

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

GABRIEL RUVIARO GOMES

ANÁLISE MICROESTRUTURAL EM QUARTZITO COM COMPORTAMENTO FLEXÍVEL
DA FORMAÇÃO MOEDA, MINAS GERAIS

CURITIBA
2023

ANÁLISE MICROESTRUTURAL EM QUARTZITO COM COMPORTAMENTO FLEXÍVEL DA FORMAÇÃO MOEDA, MINAS GERAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Lagoeiro

CURITIBA

2023

RESUMO

Amostras de quartzito apresentando flexibilidade foram investigadas a partir da anisotropia física da rocha que pertence à Formação Moeda da Província Mineral do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Rochas com variações das propriedades mecânicas entre flexíveis em algumas porções e totalmente rígidas em outras são raras e encontradas apenas em alguns locais no mundo. A flexibilidade tem sido comumente relacionada à presença de minerais com hábito tabular que funcionam como suporte estrutural da rocha e controlam o movimento de flexão. Além disso, características intrínsecas desse tipo de rocha são marcadas por suas microestruturas e orientações cristalográficas preferenciais. Tais feições estão diretamente relacionadas às propriedades físicas do agregado e refletem os processos deformacionais aos quais foi submetido durante sua evolução. A fim de caracterizar as causas desta propriedade mecânica, foram preparadas seções de rochas com distintos comportamentos, flexível e rígido, e investigadas por meio de microscopia óptica, microscopia eletrônica associada à técnica de EBSD, EDS e Micro-CT. Os resultados obtidos indicam um sistema de deslizamento no plano romboédrico. Os valores de porosidade no micro-CT e resultados EDS, apontam para uma maior porosidade e possível lixiviação dos minerais na rocha flexível. As feições macroestruturais e texturais analisadas também indicam que a microtrama da rocha influencia na sua propriedade física de flexão, com grãos interconectados.

Palavras-chave: quartzito, flexível, itacolomito, MEV-EBSD

ABSTRACT

Quartzite samples showing flexibility were investigated based on the physical anisotropy of the rock belonging to the Moeda Formation of the Quadrilátero Ferrífero Mineral Province, Brazil. Rocks with variations in mechanical properties between flexible in some portions and totally rigid in others are rare and found only in a few places in the world. Flexibility has been commonly related to the presence of minerals with tabular habit that function as structural support of the rock and control the bending movement. In addition, intrinsic characteristics of this type of rock are marked by its microstructures and preferred crystallographic orientations. Such features are directly related to the physical properties of the aggregate and reflect the deformational processes to which they were maintained during its evolution. In order to characterize the causes of this mechanical property, sections of rocks with different behaviors, flexible and rigid, were prepared and investigated by means of optical microscopy, electronic microscopy associated with the technique of EBSD, EDS and Micro-CT. The results obtained indicate a system of options in the rhombohedral plane. Micro-CT porosity values and EDS results point to increased porosity and possible leaching of minerals in the flexible rock. The present macrostructural and textural features also indicate that the rock's microweave influences its physical property of bending, with interconnected grains.

Keywords: quartzite, flexible, itacolumite, MEV-EBSD

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
2. REVISÃO TEÓRICA	3
2.1 Contextualização Geológica.....	4
2.2 Quartzito flexível	6
2.3 Características cristalográficas do quartzo.....	7
2.4 MEV com EDS - EBSD	6
2.5 Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios-X (Micro-CT).....	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS	3
3.1 Microscopia Ótica.....	6
3.2 Técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD).....	6
3.3 Técnica de Detecção de Raios-X por Energia Dispersiva (EDS)	9
3.4 Técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD).....	6
3.5 Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios-X (Micro-CT)	9
4. RESULTADOS	18
5. DISCUSSÃO	39
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
7. REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

Itacolomitos são rochas com propriedades flexíveis, geralmente representadas por quartzitos e arenitos, rochas naturalmente rígidas, que são capazes de serem flexíveis até certo ponto, sem se romperem. Elas foram primeiramente descritas pelo geólogo e metalurgista alemão Wilhelm Ludwig von Eschwege em 1822, na região do Pico do Itacolomi, próximo a Ouro Preto (Minas Gerais). A descoberta desse tipo de rocha gerou grande interesse na época, pois Eschwege (1822) correlacionou a origem dos diamantes com os itacolomitos, o que só foi desmistificado por Derby em 1882. Desde então, exemplares similares foram encontrados em outras localidades de Minas Gerais (DERBY, 1884; HELMREICHEN, 1846; HEUSSER & CLARAZ, 1861) e ao redor do mundo (FEDDEN, 1877; GRANT, 1950; BESTE, 2005).

Atualmente, a propriedade de flexão desses quartzitos é um tema pouco estudado e não conclusivo no que refere-se a microestrutura, textura, tamanho e forma dos grãos relacionados a característica elástica da rocha. Estudos de orientação cristalográfica preferencial do quartzo nesse tipo de rocha ainda são escassos. O quartzo é um importante marcador de deformação. Além de apresentar uma estrutura de simetria relativamente simples, é um mineral amplamente estudado em vários contextos geodinâmicos.

No caso dos quartzitos da Formação Moeda, objetos de estudo do presente trabalho, a composição é essencialmente de quartzo com poucos filossilicatos e muitos espaços vazios nos exemplares flexíveis. Dessa forma, a flexibilidade presente na rocha, pode ter influência do arranjo espacial e cristalográfico dos minerais que a compõem, como também das condições ambientais e de transformação térmica a eles impostos.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho pretende analisar e descrever comparativamente microestruturas, texturas cristalográficas e aspectos composicionais e geométricos dos minerais presentes nas amostras de quartzito flexível e não-flexível provenientes da Formação Moeda. Buscando avançar na compreensão da mecânica dessa rocha,

através de novos dados que fomentem informações com estudos já realizados anteriormente, visto que, muitos trabalhos apresentam resultados não conclusivos no que se refere a característica elástica da rocha.

O tema abordado também traz aplicabilidade no âmbito da ciência dos materiais, pois o estudo da estrutura flexível do quartzito pode contribuir para o desenvolvimento de materiais com mecanismo similar.

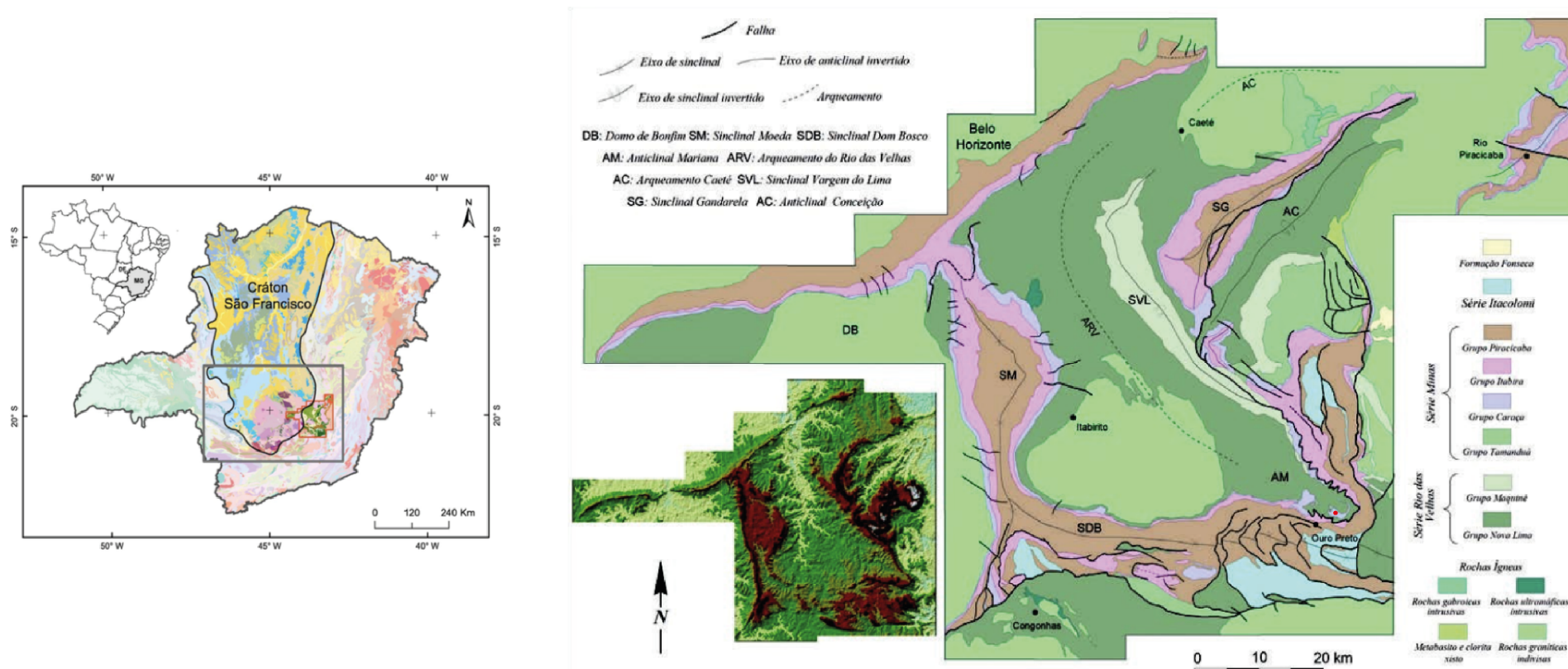
2. REVISÃO TEÓRICA

2.1 Contextualização Geológica

Os quartzitos da Formação Moeda, objeto de estudo deste trabalho, pertencem ao Grupo Caraça. Segundo Alkmim & Marshak (1998) esse grupo constitui a porção basal do Supergrupo Minas (Paleoproterozóico), representando na bacia uma fase de transição para margem passiva. Todo esse conjunto encontra-se inserido no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero (figura 1), cuja complexidade estrutural deve-se à interação dos ciclos orogênicos Transamazônico e Brasileiro que afetaram a região no paleoproterozoico e neoproterozoico respectivamente.

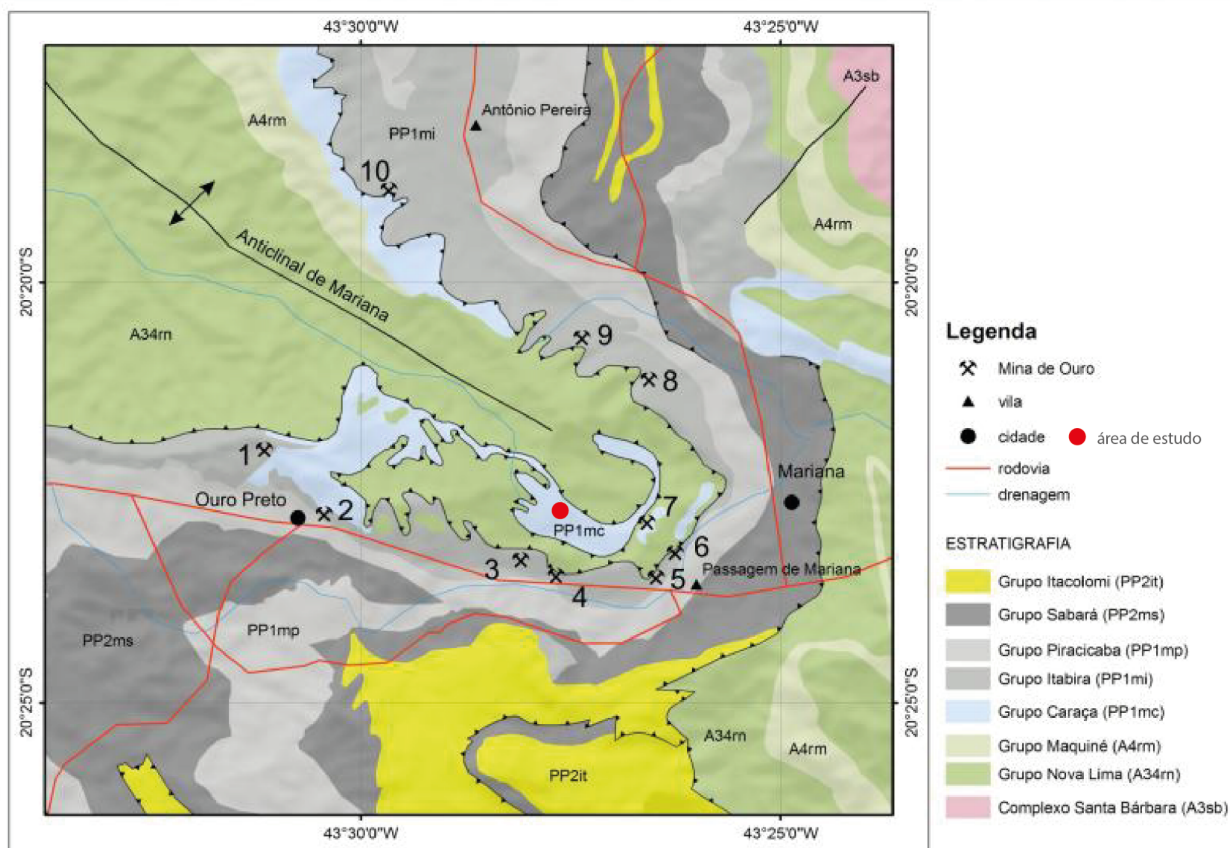
Regionalmente, as rochas do Supergrupo Minas caracterizam uma expressiva estrutura regional que circunda o quadrilátero formando dobras, destacando-se para a região estudada a Sinclinal Dom Bosco e a Anticlinal Mariana. As rochas da Formação Moeda aqui estudadas afloram na porção sudeste da região (coordenadas 20.37869° S, 43.45884° W) próximas a Ouro Preto (figura 2), apresentando localmente variações verticais, com faixas de quartzitos flexíveis e não-flexíveis. Essa diferença pode ter sido provocada pela percolação de fluidos remobilizados pelos eventos deformacionais e/ou provindos de eventos magmáticos regionais, como também a influência dos eventos deformacionais na região estudada pode ter sido menos intensa.

Figura 1 - Contexto geológico da área de estudo.



Fonte: Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos.

Figura 2 - Localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de CPRM (2022)

2.2 Estado da arte

Descobertos primeiramente no Brasil, os quartzitos com características flexíveis da Formação Moeda, vem sendo estudados desde 1822. Por se pensar ser um novo tipo de rocha, foram descritos na época como “Itacolomitos”, devido sua ocorrência próximo ao Pico do Itacolomi em Minas Gerais. Porém esse termo por vezes é usado erroneamente, visto que os quartzitos da Formação Pico do Itacolomi não são flexíveis (Siegesmund *et al.*, 2002). Atualmente, essas rochas podem ser encontradas em vários locais do mundo, como Estados Unidos, Índia e Madagascar, tanto na forma de quartzito como em arenito em menor proporção (FEDDEN, 1877; GRANT, 1950; SUZUKI, 2011).

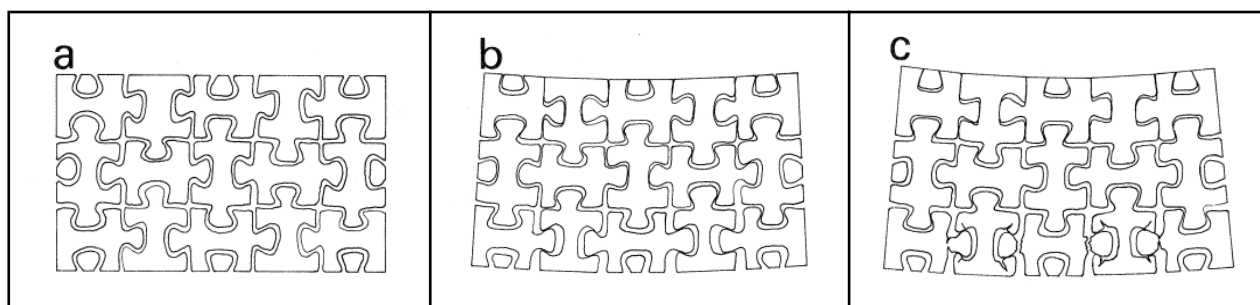
Vários estudos foram feitos a fim de compreender seu comportamento flexível. Segundo Carozzi (1960) e Dusseault (1980), essa propriedade não possui relação com a presença de nenhum tipo de cimento na rocha, mas sim com a forma complexa com que os minerais se arranjam, associada com a textura e microestrutura desses

minerais na rocha.

Análises em microscópio óptico e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas por Suzuki & Shimizu (1993) em amostras do Brasil, dos Estados Unidos e da Índia. As conclusões indicam características típicas do que se espera de um quartzito, como orientação preferencial dos grãos, limites planos bem definidos entre quartzo e muscovita e junções tríplices nos cristais de quartzo. É importante também notar que o total de espaços vazios nos itacolomitos também é o dobro do total presente nos quartzitos não flexíveis. Os resultados em MEV obtidos também reafirmam a interconexão entre os grãos e os espaços vazios entre eles.

Segundo Devries & Juglet (1968) e Sanaka (1989), a estrutura dessa rocha pode ser comparada a um quebra-cabeça, onde os grãos no quartzito possuem certa mobilidade devido a existência de espaços intergranulares entre as ligações de um grão para o outro. Quando dobrados, tanto um quebra-cabeça quanto o quartzito flexível atingem um ponto final de rigidez máxima, se comportando elasticamente até certo limite até se romperem.

Figura 3 - Processo de fraturamento no itacolomito segundo o modelo quebra-cabeça. Rocha antes da deformação (a), rocha deformada (b) e estágio de fraturamento (c)



Fonte: Sanaka (1989) e Suzuki et al. (1993).

O papel da muscovita na flexibilidade da rocha também é bastante discutido. A maioria dos autores defendem que ela possui apenas um papel estrutural, não sendo responsável diretamente pela flexibilidade. A quantidade de muscovita também diminui nos quartzitos flexíveis em comparação às espécimes rígidas (Suzuki & Shimizu, 1993), assim sua contribuição estrutural parece ser secundária.

O possível crescimento concomitante de quartzo e muscovita gerando uma coesão estrutural na rocha, associado posteriormente a um fluido pervasivo que teria lixiviado parcialmente a muscovita. Essas são hipóteses que poderiam explicar o forte

encaixe dos grãos e a porosidade da rocha (DEVRIES & JUGLET, 1968; SUZUKI & SHIMIZU, 2003).

2.3 Aspectos cristalográficos do quartzo:

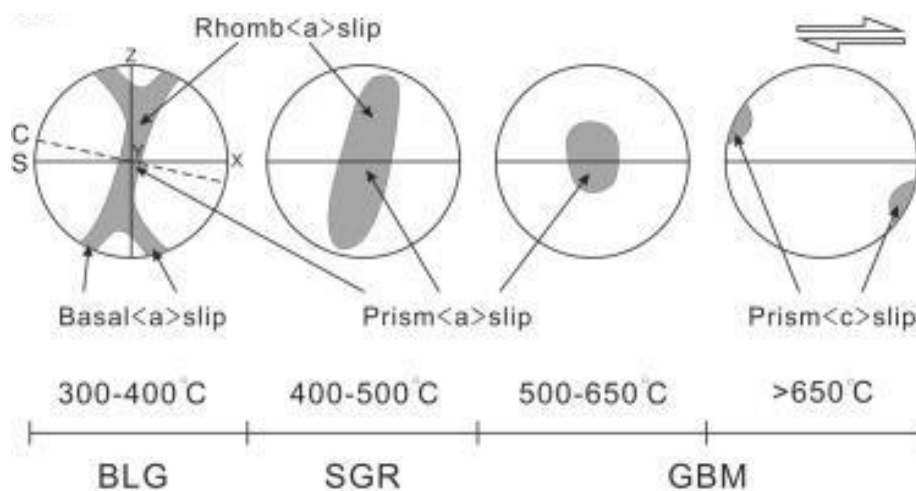
O quartzo (SiO_2) encontra-se presente na maioria das rochas da crosta terrestre. Por ser um mineral muito abundante e resistente ele é um importante marcador de deformação. Além de apresentar uma estrutura de simetria relativamente simples, é um mineral amplamente estudado em vários contextos geodinâmicos.

Dependendo da taxa de deformação, os cristais de quartzo irão se reorganizar segundo os mecanismos de recristalização dinâmica. Esse mecanismo foi descrito por Guillopé & Poirier (1979) como um retrabalhamento mineral controlado por deformação no tamanho, forma e orientação dos grãos com pouca ou nenhuma alteração química. Na escala cristalográfica essa recristalização ocorre por meio dos planos de deslizamento mineral (*slip*), que é o deslizamento em determinados planos e direções cristalográficas preferenciais dos minerais. Esse processo resulta numa mudança de direção do plano cristalográfico e conseqüente orientação preferencial do cristal (CPO).

Stipp *et al.*, (2002), descrevem três principais tipos de mecanismos de recristalização. Em temperaturas entre 300° e 400° a recristalização ocorre por meio do *bulging*, segundo o sistema de deslizamento basal $[c]\langle a \rangle$. Em temperaturas entre 400° e 500° , o mecanismo dominante é a rotação de subgrão segundo o sistema de deslizamento romboédrico $\{r\}\langle a \rangle$ e $\{z\}\langle a \rangle$. Por fim, a migração de limite de grão ocorre em condições entre 500° e 650° com a continuidade dos sistemas de deslizamento basal e romboédrico e ativação do sistema de deslizamento prismático $\{z\}\langle a \rangle$.

Na figura 4 é possível observar a relação entre cinemática e planos de deslizamento do quartzo. O plano de deslizamento mais favorável no quartzo é controlado pelo eixo $\langle a \rangle$. Durante a deformação coaxial, a figura de polo dos planos do quartzo evoluem de um máximo localizado na periferia do polo, que indica um deslizamento basal em $\langle a \rangle$, para uma única guirlanda com dois máximos nas extremidades indicando um deslizamento romboédrico em $\langle a \rangle$ até chegar num único máximo no centro do polo, revelando um deslizamento prismático em $\langle a \rangle$, sendo que a orientação das guirlandas vai depender do sentido da deformação (dextral na figura 3). Por fim, em condições de alta temperatura ocorre o deslizamento prismático em $\langle c \rangle$, com máximos na periferia do polo.

Figura 4 - Distribuição das figuras de polo para os diferentes sistemas de deslizamento do quartzo. Abaixo a relação desses sistemas com os mecanismos de recristalização.



Fonte: Wu *et al.*, (2017)

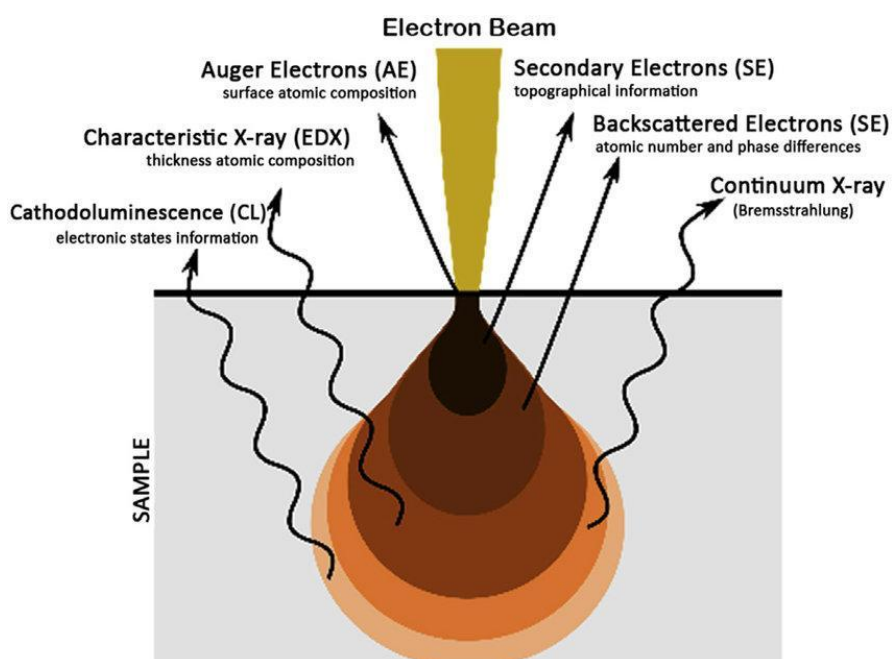
Neste trabalho feições de recristalização mineral e as orientações cristalográficas preferenciais do quartzo são usados na tentativa de determinar uma orientação preferencial dos cristais que justifique/explique a conectividade/encaixe dos grãos de quartzo que explicariam a flexibilidade do quartzito.

2.4 Técnicas analíticas

2.4.1 Técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura com detectores EDS e EBSD e FSD

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um instrumento que permite analisar as propriedades texturais e estruturais de diversos materiais em escala nanométrica, incluindo metais, rochas, cerâmicas, polímeros e amostras biológicas. A técnica envolve a emissão de uma feixe de elétrons que interagem com os átomos da superfície da amostra analisada (figura 5), gerando elétrons secundários, elétrons retroespalhados e fótons (raios-X e outras irradiações) que serão analisados por seus respectivos detectores acoplados ao MEV (NAGATANI *et al.* 1987; DEDAVID *et al.* 2007).

Figura 5 - Dispersão de elétrons e fótons no Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Ezzahmouly, M. *et al.* (2019)

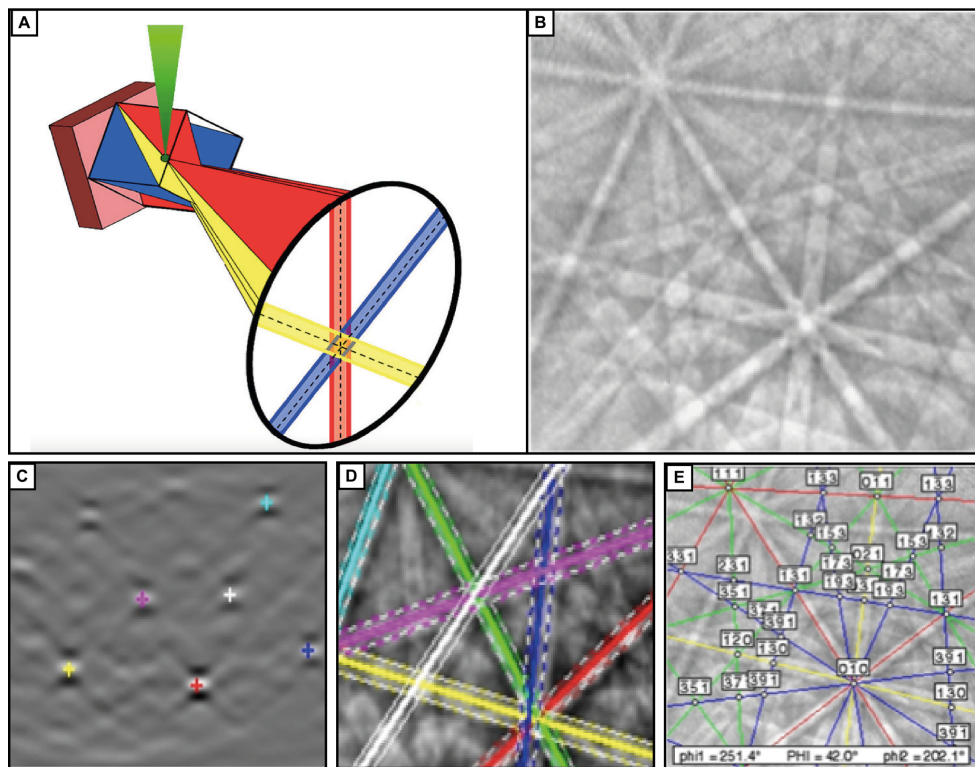
Os elétrons secundários (SE) resultam da colisão inelástica dos elétrons primários com a superfície da amostra, resultando numa perda de energia. Esses elétrons caracterizam os primeiros nanômetros da superfície da amostra e são úteis para visualização de sua topografia e morfologia. Eles são lidos no MEV a partir do Detector de Elétrons Secundários.

Já os elétrons retroespalhados resultam de uma colisão elástica (onde não há perda de energia) com a amostra que resulta num desvio em sua trajetória. Devido a maior energia e maior penetração dentro do objeto analisado, as imagens produzidas pelos elétrons retroespalhados mostram uma alta sensibilidade a diferenças de número atômico nesse objeto. Com o auxílio dos Detectores de Elétrons Retroespalhados (BSD) essas diferenças são evidenciadas na imagem por intensidades distintas nos tons de cinza permitindo uma diferenciação das fases presentes, quanto mais alto seu número atômico mais iluminada será a região (THERMO FICHER SCIENTIFIC, 2022).

O EBSD (*electron backscatter diffraction* ou difração de elétrons retroespalhados) é uma técnica que permite a visualização detalhada das propriedades cristalográficas da amostra. Ele fornece mapas de orientação cristalográfica, ângulo de *desorientação entre pontos dos cristais*, tamanho dos grãos e suas relações de contato (borda de grãos).

Após a incidência do feixe de elétrons na amostra, são gerados cones de Kossel, que são projetados na tela de fósforo para gerar as bandas de Kikuchi, o padrão dessas bandas respeitam a Lei de Bragg e seu conjunto reflete as características cristalográficas do mineral. A imagem obtida na tela de fósforo é então submetida a transformada de Hough, gerando pontos de maiores picos na imagem. Esses pontos permitem o traçado de linhas com maior intensidade de difração, que terão seus ângulos calculados e comparados via software a uma base de dados de planos cristalográficos correspondentes aos planos registrados (figura 6) (MORALES *et al.*, 2007; MOREIRA, 2012).

Figura 6 - (A) Registro das linhas de Kikuchi, pela interseção dos cones de Kossel com uma tela de fósforo, conforme os planos atômicos presentes na amostra; (B) Padrões de difração elétrons retroespalhados (EBSP); (C) Aplicação da transformada de Hough; (D) Detecção de bandas de Kikuchi e (E) Indexação dos planos cristalográficos.



FONTE: Técnicas de microscopia eletrônica de varredura para caracterização de materiais, Universidade de São Paulo.

Além disso, diodos presentes no perímetro da tela de fósforo do detector EBSD, também captam elétrons dispersos que devido a inclinação da amostra não atingem a tela do detector e são projetados em outras direções. Esses diodos são chamados de Detectores de Dispersão Direta (FSD) e permitem que um operador colete rapidamente

uma imagem de alta intensidade e alto contraste da superfície da amostra devido à maior quantidade de energia dos elétrons retroespalhados. Esses resultados dependem da posição do diodo em relação à tela de fósforo ou, mais importante, em relação ao ponto de incidência do feixe na amostra.

Por fim, para a leitura dos raios-x, o feixe de elétrons primários do MEV incide na amostra transferindo parte de sua energia e excitando seus elétrons. Devido ao seu novo estado de energia eles “pulam” para uma camada de maior valência buscando equilíbrio. Ao fazerem essa transição, deixam no átomo uma vacância com carga positiva. Essa carga então atrai um outro elétron de uma camada maior carregado negativamente, que ao preencher esse espaço libera sua energia excedente na forma de raios-x (Thermo Fisher Scientific, 2022). Com o auxílio do detector de Espectroscopia de raios-x por dispersão de energia (EDS) é possível escolher pontos de interesse na amostra para realizar uma análise química. A energia de raios-x emitida será então lida pelo equipamento e classificada de acordo com a energia de emissão característica de cada elemento químico (GOLDSTEIN *et al.*, 2003).

1.3.1 Técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios-X (Micro-CT) :

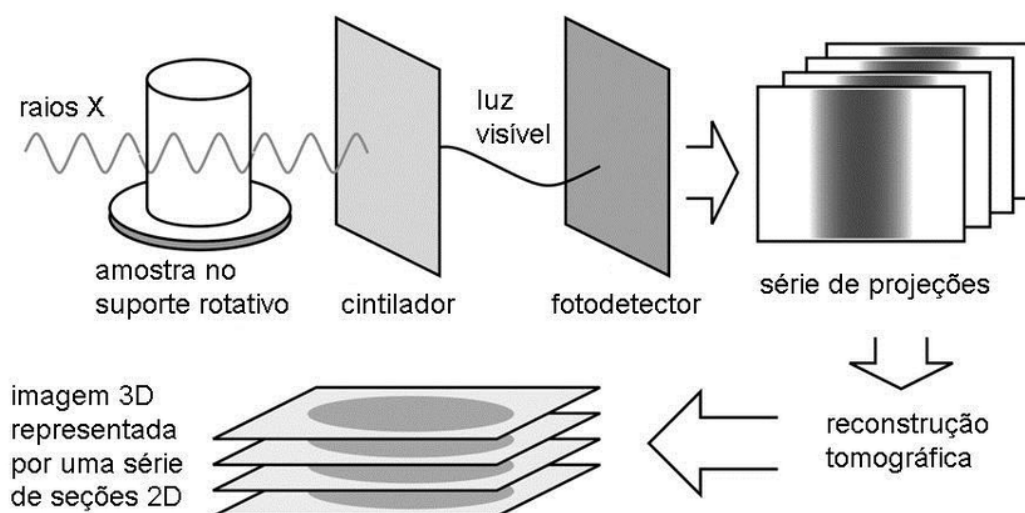
A Microtomografia Computadorizada de Raios-X (Micro-CT) permite a visualização de seções transversais em três dimensões de objetos de uma forma não-destrutiva, através da reconstrução de centenas de imagens bidimensionais, obtidas de múltiplos ângulos em torno da amostra.

Seu princípio de funcionamento baseia-se na capacidade dos materiais de absorverem os raios-x, chamado de coeficiente de atenuação. Assim, cada material reage de uma forma diferente a esse feixe exibindo intensidades distintas de absorção e refração, que dependem do número atômico dos elementos que compõem o objeto de análise. A radiação que consegue passar pela amostra atinge o detector que a transforma em luz visível (fótons), que geram um sinal eletrônico, que é enviado a um computador onde os dados são processados (figura 7).

O software de análise tridimensional reúne então as projeções bidimensionais captadas, por meio de um algoritmo matemático de reconstrução pré estabelecido. Posteriormente, através dos softwares de avaliação de imagens, o modelo tridimensional gerado pode ser cortado em qualquer orientação para revelar diferentes pontos de vista

da estrutura interna da amostra (figura 7).(MACHADO *et al.*, 2014; LOPES *et al.*, 2012; LI *et al.*, 2008).

Figura 7 - Ilustração esquemática do processo de aquisição e reconstrução das imagens obtidas com a técnica de Micro-CT.



Fonte: Landis e Keane (2010)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Duas amostras foram analisadas neste trabalho, classificadas aqui como a amostra de quartzito completamente coeso, o quartzito rígido (QR), e a amostra com a propriedade de flexão, o quartzito flexível (QF). Ambas foram coletadas e cedidas pelo Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro (UFPR). As análises foram realizadas por meio das técnicas de: Microscopia ótica, Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD); Espectroscopia de raios-x por dispersão de energia (EDS) e Microtomografia Computadorizada por difração de Raios-X (Micro-CT);

3.1 Microscopia Ótica

Depois de seccionar as amostras, confeccionou-se uma seção delgada para cada uma, paralela ao eixo X de referência (direção de máximo estiramento). A fim de identificar a mineralogia da rocha e texturas minerais em microscópio óptico, além de posterior análise das lâminas petrográficas pela técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados.

3.2 Técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD)

O polimento mecânico das lâminas petrográficas, necessário para a aplicação da técnica de EBSD foi feito em uma politriz MINIMET 1000, da marca Buehler. Uma sequência de abrasivos em solução de diamante foram utilizados com granulação decrescente 6, 3, 1 e 0,25 μm . O acabamento final da superfície da amostra foi feito utilizando sílica coloidal com ph 11 produzindo uma superfície perfeitamente plana sem qualquer tipo de relevo. Todo o processo foi conduzido no laboratório de preparação de amostras duras do Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR (CME). A aquisição dos dados com a técnica de EBSD foi realizada pelo Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) e o processamento desses dados no Centro de Microscopia Eletrônica (CME). O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado é do tipo *Field Emission Gun* (FEG), modelo Mira3 LM da marca Tescan. As análises foram realizadas com um espaçamento entre pontos de leitura de 4 μm .

O processamento e análise dos dados foi realizada com o *software* AZtec Crystal da Oxford Instruments. O pacote de aplicativos da suíte AZtec Crystal foi utilizada para a produção de mapas de orientações cristalográficas e geração de figuras de polo. Os dados de desorientação dos quartzitos foram representados por histogramas de distribuição dos ângulos de desorientação, que permitem a identificação da diferença de orientação angular entre dois pixels vizinhos (correlacionados), diagramas de eixo de rotação, que caracterizam a direção do eixo em que os cristais correlacionados rotacionam, além do mapa de contorno dos grãos com a caracterização das bordas desses grãos de acordo com os ângulos de *desorientação*.

3.3 Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS)

As amostras QR e QF foram analisadas também por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS). O equipamento utilizado é da marca EDAX-TSL modelo Octane Elect Plus - com chip de 30 mm^2 instalado em um microscópio eletrônico de varredura com canhão de emissão de campo (FEG) Quanta 450 da marca Thermo FEI. Os dados obtidos permitiram examinar a microestrutura das amostras com a obtenção de imagens de alta resolução e obter informações pontuais sobre a composição química das mesmas.

3.4 Técnica de Microtomografia Computadorizada de Difração de Raios-X (Micro-CT)

O Equipamento utilizado nesta técnica foi um Microtomógrafo da marca Zeiss, modelo Xradia 510 Versa (figura x), que possui um sistema de lentes para seleção de volumes de interesse (IVOÍ's). A tensão de aceleração é de até 160 kV de energia, com potência de 10 W e resolução espacial de até 0,7 μm . Foram geradas imagens de 3 planos de corte perpendiculares para visualização 3D, todos com tamanho do pixel de aproximadamente 9 μm

Para a etapa de reconstituição das seções obtidas e tratamento dos dados, foram utilizados os softwares *CTAnalyser* (Kharitonov 2003) para geração dos parâmetros quantitativos e visualização de matriz e poros; *CTVol* (Kharitonov 2010) para visualização 3D de fases minerais distintas e *CTVox* para a análise volumétrica sob diversos cortes (Boons 2010). Ainda foi realizado um recorte de 7mm³ na área de abrangência de leitura dos *softwares* em ambas as amostras, a fim de padronizar o processo e minimizar ruídos na análise nas regiões próximas às bordas do material analisado.

4 RESULTADOS

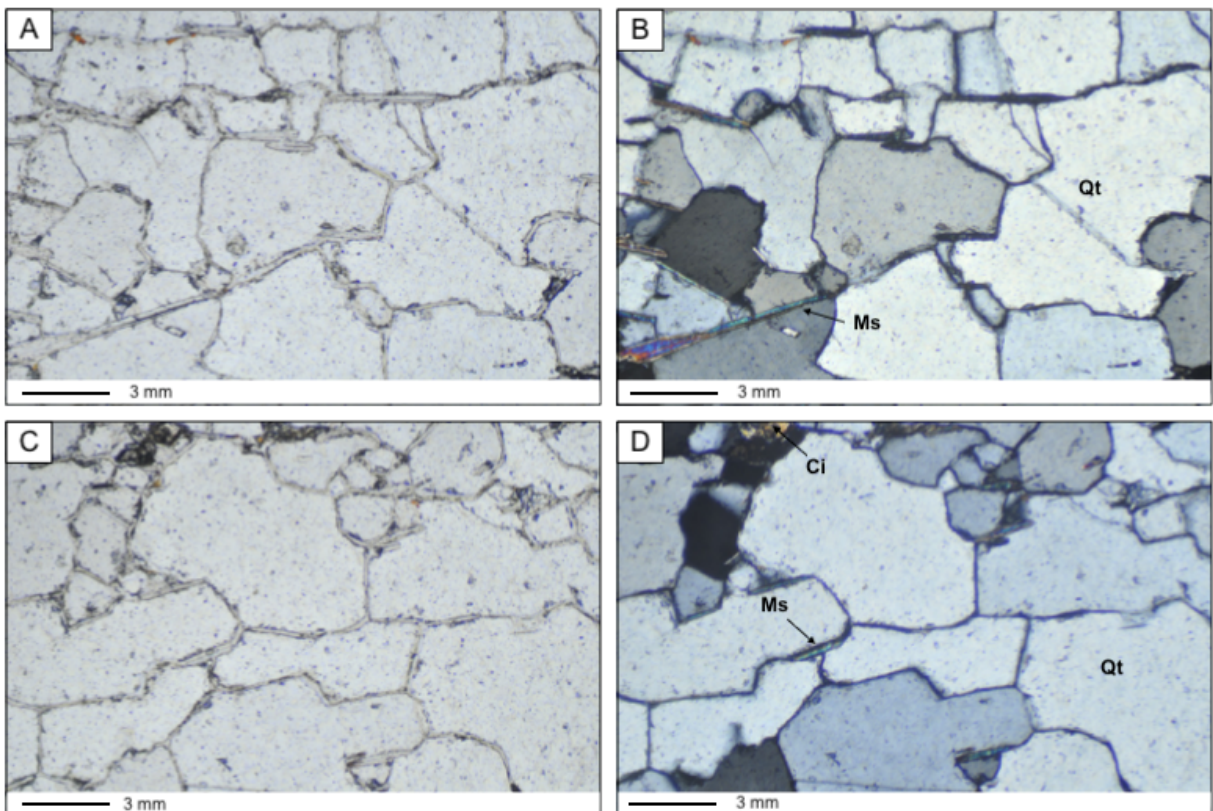
4.1 Petrografia

Ao microscópio ótico foram caracterizados quartzo, muscovita e cianita para ambas amostras de quartzito rígido (QR) e flexível (QF).

A amostra rígida (figura 8) contém 75% de quartzo, 10% de muscovita e 5% de cianita. Os grãos de quartzo possuem bordas retas e contatos poligonais com junções de aproximadamente 120° e extinção ondulante moderada. Também é possível observar feições de deformação, representadas pela formação de subgrãos. A orientação preferencial de forma é forte e marcada pela muscovita e cianita e subordinadamente o quartzo. A distribuição do tamanho dos grãos varia entre 50 e 300 μm .

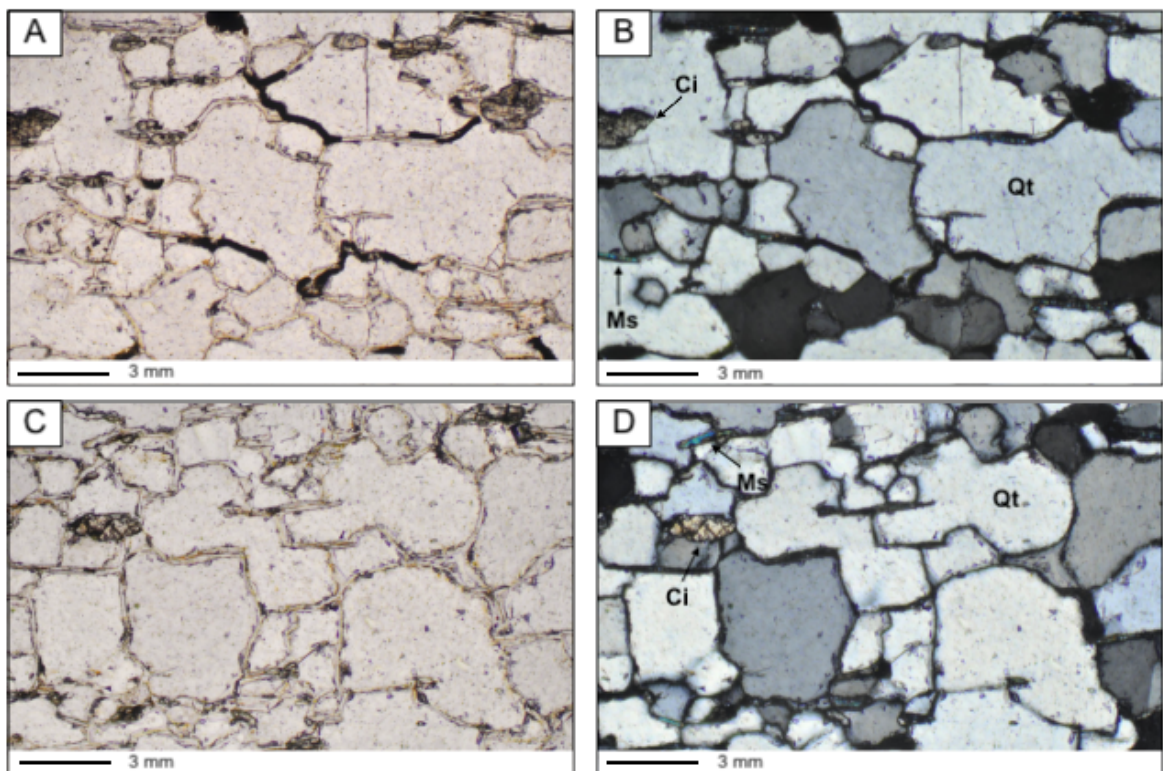
Já a amostra flexível (figura 9) possui 85% de quartzo, 20% de muscovita e traços de cianita. Os grãos de quartzo também possuem bordas retas e contatos poligonais com junções de 90° a 120°, extinção ondulante moderada e a muscovita também ocorre envolvendo os grãos de quartzo. Também é possível observar a rotação de subgrão e uma incipiente migração de limite de grão. A orientação preferencial no QF é menos intensa que na do QR, sendo considerada moderada a fraca. A granulação geral da rocha também varia de média a fina.

Figura 8 - AB e CD representam fotomicrografias do quartzito rígido em polarizadores paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita). (Qt: quartzo; Ms: muscovita; Ci: cianita)



Fonte: O autor (2023)

Figura 9 - AB e CD representam fotomicrografias do quartzito flexível em polarizadores paralelos (à esquerda) e cruzados (à direita). (Qt: quartzo; Ms: muscovita; Ci: cianita)



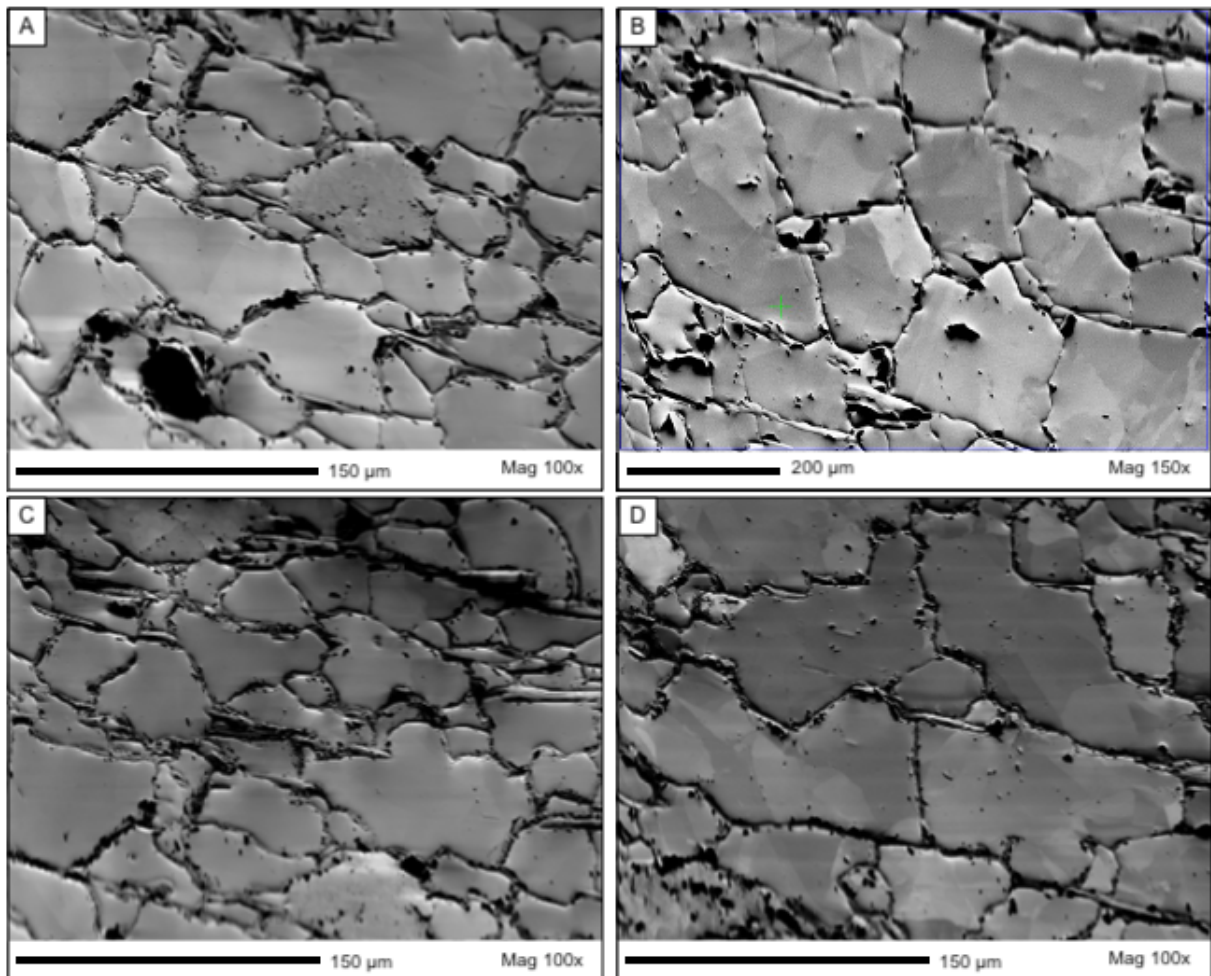
Fonte: O autor (2023)

4.2 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

4.2.1 Forescatter Electrons Detector (FSE)

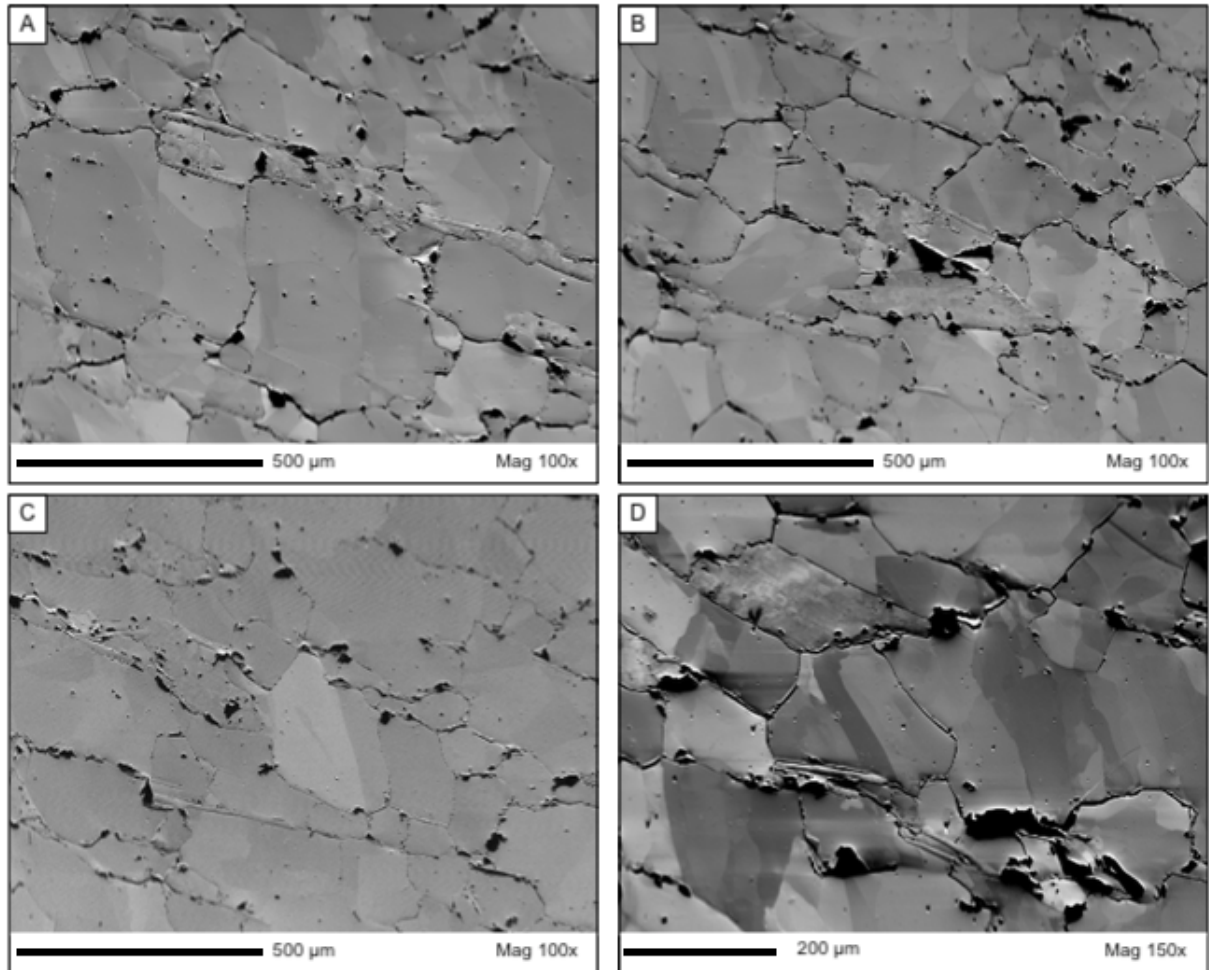
As imagens produzidas por FSE (figuras 10 e 11) fornecem contrastes de orientação. Esses detectores são mais sensíveis e permitem um alto contraste o que o tornou uma ferramenta importante para detectar pequenos desvios de orientação no interior dos cristais. Além disso, borda ou limites de grãos não emitem contrastes e se tornam completamente pretos, o que permite avaliar qualitativamente a natureza das interfaces. É nítido o contraste entre as bordas dos quartzito flexíveis quando comparados às variedades rígidas. Outro aspecto que chama a atenção é que o contraste de orientação é mais pronunciado no tipo rígido o que, de uma maneira mais grosseira, pode-se inferir que estes mostram mais sinais de deformação

Figura 10 - Fotomicrografias do quartzito flexível com o detector FSE.



Fonte: O autor (2023)

Figura 11 - Fotomicrografias do quartzito rígido com o detector FSE.

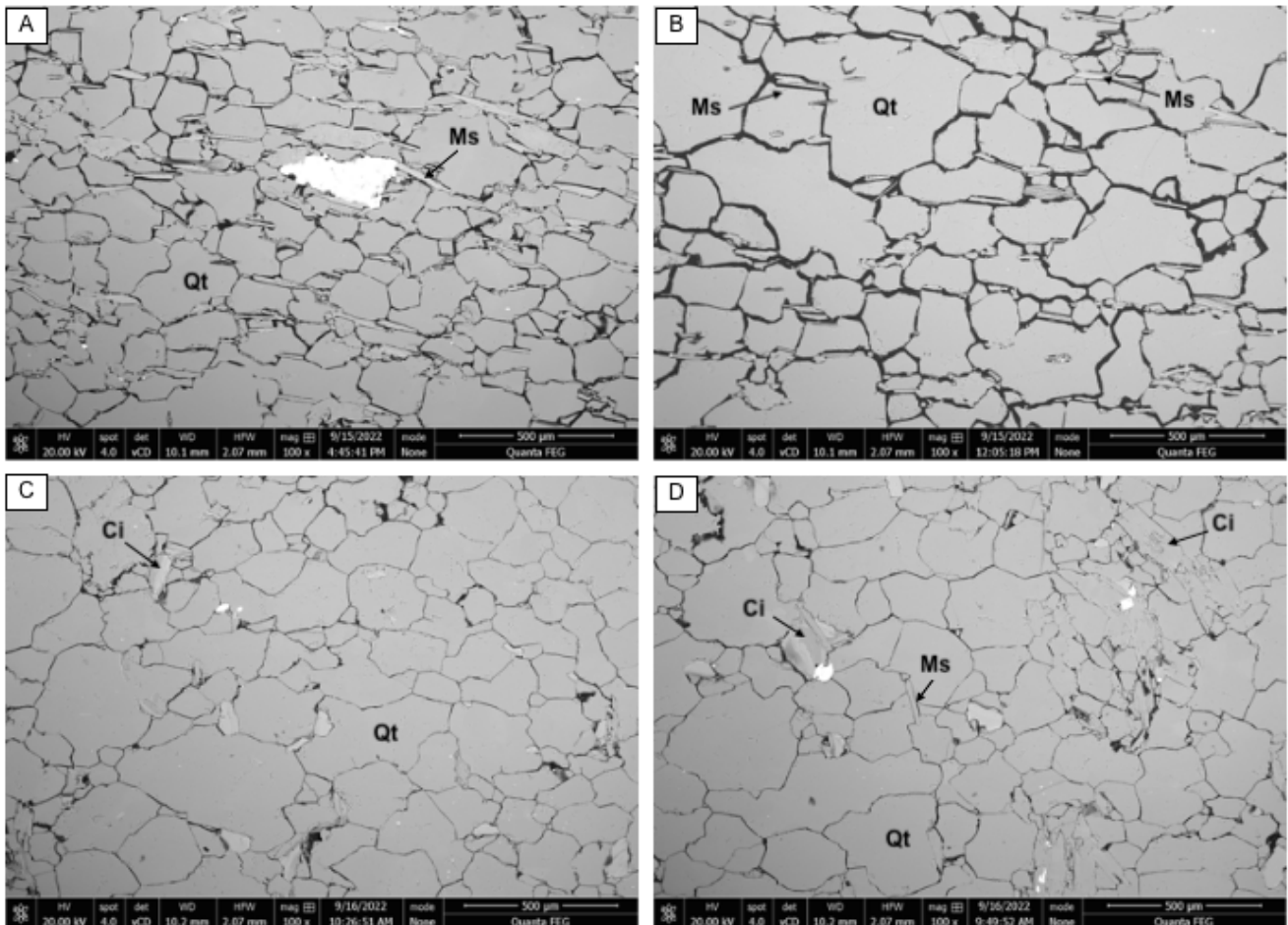


Fonte: O autor (2023)

4.2.2 Backscatter Electron Detector (BSE)

As imagens geradas por retroespalhamento de elétrons (BSE) (figura 12), enfatizam o contraste por tons de cinza entre minerais de diferentes composições químicas. De uma maneira menos evidente é possível também observar os contatos mais abertos entre os grãos de quartzo. As muscovitas mostram pouco contraste quando comparadas aos grãos de quartzo. No entanto, a sua forma característica permite uma fácil distinção. Ao contrário dos minerais com elementos químicos mais pesados, como o caso do material claro que aparece na imagem identificado como rutilo. A presença desse mineral é importante pois indica que o titânio pode também ter sido incorporado ao retículo do quartzo, o que eventualmente pode ser para determinação da temperatura de formação da rocha, pelo método de titânio em quartzo.

Figura 12 - Fotomicrografia do quartzito flexível (A e B) e rígido (C e D) com o detector BSE.



FONTE: O autor (2023)

4.2.3 Difração de elétrons retroespalhados (EBSD)

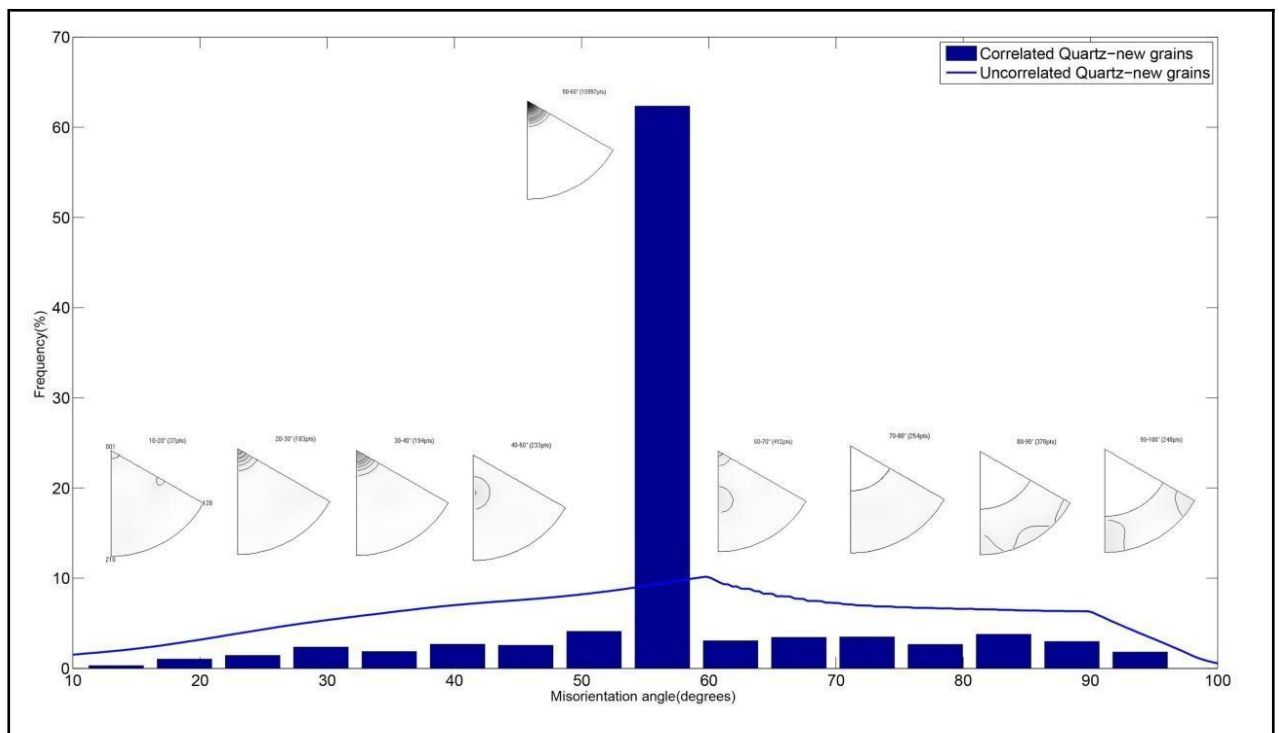
4.2.3.1 Histogramas e mapas de distribuição dos ângulos de desorientação

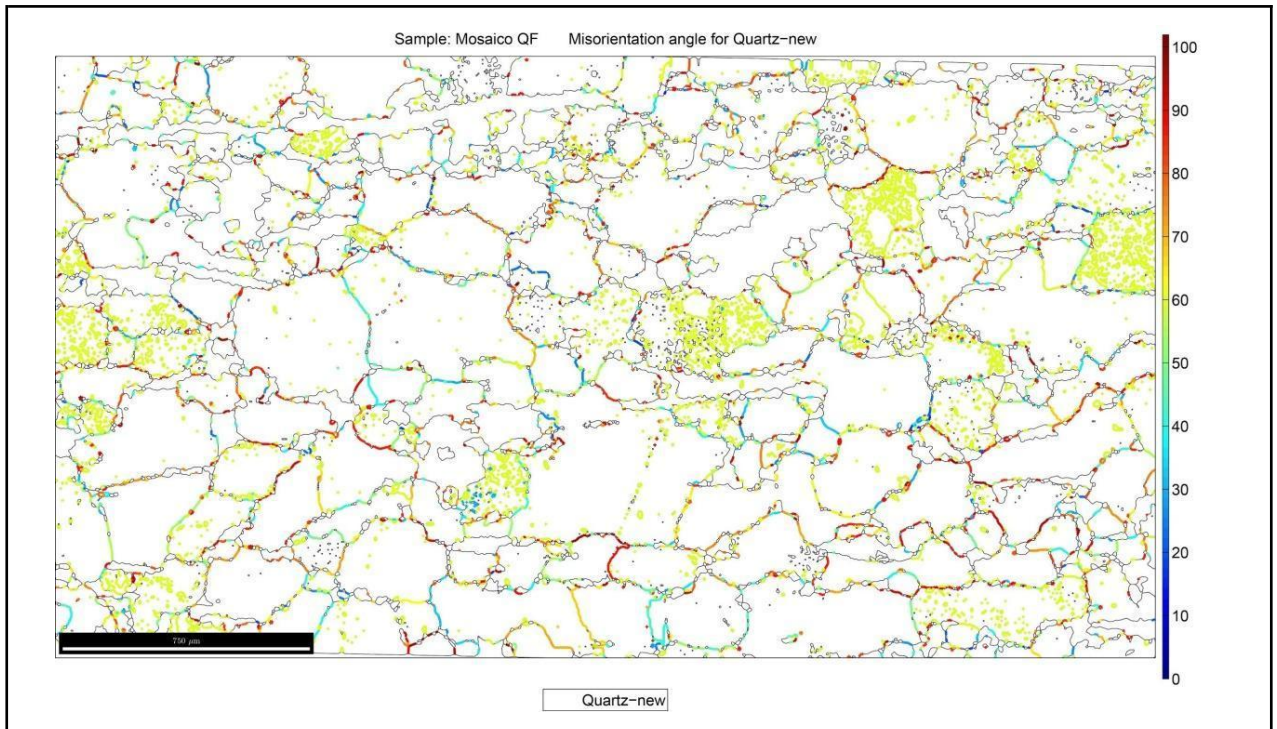
Os histogramas apresentados nas figuras 13 e 14 para ambos os exemplares rígido e flexível, apresentam nas barras em azul um pico de alta frequência em bordas de grãos de quartzo em contato direto com ângulos entre 55° e 60° , e distribuição do eixo de rotação em cinza ao redor de $\langle c \rangle$, o que pode ser relacionado a geminação do tipo Dauphiné. O pico na amostra flexível também possui frequência maior que o da amostra rígida. A frequência de bordas para os demais ângulos são baixas, não ultrapassando o valor de 10%, sendo crescente de 10° até 60° e decrescente de 60° até 100° em ambas amostras.

A linha azul representa a distribuição para os grãos de quartzo não correlacionados. A frequência é mais homogênea e com um pico bem menos acentuado entre 55° e 60° para a amostra flexível, e com um pico decrescente que começa em 55° e continua até 90° para a amostra rígida.

Distribuições de eixo de rotação em intervalos com valores menos frequentes também são observados. No quartzito flexível eles variam desde concentrações em $\langle c \rangle$ e $\{r\}$ para intervalos entre 10° e 45° até concentrações em $\{m\}$ para intervalos entre 80° e 100°. No quartzito rígido entre 10° e 45° as concentrações encontram-se em $\{m\}$ para o primeiro valor e vão até $\langle c \rangle$. Entre 60° e 100° elas variam de $\{r\}$ a $\{m\}$.

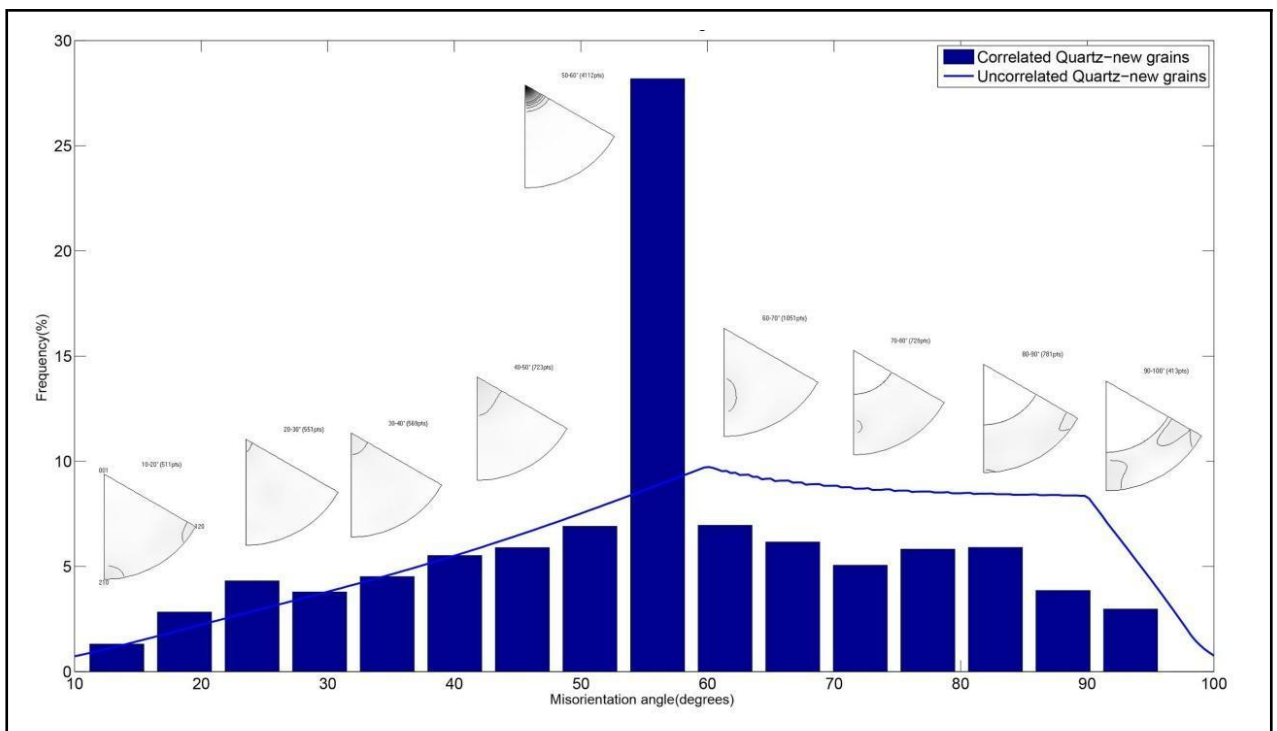
Figura 13 - Histograma e mapa de distribuição de ângulos de desorientação para o quartzito flexível.

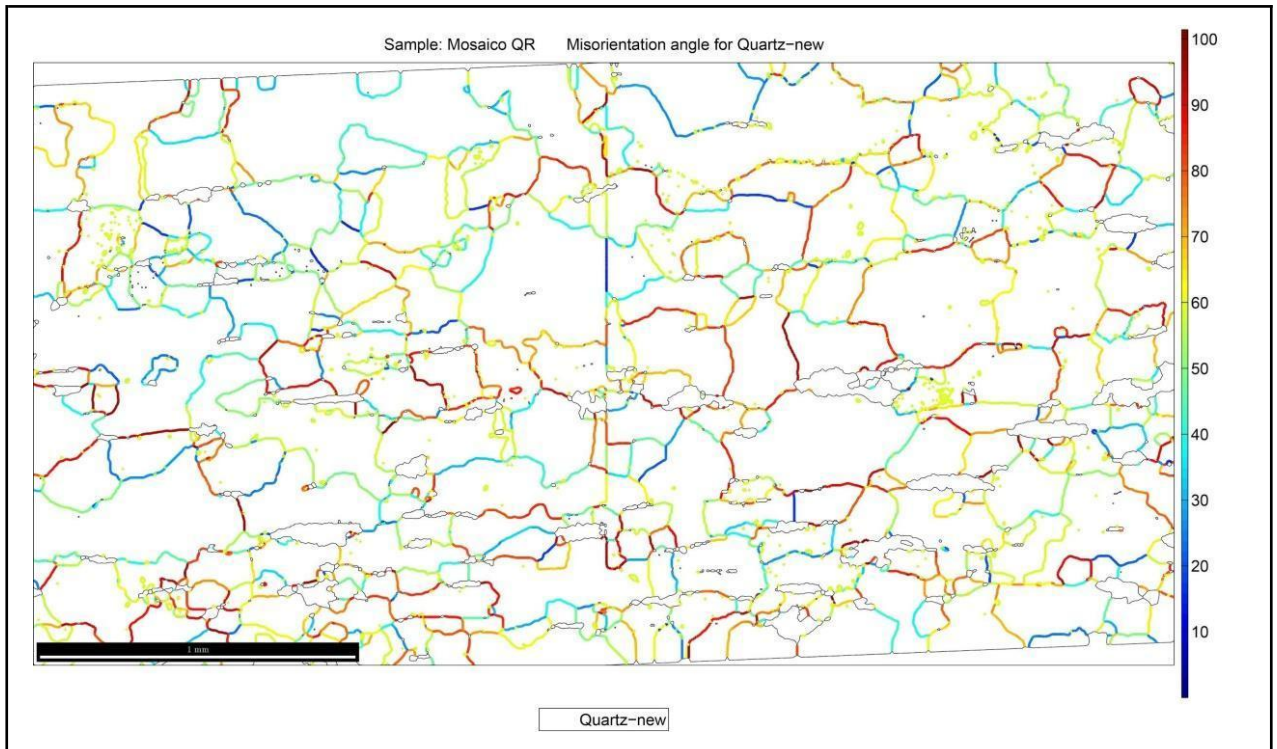




Fonte: O autor (2023)

Figura 14 - Histograma e mapa de desorientação para o quartzito rígido.





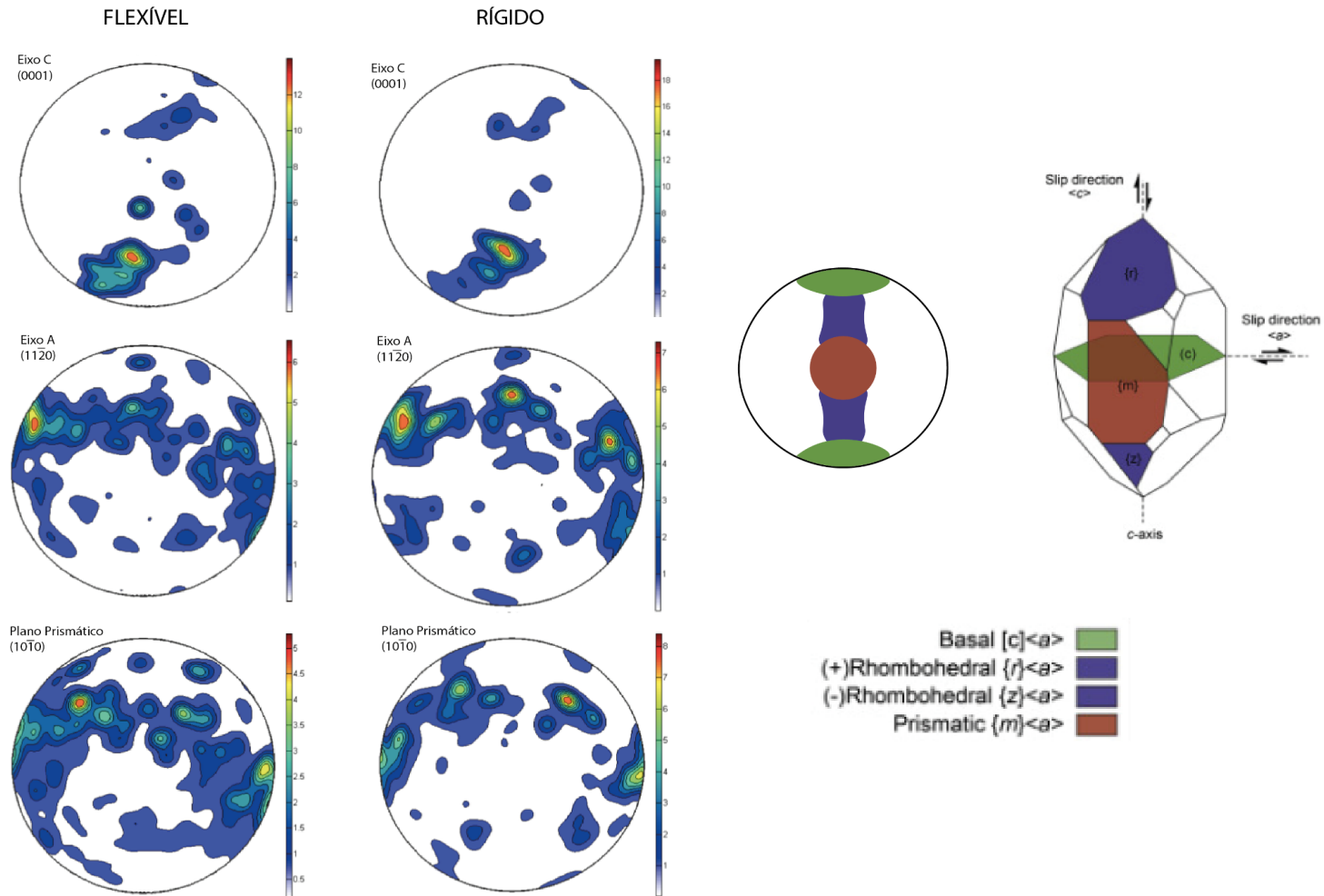
Fonte: O autor (2023)

4.2.3.2 Figuras de Polo

As figuras de polo obtidas mostram que não há diferença no padrão de orientação dos eixos-c entre as amostras rígida e flexível. Os eixos-c se orientam formando uma guirlanda simples, bastante segmentada, com ponto máximo aproximadamente entre 180° a 190° do plano da foliação, baixa inclinação e deslizamento romboédrico na direção do eixo $\langle a \rangle$. O plano prismático define uma guirlanda de pequeno círculo, com pontos máximos bem marcados, na amostra flexível.

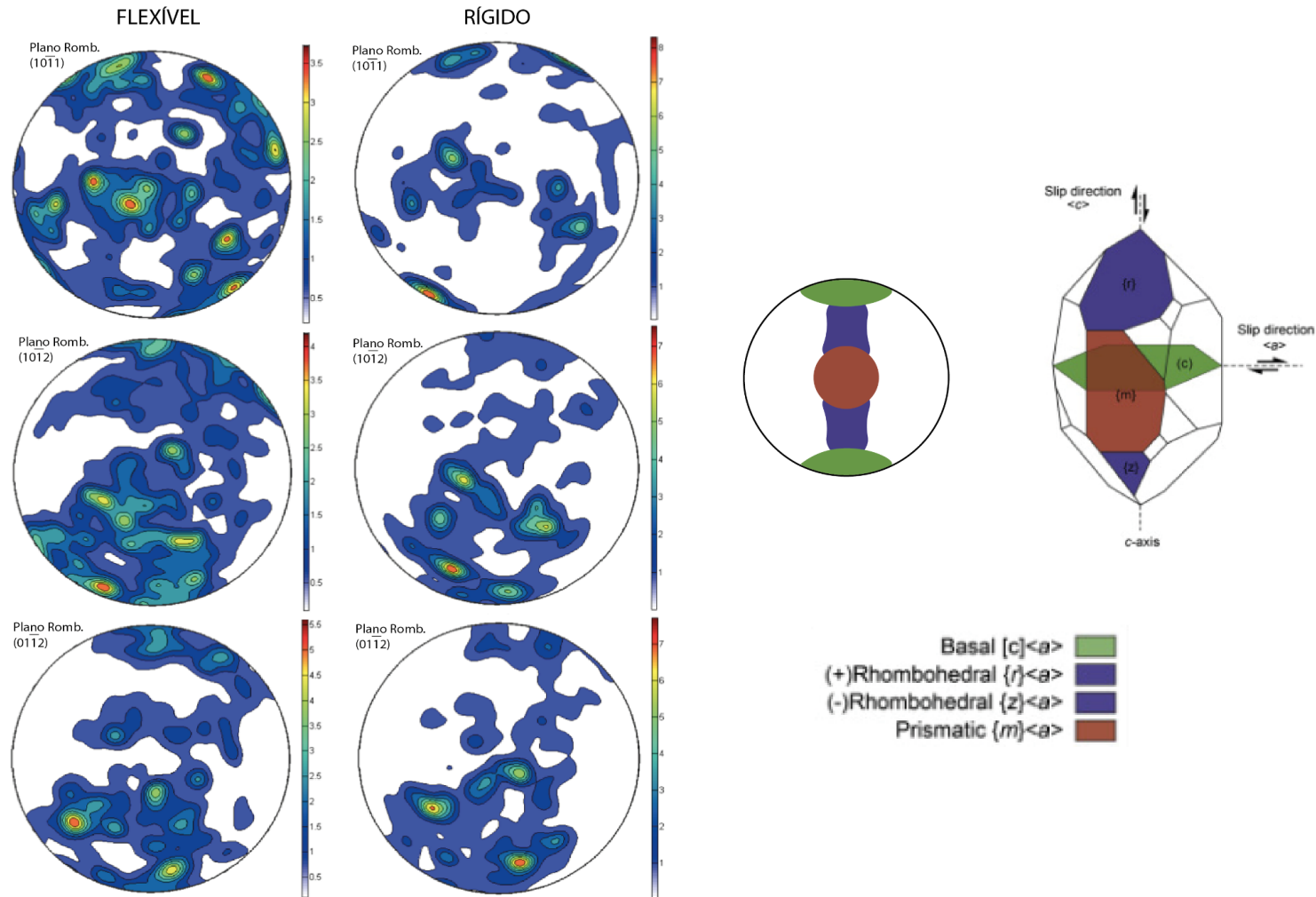
Já na amostra rígida a figura do plano prismático apresenta uma maior dispersão, embora com máximos bem marcados semelhantes aos da amostra flexível, formando uma guirlanda bastante segmentada. Ao se analisar os máximos definidos pelo eixo-a, também nota-se guirlandas nas figuras. Já os polos dos planos romboédricos, exibem uma tendência de concentração na periferia, tendendo a um deslizamento romboédrico na direção do eixo-a.

Figura 15 - A esquerda, figuras de polo do eixo-C, eixo-A e do plano prismático para o quartzo das amostras flexível e rígida. Projeção das figuras de polo no hemisfério superior do diagrama de Wulff. A direita, representação gráfica dos principais planos de deslizamento do quartzo em figura de polo e na estrutura cristalográfica.



FONTE: O autor (2023)

Figura 15 - A esquerda, figuras de polo dos planos romboédricos para o quartzo das amostras flexível e rígida. Projeção das figuras de polo no hemisfério superior do diagrama de Wulff. A direita, representação gráfica dos principais planos de deslizamento do quartzo em figura de polo e na estrutura cristalográfica.



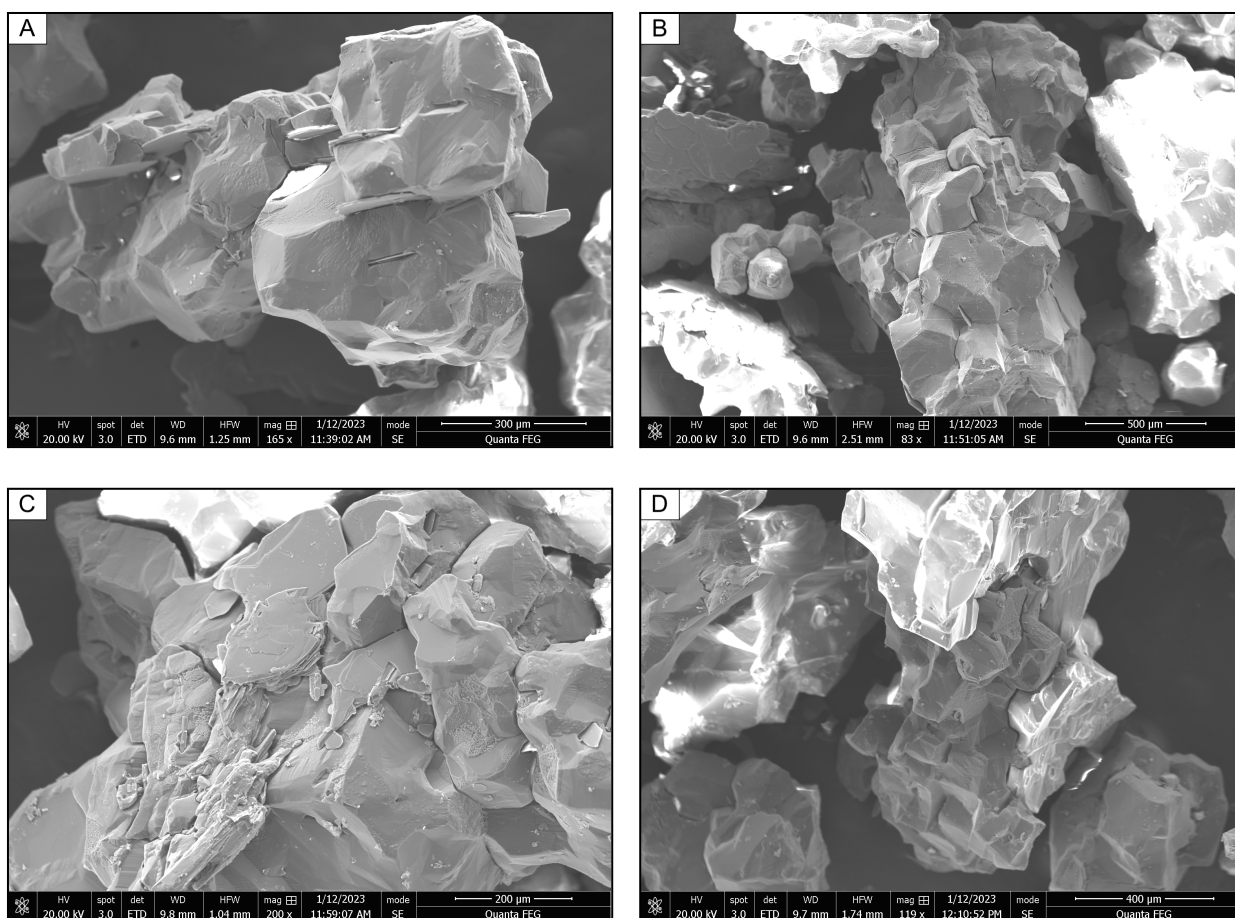
FONTE: Figuras de polo (O autor, 2023); e principais planos de deslizamento do quartzo a direita, modificado de Schmid and Casey (1986) e Hunter et. al (2018)

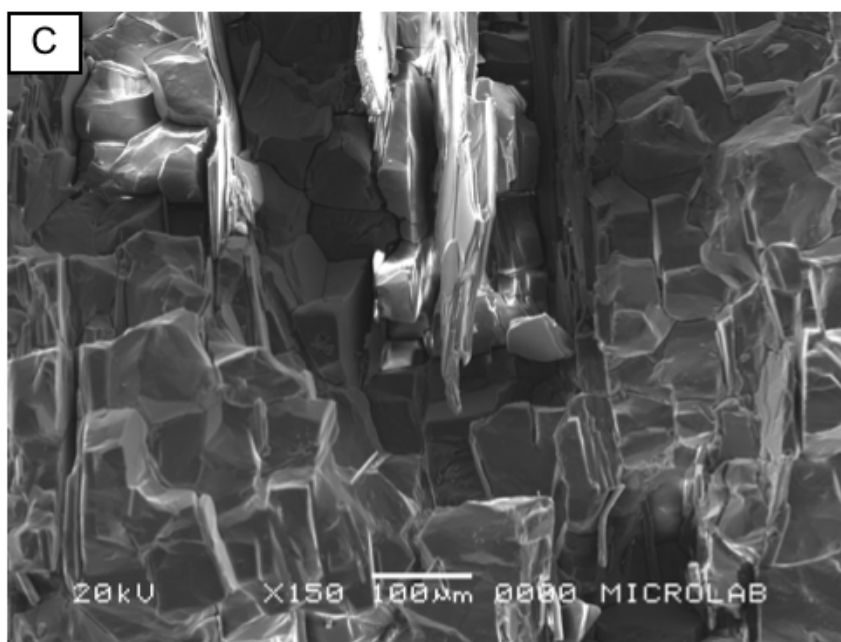
4.2.4 Imagens da microestrutura 3D por elétrons secundários

Quando observados com o detector de elétrons secundários (SE) é possível caracterizar os minerais que compõem a rocha, levando em consideração aspectos tais como hábito, porosidade, tipo de superfície e geometria externa. A figura 16 apresenta grãos isolados da rocha para melhor visualização tridimensional dos cristais. No quartzo, observa-se o complexo encaixe entre os grãos com reentrâncias bem definidas nas faces dos mesmos (figura 16B), além de um espaço negativo entre esses contatos. Por vezes algumas superfícies do quartzo encontram-se cobertas por micro-agregados de partículas muito finas.

A muscovita encontra-se orientada, ocupando de forma geral planos entre os cristais de quartzo (figura 16E). Na figura 16C também infere-se uma alteração nos cristais de muscovita e cianita. Não foi identificado a presença de cimento na rocha.

Figura 16 - Fotomicrografias com detector SE para o quartzito flexível.

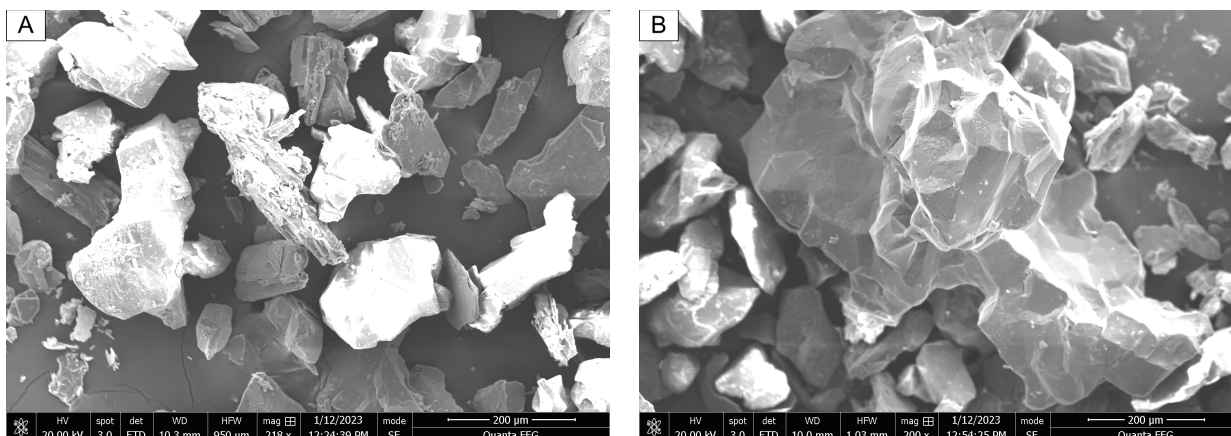


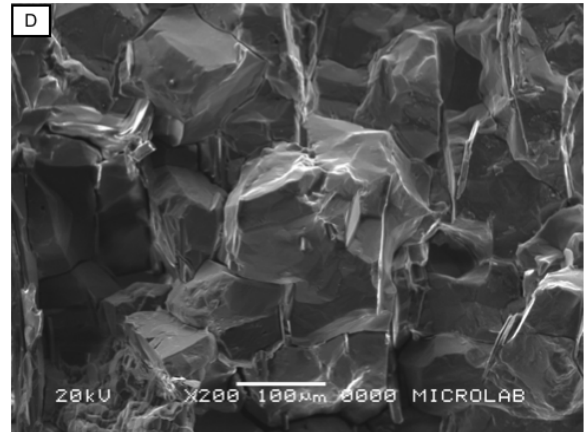
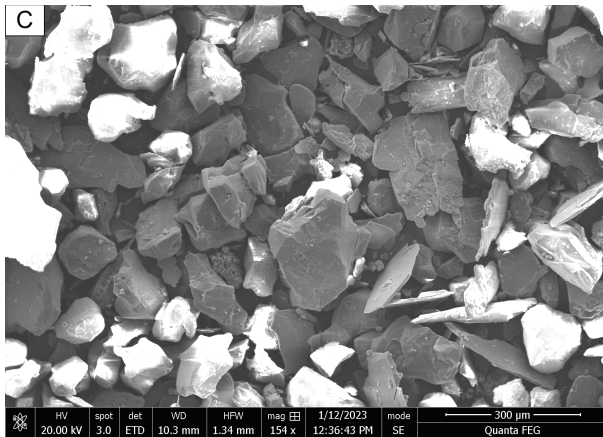


Fonte: O autor (2023)

Para o quartzito rígido (figura 17) a forma dos cristais de quartzo são menos definidas do que nas amostras flexíveis. Suas faces também são cobertas por agregados de partículas muito finas, porém em menor proporção que o QF. O contato entre os grãos é mais compacto, sem a existência de sulcos entre eles. A muscovita exibe fraca orientação preferencial e a rocha também não possui a presença de material intergranular.

Figura 17 - Imagens com detector SE para o quartzito rígido.





Fonte: O autor (2023)

Em conjunto com o detector SE, também foi utilizado o EDS para avaliação pontual da composição química dos minerais. Os resultados quantitativos com os óxidos correspondentes podem ser vistos na figura 18 e 19. Os espectros de raios-x completos encontram-se no anexo 1.

Os constituintes químicos predominantes, identificados através do EDS, foram SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O e Fe_2O_3 . Esse resultado mostrou-se coerente com a microscopia ótica uma vez que esses componentes representam basicamente a existência de quartzo, muscovita, cianita e algum óxido de ferro presente na estrutura dos dois últimos minerais.

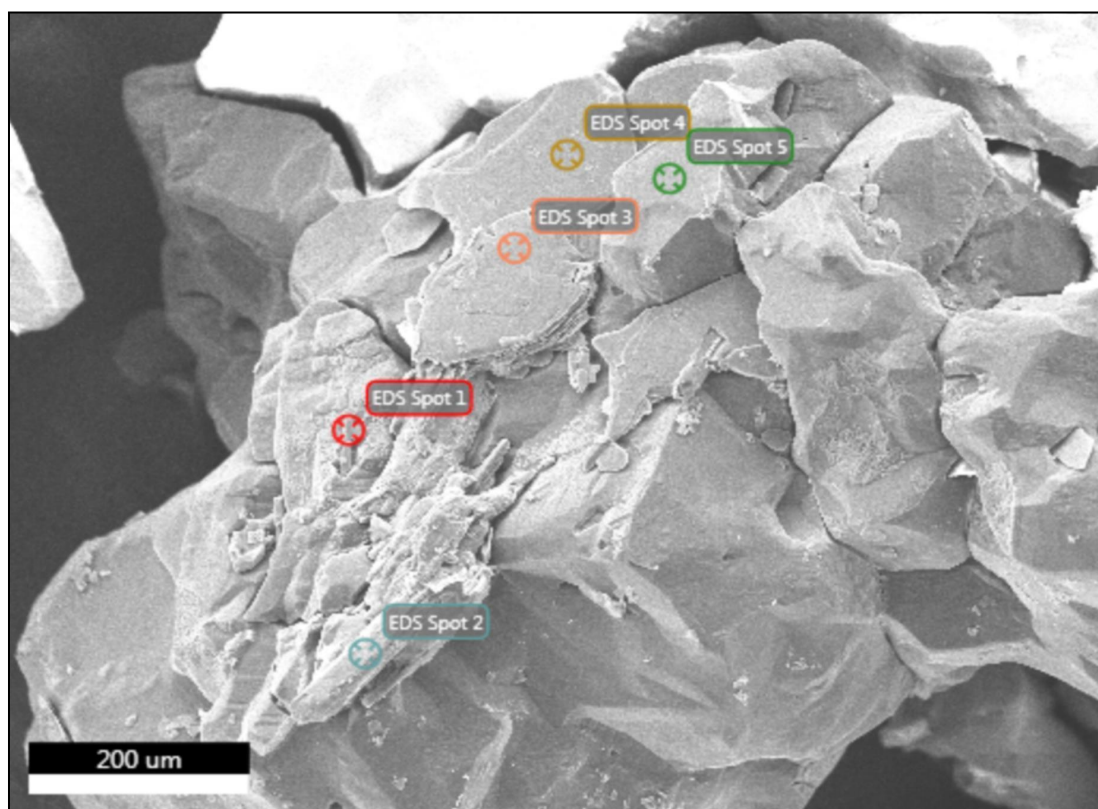
É importante observar o ponto 3 da amostra flexível, que mostra um empobrecimento em potássio e alumínio em comparação com a quantidade de óxidos esperada para essa espécie mineral (tabela 1). Esse mesmo fator se repete no resultado de alguns pontos de análise da amostra rígida. A muscovita do ponto 5 exibe valores de óxidos de alumínio e potássio abaixo do esperado. Enquanto a cianita exibe valores anômalos para os óxidos de alumínio, sílica, potássio e ferro.

Tabela 1 - Composição padrão de óxidos para muscovita e cianita com base no cálculo do peso molecular da fórmula empírica, dividido pelas somas dos pesos atômicos de cada elemento para produzir a porcentagem de cada elemento.

Óxidos	Muscovita	Cianita
SiO ₂	45.21%	37.08%
Al ₂ O ₃	38.36%	62.92%
K ₂ O	11.81%	-

Fonte: Site Web Mineral - Composição Química Mineral

Figura 18 - Pontos selecionados para a análise química por EDS no quartzito flexível.



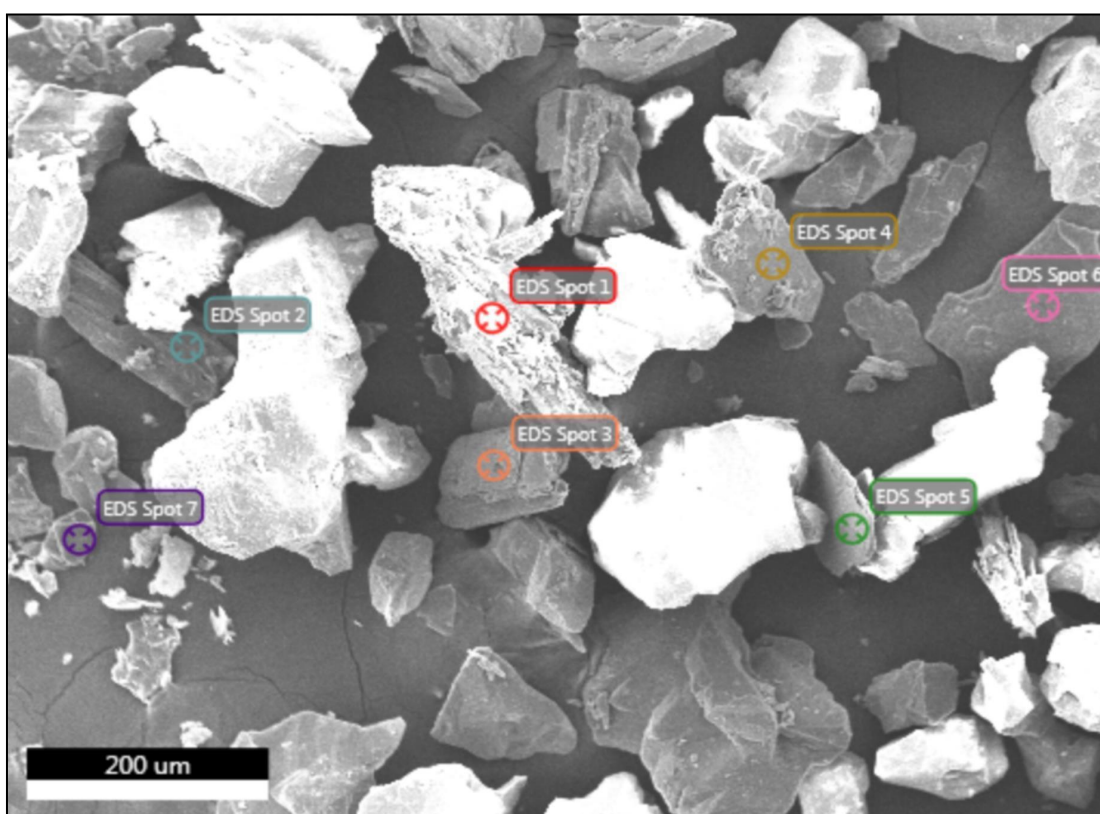
Porcentagem por peso (Wt%)

Óxidos	1	2	3	4	5
Al ₂ O ₃	62.04%	53.96%	30.90%	40.63%	-
SiO ₂	37.96%	35.33%	69.10%	51.42%	100.00%

FeO	-	10.71%	-	-	-
K2O	-	-	-	7.95%	-
	Cianita	Cianita	Muscovita	Muscovita	Quartzo

FONTE: O autor (2023).

Figura 19 - Pontos selecionados para a análise química por EDS no quartzito rígido.



Porcentagem por peso (Wt%)

Óxidos	1	2	3	4	5	6	7
Al ₂ O ₃	41.88%	-	-	41.78%	4.91%	40.93%	-
SiO ₂	50.94%	-	100.00%	50.09%	88.82%	48.07%	-
K ₂ O	4.66%	-	-	8.12%	6.27%	11.00%	-
FeO	2.53%	-	-	-	-	-	-
	Cianita		Quartzo	Muscovita	Muscovita	Muscovita	

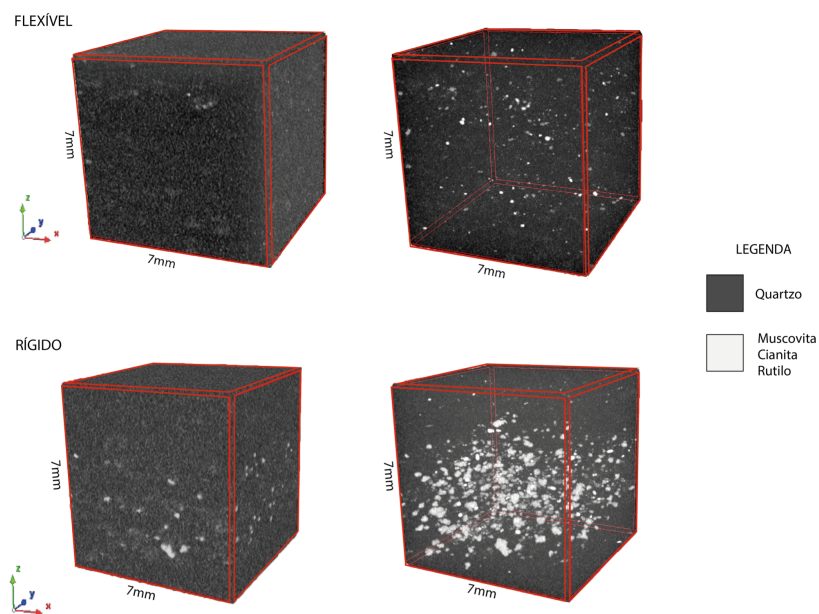
FONTE: O autor (2023)

4.2.5 MICRO CT

A análises de Micro-CT para ambas as amostras mostram resultados esperados e que já foram inferidos previamente pela microscopia ótica e eletrônica. A amostra flexível é majoritariamente composta por quartzo, representado pelo tom cinza escuro, além de muscovita e cianita em menor proporção, representadas em tons de branco a cinza claro (figura 20).

Na amostra rígida além da presença de quartzo, há uma maior porcentagem de minerais como cianita e muscovita, que dominam praticamente 50% da amostra (figura 20).

Figura 20 - A esquerda, representação da superfície externa do quartzito rígido; e a direita sua textura e mineralogia interna.

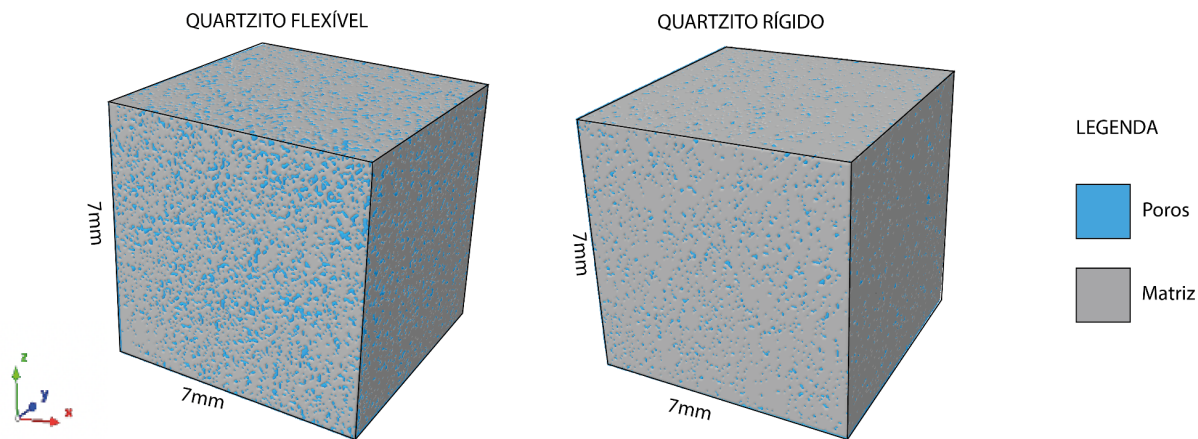


FONTE: O autor (2023)

O percentual de espaços vazios, de permeabilidade e quantidade de matriz também foram medidos. A quantidade de poros fechados na amostra flexível foi 0,26%; enquanto a permeabilidade entre esses poros foi de 20,78% sobre uma quantidade de 78,96% de matriz (figura 21 , tabela 2).

A amostra rígida exibiu valores menores de porosidade. Os poros fechados caracterizam 1,08% da amostra, a permeabilidade entre esses poros é de 13,99%, com 84,93% de matriz (figura 21, tabela 3).

Figura 21 - A esquerda, representação da relação matriz/poros do quartzito flexível e a direita do quartzito rígido.



FONTE: O autor (2023)

TABELA 2 - Resultado quantitativo do micro-ct para o quartzito flexível

Quartzito Flexível	
Poros abertos	20,78%
Poros fechados	0,26%
Matriz	78,96%

FONTE: O autor (2023)

TABELA 3 - Resultado quantitativo do micro-ct para o quartzito rígido

Quartzito Rígido	
Poros abertos	13,99%
Poros fechados	1,08%
Matriz	84,93%

FONTE: O autor (2023)

5 DISCUSSÕES

Visando determinar as principais características que distinguem a amostra de quartzito flexível da amostra rígida, foram identificadas e confirmadas neste trabalho, principalmente, variações composicionais e microestruturais para ambas as rochas.

A assembleia mineral das rochas é consistente com estudos comparativos realizados por Suzuki & Shimizu (1993) entre diferentes quartzitos com propriedades flexíveis da Índia, Brasil e Estados Unidos. Além do predomínio do quartzo nos exemplares flexíveis e rígidos, a ocorrência de muscovita no quartzito flexível é menor. Não foram identificados argilominerais na matriz, a exemplo da amostra indiana. Composicionalmente as amostras do Brasil se assemelham às estadunidenses.

A distribuição da muscovita no exemplar flexível é menos abundante, ocorrendo principalmente ao longo dos planos das bordas do quartzo, com contatos entre 90° e 120°, conferindo também uma orientação preferencial na rocha. No exemplar rígido a orientação preferencial é menos intensa, os cristais de muscovita encontram-se em maior número e o contato entre os minerais que compõem a rocha é mais regular com aproximadamente 120°. Essas características corroboram com as feições observadas nas fotomicrografias feitas com detectores FSE e BSE, onde é possível visualizar de forma detalhada a superfície da amostra flexível, que exhibe ótimo contraste entre o contato dos minerais, revelando sulcos penetrativos e regulares dentro da rocha.

A presença de cianita também indica um amplo intervalo de metamorfismo com temperaturas que variam de 200° a 700° C, e condições de pressão que variam de média a elevada.

A composição química determinada através de EDS também revelou o predomínio de quartzo, muscovita e cianita. No quartzito flexível a análise de muscovita do ponto 3 exhibe um empobrecimento em potássio. Possivelmente causado pela lixiviação desse elemento. Já no ponto 4 outra muscovita analisada exhibe valores padrões esperados para óxidos desse mineral. Isso pode indicar que uma ação não homogênea de um possível fluido lixiviador. Para tal confirmação é necessário mais pontos de análise na muscovita a fim de melhor representar estatisticamente a influência desse fluido na rocha.

Já a mostra rígida apresenta valores e ocorrências anômalas de óxidos esperados na composição da cianita. Há um excesso de sílica, pouco alumínio e a presença de potássio. Já o óxido de ferro encontrado pode ocorrer na estrutura cristalina desse mineral, segundo Faye & Nickel (1969). Além disso, o ponto de análise 3 na muscovita, mostra empobrecimento em alumínio e potássio.

Em relação aos histogramas da distribuição dos ângulos de desorientação, o quartzito flexível revela um pico entre 55° e 60°, que se traduz numa maior geração de subgrãos nesse intervalo. Dado bem mais proeminente que o pico gerado no quartzito rígido, que possui um histograma com valores mais bem distribuídos. O valor desse intervalo também revela o desenvolvimento de geminação do tipo Dauphiné. Essa geminação é uma geminação comum do quartzo, definida por uma rotação de 60° segundo o eixo <c>, que resulta numa inversão das formas cristalográficas positivas e negativas (Fron del 1962), sendo relacionada a transição α - β do quartzo e a deformações mecânicas. Ela ocorre para maximizar a energia de deformação elástica no cristal sob condições de tensão constante, a fim de minimizar a energia interna do sistema (Tullis & Tullis 1972). Assim, a maior orientação preferencial do quartzo na amostra flexível e sua maior frequência nos ângulos de desorientação, indicam que esses cristais se comportaram de forma menos rígida à deformação, acumulando energia na forma de maclamento.

As fotos de BSE e SE confirmam esse mecanismo de absorção de deformação. As superfícies de contato entre os grãos observados representam regiões de ajuste entre esses grãos, que influenciam nas propriedades de coesão e deformabilidade. Foram observados interessantes padrões escalonados no contato dos grãos de quartzo para a rocha flexível, onde os grãos parecem ser estruturalmente dependentes um do outro, com encaixes e reentrâncias de grão para grão. No micro CT também observa-se uma quantidade de poros entre a mostra flexível (20,78%) sobre a rígida (13,99%). O padrão encontrado se assemelha de forma teórica à estrutura de quebra cabeça proposta por Sanaka (1969) e também corrobora com estudos de Suzuki et al (2011), que realizou um modelo 3D dos poros a partir da impregnação da rocha com resina e posterior dissolução química do quartzo, sendo possível observar a conectividade da trama nos espaços vazios pela rocha.

No que diz respeito às análises cristalográficas, as figuras de polo representam a

distribuição preferencial dos principais planos cristalográficos do quartzo. Ao analisarmos as figuras obtidas para o eixo $\langle c \rangle$, nota-se pouca diferença entre as amostras rígida e flexível, ambas formam uma guirlanda simples, com orientação preferencial romboédrica na direção do eixo $\langle a \rangle$. Outros planos representados também exibem similaridades entre as duas amostras, o plano prismático possui guirlandas bem definidas, e os planos romboédricos definem alta concentração próximo às bordas, sugerindo um deslizamento romboédrico no eixo basal $\langle a \rangle$.

Duas hipóteses principais acerca da transformação da rocha rígida em flexível foram sugeridas. A primeira representa a dissolução química de quartzo e muscovita em quartzitos rígidos (GINSBURG & LUCASG, 1949; HAWKINS, 1951; VERMA, 1982). E a segunda, propõe uma separação mecânica dos grãos a partir da contração termal do quartzo após o metamorfismo (CARROZI, 1960; DEVRIES & JUGLE, 1968; SIEGISMUND *et al.*, 2002).

A deformação do quartzito acompanhada da dissolução de quartzo e muscovita é a opção mais plausível para esse estudo. Os contatos poligonais dos grãos de quartzo e a ocorrência de muscovita entre os planos desse mineral, indicam a recristalização concomitante de muscovita e quartzo durante o metamorfismo. A geminação Dauphiné nessa etapa também contribui estruturalmente de forma a reter mais deformação. Posteriormente a rocha pode ter sido parcialmente lixiviada, acarretando na geração de maior porosidade e alteração parcial da muscovita gerando uma baixa concentração de elementos móveis como o potássio em sua estrutura. Estudos posteriores que busquem feições de alteração por fluidos nos cristais de quartzo e muscovita, além da procura por similaridades nos eventos geológicos regionais que compõem os locais de ocorrência dos itacolomitos devem ser realizados.

Por fim, apesar da flexibilidade do itacolomito ser baixa, não podendo ser usado diretamente como uma rocha industrial, ele contribui no âmbito da ciência dos materiais pois serve como modelo análogo no desenvolvimento de materiais resistentes a certos tipos de deformação, como estruturas anti-terremotos (Yamaguchi *et al.*, 2007), cerâmicas flexíveis (Sato *et al.*, 2008) e materiais refratários (Dorcieux *et al.*, 2008).

6 CONCLUSÃO

O estudo foi importante pois permitiu a integração de técnicas que possibilitaram a caracterização textural e microestrutural entre as amostras de quartzito flexível e rígido.

A mineralogia das rochas foi definida em microscopia ótica e eletrônica. Os resultados entre as duas amostras analisadas é muito similar, com quartzo, muscovita, cianita e traços de rutilo em sua composição. Somente para a mostra flexível é possível observar uma quantidade maior de muscovita.

Os resultados de micro-ct também exibem diferentes características das duas amostras, principalmente na quantidade de porosidade. A amostra flexível é aproximadamente 10% mais porosa que a amostra rígida. O que foi interpretado com base na bibliografia e nos difratogramas de EDS como a passagem de um possível fluido lixiviador na rocha, que gerou espaço e alterou parcialmente os minerais. Porém ainda sugere-se novas análises químicas comparativas entre as duas rochas, para aumentar a certeza na análise a partir do aumento do número amostral.

Além disso, estudos comparativos que busquem por similaridades nos eventos geológicos regionais que compõem os locais de ocorrência dos itacolomitos devem ser realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM F.F. & MARSHAK S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, 90: 29-58. 1998.

BESTE, R.C. **A Location Guide for Rock Hounds in the US**. 3rd ed. Hobbit Press, Missouri. 2005

BOONS S. **Software CTVox, version 1.0.0.r479**. Kontich, Bélgica, 2010. Disponível em: <http://www.skyscan.be/products/downloads.htm>.

COOPER, A. F. (1980). Retrograde alteration of chromian kyanite in metachert and amphibolite whiteschist from the Southern Alps, New Zealand, with implications for uplift on the Alpine Fault. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, 75, p. 153-164.1980.

DERB, O.A.. On the flexibility of itacolumite. **American Journal of Science XXVIII**, 205–208. 1884.

DERB, O.A. Modes of occurrence of the diamond in Brazil. **American Journal of Science XXIV** (139–144), 34–42 Art III. 1882.

DEVRIES, R.C. and JUGLET, D.B. , Structure-Property Relation in Flexible Sandstone. **Journal of the American Ceramic Society**, 51: 387-391. 1968.

DEDAVID B.A., GOMES C.I., MACHADO, G. Microscopia Eletrônica de Varredura aplicações e preparação de amostras. **EDIPUCRS**, Porto Alegre, 60p.2007.

DUSSEAULT, M. B. 1980. Itacolumites ; the flexible sandstones. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, 13, 119-128. 1980.

ESCHWEGE, W.L. **Geognostiches Gemälde von Brasilien, und wahrscheinliches Muttergestein der Diamanten**. Wiemar.1822.

DORR, J. V. N.d. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilatero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: **United States Geological Survey**

Professional Paper 641-A, 110 p. 1969.

GIL IBARGUGHI, J. I; Mendia, M. e GIRARDEAU, J. Mg- and Cr-rich staurolite and Cr-rich kyanite in high-pressure ultrabasic rocks (Cabo Ortegal, northwestern Spain). **American Mineralogist**, 76: 501-511. 1991.

HELMREICHEN, V., 1846. **Über das Geognostische Vorkommen der Diamanten und ihre Gewinnungsmethoden auf der Serra do Grao-Magor**. Braumu ðller & Seidel, Wien. 1846.

KING, R. J. Minerals explained 38, Kyanite. **Geology Today**, February, 19, no 1. p. 33-36. 2003.

SEIFERT, F. e LANGER, K.. Stability relations of chromium kyanite at high pressures and temperatures. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, 28: 9-18. 1970.

RENGER F.E., NOCE C.M., ROMANO A.W., MACHADO N.. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, 2(1): 1-11. 1994

SUZUKI, T. Yokoyama & M. Nishihara, Scanning Electron Microscope and Acoustic Emission Studies of Itacolumites, **J. Geol. Soc. Jpn.**, 99, 443–56. 1993.

KHARITONOV V. **Software CTAnalyser, version 1.10.9.0**. Kontich, Bélgica, 2003, 1 DVD. 2003.

KHARITONOV V. **Software CTVol realistic 3D-visualization**, version 2.2.0.0. Kontich, Bélgica, 2010, 1 DVD. 2010.

SASSOV A. **Software Skyscan 1172 control**, versão 1.5.8.0. Kontich, Bélgica, 2009. 1 DVD. 2009.

FEDDEN, F. Flexible sandstone. In: Hughes (Ed.) Wardha Valley Coal Field. **Memoirs of the Geological Survey of India**. XIII Pt. 1, 16. 1877.

GRANT, W.H. Petrography of three Georgia Itacolumites. **Georgia Department of Mines Mining and Geology** 56, 91–96. 1950.

SUZUKI, Hiroyuki; KANIE, Yasumitsu; KANIE, Yuki; RAMBELOSO, Roger; RAMASIARINORO, Voahangy. Discovery of itacolumites in the central highlands of Madagascar. **Journal of Mineralogical and Petrological Sciences**. 106. 299-305. 10.2465/jmps.101210. 2011.

FRONDEL C. **The system of mineralogy**: 7th edn, vol III, sílica minerals. Wiley, New York. 1962.

TULLIS J, TULLIS T. Preferred orientation of quartz produced by mechanical dauphine twinning: thermodynamics and axial experiments. In: Heard HC, Borg IY, Carter NI, Raleigh CB (eds) Flow and fracture of rocks, Geophysical Monograph 16, **American Geophysical Union**, pp 67–82. 1972.

Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. 1st ed., Pp. 480. Belo Horizonte: 3i Editora. Disponível em: <https://qfe2050.ufop.br/news/o-quadrilatero-ferrifero-avancos-do-conhecimento-nos-ultimos-50-anos>. Acesso em: 5 Jan. 2023.

GRANT, W.H. Petrography of three Georgia Itacolumites. **Georgia Department of Mines Mining and Geology** 56, 91–96. 1950.

SIEGSMUND, S., VOLBRECHT, A., HULKA, C., 2002. The Anisotropy of Itacolumite Flexibility. Geological Society, 205. Special Publications, London, pp. 137–147.

THERMOFISHER. Disponível em: <https://www.thermofisher.com/blog/materials/sem-signal-types-electrons-and-the-information-they-provide/> acessado em 2 de jan 2023

GOLDSTEIN, J., Newbury, D.E., Echlin, P., Joy, D.C., Lyman, C.E., Lifshin, E., Linda Sawyer, L., Michael, J.R.. *Scanning Electron Microscopy and X- ray Microanalysis*. **Plenum Press**. 2003.

SAKANAK ,K. Flexible Stone, **Ceram. Jpn.**, 24, 94–5. 1989.

FAYE, G.H., NICKEL, E.H. On the origin of colour and pleochroism of kyanite. **The Canadian Mineralogist**: 10: 35-46.1969.

MACHADO, A. C.; LIMA, I.; LOPES, R. T. Effect of 3D computed microtomography resolution on reservoir rocks. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 405-407,2014.

LI, H.; ZHANG, H.; TANG, Z.; HU, G. . Micro-computed tomography for small animal imaging: Technological details. **Progress in Natural Science**, v. 18, n. 5, p. 513 - 521,2008.

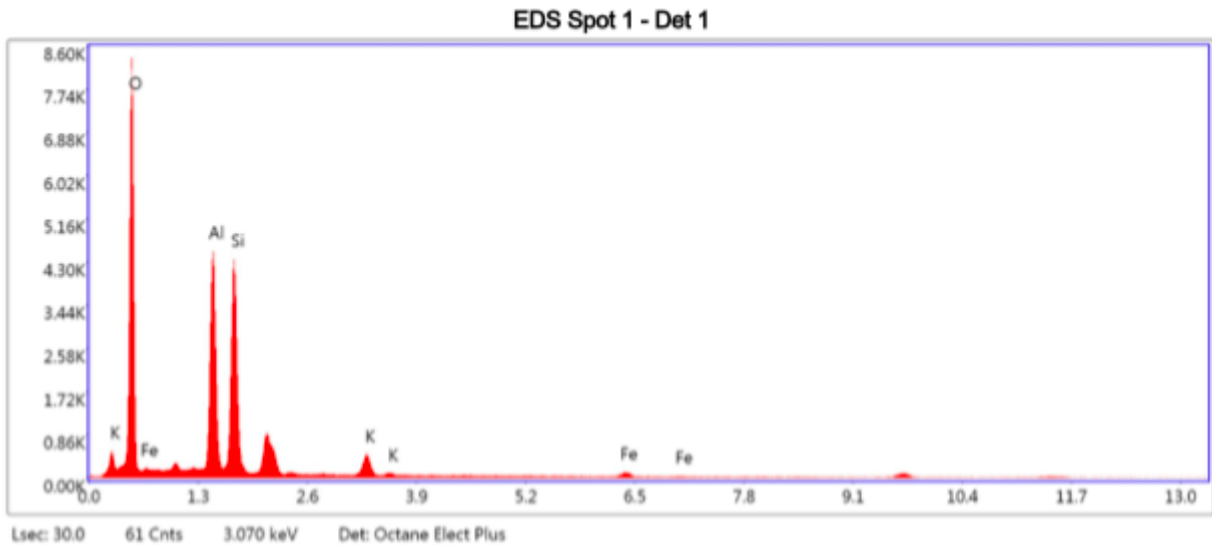
LOPES, A. P.; FIORI A. P.; REIS NETO, J. M.; MARCHESE, C.; VASCONCELLOS, E.M.G. et al. Análise tridimensional de rochas por meio de microtomografia computadorizada de raios X integrada à petrografia. **Geociências**, v. 31, n. 1, p. 129-142,2012.

MOREIRA B. B. A Transformada de Hough aplicada à Difração de Elétrons Retroespalhados. **Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 71 p. 2012.

MORALES L. F. G., HINRICHS R. e FENRANDES F L. A. D. A técnica de Difração de Elétrons Retro Espalhados (EBSD) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. **Revista Pesquisas em Geociências**. 34(1):19-34. 2007.

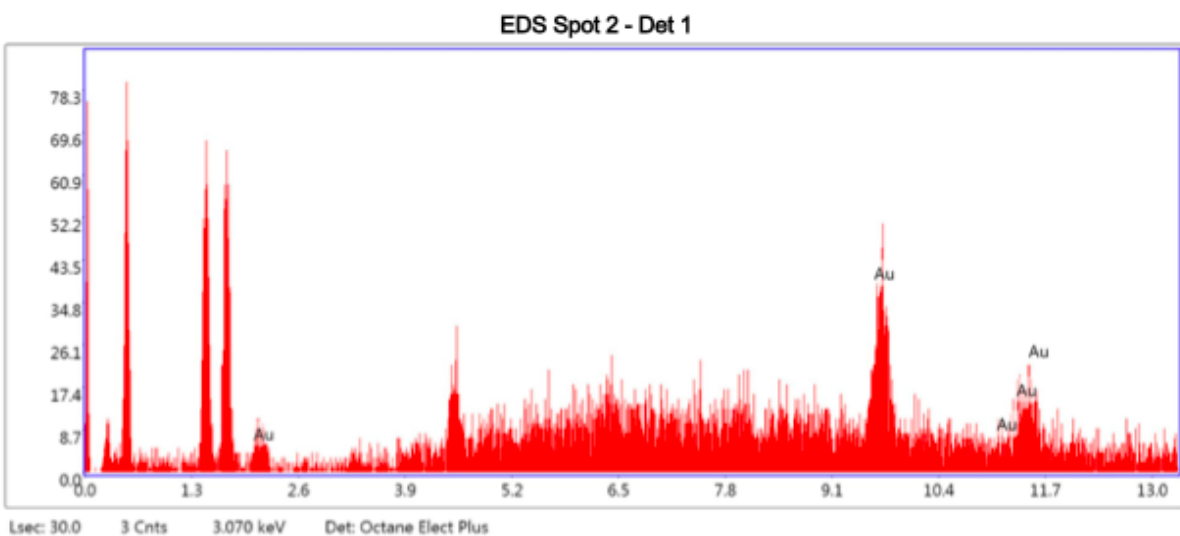
ANEXOS

Difratogramas quartzito rígido

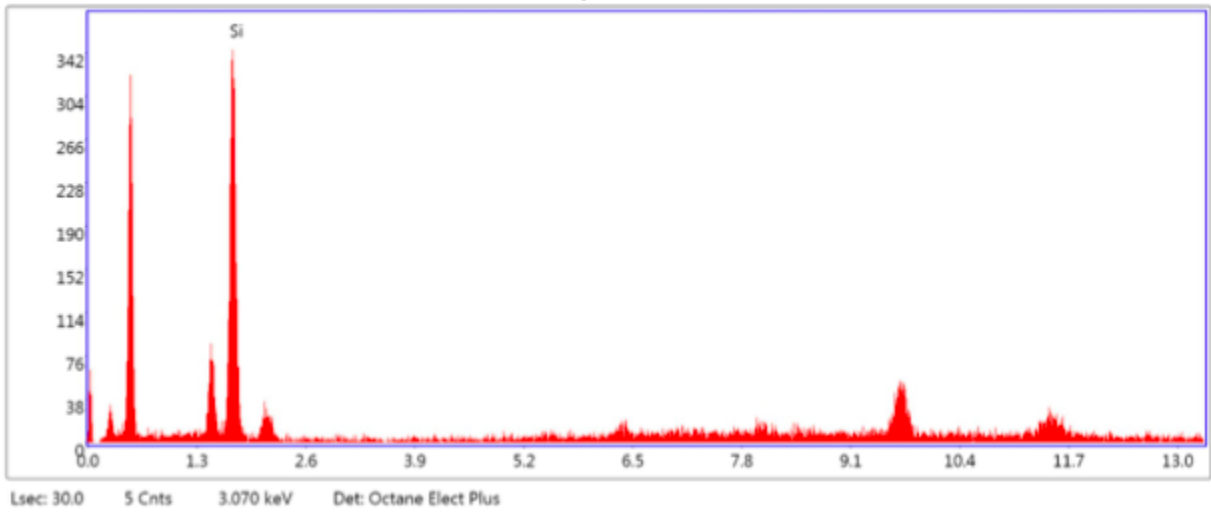


eZAF Smart Quant Results with Oxides

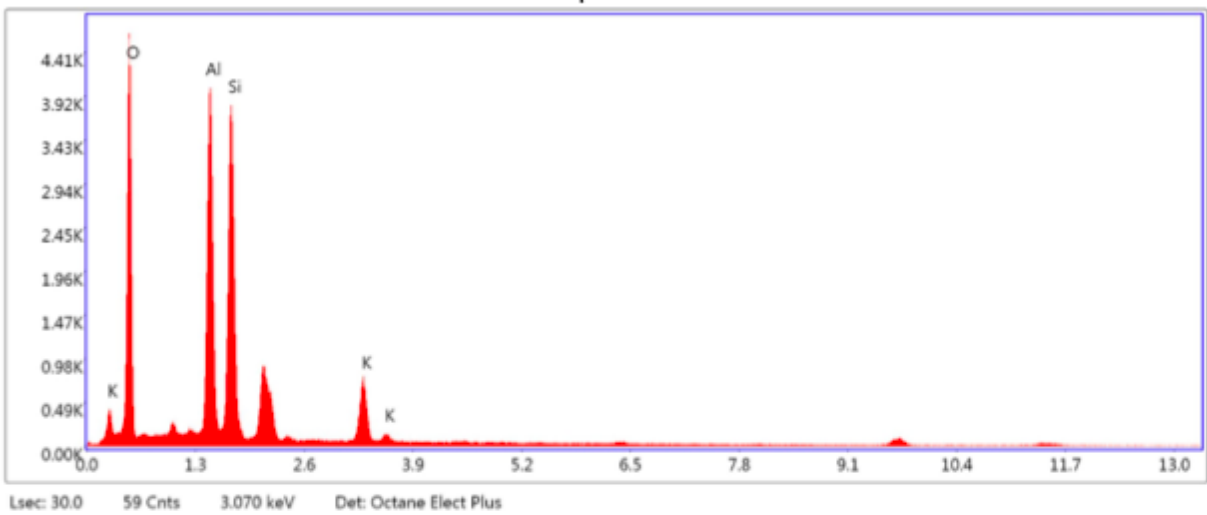
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al ₂ O ₃	41.88	30.58	1261.92	4.53	0.1255	0.9414	0.7175	1.0090
SiO ₂	50.94	63.12	1212.37	5.56	0.1197	0.9622	0.6280	1.0017
K ₂ O	4.66	3.68	150.42	6.86	0.0259	0.8924	0.8931	1.0104
FeO	2.53	2.62	40.04	14.04	0.0141	0.8103	1.0007	1.0668



EDS Spot 3 - Det 1



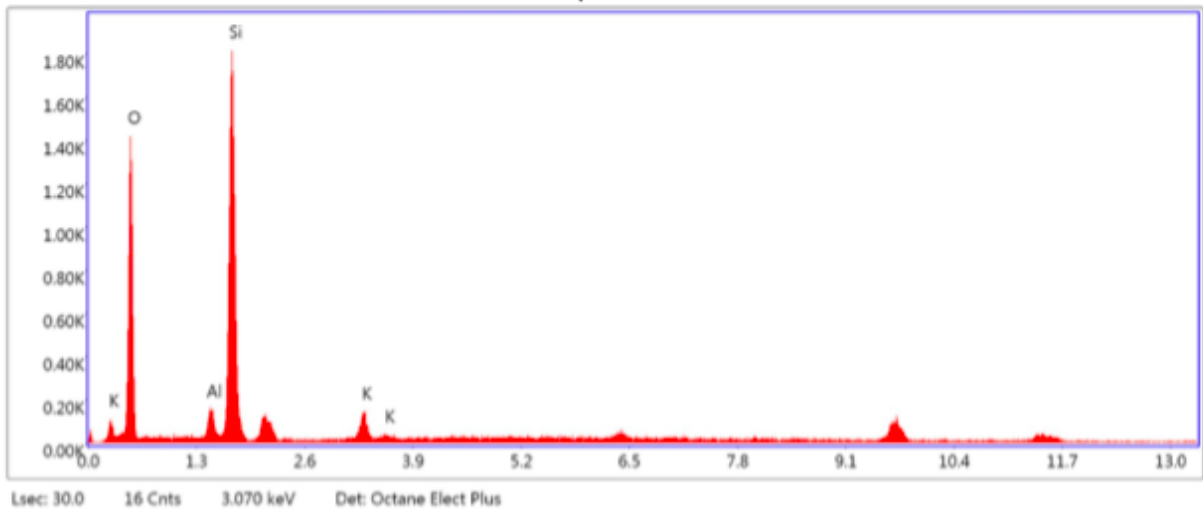
EDS Spot 4 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al 2O3	41.78	30.82	1202.98	4.53	0.1473	0.9411	0.7293	1.0094
Si O2	50.09	62.70	1133.22	5.76	0.1378	0.9618	0.6348	1.0022
K 2O	8.12	6.48	246.71	5.71	0.0522	0.8920	0.8963	1.0076

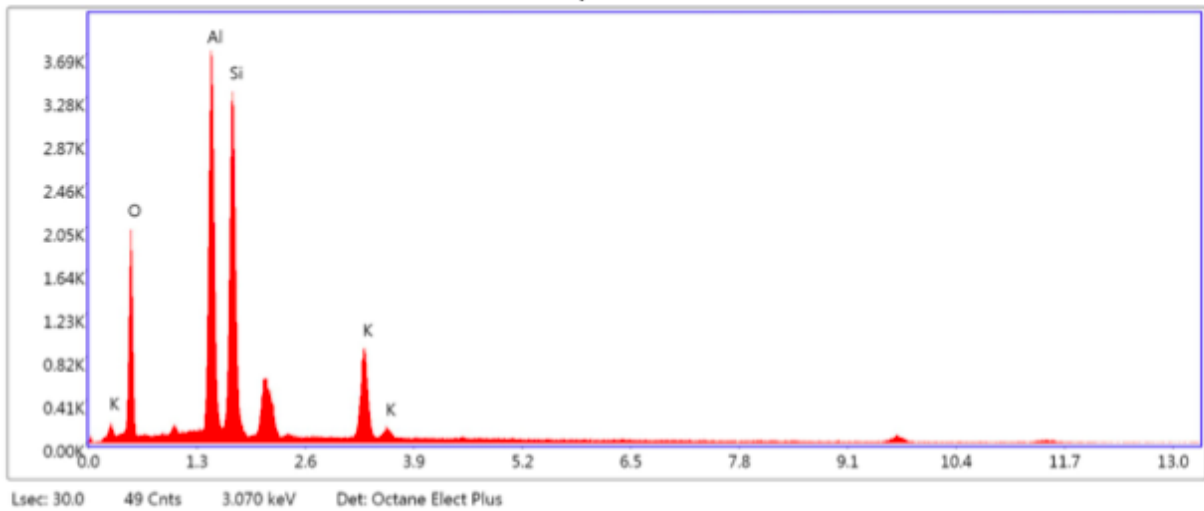
EDS Spot 5 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al ₂ O ₃	4.91	3.02	27.75	11.48	0.0156	0.9337	0.7176	1.0260
Si O ₂	88.82	92.80	499.14	4.11	0.2784	0.9543	0.8036	1.0017
K ₂ O	6.27	4.18	37.12	13.60	0.0360	0.8850	0.8893	1.0077

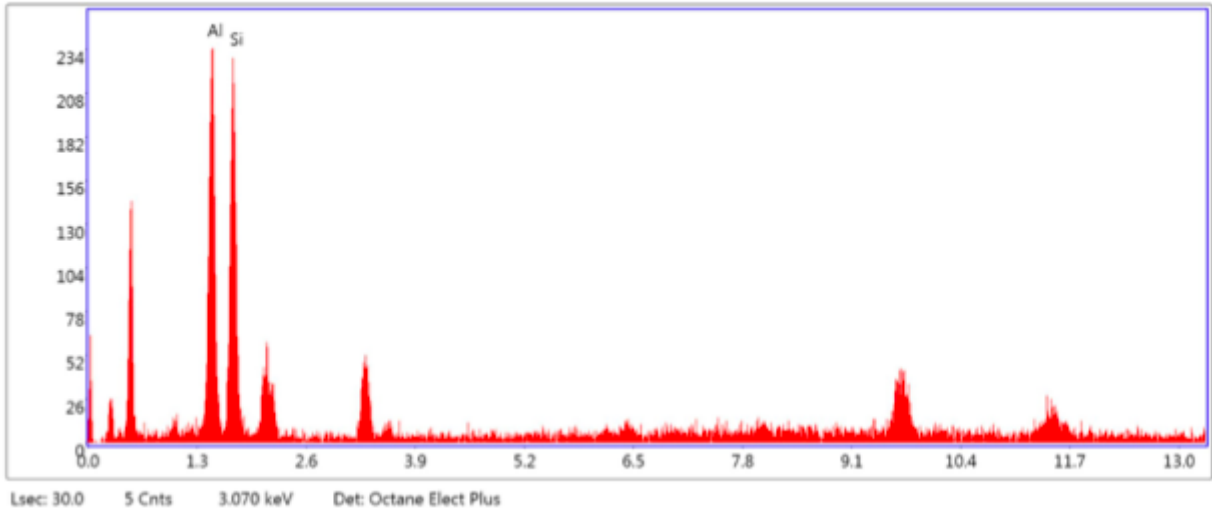
EDS Spot 6 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

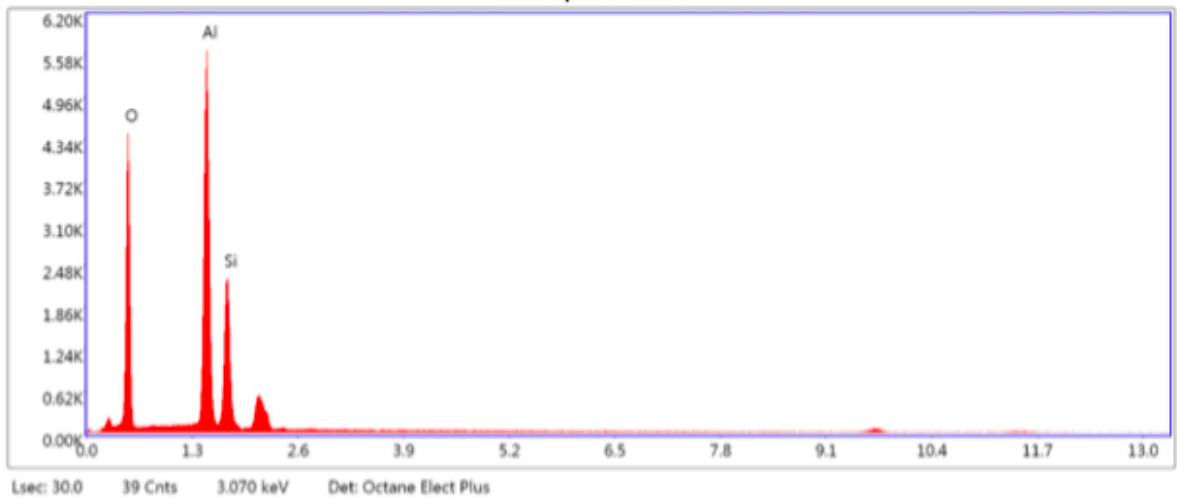
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al ₂ O ₃	40.93	30.45	1027.91	4.53	0.1712	0.9434	0.7258	1.0094
Si O ₂	48.07	60.69	956.34	5.57	0.1581	0.9642	0.6366	1.0028
K ₂ O	11.00	8.85	293.59	4.69	0.0845	0.8943	0.8993	1.0070

EDS Spot 7 - Det 1



Difratogramas quartzito flexível:

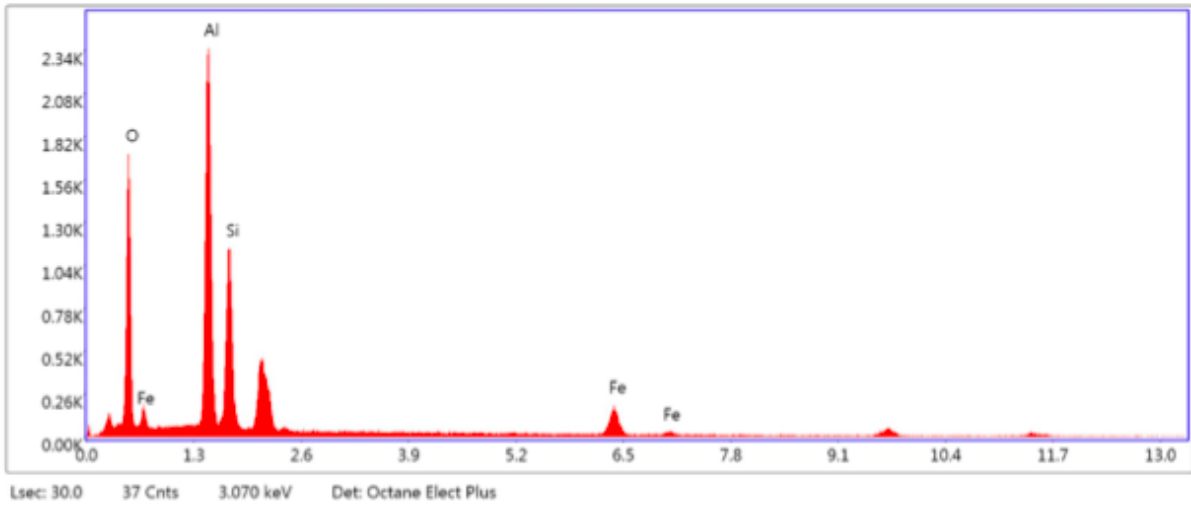
EDS Spot 1 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al 2O3	62.04	49.06	1478.65	4.16	0.2364	0.9374	0.7385	1.0055
Si O2	37.96	50.94	617.88	6.51	0.0979	0.9580	0.5565	1.0008

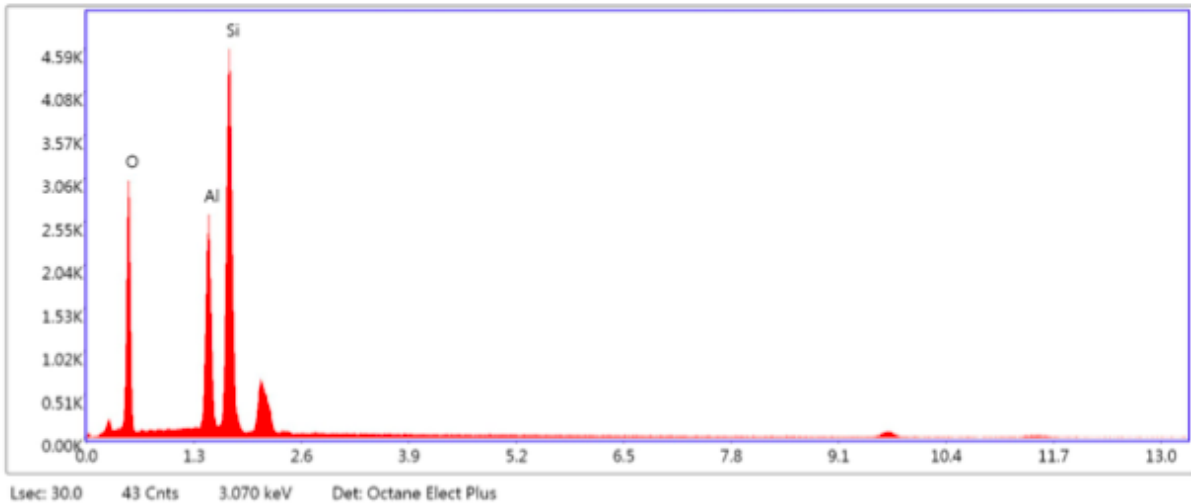
EDS Spot 2 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al 2O3	53.96	41.79	653.62	5.23	0.2079	0.9500	0.6695	1.0054
Si O2	35.33	46.43	320.10	7.13	0.1009	0.9710	0.5520	1.0016
Fe O	10.71	11.78	72.76	7.48	0.0814	0.8183	1.0045	1.0447

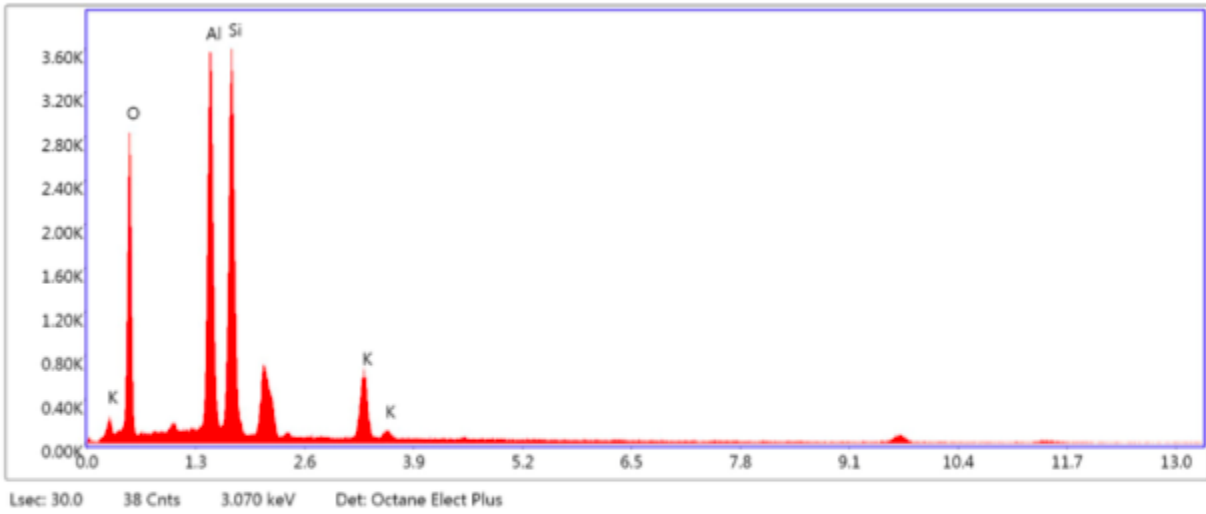
EDS Spot 3 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al 2O3	30.90	20.86	672.32	4.68	0.1289	0.9325	0.7261	1.0136
Si O2	69.10	79.14	1255.81	4.88	0.2387	0.9531	0.6748	1.0007

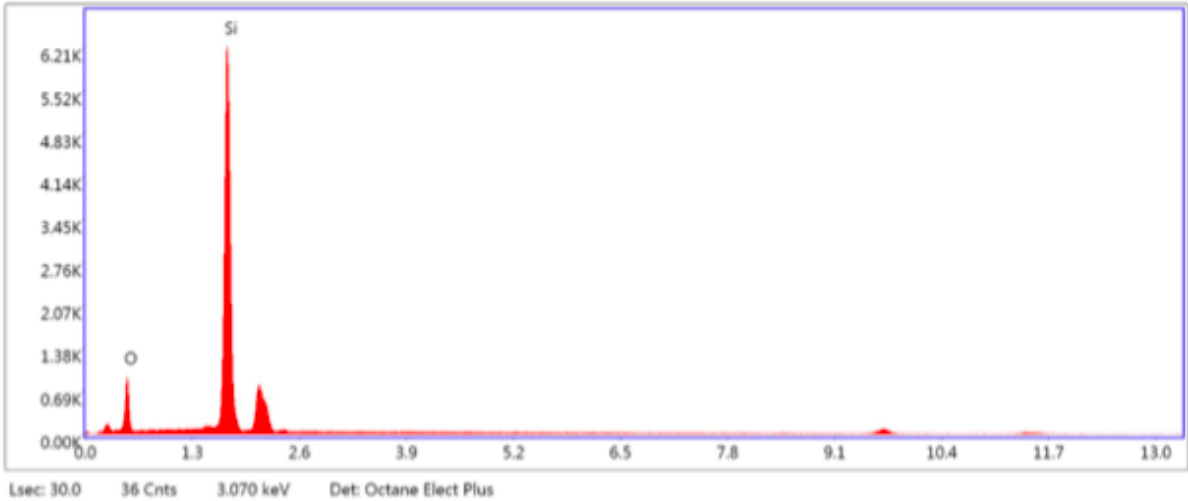
EDS Spot 4 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Al 2O3	40.63	29.77	1023.55	4.61	0.1584	0.9407	0.7208	1.0097
Si O2	51.42	63.93	1021.89	5.68	0.1568	0.9615	0.6293	1.0022
K 2O	7.95	6.30	213.86	5.71	0.0569	0.8917	0.8920	1.0077

EDS Spot 5 - Det 1



eZAF Smart Quant Results with Oxides

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
Si O2	100.00	100.00	1724.87	3.13	0.5025	0.9481	0.8306	1.0006