetivo regulamentar, fiscalizar e controlar a atividade mineral, garantindo maior segurança e eficiência no setor.

Regulamentação Ambiental: A legislação ambiental brasileira, como a Lei nº 12.651/2012 (Novo Código Florestal), e a Resolução CONAMA nº 001/1986, que trata do licenciamento ambiental, também impactam diretamente a atividade de lavra de rochas ornamentais. Estas normas visam minimizar os impactos ambientais decorrentes da atividade minerária.

A Norma Regulamentadora 22 (NR-22) do Ministério do Trabalho e Emprego estabelece as condições mínimas de segurança e saúde no trabalho em atividades de mineração. A implementação de práticas seguras e a obrigatoriedade de equipamentos de proteção individual (EPIs) são algumas das exigências para reduzir acidentes. Mediante o exposto, fica claro o potencial cearense para ampliar suas atividades minerárias.

De acordo com Vidal (2013, p. 10) o mercado de rochas ornamentais brasileiro tem uma grande variedade em muitos estados do Brasil.

“No Brasil existe uma destacada diversidade de jazidas de granitos, mármore e afins (ardósias, quartzitos, basaltos e conglomerados), com grande disponibilidade de variedades litológicas distribuídas por boa parte do território nacional. Os principais estados produtores de rochas ornamentais estão situados na região sudeste e nordeste do país, nos estados de: Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Ceará e Paraíba.” (Vidal, 201. p, 10)

### **2.1.1 Rochas Ornamentais: Características do Quartzito Cearense.**

Embora o quartzito seja uma categoria secundária entre a variedade de rochas presentes no estado do Ceará, trata-se de uma rocha metamórfica com diversas qualidades estéticas, decorrentes de suas propriedades físico-químicas, sendo o brilho elevado sua principal característica.

De modo que o valor atribuído às rochas ornamentais como um todo, justificam-se pela sua beleza estética, além de aspectos. O quartzito também pode ser utilizado em escadas, fachadas, praças, jardins, enfim em qualquer aplicação em que seja necessário um revestimento resistente, e ainda pode-se citar o emprego da rocha bruta e irregular como decoração, (Santos *et al*, 2014). Os quartzitos são rochas com textura sacaroide, derivadas de sedimentos arenosos, formadas por grãos de quartzos recristalizados. Em suas feições maciças são geralmente muito fraturados, o que anteriormente inviabiliza a sua exploração.

No entanto, pelo seu aspecto cromático e pela inovação em várias técnicas que possibilitam a estruturação do bloco para corte e utilização das resinas no beneficiamento secundário, os quartzitos passaram a ser amplamente utilizados como rocha ornamental (Alencar, 2013).

Devido à importância do setor mineral do estado do Ceará, Santos, *et al.*, (2017), desenvolveram estudos de caracterização tecnológica em 20 tipos diferentes de quartzitos, de diferentes municípios do Ceará. Apesar de tais estudos de caracterização serem divulgados em artigos científicos, não foram amplamente divulgados ao mercado de rochas ornamentais. A grande demanda pelas rochas quartzíticas, confere a necessidade de constante aperfeiçoamento na qualidade e estética dos materiais. As rochas ornamentais têm um grande apelo comercial pela sua aplicação em pisos, bancadas, revestimentos e outros (Frasca 2003, 2019).

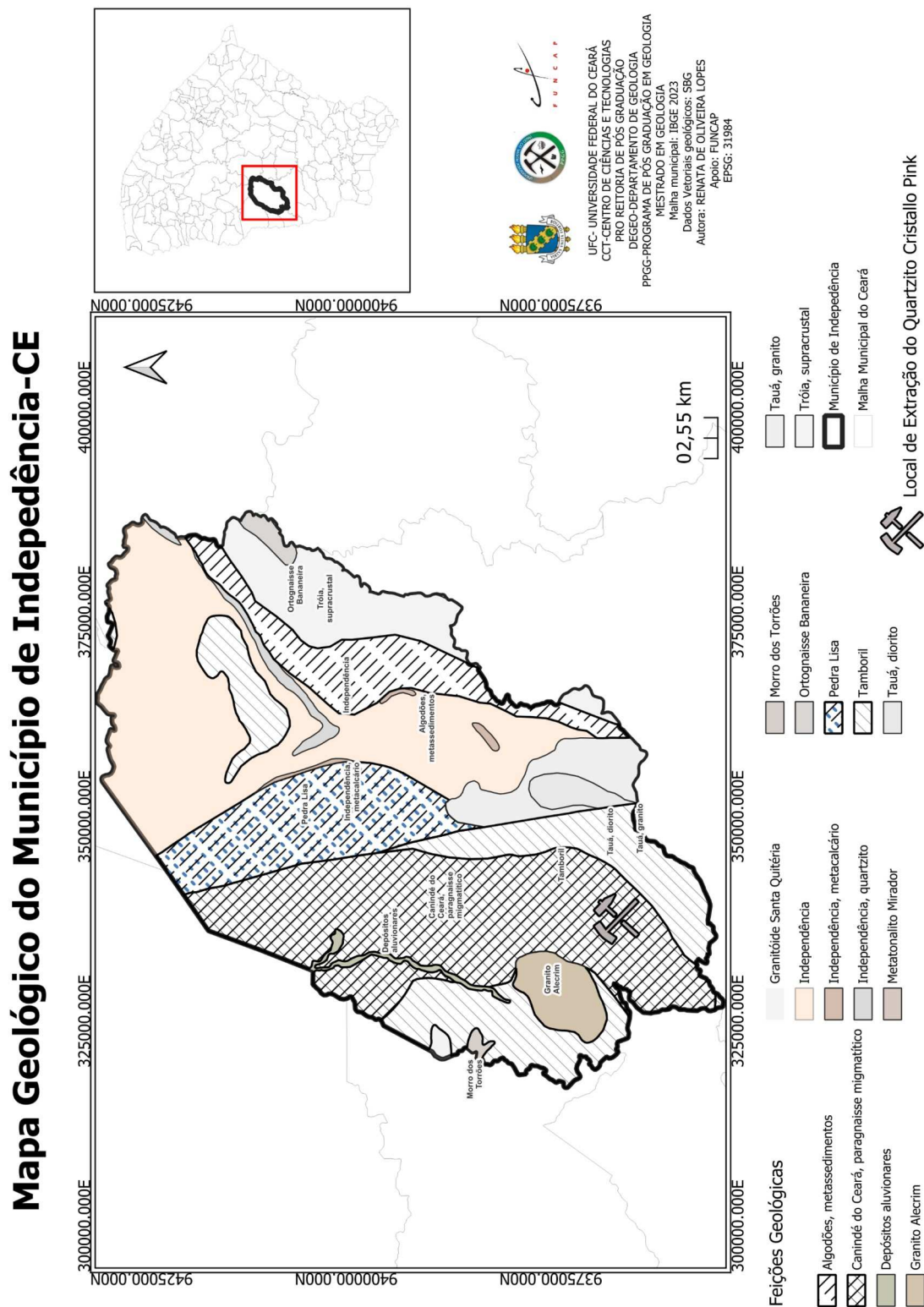
Estima-se a possibilidade de classificar o grau de resistência às principais patologias nas rochas quartzíticas cearenses e os tipos de alterabilidade ocorrentes nesse material. Auxiliando assim, na melhor forma de remediação das patologias que se apresentarem, prevenindo também futuras recorrências. Os resultados preliminares quanto a variação de brilho superficial e cor das amostras, após as etapas de ataque químico e manchamentos foram divulgados no X Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará.

#### *2.1.1.1 Contexto geológico dos Quartzitos*

A Província Borborema, abrangendo uma vasta região do Nordeste do Brasil, é caracterizada por intensa atividade magmática granítica e extensas zonas de cisalhamento transcorrentes, resultantes do ciclo Brasileiro/Pan Africano. Com cerca de 450.000 km<sup>2</sup>, é limitada a oeste pela Bacia do Parnaíba, a leste e norte por bacias da margem costeira, e a sul pelo Cráton São Francisco. Sua formação resultou da convergência dos crátons Amazônicos, West African-São Luís e São Francisco durante a assembleia do West Gondwana, (TORQUATO, 1996).

O quartzito comercialmente conhecido como Cristalino está inserido no contexto da Formação Bonsucesso, na área delimitada pelo quadrado vermelho no mapa do Estado do Ceará (Figura 1). A área apresenta uma geologia dominada por litologias pertencentes ao embasamento cristalino, caracterizadas principalmente por rochas metamórficas, como gnaisses e migmatitos, intercaladas com lentes de rochas máficas e ultramáficas “*é composta, majoritariamente, por quartzitos de granulação variada, frequentemente silicificados e micáceos*”. (CPRM, 2006)

Figura 1- Mapa Geológico do Município de Independência-CE e localização da área de extração do quartzito comercialmente denominado Cristalino Pink.



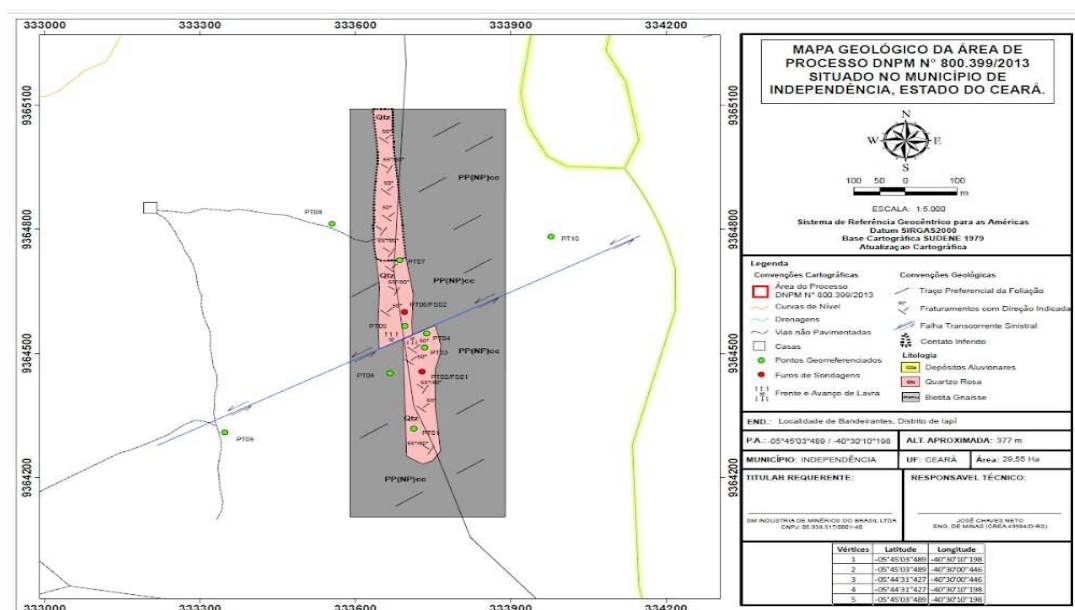
Fonte: elaborado pela autora, adaptado da base cartográfica SBG.

Essas unidades estão intensamente deformadas, evidenciando uma tectônica dúctil, com a presença de dobras e zonas de cisalhamento, sugerindo eventos metamórficos de médio a alto grau. Além disso, ocorrem intrusões graníticas associadas a fases mais tardias da evolução geológica da região. Os relevos mostram-se controlados pela estrutura geológica, refletida em padrões de drenagem anisotrópicos e feições estruturais.

Mais precisamente localizada no município de Independência, na localidade de Iapi, estado do Ceará (Figura 2), a área em estudo compreende uma faixa geológica com predominância de metassedimentos, incluindo formações de quartzitos e filitos. Em destaque, o quartzo rosa é uma variedade de quartzo com coloração rosada devido à presença de impurezas, como titânio, ferro e manganês. Ele cristaliza no sistema trigonal e possui uma dureza 7 na escala de Mohs, sendo resistente a intempéries e bastante estável em diferentes ambientes geológicos.

No contexto do mapa geológico da área de Novo Oriente, CE, a presença de quartzo rosa pode estar associada a processos hidrotermais tardios, onde fluidos ricos em sílica precipitaram o mineral em fraturas dentro de quartzitos e filitos. Segundo o Manual de Mineralogia (DUTROW *et. al* 2020), quartzos dessa natureza são frequentemente encontrados em veios hidrotermais e pegmatitos. Além disso, a associação do quartzo rosa com zonas de falhas e fraturas reforça sua relação com eventos deformacionais regionais.

Figura 2- Mapa geológico da área requerida do Quartzito Cristalino Pink, indicando os pontos georreferenciados e os furos de sondagem realizados durante a fase de pesquisa mineral.



O quartzito comercialmente conhecido como Perla Santana, encontrado no Domínio Médio Coreaú (DMC) e inserido na Província Borborema, é delimitado a leste pela zona de cisalhamento Sobral–Pedro II, uma mega estrutura de direção NE–SW, de caráter transcorrente dextral e idade neoproterozóica.

As rochas do embasamento da compartimentação tectônica DMC receberam várias denominações, sempre se referindo à mesma sequência litológica. Nascimento *et al.* (1979) foram os primeiros a usar a denominação de Complexo Granja para nomear as rochas que compõem terrenos de idade pré-cambriana da faixa compreendida entre os municípios de Granja (CE) e Parnaíba (PI), (Figura 3)

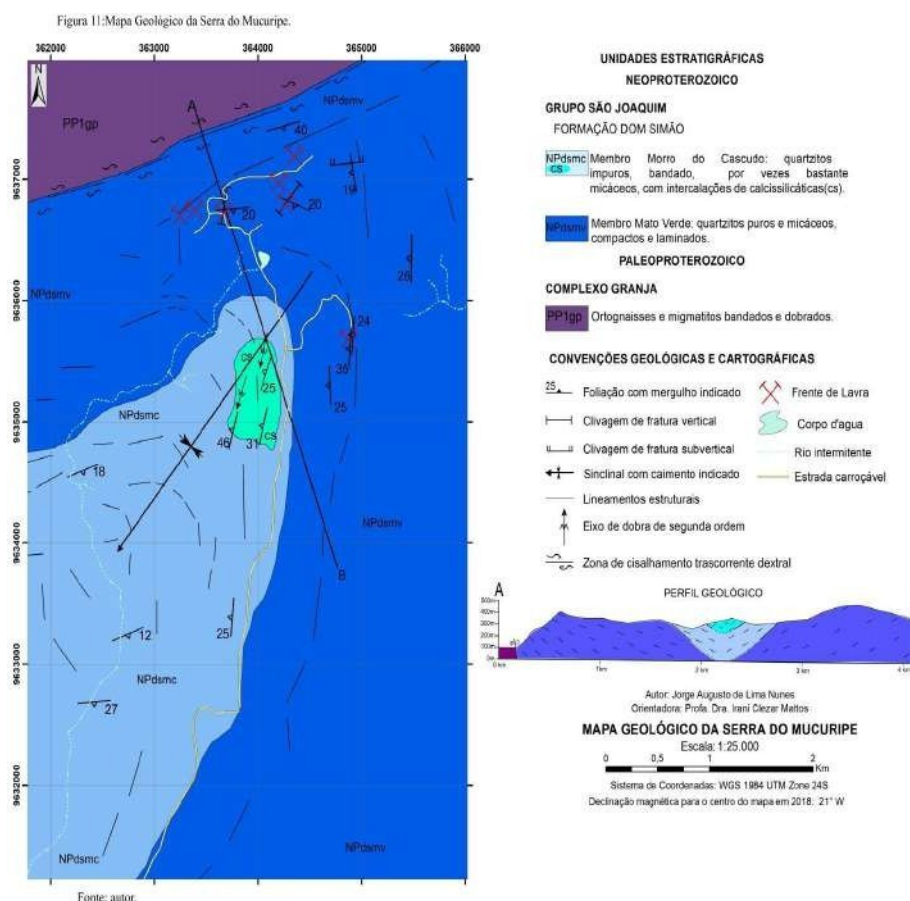
Torquato *et al.* (1987) dividem o Complexo Granja da base para o topo em três unidades: granulitos, gnaisses e granitóides. Os granulitos correspondem a uma associação com, pelo menos, cinco litotipos individualizados: biotita-granada-plagioclásio-granulito, silimanita-granada plagioclásio-granulito, pertita granada-plagioclásio-granulito (khondalito), granulito intermediário a máfico e enderbritico.



A serra do Mucuripe é formada por dois quartzitos distintos pertencentes a Formação Dom Simão do Grupo São Joaquim, utilizando a classificação proposta por Torquato & Nogueira Neto (1996) é possível distinguir os quartzitos, individualizando-os. Membros Mato Verde (quartzitos puros) e Morro do Cascudo (quartzitos impuros).

Mato Verde é caracterizado por quartzitos puros, por vezes micáceos, enquanto Morro do Cascudo apresenta quartzitos impuros intercalados com calciosilicáticas e xistos, com cores variando de cinza a esverdeadas. Os xistos exibem cor avermelhada, composto por muscovitas e quartzo, revelando microdobramentos. Essa subdivisão destacou na figura 4 as distintas características mineralógicas e estruturais desses membros, de acordo com Nunes, (2018).

Figura 4- Mapa geológico regional da Serra do Mucuripe-CE

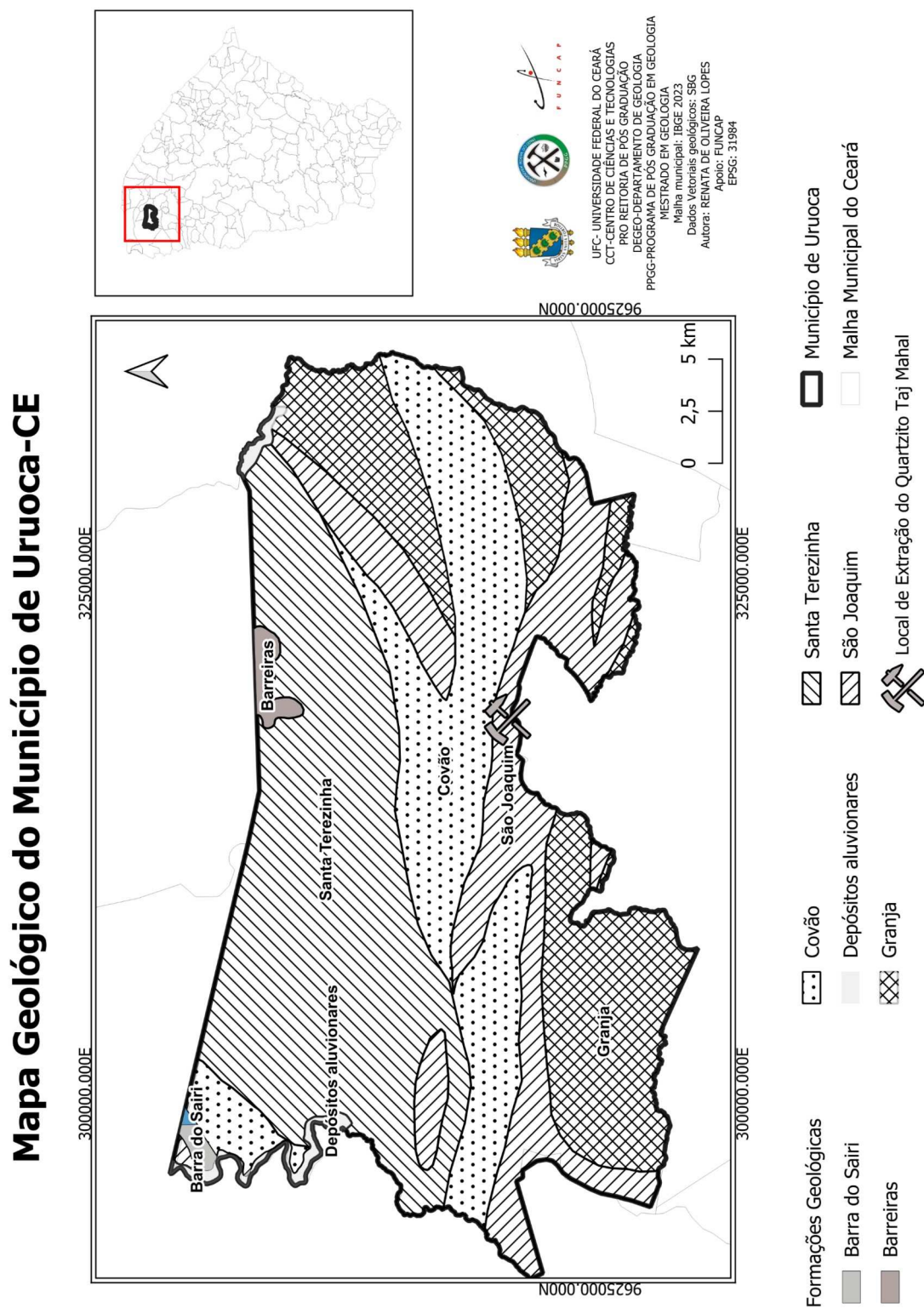


Fonte: Nunes, (2018).

O quartzito Perla Santana é extraído na região noroeste do Ceará, onde se localiza a Formação São Joaquim. Esta formação geológica é composta predominantemente por quartzitos e rochas calciosilicáticas, datadas do período Criogeniano, aproximadamente entre 850 e 650 milhões de anos atrás NUNES, (2018).

A resistência físico-mecânica dos quartzitos da Formação São Joaquim contribui para a preservação das estruturas elevadas que se destacam na paisagem local. Esse mesmo atributo de resistência explica a ampla utilização do quartzito Perla Santana — pertencente a essa formação — em projetos arquitetônicos e de design. O quartzito comercialmente conhecido como Taj Mahal é retirado da pedreira localizada no município de Uruoca-CE (Figura 6). No qual apresenta um contexto dominado por rochas metamórficas de alto grau, predominantemente gnaisses, quartzitos e migmatitos, pertencentes ao Complexo Ceará.

Figura 5- Mapa Geológico do município de Uruoca-CE e localização da Área de extração do quartzito comercialmente denominado do Taj Mahal.



Fonte: Elaborado pela Autora, usando como base os mapas da SGB.

Além disso, há coberturas sedimentares recentes, compostas por depósitos aluvionares inconsolidados, indicativos de processos erosivos e deposicionais mais recentes. Estruturalmente, a região é atravessada por falhamentos e fraturas que influenciam a distribuição dos recursos minerais. A região de Uruoca apresenta ocorrências de rochas ornamentais, como quartzitos e granitos, que possuem potencial econômico para extração e beneficiamento.

Esses terrenos são caracterizados por processos de metamorfismo regional de médio a alto grau, que resultaram na recristalização dos arenitos precursores e na formação de um quartzito de granulação fina a média, com elevada coesão e resistência mecânica (SANTOS *et. al*, 2017). Embora, os quartzitos anteriores tenham características estéticas em comum e uma mineralogia aproximada, o Taj Mahal se destaca pela cor e luminosidade de baixo contraste.

Do ponto de vista físico-mecânico, o Taj Mahal apresenta alta dureza, resistência à abrasão e baixa porosidade, tornando-o um material adequado para aplicações em revestimentos internos e externos, bancadas de cozinha e banheiro, pisos e fachadas. Sua resistência à agentes químicos e variações térmicas também favorece sua utilização em ambientes sujeitos a condições adversas, diferenciando-se do mármore e de outros materiais suscetíveis a desgastes e manchas. Por isso suas placas têm um grande apelo comercial e preferência do setor de arquitetura e design de interiores cor clara, fraturas acentuadas e nuance predominantemente acinzentada (FERNANDES, 2004). O Quartzito Taj Mahal é amplamente reconhecido por sua elevada resistência mecânica e estética diferenciada. Esta rocha é extraída de jazidas localizadas no estado do Ceará (Figura 6). A exploração e beneficiamento seguem rigorosos padrões técnicos, garantindo a qualidade do material comercializado no mercado nacional e internacional.

Figura 6- Extração de Quartzito Ornamental Taj Mahal na pedreira.



Fonte: Grupo Vermont Mineração. O acabamento superficial pode variar entre polido, escovado e levigado, possibilitando diferentes aplicações conforme as exigências do projeto arquitetônico.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1– Materiais

O quartzito Perla Santana é uma pedra natural de cor clara com veios suaves, amplamente utilizada em projetos de design de interiores e exteriores devido à sua beleza e durabilidade. Em resumo as características petrográficas básicas são: é composta majoritariamente por quartzo (94%), muscovita (2%), sericita (2%) e outros minerais acessórios. Apresenta estrutura isotrópica e textura granoblástica, com granulação variando entre 0,5 mm e 1,5 mm (NUNES, 2018).

O quartzito Cristallo Pink tem mineralogia de 90% quartzo, muito semelhante ao Perla Santana, cor predominantemente branca e com alto brilho superficial e tom cinza claro. Em relação ao Taj Mahal, a coloração dessa rocha varia entre tons de bege e creme, frequentemente acompanhados por veios sutis em tonalidades douradas e acinzentadas, resultantes do realinhamento estrutural dos minerais durante o processo metamórfico.

Os corpos de prova tiveram medidas padronizadas para os ensaios de ataque químico e manchamento, limpeza, medição de brilho e experimento de colorimetria. Foram utilizadas placas cortadas em 20cmx20cm polidas e com aplicação de telagem para maior resistência, placas não polidas de 10cmx10cm sem telagem, cubos de 2cmx2cm polidos e com aplicação de tela e cubos não polidos sem tela com 5cmx5cm.

#### 3.2 Métodos

Os métodos aplicados foram organizados em três fases principais, nelas as amostras foram delimitadas em quatro quadrantes de 10cmx10cm de largura. Na figura 7, estão dispostas as metodologias de análise, as quais os Quartzitos foram submetidos.

Figura 7-:Imagem das etapas metodológicas utilizadas para análise das rochas: A- Medição de Cor; B- Repartição de quadrantes e fixação de canos de PVC; C-Ataque Químico; D-Ensaio não destrutivo de ultrassom; E-Preparação dos agentes manchantes; F- Aplicação de agentes Limpantes;



Fonte: Elaborado pela autora.

Todas as etapas da pesquisa foram observadas em nível macro através do estereoscópio de bancada NIKON com a objetiva de 10x de aproximação no Laboratório de Microscopia Eletrônica,(LME) do Departamento de Geologia da UFC. As amostras tiveram suas imagens capturadas em todas as etapas da metodologia para criação de um banco de dados.

Para analisar com maior precisão os detalhes estruturais da rocha, a escala das imagens foi reduzida, permitindo uma aproximação mais direcionada da superfície. Cada quadrante analisado foi subdividido em nove partes menores, facilitando a localização e comparação entre os pontos. Para a investigação de fraturas e cavidades, as imagens foram ampliadas com zoom de até 30x sempre que necessário, garantindo uma análise mais detalhada das alterações na estrutura da rocha

As medidas de brilho e cor foram realizadas antes e após os experimentos. As amostras foram submetidas ao processo de limpeza para definir a recuperabilidade. Os dados foram associados aos índices físicos das rochas (densidade relativa, porosidade aparente e absorção da água), as análises da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para investigar as fraturas nos três tipos de quartzito

### ***3.2.1 Análise Petrográfica***

As análises petrográficas foram realizadas conforme os parâmetros da NBR-15845-1 no laboratório de Microscopia eletrônica, Departamento de Geologia da UFC. Este procedimento teve o objetivo de determinar a composição e proporção mineralógica de cada tipo de rocha selecionada, definir a natureza das relações texturais, o estado de alteração e o estado microfissuras, bem como identificar minerais alteráveis e solúveis.

Para o Perla Santana, As análises petrográficas indicam que as alterabilidades sobre comprometimento do lustro, durabilidade, porosidade, possíveis patologias e desempenho das rochas quartzíticas analisadas. As propriedades das rochas puderam ser determinadas de maneira adequada, obedecendo às normas técnicas. As quais muito relevante na comercialização, ações deletérias de manchas, a testagem contribui para o aperfeiçoamento dos procedimentos de limpeza e conservação dos materiais (NUNES,2018).

### ***3.2.2 Índices Físicos***

Os índices físicos são parâmetros fundamentais para caracterizar a qualidade e o comportamento das rochas. Por meio de ensaios laboratoriais, determinam-se propriedades como densidade aparente, densidade real, porosidade e absorção de água, que ajudam a prever o desempenho do material em diferentes condições de uso.

Mesquita (2002), Ribeiro, et al., (2008) e Carvalho (2010) avaliam a alterabilidade a partir do estudo do aumento de vazios (microfissuras) e alteração por meio de estudos petrográficos, modificações na porosidade e permeabilidade ao longo do tempo em que o material é exposto às intempéries, além da perda de cátions por percolação de fluidos. O procedimento de determinação da massa específica aparente das amostras de rocha por meio da pesagem hidrostática como é demonstrado na imagem da figura 8.1.

Figura 8- Procedimento de pesagem das massas submersas e saturada.



Fonte: Elaborado pela Autora.. Medidas de acordo com o princípio de Arquimedes realizadas no Laboratório LAGETEC-UFC. 1- Aferição da massa submersa; 2- massa saturada, respectivamente.

Observa-se a pesagem da amostra seca no ar, enquanto na imagem 8.2, a amostra é pesada submersa em água, utilizando um suporte adequado para garantir a imersão completa sem contato com as paredes dos recipientes realizadas no LAGETEC, Laboratório de Geotecnia do Departamento de Geologia da UFC.

A NBR 15845-2 estabelece métodos para determinar propriedades físicas das rochas ornamentais, como a massa específica aparente, a porosidade aberta e a absorção de água. Essas propriedades são calculadas a partir das massas da amostra em diferentes condições: seca, saturada em superfície e submersa em água, utilizando o princípio de Arquimedes. A massa específica aparente é determinada dividindo-se a massa da amostra seca pela diferença entre sua massa seca e sua massa quando totalmente submersa em água. Essa relação fornece uma estimativa da densidade da rocha considerando apenas os espaços porosos preenchidos por ar.

A Porosidade Relativa é expressa como a razão entre a quantidade de água absorvida pela rocha e o volume total da amostra, multiplicada por 100 para obter um valor percentual. Esse parâmetro indica o percentual de espaços vazios interconectados dentro do material, influenciando sua resistência e comportamento em diferentes ambientes. Já a Absorção de água é calculada comparando-se a variação de massa entre a condição saturada e a seca, sempre em relação à massa seca da amostra.

Esse índice reflete a capacidade da rocha de reter água, sendo um fator determinante para aplicações em áreas sujeitas a umidade. Entende-se que quanto maior a Porosidade maior será a Absorção de Água.

### ***3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV***

As amostras foram analisadas em MEV com detector EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), sob voltagem de aceleração de 15 kV. Os espectros foram obtidos com tempos de aquisição entre 12,1 s e 60 s. As imagens foram coletadas com aumentos variáveis e resolução de 512 x 384 pixels, sem metalização.

A Microscopia Eletrônica de Varredura-MEV foi aplicada com intenção de investigar se haveria preenchimento, nas fraturas do quartzito. Os quais poderiam justificar os comportamentos dos índices físicos. Esse método é usado para observar a morfologia, textura, microestrutura e composição química de amostras com alta resolução, fazendo possível entender os elementos químicos que a compõem os quartzitos. Foi utilizado o equipamento HITACH do Laboratório de Microscopia Eletrônica, (LME) do Departamento de Geologia da UFC

### ***3.2.4 Macroanálise de Fissuras***

As amostras de quartzito foram caracterizadas em relação às fissuras dispostas em sua estrutura, a fim de avaliá-las quanto sua dimensão e incidência nas placas. Tais que podem influenciar diretamente na sanidade da rocha, isto é, sua durabilidade mediante a impactos provenientes do beneficiamento e corte do bloco.

Durante a caracterização das amostras de quartzito, foram observadas e analisadas microfissuras presentes na estrutura das rochas que podem desempenhar um papel significativo na integridade mecânica das rochas, influenciando diretamente propriedades como resistência físico mecânica, durabilidade e comportamento frente a esforços externos. Foi aferido com auxílio da Lupa de bancada Nikon, onde as microfissuras estavam distribuídas, em zonas específicas da rocha a fim de constatar se as tensões se davam de maneira difusa ou distribuída.

As rochas foram observadas e descritas de acordo com os parâmetros estabelecidos de continuidade, abertura e presença de minerais secundários, aspectos fundamentais para inferências sobre a estabilidade estrutural e o comportamento das rochas em aplicações.

### ***3.2.5 Ensaios de velocidade de propagação das ondas Ultrassônicas.***

O experimento se baseia na aplicação de ondas ultrassônicas por meio de transdutores acoplados no corpo de prova, em um ou mais eixos da sua estrutura, as amostras podem ter dimensões diversas. A velocidade é medida pela relação entre o tempo de propagação e a distância da amostra entre os transdutores. O ensaio foi realizado no equipamento PUNDIT modelo 2000 do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará. A determinação da velocidade de propagação de ondas em amostras de rochas podem indicar a ocorrência de descontinuidades internas como fraturas, vazios e cavidades pontuais, permitindo a avaliação da qualidade do material e a estimativa de suas propriedades mecânicas, como densidade e grau de fraturamento. Tais descontinuidades interferem diretamente nos índices físicos, como a Porosidade, Absorção e Densidade.

Figura 9 -Procedimento realizado no NUTEC com aparelho PUNDIT 2000. A esquerda os corpos de prova que foram medidos e direita a utilização do equipamento..



Fonte: Autora.

O ensaio foi realizado com transdutores posicionados nas extremidades da amostra, utilizando-se para isolar interferências da superfície da rocha com o ar, um gel neutro.

### 3.2.6 Ensaio de brilho superficial

O aparelho de medição utilizado para a realização dos ensaios foi o GLOSSMETER, o qual foi disponibilizado pelo LME-Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, com o apoio do corpo técnico do curso de Geologia. O mesmo foi calibrado antes das medições e reajustado a cada tipo de quartzito para assegurar resultado fiel para cada um dos contextos, como pode ser detalhado a seguir. As medições de brilho nos três tipos de quartzito foram obtidas a partir de uma placa polida e cada quartzito de 20 x 20 x 3 cm, divididas em quatro partes iguais de 10 x 10 cm, denominadas quadrantes. As medidas foram organizadas em quatro etapas: (i) com a rocha em estado inicial, (ii) Após o ataque químico, (iii) Após o ensaios de manchamento e (iv) ao final do processo de limpeza (Figura 10).

Figura 10- Corpos de provas ordenadas para medição superficial. Quartzito Taj Mahal: cinza de tom quente, contraste baixo, polido e resinado, com quadrantes delimitados. Perla Santana: cinza claro com porções esbranquiçadas, tom frio, polido e resinado. Cristallo Pink: Branco com leve tonalidade enferrujada pontual, polido e resinado.



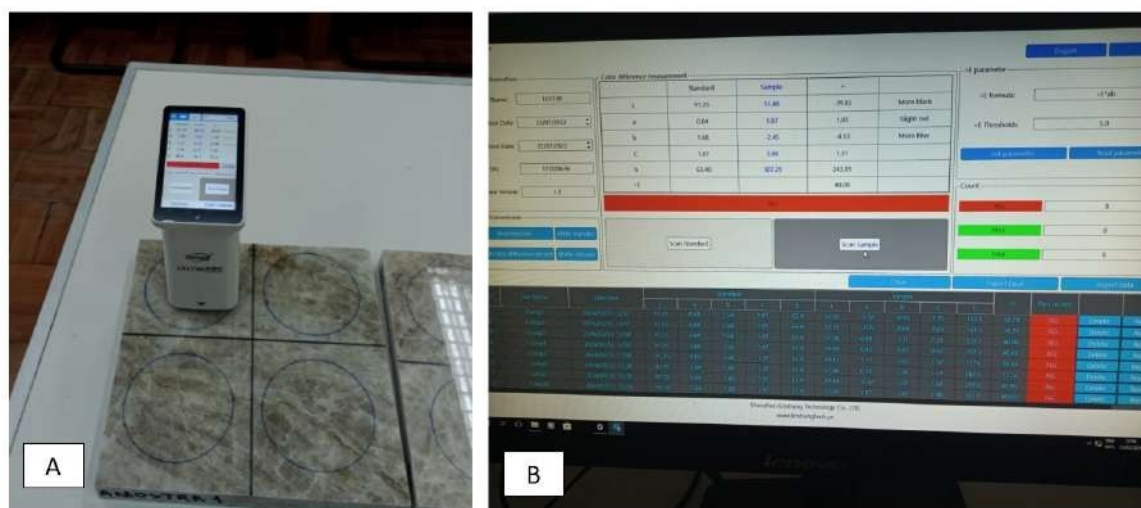
Fonte: Autora, 2025.

O brilho foi coletado em amostragem aleatória de 10 pontos em cada um dos 4 quadrantes marcados em cada placa. Ao total foram utilizadas 4 placas de cada quartzito, o que gerou o total de 16 quadrantes para os 3 tipos diferentes de quartzitos (Perla Santana, Cristallo Pink e Taj Mahal). As medições foram feitas com a rocha em estado inicial, após o ataque químico, manchamento e ao final do processo de limpeza.

### 3.2.7 Ensaio de Colorimetria

A cor foi medida no regime de amostragem aleatória de 10 pontos em cada um dos 4 quadrantes pré-determinados em cada placa. Ao total foram utilizadas 4 placas, respectivamente 16 quadrantes para os 3 tipos diferentes de quartzitos ornamentais (Perla Santana, Cristalino Pink e Taj Mahal). As medições foram feitas com a rocha em estado inicial, após o ataque químico e ao final do processo de limpeza. Cada ciclo contou com especificidades metodológicas, no entanto a medição de cor foi executada da mesma maneira. O procedimento de medição da colorimetria das amostras de rocha foi realizado utilizando um colorímetro portátil. Na Figura 11. A e o processamento dos dados no software correspondente figura 11.B. O qual foi disponibilizado pelo LME-Laboratório de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Ceará. As amostras foram preparadas e organizadas em superfícies demarcadas, garantindo a padronização das medições.

Figura 11- Aferição de cor e luminosidade com o colorímetro em contato com a superfície da amostra de Quartzito Taj Mahal. Placas delimitadas por quadrantes e círculos de referência para os aros de PVC. À direita, tela do computador exibindo a disposição dos dados coletados em tabela para quantificação.



Fonte: Autora.

A modelagem dos dados de cor se deu com base no sistema CIELAB, técnica na qual é possível relacionar as coordenadas de cor que são medidas diretamente na superfície polida das placas. As variáveis analisadas incluem  $\Delta L$  que representa a alteração na luminosidade,  $\Delta a$  alteração no eixo vermelho-verde,  $\Delta b$  alteração no eixo amarelo-azul.

A variável  $\Delta E^*$  a diferença total de cor, considerando todas as variações (luminosidade e cor) usando o estado inicial da cor como referência. Sua fórmula é detalhada em sequência, onde ( $\Delta E$ ) é a variação da cor (claro-escuro), ( $\Delta L$ ) é a variação de tom, ( $\Delta a$ ) mede os pontos verdes – vermelho e por fim os tons de azul-amarelo são representados por ( $\Delta b$ ).

A seguir descreve-se o método de cálculo utilizado no tratamento dos dados.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \text{ onde:}$$

$$\Delta L^* = L^*_{\text{final}} - L^*_{\text{inicial}};$$

$$\Delta a^* = a^*_{\text{final}} - a^*_{\text{inicial}};$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{final}} - b^*_{\text{inicial}}$$

De acordo com aplicações anteriores, principalmente, ESBERT et al. (1997), IÑIGO et al. (1997).

“Este sistema de cor é baseado em três dimensões: o tom que corresponde à tonalidade da cor (vermelha, azul e verde) e relaciona-se com a longitude da onda de luz; o croma, pureza ou saturação, que corresponde ao grau de intensidade da cor e a claridade ou luminosidade, que corresponde à cor e relaciona-se com a intensidade luminosa e a refletância da luz (ESBERT et al. 1997, IÑIGO et al. 1997)”

O software permitiu a aquisição, o processamento e a análise dos dados espectrais, fornecendo informações quantitativas sobre as variações de cor antes e após a aplicação das demais análises

### **3.2.8 Ataque Químico**

O ensaio de alterabilidade química a partir de substâncias utilizadas na limpeza e conservação, tomou como referência a norma ABNT NBR 16596 (ABNT, 2017). Nesta pesquisa foram utilizados reagentes em baixas concentrações, presentes na composição dos produtos de limpeza ou encontrados em substâncias orgânicas naturais, aplicados diretamente sobre a superfície polida das placas de quartzitos.

Tais reagentes simulam danos causados pelo contato da rocha com materiais de limpeza, bebidas, substâncias ácidas e básicas em uma velocidade acelerada, CAVALCANTI et. al. (2019). Na tabela 4 constam os reagentes, suas fórmulas químicas, as concentrações e o tempo de ataque de cada reagente, de acordo com a norma ABNT NBR 16596 (ABNT, 2017).

Tabela 4 –Produtos simulados pelos reagentes, os reagentes, suas fórmulas e seus respectivos tempos de atuação de acordo com a norma ABNT NBR 16596 (ABNT, 2017).

<b>Produtos simulados pelos reagentes</b>	<b>Reagentes</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Aplicação (horas)</b>
Detergentes e sabões	Cloreto de Amônia 100 g/L	NH <sub>4</sub> CL	24
Desinfetantes e agentes Alvejantes	Hipoclorito de Sódio 20 mg/L	NaClO	24
Sucos, Frutas cítricas e Refrigerantes	Ácido Cítrico 3%	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	24
Produtos Alimentícios	Ácido Láctico 5%	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub>	24
Vinagre, Solventes, Perfumes	Ácido Acético 3% v/v	CH <sub>3</sub> COO H	96
Ácido Muriático	Ácido Clorídrico 3%	HCl	96
Ácido Muriático	Ácido Clorídrico 18%	HCl	96
Sabões em Geral	Hidróxido de potássio 30g/L	KOH	96
Sabões em Geral	Hidróxido de potássio 100g/L	KOH	96
	Água deionizada	H <sub>2</sub> O	96

Fonte: NBR16596, ABNT (2017).

O ensaio de resistência ao ataque químico apresenta-se como mais uma ferramenta que permite avaliar a alterabilidade das rochas, simulando os efeitos de algumas substâncias presentes nos produtos de limpeza doméstica (sabões, água sanitária, desinfetantes), sucos cítricos e no tratamento de água de piscinas.

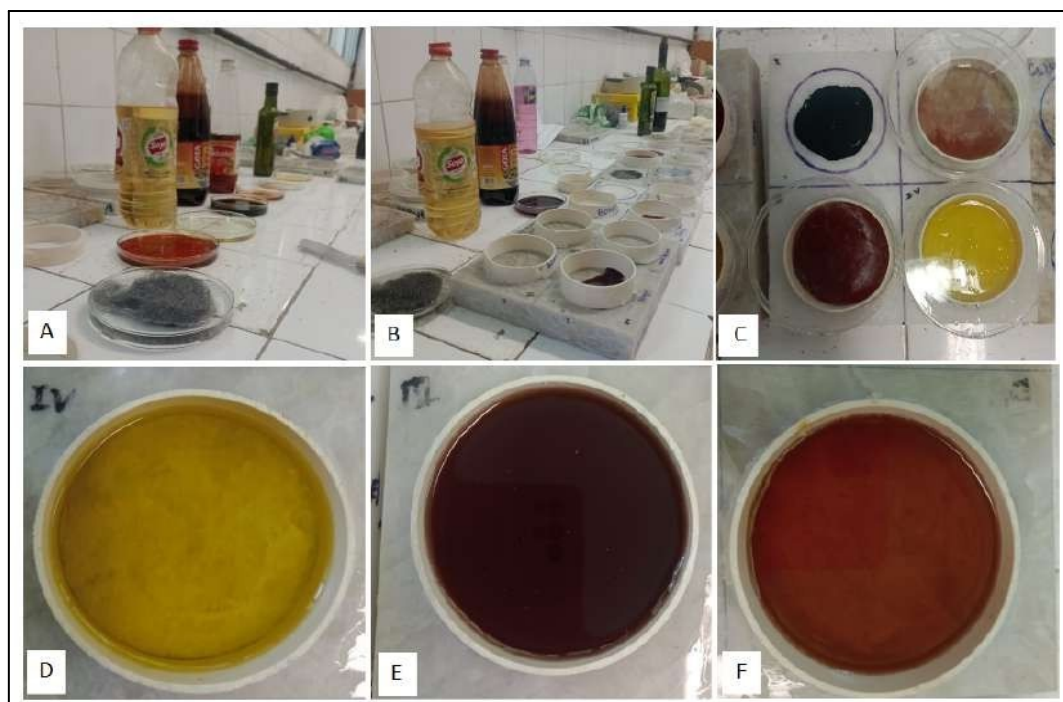
### **3.2.9 Ensaio de Manchamento**

O grau de resistência da rocha em absorver substâncias com poder manchante é denominado Classes de Resistência ao Manchamento regido pela norma da NBR 13.818 (ABNT, 201x). Substâncias consideradas “agentes manchantes” são colocadas em contato com a superfície da rocha por 24 horas e classificadas com base na sua resistência ao manchamento. Neste estudo foram utilizados como agentes manchantes Agentes de Ação Oxidante- palha de aço; Agentes de Formação de Película - Óleo de oliva.

Além de outros agentes manchantes. Como pode ser observado na figura 15. Logo, o manchamento das rochas foi simulado utilizando ingredientes alimentícios, bebidas, óleos e produtos de limpeza doméstica para observar a ação degradante que eles poderiam vir a causar nas rochas. Passado o período de 24 horas estabelecido na norma, os aros são retirados, a superfície da rocha limpa, são realizadas as medidas de brilho e cor novamente para que se determine quais foram os agentes mais agressivos na rocha durante o manchamento.

Os agentes manchantes de acordo com a norma são classificados como: Agentes de Ação Penetrante-óxido de cromo verde em óleo leve, óxido vermelho de ferro em óleo leve. A sequência ilustra as etapas de aplicação dos agentes manchantes em contato direto com as superfícies das amostras, em espaço delimitado por aro de PVC, em acordo com a norma ABNT NBR (Figura 12)

Figura 12- A-Etapas do ensaio de manchamentos prontos para aplicação na superfície da rocha B- Amostras com canos de PVC para aplicação dos agentes manchantes. C- Amostras com agentes manchantes aplicados dentro da área delimitada pelo cano de PVC, cobertas com placas de Petri limpas e secas. D- Amostra preparada para o intervalo de 24 horas com óleo de cozinha. E- Amostra com agente manchante aplicado (suco de uva). F- Amostra com agente manchante aplicado (vinho).



Fonte: Autora.

Considerando os objetivos do estudo estarem relacionados à recuperação dos quartzitos esse método tem grande importância no sentido de que, tanto para os ataques químicos como para os manchamentos, a limpeza pode ser parte da recuperação da rocha e é classificada, de acordo com a norma NBR 10545-14:1997 ABNT, (1997), em diferentes graus de limpabilidade.

A referida norma determina os tipos e especificações dos seguintes agentes de limpeza: Água quente; Produto de Limpeza Fraco - Especificações: Industrializado, Não abrasivo pH entre 6,5 e 7,5; Produto de Limpeza Forte-Especificações: Industrializado, Abrasivo pH entre 9 e 10. Nesse ensaio foi possível classificar o quartzito por meio dos agentes limpantes e seu desempenho na remoção das manchas em relação ao estado natural da rocha. Com isso se estabeleceu uma classificação dos quartzitos de acordo com a limpabilidade: Impossível de remover; 2- Removível com determinado agente limpante; Facilmente Removível conforme a tabela 5.

Tabela 5 – Classificação das manchas observadas nos ensaios de ataque químico e manchamento de acordo com a ABNT NBR 13.813/1997.

<b>Classe</b>	<b>Classificação de Manchas</b>
1	Manchamento não removível;
2	Mancha removível com HCl;
3	Mancha removível com Saponáceo;
4	Mancha removível com detergente e água quente;
5	Mancha removível com água quente;

Fonte: NBR 10545-14:1997 (ABNT, 1997).

## 4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a execução da pesquisa os resultados foram sendo obtidos de acordo com as demandas de análise dos dados e as interpretações pertinentes ao comportamento da rocha. Dessa forma a sequência que o método foi aplicado se deu de forma não linear, visto que foram surgindo mais oportunidades para investigar determinados aspectos de forma mais aprofundada, resultando em ajustes na sequência metodológica prevista. Na etapa de quantificar os níveis de alterações e o comportamento das amostras, houve a necessidade de refazer alguns experimentos por terem apresentados valores anômalos. Para validação e comparação dos dados foram utilizados, em alguns ensaios, amostras não protegidas pela resina e sem aplicação de tela para compreender o papel desta na prevenção de patologias.

### 4.1 Descrição Petrográfica dos Quartzitos

#### 4.1.1 *Quartzito Taj Mahal*

Macroscopicamente o quartzito Taj Mahal apresenta estrutura da rocha marcada por fraturas em variadas direções que estão detalhadas no item x microfissuras, sua composição mineralógica é caracterizada por alto teor de quartzo ( $\approx 95\%$ ), cor predominantemente clara.

Microscopicamente a rocha é formada essencialmente por minerais silicáticos, com presença subordinada de minerais, acessórios e traços. A composição Mineralógica basicamente composta por Quartzo (95%) que constitui a matriz dominante da rocha, exibindo grãos anédricos a subédricos, com boa sutura de contorno intergranular (majoritariamente côncavo-convexos– 66%), indicando recristalização sob condições metamórficas.

Muscovita (2%) e Sericita (2–4%): Ocorrem como minerais lamelares finamente disseminados ou associados a zonas de fraturas, provavelmente formados durante processos retrogressivos ou estágios intermediários do metamorfismo. A ausência de sericitização secundária evidencia que estas fases são relictas do protólito ou formadas por neoformação precoce. Zircão (1%), Rutilo (0,5%) e Opacos (0,5%): Minerais acessórios típicos de origem detrítica ou metamórfica. A presença de zircão indica herança sedimentar e estabilidade química do mineral sob metamorfismo. Rutilo pode ter se formado como exsolução de fases titaníferas ou relicto de minerais pesados do protólito.

Textura granoblástica: Indicativa de recristalização sob metamorfismo regional. A granulação varia de fina a média (0,5–1,5 mm), apontando para um grau médio de metamorfismo, com possível recristalização dinâmica. Estrutura isotrópica: Sem orientação preferencial de grãos, sugerindo que a deformação foi limitada ou que a rocha sofreu recristalização pós-tectônica. Contatos intergranulares: Côncavo-convexo (66%): Evidência recristalização sob pressão moderada. Plano (27,9%) e serrilhado (6%): Indicam variações locais na deformação e recristalização estática ou dinâmica heterogênea.

A rocha apresenta elevado grau de microfissuramento, o que afeta suas propriedades tecnológicas e deve ser considerada em usos ornamentais ou estruturais. A distribuição dos tipos de fissuras fornece pistas importantes sobre a história tectônica e deformacional: Intragrão não preenchida (46,4%): Principal tipo de fissura, revela microdeformações tardias ou submicroscópicas sem preenchimento mineral posterior. Intergrãos preenchidas (29,5%): Sugere que houve veiculação de fluidos pós-deformacionais, permitindo mineralização secundária (provavelmente sílica, sericita ou opacos). Intergrão não preenchida (15,8%) e intragãos preenchidas (8,3%): Completam o espectro de fraturas, indicando evolução fraturante complexa e história térmico-deformacional rica (Figura 13)

Figura 13-Lâminas petrográficas do quartzito Taj Mahal



Fonte: Amostra de campo, Higor Batista.

Sericitização ausente: Ocorre sericita primária ou neoformada, mas não há evidência de alteração retrogressiva intensa. Opacos não alterados: Estabilidade mineral típica de sistemas com baixa atividade química ou em ambientes fechados à percolação de fluidos agressivos.

A rocha Taj Mahal representa um quartzito derivado de arenito quartzoso, submetido a condições de metamorfismo regional intermediário, com recristalização significativa do quartzo e sutura intergranular adaptativa. A presença de muscovita e sericita indica provável herança do protólito ou episódios metamórficos polifásicos. O padrão de microfissuramento indica uma fase de fragilidade tectônica pós-metamórfica, associada a eventos de exumação ou alívio de pressão, com subsequente preenchimento parcial por fluidos mineralizantes. O arranjo isotrópico e a textura granoblástica revelam que os grãos foram reconstituídos sem orientação tectônica expressiva, o que pode estar ligado a um estágio final de estabilização térmica.

A combinação entre sua composição mineral, ausência de minerais instáveis, e grau de recristalização torna esse quartzito uma rocha de alta durabilidade, embora o microfissuramento elevado possa reduzir sua resistência mecânica e facilitar a penetração de fluidos em aplicações construtivas.

#### ***4.1.2 Quartzito Perla Santana***

A rocha comercialmente denominada como Perla Santana apresenta características petrográficas que indicam sua composição mineralógica essencialmente quartzosa, com 94% de quartzo, seguido por 2% de muscovita e 2% de sericita. Minerais acessórios, como zircão (1%), rutilo (0,5%) e opacos (0,5%), também estão presentes (NUNES, 2018). A amostra possui coloração branca, estrutura fraturada, com microfissuras preenchidas e não preenchidas, e textura granoblástica, características que indicam um histórico de recristalização sob condições metamórficas. A granulação varia de fina a média, com tamanhos de grãos situando-se entre 0,5 mm e 1,5 mm.

O grau de microfissuramento da rocha é considerado alto, apresentando fraturas tanto intra quanto intergranulares. As microfissuras intragrão preenchidas possuem densidade de 0,49 microfissuras/mm<sup>2</sup>, correspondendo a 8,3% do total. Já as intragrão não preenchidas atingem densidade de 2,75 microfissuras/mm<sup>2</sup>, representando 46,4% do total. No caso das microfissuras intergrão, as preenchidas apresentam densidade de 1,75 microfissuras/mm<sup>2</sup> (29,5%), enquanto as não preenchidas somam 0,94 microfissuras/mm<sup>2</sup> (15,8%). Esses valores podem estar associados à maior susceptibilidade do quartzo à dilatação térmica linear, característica que favorece a geração e propagação de microfissuras.

Os tipos de contatos entre os grãos predominam no padrão côncavo-convexo, correspondendo a 66% das interfaces. Contatos serrilhados representam 6%, enquanto contatos planos somam 27,9%, evidenciando um estágio de equilíbrio textural típico de rochas metamórficas. Em relação à alteração mineral, observa-se sericitização e alteração de minerais opacos. Com base nessas características mineralógicas, texturais e estruturais, a rocha é classificada como sericita-muscovita quartzito.

## 4.2 Ensaios de Índices físicos.

A etapa de índices físicos consistiu na análise da densidade relativa, porosidade aparente e absorção de água, de acordo com a NBR 15845-2. De acordo com o padrão estabelecido pela ASTM (2010), valores de densidade iguais ou superiores a 2,560 são considerados elevados. No entanto, as amostras analisadas apresentam valores compatíveis com a faixa normal, não se enquadrando na classificação de alta densidade.

Nesse contexto, os resultados apresentados na Tabela 5 indicam que, embora todas as amostras de quartzito tenham valores próximos ao esperado, os desvios padrão variam entre os corpos de prova. O Taj Mahal apresentou a maior variação em sua densidade, o que pode refletir a sua maior heterogeneidade em termos de fraturamento e composição, quando comparado às demais variedades.

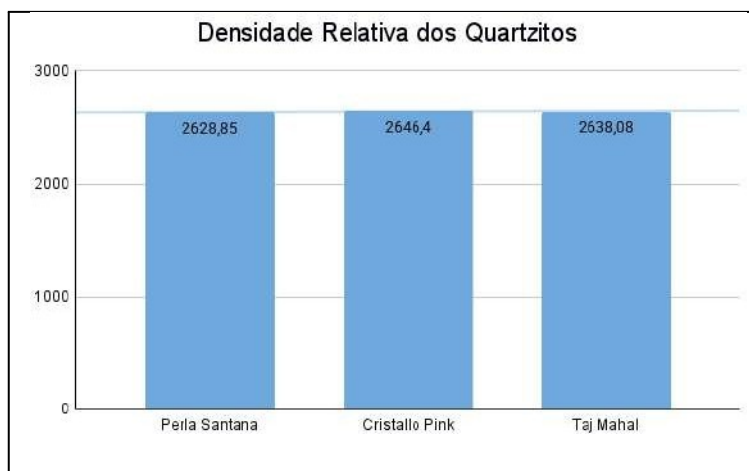
Tabela 6 – Índices físicos dos quartzitos: Perla Santana, Cristalino Pink e Taj Mahal

<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Perla Santana</b>	<b>Cristalino Pink</b>	<b>Taj Mahal</b>
Média	2628,8515	2646,40	2638,0857
Máximo	2638,0137	2648,32	2702,14
Mínimo	2624,9108	2643,58	2584,92
Desvio Padrão	4,03001	1,427	31,937
<b>Absorção (%)</b>	<b>Perla Santana</b>	<b>Cristalino Pink</b>	<b>Taj Mahal</b>
Média	0,1673	0,0428	0,1542
Máximo	0,2341	0,0818	0,2002
Mínimo	0,0653	0,0136	0,1044
Desvio Padrão	0,04469	0,02236	0,0280
<b>Porosidade (%)</b>	<b>Perla Santana</b>	<b>Cristalino Pink</b>	<b>Taj Mahal</b>
Média	0,4400	0,1133	0,4067
Máximo	0,5952	0,2164	0,5275
Mínimo	0,1720	0,0360	0,2821
Desvio Padrão	0,11752	0,0591	0,0725

Fonte: elaborada pela autora.

Quanto à densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>), os resultados médios revelam que o quartzito Cristalino Pink apresenta a maior densidade média (2646,40 kg/m<sup>3</sup>), com baixa variabilidade (desvio padrão de 1,427), indicando um material altamente compacto e homogêneo. O Perla Santana exibe uma densidade média de 2628,85 kg/m<sup>3</sup>, muito próxima à do Cristalino Pink, demonstrando comportamento similar quanto à compactação mineralógica. O Taj Mahal, embora tenha uma média de 2638,09 kg/m<sup>3</sup>, apresenta um desvio padrão elevado (31,937), refletindo uma alta heterogeneidade interna, possivelmente relacionada à presença de fraturas, poros ou variações mineralógicas locais (Figura 14)

Figura 14: Densidade relativa das três variedades de quartzitos.



Fonte: Elaborado pela Autora.

A densidade aparente expressa a relação entre a massa e o volume da rocha, sendo um parâmetro essencial para avaliar sua resistência mecânica e aplicabilidade técnica. Os resultados obtidos indicam que o Cristalino Pink apresenta a maior densidade média entre os três quartzitos analisados, com 2646,40 kg/m<sup>3</sup>, refletindo uma composição altamente compacta e homogênea, como evidenciado pelo seu baixo desvio padrão (1,427).

O Perla Santana apresenta uma densidade média de 2628,85 kg/m<sup>3</sup>, sendo classificado como um quartzito de densidade intermediária, com leve variação interna. Já o Taj Mahal, embora tenha densidade média de 2638,09 kg/m<sup>3</sup>, exibe um desvio padrão elevado (31,937), o que indica significativa heterogeneidade mineralógica ou a presença de vazios e descontinuidades internas.

Com relação à porosidade aparente (%) (Figura 15), que representa a fração do volume da rocha ocupada por vazios, os dados revelam que o Cristalino Pink apresenta a menor porosidade média (0,1133%), indicando estrutura mais compacta e de baixa permeabilidade, enquanto o Perla Santana (0,44%) e o Taj Mahal (0,4067%) exibem valores mais elevados, sugerindo maior presença de microfaturas ou poros conectados. Essa característica pode comprometer sua resistência em ambientes com presença de umidade, pois favorece a penetração de fluidos, especialmente se não houver tratamento adequado. Por sua vez, com aproximadamente 0,0428% Cristalino Pink o qual absorveu menos água Esses valores reforçam que o Cristalino Pink é o quartzito com melhor desempenho frente a umidade, sendo mais adequado para aplicações externas e em ambientes sujeitos à presença de água (Figura 15)

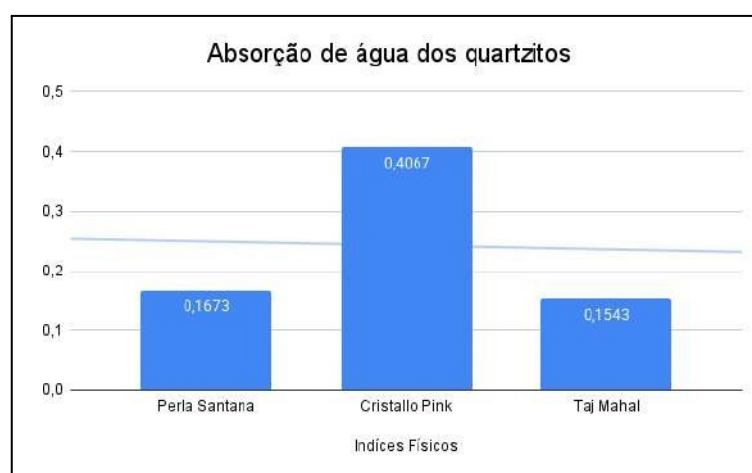
Figura 15-Porosidade aparente dos quartzitos em (%).



Fonte: Elaborado pela Autora.

A absorção de água está relacionada à capacidade da rocha de reter umidade Figura 16, sendo um fator crítico para sua durabilidade em ambientes úmidos. Perla Santana apresenta uma absorção de 0,1673% dentre os 3 o com maior absorção. Seguido por Taj Mahal com 0,1542%.

Figura 16-Absorção de água das amostras de quartzitos.



Fonte: Elaborado pela Autora.

### 4.3 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura

Os dados adquiridos por análise em MEV foram organizados na seguinte ordem, por tipo de rocha quartzítica e a nível de escala por amostra analisada. Cada uma destas recebeu mais de uma leitura, as quais foram descritas individualmente, identificadas por código e ao fim de cada secção os resultados foram sintetizados de acordo com os aspectos principais observados.

Tabela 7-Catologação e identificação das amostras processadas no MEV

<b>Tipo de rocha</b>	<b>Código da amostra</b>	<b>Observações</b>
<b>Perla Santana</b>	<i>PSRLP3</i>	Eflorescência, Caulinita e Micas
	<i>PSRLP5</i>	
<b>Cristallo Pink</b>	<i>CPRLC4</i>	Inclusão densa (monazita ou zircão); cavidades com preenchimento secundário
	<i>CPRLC7</i>	Fraturas intergranulares com selamento parcial; fases lamelares micáceas
<b>Taj Mahal</b>	<i>TMRLT4</i>	Monazita em fratura; minerais pesados em inclusões isoladas
	<i>TMRLT8</i>	Rede de fraturas interconectadas; Circulação de fluidos; fragilidade estrutural

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), acoplada à espectrometria de energia dispersiva (EDS), foi aplicada a amostras de quartzito Perla Santana com o objetivo de investigar a composição química pontual, a microtextura mineral e evidências de processos de alteração ou mineralizações acessórias.

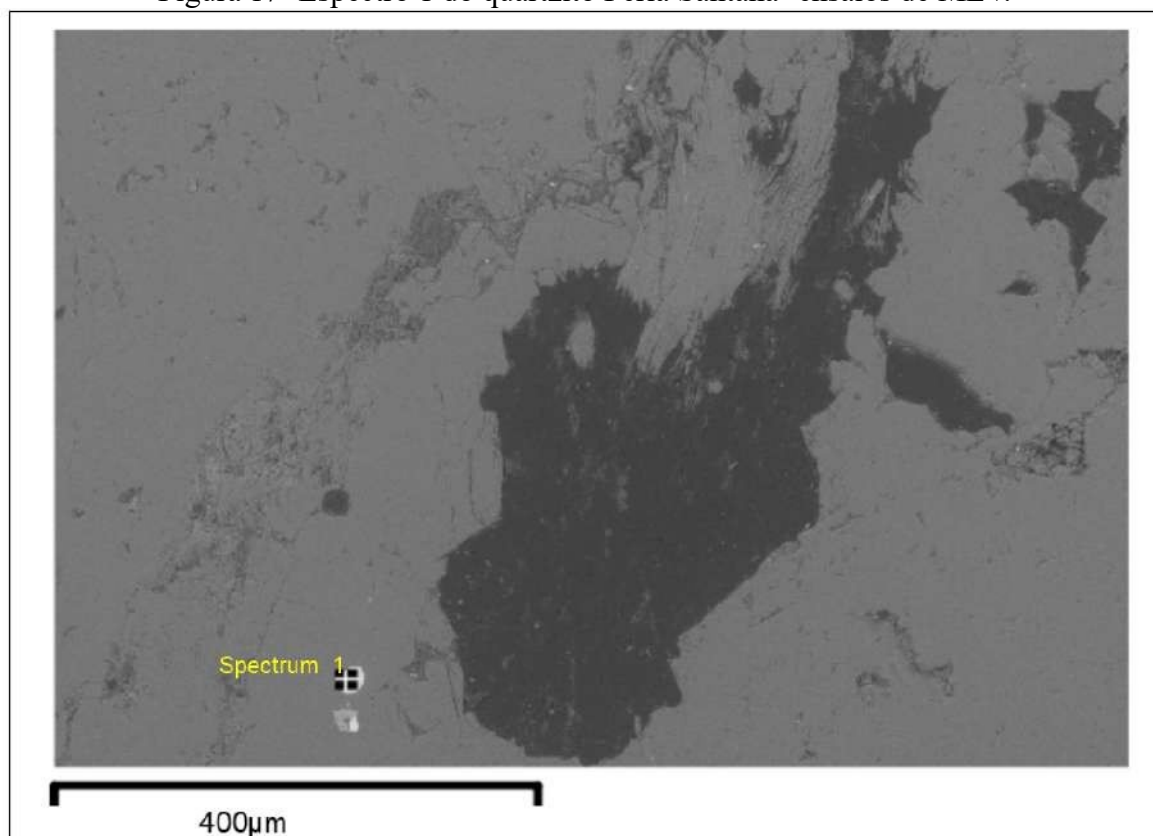
Durante a realização do experimento, foram definidos pontos estratégicos de análise com o intuito de aprimorar a compreensão das feições microestruturais presentes nas amostras de quartzito. Cada ponto foi selecionado com base em características morfológicas específicas observadas nas micrografias, tais como fraturas, inclusões, cavidades, texturas lamelares ou áreas de contraste composicional.

Esses pontos foram classificados em categorias interpretativas conforme a composição química identificada por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e a morfologia evidenciada nas imagens de elétrons secundários (SE) e retro espalhados (BSE). Assim, cada análise está

vinculada a um espectro representativo e a uma região funcional da rocha, permitindo a correlação entre aspectos estruturais e composicionais.

A seguir, apresentam-se os resultados organizados por ponto de interesse, respeitando a codificação adotada para as amostras e a correspondência com os espectros coletados. Ponto 1 – Inclusão brilhante (Zr, Si, O, C, Al) A presença significativa de Zr (45,3 % como  $ZrO_2$ ) junto à alta concentração de  $SiO_2$  (41,7 %) sugere que essa inclusão seja zircão Isso indica a presença de fases acessórios estáveis termodinamicamente dentro da matriz quartzítica, comuns em rochas metassedimentares. (Figura 17).

Figura 17- Espectro 1 do quartzito Perla Santana- ensaios de MEV.

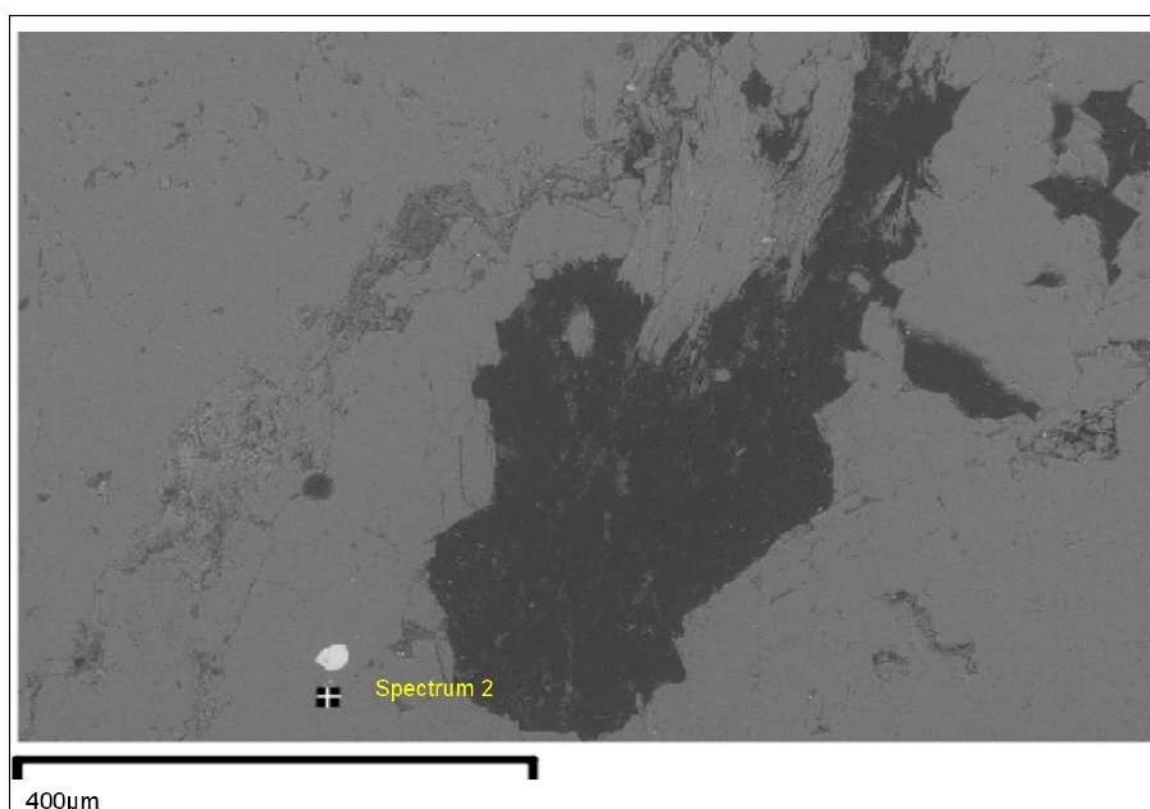


Fonte: Elaborado pela autora.

A imagem associada ao Spectro 1 apresenta inclusões brilhantes na matriz quartzítica. A composição obtida por EDS indica altos teores de óxido de zircônio ( $ZrO_2$  – 45,3%) e dióxido de silício ( $SiO_2$  – 41,7%), com menores proporções de  $CO_2$  e  $Al_2O_3$ . O pico intenso de Zr é indicativo da presença de zircão, um mineral acessório comum em rochas metassedimentares e altamente resistente ao intemperismo.

Ponto 2 – Fase silicatada rica em Ti (Si, Ti, Al, P, O) Com 14,2 % de  $\text{TiO}_2$  e 82,1 % de  $\text{SiO}_2$ , essa fase indica minerais ricos em titânio, possivelmente ilmenita ou anatásio. A presença de fósforo aponta para contaminação ou inclusão de mineral secundário. Essa análise confirma a variedade mineralógica típica de quartzitos com cristais acessórios (Figura 18).

Figura 18- Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 2) do quartzito Perla Santana.

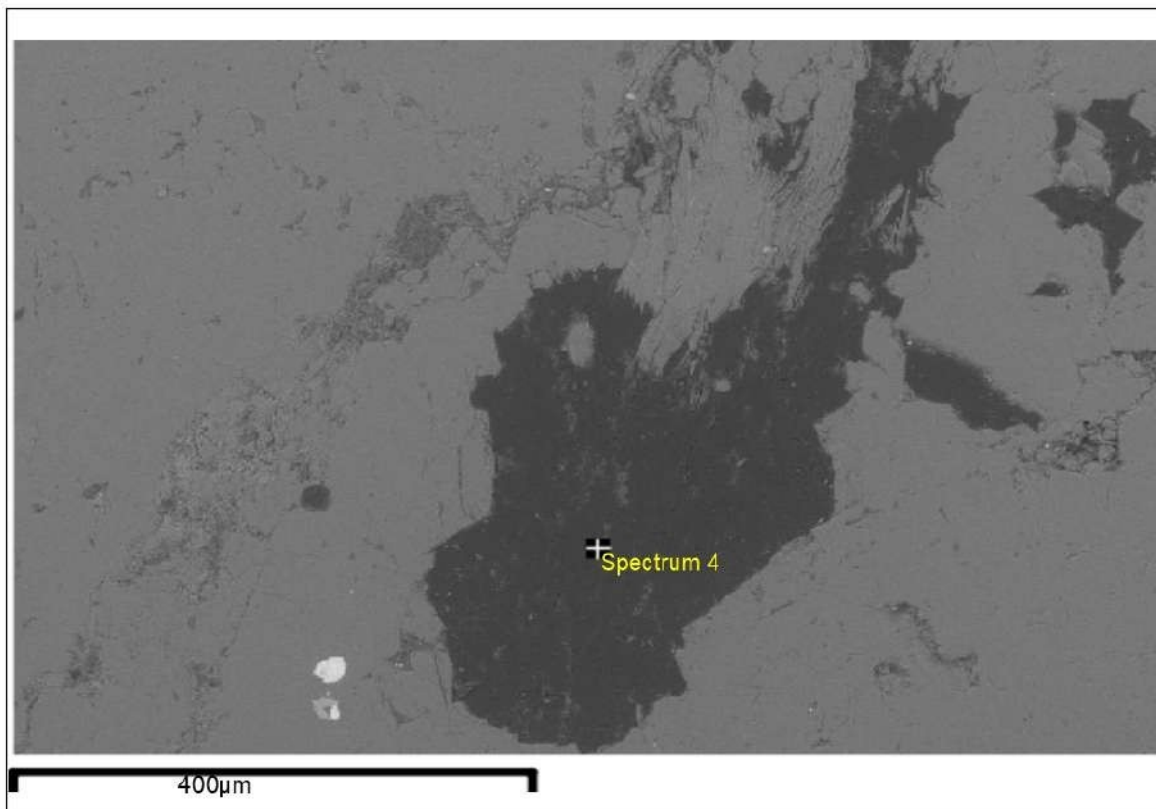


Fonte: Imagem gerada no aparelho de MEV.

Neste ponto, observou-se uma fase predominantemente rica em dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$  – 82,1%), com presença significativa de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$  – 14,2%) e óxidos de alumínio e fósforo. A associação de Ti, Al e P indica a presença de minerais acessórios como ilmenita, rutilo e anatásio, além de possíveis fosfatos. A textura do grão é densa e com limites nítidos, o que sugere cristalização primária ou relicto resistente.

Ponto 4 – Alto teor de Cl (Cl, Si, O, Al, P). O teor de 15,3 % de Cl é significativo e sugere processos de alteração hidrotermal com penetração de fluidos clorados, ou a presença de minerais evaporíticos secundários contendo cloro. Isso revela circunstâncias geológicas envolvendo fluidos salinos, assim como possíveis mudanças de pH ou redox, (Figura 19)

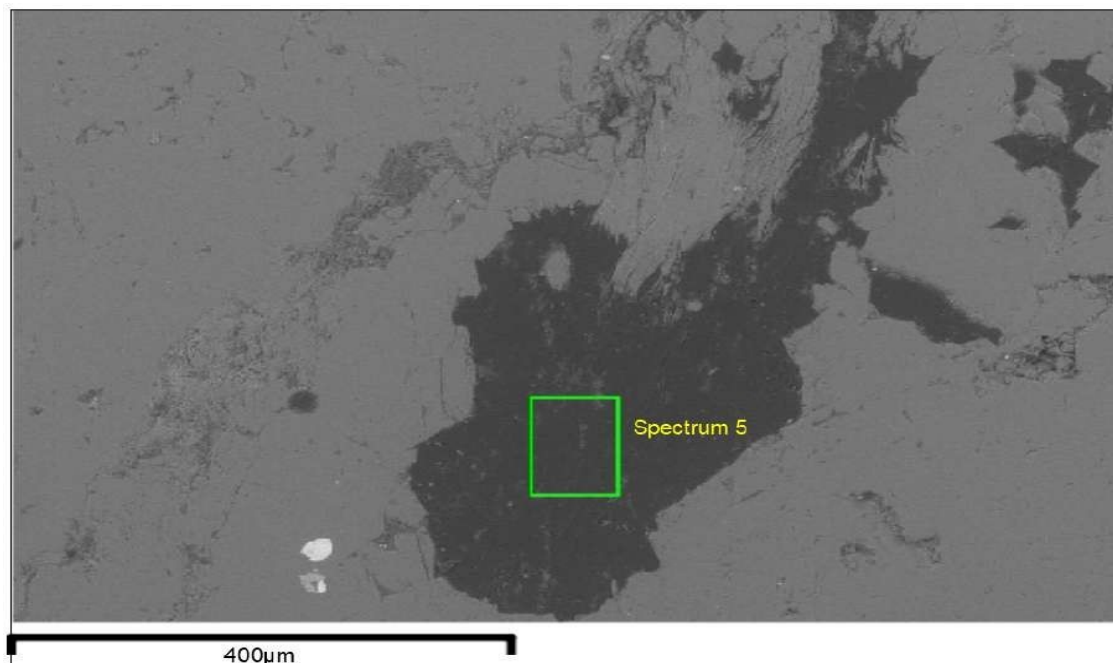
Figura 19-Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 4) do quartzito Perla Santana.



A composição química desta região revelou concentrações consideráveis de cloro (Cl – 15,3%), fósforo e alumínio, além de SiO<sub>2</sub> (70,8%). A presença de cloro em níveis tão elevados pode estar relacionada à ação de fluidos hidrotermais ou salinos, que promoveram a alteração local da rocha ou precipitação de fases evaporíticas secundárias. Essa interpretação é reforçada pela ausência de revestimento metálico na análise, o que preserva a expressão superficial dos elementos leves. Ponto 5 – Carbono elevado (C, O, Si, P, Al, Cl, S)

O carbono em 24,3 % (provavelmente na forma de CO<sub>2</sub>) indica matéria orgânica ou contaminação superficial. A presença conjunta de enxofre e cloro pode indicar interações com fluidos redutores ou originar de compostos orgânicos/evaporíticos. Isso merece atenção devido à potencial contaminação ou influência de água rica em compostos voláteis, (Figura 20).

Figura 20-Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 5) do quartzito Perla Santana



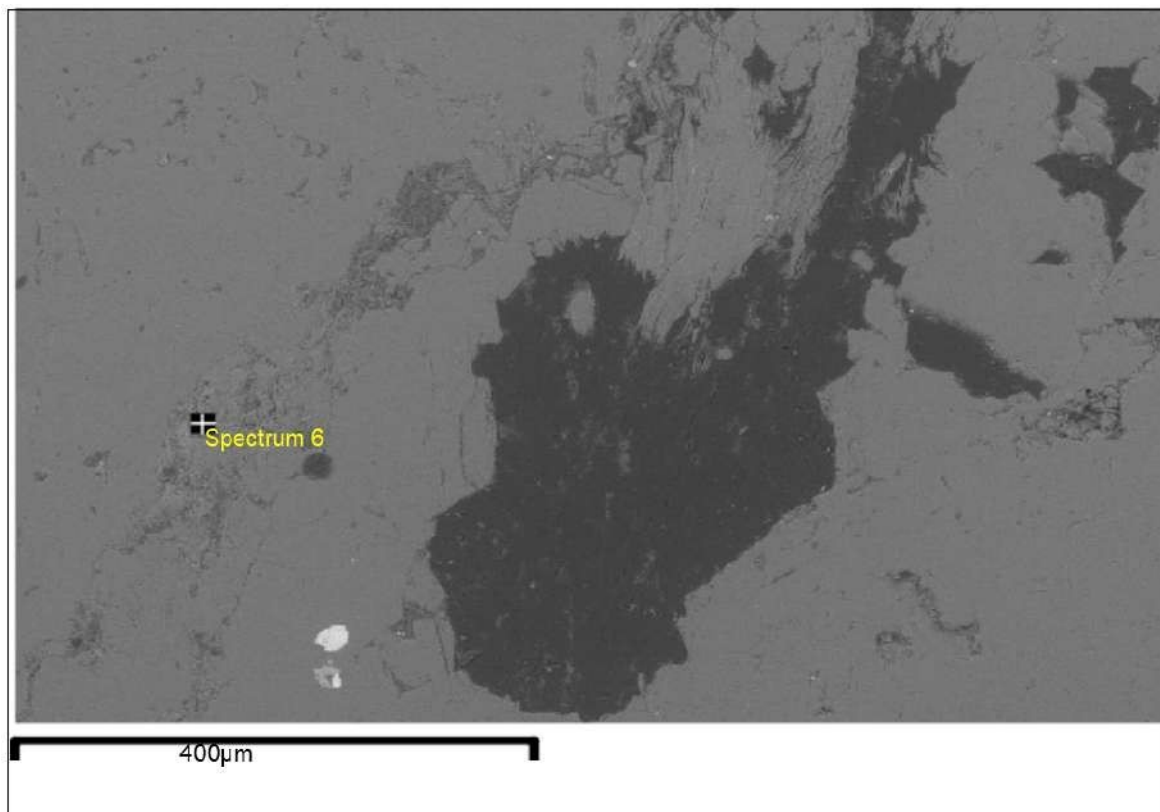
Fonte: Elaborado pela Autora.

Este espectro revelou uma composição atípica, com teor elevado de carbono ( $\text{CO}_2$  – 89%) e oxigênio, além de traços de Al, Si, P, Cl e S. A presença expressiva de carbono pode indicar contaminação superficial, presença de matéria orgânica ou compostos carbonáceos absorvidos, possivelmente oriundos do ambiente de deposição ou transporte da rocha. O enxofre e o cloro podem ser associados a compostos adsorvidos oriundos de fluidos ou do ambiente diagenético.

Ponto 6 – Fase silicatada com Al e K (Si, Al, K, Na, O).

O Espectro 6 mostra uma composição típica de mica potássica, provavelmente muscovita, que é comum em quartzitos com metamorfismo regional leve a moderado (Figura 21). Os teores elevados de alumínio, potássio e sílica confirmam essa interpretação. A presença de cálcio em baixa quantidade pode indicar impurezas ou traços de plagioclásio alterado.

Figura21-Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 6) do quartzito Perla Santana.



Fonte: Elaborado pela Autora.

A análise revelou composição rica em  $\text{SiO}_2$  (63,77%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (27,03%),  $\text{K}_2\text{O}$  (7,99%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,29%) e  $\text{MgO}$  (0,91%). Essa configuração indica a presença de feldspatos sódico-potássicos ou micas finas, como sericita ou caulinita. A textura da fase mineral, com estrutura mais compacta e granular, sugere cristalização *in situ* ou alteração intracristalina. Esses minerais contribuem para a anisotropia da rocha e para sua resposta à meteorização.

As análises por MEV/EDS do quartzito Perla Santana evidenciam uma matriz essencialmente quartzo-alumino-silicática, com presença de fases minerais acessórias como zirconita, rutilo/ilmenita, micas potássicas, fosfatos e possíveis sais solúveis.

As fases com teores elevados de elementos como Zr, Ti, Cl e C indicam uma história geológica marcada por aportes detritais variados, processos de recristalização e circulação de fluidos. A diversidade química e textural observada reforça o caráter heterogêneo da rocha, importante para a compreensão de seu comportamento físico-mecânico além de suas propriedades ornamentais.

Tabela 8 -Principais elementos químicos identificados com os compostos destacados para interpretação geológica.

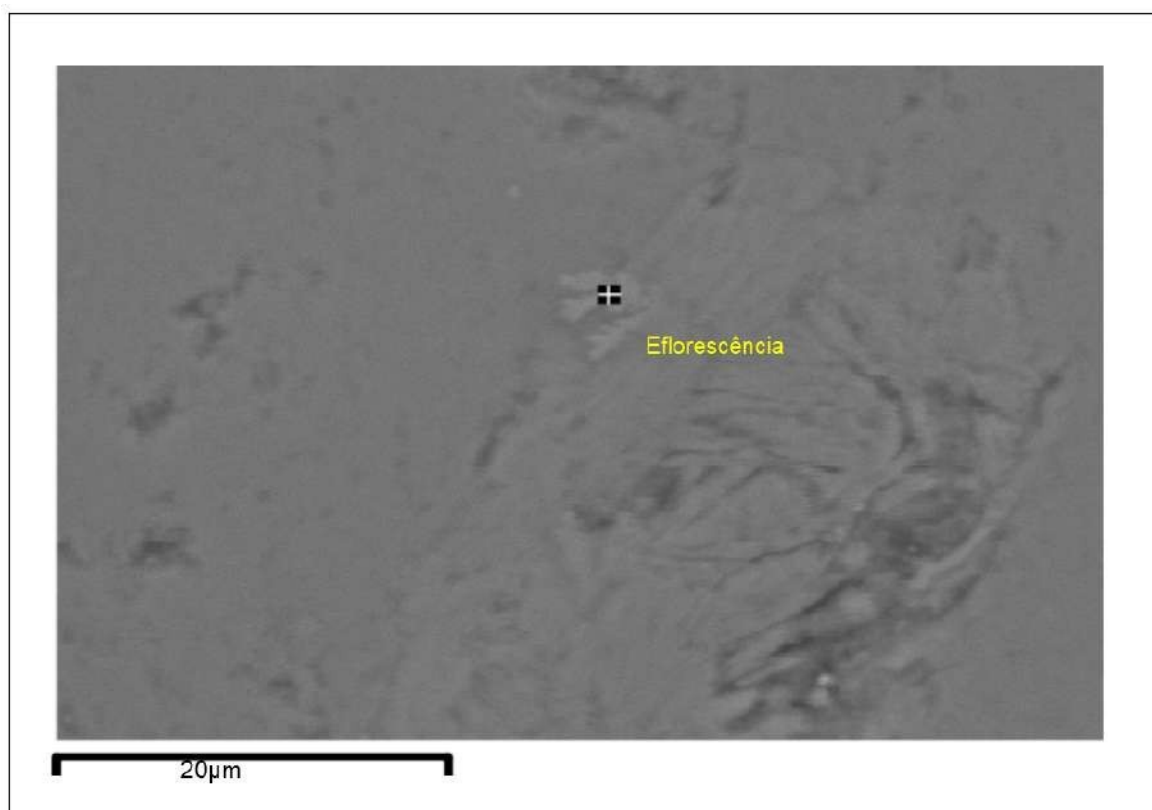
Ponto (análise)	Principais Elementos (%)	Compostos	Interpretação Geológica Destacados
1	Zr (33,6), Si (19,5), O (43,1), C (3,2), Al	ZrO <sub>2</sub> (45,3%), SiO <sub>2</sub> (41,7%)	Inclusão de zirconita; mineral acessório detrital ou recristalizado Fase titanífera (rutilo/ilmenita); mineral acessório resistente.
2	Si (38,4), Ti (8,6), Al (1,3), P (0,5), O (51,2)	SiO <sub>2</sub> (82,1%), TiO <sub>2</sub> (14,3%)	Indícios de alteração por fluidos clorados; possível precipitação secundária
3	Cl (15,3), Si (33,1), Al (2,2), P (4,2), O (45,2)	SiO <sub>2</sub> (70,9%), P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (9,7%)	Indícios de alteração por fluidos clorados; possível precipitação secundária
4	C (24,3), O (70,0), S i (3,8), Cl (1,1), S (0,1)	CO <sub>2</sub> (89,1%)	Provável contaminação orgânica ou compostos carbonáceos adsorvidos em superfície.
5	Al (15,0), Si (27,1), K (10,2), Ca (1,0), O (46,7)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (28,3%), SiO <sub>2</sub> (58,0%), K <sub>2</sub> O	Mica potássica (muscovita); inclusões ou fase secundária em fraturas.
6	Si (29,8), Al (14,3), K(6,6), Na (0,2), Mg (0,6), O (48,5)	SiO <sub>2</sub> (63,8%), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (27%)	Feldspatos e micas finas (caulinita/illita); alteração ou relicto do protólito pelítico.

Fonte: Elaborado pela autora.

A eflorescência foi observada em uma região superficial da amostra, possivelmente associada a bordas ou microfissuras, evidenciada por textura pulverulenta ou cristalina fina e clara, visível em aumento de 20 µm. Os teores detectados podem ser vistos na figura 22 abaixo, dentre eles o indício de Na, K e Cl são clássicos indicadores de sais solúveis, como: Cloreto de sódio (NaCl), Cloreto de potássio (KCl), e sais mistos com alumínio.

A presença de eflorescência em rochas ornamentais como o quartzito geralmente indica a migração de sais solúveis para a superfície da amostra, processo típico de ambientes úmidos com evaporação frequente. Essa migração se dá principalmente por percolação de água e capilaridade mas também de água com sais dissolvidos (cloretos, sulfatos, nitratos). Por sua vez, a evaporação superficial, que cristaliza os sais acumulados.

Figura 22-Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Eflorescência) do quartzito Perla Santana.

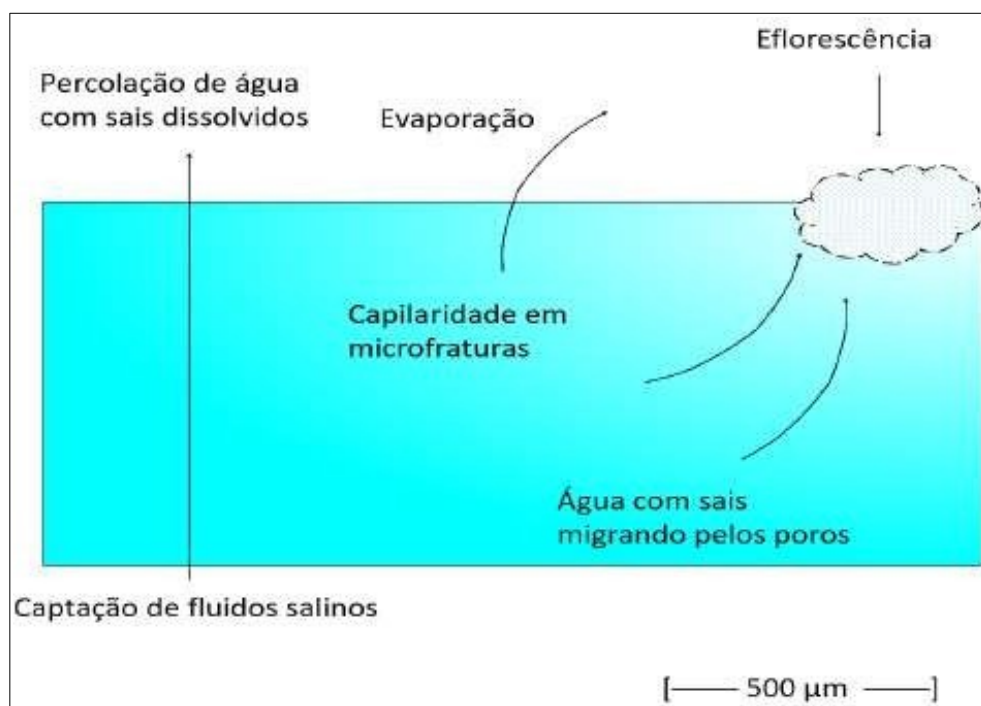


Fonte: Elaborado pela Autora.

Além disso, os altos teores de Al e Si confirmam a origem da matriz mineral da eflorescência como derivada do próprio quartzito provavelmente associada à alteração de feldspatos e micas. A eflorescência afeta a estética da rocha ornamental (formação de manchas esbranquiçadas). Pode indicar presença de microfraturas e porosidade interconectada, importantes em avaliações geotécnicas. Em ambientes internos ou com variação de umidade, pode exigir impermeabilização ou selagem química.

A eflorescência observada no quartzito Perla Santana resulta da mobilização de sais alcalinos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) em solução, que migram por difusão e cristalizam na superfície da rocha. Esse processo sugere algum nível de porosidade conectada ou microfissuração e pode impactar diretamente sua durabilidade e uso ornamental sem tratamento adequado (Figura 23).

Figura 23-Esquema do processo de eflorescência em rochas ornamentais, evidenciando a ascensão de sais dissolvidos por capilaridade e posterior precipitação na superfície.



Fonte: Elaborado pela Autora.

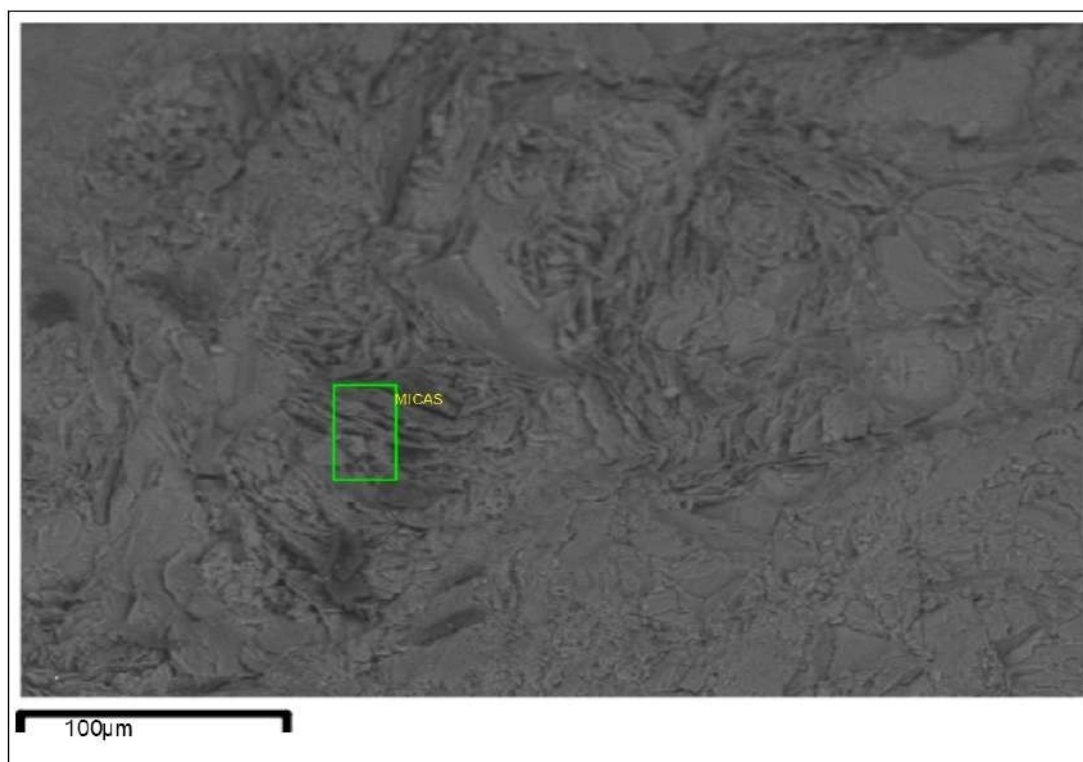
A análise foi realizada sobre uma região caracterizada por textura escamosa, lamelar e bem definida, visível em imagem com barra de escala correspondente a 20  $\mu\text{m}$ . A morfologia observada é típica de minerais do grupo das micas e argilas, com empilhamento paralelo e brilho metálico moderado nas imagens obtidas por elétrons secundários (SE). Essa feição sugere a presença de muscovita finamente cristalizada ou caulinita alterada, comum em zonas de alteração hidrotermal ou bordas de grãos submetidos a intemperismo incipiente.

A presença desses minerais pode influenciar diretamente na anisotropia e na resposta físico-química da rocha, especialmente em ambientes úmidos ou sujeitos a variações térmicas. Conclui-se que presença simultânea de caulinita e mica indica uma possível transição entre fases primárias e produtos de alteração, compatível com ambientes de intemperismo químico moderado ou circulação de fluidos pós-diagenéticos. Em termos geotécnicos, essas fases escamosas e micrométricas tendem a reduzir a coesão interna da rocha, favorecendo clivagens naturais ao longo dos planos de empilhamento e comprometendo a durabilidade mecânica.

Além disso, minerais filossilicáticos como esses podem funcionar como vias preferenciais para a absorção de umidade e sais solúveis, favorecendo processos como eflorescência e manchamento superficial em aplicações ornamentais.

Por isso, sua detecção, mesmo em níveis microscópicos, é relevante para compreender o desempenho físico-químico do quartzito em diferentes condições de uso, (Figura 24).

Imagem 24- Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Caulinita e Mica) do quartzito Perla Santana.



Fonte: Elaborado pela Autora.

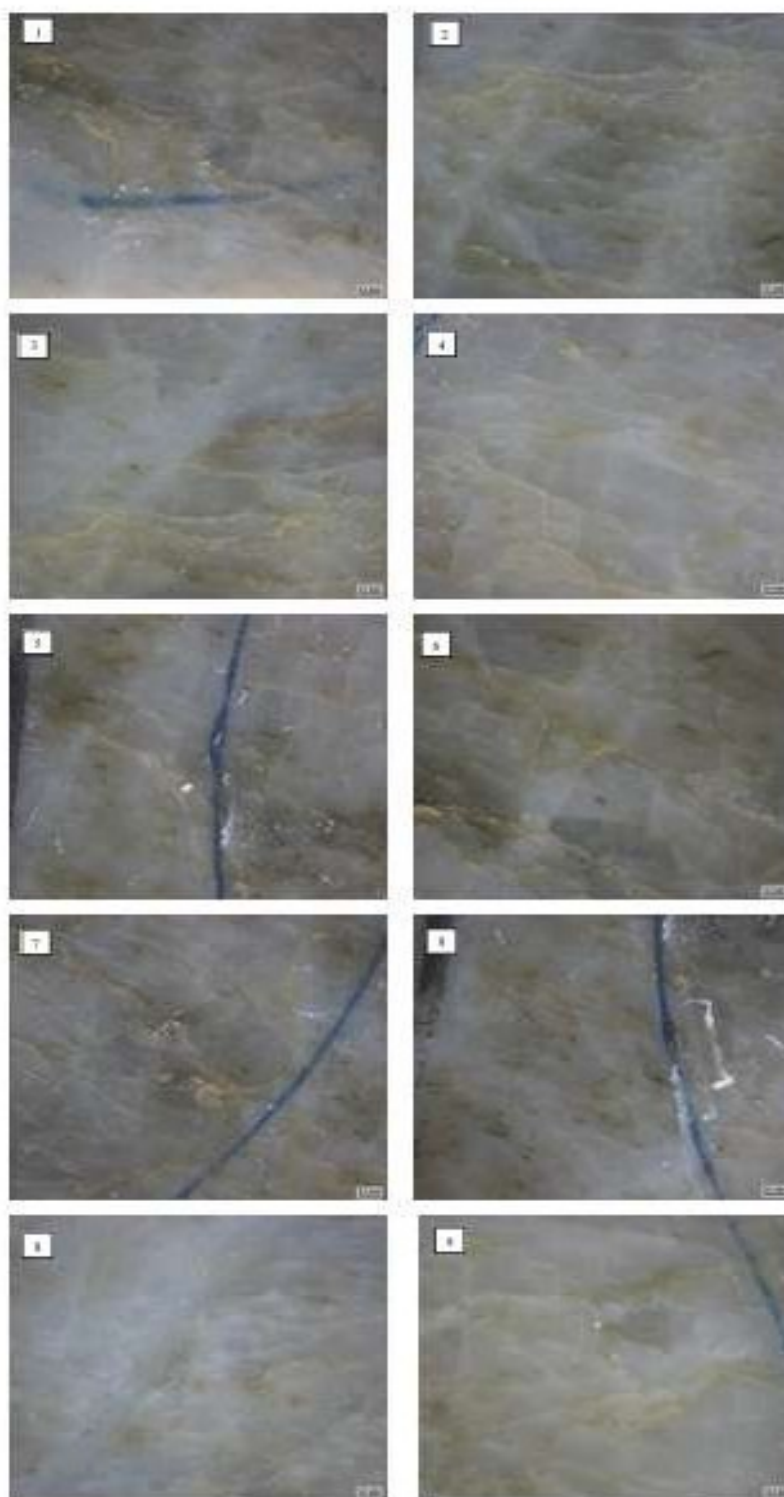
A composição química da amostra PSRLP3 é típica de uma associação entre mica potássica (muscovita) e caulinita (ou outra argila do grupo das caulinitas). As características que sustentam essa identificação são: Altos teores de Al e Si, compatíveis com filossilicatos de estrutura 1:1 ou 2:1; Presença marcante de  $K_2O$ , indicativa de micas primárias como muscovita e sericita; Cálcio em baixa quantidade, podendo representar traços de plagioclásios alterados, fases carbonatadas ou contaminação superficial.

A coexistência de mica e caulinita indica provável alteração química em ambiente subtropical úmido ou hidrotermal ácido, com lixiviação parcial de íons alcalinos. Essas fases são comuns em bordas de cristais de quartzo ou fraturas finas, atuando como preenchimentos secundários ou preenchidos do protólito. A presença dessas argilas pode reduzir a durabilidade da rocha ornamental e afetar sua resposta mecânica, favorecendo a formação de fissuras finas sob esforço, (Figura 26). Com maior concentração ácida, o ataque evidenciou maior abertura e além de halos de dissolução ao redor na figura

No quartzito Taj Mahal o ataque com ácido clorídrico a 3% revelou fissuras predominantemente retas e bem definidas, com abertura variando entre 20 e 30 micrômetros. As bordas mantêm-se nítidas, indicando baixa atuação química no entorno das fraturas.

Na figura 26.1 apresenta uma fissura principal retilínea com bordas bastante marcadas. 26.2 há uma fratura curta e isolada, subparalela à anterior. 26.3 mostra uma fissura com bifurcação em “Y” na extremidade, enquanto 26.4 revela duas fissuras cruzadas em ângulo de aproximadamente 45°. A figura 26.5 exibe uma fissura sinuosa, com possível descontinuidade. A figura 26.6 não apresenta fraturas visíveis, sendo considerada como controle da matriz intacta. 26.7 mostra uma pequena fissura pouco evidente no centro do campo visual. 26.8 observam-se microfraturas paralelas e muito finas. 26.9 revela uma fissura ramificada com bom contraste e ausência de preenchimento.

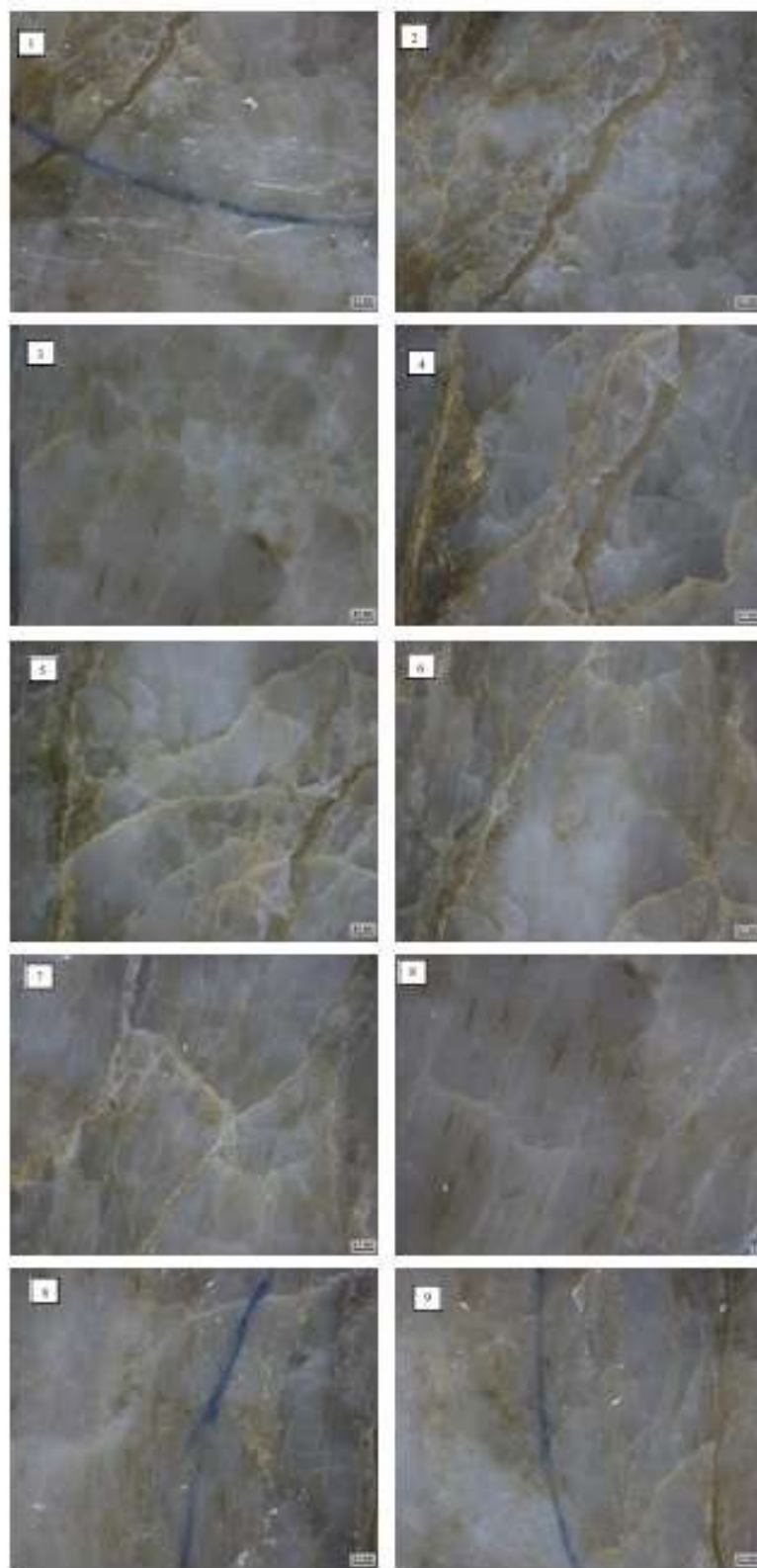
Figura 26-1º Quadrante da amostra 1 Taj Mahal atacado com ácido clorídrico 3%. (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).



Fonte: Autora.

Para o segundo quadrante, nas imagens: 27.1 exibe uma fissura com borda esbranquiçada indicando dissolução. 27.2 apresenta ramificações múltiplas, com bordas suavizadas. 26.3 mostra uma fissura curva e irregular com sinais evidentes de corrosão superficial. 27.4 contém duas fissuras cruzadas, bem marcadas. A imagem 27.5 revela ramificações secundárias saindo de uma fissura principal. 27.6 apresenta microtrincas interconectadas formando um padrão irregular. 26.7, uma fissura larga ( $\sim 50 \mu\text{m}$ ) é visível, com bordas suavemente dissolvidas. 27.8 apresenta trinca curta com leve escurecimento de um dos lados. Por fim, 27.9 mostra fissura ramificada com três ramos visíveis e halo de alteração tênue. Ataque ácido forte gerou dissolução ao redor das fissuras. Presença de bordas suavizadas e fissuras mais abertas e ramificadas.

Figura 27-2º Quadrante amostra 1 quartzito Taj Mahal atacada com ácido clorídrico 18% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).



Fonte: Autora,

A seguir, a Tabela 9 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas no segundo quadrante do Taj Mahal, o qual foi atacado com HCL 18%.

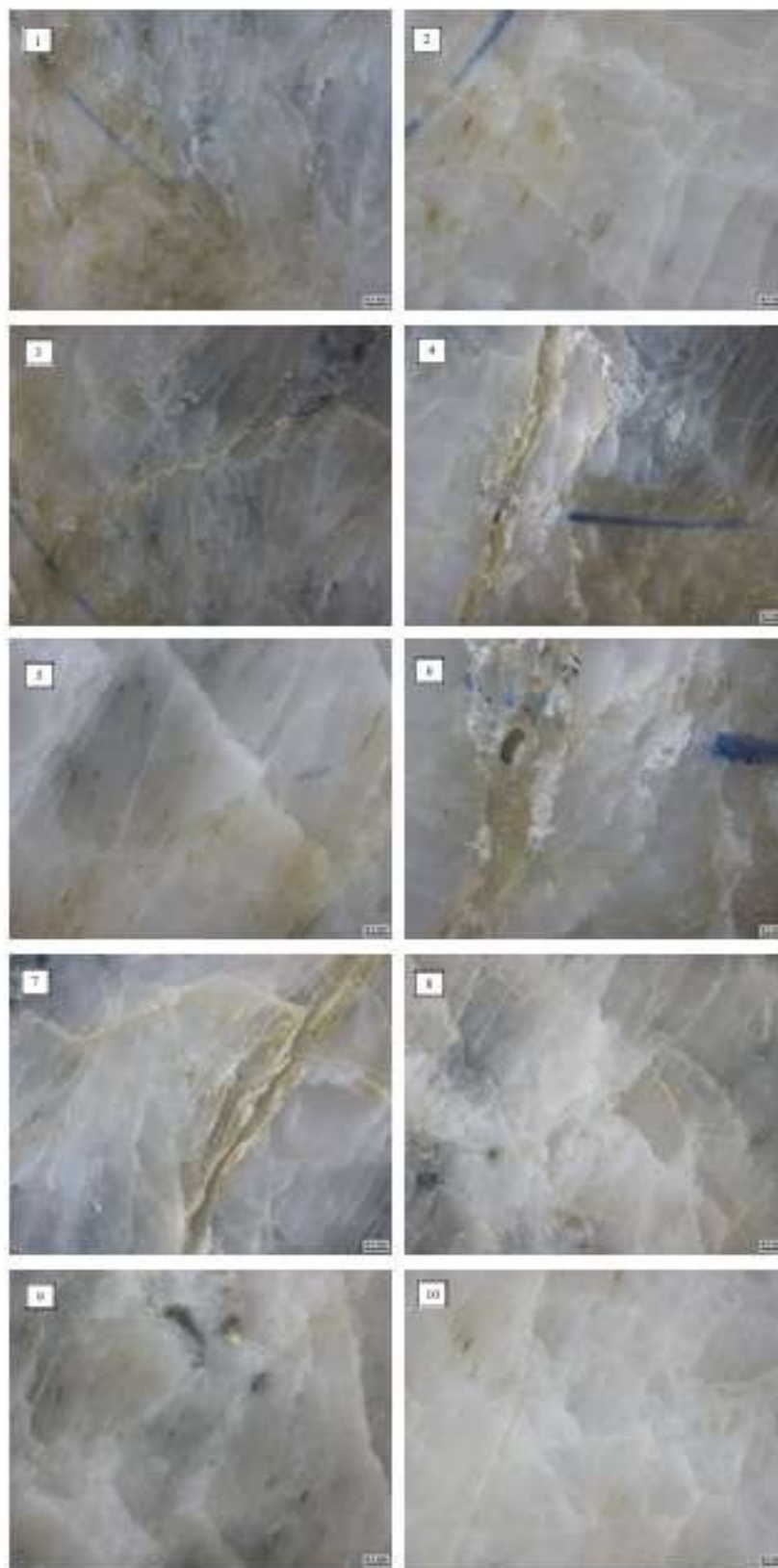
Tabela 9-Descrição da macroanálise de fraturas superficiais das placas. (2º quadrante) Taj Mahal

Amostra	Descrição Técnica
1	Fissura principal com halo de dissolução. Borda levemente Esbranquiçada.
2	Fratura ramificada, com 3 ramos visíveis. Bordas arredondadas.
3	Fissura curva com aspecto de corrosão superficial em torno. Abertura ~40 µm.
4	Presença de duas fissuras cruzadas, com aparência frágil.
5	Fissura central com ramificações finas, possível ataque em zona frágil mineralógica.
6	Microtrincas múltiplas, interconectadas, padrão irregular.
7	Fissura larga (~50 µm), com bordas suavemente dissolvidas. Indício de alteração química.
8	Trinca simples e curta, bem nítida. Borda direita com leve escurecimento
9	Fissura ramificada com três ramificações secundárias. Halo tênue de alteração.

Fonte: Elaborado pela Autora.

No terceiro quadrante (atacado com KOH 100g/l) O ataque alcalino em concentração moderada expôs fissuras mais discretas, predominantemente subparalelas, com menor alteração química. A imagem 28.1 apresenta uma fissura retilínea com orientação próxima de N-S. 28.2 mostra duas fissuras paralelas próximas. 28.3 contém uma microfissura mal definida, possivelmente artefato 28.4 há uma fissura ramificada com leve halo escuro no centro. 28.5 revela trinca curva com bordas íntegras. 28.6 mostra uma fissura levemente ramificada. 28.7 apresenta trinca quase perpendicular ao campo, com início de bifurcação. A imagem 28.8 contém microfissuras paralelas sem alteração ao redor. 28.9 revela uma fissura longa atravessando todo o campo visual. Ataque alcalino leve, mostrou fissuras subparalelas e mais discretas. Menor grau de alteração nas bordas

Figura 28-3º Quadrante Da Amostra 1 Do Quartzito Taj Mahal Atacado Com KOH 30 g/l (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).



Fonte: Autora.

Por conseguinte, a tabela 12 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas no terceiro quadrante do Taj Mahal, o qual foi atacado com KOH 30 g/L.

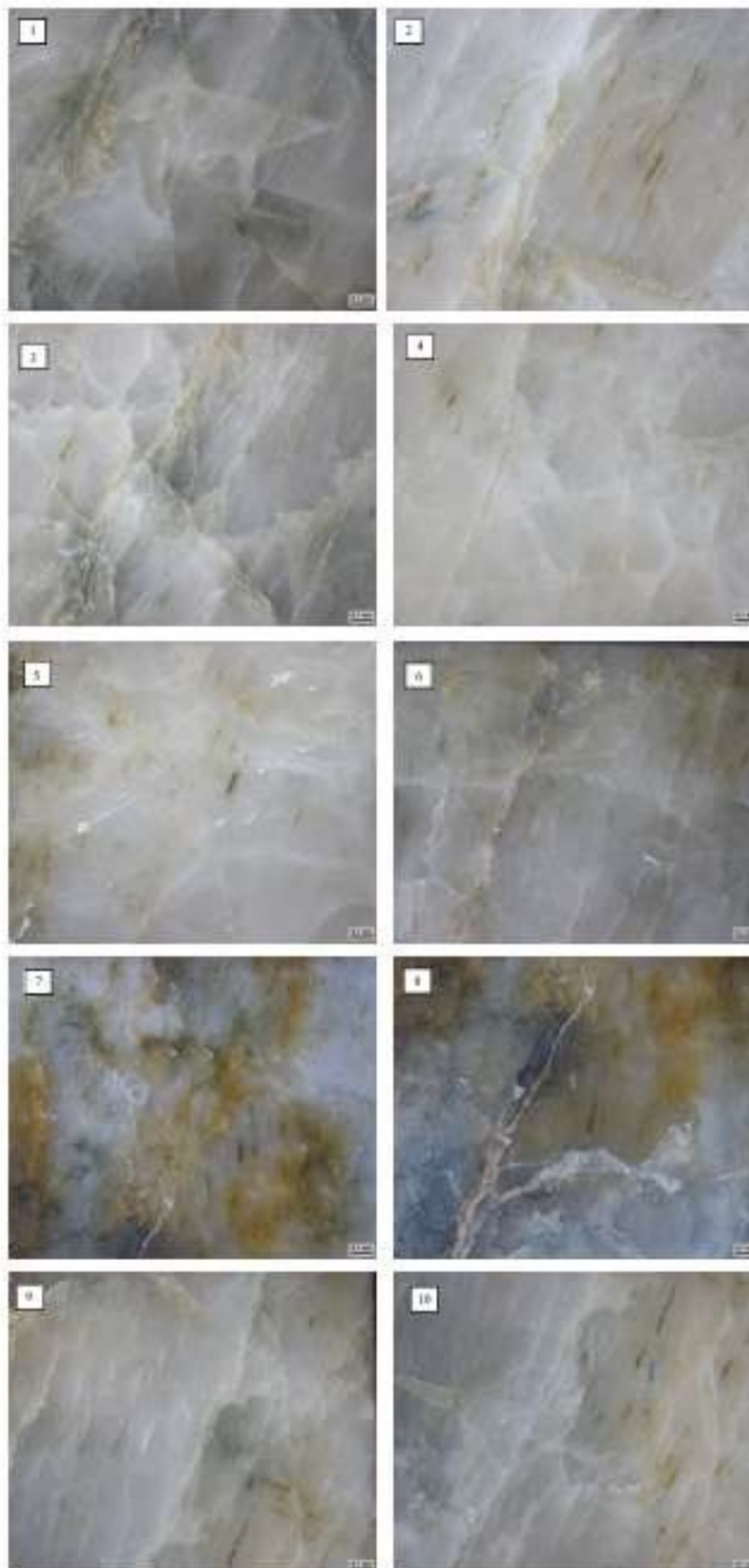
Tabela 10 –Descritivo da macroanálise de fraturas superficiais das placas. (3º quadrante) Taj Mahal

Amostra	Descrição Técnica
1	Fissura fina, retilínea, com orientação N-S. Abertura <20 µm.
2	Duas fissuras próximas e paralelas, indicando possível zona de fraqueza.
3	Microfissura mal definida, possivelmente artefato.
4	Fissura com ramificação à direita, halo escuro central
5	Trinca curva e delgada, bordas intactas.
6	Fissura principal diagonal, levemente ramificada. Sem alteração química visível.
7	Fissura quase perpendicular ao campo, com discreto ponto de ramificação.
8	Conjunto de microfissuras finas e paralelas. Sem sinais de alteração.
9	Fissura longa e retilínea, cruzando todo o campo visual. Abertura Média.

Fonte: Elaborado pela Autora.

O ataque alcalino no quarto quadrante (KOH 3%) concentrado resultou em rede de fissuras mais complexas e conectadas, com alguns halos de alteração química (Tabela 1). A imagem 29.1 mostra fissura cruzada com interseção central bem marcada. 29.2 exhibe fissuras com múltiplas ramificações, formando padrão semelhante a raízes. 29.3 apresenta trinca em arco com conexões a outras menores. 29.4 mostra leve esbranquiçamento ao redor da fissura. 29.5 revela fissura com halo sutil, possível início de alteração alcalina. 29.6 apresenta fissuras em zigue-zague com padrão interligado. 29.7 exhibe rede de microfissuras finas e densas. 29.8 mostra fissura larga com borda clara e halo escuro em um dos lados. 29.9 apresenta duas fissuras retas que se cruzam em ângulo de aproximadamente 90°, com bordas bem preservadas. Ataque alcalino concentrado revelou rede de fissuras mais complexa e interconectada. Possível halo mineralógico em alguns pontos.

Figura 29-4º Quadrante, Quartzito Taj Mahal atacado com KOH 100 g/l (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm)



Fonte: Autora.

A seguir, a Tabela 11 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas no quarto quadrante do Taj Mahal, o qual foi atacado com KOH 100 g/L.

Tabela 11 – Descrição 4º quadrante Taj Mahal.

Amostra	Descrição Técnica
1	Fissura cruzada com interseção central, bem destacada
2	Fissura principal com ramificações múltiplas, padrão em “raiz”
3	Trinca em arco, fina, conectada a duas fissuras menores
4	Fissura com ramificações e leve esbranquiçamento periférico.
5	Fissura com leve halo ao redor, possível início de alteração alcalina.
6	Trinca em zigue-zague, padrão irregular, interconectada.
7	Rede de microfissuras formando malha fina. Aberturas <15 µm.
8	Fissura larga (~40 µm), com borda clara e halo escuro em um lado.
9	Cruzamento de duas fissuras retas, formando ângulo de ~90°. Borda Limpa.

Fonte: Autora.

Portanto, a seguir na Tabela 12, apresenta-se a síntese dos dados obtidos através da metodologia de macroanálise de fraturas desenvolvida pela autora a fim de compreender a origem dos processos de alteração nas rochas.

Tabela 12-Sínteses de dados da macroanálise de fissuras na Amostra 1 do Taj Mahal

Q	Reagente	Nº de Fissuras Visíveis	Tipo de Fissura	Orientação (estimada)	Abertura (µm)	Preenchimento	Conectividade	Alteração nas bordas	Interpretação
1	HCL3%	3-4 principais	Retas Ramificada	NS-0E	20-30 µm	Ausente	Pouca	Borda Nítida	Fissuras abertas, leves sinais de dissolução superficial.
2	HCL 18%	5-6 visíveis	Ramificadas	Irregular	20-50µm	Ausente	Algumas conectadas	Borda Suavizada	Ataque mais agressivo, evidência de corrosão em torno das fissuras
3	KOH30g/l	4-5	Curvas Subparalelas	N-S com irregularidades	20 µm	Oxidação Leve	Pouca	Borda Nítida	Fissuras mais discretas, sem alteração relevante
4	KOH100g/L	5-6 visíveis	Cruzada	N-S e E-W	20-40 µm	Sem preenchimento visível	Interconectada	Borda Levemente alterada	Fissuras bem marcadas e interligadas. Agente Alcalino acentuou a rede.

Fonte: Autora

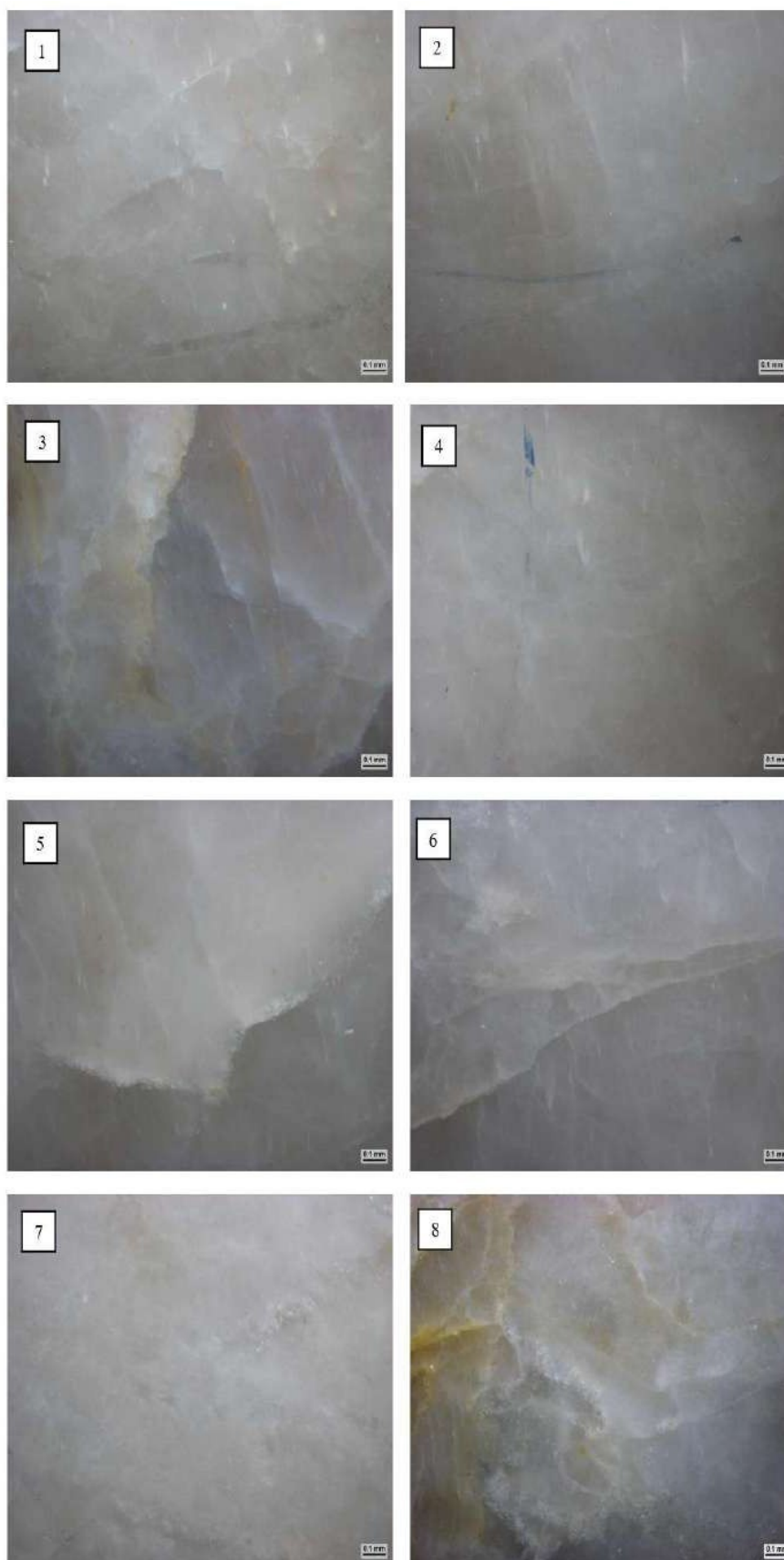
A seguir, a Tabela 13 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas no primeiro quadrante do Perla Santana, o qual foi atacado com HCL 18%.

Tabela 13 – Descrição técnica (1ª) quadrante Perla Santana.

Amostra	Descrição Técnica
1	Fissura retilínea, bem delimitada, abertura em torno de 20 $\mu\text{m}$
2	Microtrinca simples e fina, pouco destacada.
3	Fissura curva com leve inflexão no centro. Borda nítida.
4	Trinca curta com possível ramificação lateral.
5	Fissura central longa e fina, ligeiramente sinuosa.
6	Ausência de fissuras evidentes. Matriz preservada.
7	Fissura ramificada, com um dos ramos mais escuro, sugerindo início de alteração.
8	Microfissuras paralelas e isoladas, sem conexão.

Fonte: Autora.

Figura 30-1º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com Ácido Clorídrico 3% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).



A seguir, a Tabela 14 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas no segundo quadrante do Perla Santana, o qual foi atacado com HCL 18%. A concentração mais forte do ácido provocou dissolução evidente nas bordas de algumas fissuras, além de maior complexidade nas formas.

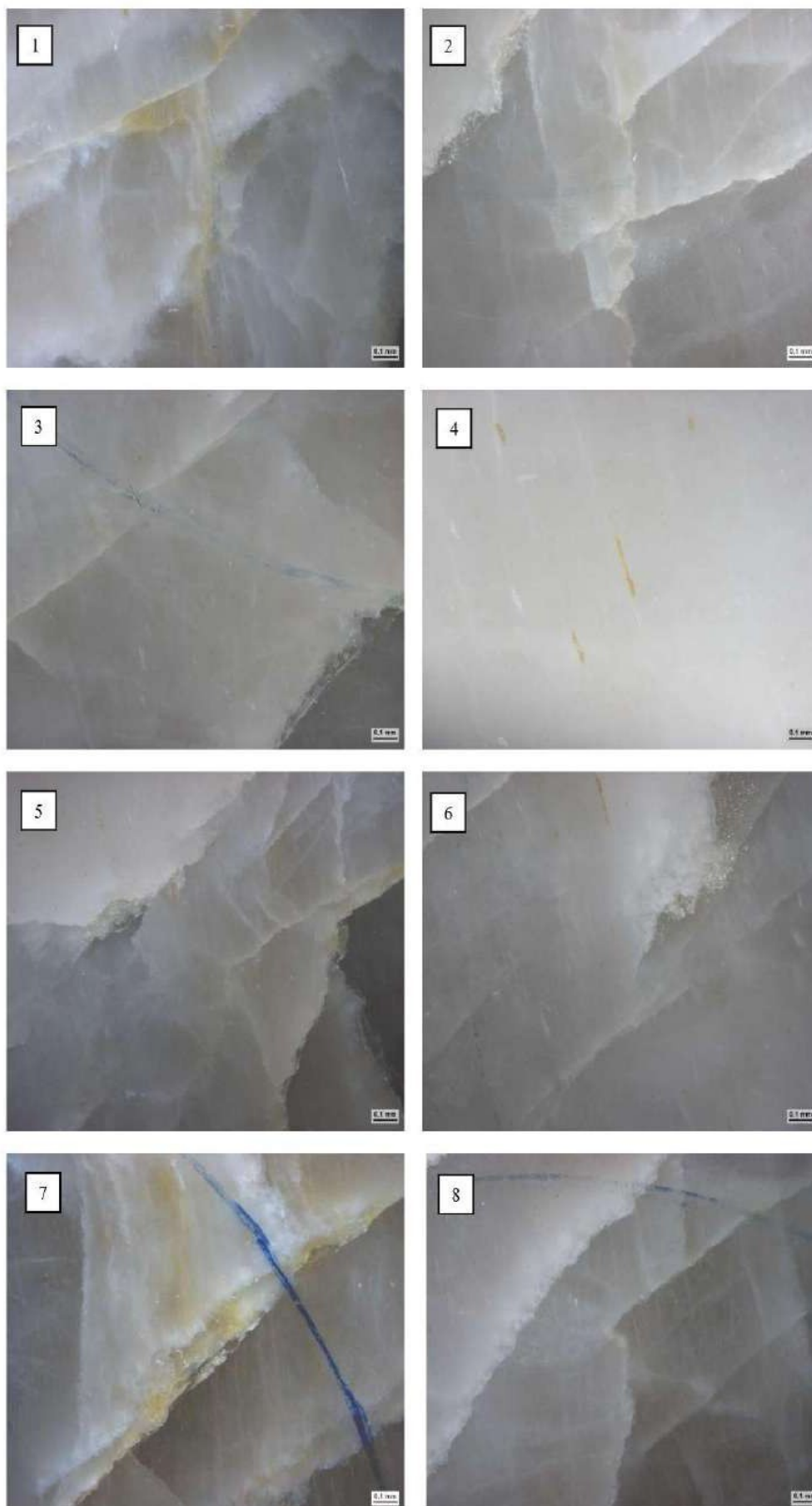
Tabela 14-Descrição técnica (2º quadrante) Perla Santana

Amostra	Descrição Técnica
1	Fissura ramificada com halo de dissolução discreto.
2	Fissura larga (~40 µm), borda suavizada, possível ataque químico ativo.
3	Trinca cruzada com orientação irregular. Leve esbranquiçamento.
4	Fissura central com duas bifurcações. Borda mais clara que o entorno.
5	Fissura múltipla, padrão de rede fina e conectada.
6	Trinca espessa, levemente curva, com possível zona de ataque preferencial.
7	Fissura irregular com perda de definição na borda. Sugere corrosão superficial.
8	Microfissuras muito finas, entrecruzadas. Textura fragilizada.

Fonte: Autora.

Como foi justificado na metodologia, apenas os quartzitos Perla Santana e Taj Mahal foram submetidos a análise experimental. De modo que a metodologia denominada “*macroanálise de fissuras*” buscou integrar o que denunciava a superfície das amostras com os resultados da microscopia eletrônica. Tendo em vista a ausência de “novidades” na mineralogia esperada de uma rocha como o quartzito. Buscou-se principalmente reconhecer os padrões de fissuramento e justificar suas incidências no contexto geral da rocha, (Figura 32)

Figura 31-2º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com Ácido Clorídrico 18% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm).



Fonte: Elaborada pela autora.

Em sequência, a Tabela 15 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas no terceiro quadrante do Perla Santana, o qual foi atacado com KOH 30 g/L. Ataque alcalino leve resultou em fissuras discretas, muitas vezes retas e isoladas. As bordas permanecem nítidas, sem halos de alteração.

Tabela 15 –Descrição técnica (3º quadrante) Perla Santana.

Imagem	Descrição Técnica
1	Fissura retilínea e isolada, orientação N-S. Abertura <20 µm.
2	Microtrinca única, quase imperceptível. Matriz pouco afetada.
3	Fissura simples com ligeira inflexão. Sem sinais de alteração química.
4	Fratura paralela à borda da imagem, reta e sem ramificações.
5	Trinca com ramificação leve à esquerda. Padrão frágil.
6	Fissura fina cruzando o campo em diagonal. Abertura uniforme.
7	Ausência de fissuras visíveis. Textura intacta.
8	Microfissuras paralelas, curtas e espaçadas. Sem conectividade.

Figura 32 -3º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com Ácido Clorídrico 18% (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1mm; largura de cada imagem=3,3cm).



Fonte: Elaborada pela autora.

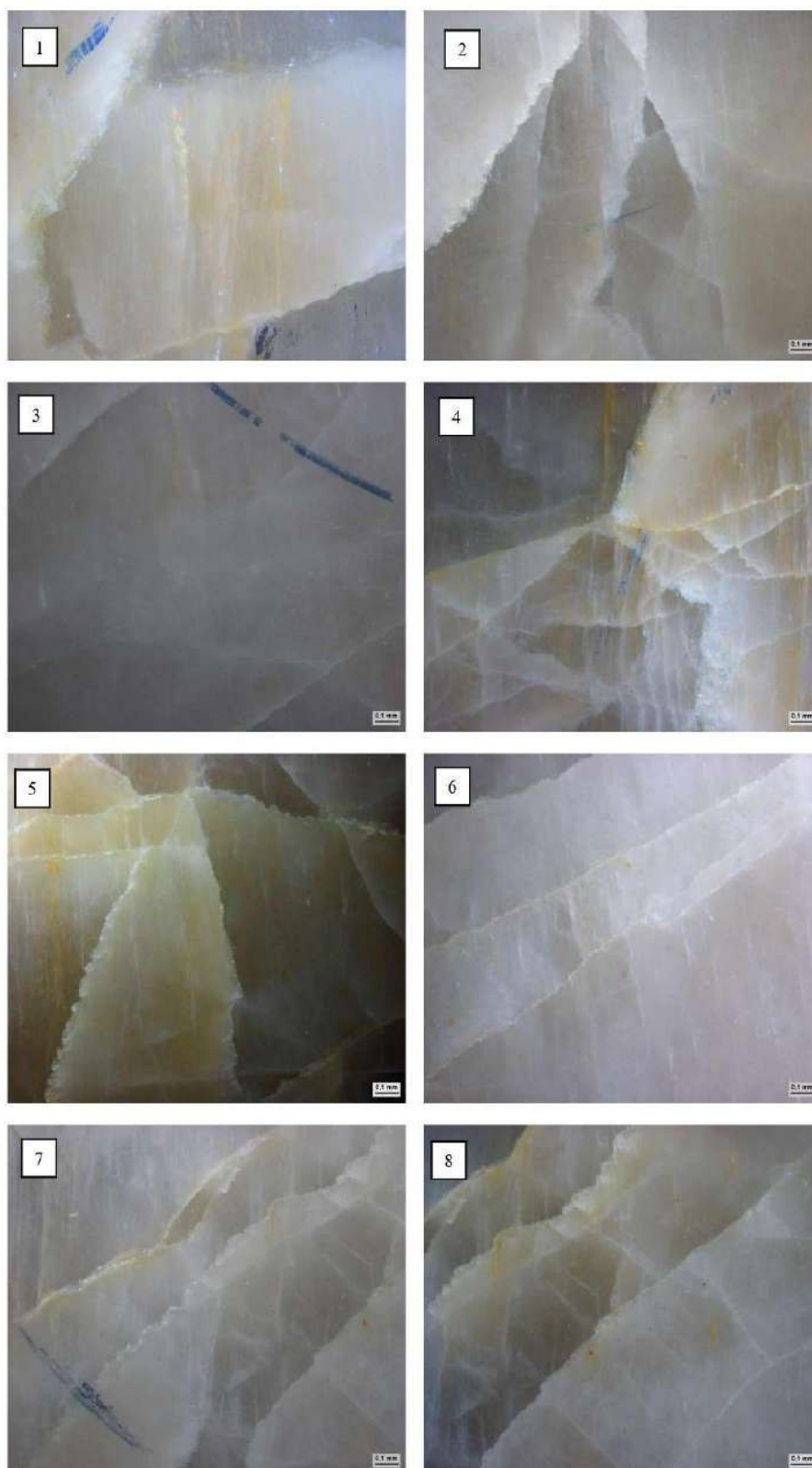
O ataque alcalino mais concentrado gerou maior abertura entre as fraturas, algumas interconectadas. Indícios visuais de leve alteração química em zonas específicas. Em comparação ao quartzito Taj Mahal o Perla Santana tem o grau de fraturamento menor. Em sequência, a Tabela 16 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas no quarto quadrante do Perla Santana, o qual foi atacado com KOH 100 g/L. Ataque alcalino leve resultou em fissuras discretas, muitas vezes retas e isoladas. As bordas permanecem nítidas, sem halos de alteração.

Tabela 16 – 4º Quadrante – Ataque com KOH 100 g/L Taj Mahal.

Imagem	Descrição Técnica
1	Trinca longa, reta e escura. Bordas levemente arredondadas.
2	Fissura com halo esbranquiçado sutil, possível alteração mineral.
3	Fissura ramificada, conectando três pontos do campo visual.
4	Trinca tortuosa e fina, com borda interna mais clara.
5	Fissura central com bifurcação tênue. Abertura entre 20–30 $\mu\text{m}$ .
6	Fissura cruzando o campo em diagonal, com espessura irregular.
7	Rede fina de microtrincas interligadas. Padrão de fraturamento tipo malha
8	Fissura densa e com leve escurecimento em uma borda. Indício de alteração alcalina.

Fonte: Autora.

Figura 33-4º Quadrante, Quartzito Perla Santana atacado com KOH 30 g/L (Escala: barra a esquerda das imagens = 0,1 mm; largura de cada imagem=3,3 cm)



Fonte: Autora.

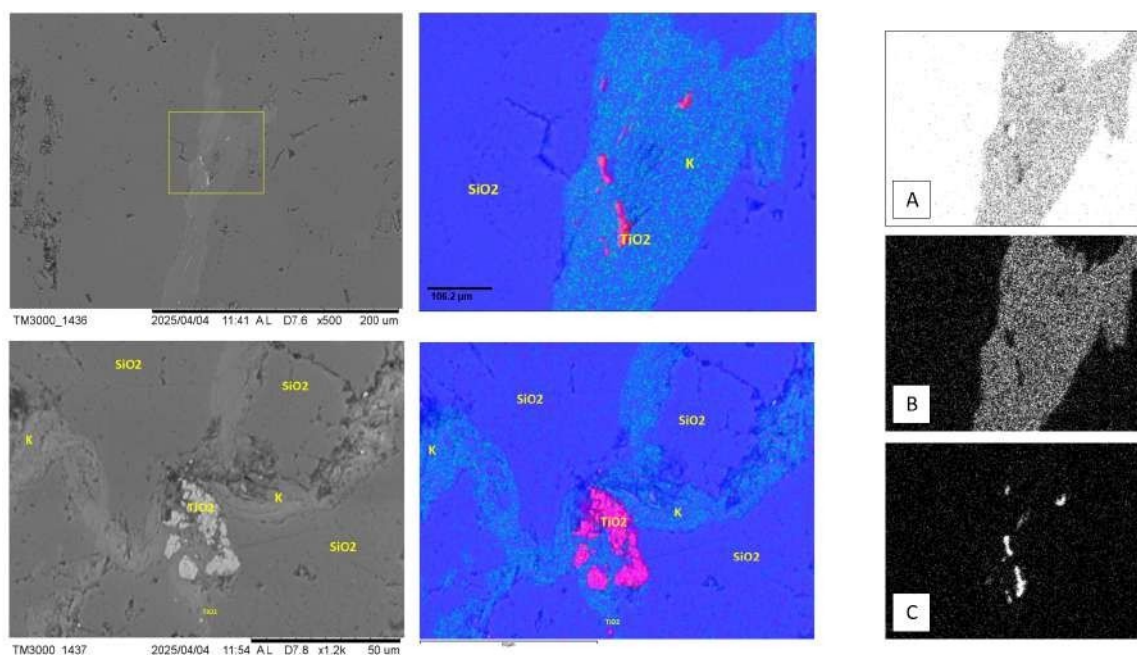
Tabela 17 – Sínteses de dados da macroanálise de fissuras na Amostra 1 do Perlla Santana.

	Reagente	Nº de fissuras visíveis	Tipo de Fissura	Orientação (estimada)	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Preenchimento	Conectividade	Alteração nas bordas	Interpretação
1	HCl 3%	5-6	Retas e curvas	Predominância N-S	0-30 $\mu\text{m}$	Ausente	Pouca	Borda preservada	Fissuras simples, discretas e estáveis. Padrão frágil com pouca alteração química.
2	HCl 18%	6-8	Cruzadas e Irregular	Ausente e ramificadas	até 40 $\mu\text{m}$	Ausente	Algumas interconectadas	Borda suavizada, com halos leves	Dissolução química evidente. Padrões de rede indicam zona de fragilidade.
3	KOH 30 g/L	4-5	Retas e isoladas	Variada, N-S e oblíquas	até 40 $\mu\text{m}$	Ausente	Baixa	Borda nítida	Pouco efeito químico. Fissuras discretas em matriz pouco afetada.
4	KOH 100 g/L	6-7	Ramificada e em redes	Cruzadas, irregulares	20-30 m	Ausente	Alta (rede visível)	Halos tênues e zonas claras	Fratramento mais denso. Indício de alteração por alcalinidade elevada.

Fonte: Autora.

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), associada à espectrometria de energia dispersiva (EDS), permitiu avaliar a microestrutura e a composição química pontual dos três quartzitos analisados. As imagens foram coletadas com diferentes aumentos e focalizadas em regiões de interesse, como fraturas, bordas de grãos e inclusões minerais. Na Figura 26, observa-se a presença de inclusões ricas em zircônio e silício, com formato arredondado e alto brilho em LE BSE. Tais feições são compatíveis com zircão e monazita, minerais acessórios típicos de protólitos pelíticos e resistentes à alteração..

Figura 34-Dados de Microscopia Eletrônica de Varredura. A-Potássio destacado (K); B-Titâneo destacado (TiO<sub>2</sub>); C-Silício destacado (SiO<sub>2</sub>).



Fonte: Elaborado pela Autora. Legenda: Project: New project Acc. Voltage: 15.0 kV / Resolution: 512 x 384 pixels / Viewed Resolution: 50% / Process Time: 5.

A presença dessas argilas é coerente com ambientes de alteração subtropical úmida e pode reduzir a durabilidade do material em aplicações externas. Sendo possível identificar fissuras intergranulares contínuas, com bordas limpas e evidência de preenchimento secundário, possivelmente por muscovita e caulinita, como sugerido pela composição química detectada nos espectros de LE BSE.

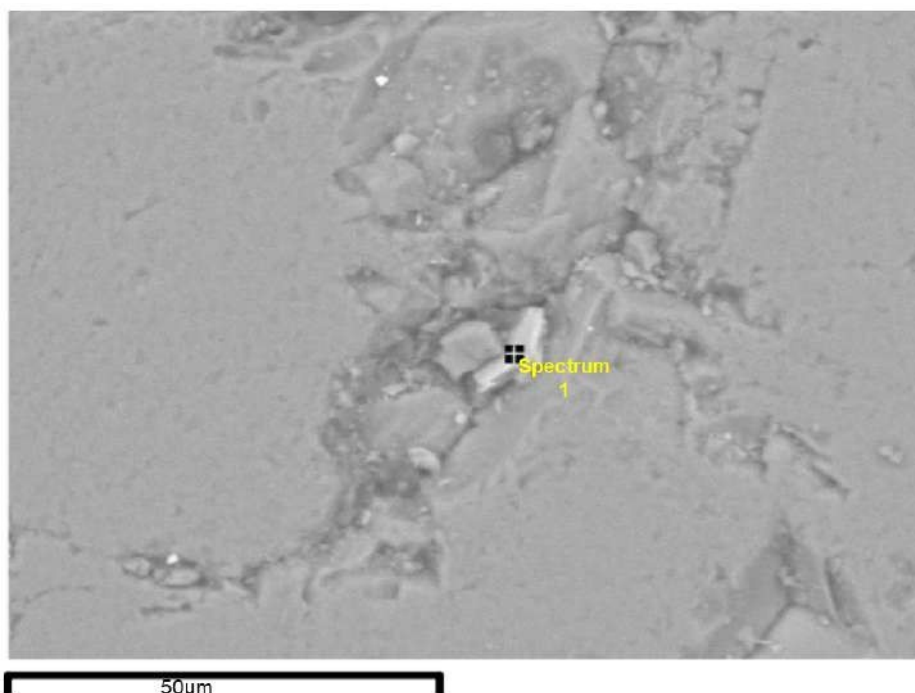
Tais estruturas favorecem a percolação de fluidos e a formação de eflorescências, como evidenciado nas bordas de fraturas da Figura 29, onde se observa halo claro indicativo de acúmulo salino. Essas evidências microtexturais corroboram os dados físicos e os resultados dos ensaios PUNDIT, reforçando a importância da integridade estrutural na resistência às alterações químicas. A Figura 27 revela uma rede de microfaturas interconectadas, com orientação preferencial, indicando fragilidade estrutural que pode ter origem em retração térmica ou esforços tectônicos.

#### 4.4 Análise Morfológica por MEV no Quartzito Cristallo Pink.

##### 4.4.1 Caverna preenchida com matriz quartzosa

A aplicação da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), associada à espectrometria de energia dispersiva (EDS), permitiu caracterizar a microestrutura e a composição química pontual do quartzito Cristallo Pink. As análises revelaram uma matriz predominantemente quartzo-alumino-silicática, além da presença de fases minerais acessórias, feições de alteração secundária e evidências de migração de fluidos. As imagens obtidas em alta resolução mostram regiões com cavidades, fraturas abertas, preenchimentos minerais e microtexturas associadas à circulação de soluções salinas, (Figura 35). As análises espectrais foram realizadas em diferentes pontos de interesse, e os resultados são descritos a seguir.

Figura 35-Caverna alongada preenchida com matriz predominante quartzosa.

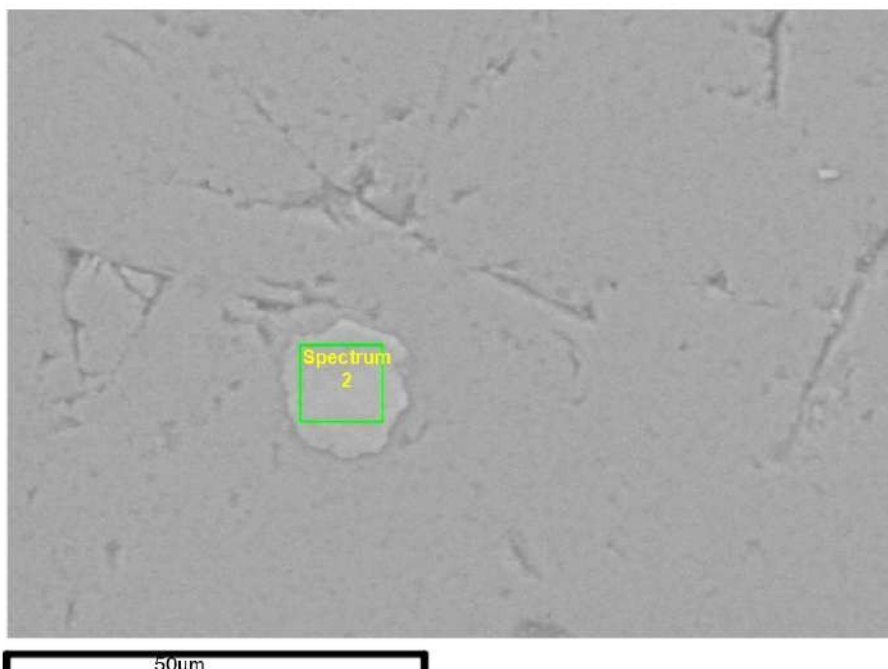


Fonte: Elaborada pela autora.

A imagem de maior resolução evidencia uma inclusão isolada, de brilho intenso no modo BSE, embutida em uma matriz composta predominantemente por quartzo. A morfologia da inclusão é subarredondada, com bordas bem definidas, e não há sinais visíveis de fratura ao seu redor. Essa feição é compatível com um mineral acessório denso, como monazita ou zircão, ambos comuns em rochas metassedimentares.

A ausência de fraturamento periférico indica que a inclusão é estável e está incorporada de forma relictiva à matriz, possivelmente como herança do protólito. A sua presença sugere um ambiente original com aporte químico rico em elementos incompatíveis, como fósforo, zircônio e terras raras (REE), o que é característico de sedimentos pelíticos ou grauvasas feldspáticas. A segunda micrografia (figura 36) mostra uma cavidade alongada e assimétrica, com bordas irregulares e sinais de preenchimento parcial por material de tonalidade intermediária. Esse preenchimento apresenta contraste eletrônico moderado, indicando densidade superior à do quartzo, mas inferior à de minerais opacos.

Figura 36-Cavidade alongada identificada na amostra de quartzito Cristalino Pink.

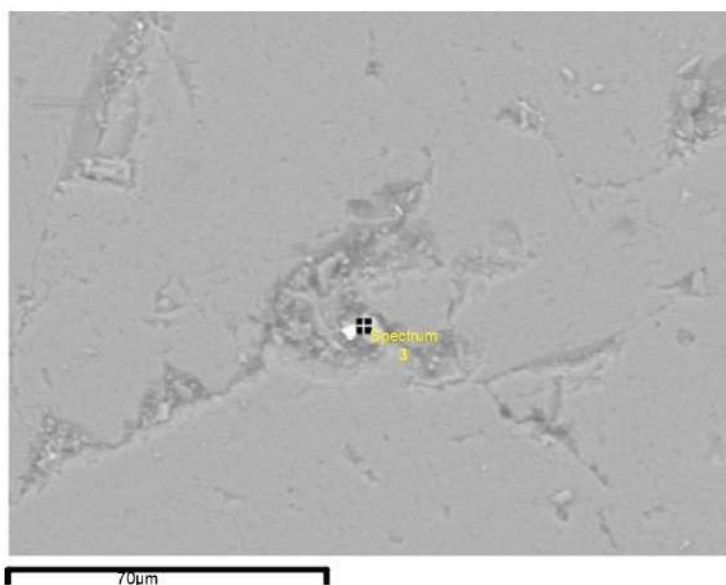


Fonte: Elaborado pela autora.

Essa feição pode ter origem em um processo de dissolução local ou retração térmica, que gerou espaços vazios posteriormente preenchidos por minerais secundários, possivelmente micas finas (como muscovita) ou argilas hidrotermalizadas, como a caulinita. A presença desse preenchimento secundário sugere a ocorrência de circulação interna de fluidos, que provocou reações mineralógicas locais, com implicações diretas na estabilidade química da rocha. Por fim a Figura 36 mostra uma fratura intergranular que atravessa múltiplos cristais, formando um traço contínuo e retilíneo.

As bordas da fratura apresentam leve aumento de contraste, sugerindo possível acúmulo ou recobrimento por material secundário precipitado ao longo do plano de ruptura. As fraturas preenchidas na figura 37 são estruturas típicas de fratura de relaxamento pós-diagenético ou de origem tectônica frágil, e sua presença indica que a rocha possui zonas de fragilidade estruturais, mesmo que sejam microscópicas.

Figura 37 -Zonas de fragilidade com sinais de relaxamento diagenético.



Fonte: Elaborado pela autora.

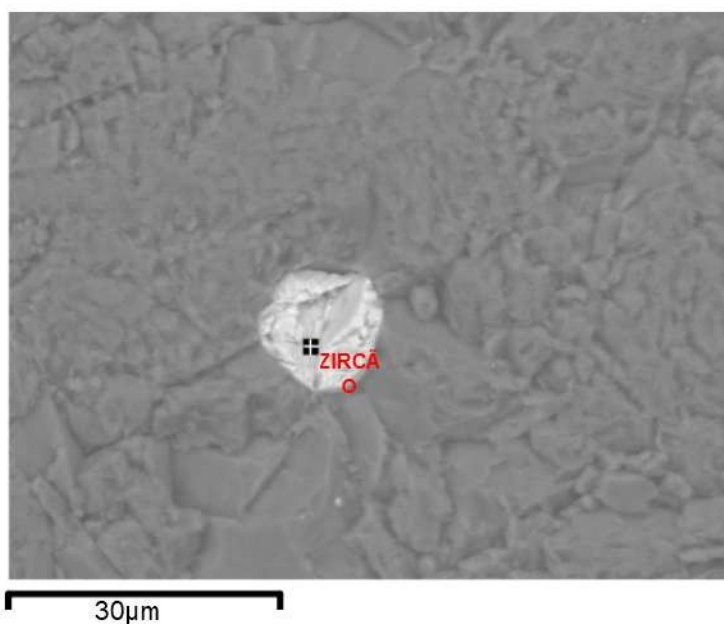
Visto que o preenchimento marginal da fratura pode corresponder a produtos de oxidação (como hematita ou goethita), sílica opalina ou até fases argilosas transportadas por fluido. Tais fraturas podem atuar como condutos para percolação de água, facilitando efeitos como eflorescência, descoloração ou fragilidade pontual, o que é particularmente importante na avaliação de desempenho do material em aplicações ornamentais ou de revestimento.

## 4.5 Análise Morfológica por MEV no Quartzito Taj Mahal.

### 4.5.1 Espectro A – Inclusão titanífera

A primeira análise espectral foi realizada sobre uma inclusão brilhante presente na matriz quartzosa. O espectro revelou a presença de elementos como titânio (Ti), silício (Si), oxigênio (O) e alumínio (Al), com predomínio de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) e dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ). Essa composição é típica de minerais titaníferos como rutilo ou ilmenita, frequentemente encontrados como minerais acessórios em quartzitos. A morfologia prismática e de alto-contraste na imagem BSE sugere origem detrital ou formação tardia por processos autigênicos, (Figura 38)

Figura 38-Inclusão brilhante de possível ilmenita ou rutilo.



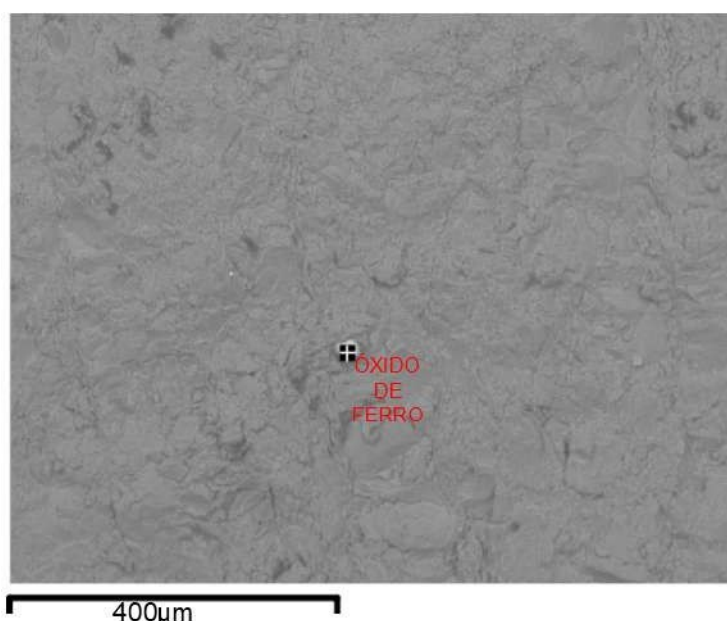
Fonte: Autora.

A segunda análise revelou uma composição rica em potássio (K), alumínio (Al), silício (Si) e oxigênio (O), com óxidos correspondentes a  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ . A distribuição lamelar e a orientação paralela entre as lâminas observadas na imagem indicam a presença de mica potássica, como muscovita ou sericita. Essa fase pode estar associada a zonas de recristalização ou alteração hidrotermal leve, presentes entre os grãos de quartzito ou preenchendo fraturas internas.

Por fim, uma região fraturada foi analisada e mostrou a presença significativa de ferro (Fe), silício (Si) e oxigênio (O).

A presença de óxidos de ferro, como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sugere processos de oxidação secundária decorrente da percolação de água meteórica. As manchas escuras observadas na imagem estão associadas à possível formação de hematita ou goethita, o que indica alteração incipiente e pode favorecer o aparecimento de colorações amareladas ou avermelhadas em superfícies expostas da rocha, (Figura 39).

Figura 39-Óxido de ferro identificado no Taj Mahal.



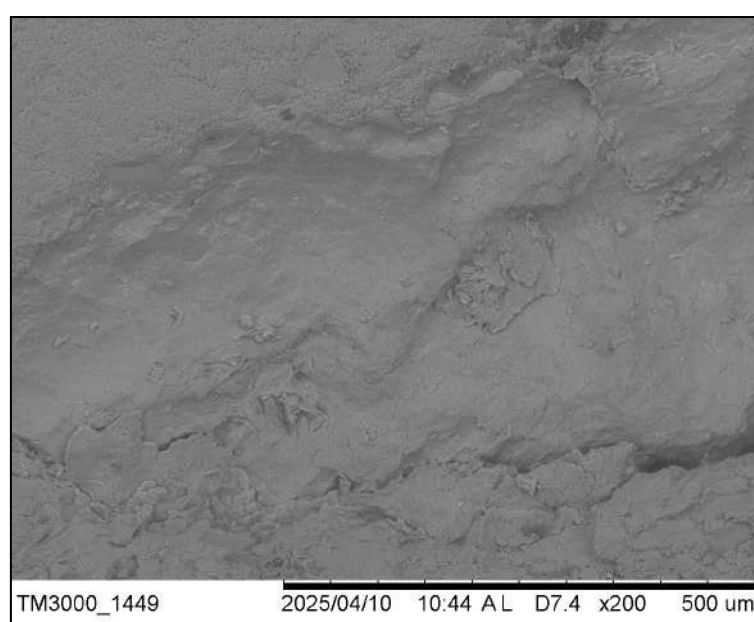
Fonte: Imagem MEV.

As imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiram observar detalhes microestruturais do quartzito Taj Mahal, com destaque para fraturas naturais interconectadas, inclusões densas de alta reflectância e evidências da presença de monazita, um mineral acessório importante de fosfato de terras raras. As análises foram realizadas em diferentes ampliações, revelando aspectos tanto pontuais quanto estruturais da rocha.

A identificação de monazita em duas formas distintas como inclusão primária e como precipitado secundário, o qual revela que o quartzito Taj Mahal possui potencial geoquímico diferenciado, com aporte de elementos raros e fósforos. Tais características são importantes não apenas para interpretação petrogenética, mas também para alertar sobre possíveis variações de cor e estabilidade química em áreas ornamentais onde a monazita sofre alteração (ex: oxidação, solubilização em ácidos fracos).

Uma cavidade superficial foi analisada e apresentou altos teores de cloro (Cl), sódio (Na) e potássio (K), elementos típicos de sais solúveis, além de oxigênio. Esses dados indicam a presença de eflorescência, resultante da migração de soluções salinas por capilaridade em microfraturas ou poros conectados, seguida de evaporação e precipitação na superfície da amostra. Essa feição compromete a estética da rocha e pode indicar susceptibilidade à ação da umidade (Figura 40).

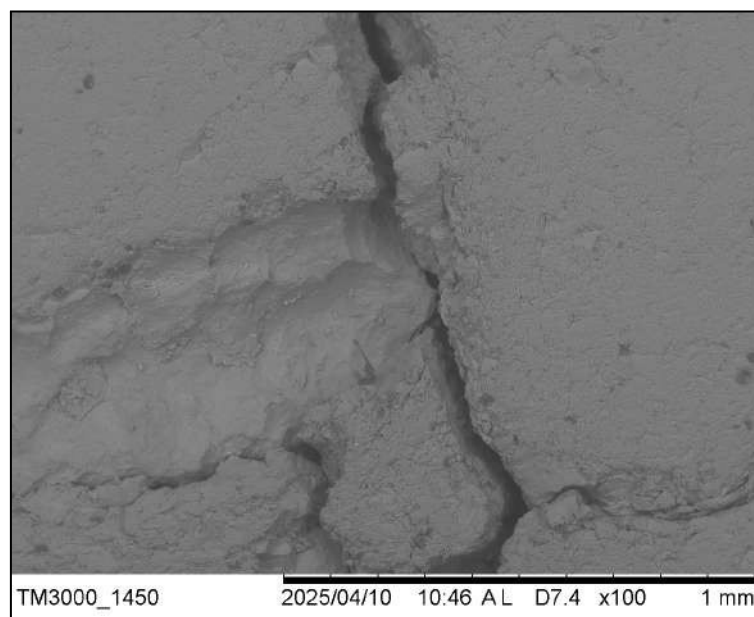
Figura 40-Cavidade com sais composta por cloro (Cl), sódio (Na) e potássio (K).



Fonte: Imagem MEV.

A composição da matriz principal foi analisada e revelou uma concentração quase exclusiva de silício (Si) e oxigênio (O), correspondendo a um teor elevado de  $\text{SiO}_2$ . Tal composição confirma a predominância de quartzo puro no Taj Mahal, característica responsável pela elevada resistência física e baixa reatividade química da rocha. Essa homogeneidade é desejável para aplicações ornamentais e estruturais, (Figura 41).

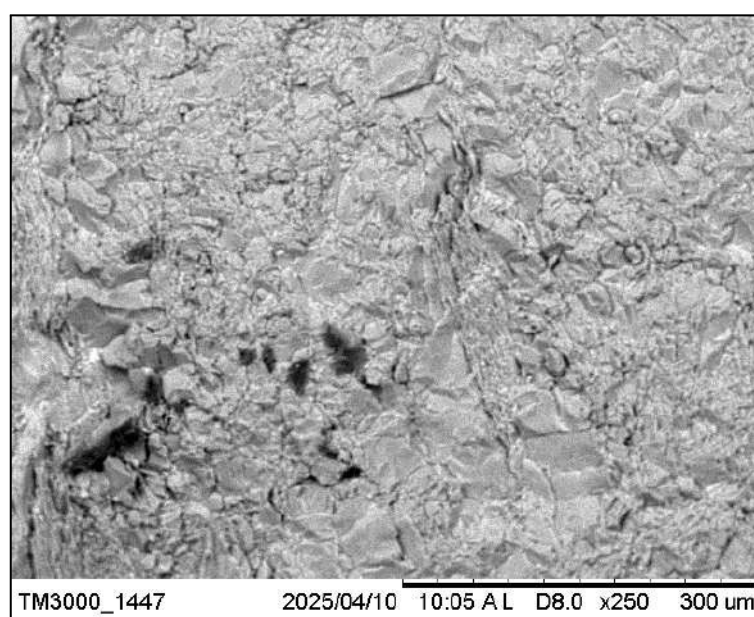
Figura 41-Fraturas na matriz quartzosa pura.



Fonte: Imagem MEV.

A micrografia na figura 36 revela uma fratura longitudinal estreita, com bordas nítidas e preenchimento parcial por materiais densos e brilhantes, compatíveis com minerais pesados. A disposição dessas inclusões ao longo da fratura sugere que funcionaram como precipitados secundários ou relictos mobilizados por fluidos durante eventos pós-diagenéticos, (Figura 42)

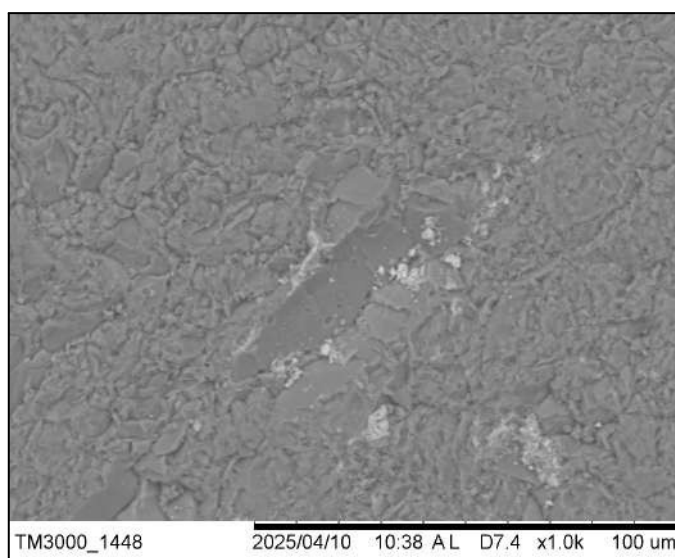
Figura 42-Fraturas parcialmente preenchidas com materiais densos e brilhantes.



Fonte: Imagem MEV.

A morfologia e o contraste eletrônico indicam a presença de monazita, frequentemente associada à cristalização tardia em ambientes metassedimentares enriquecidos em fósforo e elementos de terras raras. Essa ocorrência pode estar relacionada à circulação de fluidos minerais no sistema rochoso, uma vez que a monazita é típica de processos tardios de recristalização e tende a se formar em condições em que a mobilização de elementos químicos é favorecida, como se observa na figura 43.

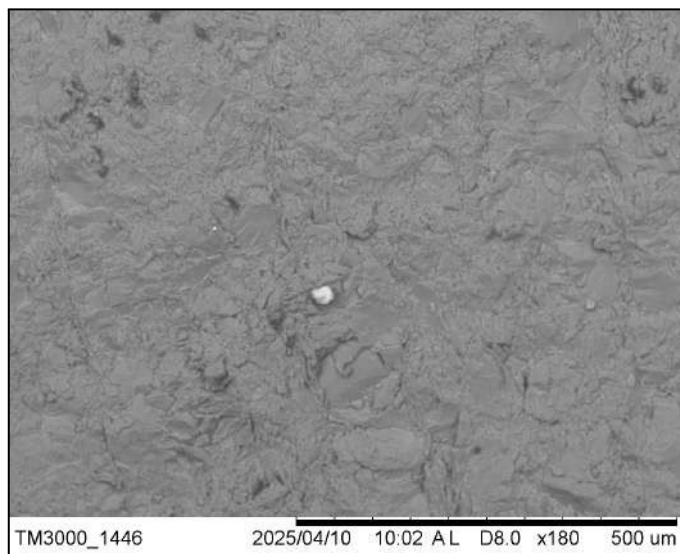
Figura 43-Indícios de monazita associada à cristalização tardia.



Fonte: Imagem MEV.

Inclusão densa na matriz quartzosa ( $180\times / 500 \mu\text{m}$ ). Nesta imagem de média ampliação, observa-se uma inclusão isolada de forma subesférica e brilho elevado em contraste com a matriz quartzosa. A inclusão se destaca em meio a uma textura compacta e levemente fraturada, e sua morfologia indica origem detrital preservada ou cristalização autigênica em fase precoce. A composição sugerida pela aparência e localização reforça a identificação como monazita, ou possivelmente zircão, ambos minerais acessórios comuns em protólitos pelíticos. A fratura periférica associada pode indicar recristalização local ou alteração física pós-formação, contribuindo para a heterogeneidade microestrutural do quartzito, (Figura 44).

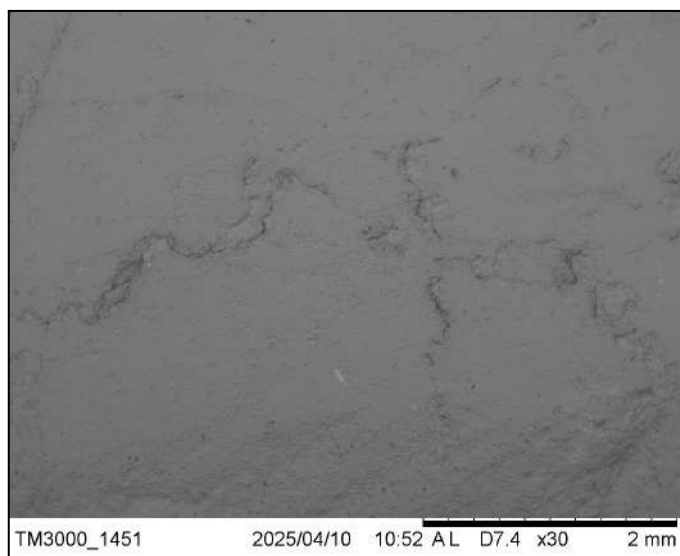
Figura 44-Fraturas periféricas associadas a recristalização local.



Fonte: Imagem MEV.

Rede de fraturas interconectadas (30×/2 mm) Em maior campo visual, esta imagem mostra uma rede complexa de fraturas milimétricas ramificadas e conectadas, com padrão irregular. Essa malha de fraturas reflete uma estrutura de fragilidade natural, provavelmente relacionada a esforços tectônicos regionais ou retração térmica durante o resfriamento. Tais fraturas podem atuar como vias preferenciais para percolação de água ou soluções salinas, favorecendo a ocorrência de processos como eflorescência, oxidação local e alteração mineral secundária. Essas feições são relevantes para a avaliação do desempenho do quartzito como rocha ornamental, sobretudo quanto à sua durabilidade física e estabilidade química em ambientes úmidos ou expostos, (Figura 45).

Figura 45-Fraturas interconectadas e ramificadas com indícios de oxidação local.

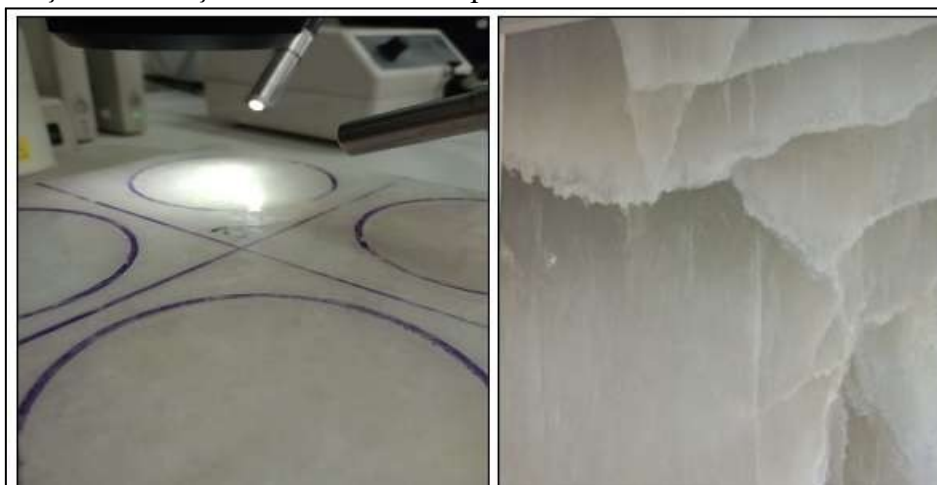


Fonte: Imagem MEV

#### 4.6 Análise de Fissuras Após o ensaio de Ataque Químico

A caracterização de fraturas abordou a variação textural nas imagens constatada pelos efeitos visíveis na superfície da placa polida, alvura e mudanças visíveis, incluindo clareamento, escurecimento e alterações nas tonalidades de vermelho, verde e amarelo. Foram capturadas as imagens digitais das amostras, através da lupa com lente de aumento e luz direcionada para a imagem, (Figura 46).

Figura 46-Observação e descrição das fraturas na superfície das amostras.



Fonte: Autora.

Com isso, foi possível observar em laboratório a ocorrência de fraturas e aspectos visuais preliminares, levando em consideração a possível ocorrência de desprendimento mineral, material pulverulento e a presença de buracos ou cavidades. As observações realizadas permitiram um entendimento detalhado das características texturais e estruturais das fraturas presentes nos quartzitos ornamentais estudados.

Dentre as amostras submetidas ao ataque químico foram selecionadas para realização da análise de fissuras as placas polidas que apresentaram maior alteração, sob ataque dos reagentes HCl e KOH. Por isso, os quartzitos Perla Santana e Taj Mahal foram submetidos a análise de fissuras após ataque químico. Enquanto isso, o quartzito Cristallo Pink não apresentou variações quantitativas relevantes que evidenciam a ação reagentes químicos Na tabela 18 a seguir foram sintetizados os critérios para que a metodologia aplicada auxilie na análise do fraturamento e possa ser replicada em experimentos futuros. Estes dados são importantes para interpretações da integridade física da rocha e a recuperação Conforme detalhado no item material e métodos a descrição das placas seguiu a sequência do mapeamento de ataque químico.

Tabela 18– Critérios adotados para a macroanálise das fissuras.

<b>Critério</b>	<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>
Número de Fissuras	1–2 (Poucas)	Quantidade observada em cada face analisada da amostra.
	3–5 (Moderadas)	
	>5 (Muitas)	
Tipo de Fissura	Reta	Classificação morfológica da forma da fratura.
	Curva	
	Ramificada	
	Cruzada	
	Subparalela	
Orientação estimada	N-S	Estimada com base no alinhamento geral das fissuras (Usando Lupa ou régua)
	NE-SW	
	NW-SE	
	Irregular	
Abertura	<10 $\mu\text{m}$ (Fina)	Estimada visualmente com escala ou ocular micrométrica.
	10–50 $\mu\text{m}$ (Média)	
	>50 $\mu\text{m}$ (Larga)	
Preenchimento	Ausente	Identificação visual de preenchimento mineral ou material alterado
	Óxidos de ferro	
	Quartzo	
	Argilominerais	
Conectividade	Isoladas	Grau de conexão entre as fissuras observadas
	Interconectadas	
	Cruzadas	
Estado da Borda	Nítida	Aparência das bordas: bem definidas, arredondadas ou com alteração química.
	Suavizada	
	Alterada	
Presença de alteração Mineral	Ausente	Sinais de alteração mineralógicas associadas às fissuras com mineral secundário.
	Associado às fissuras	
	Halo oxidado	

Fonte: Autora.

Os aspectos identificados foram registrados nas fichas de caracterização (Anexo 1), compiladas e resumidas na tabela x com destaque ao que pode ser comparado entre o estado inicial e o que foi ocasionado pelas simulações de ataque químico e manchamento. As amostras de mão foram observadas inicialmente com lupa de bancada e, posteriormente, (Aumentos 10 e 30x) com documentação por captura de imagem das fraturas mais representativas. Os registros foram

analisados individualmente e interpretados pela quantidade de fraturas, e suas demais características fundamentais: tipo, orientação, preenchimento e abertura aparente.

Com o objetivo de caracterizar as discontinuidades presentes na superfície das amostras, foi realizada uma análise visual detalhada das placas rochosas, observando aspectos como forma, orientação, abertura e continuidade das fraturas. A seguir, a Tabela 19 apresenta o descritivo técnico das principais feições observadas em cada amostra, permitindo uma avaliação técnica do estado estrutural das superfícies analisadas.

Tabela 19– Descritivo da macroanálise de fraturas superficiais das placas. (1º quadrante) Taj Mahal.

Amostra	Descrição Técnica
1	Fissura principal reta, bem definida, com bordas nítidas. Abertura estimada entre 20–30 $\mu\text{m}$ .
2	Fratura curta e isolada, subparalela à anterior. Sem sinais de alteração ou preenchimento.
3	Fissura com leve bifurcação na extremidade, abertura moderada, sem halo.
4	Duas fissuras delgadas, não conectadas, cruzando o campo de visão em ângulo de $\sim 45^\circ$ .
5	Fissura fina e sinuosa, aparente discontinuidade na porção central
6	Ausência de fraturas visíveis – matriz intacta. Pode servir de controle
7	Pequena fissura central, reta, pouco evidente.
8	Conjunto de microfraturas curtas, paralelas, com abertura $< 10 \mu\text{m}$ .
9	Fissura ramificada em “Y”, com bom contraste. Sem preenchimento aparente.

Fonte: Elaborado pela autora.

Conclui-se que o ataque com ácido leve revelou fissuras retas e bem definidas, não persistentes a ponto de gerar discontinuidades relevantes na estrutura predominantemente frágil, apresentando baixa alteração ao redor das bordas.

Considerando que a fragilidade observada não está diretamente relacionada à mineralogia, mas sim à quantidade de fraturas, é possível compreender que quanto maior o número de discontinuidades, maior a tendência à alterabilidade. Dessa forma, mesmo uma rocha frágil pode apresentar melhor desempenho frente aos processos de alteração caso suas fraturas não estejam desenvolvidas.

Em contrapartida, quando a rocha apresenta elevada densidade de fissuras, o potencial de sofrer processos de alteração é significativamente maior, havendo, conseqüentemente, menores chances de recuperação. Certo que os ácidos apesar de serem reagentes agressivos não modificaram a estrutura das rochas ou criaram novas fraturas, mas atacaram e reagiram com os

minerais já alterados (muscovita, caulinita) que as preenchiam. Deixando-as mais suscetíveis a novas alterabilidades.

#### 4.7 Ensaio de propagação de velocidade das ondas(Ultrassom).

O ensaio ultrassónico avalia a integridade através da análise da velocidade de propagação de ondas longitudinais, enquanto a pacometria utiliza a indução eletromagnética para detectar a localização, cobrimento e diâmetro. Foi realizado por meio do equipamento Pundit 2000, teve como objetivo avaliar a integridade estrutural das amostras de quartzito a partir da análise da velocidade de propagação de ondas longitudinais ultrassónicas nos três eixos principais de cada quartzito.

Valores mais altos de velocidade indicam estrutura interna mais densa, coesa e com menor incidência de descontinuidades, enquanto valores reduzidos sugerem maior porosidade, presença de microfissuras ou heterogeneidade mineralógica. Os resultados numéricos consolidados estão apresentados na Tabela 19, que sintetiza os valores médios de velocidade para cada amostra e eixo testado, garantindo repetibilidade e comparabilidade dos dados obtidos. Observa-se na Tabela 20 a distribuição dos pontos de medição em cada eixo dos corpos de prova (A, B e C).

Tabela 20– Medidas obtidas no ensaio de ultrassom ( Taj Mahal).

	TAJ MAHAL					
	Eixo A (30 cm)		Eixo B 22cm		Eixo C 14,1 cm	
Medida	m/s	y/ $\mu$	m/s	y/ $\mu$	m/s	y/ $\mu$
<b>1</b>	58,1	58,55	57,89	38	56,18	25,1
<b>2</b>	49,75	60,7	57,74	38,1	56,18	25,1
<b>3</b>	51,46	58,2	45,36	48,6	53,82	26,1
<b>4</b>	48,86	61,3	61,62	35,7	58,51	24,1
<b>5</b>	48,31	62,1	61,28	35,6	55,95	25,2
<b>6</b>	49,5	70,8	58,82	37,7	54,86	25,7
<b>7</b>	52,02	57,5	57,44	38,1	56,63	24,9
<b>8</b>	50	60	61,28	35,9	56,18	25,1
<b>9</b>	50,34	59,6	61,97	35,5	54,65	25,8
<b>10</b>	52,4	61,4	61,11	36	56,18	25,2
<b>Média</b>	51,07	61,01	58,45	37,92	55,91	25,23

Fonte: Autora.

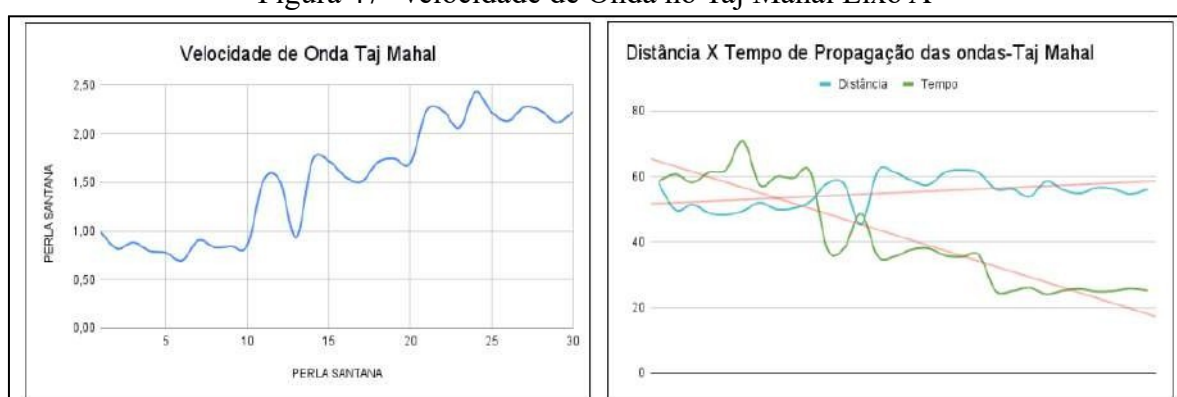
No caso do quartzito Taj Mahal, as velocidades médias registradas foram de 51,07 m/s no eixo A, 58,45 m/s no eixo B e 55,91 m/s no eixo C.

A variação observada entre os eixos, ilustrada nas figuras 47 a 48, sugere a

existência de zonas preferenciais de fraturamento ou veios mineralógicos com comportamento anisotrópico.

Apesar da boa densidade aparente obtida nos ensaios de índices físicos, resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Indicam uma estrutura interna relativamente heterogênea. A relação da distância x tempo de propagação das ondas entre os três eixos do quartzito Taj Mahal somados, totalizando aproximadamente 61 cm. O gráfico mostra que durante os picos de velocidade ocorre um caminho “livre” para propagação das ondas ultrassônicas no interior da rocha.

Figura 47- Velocidade de Onda no Taj Mahal Eixo A



Fonte: Elaborado pela autora.

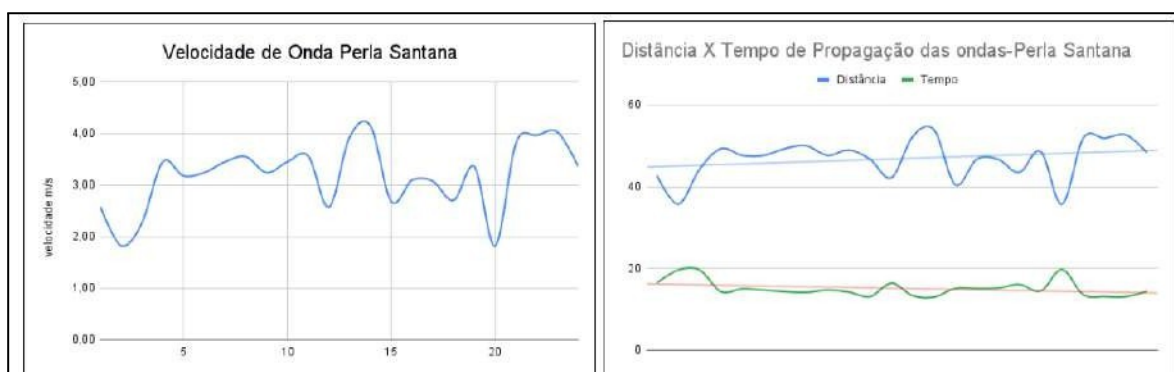
Para o quartzito Perla Santana, os valores médios da velocidade de propagação de ondas ficaram em 45,99 m/s no eixo A e 47,31 m/s no eixo B, conforme demonstrado na tabela a seguir, (Tabela 21).

**Tabela 21 –Medidas obtidas no ensaio de ultrassom ( Perla Santana)**

	PERLA SANTANA			
	Eixo A (10-cm)		Eixo B (10 cm)	
Medida	m/s	y/ $\mu$	m/s	y/ $\mu$
1	42,68	16,5	52,24	13,3
2	35,71	19,6	53,85	13
3	44,3	19,6	40,46	15,1
4	49,3	14,3	46,67	15,1
5	47,62	15	46,67	15,2
6	47,61	14,7	43,48	16,1
7	49,3	14,3	48,61	14,5
8	50	14,1	35,71	19,7
9	47,62	14,7	51,85	13,6
10	48,95	14,2	51,85	13,1
11	46,67	13,1	52,65	13,1
12	42,17	16,4	48,28	14,4
<b>Média</b>	<b>45,99</b>	<b>15,21</b>	<b>47,31</b>	<b>14,98</b>

Fonte:Autora.

Figura 48- Velocidade da onda propagada no quartzito Perla Santana.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esses valores são consistentemente inferiores aos das demais amostras, refletindo maior grau de descontinuidade interna. Esses dados estão em concordância com os resultados de absorção e porosidade anteriormente discutidos, nos quais o Perla Santana apresentou os maiores índices. O quartzito Cristallo Pink destacou-se com os melhores resultados no ensaio ultrassônico, com velocidades médias de 50,02 m/s (amostra 1) e 54,60 m/s (amostra 2), como ilustrado nas Figuras 48 e 49.

Esses dados indicam boa integridade interna e homogeneidade estrutural, corroborando sua menor suscetibilidade a alterações físico-químicas nos ensaios de brilho e colorimetria. O ensaio de propagação de ondas longitudinais ultrassônicas, também conhecido como ensaio ultrassônico, e a pacometria são métodos de ensaios não destrutivos utilizados na avaliação de estruturas de concreto.

Tabela 22 –Resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Cristallo Pink).

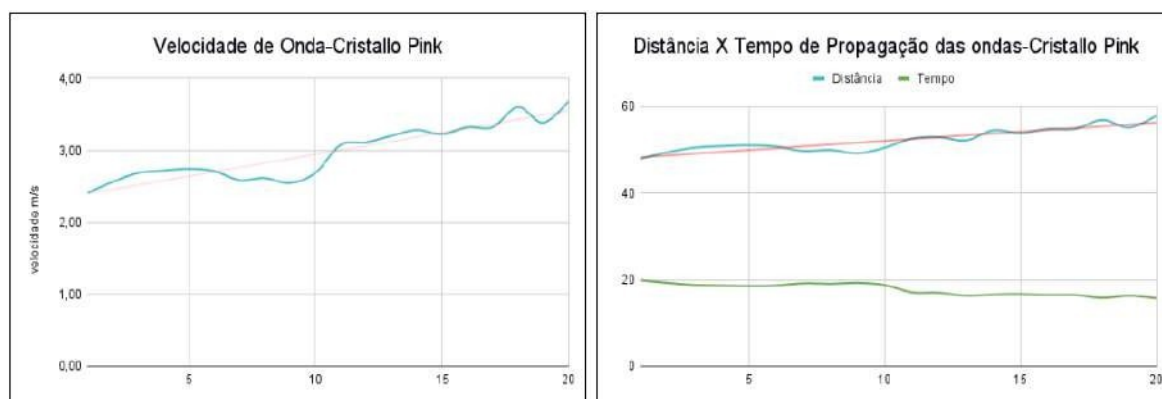
Medida	CRISTALLO PINK			
	Amostra 1 (0,90m)		Amostra 2(0,09mm)	
	m/s	y/ $\mu$	m/s	y/ $\mu$
1	47,96	19,9	52,63	17,1
2	49,46	19,3	52,94	17
3	50,53	18,8	52,21	16,3
4	50,89	18,7	54,55	16,6
5	51,08	18,6	53,89	16,7
6	50,80	18,7	54,87	16,5
7	49,74	19,2	54,88	16,5
8	50,00	19,1	56,96	15,8
9	49,22	19,3	55,21	16,3

<b>10</b>	50,53	18,8	57,92	15,7
<b>MÉDIA</b>	50,02	19,05	54,60	16,45

Fonte: Elaborado pela autora.

O ensaio ultrassônico avalia a integridade do concreto através da análise da velocidade de propagação de ondas longitudinais, enquanto a pacometria utiliza a indução eletromagnética para detectar a localização, cobrimento e diâmetro das barras de aço (armaduras), (Figura 49)

Figura 49-Velocidade da onda propagada no quartzito Cristallo Pink.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os gráficos apresentados para o quartzito Cristallo Pink evidenciam importantes aspectos relacionados à propagação das ondas mecânicas no material. Na figura 50.1, observa-se uma tendência crescente da velocidade de onda ao longo do corpo de prova, partindo de aproximadamente 2,3 m/s até alcançar cerca de 4,0 m/s. Esse comportamento indica um possível aumento da densidade ou compactação interna do material, além de sugerir uma redução progressiva na presença de fraturas ou porosidade.

A oscilação suave da curva sugere a existência de pequenas variações internas, possivelmente causadas por microdefeitos ou diferenças mineralógicas locais, mas sem indícios de falhas estruturais significativas. Na figura 50.2 que relaciona a distância com o tempo de propagação das ondas, é possível observar que ambas as curvas (distância e tempo) acompanham-se de forma regular, o que demonstra uma boa continuidade estrutural do material. A linha correspondente à velocidade apresenta leve oscilação decrescente, o que pode estar relacionado à dissipação de energia ao longo do percurso, causada por zonas pontuais de maior porosidade ou menor coesão.

De forma geral, os dados indicam que o quartzito Crisallo Pink apresenta comportamento mecânico contínuo e previsível, com predominância de uma estrutura coesa e compacta, embora apresente heterogeneidades internas que merecem atenção. Tais características reforçam a importância da caracterização física detalhada para garantir sua aplicação segura em projetos que exijam resistência e durabilidade, especialmente nas áreas de revestimento e estrutura ornamental.

A análise comparativa dos dados obtidos permite afirmar que há correlação direta entre a integridade estrutural interna, avaliada por meio do PUNDIT, e o desempenho estético e físico das rochas após exposição a agentes químicos. Assim, os dados de se mostram fundamentais para prever a durabilidade dos materiais e orientar a escolha e especificação técnica dos quartzitos ornamentais em aplicações comerciais.

#### 4.8 Análise de brilho superficial

A relação entre o brilho das amostras em estado natural e a perda após serem submetidas ao ataque foram organizadas com valores médios iniciais e finais de brilho para os três quartzitos de acordo com cada reagente aplicado e estão relacionados na tabela 23.

Tabela 23- Dados de brilho superficial do quartzito Perla Santana antes e após o ataque químico com 10 reagentes de acordo com a NBR 16596 (ABNT, 2017) .

<b>PERLA SANTANA</b>			
<b>Reagente</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Perda de brilho</b>
HCL 30%	64,1	66,1	2,33%
HCL 18%	65,2	60,8	6,62%
KOH 30g/L	71,7	56,9	7,32%
KOH 100g/L	76,4	62,5	18,30%
ÁGUA DESTILADA	74	74	0,00%
NH4CL 100g/L	72,6	76,15	4,67%
HIPOCLORITO	71,25	66,27	0,84%
ÁCIDO CÍTRICO	76,14	68,14	7,62%
ÁCIDO LÁTICO	75,2	58,78	22,97%
ÁCIDO ACÉTICO	66,84	69,42	4,50%

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 24- Dados de brilho superficial do quartzito Crisallo Pink antes e após o ataque químico com 10 reagentes de acordo com a NBR 16596 (ABNT, 2017) .

<b>CRISTALLO PINK</b>			
<b>Reagente</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Perda de brilho</b>
HCL 30%	74,57	53,52	0,72%
HCL 18%	71,97	54,37	8,57%
KOH 30g/L	74,05	56,79	5,41%
KOH 100g/L	68,18	49,71	26,96%
ÁGUA DESTILADA	70,4	69,8	0,85%
NH4CL 100g/L	75,89	77,11	1,72%
HIPOCLORITO	80,27	69,9	0,42%
ÁCIDO CÍTRICO	69,67	67,52	4,83%
ÁCIDO LÁTICO	77,5	73,54	6,45
ÁCIDO ACÉTICO	73,44	71,13	3,34

Fonte: Elaborado pela autora.

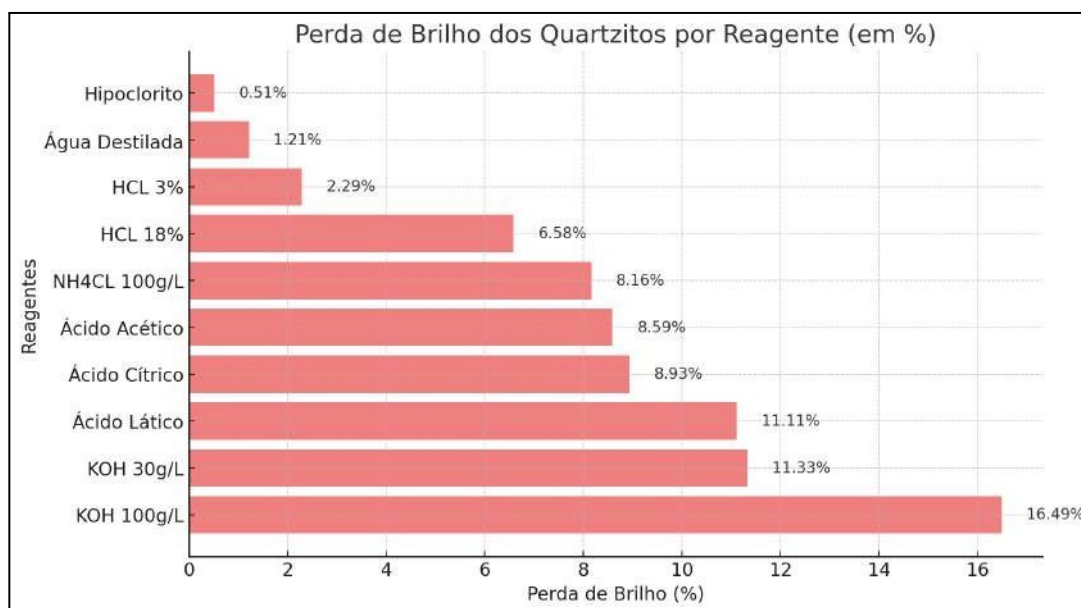
Tabela 25- Dados de brilho superficial do quartzito Taj Mahal antes e após o ataque químico com 10 reagentes de acordo com a NBR 16596 (ABNT, 2017) .

<b>TAJ MAHAL</b>			
<b>Reagente</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Perda de brilho</b>
HCL 30%	79,42	76,34	3,82%
HCL 18%	66,02	69,66	4,55%
KOH 30g/L	76,24	59,88	21,25%
KOH 100g/L	72,99	75,91	4,22%
ÁGUA DESTILADA	81,82	81	2,78%
NH4CL 100g/L	83,58	68,57	18,10%
HIPOCLORITO	81,98	71,06	0,27%
ÁCIDO CÍTRICO	72,64	76,98	14,35
ÁCIDO LÁTICO	80,75	85,29	3,90
ÁCIDO ACÉTICO	87,23	71,33	17,92

Fonte: Elaborado pela autora.

As alterações no brilho ocasionadas pelos ácidos mais fortes demonstraram uma perda significativa de brilho na superfície das amostras, em média, em relação ao seu estado natural como pode ser visto na figura 50. O agente mais agressivo foi o KOH, em comum às três variedades analisadas, como mostra o gráfico em porcentagem a variação negativa de brilho, ou seja a perda provocada por cada reagente durante a análise.

Figura 50- Variação média da perda de brilho (dos três quartzitos) no ataque químico.



Fonte: Autora.

Com menor ação o hipoclorito de sódio alterou em apenas 0,51%, por outro lado a Água Destilada apresentou um valor de 1,21% de perda de brilho em decorrência das fraturas do quartzito Taj Mahal. Em seguida o HCl 3% com ação de 2,29% de perda de brilho e logo em seguida o mesmo reagente HCl com concentração de 18% teve uma performance de 6,58% na de perda de brilho, já o Cloreto de Amônio (NH<sub>4</sub>Cl) 100g/L com 8,16%.

Por sua vez, os ácidos mais agressivos são o Acético 8,59%, o Cítrico 8,93% e o Lático 11,11% de perda de brilho. Os reagentes que apresentaram maior potencial deletério de brilho foram o Hidróxido de potássio em duas concentrações: KOH 30g/L (11,33%) e KOH 100g/L (16,49%).

No caso do quartzito Perla Santana, apesar da grande resistência proporcionada pela resina, ainda sim, houveram alterações de brilho superficial medido após ataque químico. Contudo, em comparação aos demais, demonstrou uma resistência satisfatória quanto a maioria dos reagentes químicos. Como previsto, as perdas visíveis de brilho foram imperceptíveis a olho nu, observadas somente pela variação de brilho nas medições realizadas com o aparelho GlossMeter.

Foram identificadas as alterações e aplicados os produtos limpantes para a testar o grau de remediação que se pode atingir. As manchas provocadas pelos ácidos menos agressivos foram remediadas com cinco agentes limpantes: Bicarbonato de sódio, HCl a 13% e uma mistura de água morna com detergente e saponáceo. As manchas causadas pelos manchantes oleosos, ficaram apenas superficialmente nas placas foram facilmente removidas, no entanto, para as manchas mais persistentes foram necessários novos ciclos de limpeza.

Utilizando limpantes mais fortes (Ácido cítrico, Saponáceo e Suco de limão). Ademais todas foram removidas, exceto as duas concentrações de KOH que provocaram manchas visíveis a olho nu com alteração não removível.

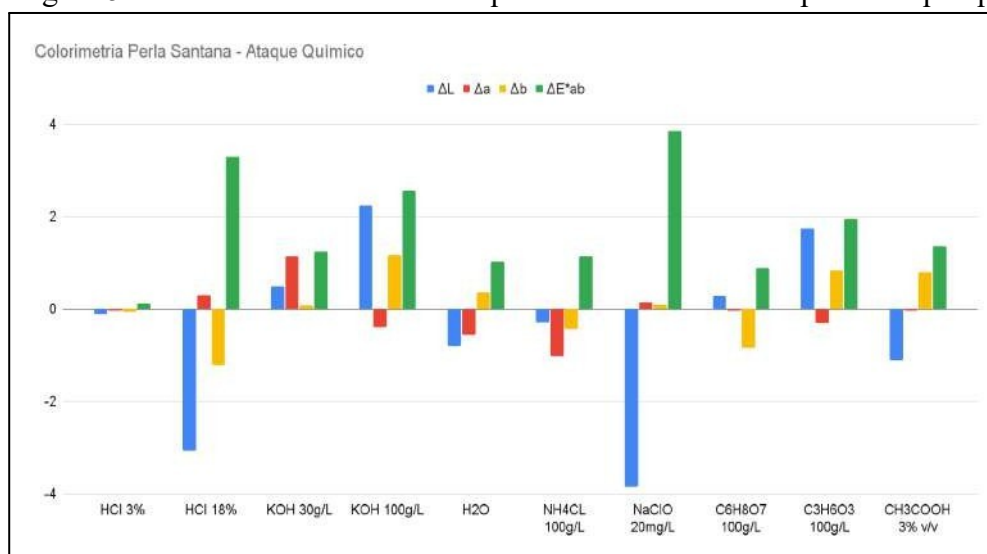
#### 4.9 Análise de Colorimetria

O ensaio de colorimetria foi aplicado para mensurar variações perceptíveis e não perceptíveis de cor após o ataque químico e após o manchamento, com diferentes reagentes. As variáveis  $\Delta L$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  e  $\Delta E$  foram determinadas conforme o sistema CIELAB, com base em 10 pontos de medição em quadrantes fixos das amostras. Nas figuras 36, 37 e 38 apresentam os dados de colorimetria dos três tipos de quartzitos (Perla Santana, Cristalino Pink e Taj Mahal) após serem submetidos ao ataque químico.

A Figura 51 apresenta os dados do quartzito Perla Santana, evidenciando que a maior alteração ocorre na variável  $\Delta E$ , com impacto significativo na percepção visual da cor após o ataque químico. Reagentes como NaClO 20g/L e HCl 18% causaram redução de até 4% na luminosidade ( $\Delta L$ ), enquanto o KOH promoveu aumento da luminosidade em 2,5%.

No caso do quartzito Perla Santana, observa-se que a maior variação ocorre em  $\Delta E$ , indicando uma mudança significativa na percepção global de cor após o ataque químico. O  $\Delta L$  apresenta alterações relevantes em algumas condições, sugerindo mudanças na luminosidade, enquanto as variações de  $\Delta a$  e  $\Delta b$  são menores, menos impactantes (Figura. 51).

Figura 51-Dados de colorimetria do quartzito Perla Santana após o ataque químico.



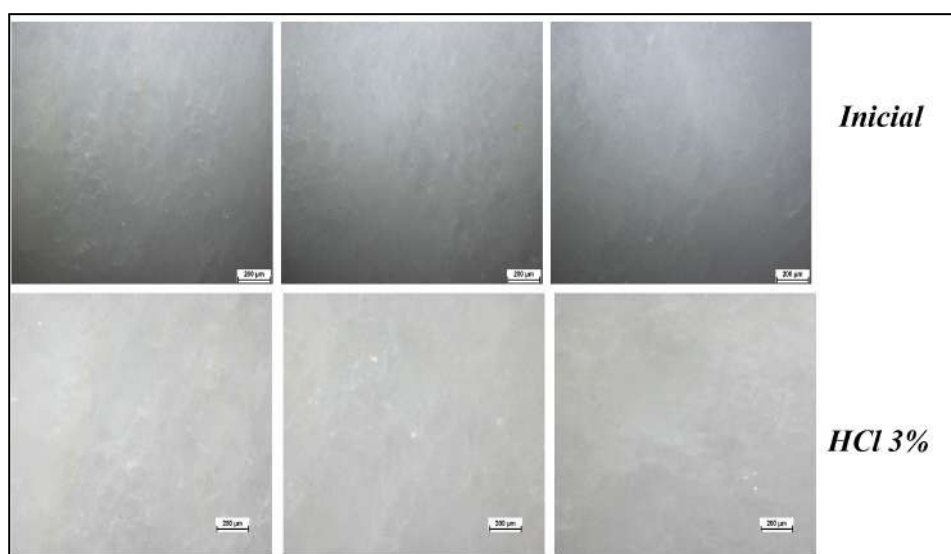
Fonte: Autora.

As barras do gráfico na cor verde ( $\Delta E^*ab$ ) demonstram a relação matemática entre os resultados da análise de cor e luminosidade após ataque químico. Com o tratamento dos dados foi possível modelar as variações entre as cores e a luminosidade.

Alguns reagentes diminuem a luminosidade das placas como o NaClO 20g/ml com redução de 4%, HCL na concentração de 18% reduziu em torno de 3% e o Ácido acético por sua vez com uma redução de 2%. Em contrapartida, os que aumentaram a luminosidade percebida nas placas como o KOH 30g/L aumentou 2,5% e em seguida o ácido láctico reduziu aproximadamente 1,8% como pode ser observado na.

Na Figura 52 observa-se que o quartzito Crisallo Pink teve como principal impacto a perda de luminosidade ( $\Delta L$ ), com redução de até 8% após o ataque com HCl a 3%. A Figura 19 ilustra a comparação visual antes e depois do ataque, demonstrando clareamento superficial perceptível, mesmo na ausência de desprendimento mineral.

Figura 52- Quartzito Crisallo Pink antes e após ataque químico com HCl a 3%.



Fonte: Autora.

Para o quartzito Crisallo Pink, o  $\Delta L$  se destaca como o principal indicador de alteração, com mudanças perceptíveis na luminosidade. Chegando até 8% sendo componente mais afetado, indicando que a modificação na luminosidade é o principal impacto visual correlacionado em  $\Delta a$  e  $\Delta b$  mostram as alterações nos intervalos de cor (azul-vermelho e amarelo-verde) nas colunas do  $\Delta E^*ab$ . Nas imagens do quartzito Crisallo Pink (Figura 52) pode-se observar as sequências que mostram a comparação antes e após ataque químico.

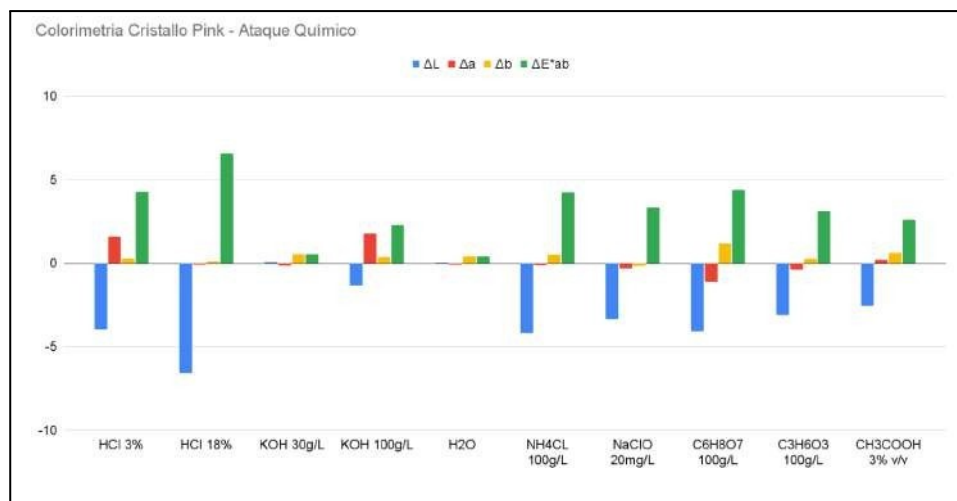
O reagente químico utilizado foi o HCl a 3%, que causou um clareamento na superfície da placa detectado pela lupa. Não houve desprendimento mineral nem material pulverulento na inspeção superficial, apesar da alteração evidente na luminosidade da rocha.

O que pode ser justificado pelas propriedades petrográficas e petrofísicas da rocha em comparação às demais: sua superfície é predominantemente branca (> 90% de quartzo) sem a presença de minerais coloridos, de veios, ou de fraturas contrastantes.

A metodologia adotada consistiu na caracterização de fraturas, a investigação abordou os efeitos de variação cromática nas imagens pelos efeitos de alvura e mudanças visíveis, incluindo clareamento, escurecimento e alterações nas tonalidades de vermelho, verde e amarelo.

Foram capturadas as imagens digitais das amostras, através da lupa com lente de aumento e luz direcionada para a imagem, na qual pode ser percebida a proporcionalidade entre agentes mais agressivos. Ao contrário do Perla Santana, a variação de luminosidade e cor seguiu um intervalo de aproximadamente 5%, (Figura 53)

Figura 53-Dados de colorimetria do quartzito Crísalto Pink Após o ataque químico.

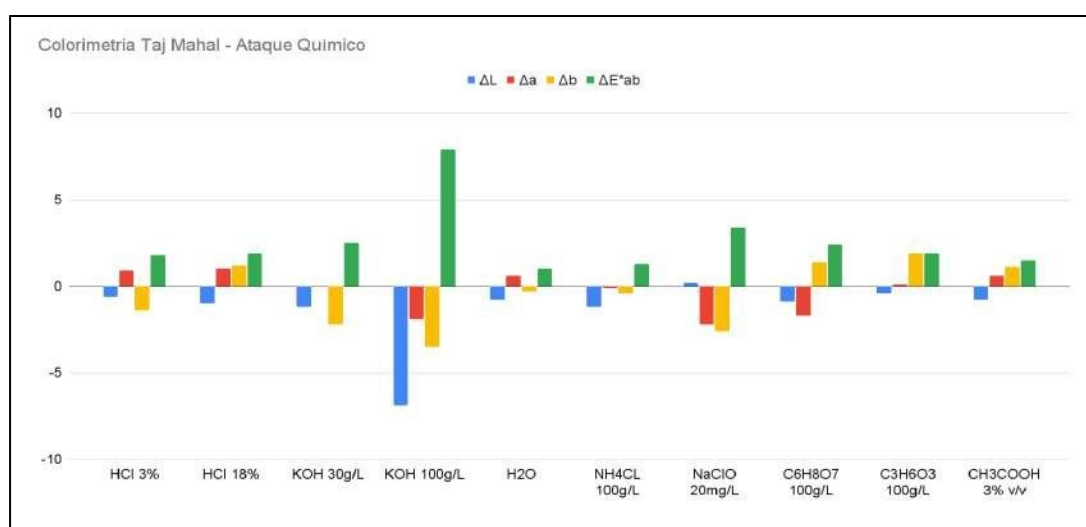


Fonte: Autora.

No quartzito Taj Mahal o ( $\Delta E^*a$ ) quantifica as variações de cor e luminosidade na superfície da amostra, reforçando a alteração perceptível na área atacada pelos reagentes. o  $\Delta E^*Ab$  mostrou o KOH como maior variante na relação global (luminosidade e cor) . Na Figura 39 é possível observar que O KOH diminuiu a luminosidade em 7%, as demais reduções quase imperceptíveis (abaixo de 2%). Os dados do Taj Mahal indicam o KOH como o agente com maior impacto global ( $\Delta E$ ), provocando perda de 7% de luminosidade.

As demais substâncias testadas geraram alterações pouco perceptíveis, com  $\Delta L$  abaixo de 2%, (Figura 54). Esses resultados permitem concluir que reagentes alcalinos têm maior potencial de modificação óptica na superfície das rochas, principalmente quando há microfissuras que facilitam a penetração. Além disso, as variações colorimétricas acompanham, de modo geral, a porosidade e o grau de fraturamento de cada tipo de quartzito.

Figura 54- Dados de colorimetria do Quartzito Taj Mahal após o ataque químico.



Fonte: Autora.

#### 4.10 Ensaio de Ataque Químico

O fraturamento das rochas obtidos pelos ensaios não destrutivos de pacometria, indicaram uma menor velocidade de transmissão das ondas nas amostras do quartzito Taj Mahal podendo ser classificada como muito fraturada segundo a norma ASTM (ASTM E399).

Consequente, a etapa de limpeza consistiu em aplicações diretas de agentes limpantes simples (bicarbonato de sódio, detergente, água morna, saponáceo, HCl a 3% e limpador de superfícies) aplicados por 24 horas, individualmente para medir sua eficiência de limpeza e recuperação de brilho ou eventuais manchas tanto para cada um dos reagentes químicos aplicados, quanto para os manchantes dos agentes químicos, provocando formação de Caulim  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  iridescência e alteração de cor nas placas.

Agentes manchantes, como vinagre de vinho, vinho e palha de aço umedecida, o fraturamento das rochas permitiu que penetrassem e manchassem em diversos pontos, sendo absorvidos e demonstrando comprometimento parcial. Estas amostras foram testadas, mas os agentes limpantes não foram completamente eficientes na recuperação.

Os reagentes mais agressivos provocaram mudanças visíveis a olho nu no quartzito, sendo eles KOH 100g/L, ácido láctico, hipoclorito, HCl a 18% e óxidos de ferro. Os resultados das análises de alterabilidade dos quartzitos indicam variações significativas nos processos de intemperismo e transformação mineralógica, mesmo quando protegidos por resina. Por isso, a remediação não foi efetiva após as simulações de ataque químico e manchamento.

No quartzito Perla Santana, a presença de lamelas de alteração e a formação de caulim sugerem um grau avançado de intemperismo químico, possivelmente associado à interação com fluidos ricos em sílica e alumínio. Esses processos indicam que, apesar da aplicação da resina, a proteção não foi suficiente para impedir a progressão da alteração mineralógica, o que pode comprometer a resistência mecânica da rocha ao longo do tempo.

Na amostra de Taj Mahal, a identificação de cavidades e de material iridescente aponta para processos de dissolução e precipitação mineral, possivelmente relacionados à circulação de fluidos hidrotermais ou à lixiviação de componentes solúveis.

A presença de material iridescente pode estar associada a óxidos metálicos ou filmes superficiais de minerais secundários. Assim como no Perla Santana, a aplicação de resina não conseguiu impedir completamente esses processos, sugerindo que a proteção superficial pode não ser suficiente para mitigar os efeitos de alteração em condições ambientais adversas.

No entanto, as amostras de Taj Mahal, submetidas ao KOH 30% reagiram de maneira inesperada trazendo à superfície da rocha uma mancha de coloração azulada, Na figura 55, a amostra atacada com KOH foi observada na lupa NIKON com aumento de 10x. No primeiro momento admitiu-se como uma possível contaminação durante o ensaio, o qual poderia ter sido comprometido com o vazamento da tinta usada para guiar a aplicação do PVC necessário para a realização do experimento.

Figura 55-Imagem do quartzito taj mahal após a coloração azul na superfície da amostra.



Fonte: Autora.

Porém, ao repetir o experimento sem demarcação colorida e com cano de pvc de diâmetro menor do que o estabelecido pela (NBR 16596) na figura 56 obteve-se a mesma reação de coloração azul.

Figura 56-Experimento do ensaio de ataque químico com KOH 30% no quartzito taj mahal.



Fonte: Autora.

Vale destacar na Figura 55 das placas do quartzito Taj Mahal, que mesmo resinadas sofreram alteração de brilho, de acordo com o exposto na metodologia de medição da cor, o ensaio colorimétrico, somente as cores que ultrapassam o Raio RGB são visíveis a olho nu, Foram identificadas cavidades abertas e por conseguinte um alto fraturamento permitiram a percolação do líquido, provocando reações visíveis de mudança de cor .

O quartzito Taj Mahal mostrou-se resistente, com porosidade reduzida (devida ao processo de resinagem) isso torna ele mais protegido e mais resistente do que em comparação aos em estado natural, porém deve ser observado em relação ao KOH. Pois, dentre os reagentes, se mostrou mais agressivo e ocasionou maior comprometimento do aspecto visual do quartzito. Logo produtos que possuam em sua composição devem ser evitados (Limpadores desengordurantes/ de limpeza pesada).

As rochas quartzíticas só apresentarão resistência à alterabilidade se forem devidamente impermeabilizadas ou se possuírem baixo grau de fraturamento e porosidade. Isso porque, quanto mais densa for a rocha, menor será sua capacidade de absorção de água. Por outro lado, rochas menos densas tendem a apresentar maior porosidade, o que facilita a percolação de líquidos pelas fraturas e aumenta sua absorção. Esses achados reforçam a necessidade de uma caracterização detalhada das propriedades físico-químicas dos quartzitos, especialmente para aplicações estruturais e ornamentais, onde a degradação da rocha pode agregar mais do que números ao entendimento geral.

A interpretação integrada dos dados obtidos sugere que fatores como mineralogia inicial, condições ambientais e história geológica desempenham um papel fundamental na evolução da alteração dessas rochas, e que medidas adicionais podem ser necessárias para garantir sua durabilidade em longo prazo.

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o desempenho do quartzito Taj Mahal frente aos ensaios de alterabilidade está intimamente ligado à sua estrutura interna e ao tratamento superficial aplicado, como a resinagem. Embora este processo reduza a porosidade e aumente a resistência à absorção de líquidos, ele não elimina totalmente os efeitos de agentes químicos agressivos, como o KOH, que se mostrou especialmente danoso ao aspecto visual da rocha.

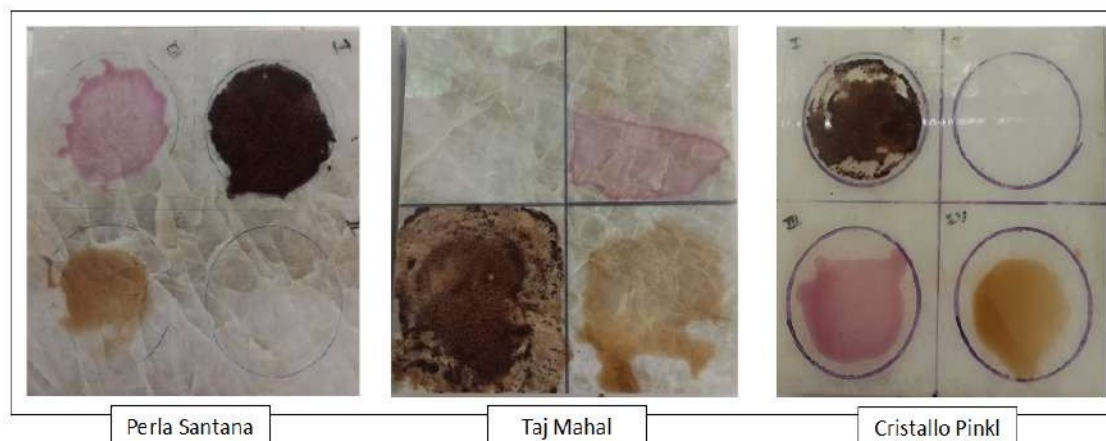
A presença de fraturas e cavidades, ainda que superficiais, favorece a percolação de soluções e a ocorrência de reações visíveis, destacando a importância de uma avaliação criteriosa das propriedades físico-químicas da rocha antes de sua aplicação. Em ambientes onde a durabilidade estética e estrutural é essencial, torna-se imprescindível adotar medidas preventivas, como a impermeabilização e a escolha adequada de produtos de limpeza.

Dessa forma, a caracterização integrada das rochas quartzíticas se apresenta como ferramenta indispensável para garantir seu uso seguro e eficiente, contribuindo não apenas para a longevidade do material, mas também para a valorização do projeto em que será empregado.

#### 4.11 Efeitos do manchamento na superfície dos Quartzitos.

De uma maneira mais ampla, as alterações nos quartzitos são semelhantes e são relacionadas à composição mineralógica, nela o quartzo é predominante com incidência de outros minerais que aparecem em porções pontuais. Quanto à aparência visual das placas destaca-se o Quartzito Cristalino Pink pela sua cor predominantemente branca e alvura marcada pela ausência de inclusões “coloridas” na maioria das peças. Como mostra a figura 57 as peças em contato com os agentes manchantes.

Figura 57: Corpos de prova submetidos aos agentes manchantes. Aplicação de suco de uva industrializado, Coca-Cola, vinagre de álcool e café solúvel em placas de quartzito, com repouso de 24 horas. O manchamento não requer o uso de cano de PVC.



Fonte: Autora.

A análise de resistência ao manchamento foi realizada utilizando diferentes agentes manchantes, como tinta, vinagre, vinho, azeite, shoyu, lâ de aço, suco de uva e óleo. A variação de cor foi medida por meio do parâmetro  $\Delta E^*ab$ , e a porcentagem de variação de cor foi calculada em relação ao valor de L antes da exposição ao agente manchante. A partir disso, também foi determinada a porcentagem de limpeza, que indica a capacidade do material de retornar à sua cor original após a limpeza.

No Perla Santana, o agente que causou a maior variação de cor foi o vinho, com uma alteração de 4,17%, enquanto o azeite apresentou a menor variação, com 1,70%. Para o Cristallo Pink, a tinta foi o agente mais agressivo, com 8,31% de variação de cor, enquanto o óleo causou o menor impacto, com apenas 0,42%. Já no Taj Mahal, o óleo foi o agente que gerou a maior alteração, com uma variação de 8,91%, seguido pelo vinagre, com 8,42%. O shoyo, por outro lado, teve o menor impacto na coloração, com apenas 0,61% de variação

Os manchantes menos agressivos formam películas densas de sujeira, porém removíveis com aplicações dos limpantes (água, água morna com detergente). Os demais, como vinagre de álcool, vinho e palha de aço molhada, tinta de caneta, óleo de cozinha necessitam de mais ciclos de limpeza com os agentes limpantes (Ácido Clorídrico- HCL 3%, saponáceo, bicarbonato). Os dados foram organizados na Figura 58 de acordo com a variação de brilho após a aplicação de cada agente manchante e por conseguinte o brilho depois do processo de limpeza das placas.

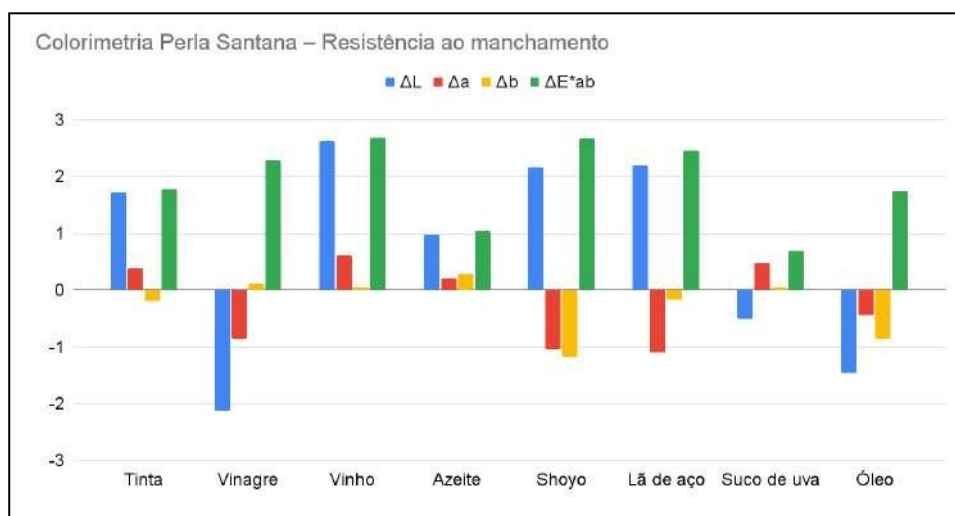
Figura 58: Dados de resistência ao manchamento do quartzito Cristallo Pink após a limpeza.



Fonte: Autora.

Considera-se também que a baixa limpabilidade se dá pela interferência do fraturamento nas rochas, que permitiu a percolação dos agentes manchantes mais agressivos. Confirmando a alteração permanente (Manchas não removíveis). Em sequência na figura 59 agentes manchantes, os quais que tiveram ação mais agressiva no Quartzito Cristallo Pink foram em ordem decrescente: o vinho com redução de aproximadamente 9% da luminosidade, seguido pela lã de aço com aproximadamente 7%.

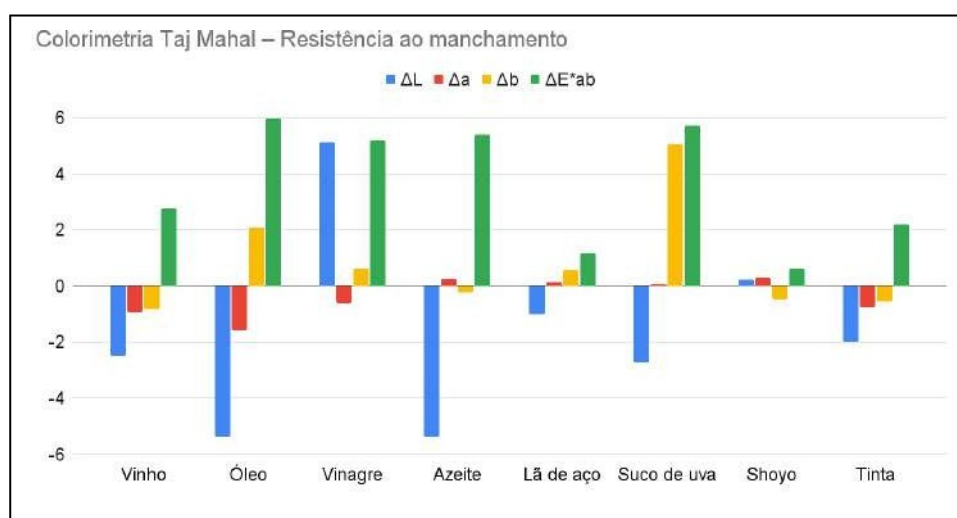
Figura 59: Dados de resistência ao manchamento do quartzito Perla Santana após a limpeza.



Fonte: Autora.

As análises finais constataram uma recuperação expressiva no brilho e estabilização de cor, efetivando a possibilidade de recuperação das condições iniciais, mesmo com os agentes mais agressivos. Por fim, o quartzito na figura 60, é visível que o Taj Mahal teve uma perda de luminosidade maior com as substâncias oleosas e o azeite seguidos por suco de uva industrializado, tinta de caneta e vinho em relação com a diminuição de luz refletida na placa.

Figura 60: Dados de colorimetria em relação à resistência ao manchamento.



Fonte: Autora.

Foi possível resultados avaliar a eficácia dos limpantes aplicados, com base na capacidade de cada produto em restituir a cor original da amostra após o tratamento. A comparação entre os valores obtidos antes e após a aplicação dos limpantes evidenciando o grau de recuperação da tonalidade inicial, indicando, portanto, o desempenho de cada substância na remoção das alterações superficiais (Tabela 26).

Tabela 26 – Efeitos dos agentes limpantes na remediação da variação de cor.

<b>Agente Limpante</b>	<b>Perla Santana (%)</b>	<b>Cristallo Pink (%)</b>	<b>Taj Mahal(%)</b>
Água Morna	4,71	6,08	1,00
Água + Detergente	2,74	9,98	3,59
Água + HCl 18%	2,61	7,88	4,11
Saponáceo	1,59	8,24	9,70
Bicarbonato	0,04	10,62	9,30

Fonte: Elaborado pela autora.

A água morna teve menor eficiência constatada, mas acabou por remover manchas facilmente removíveis como café solúvel e coca cola pois formaram apenas resíduo superficial. Com a adição de detergente neutro a mistura conseguiu eliminar manchas de óleo, azeite de oliva, suco de uva e shoyu.

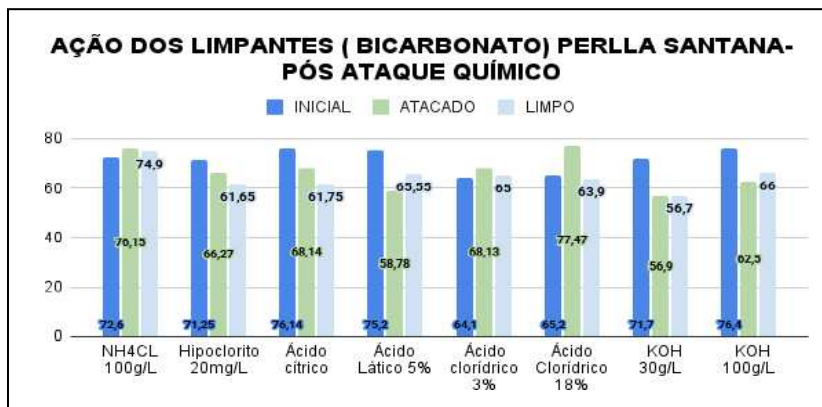
A resinagem apresentou um papel imprescindível na preservação da estrutura e conservação da boa aparência superficial da rocha, em todos os corpos de provas analisados houve uma ação penetrante reduzida por parte dos agentes de ataque.

#### **4.12 Limpeza e recuperação**

Nesta etapa demonstram-se os dados representativos da fase metodológica de limpeza e recuperação dos quartzitos. Quantificando a limpabilidade que os agentes limpantes exerceram nas amostras após os ensaios de ataque químico e manchamento.

De modo geral, o saponáceo e o bicarbonato demonstraram os maiores poderes de limpeza nas amostras do Taj Mahal. Por conseguinte, o HCl 18% apresentou um desempenho relativamente eficaz, principalmente no Taj Mahal, porém ocorreram variações em outras amostras. No entanto, a água morna teve os menores valores de remoção, indicando baixa eficiência. O Bicarbonato é o limpante mais indicado pelas empresas de rochas ornamentais para realizar a manutenção e limpeza preventiva, indicado principalmente para granitos e mármore aplicados em cozinhas e áreas molhadas como banheiros e saunas, (Figura 61).

Figura 61- Ação do Limpante Bicarbonato no quartzito Perla Santana após o ataque químico.



Fonte: Autora. Dados representativos da limpabilidade que o Agente Limpante Bicarbonato de sódio exerceu nas amostras após o ataque químico.

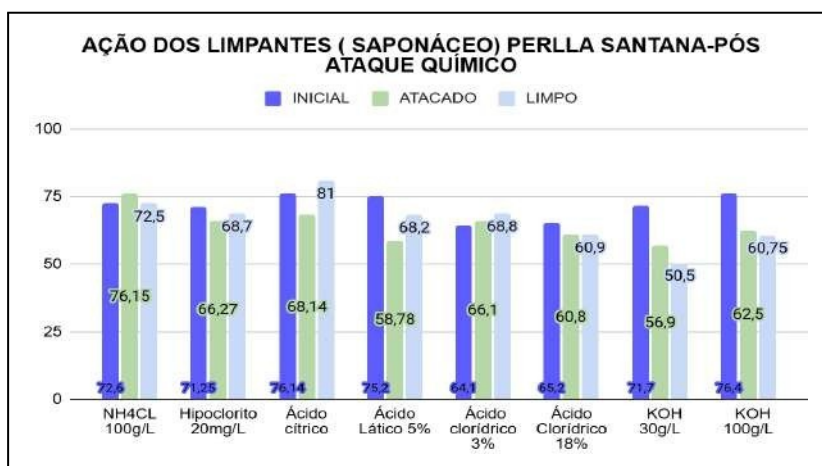
O cloreto de amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) teve um aumento de brilho e se manteve estável após a limpeza; O Reagente hipoclorito de sódio a 20 mg/L, teve uma redução de brilho que foi intensificada após a limpeza. O ácido cítrico foi considerado agressivo à arrocha, pois reduziu o brilho e foi acentuado ainda na limpeza, fazendo com que a remediação fosse dificultosa.

O ácido clorídrico a 3% teve um aumento de brilho e se manteve estável durante a limpeza. O ácido clorídrico a 18% teve um aumento considerável de brilho e se estabilizou novamente evidenciando um efeito de remediação. O agente limpante bicarbonato de sódio é recomendado no caso de danos causados pelos agentes químicos de Cloreto de Amônio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 100g/l. Ácido láctico a 5%, ácido clorídrico a 3%.

Para agentes químicos mais agressivos, como as 2 variações de hidróxido de potássio nas concentrações diferentes usadas nos experimentos de ataque químico, não se recomenda o uso de bicarbonato de sódio, pois a recuperação de brilho foi baixa.

O saponáceo é um produto de limpeza abrasivo amplamente utilizado na remoção de sujeiras difíceis, gorduras e manchas em diversas superfícies, como pias, fogões, azulejos e metais. Sua formulação em creme, sendo composta, essencialmente, por tensoativos, abrasivos e, em algumas versões, agentes alvejantes (Figura 62). Os tensoativos desempenham um papel fundamental na solubilização de gorduras e impurezas, facilitando sua remoção, enquanto os abrasivos, como o carbonato de cálcio ou a sílica, proporcionam a ação mecânica necessária para eliminar resíduos mais aderidos.

Figura 62- Ação do Limpante Saponáceo no quartzito Perla Santana após o ataque químico.



Fonte: Autora. Dados representativos da limpabilidade que o Agente Limpante Saponáceo exerceu nas amostras após o ataque químico.

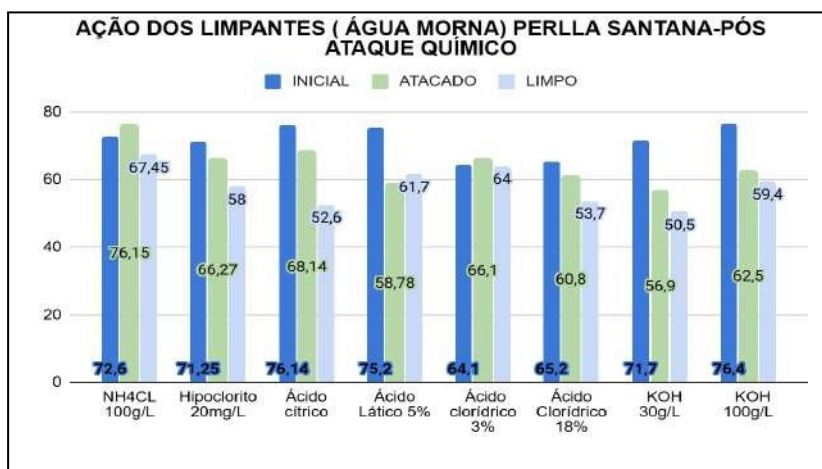
O cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl) gerou um aumento de brilho indicando que a barreira protetora da resina pode ter sido rompida pelo ácido, porém, sem percolação aparente. Durante a remediação, houve uma redução de brilho, basicamente uma estabilização da luminosidade. O hipoclorito ocasionou leve redução de brilho parcialmente recuperada com a remediação do agente limpante. Já o ácido cítrico, reduziu o brilho durante o ataque químico e após a remediação, o brilho final superou o brilho inicial, evidenciando também o rompimento da barreira protetora da resina.

No caso do ácido láctico a 10% houve uma redução considerável de brilho com ataque químico na placa de pela Santana, respondendo positivamente a remediação com saponáceo. No ácido clorídrico a 3% houve um aumento de brilho, mas sem percolação de líquido. O ácido clorídrico a 18% teve uma redução de brilho razoável. Porém, não comprometedora e se estabilizou durante a remediação.

O hidróxido de potássio por ser o reagente mais agressivo para o quartzito Perla Santana, nenhum agente limpante possibilitou a remediação da perda de brilho causada por ele na superfície das placas; tanto na concentração de 30g/L, quando na de 100g/L a remediação foi praticamente nula.

Água morna foi um agente de limpeza menos agressivo utilizado nessa etapa de recuperação das placas atacadas. A NBR 13.813/1997, logo a remediação constatado foi praticamente nula na recuperação de brilho após ataque químico (Figura 63).

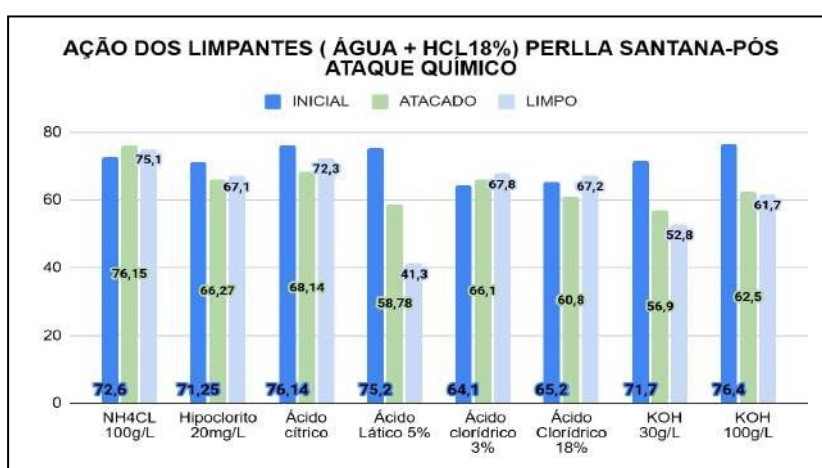
Figura 63- Ação do Limpante Água Morna no quartzito Perla Santana após o ataque químico.



Fonte:Autora.

O HCl 18% é uma solução de ácido clorídrico amplamente utilizada como agente de limpeza devido à sua alta capacidade de dissolver incrustações minerais, óxidos metálicos e resíduos cimentícios. Sua ação corrosiva permite a remoção eficaz de sujeiras difíceis, tornando-o comum na limpeza industrial, desincrustação de superfícies e ajuste de pH. Foi aplicado como agente limpante dissolvido em água para medir a capacidade de recuperação do brilho após o ataque químico (Figura 64).

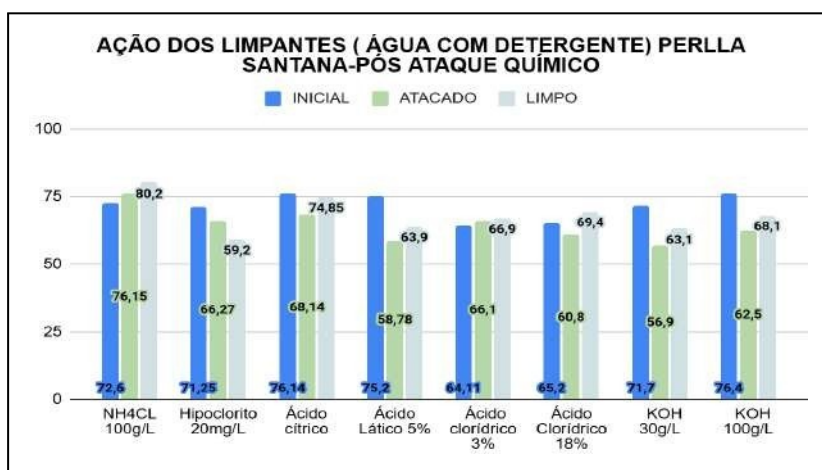
Figura 64-Ação do Limpante Água +HCL 18% no quartzito Perla Santana após o ataque químico.



Fonte:Autora. Dados representativos da limpabilidade que o Agente Limpante Água+HCL 18% exerceu nas amostras após o ataque químico.

A mistura utilizada de água e HCL a 18% é recomendada apenas para remediação de danos causados por compostos de ácido cítrico e hipoclorito de sódio a 20 miligramas teve a menor recuperação. O Ácido Lático reagiu negativamente aumentando o dano causado à placa após a aplicação do limpante (Figura 65).

Figura 65- Ação do Limpante Água + detergente no quartzito Perla Santana após o ataque químico.



Fonte: Autora. Dados representativos da limpabilidade que o Agente Limpante Água com detergente exerceu nas amostras após o ataque químico

A ação do limpante composto por água e detergente ocorre por meio de diversos mecanismos físicos e químicos que garantem a remoção eficiente de sujeiras e gorduras. Inicialmente, a água atua como solvente, promovendo a umidificação e o amolecimento das partículas aderidas à superfície. Os tensoativos presentes no detergente reduzem a tensão superficial da água, permitindo maior penetração nos resíduos.

Além disso, ocorre a emulsificação das gorduras, na qual as moléculas lipofílicas são fragmentadas em pequenas partículas e mantidas dispersas na solução. Ocorreu remediação positiva em relação ao Cloreto de Amônio (NH<sub>4</sub>CL) 100g/L, Ácido cítrico, Ácido lático, Ácido clorídrico 18%. Destaca-se que recuperou mesmo que razoavelmente a ação deletéria de brilho das variações de KOH. A análise dos níveis de limpabilidade demonstrou que as amostras apresentam comportamentos distintos quanto à facilidade de remoção de agentes contaminantes, variando de acordo com as características físico-mecânicas das superfícies.

No que se refere à recuperação após o ataque químico, observou-se que a resistência dos materiais está diretamente relacionada à sua composição mineralógica e ao grau de tratamento superficial. Superfícies previamente tratadas com agentes impermeabilizantes ou protetores mostraram maior capacidade de recuperação, com menores alterações visuais, estruturais e de cor após a exposição a agentes agressivos. A ação de cada limpante foi quantificada de acordo com a diferença entre seu estado de brilho inicial, após aplicação de reagentes químicos e após a aplicação de cada agente limpante. Foi calculada a perda de brilho média ocasionada pela reação dos reagentes a performance de cada agente limpante em relação aos agentes manchantes, (Tabela 27).

Tabela 27: Efeito dos agentes limpantes na remediação da perda de brilho o quanto os quartzitos se aproximaram do brilho original.

<b>Agente Limpante</b>	<b>Perla Santana (%)</b>	<b>Cristallo Pink (%)</b>	<b>Taj Mahal(%)</b>	<b>Média (%)</b>
Água Morna	4,71	6,08	1,00	3,93
Água + Detergente	2,74	9,98	3,59	5,4
Água + HCl 18%	2,61	7,88	4,11	4,8
Saponáceo	1,59	8,24	9,70	6,5
Bicarbonato	0,04	10,62	9,30	6,8

Fonte: Autora.

Portanto, conclui-se que a eficiência dos agentes limpantes quanto à limpabilidade e à recuperação após o ataque químico e manchamento estão condicionadas tanto às suas propriedades intrínsecas (microfissuras, mineralogia) quanto às intervenções de proteção aplicadas (polimento e resinas), de acordo como foi constatado na recuperação do Cristallo Pink e Taj mahal. Esses fatores devem ser criteriosamente considerados em contextos onde a durabilidade estética e funcional dos materiais seja essencial.

## 5. CONCLUSÃO

A presente dissertação analisou as alterabilidades químicas e físicas dos principais quartzitos ornamentais do estado do Ceará – Perla Santana, Cristallo Pink e Taj Mahal – com foco na remediação dos danos estéticos provocados por agentes de uso doméstico. Foram aplicados ensaios normatizados de brilho, colorimetria, pacometria (PUNDIT), microscopia eletrônica de varredura (MEV), Ensaio de índices físicos de porosidade, absorção e densidade, além da aplicação de reagentes químicos, manchamento e limpantes. A integração dessas metodologias permitiu uma caracterização minuciosa dos materiais, com foco tanto na compreensão dos mecanismos de degradação quanto na efetividade dos processos de recuperação.

Nos ensaios de brilho superficial, observou-se que o reagente mais deletério foi o hidróxido de potássio (KOH), provocando perdas médias de brilho de até 16,49%. Em contraste, o hipoclorito de sódio apresentou alteração pouco significativa, com perda inferior a 1%. O ensaio de colorimetria indicou que os maiores valores de  $\Delta E$  foram encontrados nas amostras de Cristallo Pink, o que indica alterações perceptíveis a olho nu. Já o Taj Mahal apresentou alterações visuais mais sutis, ainda que seu comportamento estrutural tenha revelado maior fraturamento em zonas localizadas.

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (ultrassom), realizado por meio do equipamento Pundit 2000, teve como objetivo avaliar a integridade estrutural das amostras de quartzito a partir da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nos três eixos principais de cada corpo de prova. Valores mais altos de velocidade indicam estrutura interna mais densa, coesa e com menor incidência de descontinuidades, enquanto valores reduzidos sugerem maior porosidade, presença de microfissuras ou heterogeneidade mineralógica. Para o quartzito Perla Santana, os valores médios ficaram em 45,99 m/s no eixo A e 47,31 m/s no eixo B. Esses valores são consistentemente inferiores aos das demais amostras, refletindo maior grau de descontinuidade interna. Esses dados estão em concordância com os resultados de absorção e porosidade anteriormente discutidos, nos quais o Perla Santana apresentou os maiores índices.

Já o quartzito Cristallo Pink destacou-se com os melhores resultados no ensaio ultrassônico, com velocidades médias de 50,02 m/s (amostra 1) e 54,60 m/s (amostra 2). Esses dados indicam boa integridade interna e homogeneidade estrutural, confirmando sua menor suscetibilidade a alterações físico-químicas nos ensaios de brilho e colorimetria.

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), associada à espectrometria de energia dispersiva (EDS), permitiu avaliar a microestrutura e a composição química pontual dos três quartzitos analisados. As imagens foram coletadas com diferentes aumentos e focalizadas em regiões de interesse, como fraturas, bordas de grãos e inclusões minerais. Observa-se a presença de inclusões ricas em zircônio e silício, com formato arredondado e com alto brilho em modo BSE. Tais feições são compatíveis com zircão ou monazita, minerais acessórios típicos de protólitos pelíticos e resistentes à alteração.

Foram identificadas fissuras intergranulares contínuas, com bordas limpas e evidência de preenchimento secundário, possivelmente por muscovita ou caulinita, como sugerido pela composição química detectada nos espectros de EDS. A presença dessas argilas é coerente com ambientes de alteração subtropical úmida e pode reduzir a durabilidade do material em aplicações externas. O quartzito Taj Mahal possui uma rede de microfaturas interconectadas, com orientação preferencial, indicando fragilidade estrutural que pode ter origem em retração térmica ou esforços tectônicos. Tais estruturas favorecem a percolação de fluidos e a formação de eflorescências, como evidenciado nas bordas de fraturas onde se observa halo claro indicativo de acúmulo salino.

O ensaio de colorimetria foi aplicado para mensurar variações visuais e perceptíveis de cor após o ataque químico com diferentes reagentes. As variáveis  $\Delta L$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  e  $\Delta E$  foram determinadas conforme o sistema CIELAB, com base em 10 pontos de medição em quadrantes fixos das amostras.

No ensaio de colorimetria o quartzito Perla Santana, evidenciando que a maior alteração ocorre na variável  $\Delta E$ , com impacto significativo na percepção visual da cor após o ataque químico. Reagentes como NaClO 20 g/L e HCl 18% causaram redução de até 4% na luminosidade ( $\Delta L$ ), enquanto o KOH promoveu aumento da luminosidade em 2,5%.

O quartzito Cristallo Pink teve como principal impacto a perda de luminosidade ( $\Delta L$ ), com redução de até 8% após o ataque com HCl a 3%. A comparação visual antes e depois do ataque, demonstrando clareamento superficial perceptível, mesmo na ausência de desprendimento mineral. O hidróxido de potássio (KOH) atuou como o agente de maior impacto global ( $\Delta E$ ), provocando perda de 7% de luminosidade. As demais substâncias testadas geraram alterações pouco perceptíveis, com  $\Delta L$  abaixo de 2%.

Esses resultados permitem concluir que reagentes alcalinos têm maior potencial de modificação cromática na superfície das rochas, principalmente quando há microfissuras que facilitam a penetração.

Além disso, as variações colorimétricas acompanham, de modo geral, a porosidade e o grau de fraturamento de cada tipo de quartzito. Fazendo possível correlacionar as características mineralógicas com as condições estruturais da rocha.

Portanto, a maneira como as fraturas facilitam a alteração intempérica causando a alterabilidade observada durante os ensaios de ataque químico e manchamento. Porém, a aplicação de agentes de limpeza possibilitou a recuperação. Visto que as propriedades físicas e estruturais dos quartzitos, como Porosidade, grau de microfissuramento e composição mineral, exercem influência direta sobre seu desempenho diante da degradação química. A caracterização integrada permite maior controle sobre o beneficiamento e a aplicação desses materiais, oferecendo subsídios técnicos relevantes para a cadeia produtiva de rochas ornamentais.

Observou-se que as amostras com maior porosidade apresentaram também maiores perdas de brilho e maiores valores de  $\Delta E$ . Isso reforça a hipótese de que a conectividade entre os poros facilita a penetração dos reagentes, provocando alteração não apenas estética, mas também físico-mecânica.

A partir dos resultados do PUNDIT e MEV, é possível sugerir que a qualidade ornamental de um quartzito está mais ligada à sua integridade microestrutural do que exclusivamente à sua composição mineralógica. Certo que os reagentes mais agressivos como HCL e KOH conseguiram quebrar a proteção da resina e aproveitar as aberturas nas placas, sendo estas fissuras, fraturas e cavidades abertas que permitiram a percolação dos líquidos no interior da rocha possibilitando as alterações minerais observadas.

Logo, por mais que a rocha quartzítica seja em suma composta por quartzo, mineral de alta resistência, pode ser degradado pelas interferências externas quando sua estrutura estiver fragilizada por descontinuidades estruturais. Tanto quando não houver uma hipermeabilização e selagem adequada pela resina utilizada. Dado o desempenho observados nos resultados na função de proteger a superfície da rocha, mantendo sua integridade e aparências estética uniforme. Ainda sim, é preciso uma maior amostragem de testes em trabalhos futuros. Outros aspectos de resistência podem ser analisados futuramente, incluindo simulações de vida útil da rocha, poderiam ser simulados os processos de lixiviamento com a utilização de SOXLET. Além de buscar simulações mais densas com objetivo de encontrar novos meios de remover os óxidos de ferro dos quartzitos com a realização de novos ensaios destrutivos/não destrutivos da rocha em laboratório e no afloramento *in loco*.

Sugere-se que estudos futuros possam incorporar técnicas como DRX, tomografia computadorizada de raios-X, degradação salina e envelhecimento acelerado artificial para complementar a avaliação de durabilidade. A aplicação desses resultados pode contribuir para uma especificação mais eficiente e sustentável de materiais na construção civil, com menor desperdício e maior valor agregado à produção mineral do Ceará. Buscando alinhar as perspectivas de inovação científica com os desafios da sustentabilidade na produção mineral brasileira. Não somente, mas também aproximar-se dos ODS-Objetivos de desenvolvimento sustentável, em especial o 9º (Indústria, inovação e infraestrutura).

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15845-1:** rochas para revestimento – análise petrográfica. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12042:** rochas para revestimento – desgaste abrasivo Amsler. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13818:** placas cerâmicas para revestimento – especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15845-1:** rochas para revestimento – análise petrográfica. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15845-2:** rochas para revestimento – determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15845-4:** rochas para revestimento – determinação da resistência ao congelamento e degelo. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15845-5:** rochas para revestimento – determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15845-6:** rochas para revestimento – determinação do módulo de ruptura. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16596:** rochas para revestimento – resistência ao ataque químico. Rio de Janeiro, 2017.
- AIRES-BARROS, L. **Alteração e alterabilidade de rochas**. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Científica, 1991.
- ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. Cachoeiro de Itapemirim: IEL, 2013.
- BRASIL. **Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967**. Institui o Código de Mineração. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 fev. 1967.
- BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2 set. 1981.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa.

Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012.

BRASIL. **Lei nº 13.123, de 20 de maio de 2015.** Dispõe sobre o acesso ao patrimônio genético. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 maio 2015.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 fev. 1986.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 dez. 1997.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora nº 22 (NR-22): segurança e saúde ocupacional na mineração.** Brasília, 1978.

CARVALHO, C. S. **Estudo do comportamento tecnológico e de alterabilidade das rochas ornamentais silicáticas Verde Amazonas, Preto Cajugram e Bege Ipanema.** 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

CAVALCANTI, S. G. F. et al. Viabilidade do ácido cítrico como solução para remoção de ferrugem em placas polidas de granitos do Ceará. In: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 10., 2019, Fortaleza. Anais [...]. Rio de Janeiro: CETEM, 2019. p. 122.

CLAUDINO-SALES, V. **Megageomorfologia do Ceará: história da paisagem geomorfológica.** [S.l.]: Novas Edições Acadêmicas, 2018.

DUTROW, B.; DANA, J. D.; KLEIN, C. **Manual of mineralogy.** 23. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

FERNANDES, T. W. G. **Diagnóstico da cadeia produtiva de rochas ornamentais e de revestimentos do Estado do Ceará.** 2004. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

FRASCÁ, M. H. B. O. Caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de revestimento. In: SIMPÓSIO SOBRE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3., 2002, Recife. Anais [...]. Recife, 2002.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento.** 2003. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FRASCÁ, M. H. B. O.; RODRIGUES, E. P.; PALDÊS, R. J. A. **Orientações para especificação de rochas ornamentais**. Brasília: ABIROCHAS, 2019.

MATTOS, I. C. et al. **Resistência ao ataque químico de granitos ornamentais do Stock Serra do Barriga – Sobral/CE**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 43, p. 124–136, 2020.

MESQUITA, M. P. S. **Composição, estruturas, propriedades tecnológicas e alterabilidade dos granitos ornamentais do stock Morrinho, Santa Quitéria (CE)**. 2002. 171 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

NASCIMENTO, D. A.; GAVA, A. Novas considerações sobre a estratigrafia da Bacia do Jaibaras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 9., 1979, Natal. Anais [...]. Natal: SBG, 1979. p. 14–29.

NUNES, J. A. L. **Caracterização litoestrutural de quartzitos da Serra do Mucuripe – NW do Ceará**. 2018. 78 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

RIBEIRO, R. C. C. et al. **Estudo de alterabilidade de rochas silicáticas para aplicação ornamental**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008.

ROBERTO, F. A. C. et al. **O setor de rochas ornamentais no Ceará**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 1.; CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 2., 2005, Guarapari. Anais [...]. Guarapari: CETEM, 2005.

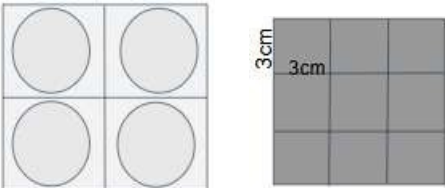
RODRIGUES, L. **Cinco municípios do Ceará exportaram mais de R\$ 100 milhões em rochas ornamentais em 2024**. *Diário do Nordeste*, Fortaleza, 9 fev. 2025. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SANTOS, L. S. A. et al. **Caracterização tecnológica de quartzitos do estado do Ceará**. Revista de Geologia, Fortaleza, v. 30, p. 261, 2017.

TORQUATO, J. R.; NOGUEIRA NETO, J. A. **Historiografia da região de dobramentos do Médio Coreau**. Revista Brasileira de Geociências, v. 26, n. 4, p. 303–314, 1996.

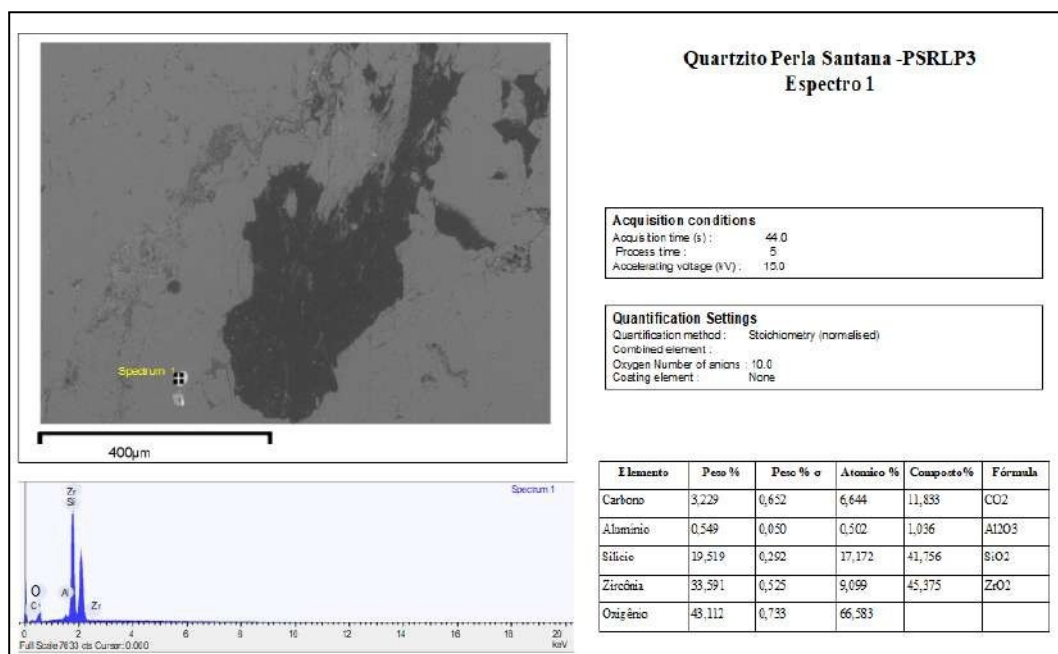
VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM, 2013.

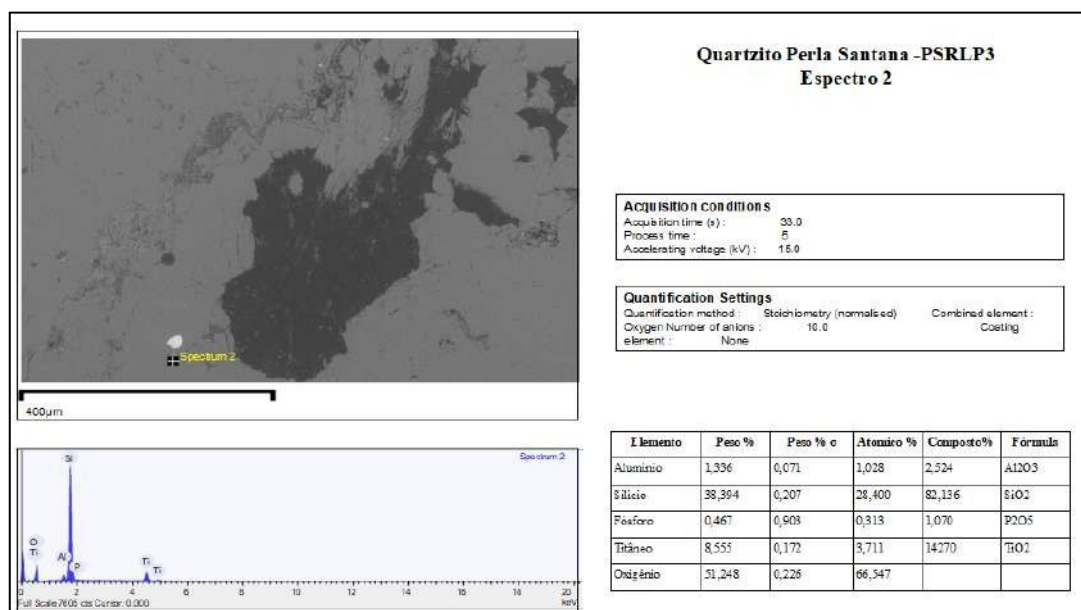
## ANEXO A- FICHA DE AVALIAÇÃO VISUAL DA MACROANÁLISE DE FISSURAS

UFC-Universidade Federal do Ceará		PROPGGEO- Programa de Pós Graduação em Geologia	
<b>Mestrado em Geologia: Geodinâmica e Recursos Minerais</b>			<b>Data:</b> /    /
<b>Mestranda:</b> Renata de Oliveira Lopes <b>Orientação:</b> Irani Clézar Mattos		<b>Metodologia:</b> Caracterização de Fraturas: Quartzitos Onomamentais ( Etapa Laboratorial )	
			<b>Efeitos de variação Cromática</b>  <input type="checkbox"/> Clareamento <input type="checkbox"/> Escurecimento <input type="checkbox"/> Mais vermelho <input type="checkbox"/> Mais Verde <input type="checkbox"/> Mais Amarelo
<b>Ataque Químico:</b> <b>Brilho Inicial (média/quadrante)</b> <b>Cor Inicial (média/quadrante)</b> <b>Brilho Final:</b> <b>Aspecto visual</b>			<input type="checkbox"/> Desprendimento Mineral <input type="checkbox"/> Material Pulverolento <input type="checkbox"/> Buracos/Cavidades
Critério	Descrição	Classificação	Observações
Abertura da Fratura	Largura da fratura (mm)	<input type="checkbox"/> Pequena (< 1 mm)	
		<input type="checkbox"/> Média (1-5 mm)	
		<input type="checkbox"/> Grande (> 5 mm)	
Continuidade	Extensão da fratura	<input type="checkbox"/> Curta (< 1 cm)	
		<input type="checkbox"/> Moderada (1-3 cm)	
		<input type="checkbox"/> Longa (> 5 cm)	
Espaçamento entre Fraturas	Distância entre fraturas adjacentes	<input type="checkbox"/> Muito próximo (< 10 cm)	
		<input type="checkbox"/> Próximo (10-50 cm)	
		<input type="checkbox"/> Distante (> 50 cm)	
Preenchimento	Material preenchendo a fratura	<input type="checkbox"/> Sem preenchimento	
		<input type="checkbox"/> Com preenchimento	
Rugosidade da Superfície	Textura da superfície da fratura	<input type="checkbox"/> Lisa	
Cor Visível a olho nu		<input type="checkbox"/> Moderadamente rugosa	
Brilho Perceptível		<input type="checkbox"/> Rugosa	
Tipo de Fratura	Tipo morfológico da fratura	<input type="checkbox"/> Fratura de Tensão	
		<input type="checkbox"/> Fratura de Cisalhamento	
		<input type="checkbox"/> Outra	
Minerais Identificados		<input type="checkbox"/>	
		<input type="checkbox"/>	
		<input type="checkbox"/>	
<b>Ataque Químico:</b> <b>Brilho Inicial (média/quadrante)</b> <b>Cor Inicial (média/quadrante)</b> <b>Brilho Final:</b> <b>Aspecto visual</b>			<input type="checkbox"/> Desprendimento Mineral <input type="checkbox"/> Material Pulverolento <input type="checkbox"/> Buracos/Cavidades
Critério	Descrição	Classificação	Observações
Estabilidade	Estabilidade estrutural da fratura	<input type="checkbox"/> Estável	
		<input type="checkbox"/> Potencialmente instável	

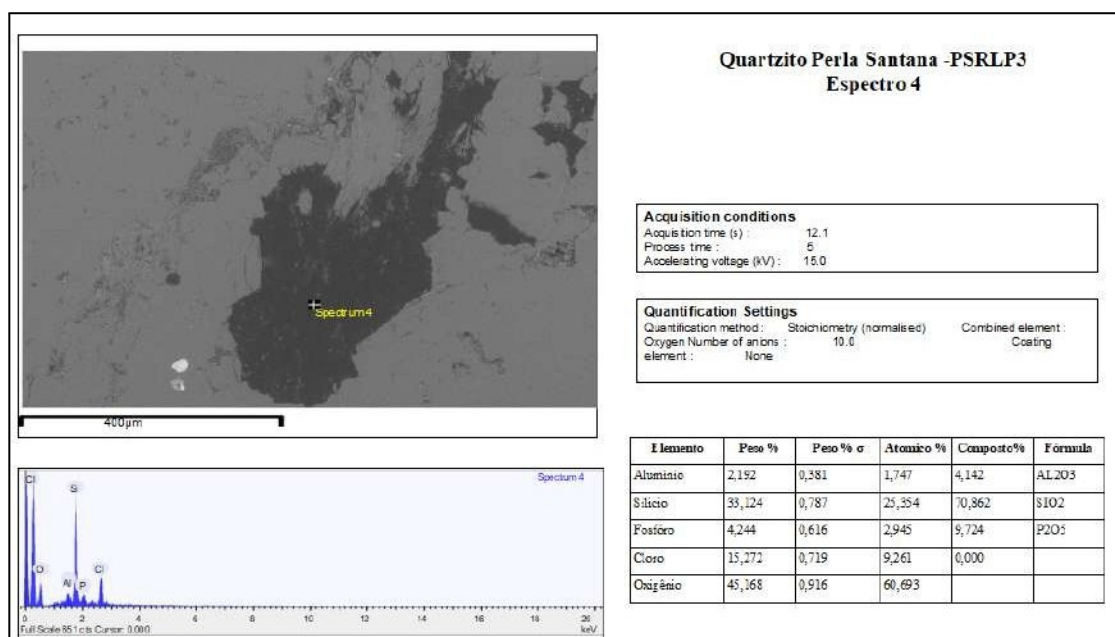
		<input type="checkbox"/> Instável	
--	--	-----------------------------------	--

## ANEXO B – SÍNTESE DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE MEV NAS AMOSTRAS DE QUARTZITOS.

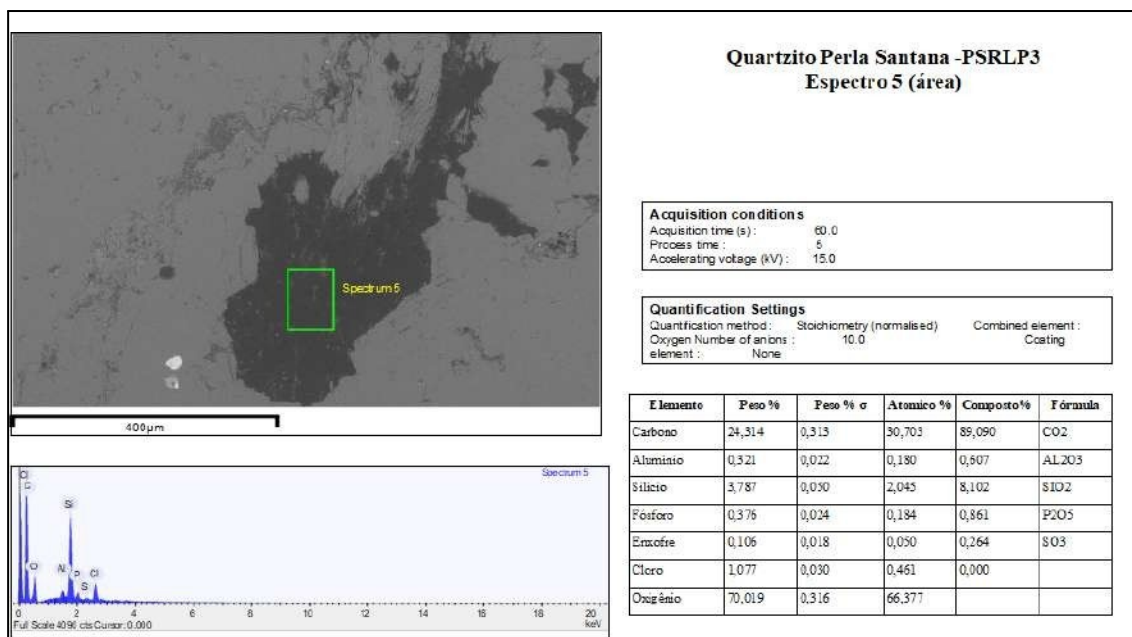




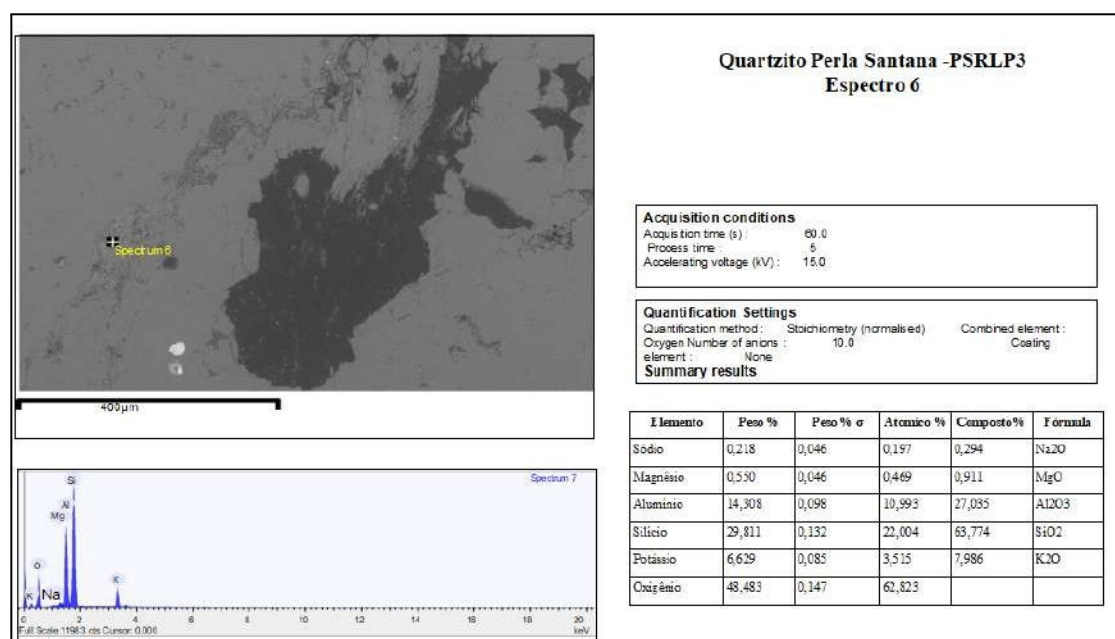
Fonte: Elaborado pela Autora. Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 2) do quartzito Perla Santana



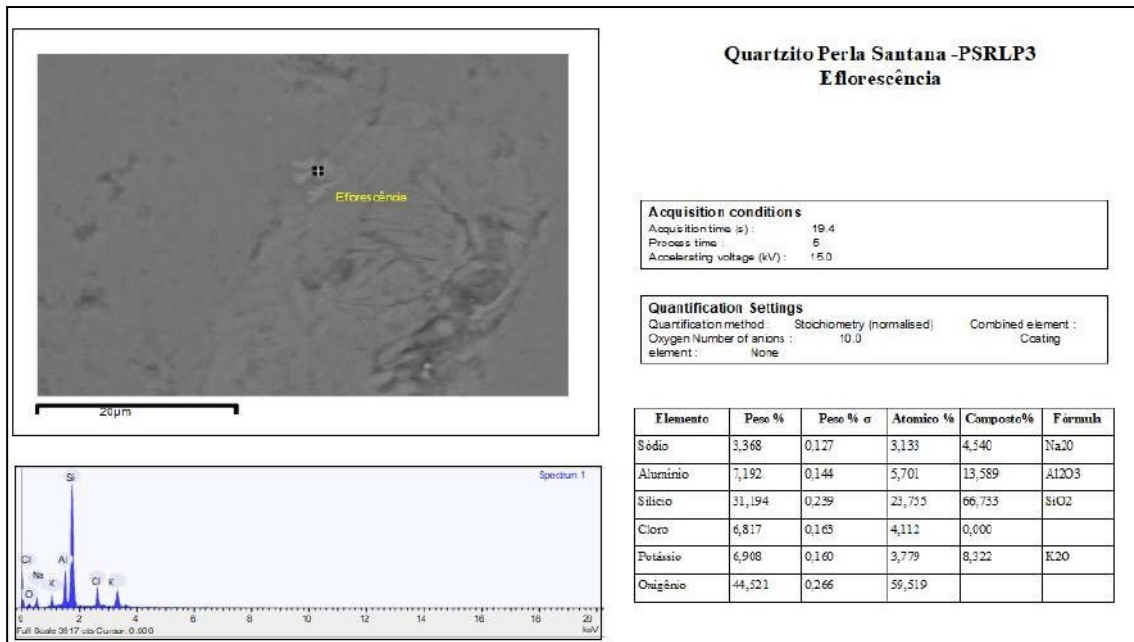
Fonte: Elaborado pela Autora. Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 4) do quartzito Perla Santana



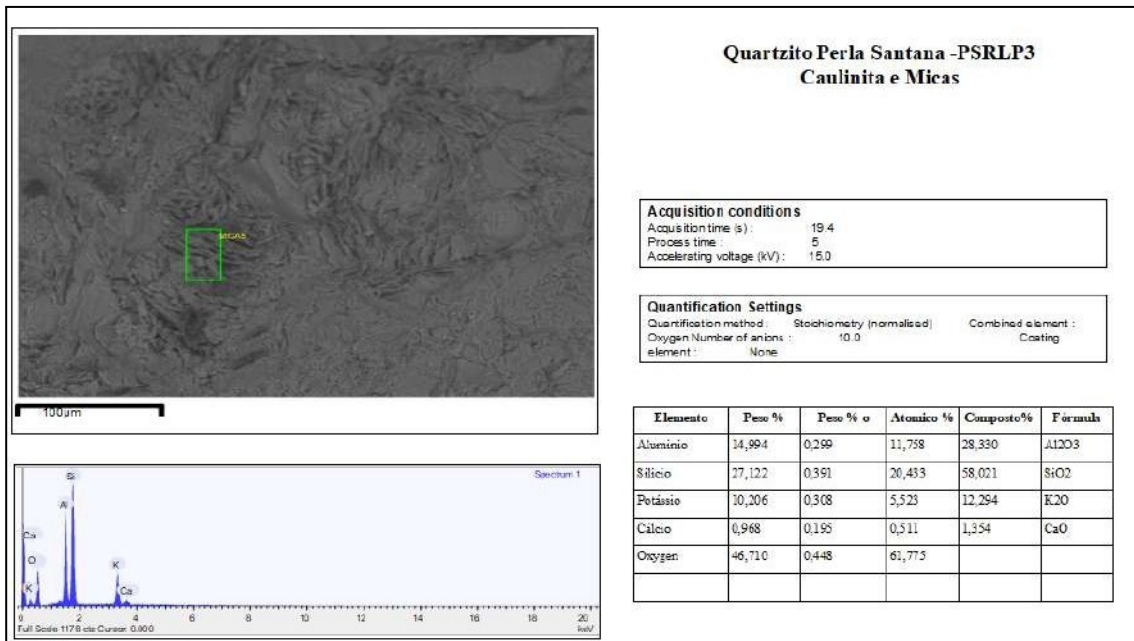
Fonte: Elaborado pela Autora. Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 5) do quartzito Perla Santana.



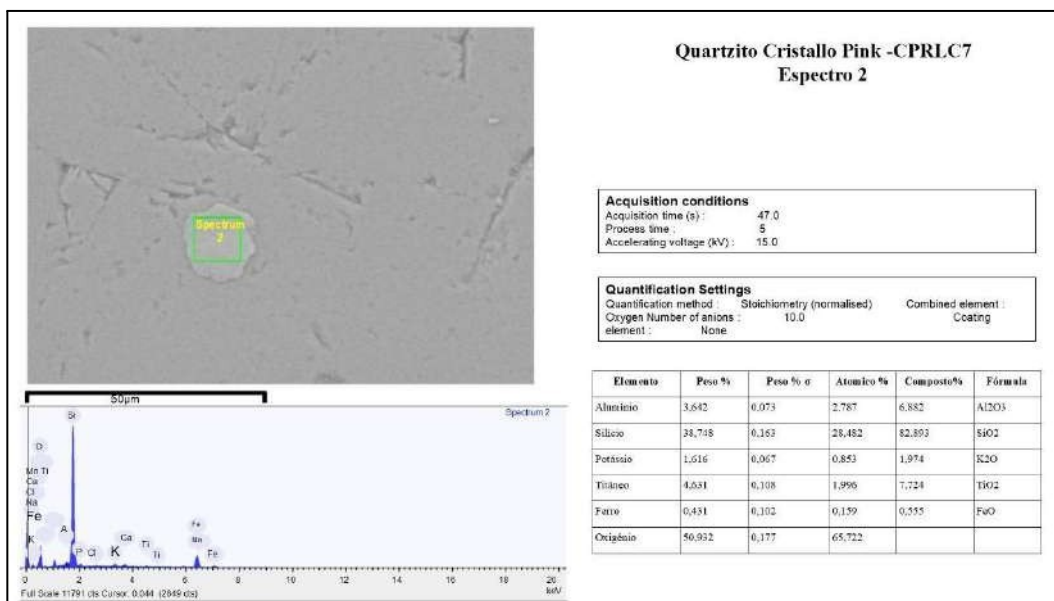
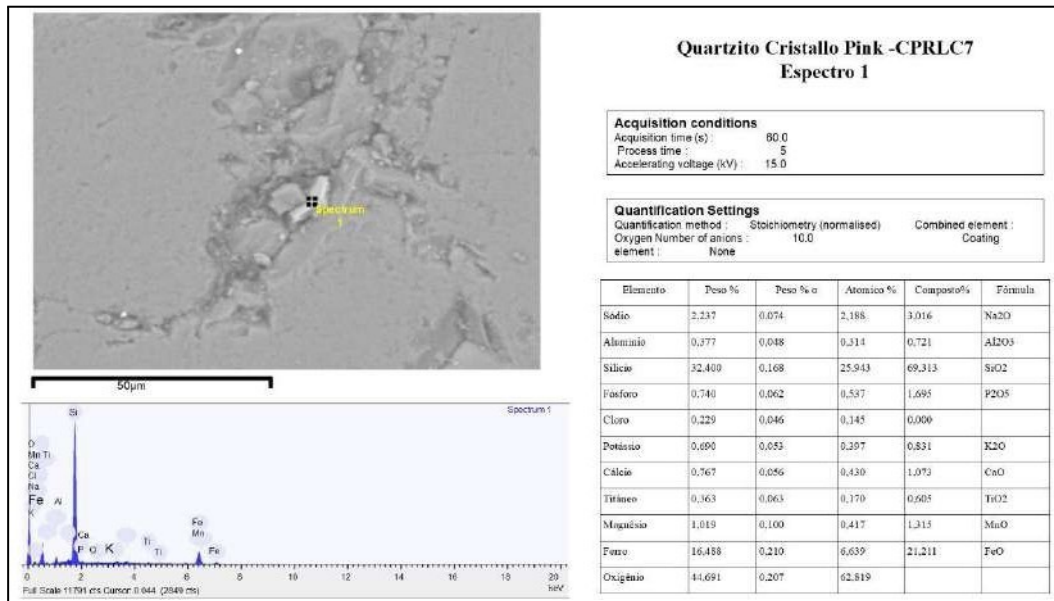
Fonte: Elaborado pela Autora. Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Espectro 6) do quartzito Perla Santana.



Fonte: Elaborado pela Autora. Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Efluorescência) do quartzito Perla Santana.

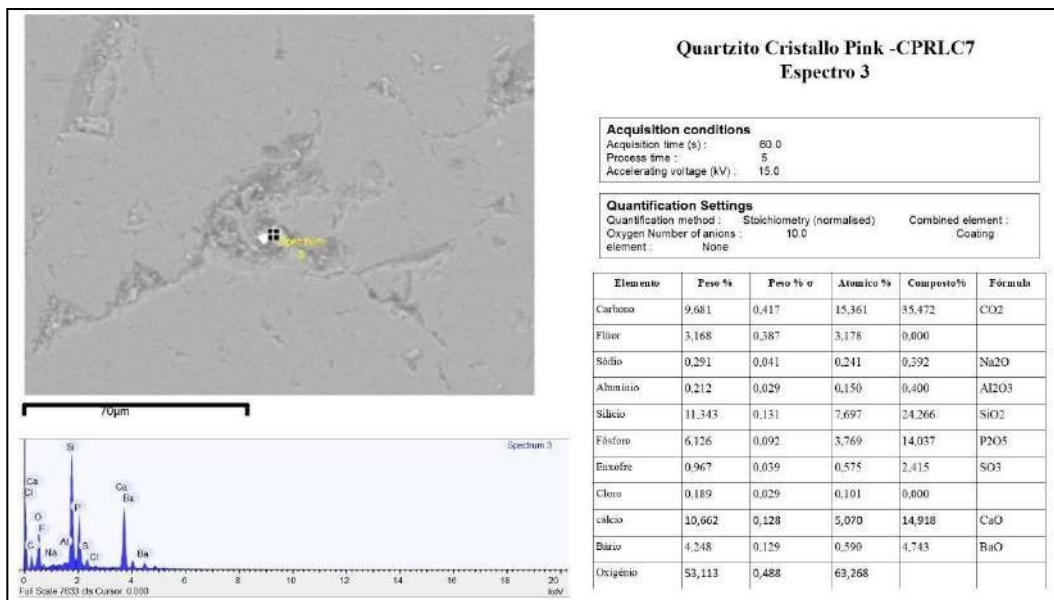


Fonte: Elaborado pela Autora. Síntese dos dados de Microscopia de Varredura Eletrônica na amostra PSRLP3 (Caulinite e Mica) do quartzito Perla Santana

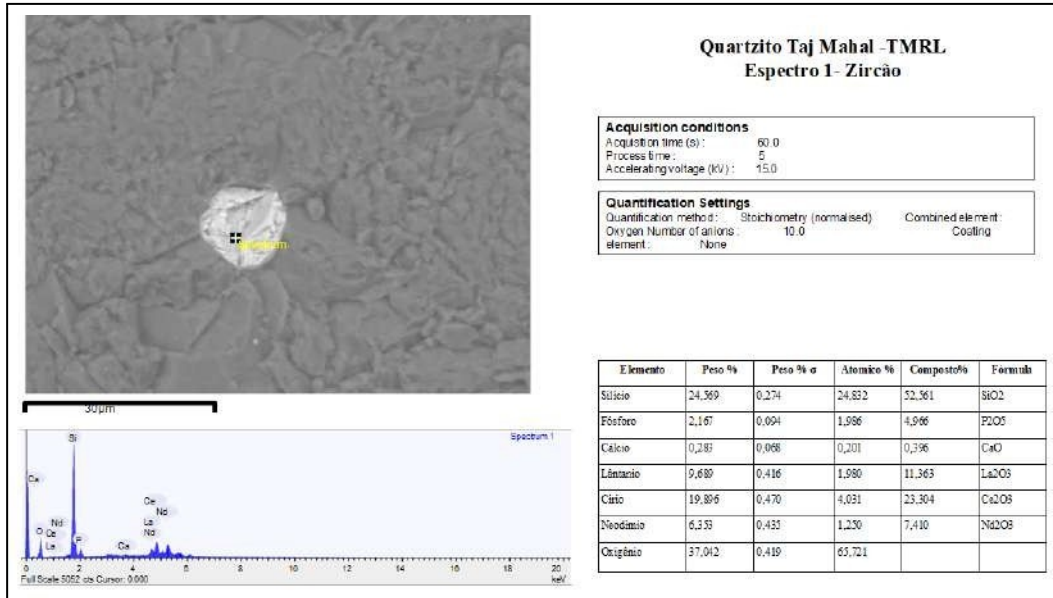


Fonte: Elaborado pela Autora.

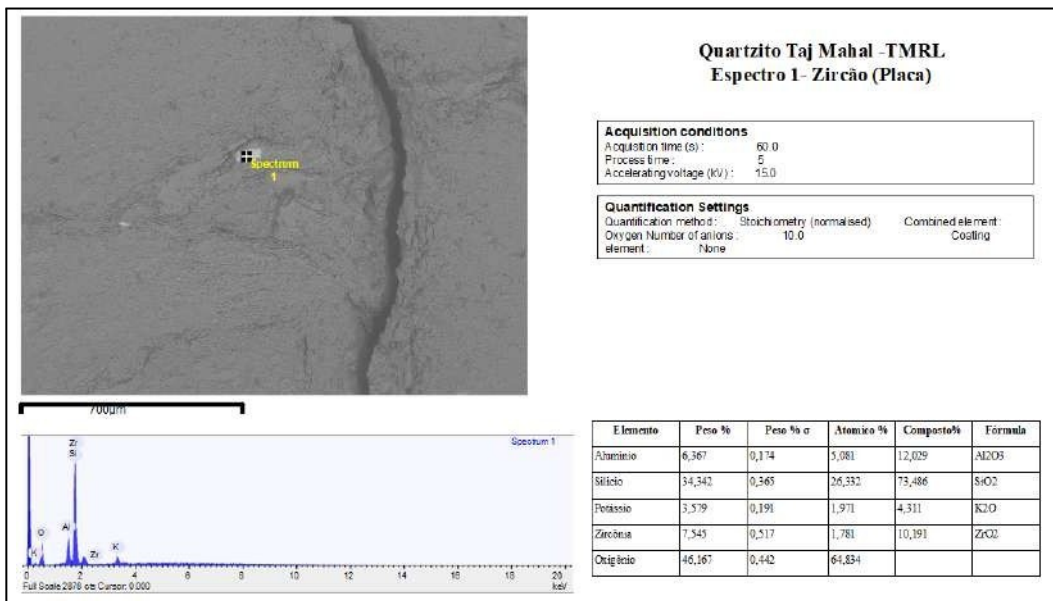
Fonte: Elaborado pela Autora.



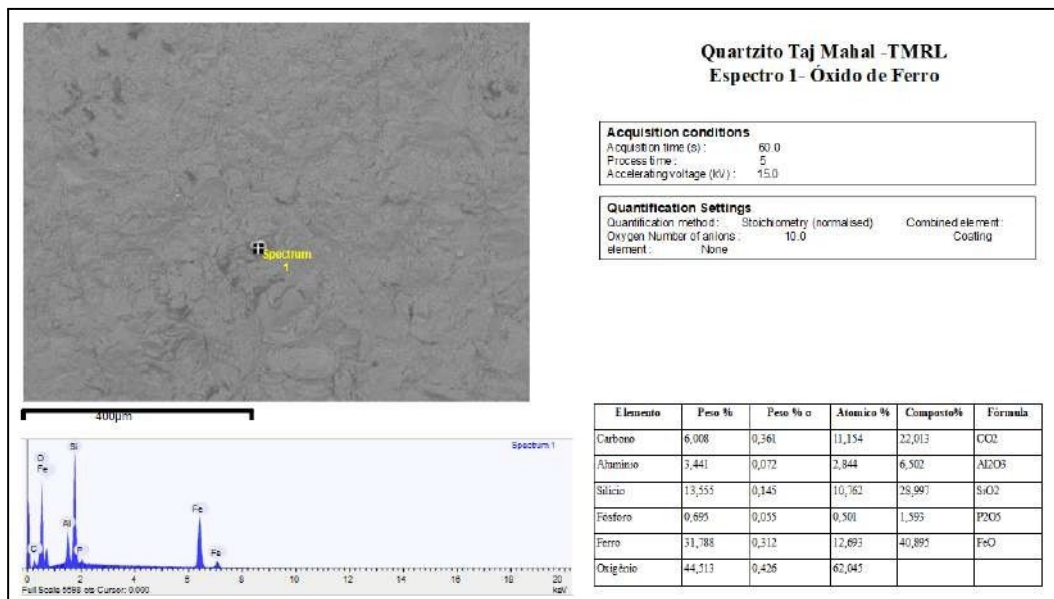
Fonte: Elaborado pela autora.



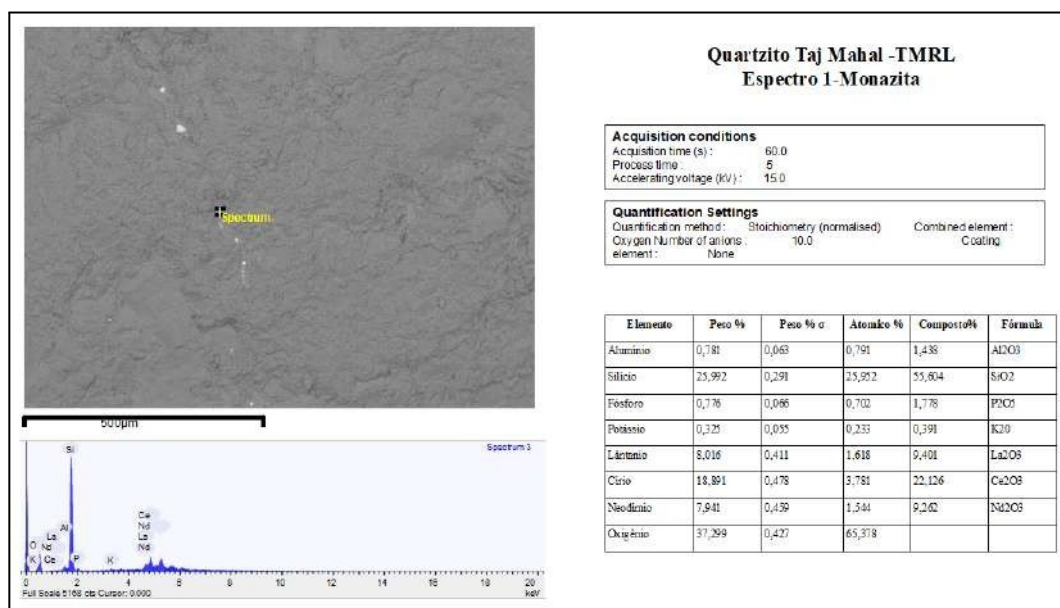
Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.