



**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DO PERFIL DE INTEMPERISMO
DO CARBONATITO TRÊS ESTRADAS, RS**

Porto Alegre, 2015

HENRIQUE DE MAMAN ANZOLIN

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DO PERFIL DE INTEMPERISMO
DO CARBONATITO TRÊS ESTRADAS, RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores:

Prof. Dr. Norberto Dani

Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus

Supervisor(a):

João Angelo Toniolo

Porto Alegre, 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Anzolin, Henrique de Maman

Mineralogia e Geoquímica Do Perfil de Intemperismo
Do Carbonatito Três Estradas, RS . / Henrique de Maman Anzolin.
Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015.

[116 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade
Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de
Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es):Norberto Dani

Coorientador(es):Marcus Vinicius Dorneles Remus

1. Carbonatito 2. Geoquímica 3. Fosfato 4. Apatita I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Veleida Ana Blank

CRB 10/571

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DO PERFIL DE INTEMPERISMO DO CARBONATITO TRÊS ESTRADAS**, elaborado por HENRIQUE DE MAMAN ANZOLIN, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Arthur Cezar Bastos Neto

Lauren Duarte

Pedro Luiz Juchem

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Alfredo Geraldo Anzolin e Dóris Maria de Maman Anzolin, que me apoiaram e me deram condições para concluir mais esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram, direta ou indiretamente para a conclusão desta etapa. Por isso, não posso deixar de agradecê-las adequadamente pelo auxílio.

Aos meus pais e minha irmã, por me apoiarem durante toda a minha vida e por me ensinarem o verdadeiro significado de uma família. Agradeço também aos meus primos, amigos e companheiros desde a infância Felipe (Fi), Jonatas (Zé), Fernando (Fernandinho) e em especial ao Leandro (Alemão), com quem compartilhei bons momentos e aprendi importantes lições sobre sobrevivência, mecânica, vocabulário e outros assuntos não tão importantes.

Aos meus amigos durante a graduação e colegas da bolsa iniciação científica Ana Paula, Gabriel, João Vitor, Kelvyn, Maurício e Rafael Bender, por fazerem minhas refeições no Restaurante Universitário se tornarem mais agradáveis e comestíveis, além de aceitarem discutir com mais naturalidade do que seria de se esperar minhas teorias as vezes excêntricas. E um agradecimento especial ao Kelvyn, pelos momentos passados juntos sentados pelo Vale observando que sim, ainda há motivos para se perscrutar a humanidade. Agradeço também ao Edgar, por sempre me ajudar e permitir que eu usufrísse da difração de raios X e da cafeteira.

Aos meus companheiros de treino de Wing Chun, por me ajudarem, voluntariamente ou não, a desestressar e limpar a mente depois de um dia longo de pesquisa. Saibam que todo o suor derramado não foi em vão.

Agradeço ao professor Norberto Dani, por todo o conhecimento compartilhado durante esse tempo em que trabalhamos juntos, por acreditar no meu potencial e me colocar no caminho certo, quando meus pensamentos me levavam a conclusões equivocadas. Ao professor Rafael R. Ribeiro, por me auxiliar sempre que os programas computacionais insistiam em complicar a minha vida. Ao professor Marcus Remus, por sempre demonstrar interesse pelo meu trabalho e me auxiliar sempre que foi solicitado. A empresa Águia Metais, por disponibilizar amostras importantes para a realização deste trabalho.

Mah, por ser a minha luz no fim do túnel e me dar a esperança de um futuro melhor, por me dar suporte, mesmo que a distância, nas noites e finais de semana em que eu saía tarde do Vale e por me dar um motivo para sorrir nas noites frias e solitárias de Porto Alegre. Muito obrigado por estar presente na minha vida.

Pois nada se cria, nem nas operações da arte, nem nos da natureza, e podemos postular que, em qualquer operação, há uma quantidade igual de matéria antes e depois da operação, que a qualidade e quantidade dos ingredientes são a mesma, e que só há alterações, modificações.

Antoine Lavoisier - Traité élémentaire de chimie.

RESUMO

Este estudo investiga o comportamento mineralógico e geoquímico do manto de alteração na região do Carbonatito Três Estradas, Lavras do Sul - RS. Informações preliminares estabelecem que o principal mineral concentrador do fósforo nestas rochas é a apatita e dependendo das condições locais, este mineral poderá ser preservado ou será transformado para outras fases que acomodarão o fósforo. Os carbonatitos são rochas com grande interesse dentro do cenário geológico devido a sua importância em estudos envolvendo a evolução geotectônica, petrológica e geoquímica e também devido ao seu potencial econômico. Muitas jazidas de interesse econômico em nosso país estão relacionadas com processos supergênicos de enriquecimento das rochas (protólitos). Os carbonatitos se constituem em protólitos naturalmente enriquecidos em carbonatos, fosfatos e elementos do grupo das terras raras (ETR). As recentes descobertas de carbonatito no Rio Grande do Sul ligado a projetos de prospecção de novos insumos agrícolas, entre os quais cita-se novas fontes de fósforo despertou o interesse científico e motivou a execução deste trabalho. As metodologias aplicadas para a realização deste trabalho envolvem a descrição das amostras coletadas em trincheira e furo de sondagem com o auxílio de lupa binocular e microscopia ótica e a caracterização mineralógica e química através das técnicas de espectrometria de fluorescência de raios X, difratometria de raios X e microssonda eletrônica. Os resultados demonstraram que o intemperismo atuante no carbonatito Três Estradas foi eficiente para concentrar fosfato, na forma de apatita e dentro dos resultados analíticos obtidos a possibilidade de representar um depósito com potencial econômico para este bem mineral. Além da apatita primária, foram identificadas outras duas fases de apatita, com característica de ser de origem secundária e supergênica. A análise química das apatitas permitiu classificá-las como hidroxi-fluorapatita de acordo com o normalmente esperado para rochas carbonatíticas. Os dados mostram que o perfil de intemperismo não é homogêneo, apresentando áreas com concentrações variáveis de fósforo.

Palavras-Chave: Carbonatito. Geoquímica. Fosfato. Apatita.

ABSTRACT

This study investigates the mineralogical and geochemical behavior of the weathering mantle in the area of Três Estradas carbonatite, in Lavras do Sul – RS. Preliminary information establish that the main mineral concentrator of phosphorus in this rocks is the apatite and, pending on the local conditions, this mineral can be preserved or transformed to accommodate, in other phases, the phosphorus. The carbonatites are rocks with great interest inside the geological scenario due to its relevance amongst studies involving the geotectonic, petrological and geochemical evolution and also due to its economic potential. Many deposits of economic interest in our country are linked with process of supergenic enrichment of rocks (protolith). The carbonatites are constituted in protoliths naturally enriched with carbonates, phosphates and elements of the rare earth group (REE). Recent discoveries of carbonatite in Rio Grande do Sul, involved with prospection projects of new agricultural inputs, among those is quoted new sources of phosphorus, has brought up scientific relevance and has motivated the execution of this present work. The methodologies applied in the making of the project involve the description of the samples collected in trenches and boreholes with the help of binocular magnifying glass and optical microscopy and the mineralogical and chemical characterization through spectrometry of x ray fluorescence, x ray diffractometry and electron microprobe techniques. The results demonstrate that the active weathering in Três Estradas carbonatite was efficient to concentrate phosphorus, in the form of the apatite and, inside the analytical results obtained, the possibility of representing a deposit with economical potential to this mineral good. Besides the primary apatite, there were identified another two phases of it, with secondary and supergenic origin characteristics. The chemical analysis of the apatites has allowed classifying it as hydroxyfluorapatite according to what is usually expected to carbonatic rocks. The data show the weathering profile is not homogeneous, presenting areas with varying concentrations of phosphate.

Key-words: Carbonatite. Geochemical. Phosphate. Apatite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área do projeto e do carbonatito Três Estradas, incluindo-se as principais vias de acesso, drenagem e estrada de ferro. Modificado de Hasenack e Weber (2010).	15
Figura 2: Mapa Geológico da região de ocorrência do Carbonatito Três Estradas. (Modificado de CPRM, 2006).	16
Figura 3. Classificação química para carbonatitos com $\text{SiO}_2 < 20\%$. Usando porcentagem em peso dos óxidos. Modificado de Woolley & Kempe (1989).	20
Figura 4: Mapa climático do Rio Grande do Sul. Os pontos marcados representam o carbonatito Três Estradas (em vermelho, alvo deste projeto) e o carbonatito Joca Tavares (em amarelo). Modificado de Kuinchtner (2001).	24
Figura 5: Caracterização do clima da região de estudo obtido com os dados da estação de Bagé, a mais próxima do carbonatito Três Estradas. Observa-se disponibilidade de água durante a maior parte do ano com uma tendência de uma fraca deficiência hídrica apenas nos meses de dezembro e janeiro.	24
Figura 6: Representação das amostras cedidas pela empresa Águia Metais, pertencentes ao furo de sondagem TED 1101.	27
Figura 7: Foto da trincheira amostrada. Esta trincheira foi aberta durante uma campanha de prospecção mineral para ouro na região.	29
Figura 8: Perfil vertical amostrado. Foram coletadas 8 amostras, sendo uma no Horizonte R, de maior profundidade e menor alteração, 5 amostras no horizonte C, de maior representatividade no perfil, 1 amostra na zona de transição entre o horizonte C e o horizonte A e 1 amostra no horizonte A.	30
Figura 9: Croqui do perfil da trincheira amostrado. Observa-se representado zonas de maior alteração paralelas à foliação subvertical do carbonatito. Considera-se a possibilidade de que a mudança composicional nas bandas do carbonatito faça com que algumas zonas sofram maior alteração.	31
Figura 10: Fluxograma de atividades desenvolvidas neste trabalho.	32
Figura 11: Lupa modelo Olympus Tokyo 208792 utilizada na descrição prévia das amostras. ...	33
Figura 12: Microscópio de luz transmitida e refletida modelo Leitz Aristomet.	34
Figura 13 Modelo do funcionamento da Espectrometria de Fluorescência de raios X. Modificado de Marques (2006).	35
Figura 14: Difratorômetro SIEMENS, modelo D5000 com goniômetro θ - θ disponível no Laboratório de Difratorometria de Raios X do CPGq.	36
Figura 15: Microsonda eletrônica modelo Cameca SX Five disponível no Laboratório de Microsonda Eletrônica do CPGq no Instituto de Geociências.	38
Figura 16: Programa Seditools®, versão 2.1.1, utilizado para calcular o tempo de decantação para separação de fração menor que $2\mu\text{m}$	40
Figura 17: Prensa Herzog utilizada para a confecção de pastilhas prensadas.	41
Figura 18: Equipamento para preparação de amostras fundidas da marca PANalytical, modelo Eagon 2, disponível no Laboratório de Geoquímica do CPGq.	43
Figura 19: Amostra TED01T em lupa. Na imagem é possível observar a presença de agregados de magnetita e hematita (dado obtido através da DRX) e de cavidades de dissolução.	45

Figura 20: Foto em lupa de uma cavidade de dissolução da amostra TED01T. Nesta é possível observar pequenos cristais incolores incrustados nas paredes da cavidade.	45
Figura 21: Foto em lupa de vênulos composto por apatita (informação obtida posteriormente por DRX), com cavidade de dissolução no centro da imagem. Amostra TED02T.....	46
Figura 22: Foto em lupa de vênulos com espessura de cerca de 2mm. O mesmo material presente no vênulo aparece também disseminado na amostra. Amostra TED 04T.	46
Figura 23: Veios Detalhe dos vênulos parcialmente preenchidos. Amostra TED04T.	47
Figura 24: Resultados da análise por DRX ao longo do perfil vertical da trincheira evidenciando a presença dominante de minerais opacos identificados como magnetita (Mag), hematita (Hem) e fracamente a goethita (Gt). Segue a presença de quartzo (Qz) e apatita (Ap).	48
Figura 25: identificação da mineralogia por DRX dos vênulos comuns nas amostras TED02T e TED04T da trincheira. O mineral dominante identificado são as apatitas (Ap). Na amostra TED02T aparece argilominerais.	49
Figura 26: Fotos em lâmina delgada da amostra TED 38. A) Grãos de apatita de até 500 µm, subédricos, e fraturados. B) Banda com maior concentração de minerais opacos e apatita.	50
Figura 27: Fotos em lâmina delgada da amostra TED 01T. A) Apatita primária (Ap1), subédrica a euédrica, apresentando dissolução parcial da borda; Crescimento epitaxial de apatita secundária (Ap2) sobre as apatitas primárias; Cristais micrométricos de apatita ocorrem preenchendo as cavidades e sobre os minerais presentes. B) Zona com alta concentração de cristais micrométricos de apatita preenchendo cavidades.....	51
Figura 28: Curvas de variação da concentração de elementos imóveis ao longo do furo de sondagem estudado.....	52
Figura 29: Mediana da comparação de concentrações dos elementos maiores e menores para as amostras TED 01 até TED 05.	53
Figura 30: Mediana da comparação de concentrações dos elementos maiores e menores para as amostras TED 06 até TED 10.	53
Figura 31: Mediana da comparação de concentrações dos elementos maiores e menores para as amostras TED 11 até TED 20.	54
Figura 32: Comparação de concentrações dos elementos maiores e menores das amostras pertencentes ao perfil vertical da trincheira amostrada.	54
Figura 33: Análise em pó total das amostras coletadas no perfil vertical da trincheira.	55
Figura 34: Análise em pó total das amostras coletadas no perfil horizontal da trincheira.....	56
Figura 35: Análise da fração menor que 2 µm da amostra TED 02T do perfil vertical da trincheira.	57
Figura 36: Análise da fração menor que 2 µm da amostra TED 13T do perfil horizontal da trincheira.	57
Figura 37: Análise em pó total das amostras coletadas na zona de menor profundidade do furo (TED 01 - 05).	59
Figura 38: Análise em pó total das amostras coletadas na zona de profundidade intermediária do furo (TED 06 - 10).	60
Figura 39: Análise em pó total das amostras coletadas na zona de maior profundidade do furo (amostras TED 11 - 20).	61
Figura 40: Análise da fração menor que 2 µm da amostra TED 20 do furo de sondagem TED 1101, apresentando os picos característicos da esmectita.....	62

Figura 41: Análise da fração menor que 2 µm orientada da amostra TED 19 do furo de sondagem TED 1101, com os picos característicos da esmectita e da clorita.....	63
Figura 42: Análise da fração menor que 2 µm orientada saturada em Ca da amostra TED 02 do furo de sondagem TED 1101, apresentando os picos característicos da esmectita nestas condições.....	64
Figura 43: Comportamento de alguns elementos químicos obtidos a partir da análise de apatitas da amostra TED 01T com a microsonda eletrônica. Vermelho: Apatitas primárias. Azul: crescimento epitaxial. Verde: Apatitas fibrosas e micrométricas. A) Razão da porcentagem de CaO <i>versus</i> Na ₂ O. B) Razão da porcentagem de CaO <i>versus</i> SrO. C) Gráfico ternário F <i>versus</i> OH ⁻ <i>versus</i> Cl. D) detalhe do gráfico C, mostrando pouca variação entre as diferentes fases de apatita.	65
Figura 44: Comparação entre os resultados obtidos no atual estudo e os existentes na bibliografia. A) Composição das apatitas em diferentes rochas hospedeiras: Vermelho representa rochas félsicas, azul rochas máficas, cinza são carbonatitos, verde são depósitos hidrotermais e amarelo rochas sedimentares. (Webbster & Piccoli, 2015). B) Composição das apatitas analisadas neste trabalho. Vermelho representa as apatitas primárias, azul o crescimento epitaxial e verde as apatitas fibrosas e micrométricas que caem dentro do campo característico de apatitas oriundas de carbonatito.	70

LISTA DE SIGLAS

DRX – Difractometria de raios X

FRX – Fluorescência de raios X

P.F. – Perda ao Fogo

TED – Três Estradas *District* - Distrito de Três Estradas

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3.	OBJETIVOS.....	18
2.	ESTADO DA ARTE	18
2.1.	ASPECTOS GERAIS SOBRE OS CARBONATITOS	19
2.2.	O INTEMPERISMO EM CARBONATITOS	21
2.3.	O CARBONATITO TRÊS ESTRADAS	21
2.4.	ASPECTOS GERAIS DO INTEMPERISMO NO RIO GRANDE DO SUL.....	22
3.	HIPÓTESES	25
4.	METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO	26
4.1.	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	26
4.2.	COLETA DE AMOSTRAS.....	26
4.2.1.	FURO DE SONDAÇÃO.....	26
4.2.2.	EXPEDIÇÃO DE CAMPO.....	27
4.2.2.1.	ETAPA PRÉ-CAMPO.....	27
4.2.2.2.	PROCEDIMENTOS DE CAMPO	28
4.2.2.3.	COMPILAÇÃO DA CADERNETA DE CAMPO.....	28
4.3.	MÉTODOS DE ANÁLISE	31
4.4.	TÉCNICAS ANALÍTICAS.....	32
4.4.1.	ANÁLISE EM LUPA BINOCULAR.....	32
4.4.2.	MICROSCOPIA ÓTICA	33
4.4.3.	ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	34
4.4.5.	MICROSSONDA ELETRÔNICA	36
4.5.	TRABALHOS DE LABORATÓRIO	38
4.5.1.	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE EM DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	38
4.5.2.	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE EM FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	40
4.5.2.1.	AMOSTRAS Prensadas.....	40
4.5.2.2.	AMOSTRAS Fundidas.....	42
4.5.3.	PERDA AO FOGO.....	43
5.	RESULTADOS	44
5.1.	ANÁLISE EM LUPA BINOCULAR	44
5.2.	ANÁLISE DE LÂMINAS DELGADAS EM MICROSCÓPIO ÓPTICO	49
5.3.	ANÁLISE QUÍMICA EM FRX	51
5.4.	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	54
5.4.1.	ANÁLISE EM DRX DAS AMOSTRAS DA TRINCHEIRA.....	55
5.4.2.	ANÁLISE EM DRX DAS AMOSTRAS DO FURO DE SONDAÇÃO	58
5.5.	ANÁLISE QUÍMICA EM MICROSSONDA ELETRÔNICA.....	64
6.	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	65
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DA TRINCHEIRA	66
6.2.	CARACTERIZAÇÃO DO FURO DE SONDAÇÃO TED 1101	67
6.3.	CARACTERIZAÇÃO DAS APATITAS NO ALTERITO	68
6.4.	CONCLUSÕES FINAIS	70
7.	REFERÊNCIAS	72
8.	APÊNDICES	76

1. INTRODUÇÃO

O carbonatito Três Estradas está localizado dentro dos limites do município de Lavras do Sul e não distante dos municípios de Ibaré e Dom Pedrito. Recebeu este nome por se encontrar próximo ao entroncamento das estradas que ligam estes três municípios, nas coordenadas UTM 767812E 6577414N fuso 21J. A Figura 1 ilustra a localização do carbonatito Três Estradas dentro do Rio Grande do Sul.

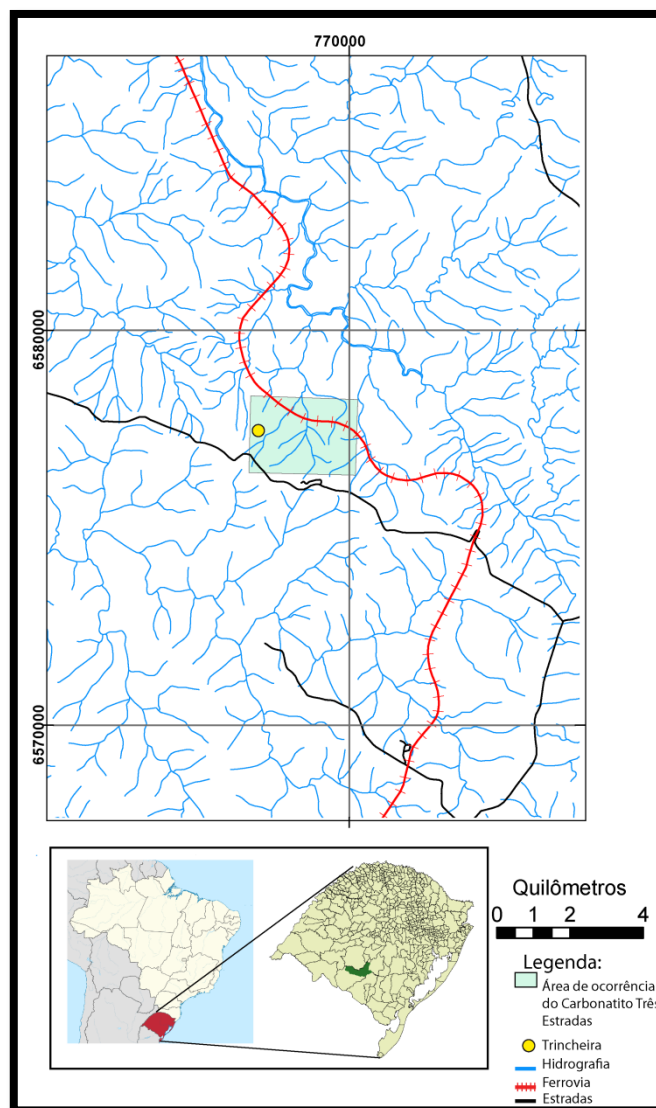


Figura 1: Localização da área do projeto e do carbonatito Três Estradas, incluindo-se as principais vias de acesso, drenagem e estrada de ferro. Modificado de Hasenack e Weber (2010).

O carbonatito Três Estradas está inserido no Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CPRM, 2006). O complexo é descrito como um “gnaisse bimodal félsico-máfico intercalado, variando entre ortognaisse quartzo-feldspático e máfico, ocorrendo sillimanita gnaisses, mármore, metapelitos (BIF’s) e lentes de lherzolito metamorizadas na fácies granulito” (Figura 2).

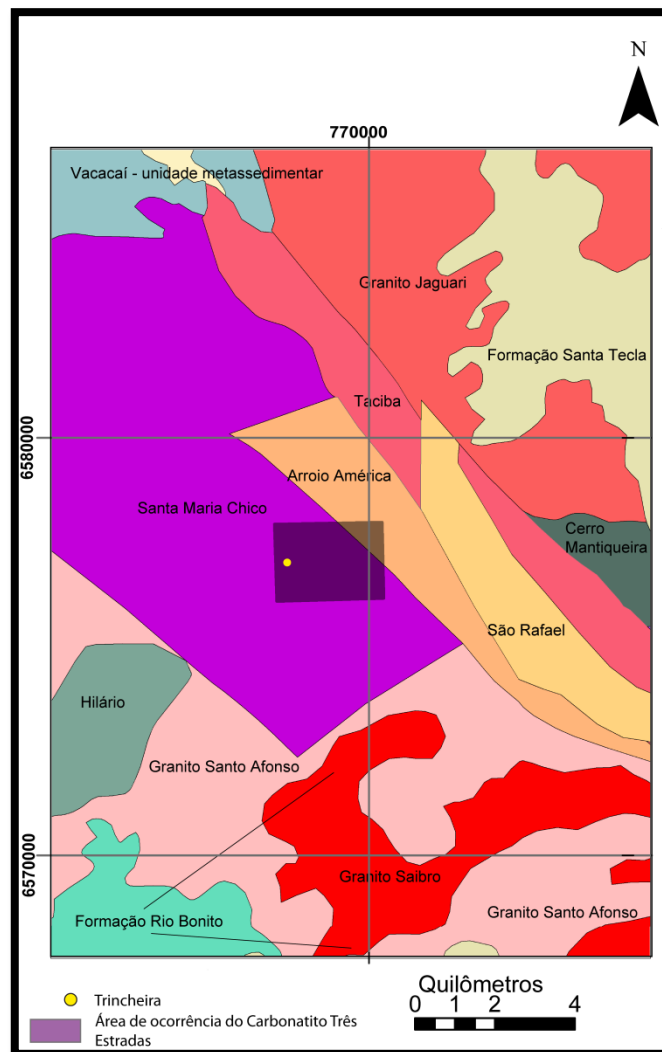


Figura 2: Mapa Geológico da região de ocorrência do Carbonatito Três Estradas. (Modificado de CPRM, 2006).

O Complexo Granulítico Santa Maria Chico foi primeiramente descrito por Nardi & Hartmann (1979), como formado por gnaisses quartzo-feldspáticos (granulitos), gnaisses básicos, anortositos, ultramafitos, metapelitos (sillimanita gnaisses) e mármore, com retrometamorfismo para a fácies xisto verde por efeito térmico de granitos intrusivos.

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Carbonatitos são rochas ígneas de ocorrência rara na crosta terrestre na forma de corpos pequenos e que apresentam uma mineralogia ímpar. A descoberta de dois corpos carbonatíticos no Rio Grande do Sul (Carbonatito Joca Tavares e Carbonatito Três Estradas) pelo Projeto Agrominerais do RS (CPRM-SUREG Porto Alegre) vem despertando o interesse por estas rochas, até então não identificadas no estado. Por serem descobertas recentes (as primeiras publicações datam de 2010), os estudos envolvendo a geologia das ocorrências ainda estão em andamento. O projeto aqui apresentado possui o foco voltado para os produtos de alteração gerados pelo carbonatito Três Estradas. Dentro do tema carbonatito, o problema abrangido por este projeto é a alteração de natureza supergênica desenvolvida a partir do carbonatito, adotando-se uma metodologia que permita caracterizar mineralogicamente e geoquimicamente os produtos de alteração, bem como a identificação de possíveis compartimentações ou zoneamento.

1.2. JUSTIFICATIVA

Os carbonatitos são rochas com grande interesse econômico e apresentam minerais com significativa importância estratégica, entre as quais a apatita, mineral utilizado para a produção de ácido fosfórico, insumo básico na fabricação de fosfatos para fertilizantes. Nem todos os carbonatitos são enriquecidos em apatita, daí uma das justificativas da realização deste projeto, que irá avaliar a concentração do mineral apatita na rocha e nos produtos de alteração intempérica. Globalmente também são importantes na produção de elementos terras raras (ETR), estratégicos devido a sua larga utilização tecnológica, porém, este aspecto não será investigado neste projeto.

O Brasil e especialmente o Rio Grande do Sul são grandes consumidores de fosfato na indústria agrícola. Por isso, a necessidade de mercado em aumentar a sua produção, já que este é importado de vários países. Outro fato significativo é que possuímos solos naturalmente pobres em macro nutrientes (NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio), tornando o Brasil o quarto maior importador de fertilizantes e o segundo maior importador de produtos fosfatados (Lapido-Loureiro, Monte e

Nascimento, 2008). Isso faz com que a prospecção de novos depósitos fosfáticos seja uma necessidade nacional. Embora haja significativa produção de fosfato apatítico, a descoberta de novas ocorrências destas rochas gera um grande interesse por parte da indústria de fertilizantes, sendo necessários estudos geoquímicos e mineralógicos detalhados para determinar a potencialidade econômica destas ocorrências.

O atual projeto de estudo dos carbonatitos do Rio Grande do Sul contempla uma avaliação da composição química do manto de alteração desenvolvido no carbonatito Três Estradas, destacando o estudo do fósforo no processo de alteração da rocha. Em paralelo, o projeto permitiu o desenvolvimento da parte técnica nos laboratórios do Centro de Pesquisa em Petrologia e Geoquímica (CPGq), envolvendo a determinação do teor de fósforo em amostras com concentração elevadas e incomuns nos padrões de rocha utilizados.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo deste projeto foi estudar a mineralogia e a geoquímica dos produtos de alteração do Carbonatito Três Estradas utilizando as técnicas disponíveis no CPGq. Os perfis de alteração foram descritos em atividades de campo com o levantamento de seção vertical e horizontal em trincheira e em amostras de testemunho de furo de sondagem, disponibilizado pela empresa Águia Metais. Nestas unidades foram coletadas amostras para a realização de análises mineralógicas e químicas. Da mesma forma, um levantamento geral do sítio com o uso de modelos do terreno, cartas topográficas e interpretação de imagens e de fotografias aéreas foram realizados na tentativa de situar os perfis de alteração em relação aos compartimentos geomorfológicos da área.

2. ESTADO DA ARTE

Para a montagem do projeto foi realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre os temas em estudo, conforme apresentado a seguir.

2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE OS CARBONATITOS

Carbonatitos são classificados como rochas ígneas subsaturadas em sílica cuja ocorrência poderá ser intrusiva, extrusiva e hipoabissal. Estão geralmente associados a complexos ígneos alcalinos em regiões intra-placa relativamente estáveis (Modreski, Armbrustmacher & Hoover, 1995), na forma de *plugs* centrais, diques, *sills*, brechas e veios, além de cinturões móveis, ilhas oceânicas e no assoalho oceânico (Lapin, Iwanuch & Ploshko, 1999). Os carbonatitos possuem como principal característica a composição predominantemente carbonática (normalmente calcita em mais de 50% dos carbonatitos). Magmas com essas características são bastante incomuns, sendo conhecidas apenas 529 ocorrências no mundo, representando menos de 1% da crosta. Conforme citado anteriormente, os carbonatitos se apresentam em corpos com tamanhos reduzidos, porém possuem um grande potencial econômico, já que é comum a presença de apatita, minerais de ETR e de nióbio. Além destes elementos também podem conter anomalias de urânio, tório, cobre, ferro, titânio, bário, flúor, zircônio e outros elementos raros ou incompatíveis (Modreski *et al.* 1995). Outros minerais comuns em carbonatitos são a barita, magnetita, fluorita e pirocloro (Best, 2003).

A apatita, além de cristalizar nas fases precoces, também pode ocorrer como um mineral tardio, sob a forma de fluorapatita ou carbonato-fluorapatita, rica em ETR e Sr. As variedades de apatita dos carbonatitos normalmente são zonadas, havendo comumente um enriquecimento de ETR e Na no anel periférico e de Sr e F no núcleo (Lapido-Loureiro, Castro e Silva, 2005)

A classificação proposta pela IUGS (Le Maitre, 2002), é baseada no tipo de carbonato, conforme segue:

Carbonatitos Calcíticos: Aqueles que possuem principalmente calcita, como os sövitos (granulometria grossa) e os Alvikitos, quando a granulometria é fina a média.

Carbonatitos Dolomíticos: Têm como principal carbonato a dolomita, como os beforsitos e os rauhaugitos (Modreski *et al.* 1995).

Carbonatitos Ricos em Ferro ou Ferríferos: Predominam carbonatos de ferro como os siderita carbonatitos ou ankerita carbonatitos.

Natrocronatitos ou Carbonatitos Alcalinos: Possuem principalmente carbonatos ricos em metais alcalinos, como potássio e sódio. Um exemplo bastante conhecido é o carbonatito de Oldoinyo Lengai na Tanzânia, que é o único caso conhecido de lavas de composição natrocronatítica.

Quando o tamanho de grão é muito fino é mais difícil a classificação do carbonatito através da identificação dos carbonatos por técnicas mais comuns como a microscopia óptica. Neste caso é recomendado o uso de uma classificação química (Figura 3) baseada nas proporções dos óxidos de Ca-Mg-Fe (Woolley & Kempe, 1989 *apud* Le Maitre, 2002). Quando a quantidade de SiO_2 é maior que 20%, os carbonatitos podem ser classificados como silicocarbonatitos (Le Maitre, 2002).

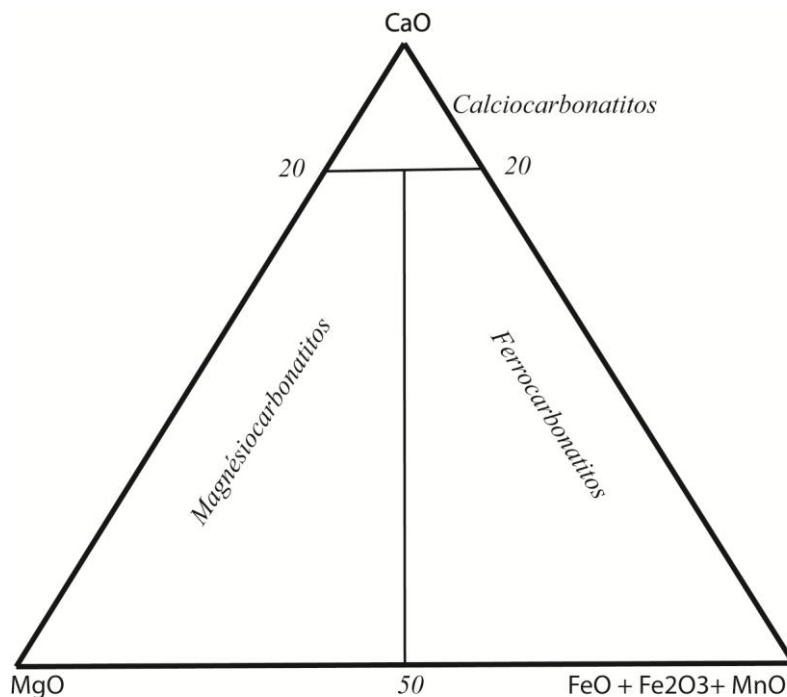


Figura 3. Classificação química para carbonatitos com $\text{SiO}_2 < 20\%$. Usando porcentagem em peso dos óxidos. Modificado de Woolley & Kempe (1989).

Considerando o posicionamento geológico e a geoquímica dos elementos traços, Chakhmouradian (2009) classifica os carbonatitos em dois grupos: (1) carbonatitos localizados em riftes e estruturas extencionais de menor escala desenvolvidos em crátons arqueanos estáveis ou cinturões paleo-orogênicos e (2) Carbonatitos localizados em sistemas colisionais pós-orogênicos. Em ambos os casos predominam os carbonatitos calcíticos ou sövitos. Os carbonatitos tipo 1 se

diferenciam quimicamente dos carbonatitos do tipo 2 por apresentarem grande abundância de elementos do tipo HFSE (high-field-strength-elements, elementos de elevado potencial iônico), como o Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, além de U, Rb e V, porém apresentam baixas concentrações de Sr, Ba, Sb, ETR, F e S.

2.2. O INTEMPERISMO EM CARBONATITOS

O intemperismo nos carbonatitos costuma produzir espessos perfis de alteração, principalmente em regiões tropicais a subtropicais, onde as condições climáticas são favoráveis, como descrito no carbonatito Juquiá (Walter, Hanon, Flicoteaux, Girard & Melfi, 1995) e no complexo carbonatítico Catalão I (Oliveira & Imbernon, 1998), ambos carbonatitos localizados no Brasil.

A alteração química nesses ambientes promove a dissolução dos carbonatos sem deixar resíduos. O ambiente torna-se então empobrecido em cálcio, proporcionando um aumento do pH a ponto de desestabilizar a apatita, que é preservada da alteração enquanto o carbonato está presente (Altschuler, 1973 *apud* Oliveira & Imbernon, 1998). O fósforo é então liberado da apatita para participar de atividades biológicas de superfície ou formar novas fases minerais como apatitas secundárias (Toledo, Lenharo, Ferrari, Fontan, Parseval & Leroy, 2004), além de alumino-fosfatos ricos em ETR, como os minerais do grupo da crandalita $[\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}]$, formados pela goyazita $[\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}]$, gorceixita $[\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}]$, florencita $[\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6]$ e a plumbogumita $[\text{PbAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5]$ (Lapido-Loureiro *et al.* 2005). A apatita pode também se mostrar resistente ao intemperismo, gerando depósitos lateríticos de apatita residual de importância econômica, sendo estes os principais explorados no Brasil (Toledo *et al.* 1999).

2.3. O CARBONATITO TRÊS ESTRADAS

No Rio Grande do Sul, o carbonatito Três Estradas está localizado entre os municípios de Lavras do Sul, Ibaré e Dom Pedrito, dentro do Domínio Taquarembó, no escudo Sul Rio-Grandense. As primeiras descrições mostram que o carbonatito é

formado por minerais com grãos finos a médios com carbonato (75% a 90%), apatita (10% a 30%), flogopita (10%), minerais opacos (<5%) e raros grãos de anfibólio. As análises realizadas até o momento indicam a influência do metamorfismo, estando intercalado com anfibolitos e metagranitóides (Toniolo, Grazia, Parisi e Pinto, 2011). As análises químicas preliminares possibilitaram verificar a existência de significativos teores de fósforo e ETR (Grazia, Toniolo, Parisi, Muller, e Dressler, 2011). Do ponto de vista estrutural e tectônico, a gênese do carbonatito possui duas interpretações: (1) na forma de lentes dentro da rocha gnáissica hospedeira, e (2) o corpo está disposto dentro de uma faixa limitada, que coincide com uma zona de cisalhamento ou com “extremos paralelos ao bandamento gnáissico da rocha hospedeira” (Senhorinho, 2012). Portanto, no interior desta faixa não ocorreria um maciço carbonatítico, mas sim uma concentração de fragmentos com esta composição.

O carbonatito Três Estradas é, ainda, classificado morfologicamente como sendo do Tipo Linear (Senhorinho, 2012), pois apresenta disposição concordante com as das rochas encaixantes, estendendo-se paralelamente à estruturação regional geral (Lapin *et al.* 1999).

2.4. ASPECTOS GERAIS DO INTEMPERISMO NO RIO GRANDE DO SUL

Entende-se por intemperismo os processos de ordem física, química ou biológica que as rochas sofrem ao aflorar na superfície terrestre, resultando em rocha alterada, também chamada de alterito ou saprolito (Teixeira, Toledo, Fairchild e Taioli, 2009).

O Intemperismo físico, também chamado de intemperismo mecânico, resulta na desintegração da rocha sem significativa alteração dos minerais presentes. Isso é feito de diversas formas, como mudanças de temperatura, alívio de pressão, saturação e perda d'água e ação biológica, como o crescimento de raízes (Burt, Chorley, Brunnsden, Cox & Goudie, 2008).

Já o intemperismo químico resulta em mudanças na composição e estrutura química dos minerais presentes na rocha. Quando a rocha aflora em superfície ela é exposta a condições de temperatura e pressão muito diferentes daquelas em que se formou, com abundante oxigênio e água. Como resultado os minerais entram em

desequilíbrio com o meio, tendendo a dissolver ou a formar outros minerais, mais estáveis nas condições de superfície. O principal agente do intemperismo químico é a água da chuva, que juntamente ao CO_2 da atmosfera forma uma solução ácida. Matéria orgânica em decomposição também pode gerar uma série de ácidos que, ao se incorporar às águas percolantes, aumentam em muito sua acidez e poder de ataque aos minerais (Teixeira *et al.* 2009).

O clima é o principal fator controlador do intemperismo, tendo os parâmetros temperatura e distribuição sazonal da precipitação como principais agentes nas reações químicas. A Classificação Climática de Köppen, descrita em 1931 se baseia nestes dois parâmetros para classificar o clima de determinada região. Seguindo essa classificação Kuinchtner (2001) identificou o clima do Rio Grande do Sul como sendo do tipo Cfa (temperado chuvoso com verão quente) em sua maior parte e Cfb (temperado chuvoso com verão temperado) principalmente na região nordeste (Figura 4).

Para analisar o clima em detalhe na região do carbonatito Três Estradas, foram utilizados os dados históricos mensais no período de janeiro de 1961 até junho de 2015, envolvendo a precipitação total, evapotranspiração real e temperatura compensada média da Estação Meteorológica de Bagé, disponível no BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Os dados foram trabalhados de forma a se obter a mediana dos três parâmetros em cada mês do ano, considerando um intervalo de observação de 49 anos (Figura 5).

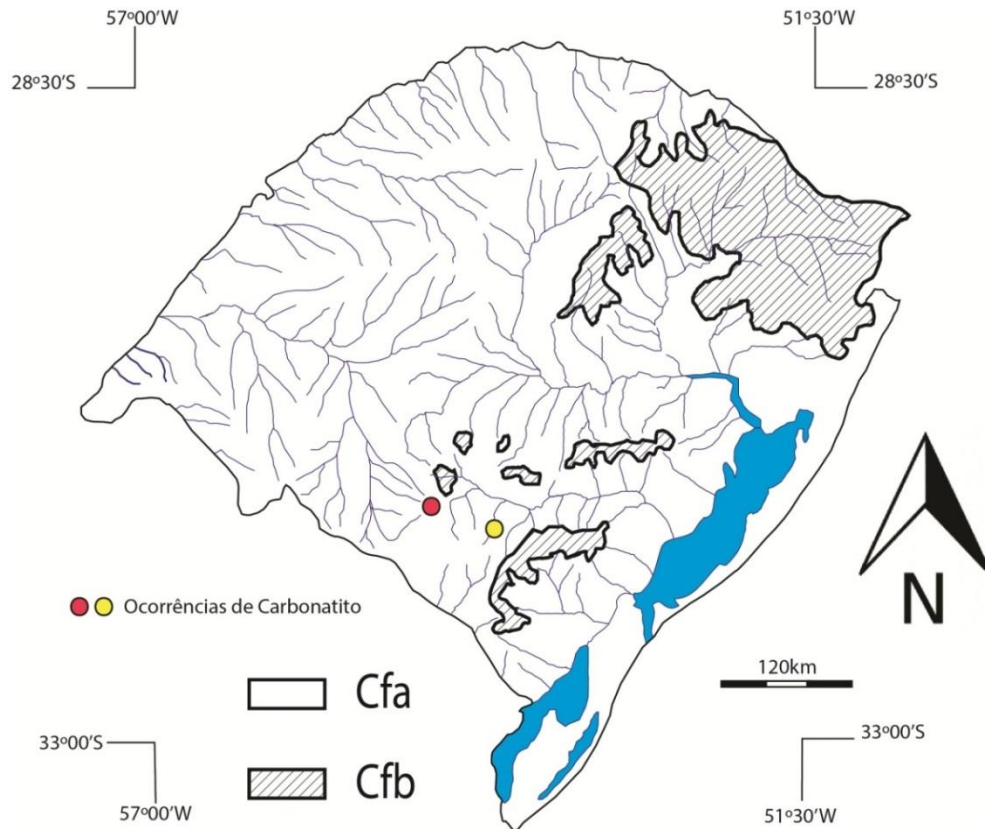


Figura 4: Mapa climático do Rio Grande do Sul. Os pontos marcados representam o carbonatito Três Estradas (em vermelho, alvo deste projeto) e o carbonatito Joca Tavares (em amarelo). Modificado de Kuinchtner (2001).

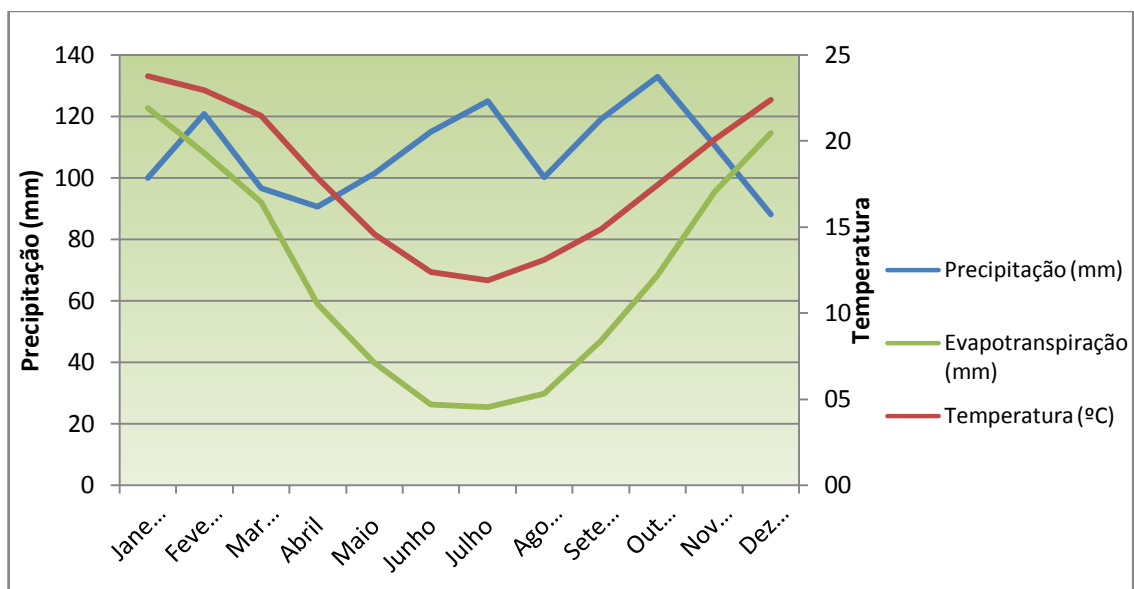


Figura 5: Caracterização do clima da região de estudo obtido com os dados da estação de Bagé, a mais próxima do carbonatito Três Estradas. Observa-se disponibilidade de água durante a maior parte do ano com uma tendência de uma fraca deficiência hídrica apenas nos meses de dezembro e janeiro.

Na região o clima é úmido, classificado como Cfa (temperado chuvoso com verão quente) na classificação climática de Köppen. Isso indica que ocorre um aporte de água suficiente para o desenvolvimento das reações químicas do intemperismo nas rochas estudadas.

Por consequência do clima do Rio Grande do Sul, são encontradas aqui três zonas distintas de intemperismo: zona de acidólise, de monossialitização e bissialitização (Becker, 2008).

Em regiões de clima frio onde a decomposição da matéria orgânica não é completa, levando a formação de ácidos orgânicos que alteram o pH das águas percolantes a valores inferiores a 5, ocorre a acidólise (Teixeira *et al.* 2009). Este processo de formação de solos não é comum no Brasil, porém no Rio Grande do Sul, por estar posicionado em latitudes subtropicais, ocorrem argissolos em decorrência desse processo, predominantemente na Depressão Central (Becker, 2008).

A monossialitização está contida em zonas temperadas quentes, com precipitação superior a 500 mm anuais e temperatura média anual superior a 15°C, ocorrendo hidrólise parcial. Neste contexto é formado principalmente argilominerais do tipo 1:1, como a caolinita, e óxi-hidróxidos de ferro (Teixeira *et al.* 2009). Neste contexto, predominam perfis de solos profundos, como os latossolos, chernossolos e nitossolos (Biragela, 1994 *apud* Becker, 2008). Estes solos possuem bom potencial para a agricultura e são os que ocorrem em maioria no Rio Grande do Sul (Becker, 2008).

A bissialitização ocorre em zonas temperadas e áridas, onde a alteração e a lixiviação são pouco intensas, tendo como resultado argilominerais secundários do tipo 2:1, como a esmectita (Teixeira *et al.* 2009). No Rio Grande do Sul gera os vertissolos na região da Campanha Gaúcha, em relevo de coxilhas (Streck, Kampf, Dalmolin e Klamt, 2008).

3. HIPÓTESES

Baseando-se em outras ocorrências de carbonatitos no Brasil que possuem espessos perfis de alteração intempérica, como o carbonatito de Jacupiranga (Alves, 2008), o complexo carbonatítico Catalão I (Toledo *et al.* 2004) e o carbonatito de

Juquiá (Walter *et. al*, 1995), a hipótese é que a área estudada tem potencialidade para a existência de um perfil de alteração intempérica, e que este pode concentrar a apatita como mineral residual, além de originar fases secundárias de apatita por meio de processos químicos envolvidos no intemperismo, como descrito por Toledo *et al.* (2004).

4. METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

A metodologia deste projeto foi dividida em diversas etapas. Neste capítulo serão discutidas as análises realizadas e seu funcionamento de maneira detalhada.

4.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Etapa contínua durante todo o projeto, com foco na reunião da bibliografia específica na forma de livros, artigos, publicações e apresentações em congressos sobre carbonatitos e seus produtos de alteração e mineralizações associadas. Etapa indispensável para se conhecer o máximo possível sobre o assunto abordado.

4.2. COLETA DE AMOSTRAS

Foram utilizadas amostras do carbonatito Três Estradas e seu perfil de alteração. As amostras utilizadas neste trabalho possuem duas origens: um furo de sondagem realizado pela empresa Águia Metais e amostras de trincheira coletadas em expedição de campo.

4.2.1. FURO DE SONDAGEM

As amostras foram coletados do furo de sondagem TED1101 disponibilizado pela empresa Águia Metais. Totalizam 19 amostras representando 18,2m de alteração do carbonatito Três Estradas, além de uma amostra de rocha sã, coletada a 34,2m de profundidade (Figura 6).

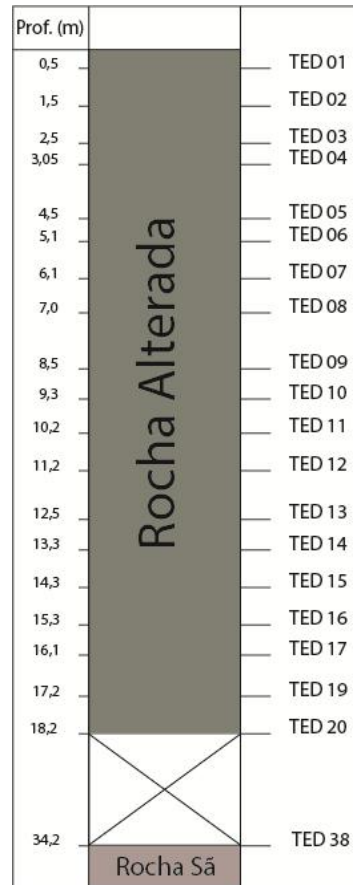


Figura 6: Representação das amostras cedidas pela empresa Águia Metais, pertencentes ao furo de sondagem TED 1101.

4.2.2. EXPEDIÇÃO DE CAMPO

O trabalho de campo foi realizado nos dias 4, 5 e 6 de maio de 2015, na região de Três Estradas, município de Lavras do Sul – RS. O objetivo foi localizar, amostrar e descrever trincheira previamente aberta na área de ocorrência do Carbonatito Três Estradas, além de observações de como o carbonatito ocorre em campo.

4.2.2.1. ETAPA PRÉ-CAMPO

O estudo pré-campo constituiu em estudar o local de ocorrência do carbonatito Três Estradas, localizando-o em carta topográfica 1:50.000 e imagens de

satélite no software Google Earth®, com o objetivo de identificar rotas de acesso à área, bem como a localização aproximada da trincheira a ser amostrada.

4.2.2.2. PROCEDIMENTOS DE CAMPO

Os objetivos deste trabalho de campo foram localizar a ocorrência do carbonatito Três Estradas, descrever afloramentos desta rocha e, principalmente, localizar, descrever e amostrar uma trincheira previamente aberta na área de ocorrência do carbonatito, durante uma campanha para prospecção de ouro na década de 60.

Foram coletadas 13 amostras na trincheira, sendo 8 em perfil vertical e 5 lateral, perpendicular à foliação da rocha, ainda preservada no saprolito. Todas as amostras foram submetidas a análise química e mineralógica estabelecidos para este trabalho.

4.2.2.3. COMPILAÇÃO DA CADERNETA DE CAMPO

O trabalho de campo teve início no dia 5 de maio de 2015 com saída de Porto Alegre – RS com destino a Lavras do Sul. A chegada ao município ocorreu por volta das 15 horas, sendo utilizado o tempo ainda disponível para localizar a área de ocorrência do carbonatito Três Estradas e as vias de acesso, etapa realizada com o auxílio das cartas topográficas Ibaré e Coxilha do Tabuleiro, em escala 1:50.000 do Exército Brasileiro, e de aparelho GPS.

No dia seguinte planejou-se uma busca de uma antiga trincheira previamente aberta na área, durante campanha de prospecção para ouro na década de 60. Nesta etapa o conhecimento prévio do Prof. Norberto Dani foi indispensável, já que este já havia visitado o local. A trincheira foi encontrada nas coordenadas UTM 767733 mE 6577357 mS, fuso 21J, a 300m ao sul da estrada de ferro na encosta de um morro descampado, sob uma árvore (Figura 7).



Figura 7: Foto da trincheira amostrada. Esta trincheira foi aberta durante uma campanha de prospecção mineral para ouro na região.

A trincheira foi amostrada tanto verticalmente (Figura 8), cortando, assim, os horizontes de alteração intempérica, quanto lateralmente (Figura 9), paralela à foliação subvertical leste-oeste presente no carbonatito, com a intenção de coletar amostras que pudessem representar mudanças composicionais de acordo com o bandeamento da rocha.

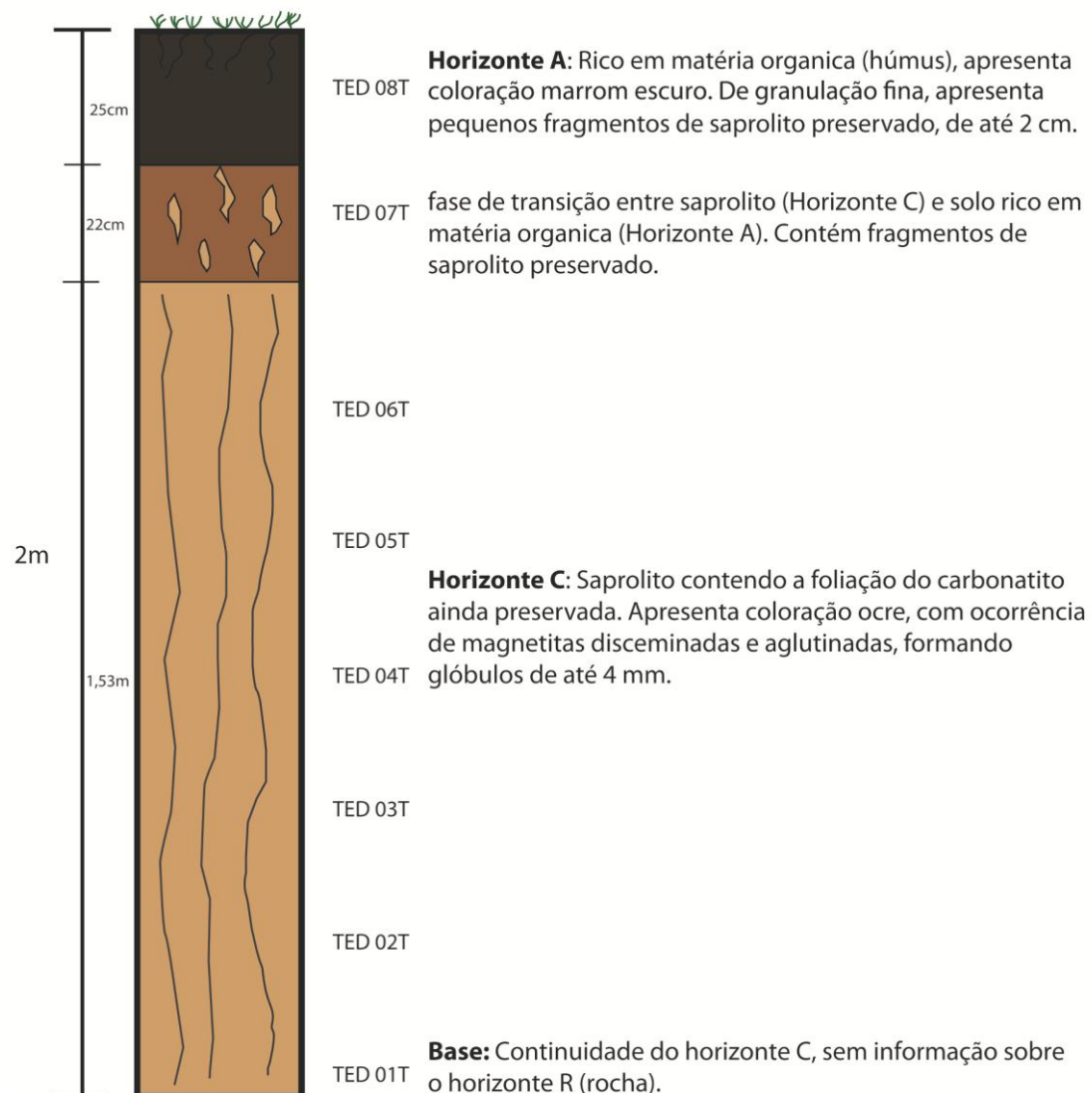


Figura 8: Perfil vertical amostrado. Foram coletadas 8 amostras, sendo uma no Horizonte R, de maior profundidade e menor alteração, 5 amostras no horizonte C, de maior representatividade no perfil, 1 amostra na zona de transição entre o horizonte C e o horizonte A e 1 amostra no horizonte A.

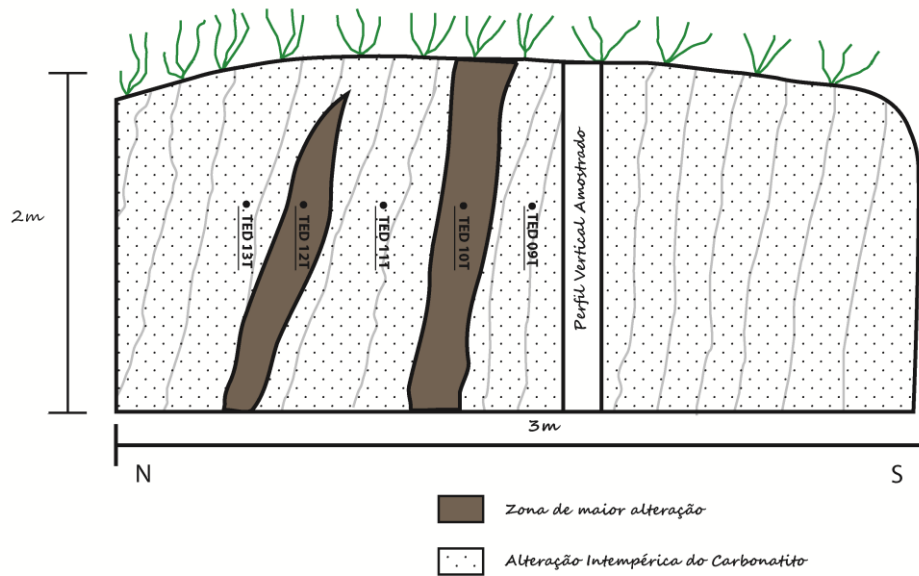


Figura 9: Croqui do perfil da trincheira amostrada. Observa-se representado zonas de maior alteração paralelas à foliação subvertical do carbonatito. Considera-se a possibilidade de que a mudança composicional nas bandas do carbonatito faça com que algumas zonas sofram maior alteração.

4.3. MÉTODOS DE ANÁLISE

Os métodos de análise utilizados neste projeto tiveram como objetivo a obtenção de informações sobre a composição química e mineralógica das amostras, para posterior interpretação (Figura 10). Entre eles: descrição em lupa binocular, microscopia ótica, difratometria de raios X, fluorescência de raios X e microsonda eletrônica. Todas as análises foram realizadas no Instituto de Geociências da UFRGS, em laboratórios pertencentes ao Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq).

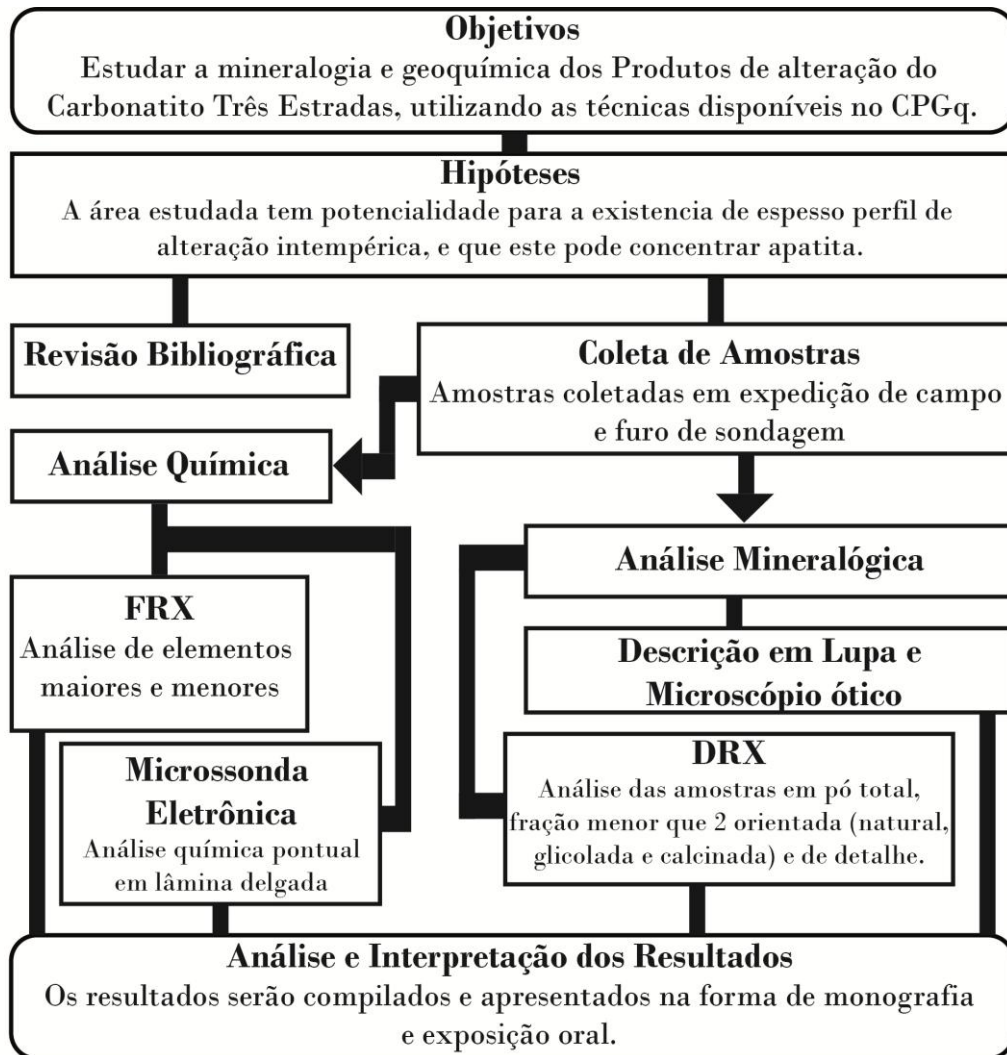


Figura 10: Fluxograma de atividades desenvolvidas neste trabalho.

4.4. TÉCNICAS ANALÍTICAS

Após obter as amostras coletadas em campo e a partir do furo de sondagem cedido deu-se início a etapa de aquisição de dados proposta para o projeto.

4.4.1. ANÁLISE EM LUPA BINOCULAR

Método de análise preliminar, permite descrever o material coletado com aumento de até 40 vezes (Figura 11). É feita uma descrição identificando parâmetros visuais da amostra, como cor, tamanho dos minerais, forma de ocorrência mineral, mineralogia (quando possível) e texturas. Em conjunto com esta técnica podem ser

preparadas amostras de detalhe para análise em DRX, como descrito adiante (tópico 4.5.1.).



Figura 11: Lupa modelo Olympus Tokyo 208792 utilizada na descrição prévia das amostras.

4.4.2. MICROSCOPIA ÓTICA

O estudo das amostras por microscopia ótica na geologia é básico. Com o uso de lâminas delgadas impregnadas, à luz transmitida e refletida, utilizando polarizadores, compensadores e lentes de diferentes aumentos, o microscópio petrográfico (Figura 12) permite a identificação dos minerais presentes e suas proporções modais que, plotados em determinados diagramas, permitem classificar as rochas. Porém nem todos os minerais são identificáveis neste método. Como exemplo temos o grupo dos argilominerais que, devido ao seu tamanho diminuto, não é possível a identificação e classificação através da microscopia ótica. Além disso, a técnica permite a obtenção de informações sobre os regimes deformacionais, processos de metamorfismo e diagênese.

Para análise em microscopia ótica foi utilizada duas lâminas petrográficas, produzidas a partir do material coletado. A primeira foi gerada pela amostra TED 38, presente no furo de sondagem, sendo a de maior profundidade e representando a rocha inalterada. Já a segunda foi preparada a partir da amostra TED 01T, coletada na base da trincheira e que representa a alteração do carbonatito.

Nesta etapa, também serão avaliados pontos de interesse para posterior análise utilizando a microsonda eletrônica.

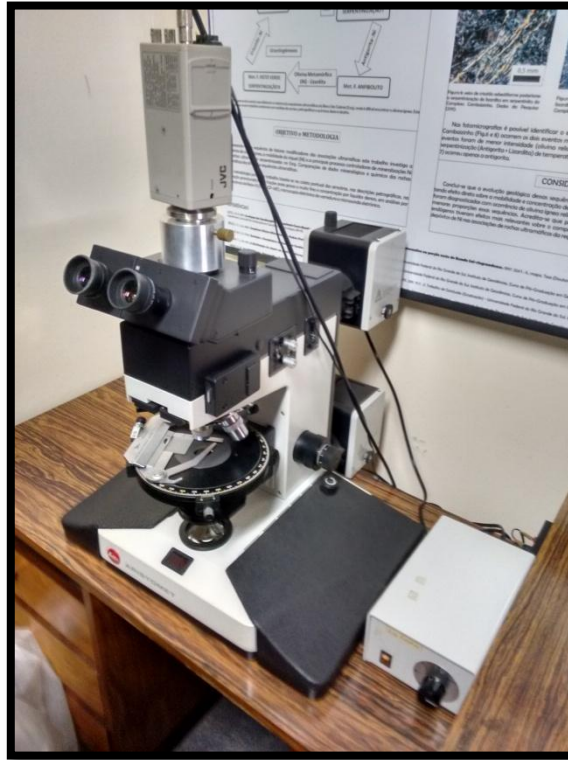


Figura 12: Microscópio de luz transmitida e refletida modelo Leitz Aristomet.

4.4.3. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A Espectrometria Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica de análise química qualitativa e quantitativa não destrutiva, que permite analisar a maioria dos elementos com massa atômica maior que 12. Possui algumas vantagens, como a ampla capacidade de detecção, a grande versatilidade analítica, permitindo análises de amostras na forma líquida, sólida ou sob a forma de pó, em geral com baixo custo de preparação e rapidez (Gomes, Formoso e Trescases, 1984).

A técnica consiste na irradiação da amostra por um feixe de raios X (Figura 13), o que ioniza os níveis internos dos átomos constituintes por efeito fotoelétrico. Na reorganização do átomo e regresso ao estado fundamental, este pode liberar o excesso de energia através da emissão de raios X fluorescente, cujo comprimento de onda é característico para cada elemento. Estes raios X são difratados por um cristal analisador e contados em um contador. Cada cristal apresenta características

que permitem analisar os comprimentos de onda de determinados elementos. Logo, em uma análise é usado mais de um cristal analisador, obtendo-se contagens simultâneas dos vários elementos presentes na amostra. Os raios X característicos passam por um detector que tem a função básica de converter a energia dos fótons de raios X absorvidos em pulsos elétricos, permitindo assim a construção de um espectro de raios X *versus* intensidade dos picos, em contagens por segundo (Cps). O resultado final é convertido em porcentagem de óxidos de cada elemento analisado. Uma análise de rocha é considerada aceitável se exhibe como resultado final, valores entre 98% e 102%, quando for acrescentado aos valores dos óxidos à perda ao fogo, sendo assim aceito uma variação de 2% no resultado final.

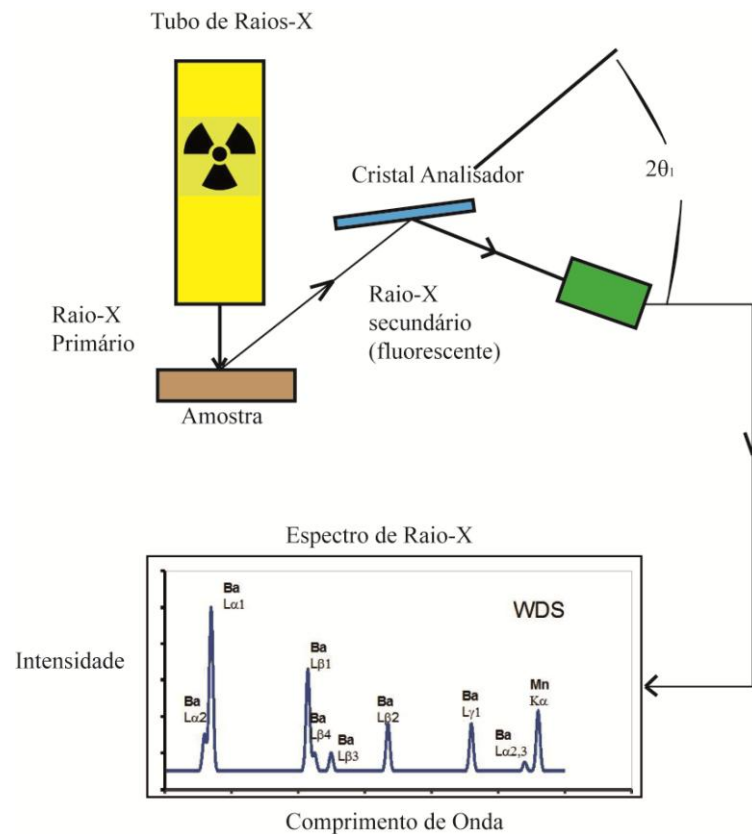


Figura 13 Modelo do funcionamento da Espectrometria de Fluorescência de raios X. Modificado de Marques (2006).

4.4.4. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

A difratometria de raios X utiliza a Lei de Bragg. O método se baseia na difração sofrida por um feixe de raios X ao atingir uma amostra devido à interação deste com os átomos presentes, em duas direções principais. Essas direções correspondem ao prolongamento do feixe incidente e à reflexão pelo plano.

Qualquer plano no cristal correspondente a uma face (hkl) pode ser considerado. A difração resultante de um cristal, compreendendo posições e intensidades das linhas de difração, é uma propriedade física fundamental da substância cristalina, servindo para a identificação e estudo da estrutura dos minerais analisados (Gomes, *et al.* 1984). Assim, o método se aplica apenas na identificação de substâncias que possuem estrutura cristalina, não apresentando bons resultados quando esta estrutura é insipiente ou ausente (substâncias amorfas).

O equipamento utilizado no Laboratório de Difractometria de Raios X pertencente ao CPGq é um difratômetro da marca SIEMENS, modelo BRUKER-AXS D5000, com goniômetro θ - θ (Figura 14). A radiação é $K\alpha$ em tubo de cobre nas condições de 40 kV e 25 mA. As análises realizadas na difração de raios X do Instituto de Geociências da UFRGS seguem duas metodologias quanto à preparação de amostras: Pó Total e Orientada.



Figura 14: Difratômetro SIEMENS, modelo D5000 com goniômetro θ - θ disponível no Laboratório de Difractometria de Raios X do CPGq.

4.4.5. MICROSSONDA ELETRÔNICA

O método de análise por Microsonda Eletrônica (Figura 15) é bastante semelhante ao já citado método da Fluorescência de raios X. A principal diferença é a fonte de energia utilizada: enquanto a fluorescência utiliza um feixe de raios X, a Microsonda Eletrônica utiliza um feixe de elétrons, de maior energia. Assim, como o

método anterior, a análise por microsonda eletrônica visa à identificação das linhas do espectro característico de raios X originados a partir do bombardeamento da amostra por um feixe de elétrons. O resultado pode ser qualitativo ou quantitativo quando é realizada a comparação da intensidade da radiação detectada com aquela emanada por uma substância de composição química conhecida tomada como padrão (Gomes *et al.* 1984). A análise é feita pontualmente, obtendo-se, assim, a composição de um ponto da amostra com raio de poucos micrometros. A técnica é utilizada quando se visa à identificação da composição química de determinado mineral, ou de certa parte do mineral, como no caso de cristais zonados.

As amostras a serem analisadas na microsonda eletrônica são basicamente lâminas delgadas ou seções polidas, sendo que ambas devem passar por um processo de polimento e, se necessário, por uma metalização com material condutor elétrico.

Segundo Gomes *et al.* (1984), o método possui diversas vantagens:

- Alta resolução espacial, permitindo a análise de partículas da ordem de poucos microns;
- O material pode ser visualizado no momento da análise, permitindo que se faça uma correlação entre a composição química e a morfologia do mineral;
- O material é analisado *in situ*, na forma de lâminas delgada ou seções polidas. Dessa forma, o equipamento conta com um sistema de iluminação, permitindo a observação da amostra em luz transmitida, refletida ou polarizada;
- Pode ser considerado um método não destrutivo;
- Possui grande eficiência, permitindo a obtenção de resultados sobre a composição química em um curto intervalo de tempo.



Figura 15: Microsonda eletrônica modelo Cameca SX Five disponível no Laboratório de Microsonda Eletrônica do CPGq no Instituto de Geociências.

4.5. TRABALHOS DE LABORATÓRIO

Para as investigações utilizando a FRX e a DRX foram necessários determinados procedimentos de laboratório para a preparação das amostras para análise. A metodologia seguida é utilizada pelos laboratórios de fluorescência e difratometria de Raios X do CPGq.

4.5.1. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE EM DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

No presente trabalho foram utilizadas três técnicas para preparação de amostras para análise em difratometria de Raios X: amostras em pó total, de fração menor que $2\mu\text{m}$ orientada e amostras de detalhe.

Amostras em pó total são utilizadas quando o objetivo é conhecer a mineralogia geral do material analisado. O processo de preparação envolve a maceração do material até a granulometria de 200 mesh ($74\mu\text{m}$) em graal de ágata e deposição deste material em porta-amostra especial, de forma que o pó analisado forme uma superfície lisa e plana onde os Raios X irão incidir.

As amostras de fração menor que 2 μ m orientadas possuem um processo mais complexo. A separação da fração tem como objetivo selecionar a fração granulométrica argila da amostra para análise.

Primeiramente é feito uma desagregação geral da amostra em gral de porcelana. Em seguida a amostra é colocada dentro de um recipiente fechado com água bideionizada. Este frasco é colocado em um aparelho agitador durante 14 horas, onde a amostra sofre desagregação natural dos argilominerais sem pulverizar. Após este procedimento, a amostra é condicionada num recipiente apropriado, adicionado água bideionizada e, seguindo a lei de Stokes, corrigindo-se a temperatura, a viscosidade do fluido e a densidade das partículas, deixada decantar pelo tempo necessário para selecionar a fração desejada. Após a separação da fração, uma fração da amostra, ainda em meio aquoso é depositada sobre uma lamina de vidro e deixada secar, fazendo com que as partículas de argila se depositem naturalmente.

Para calcular o tempo de decantação necessário foi utilizado o programa Seditools®, versão 1.1.2 (Figura 16), que permite calcular o tempo necessário para decantação informando o tamanho de partícula a ser selecionado, a densidade da partícula (neste trabalho foi utilizado o valor de 2,65g/cm³), a temperatura da solução e a altura da coluna d'água onde se pretende concentrar a fração desejada.

Considerando a natureza das amostras utilizadas é necessário realizar um procedimento de remoção dos carbonatos presentes nas amostras antes de iniciar a separação de fração, já que o carbonato pode estar associado a essas argilas, aumentando virtualmente o seu tamanho. Para isso, se utiliza uma solução tampão preparada com ácido acético e acetato de sódio com pH 5. O ataque das amostras utilizando esta solução permite a diluição dos carbonatos presentes e, por ser uma solução tampão com pH 5, não afeta as argilas presentes.

Stokes Settling Times	
Water Temperature [°C]:	30
Spec. Gravity Water [g/cm3]:	0.99621
Water Viscosity [Poise]:	0.00763
Spec. Gravity Grains [g/cm3]:	2.65
Settling Height [cm]:	8
Expected Grain Size [µm]:	2
Settling Time [min]:	282.372
days:hours:min:sec	0:4:42:22

Figura 16: Programa Seditools®, versão 2.1.1, utilizado para calcular o tempo de decantação para separação de fração menor que 2µm.

Além destas metodologias, durante a análise do material coletado em lupa binocular separou-se amostras de detalhe, onde determinada particularidade de destaque na amostra (um veio preenchido, por exemplo) pode ser amostrado, macerado e disposto em lâmina em meio aquoso. Após seca, esta amostra pode ser analisada na DRX obtendo-se assim a mineralogia de detalhe daquele ponto. Neste trabalho, esta metodologia foi utilizada para analisar em detalhe a composição de veios e minerais opacos com propriedades magnéticas, selecionados com o auxílio de um imã.

4.5.2. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE EM FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A preparação de amostras de material rochoso para análise por Fluorescência de Raios X pode ser feita seguindo duas metodologias distintas: Amostras Prensadas e Amostras Fundidas.

4.5.2.1. AMOSTRAS PRENSADAS

As amostras prensadas são mais simples de serem preparadas e o método consiste na aplicação de uma pressão de ao menos 15-20 toneladas por polegada

quadrada sobre uma amostra moída a menos de $50\mu\text{m}$ (300 mesh) misturada com algum outro material com função de “liga” e sem interferência nos resultados da leitura dos elementos (Buhrke; Jenkis & Smith, 1998).

As análises em amostras prensadas são direcionadas para a determinação dos elementos traços (ppm), porém, com certa limitação podem ser utilizadas para a quantificação de elementos maiores (aqueles com concentração maior que 1%) e para elementos menores, ou seja, aqueles com concentrações entre 1% e 0,01%. A grande desvantagem deste método de análise é a forte influência da estrutura cristalina nos resultados, exigindo cálculos de correção e implicando num forte efeito matriz, que pode impedir o fechamento das análises em valores próximos a 100%. Para minimizar esse efeito, foram construídas curvas de calibração que permitiram uma análise mais precisa. Estas curvas foram construídas utilizando padrões internacionais de rocha com composição conhecida, que foram analisadas no equipamento com os resultados servindo como parâmetros de análise e comparação.

Neste trabalho as amostras prensadas foram utilizadas apenas para análise dos elementos traços. A metodologia envolveu a secagem da amostra a 110°C durante 24 horas, seguido pela maceração do material até obterá obtenção de uma granulometria menor que 200 mesh ($74\mu\text{m}$). Foram separados 5,000g do material homogeneizado, que foi misturado com 1,0000g de ácido bórico, substância com função de liga que não interfere na técnica analítica. A mistura foi então prensada utilizando uma prensa Herzog (Figura 17), aplicando-se uma carga de 30ton por dois minutos e trinta segundos.



Figura 17: Prensa Herzog utilizada para a confecção de pastilhas prensadas.

4.5.2.2. AMOSTRAS FUNDIDAS

As amostras fundidas possuem uma metodologia complexa, que consiste na fusão da amostra junto com um fundente, normalmente bórax (tetraborato de sódio), porém as amostras utilizando tetraborato de lítio apresentam resultados mais satisfatórios devido ao baixo número atômico dos elementos envolvidos, em comparação com o tetraborato de sódio e, se usado junto com carbonato de lítio, na proporção de 6:1, este apresenta um ponto de fusão menor que o do bórax (Buhrke *et al.* 1998). Outro fator importante é a base sobre a qual se realizará a fusão. Este pode ser feito com cadinhos de platina, níquel, carbono ou sílica. Cada um destes possui certas vantagens a oferecer, porém todos apresentam a desvantagem do material fundido aderir ao cadinho, o que impossibilita uma total recuperação da mistura fundida. O uso de cadinhos de platina com 3% de ouro apresenta os melhores resultados. Esta liga sofre pouca aderência do material fundido com boratos e a limpeza é muito mais simples (Buhrke *et al.* 1998). Este método fornece resultados mais precisos, porém apenas para elementos maiores devido à diluição da amostra com a adição de fundente. Como a amostra é fundida e resfriada rapidamente, o resultado final é um vidro de composição homogênea, sem apresentar o efeito matriz existente na amostra preparada com a técnica da pastilha prensada.

Neste trabalho as amostras vítreas foram utilizadas para análise dos elementos maiores. As amostras foram previamente secas por 24 horas a temperatura de 110°C. Em seguida, foi feita a maceração da amostra até se obter uma granulometria menor que 200 mesh. O material foi homogeneizado e pesado 1,0000g, que foi misturado com 7,0000g de tetraborato de lítio, substância utilizada para facilitar a fusão da amostra (fundente) e que não interfere na técnica analítica. A mistura foi então fundida em cadinhos constituídos de platina com 3% de ouro, a uma temperatura de 1200°C, utilizando a máquina de fusão modelo Eagon 2, da marca PANalytical (Figura 18).



Figura 18: Equipamento para preparação de amostras fundidas da marca PANalytical, modelo Eagon 2, disponível no Laboratório de Geoquímica do CPGq.

4.5.3. PERDA AO FOGO

Para a análise da composição química dos elementos maiores, em óxidos, na espectrometria de fluorescência de Raios X é necessário quantificar os voláteis presentes na amostra, já que estes se perdem ao fundir. Para isso, é realizada uma metodologia em que a amostra é exposta a altas temperaturas, suficiente para volatilizar a água presente nos interstícios cristalinos e o dióxido de carbono dos carbonatos. A metodologia consiste nos seguintes procedimentos:

- Remover umidade do cadinho de porcelana em forno a 1000 oC por 60 min;
- Transferir o cadinho para resfriamento em um dessecador;
- Secar uma quantidade de amostra (aproximadamente 4 g) numa estufa na temperatura de 110°C, por um período de 24 horas. Transferir a amostra para um dessecador;
- Pesar o cadinho (Mc)
- Pesar 1,0000 g de amostra no cadinho previamente tarado (Ma);
- Levar ao forno na temperatura de 1000oC por uma hora;
- Deixar esfriar por pelo menos 40 minutos em dessecador;
- Pesar novamente o cadinho (Mf);
- Calcular a perda ao fogo através da expressão:

$$PF = \left(\frac{M_c + M_a - M_f}{M_a} \right) * 100$$

5. RESULTADOS

Seguem os resultados obtidos através das técnicas propostas para este trabalho. Para um melhor entendimento dos resultados, são apresentados neste item alguns dos dados obtidos de maior relevância para o projeto. Os resultados completos envolvendo todas as amostras trabalhadas se encontram na seção APÊNDICES (página 81).

5.1. ANÁLISE EM LUPA BINOCULAR

As amostras coletadas na trincheira foram descritas utilizando lupa binocular com aumento de até 40 vezes. Paralelamente a esta análise foram separadas amostras de detalhe para análise ao DRX de ocorrências minerais que despertaram interesse e que permitiam a coleta deste material, como por exemplo, o preenchimento de veios e minerais opacos. As amostras que formam o perfil vertical da trincheira (Figura 8) foram primeiramente estudadas e em seguida as amostras que compunham o perfil horizontal, paralelo à foliação do carbonatito (Figura 9).

As amostras do horizonte C (TED 01T a TED 06T, Figura 8) apresentaram a foliação do carbonatito ainda preservada. Possuem granulometria fina, coloração ocre com porções esbranquiçadas, apresentando cristais de magnetita disseminada e agrupada, identificada com a ajuda de um ímã de mão (Figura 19). Ocorre também dissoluções formando cavidades menores que 1 mm parcialmente preenchidas por cristais incolores incrustados nas paredes (Figura 19 e 20) e óxidos de ferro, o que dá a algumas destas cavidades uma coloração avermelhada. As amostras foram testadas com ácido clorídrico a 10% e não apresentaram reação ao mesmo, indicando que o carbonato, principal constituinte dos carbonatitos, já não está presente nestas amostras. É comum também a presença de pequenos veios, com no máximo 3 mm de espessura, preenchidos parcialmente por mineral de coloração

branca (Figuras 21, 22 e 23). Estes veios também foram testados com ácido clorídrico, porém também não apresentaram reação.

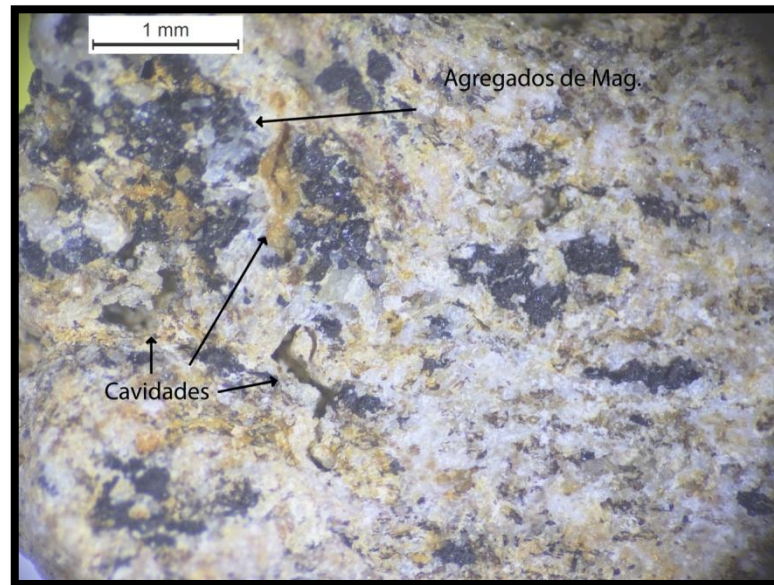


Figura 19: Amostra TED01T em lupa. Na imagem é possível observar a presença de agregados de magnetita e hematita (dado obtido através da DRX) e de cavidades de dissolução.

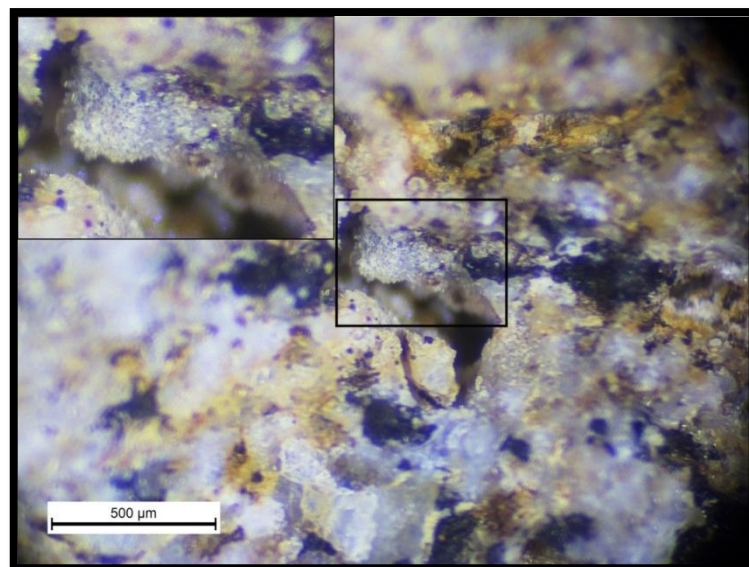


Figura 20: Foto em lupa de uma cavidade de dissolução da amostra TED01T. Nesta é possível observar pequenos cristais incolores incrustados nas paredes da cavidade.

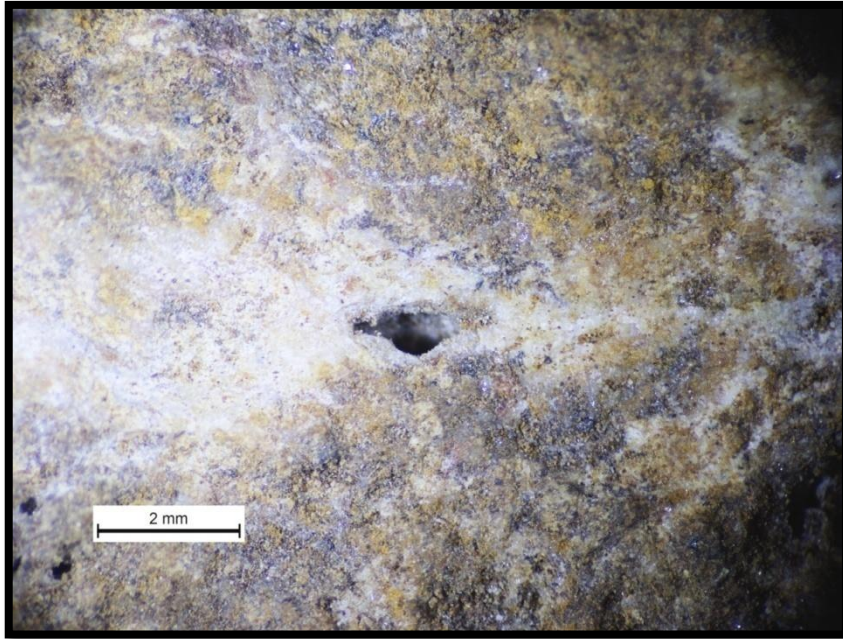


Figura 21: Foto em lupa de vênulos composto por apatita (informação obtida posteriormente por DRX), com cavidade de dissolução no centro da imagem. Amostra TED02T.

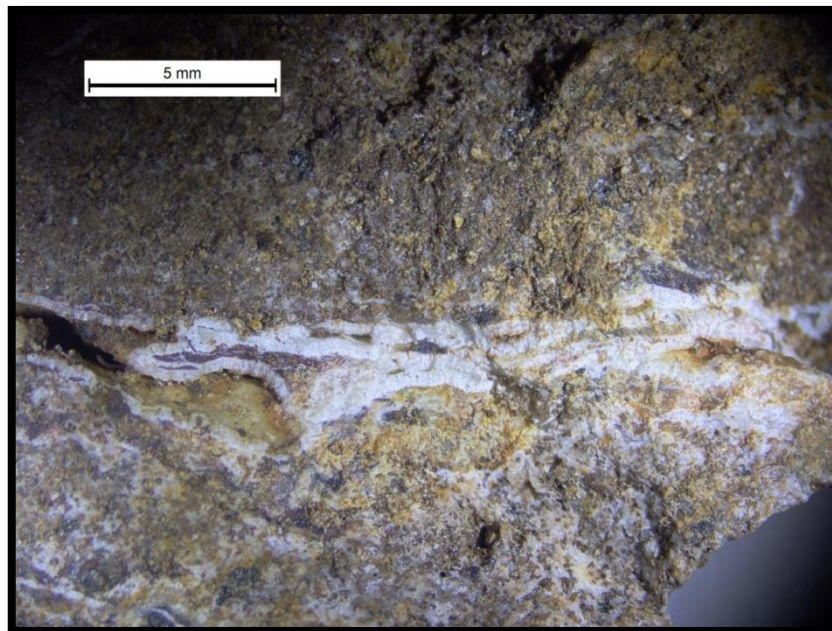


Figura 22: Foto em lupa de vênulos com espessura de cerca de 2mm. O mesmo material presente no vênulo aparece também disseminado na amostra. Amostra TED 04T.



Figura 23: Veios Detalhe dos vênulos parcialmente preenchidos. Amostra TED04T.

A amostra pertencente à zona de transição entre o horizonte C e o horizonte A (TED 07T, Figura 8) apresenta uma mistura entre fragmentos de saprólito e o solo do horizonte A, mais escuro e contendo matéria orgânica. Nesta amostra ainda ocorre magnetitas disseminadas e identificadas com a ajuda de um ímã de mão.

A amostra TED 08T (Figura 8) situa-se no horizonte A no topo do perfil. Apresenta coloração marrom escura, contendo matéria orgânica e alta atividade biológica. Ainda possui fragmentos de saprólito parcialmente preservado, de até 2 cm. Nestes fragmentos ainda ocorrem magnetitas preservadas, porém em menor quantidade e mais alteradas.

Analisando a trincheira por perfil horizontal (Figura 9), foi identificada uma variação nos níveis de alteração das amostras e subsequente diferença nos produtos de intemperismo. A amostra TED 09T apresenta características típicas do horizonte C, com a foliação do carbonatito ainda preservado e magnetitas disseminadas e formando glóbulos. Já a amostra TED 10T apresenta um grau de alteração maior, com uma maior quantidade de argilas. Possui cor marrom, homogênea e com resquícios de atividade orgânica, bastante semelhante ao horizonte A. Seguindo o perfil lateral, a amostra TED 11T apresenta as características do horizonte C, semelhante à amostra TED 09T. A amostra TED 12T volta a apresentar características do horizonte A, com pequenos fragmentos de

saprólito parcialmente preservado, de até 2 cm e semelhante à amostra TED 10T. A última amostra coletada em perfil horizontal (TED 13T) volta a apresentar semelhança às amostras TED 09T e TED 11T, identificada como um saprólito formador do horizonte C.

Para análise em detalhe na DRX, quando possível foram separadas duas fases minerais de interesse: os opacos, separados com o auxílio de um imã de mão e o preenchimento dos veios, separados por raspagem e com estilete.

Os resultados mostraram que os minerais opacos são formados por hematita, magnetita e goethita (Figura 24). A presença nos resultados das linhas de difrações de quartzo e apatita mostra que o processo de separação destes minerais não foi eficiente a ponto de selecionar apenas os minerais opacos.

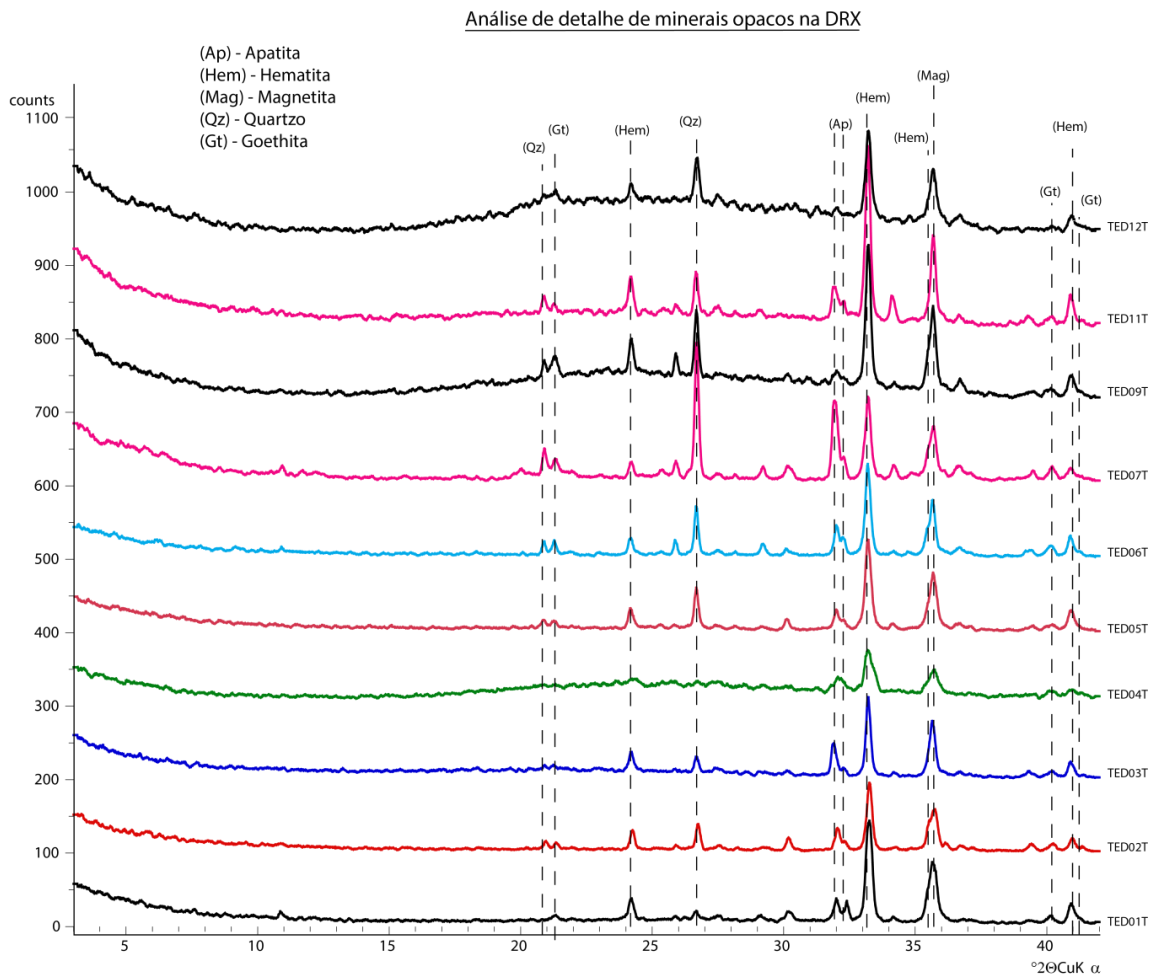


Figura 24: Resultados da análise por DRX ao longo do perfil vertical da trincheira evidenciando a presença dominante de minerais opacos identificados como magnetita (Mag), hematita (Hem) e fracamente a goethita (Gt). Segue a presença de quartzo (Qz) e apatita (Ap).

Já os resultados das análises em detalhe na DRX do material coletado (Figura 25) em veios permitiram identificar que estes são compostos predominantemente por apatita.

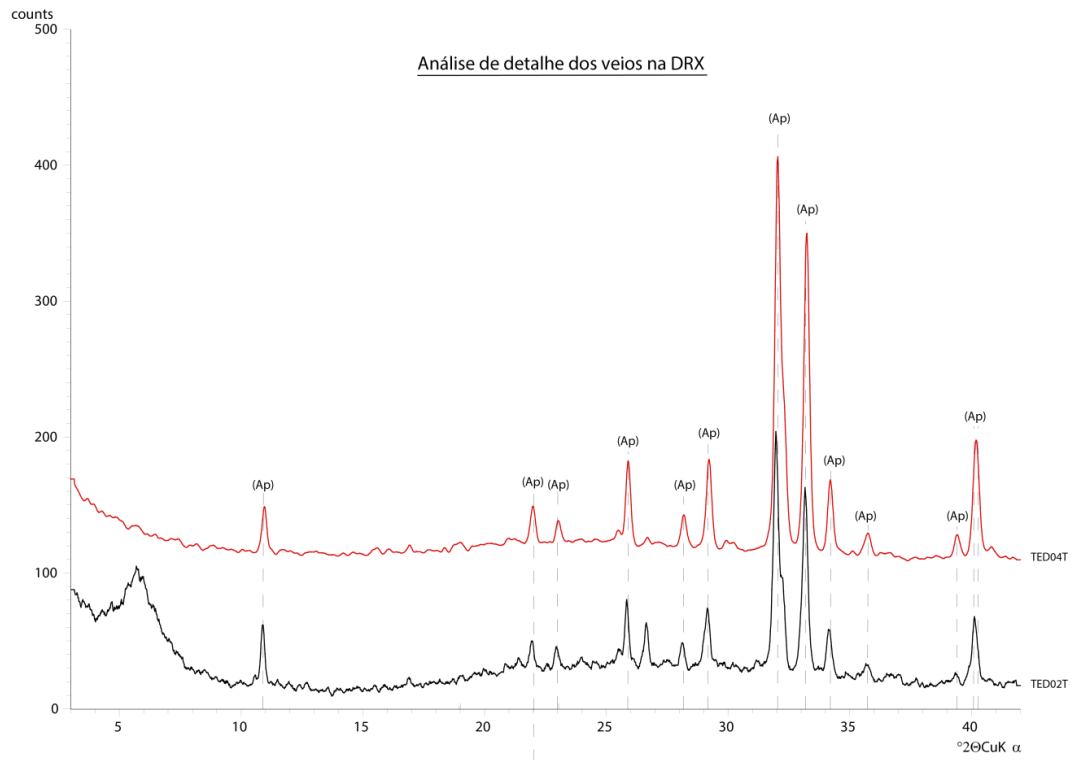


Figura 25: identificação da mineralogia por DRX dos vênulos comuns nas amostras TED02T e TED04T da trincheira. O mineral dominante identificado são as apatitas (Ap). Na amostra TED02T aparece argilominerais.

5.2. ANÁLISE DE LÂMINAS DELGADAS EM MICROSCÓPIO ÓPTICO

Esta etapa teve como objetivo principal identificar pontos de interesse para análise na microsonda eletrônica, além de permitir identificar a mineralogia e morfologia dos minerais presentes nas amostras, bem como suas texturas e estruturas.

A amostra TED 38, oriunda da base do furo de sondagem, é uma rocha holocristalina fanerítica, hipidiomórfica equigranular com tamanho de grão médio a fino e com bandas ou vênulos. Apresenta uma composição predominantemente carbonática (cerca de 80%), com apatitas subédricas fraturadas de até 1mm (cerca de 10%) (Figura 26 A), e opacos anédricos a subédricos de até 2mm (cerca de 8%) ocorrendo de forma disseminada e concentrada em bandas (Figura 26 B).

Subordinadamente ocorrem biotitas orientadas segundo a foliação da rocha (cerca de 2%). A amostra ainda possui veios preenchidos com carbonato de até 1,5mm de espessura.

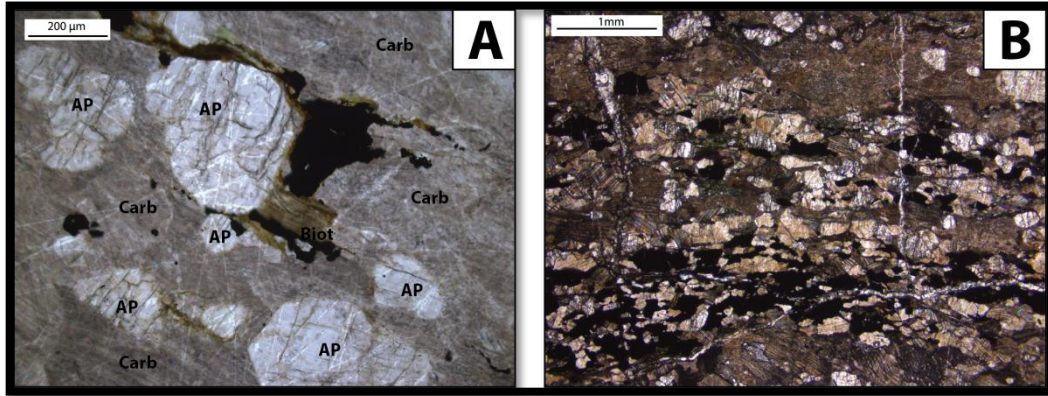


Figura 26: Fotos em lâmina delgada da amostra TED 38. A) Grãos de apatita de até 500 µm, subédricos, e fraturados. B) Banda com maior concentração de minerais opacos e apatita.

A amostra TED 01T oriunda da base da trincheira é composta predominantemente por apatita, apresentando também opacos e micas fortemente alteradas. Foi possível observar que as apatitas apresentaram três fases de ocorrência: a apatita primária, apatita de crescimento epitaxial e apatitas formando cristais euédricos micrométricos secundários (Figura 27 A). As apatitas primárias apresentam tamanho de grão de até 0,5mm, euédricas, fraturadas e com bordas arredondadas e arestas dissolvidas, indicando que houve um processo de dissolução das apatitas em algum estágio de formação da rocha, num ambiente cujas evidencias ainda estão sendo avaliadas se de natureza endógena ou exógena. Sobre estes cristais ocorre o crescimento epitaxial da apatita, em harmonia com o cristal primário central, apresentando zonação incipiente. Por fim, os cristais micrométricos e/ou fibrosos de apatita ocorrem sobre os outros minerais preenchendo as cavidades, por vezes formando agregados radiais (Figura 27 B). O crescimento deles se dá simultaneamente às franjas de óxido de ferro, demonstrando que esta fase da apatita se formou num ambiente aberto e provavelmente sob o regime do intemperismo.

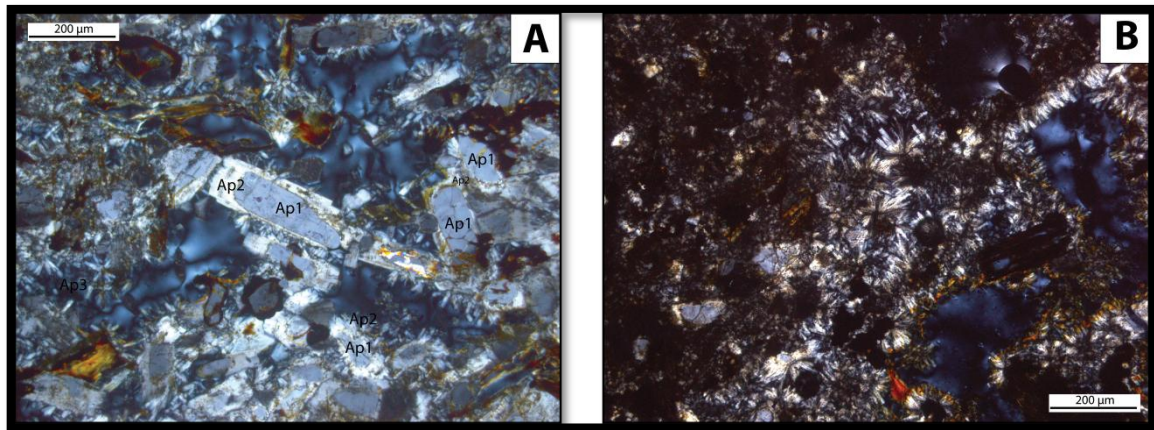


Figura 27: Fotos em lâmina delgada da amostra TED 01T. A) Apatita primária (Ap1), subédrica a euédrica, apresentando dissolução parcial da borda; Crescimento epitaxial de apatita secundária (Ap2) sobre as apatitas primárias; Cristais micrométricos de apatita ocorrem preenchendo as cavidades e sobre os minerais presentes. B) Zona com alta concentração de cristais micrométricos de apatita preenchendo cavidades.

5.3. ANÁLISE QUÍMICA EM FRX

As análises químicas realizadas com a técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X (XRF) permitiram definir o comportamento da concentração dos elementos maiores em óxidos e dos elementos menores (Apêndice A e B). Foi utilizada a técnica da comparação de concentrações para identificar como as concentrações dos elementos variam no manto de alteração em relação à rocha considerada menos transformada no perfil (amostra TED 38). Esta técnica baseou-se em uma relação direta entre as concentrações, de acordo com a fórmula a seguir:

$$\Delta C^i = \frac{C_A^i}{C_R^i}$$

Onde:

ΔC^i = Variação da concentração do elemento i ;

C_A^i = Concentração do elemento i no alterito;

C_R^i = Concentração do elemento i na rocha.

Os elementos que apresentaram ΔC maior que 1 estão sendo enriquecidos residualmente durante o processo de intemperismo. Já aqueles que apresentaram ΔC menor que 1 estão se empobrecendo e entrando em solução.

Na alteração intempérica, são considerados como elementos imóveis o zircônio, titânio, nióbio e alumínio (Taylor & Eggleton, 2001). A análise da variação

das concentrações destes elementos (em especial o alumínio, titânio e nióbio) nas amostras do furo de sondagem permitiu compartimentar o perfil de alteração em três zonas de comportamento distinto (Figura 28).

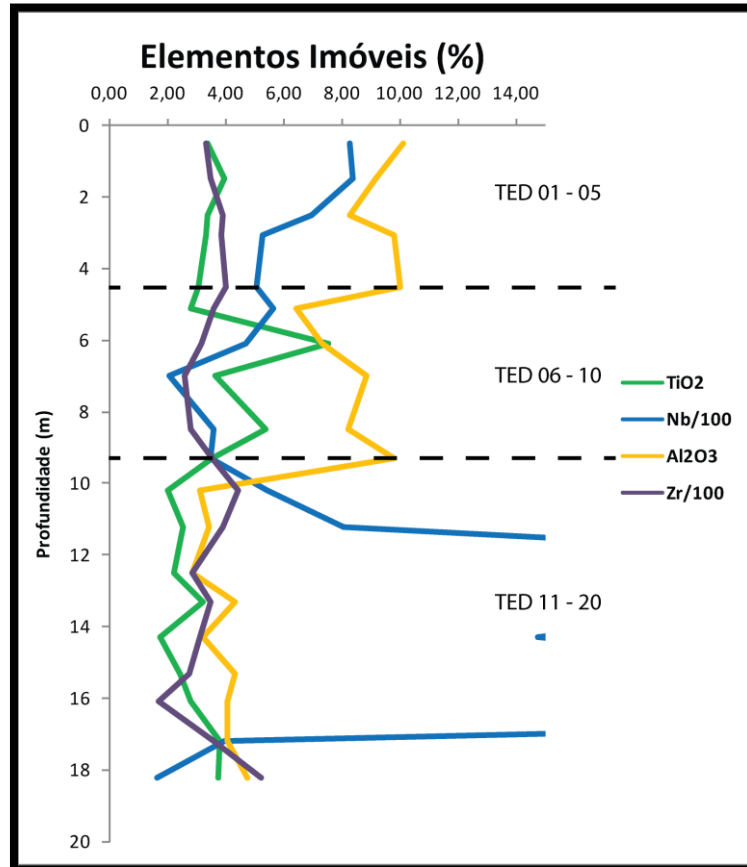


Figura 28: Curvas de variação da concentração de elementos imóveis ao longo do furo de sondagem estudado.

As amostras da superfície até a profundidade de 4,5 m (TED 01 a TED 05, Figura 6) apresentam concentrações de Al entre 8% e 10% e Ti em torno de 3%. O Nb apresenta uma tendência decrescente da amostra TED 01 (826 ppm) para a amostra TED 05 (508 ppm).

Já as amostras entre as profundidades de 5,1 m e 9,3 m (TED 06 a TED 10) apresentam uma diminuição na concentração do Al para valores entre 6% e 9% e do Nb para valores entre 300 ppm e 600 ppm. O Ti apresenta um aumento na concentração, chegando a até 7%.

Por fim, as amostras entre 10,2 m e 18,2 m (TED 07 a TED 20) a concentração do Al diminuiu para valores entre 3% e 4%, e o Ti para valores em torno de 2%. O Nb apresenta um expressivo acréscimo em sua concentração, chegando a até 6412 ppm

O compartimento das amostras do furo de sondagem nestas três zonas de comportamento distinto permitiu calcular a variação da concentração dos elementos para cada zona, utilizando a mediana das comparações de concentrações das amostras que compõem cada zona. Os resultados estão expostos neste trabalho na forma de tabelas (Apêndice C e D) e gráficos (Figura 29, 30, 31 e 32).

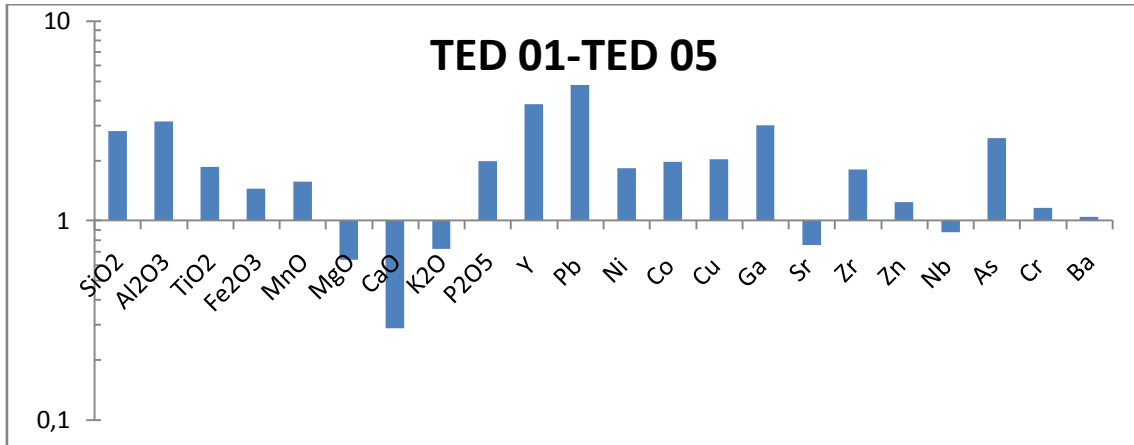


Figura 29: Mediana da comparação de concentrações dos elementos maiores e menores para as amostras TED 01 até TED 05.

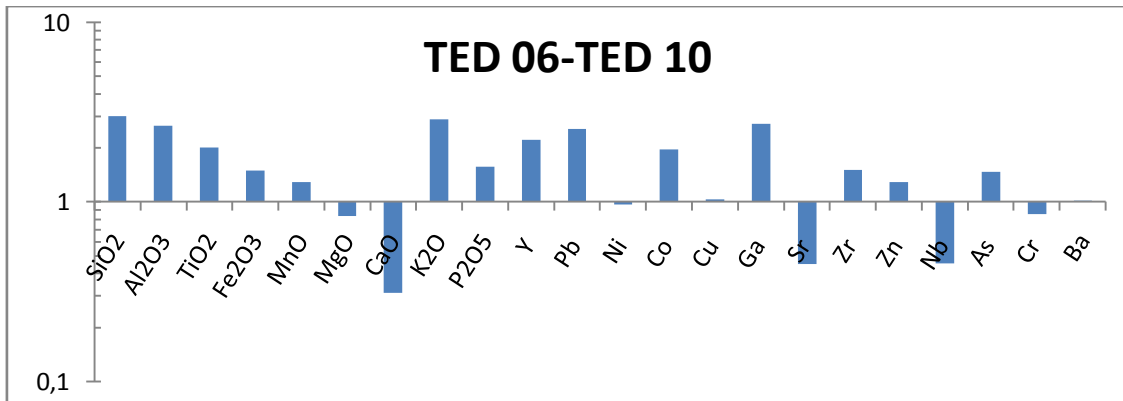


Figura 30: Mediana da comparação de concentrações dos elementos maiores e menores para as amostras TED 06 até TED 10.

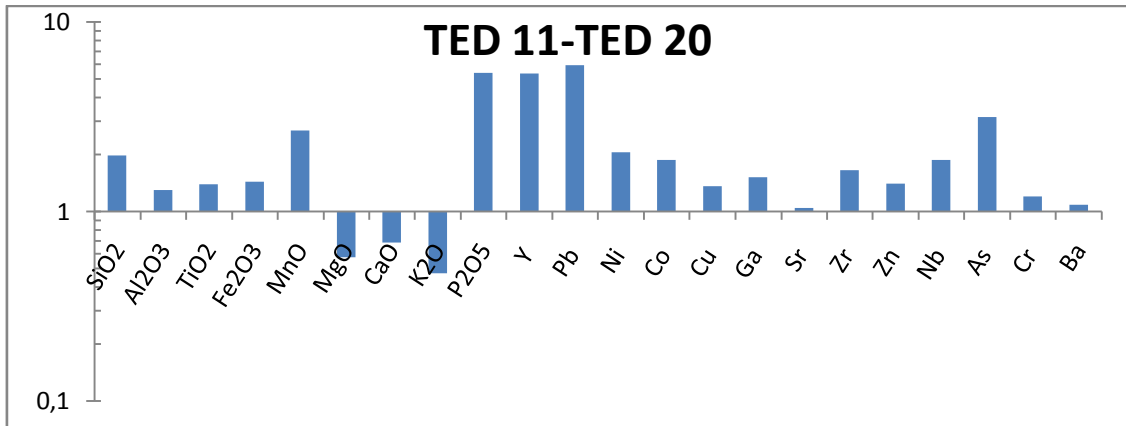


Figura 31: Mediana da comparação de concentrações dos elementos maiores e menores para as amostras TED 11 até TED 20.

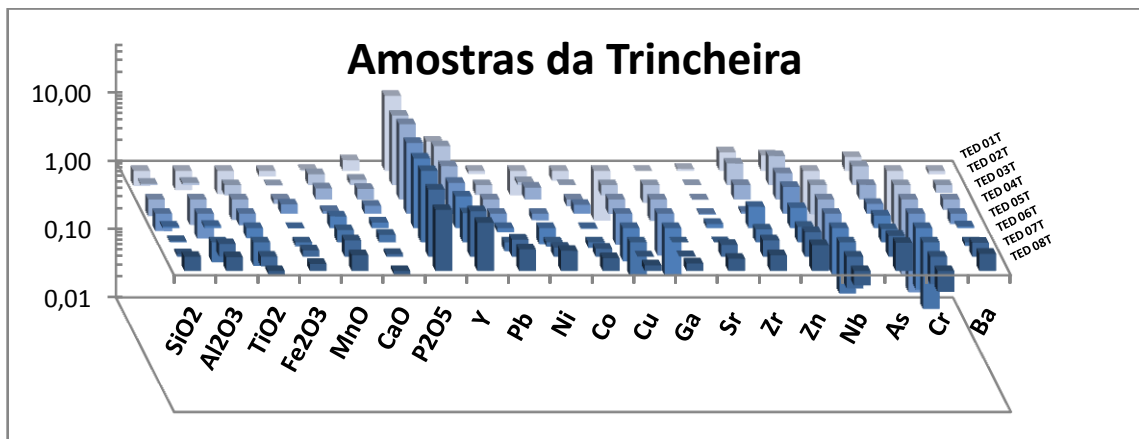


Figura 32: Comparação de concentrações dos elementos maiores e menores das amostras pertencentes ao perfil vertical da trincheira amostrada.

5.4. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

A seguir são apresentados os resultados de difratometria de raios X (XRD) obtidos da análise das trinta e três amostras utilizadas neste trabalho. Serão primeiramente apresentados os resultados referentes ao método de pó total e em seguida a análise da fração menor que 2 μm orientada sem tratamento (natural), tratada com etileno glicol (glicolada) e tratada com aquecimento à 550°C (calcinaada). O processo de tratamento com etileno glicol permite a identificação dos argilominerais presentes com propriedades expansivas, já que o etileno ocupa os espaços interfoliares. A calcinação pode causar o colapso da estrutura de

determinadas argilas ou até mesmo destruí-las. Este procedimento serve para diferenciar os argilominerais sensíveis ao aquecimento.

Neste tópico serão apresentados os difratogramas de maior relevância neste trabalho. Todos os difratogramas obtidos nesta etapa se encontram nos apêndices H, I, J, L e M

5.4.1. ANÁLISE EM DRX DAS AMOSTRAS DA TRINCHEIRA

Os difratogramas das amostras que compõem o perfil vertical amostrado (Figura 33) foram obtidos pelo método de pó total. Os principais picos que compõem o difratograma indicam a presença de apatita (picos a 8,04 Å, 3,43 Å, 2,79 Å, 2,76 Å, e 2,69 Å), goethita (picos a 4,16 Å, 3,68 Å), hematita (picos a 3,68 Å, 2,50 Å), magnetita (picos a 2,96 Å, 2,50 Å), e quartzo (picos a 4,23 Å e 3,34 Å). O rutilo (3,24 Å) também aparece fracamente.

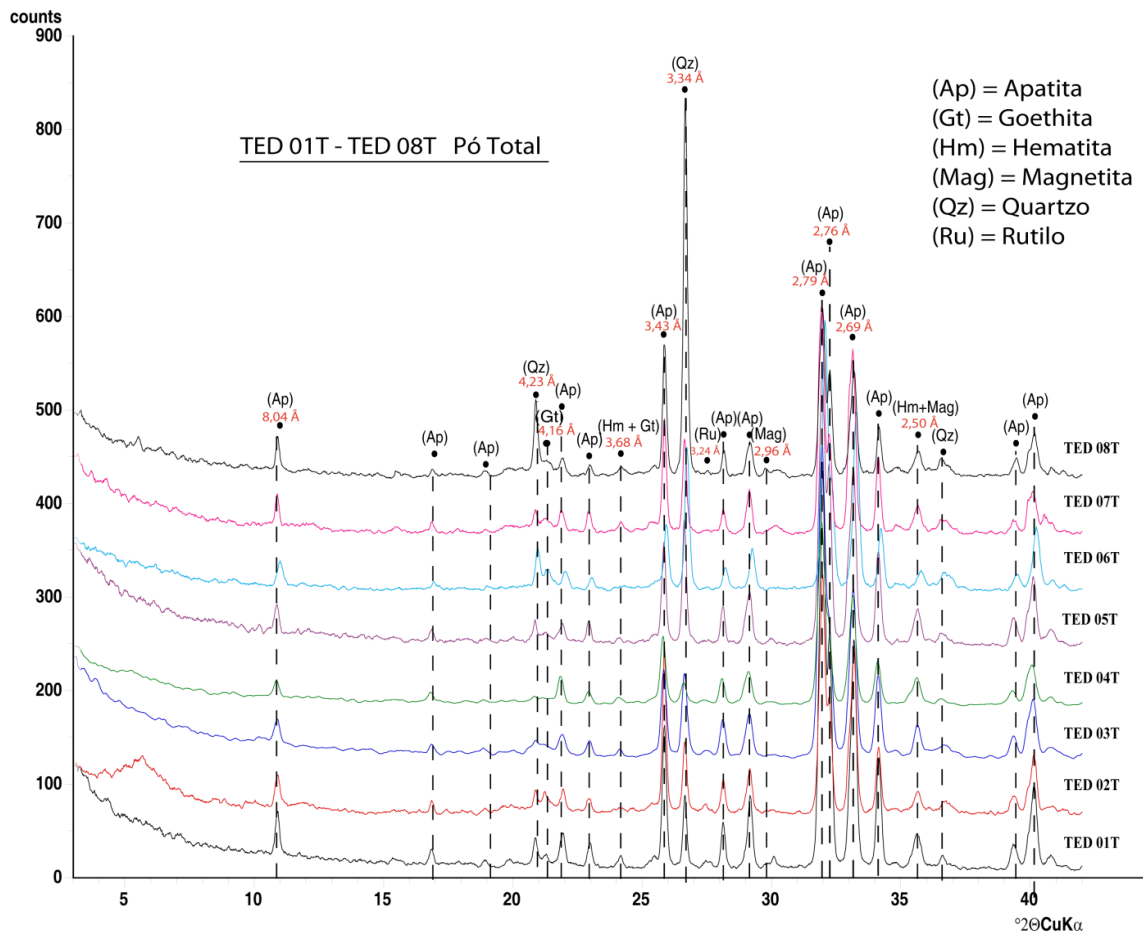


Figura 33: Análise em pó total das amostras coletadas no perfil vertical da trincheira.

Os difratogramas das amostras do perfil horizontal (Figura 34), obtidos pelo método do pó total apresentaram resultados semelhante ao observado no perfil vertical. Os principais picos que compõem os difratogramas indicam a presença de apatita (picos a 8,04 Å, 3,43 Å, 2,79 Å, 2,76 Å, e 2,69 Å), goethita (picos a 4,16 Å, 3,68 Å), hematita (picos a 3,68 Å, 2,50 Å), magnetita (picos a 2,96 Å, 2,50 Å), e quartzo (picos a 4,23 Å e 3,34 Å). O rutílo (3,24 Å) novamente aparece fracamente. A sepiolita (picos a 12,2 Å, 4,32 Å e 2,26 Å) aparece apenas na amostra TED 13T.

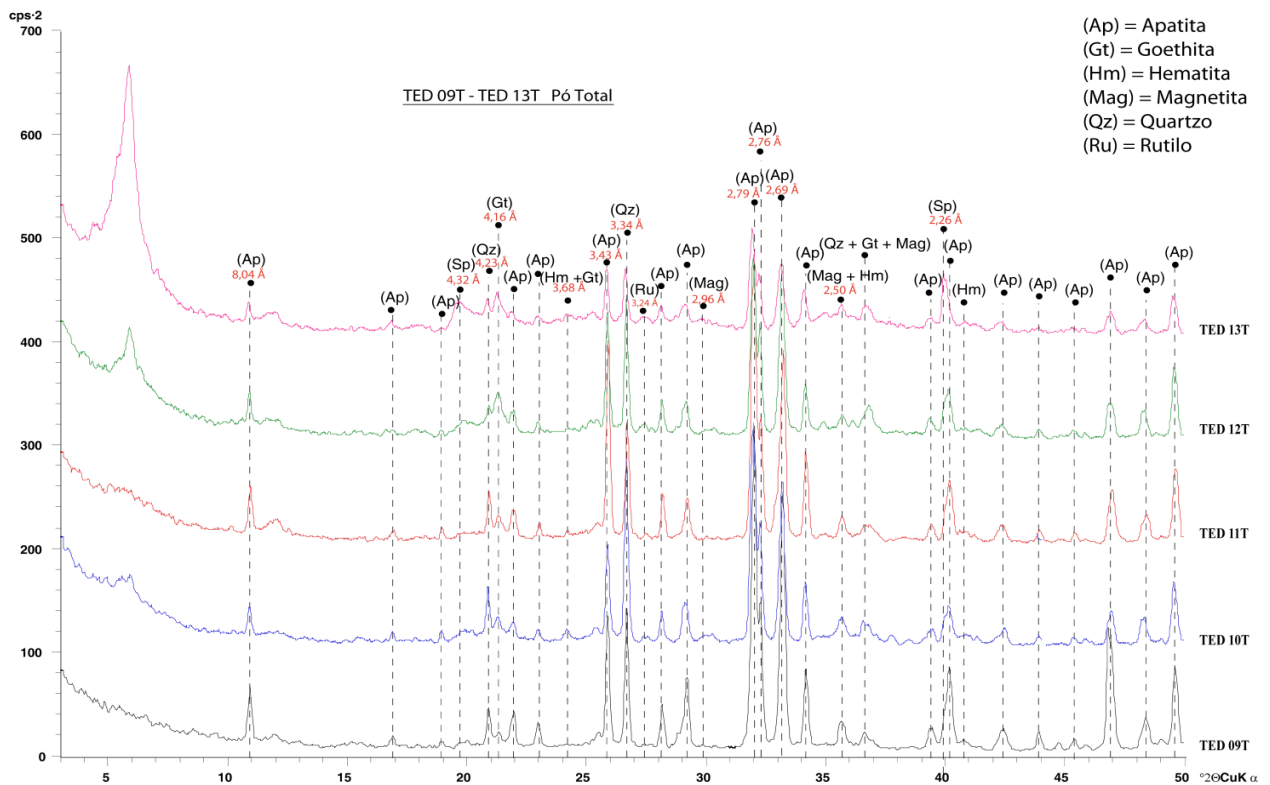


Figura 34: Análise em pó total das amostras coletadas no perfil horizontal da trincheira.

Com base nos resultados das análises em pó total, foram selecionadas as amostras TED 02T e TED 13T para analisar a fração menor que 2 µm orientada. O difratograma da amostra TED 02T (Figura 35) apresenta os resultados para a amostra natural, glicolada e calcinada. Foi identificado um pico a ~15 Å, que se expande para ~17 Å na amostra glicolada e colapsa para 10 Å na amostra calcinada. Esse comportamento permite classificar o argilomineral presente como uma esmectita. O difratograma da amostra TED 13T (Figura 36) apresentou o mesmo comportamento da esmectita observado na amostra TED 02T.

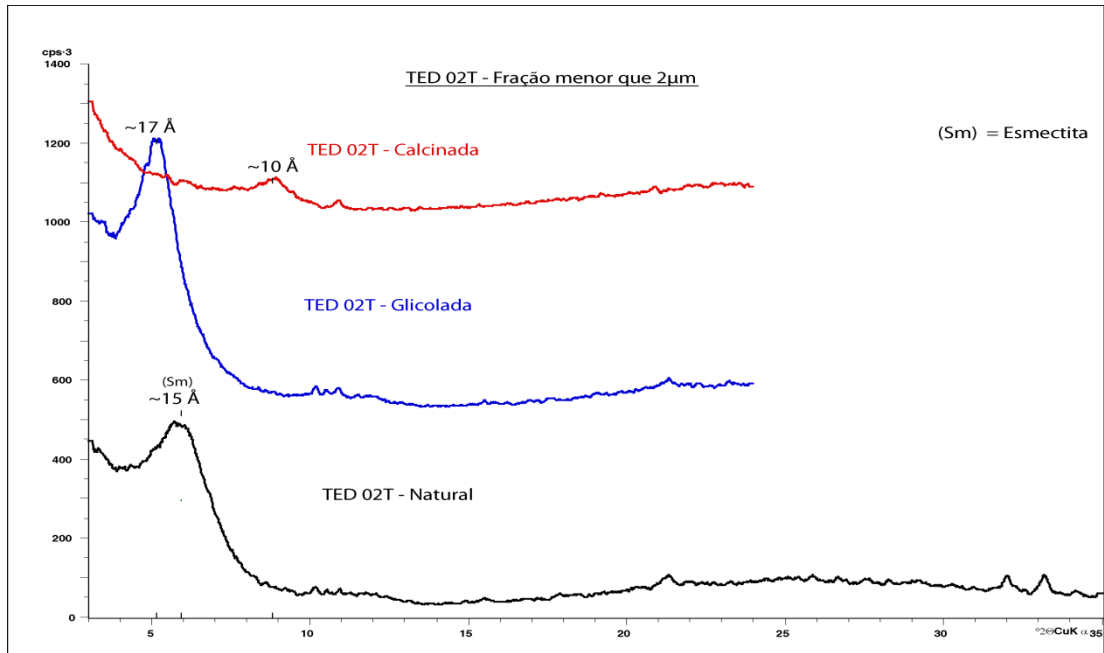


Figura 35: Análise da fração menor que 2 µm da amostra TED 02T do perfil vertical da trincheira.

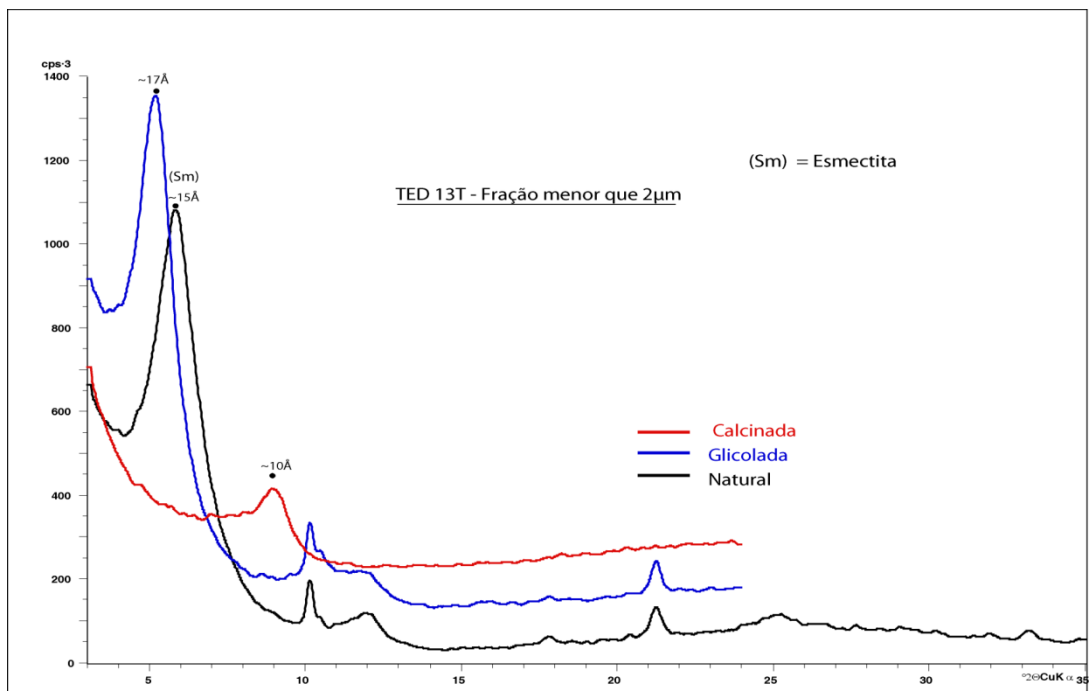


Figura 36: Análise da fração menor que 2 µm da amostra TED 13T do perfil horizontal da trincheira.

5.4.2. ANÁLISE EM DRX DAS AMOSTRAS DO FURO DE SONDAGEM

Os resultados das análises em pó total das amostras que compõem o furo de sondagem foram divididos em três difratogramas, seguindo as três zonas definidas pela comparação de concentrações dos elementos imóveis (Figura 28).

Os difratogramas das análises em pó total das amostras TED 01 a TED 05 (Figura 37) indicam a presença de anfibólio (picos a 8,38 Å, 4,2 Å, 3,26 Å, 3,12 Å, 3,93 Å, e 2,38 Å), apatita (picos a 8,04 Å, 2,79 Å, 2,76 Å e 2,69 Å), hematita (picos a 2,69 Å, 2,50 Å e 1,84 Å), magnetita (picos a 2,96 Å e 2,50 Å) e quartzo (picos a 3,44 Å e 3,34 Å).

Os difratogramas das análises em pó total das amostras TED 06 a TED 10 (Figura 38) indicam a presença de anfibólio (picos a 8,34 Å, 4,2 Å, 3,26 Å, 3,12 Å, e 2,38 Å), apatita (picos a 8,04 Å, 3,43 Å, 2,79 Å, 2,76 Å, e 2,69 Å), goethita (picos a 3,68 Å, 2,69 Å e 2,25 Å), hematita (picos a 3,68 Å, 2,69 Å, 2,50 Å e 1,84 Å), magnetita (picos a 4,85 Å, 2,96 Å e 2,50 Å), plagioclásio (picos a 3,19 Å e 4,02 Å) e quartzo (pico a 3,34).

Os difratogramas das análises em pó total das amostras TED 11 a TED 20 (Figura 39) indicam a presença de anfibólio picos a (8,34 Å, 4,51 Å, 3,12 Å e 2,32 Å), apatita (picos a 8,04 Å, 3,43 Å, 2,79 Å, 2,76 Å, e 2,69 Å), goethita (picos a 3,68 Å e 2,25 Å), hematita (picos a 3,68 Å e 2,50 Å), magnetita (picos a 2,96 Å e 1,61 Å) e quartzo (picos a 4,23 Å e 3,34 Å). A calcita aparece na amostra TED 20, com picos a 3,03 Å, 2,28 Å, 1,91 Å e 1,87 Å.

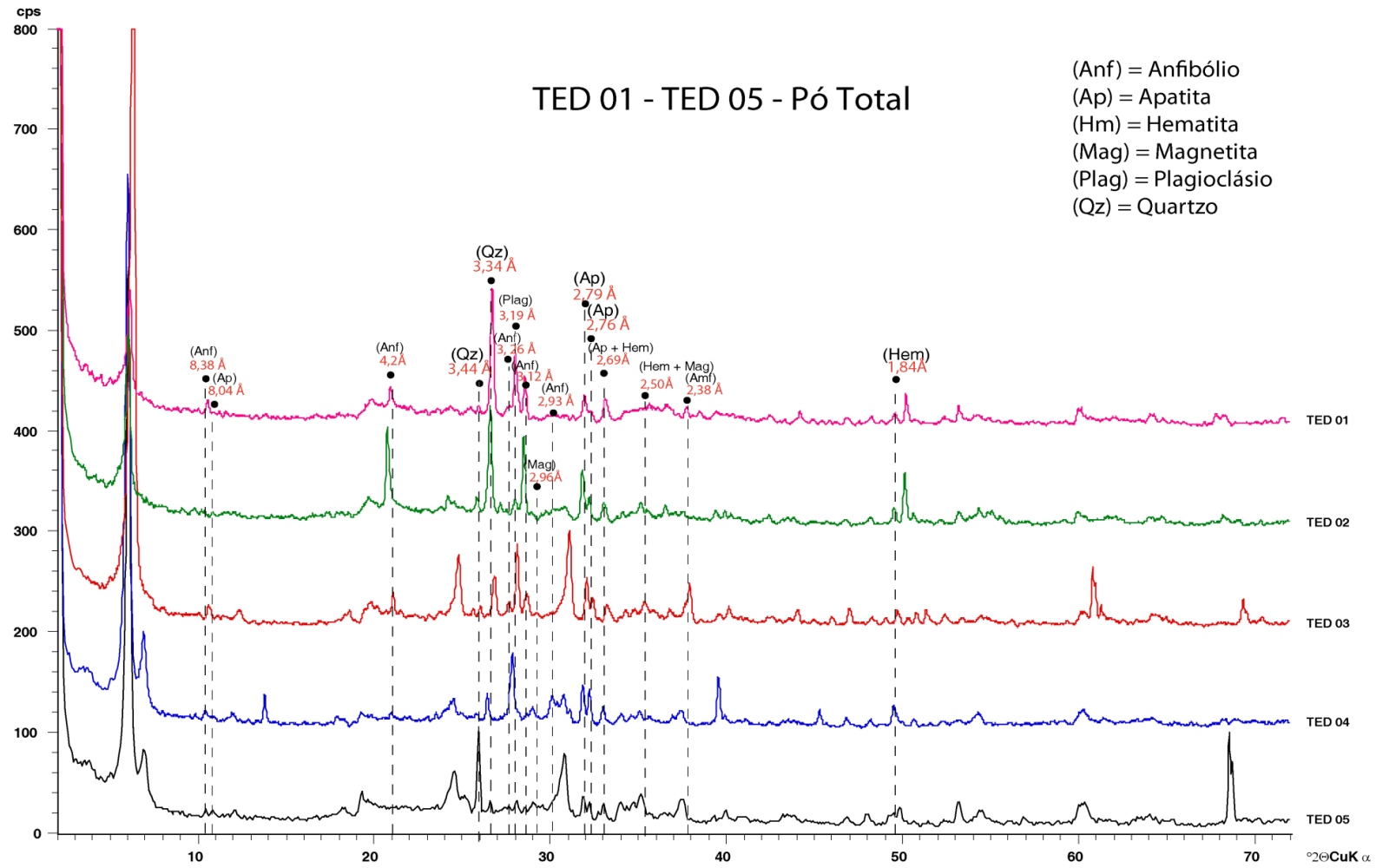


Figura 37: Análise em pó total das amostras coletadas na zona de menor profundidade do furo (TED 01 - 05).

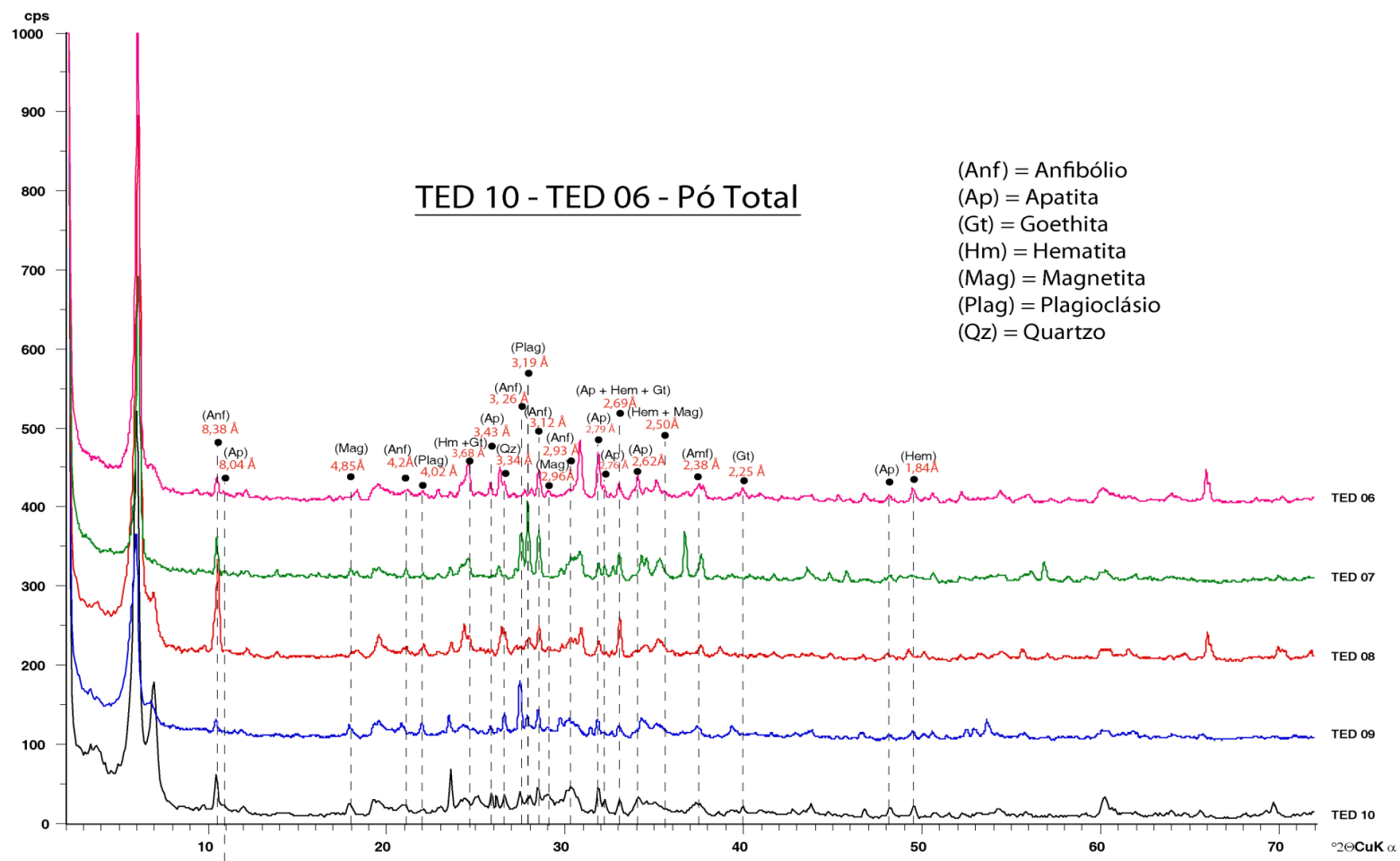


Figura 38: Análise em pó total das amostras coletadas na zona de profundidade intermediária do furo (TED 06 - 10).

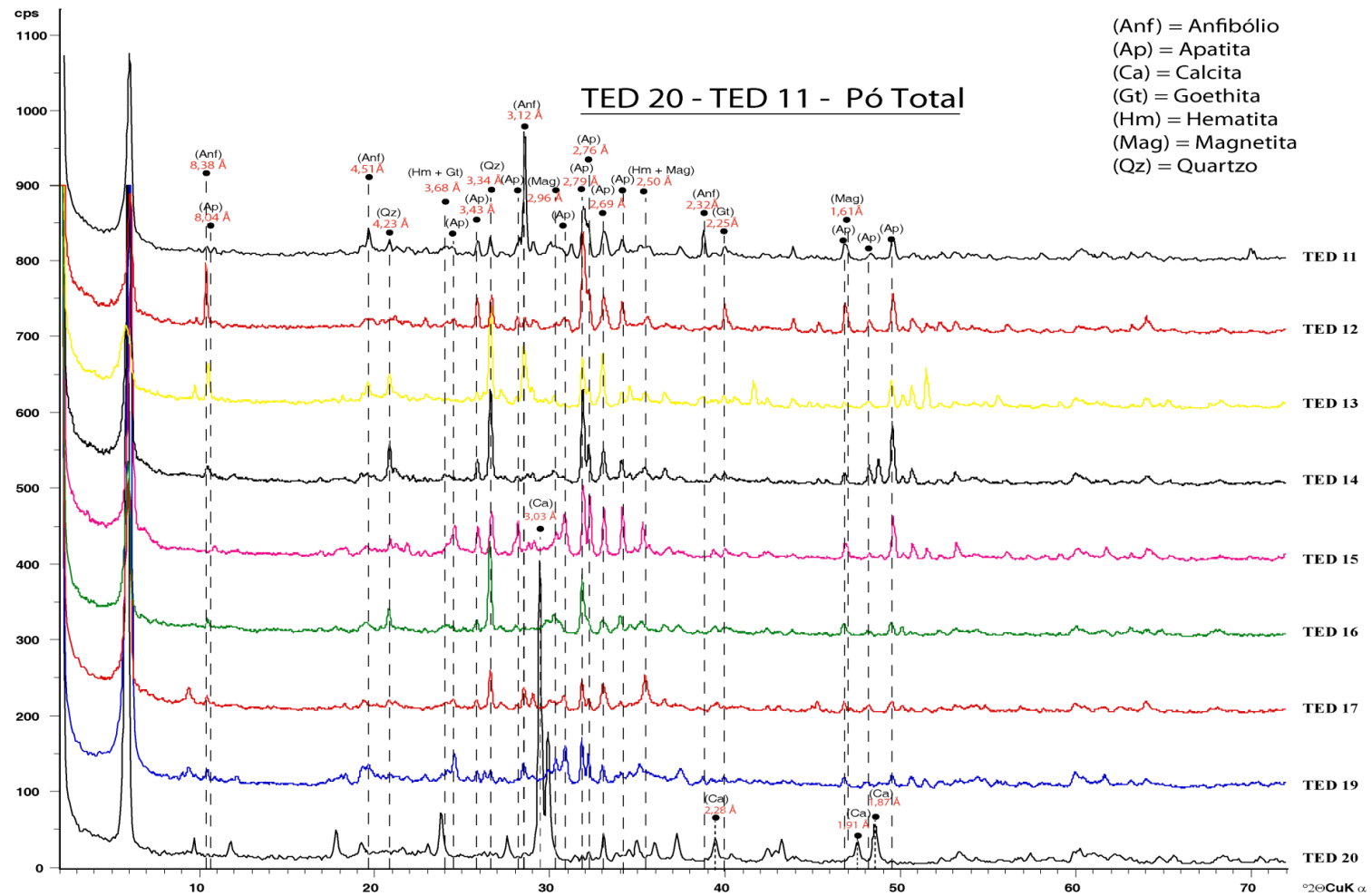


Figura 39: Análise em pó total das amostras coletadas na zona de maior profundidade do furo (amostras TED 11 - 20).

Foi realizado a análise da fração do material de granulometria menor que 2 μm de todas as amostras do alterito do furo de sondagem (amostras TED 01 – TED 20). O argilomineral encontrado foi uma esmectita, com pico em condições naturais a $\sim 15 \text{ \AA}$, que se expande para 17 \AA ao ser glicolada e colapsa para 10 \AA após a calcinação (Figura 40). A clorita aparece localmente na amostra TED 19, com pico em condições naturais a $\sim 15 \text{ \AA}$ que se mantém após ser glicolada e calcinada (Figura 41).

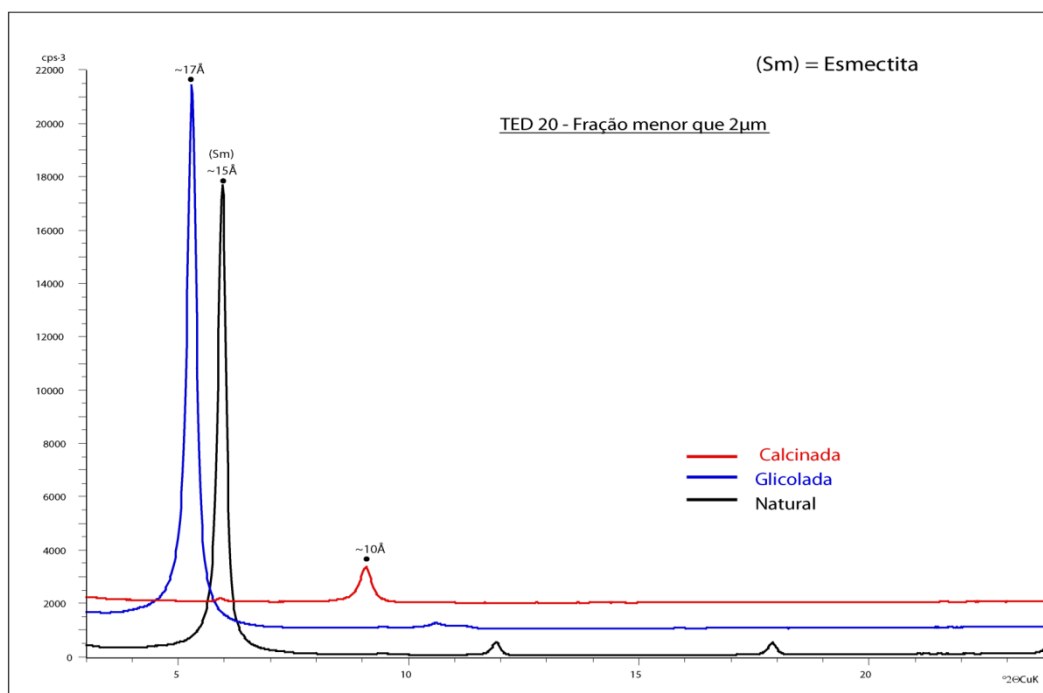


Figura 40: Análise da fração menor que 2 μm da amostra TED 20 do furo de sondagem TED 1101, apresentando os picos característicos da esmectita.

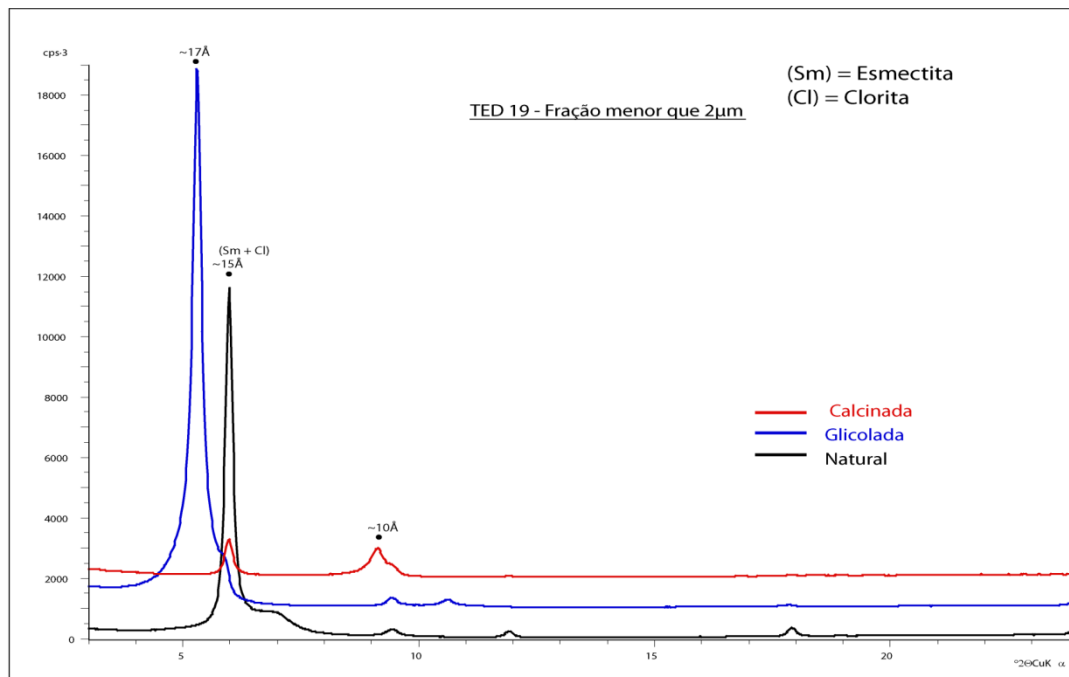


Figura 41: Análise da fração menor que 2 μm orientada da amostra TED 19 do furo de sondagem TED 1101, com os picos característicos da esmeclita e da clorita.

A esmeclita também aparece com picos em 13 Å e 12 Å nas amostras TED 02, TED 03, TED 04, TED 05, TED 06, TED 07, TED 08, TED 10, TED 11, TED 15 e TED 16 em condições naturais, o que reflete em picos anômalos nas análises glicoladas. Isso ocorre devido as diferentes quantidades de água e cátions preenchendo as camadas interlamelares das esmeclitas, o que resulta em uma oscilação no espaçamento interlamelar em condições naturais de análise e conseqüente variação nos resultados das análises glicoladas. Para otimizar a identificação da esmeclita, foi realizado o processo de saturação com CaCl, onde a fração menor que 2 μm é posta em uma solução com cloreto de cálcio, com o objetivo de homogeneizar a composição dos cátions interlamelares do argilomineral com capacidade de proceder as trocas catiônicas. As esmeclitas, ao serem saturadas em cálcio, tem seu espaçamento expandido para 15 Å (Deer, Howie & Zussman, 1992). O processo foi realizado nas amostras TED 02, TED 07 e TED 10, e os resultados comprovaram que o argilomineral presente é a esmeclita (Figura 42).

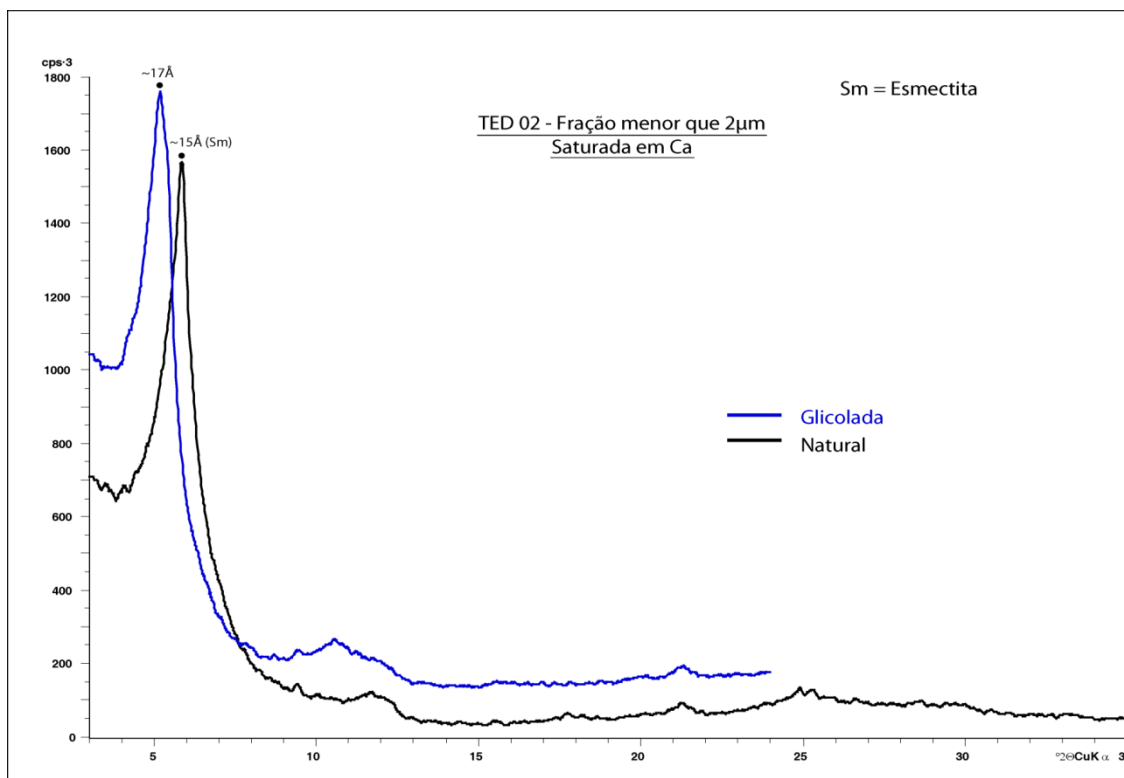


Figura 42: Análise da fração menor que 2 μm orientada saturada em Ca da amostra TED 02 do furo de sondagem TED 1101, apresentando os picos característicos da esmeclita nestas condições.

5.5. ANÁLISE QUÍMICA EM MICROSSONDA ELETRÔNICA

Para análise na microsonda eletrônica, foram selecionadas as diferentes fases de apatita identificadas na amostra TED 01T através do estudo em microscópio ótico e os carbonatos presentes na amostra de rocha sã (TED 38). As apatitas primárias foram analisadas em três pontos (centro, intermediário e borda), a fim de identificar possíveis variações composicionais relacionadas à zonações. A mesma metodologia foi utilizada, quando permitido pelo tamanho do mineral, nos crescimentos epitaxiais de apatita.

Foram selecionados os principais elementos constituintes das apatitas (Si, Fe, Mn, Mg, Sr, Ca, Na, P, F e Cl) para serem quantificados. Os resultados obtidos estão expressos na forma de óxidos (apêndice E). A composição química em cátions foi definida utilizando o programa MinPet 2.02® (apêndice F). A quantidade de hidroxila (OH^-) foi calculada utilizando a técnica de balanço de carga (Webster & Piccoli, 2015) e utilizada para classificar as apatitas de acordo com as concentrações de Cl, F e OH. (Figura 33 C e D).

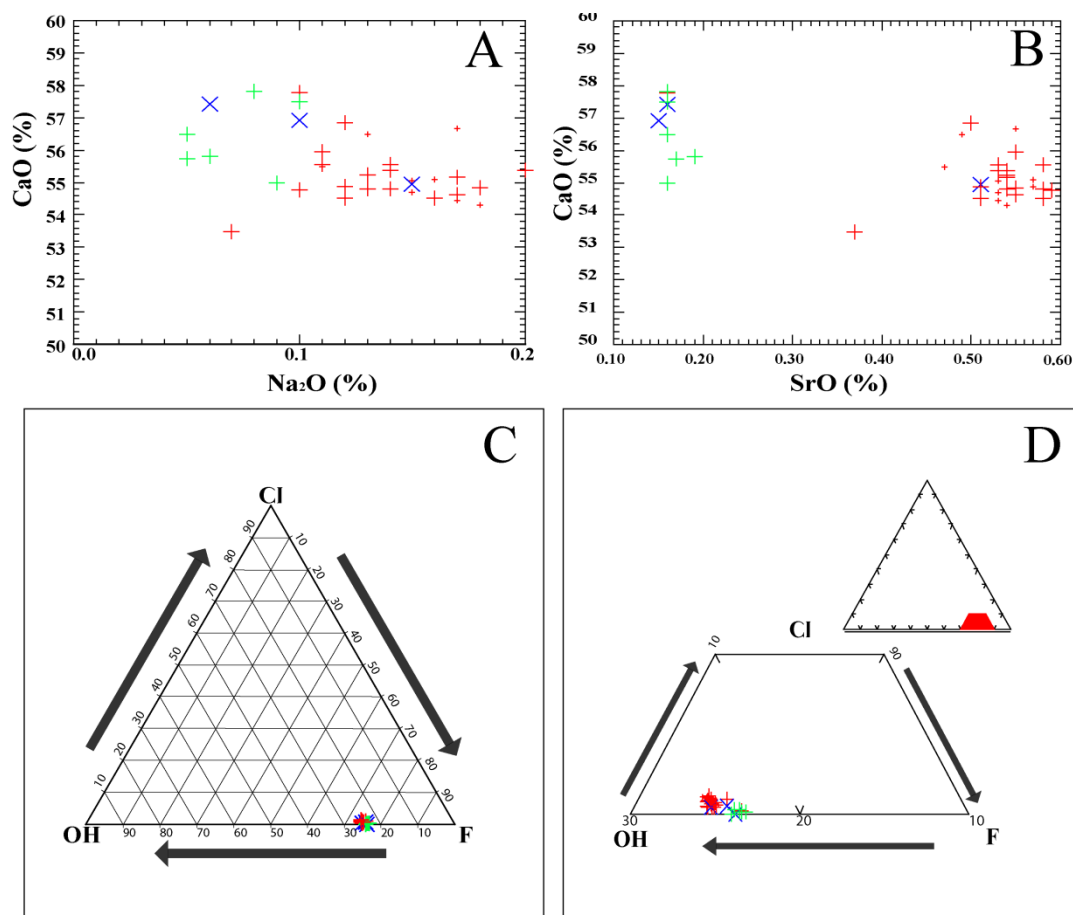


Figura 43: Comportamento de alguns elementos químicos obtidos a partir da análise de apatitas da amostra TED 01T com a microsonda eletrônica. Vermelho: Apatitas primárias. Azul: crescimento epitaxial. Verde: Apatitas fibrosas e micrométricas. A) Razão da porcentagem de CaO *versus* Na₂O. B) Razão da porcentagem de CaO *versus* SrO. C) Gráfico ternário F *versus* OH⁻ *versus* Cl. D) detalhe do gráfico C, mostrando pouca variação entre as diferentes fases de apatita.

As análises dos carbonatos presentes na amostra TED 38 permitiu identificar que o carbonato presente na matriz da rocha é a dolomita. Os veios foram também analisados e o resultado mostrou que estes são compostos por calcita (Apêndice G).

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu caracterizar geoquímica e mineralogicamente o perfil de alteração intempérica do carbonatito Três Estradas utilizando as técnicas disponíveis no CPGq. Já o estudo das apatitas permitiu identificar

fases diferentes de ocorrência e variações químicas relacionadas a estas fases.

O estudo das amostras pertencentes ao furo de sondagem TED 1101 e da trincheira demonstrou que há uma heterogeneidade na camada de alteração, com zonas de maior concentração de apatita (como a trincheira) e zonas de maior concentração de argilominerais (como o furo de sondagem).

Os resultados também demonstraram a ausência dos carbonatos presentes na rocha sã (dolomita e calcita) nas amostras intemperizadas coletadas na trincheira e nas amostras TED 01 a TED 19 do furo de sondagem, demonstrando que os processos de alteração supergênica na região foram efetivos na dissolução destes minerais e consequente concentração de fases residuais, como a apatita e óxidos de ferro.

6.1. CARACTERIZAÇÃO DA TRINCHEIRA

A trincheira amostrada neste trabalho possui uma composição mineralógica relativamente homogênea, tendo pouca variação de sua mineralogia do topo para a base. Os resultados mostraram que o perfil é composto principalmente por apatita, tendo quantidades menores de quartzo, óxidos de ferro (magnetita, hematita e goethita) e rutilo, havendo um incremento da intensidade do pico do quartzo, demonstrando que este mineral aumenta em quantidade para o topo, principalmente na amostra TED 08T pertencente à camada O (Figura 8).

Horizontalmente, as zonas de maior e menor alteração apresentam pouca variação da mineralogia, tendo as zonas de maior alteração (representadas pelas amostras TED 10T e TED 12T) uma maior quantidade de quartzo que aquelas referentes às zonas de menor alteração (amostras TED 09T, TED 11T e TED 13T), comportamento semelhante ao apresentado na amostra TED 08T da camada O do perfil vertical.

A análise da fração menor que 2 μm demonstrou que o argilomineral presente nas amostras é uma esmectita (Figuras 35 e 36) . Considerando os resultados da análise química das amostras, com altos teores de ferro, é

provável que esta esmectita pertença ao grupo das nontronitas, um argilomineral dioctaédrico rico em ferro, porém são necessários estudos complementares para confirmar esse dado.

Os resultados das análises químicas apresentaram elevados valores de cálcio e fósforo, relacionados à concentração de apatita nestas amostras. Essa concentração é visível quando analisado a comparação de concentrações das amostras do perfil vertical amostrado, quando o enriquecimento em fósforo chega a mais de 12 vezes a concentração original (figura 32, tabela 7).

As amostras ainda apresentam valores expressivos de ferro, relacionados à presença de óxidos de ferro (hematita, goethita e magnetita). Apesar disso, a comparação de concentrações do ferro não demonstrou enriquecimento expressivo, apresentando até empobrecimento nas amostras do topo da trincheira (amostras TED 06T, TED 07T e TED 08T).

Pela comparação de concentrações é possível ainda identificar que as amostras possuem, em geral, uma diminuição relativa de quase todos os elementos analisados. O enriquecimento se dá apenas em relação ao P, Y, Zr e Zn.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DO FURO DE SONDAGEM TED 1101

As amostras do furo de sondagem representam um perfil de alteração mais complexo que o amostrado na trincheira. O perfil é significativamente mais rico em argilominerais (esmectita). Esta maior concentração de filossilicatos resulta em maiores valores de Si e Al, visualizados nas análises químicas (Tabela 1) e substancial enriquecimento, quando comparado com a rocha sã pela comparação de concentrações (Figuras 29, 30 e 31 e Tabela 5).

As análises em pó total na difratometria de raios X das amostras TED 20 a TED 11 (Figura 39), que compõem a zona de maior profundidade (10,2m a 18,2 m), apresentam uma mineralogia composta por apatita, óxidos de ferro (magnetita, hematita e goethita) e quartzo. A amostra TED 20, a mais profunda das amostras de alterito estudada, ainda possui calcita, mostrando que o intemperismo químico ainda não dissolveu todo o carbonato nesta profundidade. Já as análises em pó total na difratometria de raios X das

amostras TED 10 a TED 06 (Figura 38) apresentou, além dos minerais presentes nas amostras TED 20 a TED 11, anfibólio e plagioclásio. Essa mineralogia se estende até o topo do perfil. Os picos referentes ao quartzo tendem a se intensificar para o topo do perfil, mostrando que esse mineral aumenta em concentração quanto mais próximo da superfície (Figura 37).

Os difratogramas obtidos da fração menor que 2 μm orientada indicou que o argilomineral presente na alteração do carbonatito é a esmectita (Figuras 40, 41 e 42). Considerando a química das amostras, que mostram altos valores de ferro e pouca participação do alumínio, é provável que a esmectita presente seja a nontronita, uma esmectita dioctaédrica rica em ferro.

A análise da comparação de concentrações das amostras pertencentes ao furo de sondagem (figuras 29, 30 e 31) mostra que a zona com maior concentração de fosfato ocorre entre as amostras TED 11 e TED 20, na profundidade de 10,2 m a 18,2 m. Essa zona também apresenta enriquecimento expressivo em Y e Pb. Já o Mg tende a diminuir a quantidade no alterito, o que pode estar relacionado à dissolução da dolomita, principal carbonato presente na rocha sã.

6.3. CARACTERIZAÇÃO DAS APATITAS NO ALTERITO

Como visto anteriormente, os processos de alteração intempélica identificados na região do perfil de alteração Três Estradas se mostraram eficientes em concentrar o mineral apatita. A análise em detalhe deste mineral em microscopia ótica na amostra TED 01T permitiu identificar três fases distintas de ocorrência: a primária, relacionada à gênese da rocha, o crescimento epitaxial secundário de apatita sobre as primárias e, por fim, na forma de cristais fibrosos e/ou euédricos micrométricos sobre os outros minerais presentes, preenchendo cavidades vazias (figura 27 A e B). Além disso, a identificação da mineralogia que compõe as vênulas durante o estudo com lupa binocular e análise de detalhe em difratometria de raios X mostrou que a apatita ainda ocorre preenchendo estas estruturas. Como não foi observado esses crescimentos secundários de apatita na rocha sã (amostra TED 38, Figura 26), conclui-se que estas fases de apatita provavelmente estão

relacionadas aos processos de alteração supergênicos, como é observado nos produtos de alteração intempérica do complexo carbonatítico carbonatítico Catação I (Toledo, *et al.* 2004). Observa-se que os cristais primários de apatita não possuem zonação e apresentam bordas arredondas e arestas corroídas, típicas texturas de dissolução, indicando que este mineral foi parcialmente dissolvido durante os processos de intemperismo, fenômeno que ocorre após a dissolução completa dos carbonatos.

Os cristais micrométricos euédricos e fibrosos de apatita secundária se formam ocupando as cavidades abertas após a dissolução dos carbonatos. Simultaneamente ao crescimento ocorre a deposição de franjas de óxido de ferro, mostrando que estas apatitas se formaram em ambiente oxidante.

Os resultados das análises das apatitas em microsonda eletrônica mostraram que todas as três fases presentes apresentaram baixa concentração de Cl e alta concentração em F e OH⁻ (figura 33 C e D), classificando-as como hidróxi-fluorapatita. O resultado é compatível com apatitas típicas de carbonatito, de acordo com Webster & Piccoli (2015) (figura 34). Não se observou, porém, diferença considerável entre as fases de apatita presentes.

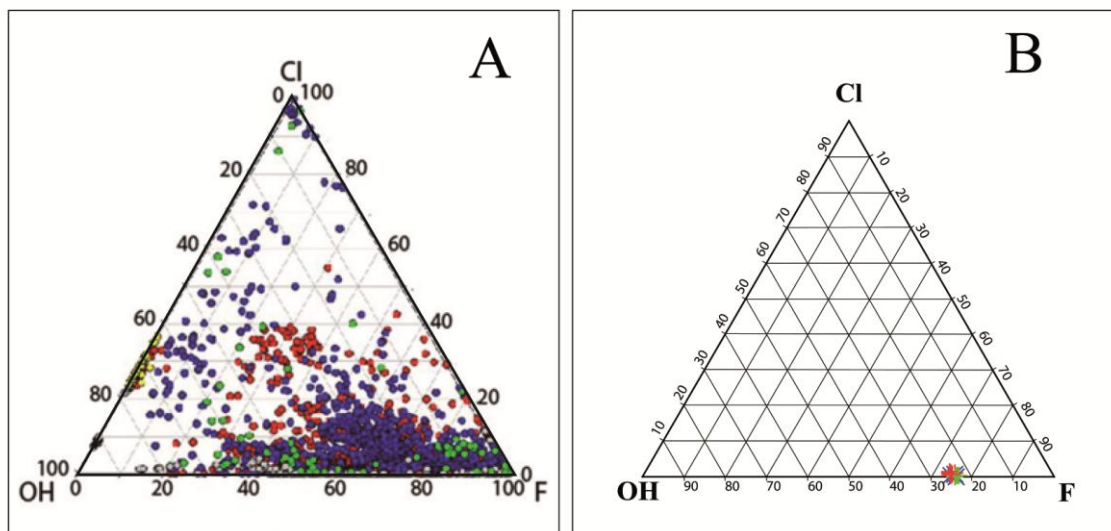


Figura 44: Comparação entre os resultados obtidos no atual estudo e os existentes na bibliografia. A) Composição das apatitas em diferentes rochas hospedeiras: Vermelho representa rochas félsicas, azul rochas máficas, cinza são carbonatitos, verde são depósitos hidrotermais e amarelo rochas sedimentares. (Webbster & Piccoli, 2015). B) Composição das apatitas analisadas neste trabalho. Vermelho representa as apatitas primárias, azul o crescimento epitaxial e verde as apatitas fibrosas e micrométricas que caem dentro do campo característico de apatitas oriundas de carbonatito.

Os resultados das análises de Na e Sr demonstraram que as apatitas primárias possuem, em geral, maior concentração destes elementos em relação às apatitas secundárias (figura 43 A e B).

6.4. CONCLUSÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos e as interpretações realizadas a partir deles, é possível afirmar que:

- Os processos de intemperismo que atuaram e são atuantes no carbonatito Três Estradas são eficientes na dissolução dos carbonatos e na concentração relativa das apatitas formadoras da rocha, gerando perfis de alteração de até 18 m.
- A alteração do carbonatito se configura num processo natural de concentração de fosfato, na forma de apatita, mostrando enriquecimento deste mineral em relação à rocha sã. Este processo pode gerar

depósitos de interesse econômico na área, desde que possua volumes suficientes.

- A apatita, além de possuir origem primária relacionada à gênese da rocha, cristaliza em ambiente provavelmente supergênico, na forma de crescimento epitaxial e cristais micrométricos e fibrosos preenchendo as cavidades do alterito e em vênulos.
- A presença de quartzo nas amostras pode indicar uma contribuição externa deste mineral, visto que ele não faz parte da assembleia mineralógica dos carbonatitos. A provável origem deste mineral estaria relacionada ao complexo granulítico Santa Maria Chico, composto por gnaisses.
- A diferença de composição química e mineralógica observada entre as amostras da trincheira e as do furo de sondagem mostram que o perfil de alteração intempérica não é homogêneo na área de ocorrência do carbonatito. É provável que haja um controle topográfico onde zonas próximas a vales possuam um maior acúmulo de argilominerais, como observado no furo de sondagem, e zonas em altos topográficos sejam lixiviadas e empobrecidas nestes minerais, como a trincheira. Se essa afirmação estiver correta, os altos topográficos se configuram como zonas mais propícias para exploração de fosfato.
- Não está descartado a possibilidade de existirem perfis antigos de alteração, desenvolvidos em outros períodos e em condições climáticas diferenciadas das observadas atualmente na região. Estudos adicionais de natureza geomorfológica, mineralógica, isotópica e de traços de fissão seriam interessantes para a compreensão desta possibilidade.

7. REFERÊNCIAS

Alves, P. R. 2008. *The Carbonatite-Hosted Apatite Deposit Of Jacupiranga, Se Brazil: Styles Of Mineralization, Ore Characterization, And Association With Mineral Processing*. Rolla, 108 p. Dissertação de mestrado, Curso de Geologia, Missouri University Of Science And Technology.

Becker, E. L. S. 2008. *Solo do Rio Grande do Sul e sua Relação com o Clima. Santa Maria*. 101 p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria.

Best, M. G. 2003. *Igneous and Metamorphic Petrology*. 2 ed. Brigham Young University: Blackwell Publishing. 758 p.

Brinatti, A. M. 2001. *Uso de Espectroscopias e Difração de Raios X Aplicados À Caracterização Mineralógica de Solos*. São Carlos. 194 p. Tese de Doutorado, Curso de Física Aplicada, Departamento de Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Buhrke, V. E., Jenkis, R., Smith, D. K. 1998. *A Practical Guide For The Preparation Of Specimens For X-Ray Fluorescence And X-Ray Diffraction Analysis*. Nova York: Wiley-VHC. 360 p.

Burt, T. P., Chorley R. J., Brunnsden D., Cox N. J., Goudie A. S. 2008. *The History of The Study of Landforms Or the Development of Geomorphology: Volume 4: Quaternary and Recent Proceses and Forms*. Bath. Londres. The Geological Society of London, 1005 p.

Carvalho, M. L. 2012. *Fluorescência de Raios X*. (resumo). 15 p. Departamento de Física, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Chakmouradian, A. 2009. The geochemistry of carbonatites revisited: Two major types of continental carbonatites and their trace-element signatures (resumo). *Geophysicam Researth Abstractis*, Winnipeg, Canadá, v. 11.

COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. *Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. Escara 1:750.000

Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. 1992. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. 2 ed. Harlow, Longman, 695 p.

Giovannini, Arthur Lemos. 2013. *Contribuição À Geologia E Geoquímica do Carbonatito e da Jazida (Nb, ETR) De Seis Lagos (Amazonas)*. Porto Alegre, 128 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Gomes, C.B., Formoso, M.L.L., Trescases, J.J. 1994. *Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas À Geologia*. São Paulo. Edgar Blücher Ltda, 218p.

Goldich, S. S. 1938. *A Study in Rock Weathering*. The Journal Of Geology, v. 46, n.1, p.17-58.

Grazia, C. A.; Toniolo, J. A.; Parisi, G.; Muller, E. I., Dressler, V. L. 2011. *Prospecção hidrogeoquímica no carbonatito Três Estradas, RS*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, Gramado. Anais... Gramado, SBGq, p. 1769-1772.

Hasenack, H.; Weber, E. (org) *Base cartográfica vetorial do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000*. Porto Alegre, UFRGS-IB-Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento,3)

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. BDMEP – *Banco de Dados Meteorológico para Ensino e Pesquisa*. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em 17 de setembro de 2015.

Köppen, W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Berlin: W Guyter, 390p.

Kuinchtner, A. 2001. Clima Do Estado Do Rio Grande Do Sul Segundo A Classificação Climática De Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia: Série: Ciências Exatas*, v. 2, n. 1, p.171-182.

Lapin, A. V.; Iwanüch W. & Ploshko, V. V. 1999. Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(4):483-490.

Lapido-Loureiro, F. E. L., Castro, N. F., Silva, R. E. C. 2005. Brasil: Recursos Minerais e a Produção de Fosfatos, *Fosfatos, Minerales para la Agricultura em Latinoamérica*. p.53- 72. 19

Lapido-Loureiro, F. L. Monte, M. B. M., Nascimento, M. 2008. *Agrominerais – Fosfatos, Rochas e Minerais Industriais* – CETEM, 2ª Edição.

Le Maitre, R. W. 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press. 236 p.

Marques, M. M. 2006. *Interferência De Picos Nas Análises Por Espectrometria De Fluorescência De Raios-X*. Porto Alegre. In: Salão De Iniciação Científica – Ufrgs.

Modreski, P. J., Armbrustmacher, T. J. Hoover. D. B. 1995. Carbonatite Deposits. *U.S. Geological Survey*.

Oliveira, S. M. B., Imbernon, R. A. L. 1998. Weathering alteration and related REE concentration in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *Journal Of South American Earth Sciences*, v. II , n. 4, p.379-388,.

Portal SERC, Geochemical Instrumentation and Analysis, disponível em <http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/semcl.html>, acesso em 30 de maio de 2015.

Senhorinho, E. M. 2012. *Controle Estrutural Dos Carbonatitos No Rio Grande do Sul: Análise De Produtos De Sensoriamento Remoto e Aerogeofísicos*. Porto Alegre, 180p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Streck, E.V., Kampf, N., Dalmolin, R.S.D., Klamt, E., Nascimento, P.C., Schneider, P. 2002. *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, UFRGS, 107 p.

Taylor, G.; Eggleton, R. A. 2001. *Regolith Geology and Geomorphology*. Chichester: John Wiley Professio,. 392 p.

Teixeira, W., Toledo, C. M., Fairchild, T. R. Taioli, F. 2009. *Decifrando a Terra*. São Paulo, Companhia Editora Nacional, 624p.

Toledo, M. C. M., Lenharo, S. L. R. Ferrari, C. V., Fontan, F. Parseval, P., Leroy, G. 2004. The Compositional Evolution Of Apatite In The Weathering Profile Of The Catalão I Alkaline-Carbonatitic Complex, Goias, Brazil. *The Canadian Mineralogis*, Vol. 42, p. 1139-1158.

Toniolo, J. A. Grazia, C.A. Parisi, G. Pinto, L.G. 2011. *Carbonatitos do Rio Grande do Sul, Brasil*. Poster, In V Simpósio de Vulcanismo e Ambientes, Cidade de Goiás.

Walter, A. V. Hanon D. Flicoteaux R. Girard J. P. Melfi A. 1995. Behaviour Of Major And Trace Elements And Fractionation Of REE Under Tropical Weathering Of A Typical Apatite-Rich Carbonatite From Brazil. *Earth And Planetary Science Letters*, n. 136, p.591-602,.

Webster, J. D.; Piccoli, P. M. 2015. Magmatic Apatite: A Powerful, Yet Deceptive, Mineral. *Elements*, v. 11, n. 3, p.177-182.

8. APÊNDICES

APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE ANÁLISE QUÍMICA EM ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA AS AMOSTRAS DO FURO DE SONDAGEM.

Amostra	Profundidade (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₄	P.F.	Total
TED01	0.5	41.45	10.10	3.40	16.62	0.39	2.83	8.42	Nd	0.13	5.14	nd	11.19	99.67
TED02	1.5	38.05	9.16	3.97	16.27	0.38	3.92	8.77	0.11	0.13	4.90	nd	12.62	98.27
TED03	2.5	36.97	8.25	3.39	16.08	0.40	6.32	10.17	0.24	0.13	5.86	nd	11.48	99.29
TED04	3.05	37.71	9.81	3.34	16.54	0.39	8.06	10.14	0.89	0.68	6.39	nd	5.41	99.36
TED05	4.5	39.36	10.01	3.04	15.99	0.41	8.90	8.63	0.80	0.78	5.09	nd	5.82	98.84
TED06	5.1	31.71	6.42	2.82	16.14	0.48	8.15	13.82	0.05	0.28	8.79	nd	11.31	99.96
TED07	6.1	37.16	7.30	7.55	20.63	0.32	7.79	8.97	1.15	0.10	2.37	nd	6.82	100.16
TED08	7	40.39	8.85	3.64	21.97	0.48	8.40	6.39	1.02	0.53	1.20	nd	7.76	100.63
TED09	8.5	42.55	8.22	5.38	16.72	0.25	8.25	10.61	0.05	0.72	4.03	nd	4.74	101.52
TED10	9.3	40.51	9.81	3.53	13.79	0.29	10.38	9.40	0.46	1.41	4.75	nd	5.80	100.14
TED11	10.2	25.82	3.09	1.99	14.86	0.68	4.29	24.14	nd	0.06	16.73	nd	6.84	98.51
TED12	11.2	23.69	3.41	2.53	19.07	0.66	5.65	22.17	nd	0.02	14.75	nd	8.35	100.29
TED13	12.5	31.14	2.85	2.24	14.08	1.02	5.52	20.66	nd	0.09	14.25	nd	7.34	99.20
TED14	13.3	30.84	4.32	3.23	18.32	0.59	5.62	15.67	nd	0.10	10.67	nd	9.41	98.78
TED15	14.3	24.68	3.20	1.75	14.46	0.86	3.25	24.11	nd	0.17	17.74	nd	10.34	100.55
TED16	15.3	31.07	4.35	2.46	16.09	0.94	5.84	19.41	nd	0.11	13.87	nd	5.24	99.38
TED17	16.1	29.80	4.04	2.82	30.94	0.50	7.59	9.63	nd	0.01	6.03	nd	9.17	100.53
TED19	17.2	26.67	4.06	3.82	18.17	0.32	9.32	18.85	nd	nd	12.31	nd	8.00	101.51
TED20	18.2	23.03	4.73	3.74	7.59	0.18	9.92	27.23	nd	nd	1.02	1.70	21.27	100.42
TED38	34.2	13.55	3.12	1.83	11.24	0.25	9.91	30.35	0.00	0.19	2.58	1.96	26.04	101.02

Amostra	Profundidade (m)	Y	Pb	Ni	Co	Cu	Ga	Sr	Zr	Zn	Nb	Rb	As	Cr	Ba
TED01	0.5	179.38	31.70	153.73	106.39	85.89	20.36	942.40	330.63	186.05	826.35	nd	26.89	402.30	1358.00
TED02	1.5	183.48	32.66	134.67	105.89	87.63	18.41	885.06	348.01	187.56	835.71	nd	23.90	382.90	1189.80
TED03	2.5	188.96	34.02	111.52	101.68	84.49	16.77	929.32	388.16	198.89	693.27	nd	23.31	351.10	958.70
TED04	3.05	224.36	27.73	98.93	96.13	58.65	17.75	922.08	384.50	227.21	526.54	44.71	17.65	291.20	1111.70
TED05	4.5	218.60	28.55	81.74	99.50	59.00	17.43	840.20	403.69	220.04	508.43	35.64	17.65	223.70	1136.30
TED06	5.1	271.57	37.31	118.50	101.01	69.13	14.17	1153.22	356.70	209.84	561.75	nd	22.12	393.60	1096.10
TED07	6.1	100.88	16.39	nd	108.91	62.14	15.80	317.78	318.06	173.59	469.04	nd	11.98	121.00	563.10
TED08	7	47.94	15.70	40.72	115.98	23.39	23.30	339.10	256.86	269.88	209.12	nd	11.68	121.60	1102.80
TED09	8.5	109.09	16.80	58.76	95.63	42.94	16.12	549.72	279.14	184.54	359.34	nd	13.17	257.90	1104.10
TED10	9.3	156.45	41.46	77.83	86.40	40.98	18.73	682.12	352.79	207.23	346.81	64.26	21.82	291.50	1432.00
TED11	10.2	324.24	33.80	70.77	77.31	44.42	5.35	1246.73	443.22	196.27	544.38	nd	25.10	168.10	1094.00
TED12	11.2	292.56	47.43	111.01	100.17	56.56	7.97	1273.92	393.23	277.44	808.05	nd	29.27	333.60	1067.90
TED13	12.5	241.44	134.20	126.93	83.10	22.48	8.95	1685.23	285.21	167.50	3821.83	nd	70.40	360.60	1133.40
TED14	13.3	262.44	38.95	162.75	109.42	65.29	12.86	1400.65	350.47	250.62	2480.31	nd	28.38	649.40	1175.20
TED15	14.3	445.44	79.79	124.13	86.62	34.89	7.32	1934.45	310.12	224.26	1474.48	nd	48.64	321.30	1407.70
TED16	15.3	286.17	116.21	156.97	101.01	62.14	11.56	1637.62	274.28	213.62	2850.15	nd	61.76	532.10	1420.90
TED17	16.1	197.63	23.36	113.40	175.69	203.91	10.25	641.65	170.62	298.96	6412.92	nd	23.31	482.40	1309.40
TED19	17.2	191.24	1.93	163.69	96.15	129.64	8.95	1167.21	358.34	228.10	396.94	nd	13.17	440.60	611.80
TED20	18.2	48.10	1.93	98.40	32.97	28.43	7.53	727.17	523.40	96.23	164.12	nd	5.27	166.50	8879.90
TED38	34.2	49.30	6.62	60.72	51.63	41.65	5.93	1223.75	212.48	160.92	793.78	nd	9.01	302.30	1086.70

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE ANÁLISE QUÍMICA EM ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA AS AMOSTRAS DA TRINCHEIRA.

	Amostra	Profundidade (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₄	P.F.	Total
Perfil Vertical	TED 8T	0.25	21.88	4.96	1.65	14.28	0.42	0.02	27.48	nd	0.08	20.31	nd	8.55	99.61
	TED 7T	0.5	14.77	4.78	1.31	13.91	0.43	0.00	33.19	nd	0.01	24.85	nd	7.99	101.22
	TED 6T	0.75	14.19	1.60	0.83	9.84	0.37	0.00	39.25	nd	nd	28.75	nd	4.88	99.71
	TED 5T	1	14.24	3.35	1.30	11.15	0.37	0.00	36.65	nd	nd	27.00	nd	5.53	99.60
	TED 4T	1.25	7.55	1.35	1.24	15.44	0.27	0.00	39.76	nd	nd	28.20	nd	4.71	98.51
	TED 3T	1.5	7.74	1.32	0.91	9.69	0.36	0.00	43.36	nd	nd	32.75	nd	4.62	100.75
	TED 2T	1.75	14.15	3.36	1.29	11.12	0.36	0.00	36.50	nd	nd	26.94	nd	6.43	100.15
	TED 1T	2	8.10	1.63	0.83	9.29	0.25	0.00	43.49	nd	nd	32.50	nd	5.08	101.19
Perfil Horizontal	TED 9T		12.76	2.24	0.64	7.81	0.33	0.00	39.33	nd	0.00	27.65	nd	7.79	98.54
	TED 10T		19.93	5.36	1.78	14.22	0.48	0.02	28.24	nd	0.05	20.90	nd	7.61	98.58
	TED 11T		16.32	3.50	1.02	11.53	0.46	0.00	35.11	nd	0.00	26.12	nd	6.21	100.27
	TED 12T		15.70	5.70	1.80	13.61	0.57	0.21	30.27	nd	0.06	23.50	nd	9.71	101.13
	TED 13T		26.53	7.84	4.08	18.91	0.37	1.57	18.79	nd	0.13	13.44	nd	6.34	97.99

	Amostra	Profundidade (m)	Y	Pb	Ni	Co	Cu	Ga	Sr	Zr	Zn	Nb	Rb	As	Cr	Ba
Perfil Vertical	TED 8T	0.25	132.06	5.95	26.55	37.05	7.78	nd	1309.44	396.76	270.25	123.24	nd	14.37	29.6	971.7
	TED 7T	0.5	183.61	4.77	67.28	52.02	29.44	3.27	1230.39	440.56	428.93	296.32	nd	17.05	76.8	842.6
	TED 6T	0.75	151.49	4.55	90.25	41.19	25.57	2.87	1211.22	345.29	390.66	163.19	nd	14.71	24	764
	TED 5T	1	140.13	4.76	48.72	69.73	14.66	1.45	1186.41	228.61	397.52	118.05	nd	12.58	21.4	767.1
	TED 4T	1.25	143.4	5.78	35.16	50.17	13.57	1.18	1401.22	435.35	316.74	166.53	nd	13.77	37.9	1151.1
	TED 3T	1.5	131.61	4.92	52.73	42.82	13.23	nd	1226.85	329.68	271.42	141.7	nd	14.1	32.1	967.1
	TED 2T	1.75	228.41	11.79	82.4	67.67	41.9	6.01	1823.7	368.46	368.16	271.81	nd	18.24	119.5	1743.6
	TED 1T	2	250.12	13.75	119.94	79.83	50.38	7.64	1849.66	360.5	384.86	488.96	nd	23.31	149.9	1940.2
Perfil Horizontal	TED 9T		140.98	5.68	37.86	33.43	14.57	1.09	1268.19	319.52	261.64	116.84	nd	14.07	27.5	955.3
	TED 10T		251.94	23.3	116	79.29	45.5	7.97	1928.59	400.31	429.47	546.83	nd	27.48	250.3	1914.1
	TED 11T		236.91	13.15	73.95	54.47	30.28	3.31	1454.82	366.88	362.58	211.47	nd	19.73	77.7	830.1
	TED 12T		282.1	34.71	152.04	85.4	48.31	11.23	1935.87	299.77	550.64	554.54	nd	38.81	250.4	1656
	TED 13T		176.18	12.56	165.65	99.66	58.65	20.69	1140.54	465.12	672.44	619.45	nd	24.5	515.8	681.7

APÊNDICE C – COMPARAÇÃO DE CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAS ALTERADAS, EM COMPARAÇÃO À ROCHA SÃ (TED 38) DO FURO DE SONDAGEM.

Amostra	Profundidade (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅
TED01	0.5	3.06	3.24	1.86	1.48	1.57	0.29	0.28	0.72	1.99
TED02	1.5	2.81	2.94	2.17	1.45	1.53	0.40	0.29	0.72	1.89
TED03	2.5	2.73	2.65	1.85	1.43	1.63	0.64	0.34	0.72	2.27
TED04	3.1	2.78	3.15	1.83	1.47	1.57	0.81	0.33	3.67	2.47
TED05	4.5	2.91	3.21	1.66	1.42	1.66	0.90	0.28	4.22	1.97
TED06	5.1	2.34	2.06	1.54	1.44	1.95	0.82	0.46	1.49	3.40
TED07	6.1	2.74	2.34	4.13	1.84	1.29	0.79	0.30	0.56	0.92
TED08	7.0	2.98	2.84	1.99	1.95	1.96	0.85	0.21	2.87	0.46
TED09	8.5	3.14	2.64	2.94	1.49	1.02	0.83	0.35	3.88	1.56
TED10	9.3	2.99	3.15	1.93	1.23	1.18	1.05	0.31	7.62	1.84
TED11	10.2	1.91	0.99	1.09	1.32	2.76	0.43	0.80	0.34	6.47
TED12	11.2	1.75	1.09	1.38	1.70	2.66	0.57	0.73	0.09	5.71
TED13	12.5	2.30	0.92	1.23	1.25	4.14	0.56	0.68	0.47	5.51
TED14	13.3	2.28	1.38	1.77	1.63	2.40	0.57	0.52	0.56	4.13
TED15	14.3	1.82	1.03	0.95	1.29	3.49	0.33	0.79	0.90	6.87
TED16	15.3	2.29	1.40	1.34	1.43	3.81	0.59	0.64	0.60	5.37
TED17	16.1	2.20	1.30	1.54	2.75	2.02	0.77	0.32	0.04	2.33
TED19	17.2	1.97	1.30	2.09	1.62	1.28	0.94	0.62		4.76
TED20	18.2	1.70	1.52	2.05	0.68	0.72	1.00	0.90		0.40

Amostra	Profundidade	Y	Pb	Ni	Co	Cu	Ga	Sr	Zr	Zn	Nb	As	Cr	Ba
TED01	0.5	3.64	4.79	2.53	2.06	2.06	3.44	0.77	1.56	1.16	1.04	2.98	1.33	1.25
TED02	1.5	3.72	4.93	2.22	2.05	2.10	3.11	0.72	1.64	1.17	1.05	2.65	1.27	1.09
TED03	2.5	3.83	5.14	1.84	1.97	2.03	2.83	0.76	1.83	1.24	0.87	2.59	1.16	0.88
TED04	3.1	4.55	4.19	1.63	1.86	1.41	3.00	0.75	1.81	1.41	0.66	1.96	0.96	1.02
TED05	4.5	4.43	4.31	1.35	1.93	1.42	2.94	0.69	1.90	1.37	0.64	1.96	0.74	1.05
TED06	5.1	5.51	5.64	1.95	1.96	1.66	2.39	0.94	1.68	1.30	0.71	2.45	1.30	1.01
TED07	6.1	2.05	2.48	nd	2.11	1.49	2.66	0.26	1.50	1.08	0.59	1.33	0.40	0.52
TED08	7.0	0.97	2.37	0.67	2.25	0.56	3.93	0.28	1.21	1.68	0.26	1.30	0.40	1.01
TED09	8.5	2.21	2.54	0.97	1.85	1.03	2.72	0.45	1.31	1.15	0.45	1.46	0.85	1.02
TED10	9.3	3.17	6.26	1.28	1.67	0.98	3.16	0.56	1.66	1.29	0.44	2.42	0.96	1.32
TED11	10.2	6.58	5.11	1.17	1.50	1.07	0.90	1.02	2.09	1.22	0.69	2.78	0.56	1.01
TED12	11.2	5.93	7.16	1.83	1.94	1.36	1.34	1.04	1.85	1.72	1.02	3.25	1.10	0.98
TED13	12.5	4.90	20.27	2.09	1.61	0.54	1.51	1.38	1.34	1.04	4.81	7.81	1.19	1.04
TED14	13.3	5.32	5.88	2.68	2.12	1.57	2.17	1.14	1.65	1.56	3.12	3.15	2.15	1.08
TED15	14.3	9.03	12.05	2.04	1.68	0.84	1.23	1.58	1.46	1.39	1.86	5.40	1.06	1.30
TED16	15.3	5.80	17.55	2.58	1.96	1.49	1.95	1.34	1.29	1.33	3.59	6.85	1.76	1.31
TED17	16.1	4.01	3.53	1.87	3.40	4.90	1.73	0.52	0.80	1.86	8.08	2.59	1.60	1.20
TED19	17.2	3.88	0.29	2.70	1.86	3.11	1.51	0.95	1.69	1.42	0.50	1.46	1.46	0.56
TED20	18.2	0.98	0.29	1.62	0.64	0.68	1.27	0.59	2.46	0.60	0.21	0.59	0.55	8.17

APÊNDICE D – COMPARAÇÃO DE CONCENTRAÇÕES DAS AMOSTRAS ALTERADAS, EM COMPARAÇÃO À ROCHA SÃ (TED 38) DA TRINCHEIRA.

Amostra	Profundidade (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	P ₂ O ₅
TED 1 T	2	0.60	0.52	0.46	0.83	1.03	1.43	12.58
TED 2 T	1.75	1.04	1.08	0.71	0.99	1.45	1.20	10.42
TED 3 T	1.5	0.57	0.42	0.50	0.86	1.45	1.43	12.67
TED 4 T	1.25	0.56	0.43	0.68	1.37	1.10	1.31	10.91
TED 5 T	1	1.05	1.08	0.71	0.99	1.48	1.21	10.45
TED 6 T	0.75	1.05	0.51	0.45	0.87	1.51	1.29	11.12
TED 7 T	0.5	1.09	1.53	0.72	1.24	1.73	1.09	9.61
TED 8 T	0.25	1.61	1.59	0.90	1.27	1.70	0.91	7.86

Amostra	Profundidade (m)	Y	Pb	Ni	Co	Cu	Ga	Sr	Zr	Zn	Nb	As	Cr	Ba
TED 1 T	2.00	2.68	0.90	0.44	0.72	0.19	1.00	1.07	1.87	1.68	0.16	1.59	0.10	0.89
TED 2 T	1.75	3.72	0.72	1.11	1.01	0.71	0.55	1.01	2.07	2.67	0.37	1.89	0.25	0.78
TED 3 T	1.50	3.07	0.69	1.49	0.80	0.61	0.48	0.99	1.63	2.43	0.21	1.63	0.08	0.70
TED 4 T	1.25	2.84	0.72	0.80	1.35	0.35	0.24	0.97	1.08	2.47	0.15	1.40	0.07	0.71
TED 5 T	1.00	2.91	0.87	0.58	0.97	0.33	0.20	1.15	2.05	1.97	0.21	1.53	0.13	1.06
TED 6 T	0.75	2.67	0.74	0.87	0.83	0.32	1.00	1.00	1.55	1.69	0.18	1.56	0.11	0.89
TED 7 T	0.50	4.63	1.78	1.36	1.31	1.01	1.01	1.49	1.73	2.29	0.34	2.02	0.40	1.60
TED 8 T	0.25	5.07	2.08	1.98	1.55	1.21	1.29	1.51	1.70	2.39	0.62	2.59	0.50	1.79

APÊNDICE E – RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE ANÁLISE QUÍMICA DAS APATITAS DA AMOSTRA TED 01T EM MICROSSONDA.

Apatita Analisada	SiO₂	FeO	MnO	MgO	SrO	CaO	Na₂O	P₂O₅	F	Cl	Total Corrigido	O=F,Cl	Total Corrigido
Primária Centro	0,00	0,00	0,01	0,00	0,53	54,71	0,15	42,36	2,78	0,03	100,56	1,18	99,38
	0,00	0,05	0,00	0,00	0,53	55,04	0,15	42,37	3,17	0,03	101,34	1,34	100,00
	0,00	0,01	0,02	0,00	0,57	54,86	0,12	43,05	3,25	0,03	101,91	1,37	100,54
	0,00	0,09	0,00	0,01	0,47	55,50	0,11	42,19	2,94	0,02	101,33	1,24	100,09
	0,00	0,05	0,00	0,01	0,53	54,46	0,17	42,20	2,78	0,04	100,22	1,18	99,04
	0,00	0,05	0,04	0,01	0,55	56,65	0,17	42,35	2,84	0,04	102,71	1,21	101,50
	0,00	0,05	0,04	0,02	0,54	54,31	0,18	42,40	2,54	0,02	100,09	1,07	99,02
	0,00	0,08	0,02	0,04	0,49	56,49	0,13	42,37	2,98	0,04	102,63	1,26	101,37
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	55,10	0,16	42,43	2,13	0,03	100,41	0,90	99,51
	0,00	0,02	0,08	0,00	0,55	54,64	0,17	42,52	3,13	0,03	101,14	1,32	99,82
Primária Intermediária	0,00	0,00	0,01	0,00	0,58	55,54	0,14	42,22	2,64	0,03	101,15	1,12	100,03
	0,00	0,02	0,02	0,00	0,51	54,53	0,12	42,35	3,21	0,04	100,79	1,36	99,43
	0,00	0,02	0,01	0,01	0,55	55,94	0,11	42,51	3,33	0,02	102,50	1,41	101,09
	0,00	0,00	0,01	0,00	0,59	54,78	0,10	42,72	2,84	0,03	101,06	1,20	99,86
	0,00	0,07	0,00	0,03	0,54	55,24	0,13	42,24	3,73	0,05	102,02	1,58	100,44
	0,00	0,04	0,05	0,00	0,53	55,36	0,20	42,06	3,54	0,03	101,81	1,50	100,31
	0,00	0,08	0,08	0,04	0,54	55,17	0,17	42,31	3,38	0,02	101,79	1,43	100,36
	0,00	0,02	0,00	0,00	0,53	55,55	0,11	42,35	3,06	0,03	101,63	1,29	100,34
	0,00	0,08	0,00	0,03	0,55	54,85	0,18	42,60	3,52	0,02	101,81	1,48	100,33
	0,00	0,07	0,00	0,02	0,58	54,51	0,16	42,39	1,91	0,03	99,65	0,81	98,84

Apatita Analisada	SiO₂	FeO	MnO	MgO	SrO	CaO	Na₂O	P₂O₅	F	Cl	Total Corrigido	O=F,Cl	Total Corrigido
Primária Borda	0,00	0,04	0,00	0,00	0,54	54,80	0,14	42,64	2,86	0,02	101,03	1,21	99,82
	0,00	0,02	0,01	0,01	0,54	55,38	0,14	42,17	3,27	0,03	101,57	1,38	100,19
	0,00	0,01	0,01	0,00	0,55	54,63	0,17	42,67	2,48	0,02	100,54	1,05	99,49
	0,00	0,27	0,03	0,04	0,16	57,76	0,10	37,34	4,72	0,01	100,42	1,99	98,43
	0,00	1,66	0,05	0,02	0,37	53,49	0,07	40,40	3,19	0,04	99,30	1,35	97,95
	0,00	0,03	0,00	0,03	0,50	56,84	0,12	42,27	3,00	0,02	102,80	1,27	101,53
	0,00	0,00	0,03	0,01	0,58	54,80	0,13	42,12	2,62	0,02	100,32	1,11	99,21
	0,00	0,05	0,02	0,01	0,51	54,89	0,12	42,10	2,58	0,02	100,29	1,09	99,20
Epitaxial	0,00	0,06	0,02	0,01	0,51	54,95	0,15	42,53	3,81	0,02	102,07	1,61	100,46
	0,00	0,32	0,01	0,03	0,15	56,90	0,10	38,50	5,45	0,00	101,45	2,30	99,15
	0,00	0,15	0,02	0,01	0,16	57,43	0,06	39,03	4,40	0,03	101,28	1,86	99,42
Micrométrica / Fibrosa	0,00	0,26	0,00	0,04	0,16	54,97	0,09	38,84	6,06	0,01	100,43	2,55	97,88
	0,00	0,37	0,02	0,03	0,16	57,50	0,10	38,43	5,00	0,00	101,61	2,11	99,50
	0,00	0,39	0,00	0,03	0,16	56,47	0,05	38,71	5,09	0,02	100,91	2,15	98,76
	0,00	0,61	0,00	0,05	0,17	55,72	0,05	38,35	5,57	0,02	100,53	2,35	98,18
	0,00	0,53	0,00	0,05	0,19	55,82	0,06	38,38	6,09	0,01	101,13	2,57	98,56
	0,00	0,24	0,04	0,03	0,16	57,81	0,08	36,91	5,22	0,01	100,49	2,20	98,29

APÊNDICE F – QUANTIDADE CALCULADA PELO PROGRAMA MINPET 2.02® DOS ELEMENTOS NAS APATITAS DA AMOSTRA TED 01T ANALISADAS UTILIZANDO A MICROSSONDA ELETRÔNICA.

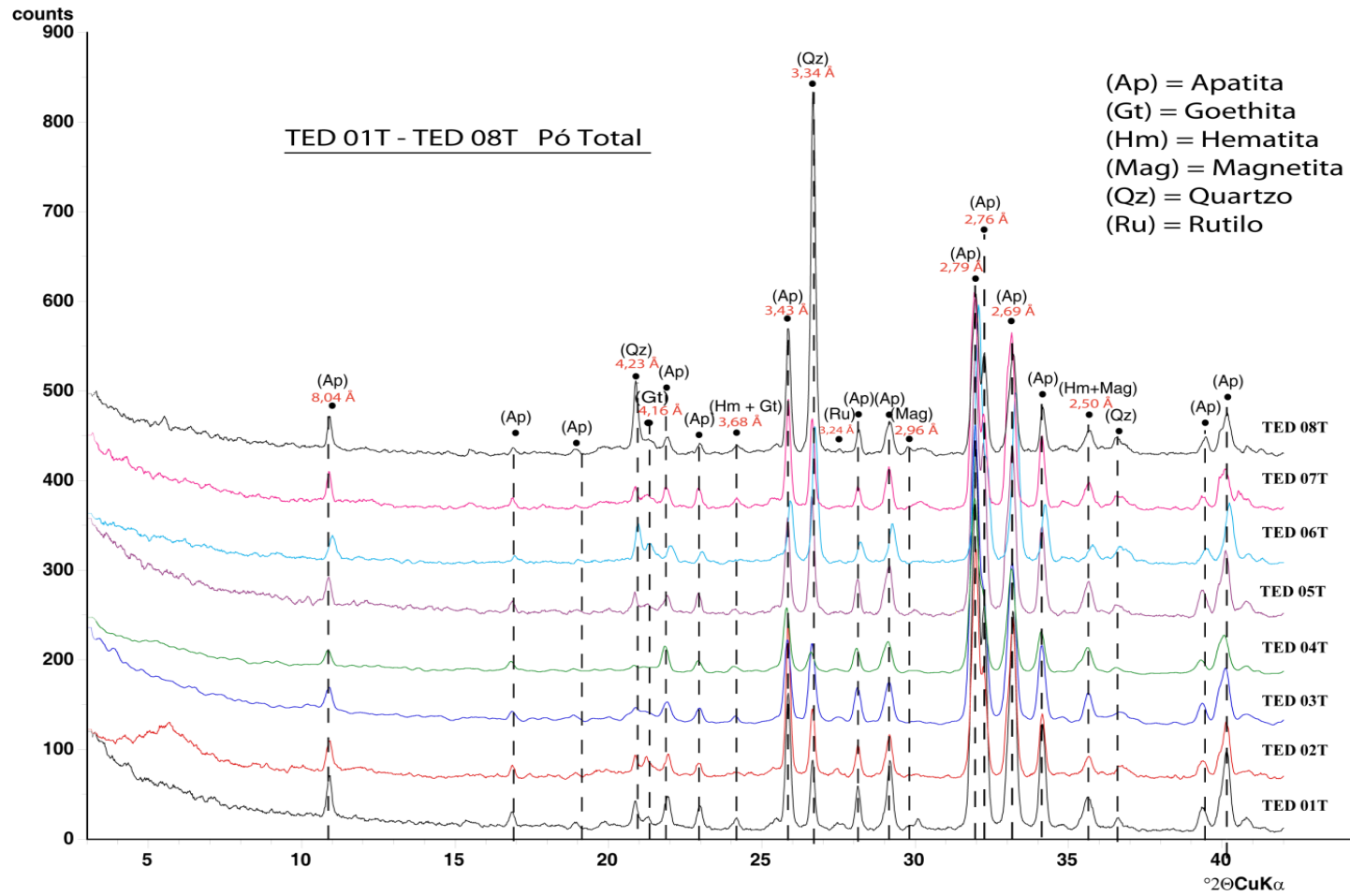
Apatita Analisada	Fe	Mn	Mg	Sr	Ca	Na	P	F	Cl	OH
Primária Centro	0,00	0,00	0,00	0,03	4,73	0,02	2,89	1,42	0,01	0,93
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,78	0,02	2,87	1,34	0,01	1,06
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,72	0,02	2,90	1,45	0,01	1,09
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,74	0,02	2,89	1,61	0,01	0,98
	0,00	0,00	0,00	0,02	4,72	0,02	2,90	1,64	0,01	0,93
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,78	0,02	2,87	1,67	0,01	0,97
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,69	0,02	2,91	1,64	0,01	0,83
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,78	0,02	2,87	1,68	0,01	1,01
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,70	0,03	2,90	1,26	0,01	0,71
	0,01	0,00	0,00	0,02	4,78	0,02	2,87	1,50	0,01	1,03
Primária Intermediária	0,00	0,00	0,00	0,03	4,71	0,02	2,90	1,44	0,01	0,89
	0,01	0,00	0,00	0,03	4,76	0,02	2,88	1,90	0,01	1,07
	0,02	0,00	0,01	0,01	5,25	0,02	2,68	2,54	0,00	1,13
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,73	0,03	2,89	1,42	0,01	0,96
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,78	0,03	2,87	1,81	0,01	1,25
	0,12	0,00	0,00	0,02	4,76	0,01	2,84	1,68	0,01	1,18
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,83	0,03	2,85	1,43	0,01	1,13
	0,01	0,01	0,01	0,03	4,75	0,03	2,88	1,72	0,01	1,02
	0,00	0,00	0,00	0,02	4,85	0,02	2,85	1,51	0,01	1,17
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,70	0,03	2,90	1,30	0,01	0,64
Primária Borda	0,00	0,00	0,00	0,03	4,78	0,02	2,88	1,55	0,01	0,97
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,75	0,02	2,88	1,34	0,01	1,08
	0,00	0,00	0,00	0,02	4,73	0,02	2,89	1,94	0,01	0,83
	0,02	0,00	0,00	0,01	5,12	0,02	2,74	2,89	0,00	1,44

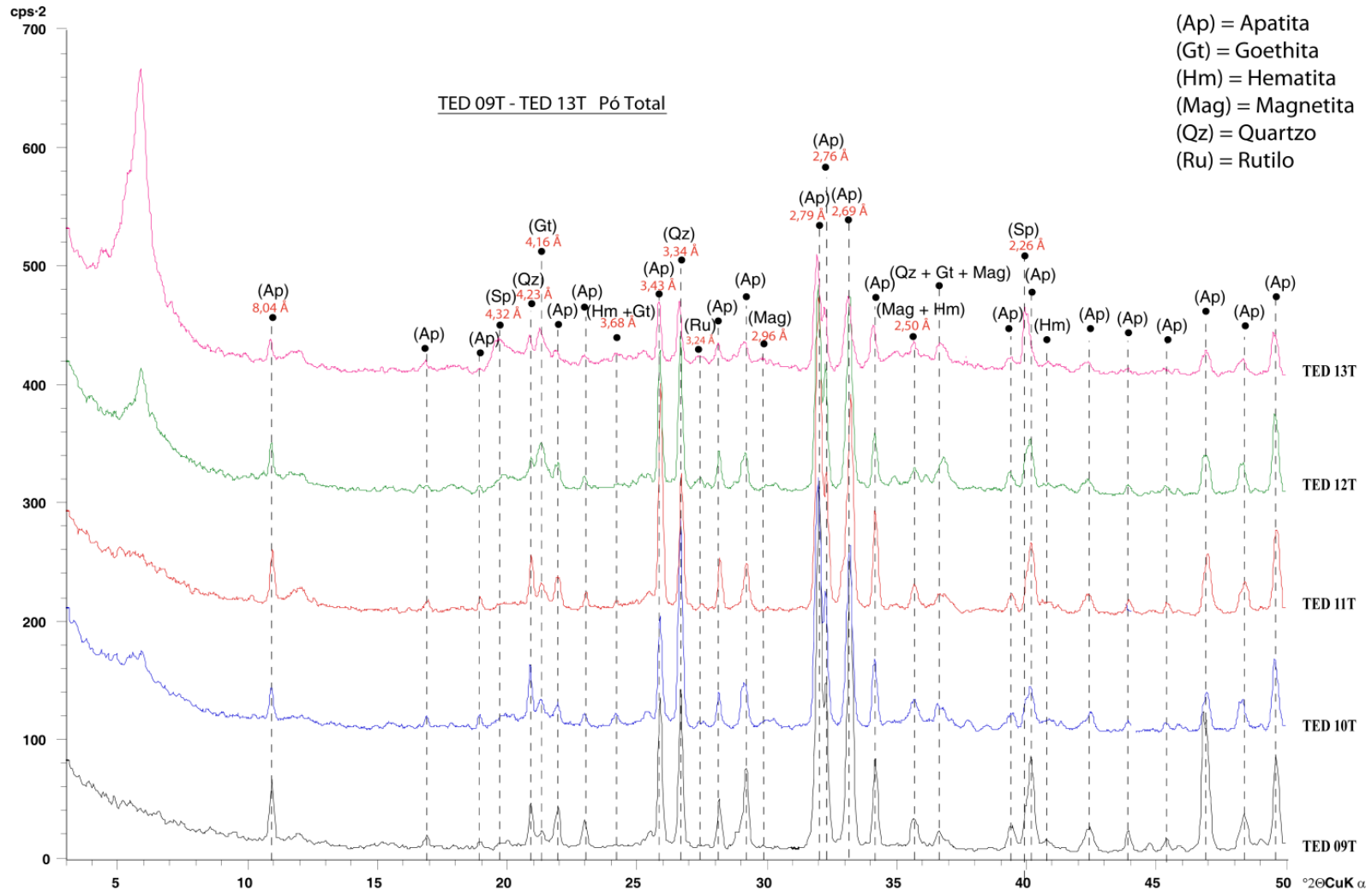
Apatita Analisada	Fe	Mn	Mg	Sr	Ca	Na	P	F	Cl	OH
Primária Borda	0,01	0,00	0,00	0,02	4,82	0,02	2,86	1,50	0,01	1,01
	0,01	0,00	0,00	0,03	4,72	0,03	2,89	1,79	0,01	1,02
	0,01	0,00	0,00	0,01	5,11	0,01	2,75	2,31	0,01	0,87
	0,02	0,00	0,01	0,01	4,99	0,02	2,79	3,25	0,00	0,85
Epitaxial	0,03	0,00	0,00	0,01	5,15	0,02	2,72	2,65	0,00	1,28
	0,03	0,00	0,00	0,01	5,08	0,01	2,75	2,70	0,01	1,70
	0,04	0,00	0,01	0,01	5,06	0,01	2,75	2,98	0,00	1,40
Micrométrica / Fibrosa	0,04	0,00	0,01	0,01	5,06	0,01	2,75	3,26	0,00	1,85
	0,00	0,00	0,00	0,03	4,74	0,02	2,89	1,08	0,01	1,58
	0,02	0,00	0,00	0,01	5,29	0,01	2,67	2,82	0,00	1,59
	0,01	0,00	0,00	0,03	4,71	0,03	2,90	0,97	0,01	1,71
	0,00	0,00	0,00	0,02	4,76	0,02	2,88	1,32	0,01	1,87
	0,00	0,01	0,00	0,03	4,71	0,03	2,90	1,59	0,01	1,57

APÊNDICE G – RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO DE ANÁLISE QUÍMICA DOS CARBONATOS DA AMOSTRA TED 38 EM MICROSSONDA.

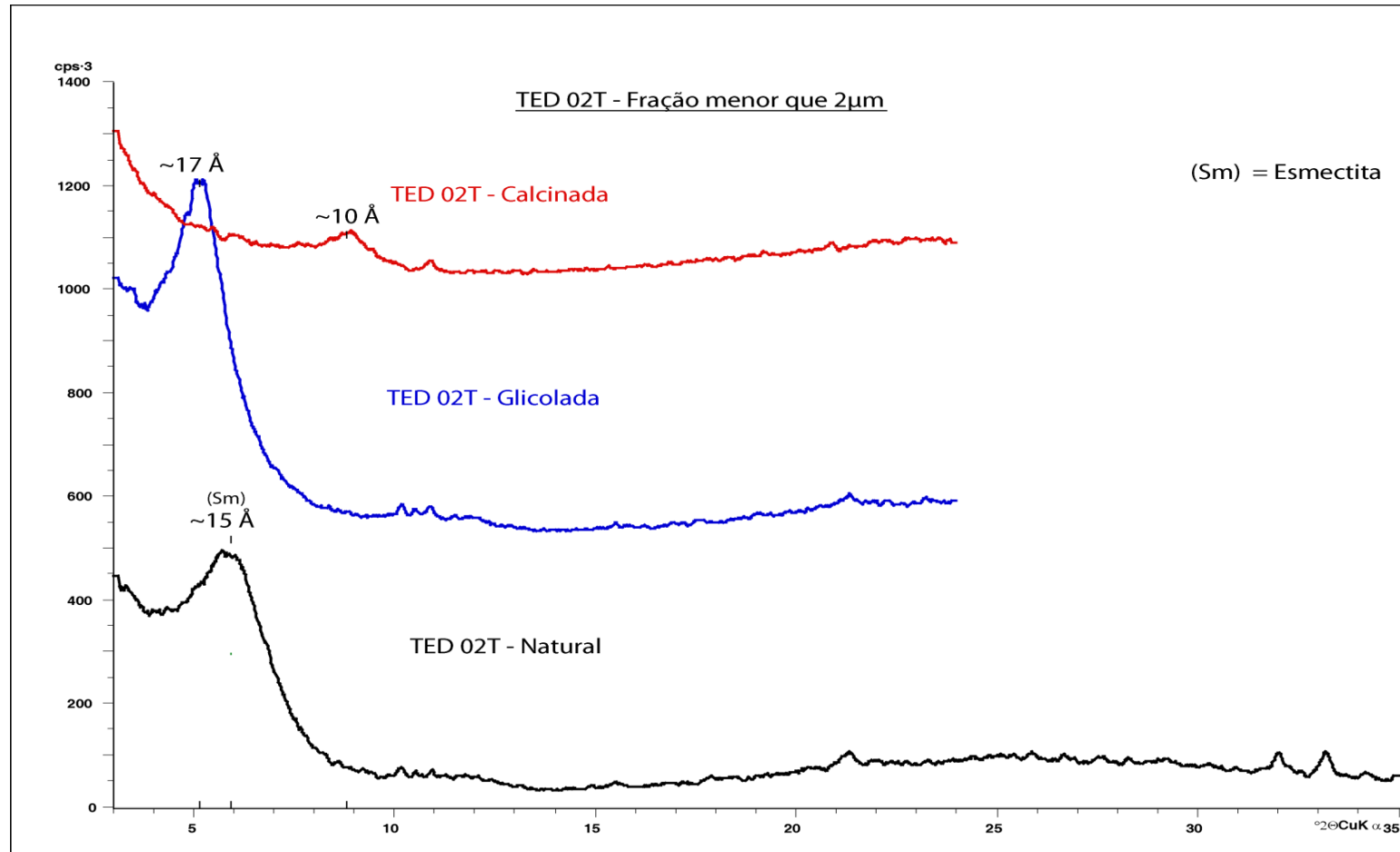
Descrição	MgO	CaO	MnO	FeO	SrO	BaO	CO2	Total
Veios	0.58	53.02	0.35	0.62	0.68	nd	44.74	99.98
	0.54	52.82	0.32	0.44	0.30	0.04	45.53	100.00
	0.58	53.15	0.35	0.44	0.37	0.09	45.02	100.00
	0.12	54.51	0.23	0.22	0.07	nd	44.80	99.91
	0.29	54.18	0.25	0.36	0.06	0.01	44.84	100.00
	0.38	53.84	0.37	0.51	0.01	0.05	44.83	100.00
	0.29	53.58	0.32	0.36	0.04	0.04	45.36	100.00
	0.11	54.20	0.22	0.27	0.07	0.02	45.12	100.00
	0.25	53.14	0.28	0.33	0.03	0.05	45.92	100.00
Matriz	16.88	29.64	0.74	6.26	0.37	0.02	46.09	100.00
	17.11	30.03	0.62	6.19	0.41	0.01	45.63	100.00
	16.71	29.43	0.55	6.45	0.51	0.08	46.27	100.00
	19.11	29.92	0.50	3.25	0.55	0.05	46.63	100.00
	18.52	30.04	0.52	4.14	0.48	0.02	46.29	100.00
	18.25	29.87	0.61	5.04	0.44	0.03	45.77	100.00
	18.02	29.69	0.54	5.14	0.46	nd	46.14	99.97
	19.11	30.16	0.57	3.45	0.41	nd	46.30	100.00
	16.91	30.19	1.14	4.93	0.29	0.03	46.52	100.00

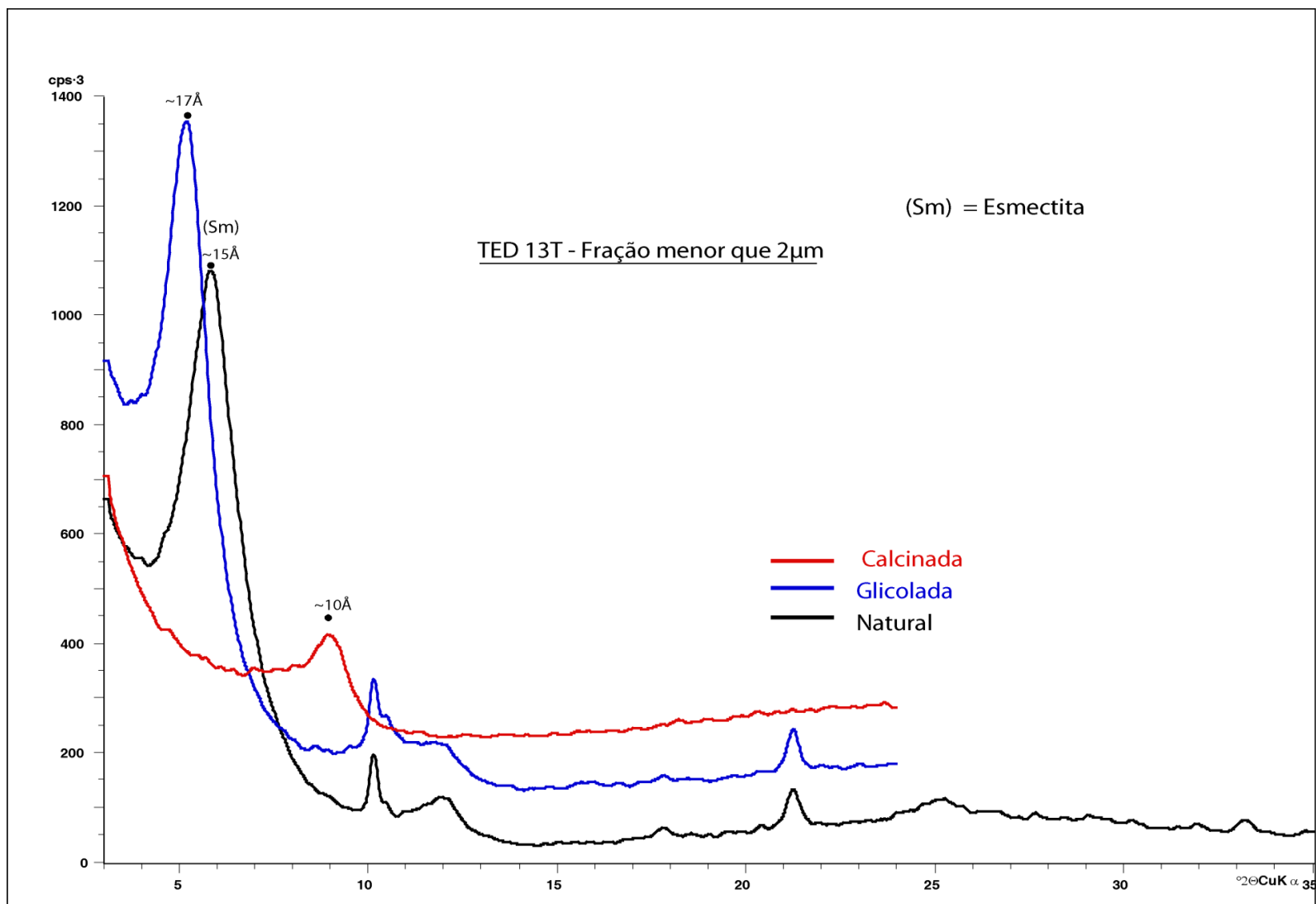
APÊNDICE H – DIFRATOGRAMAS DO PÓ TOTAL DAS AMOSTRAS DA TRINCHEIRA, OBTIDOS PELA TÉCNICA DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.



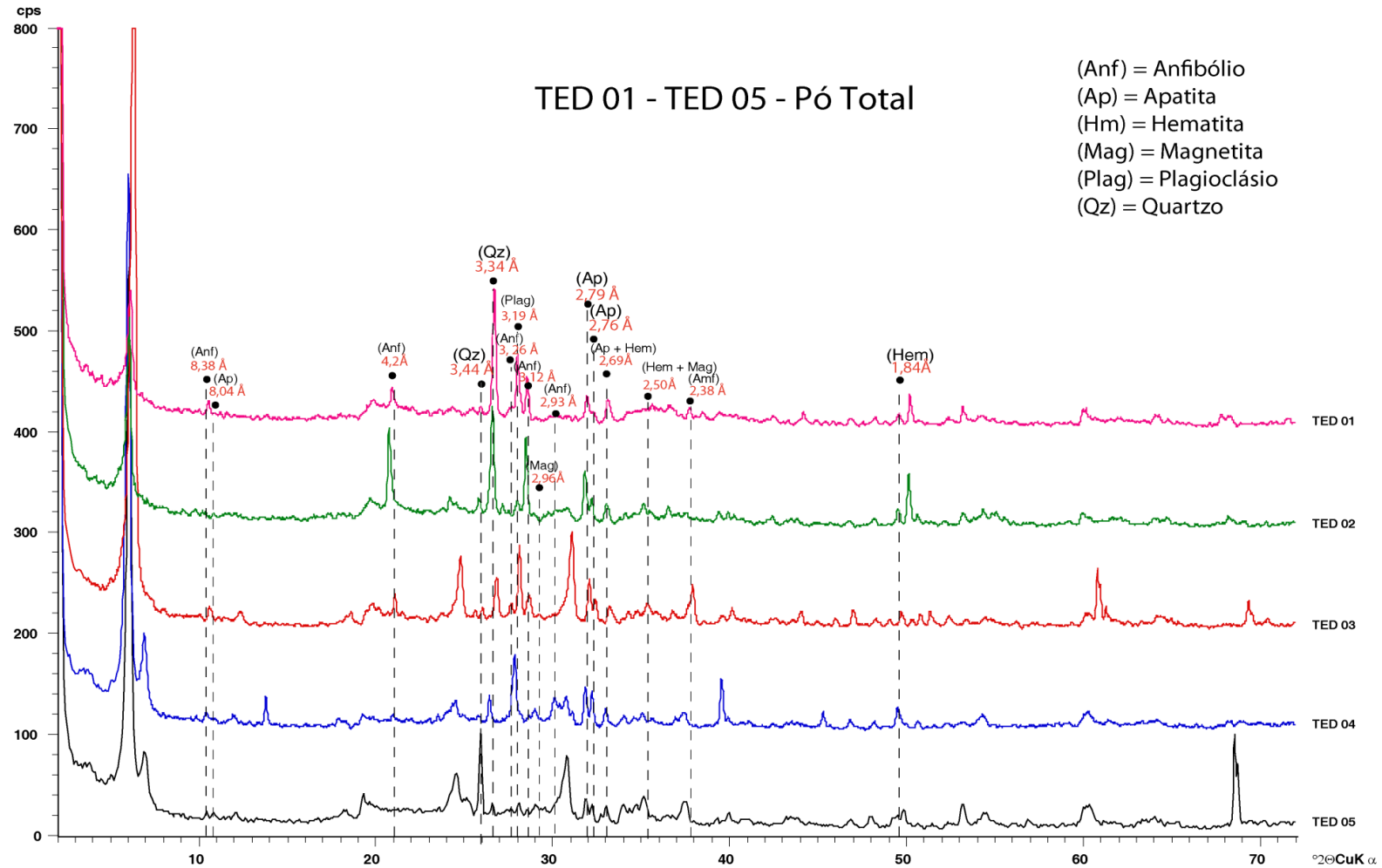


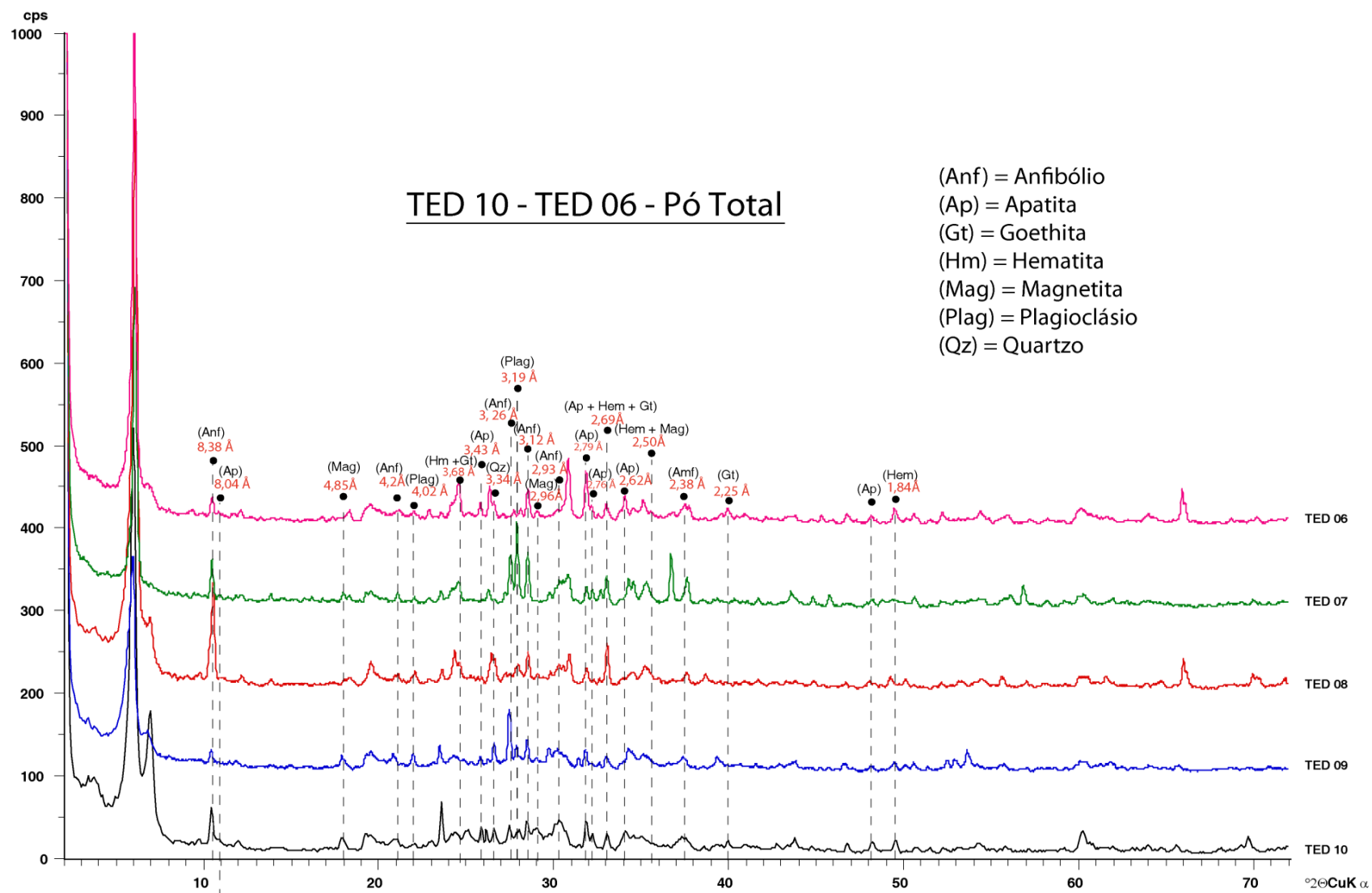
APÊNDICE I – DIFRATOGRAMAS DA FRAÇÃO MENOR QUE 2 μm DAS AMOSTRAS DA TRINCHEIRA, OBTIDOS PELA TÉCNICA DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.

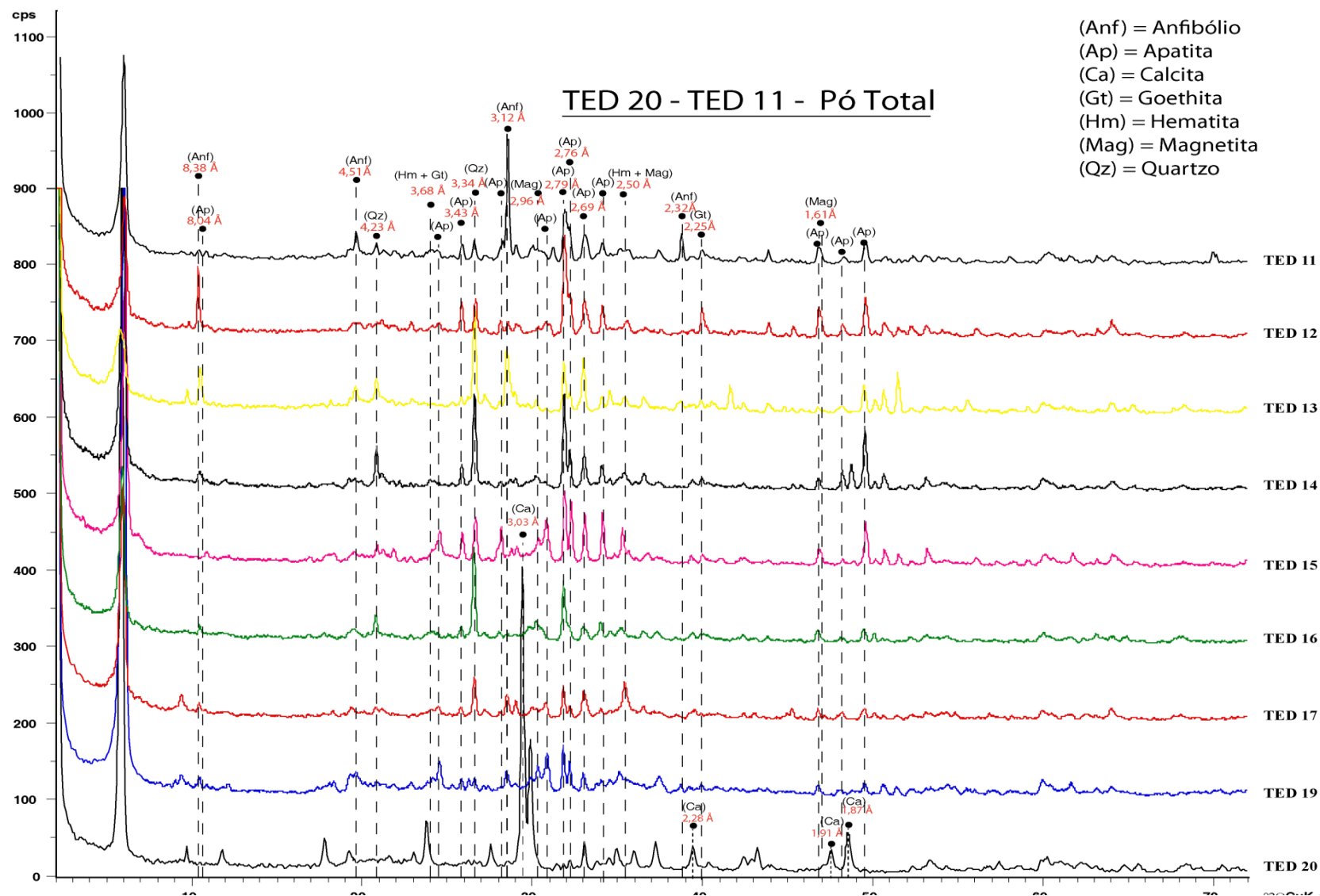




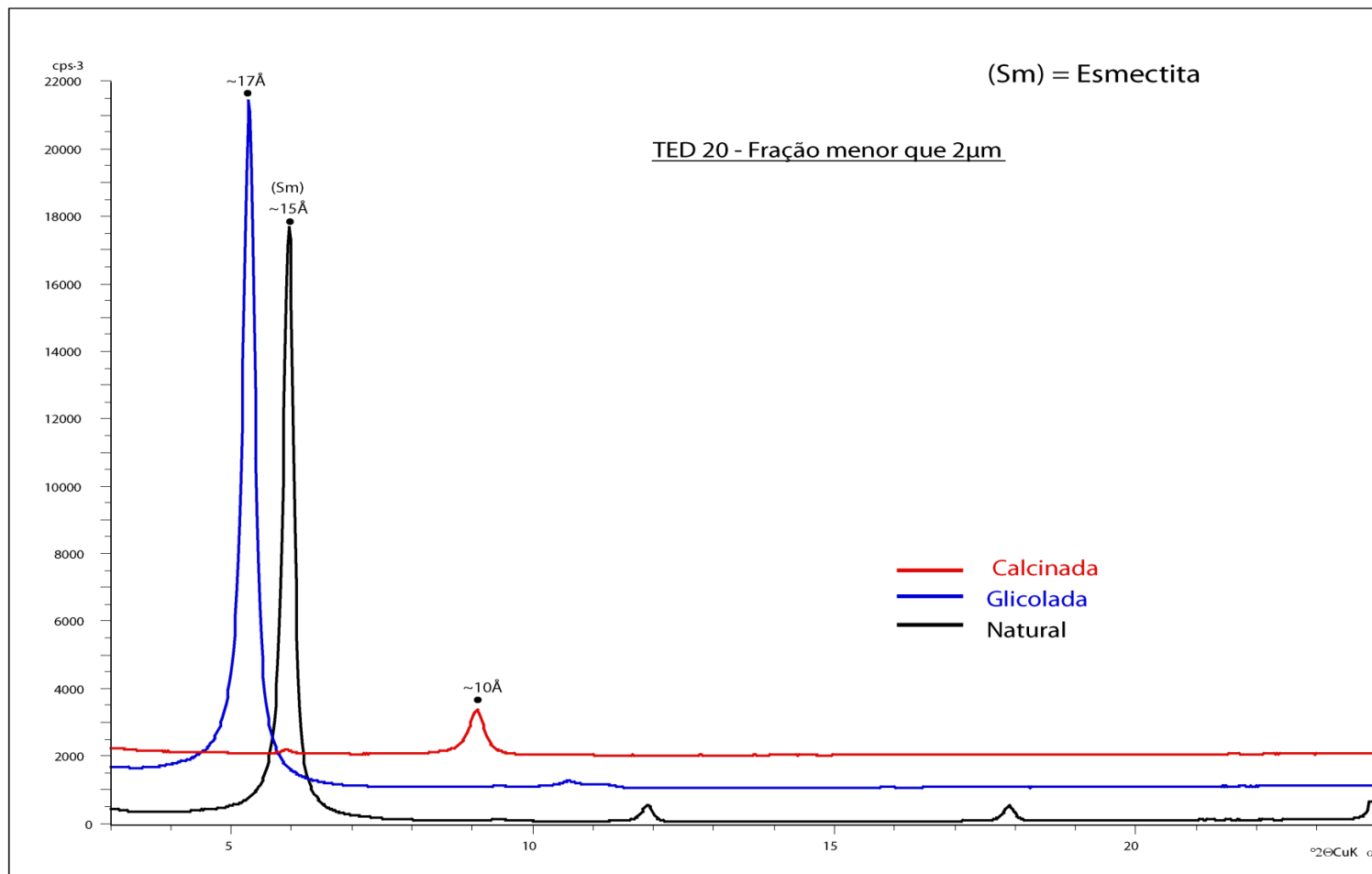
APÊNDICE J – DIFRATOGRAMAS DO PÓ TOTAL DAS AMOSTRAS DO FURO DE SONDAGEM, OBTIDOS PELA TÉCNICA DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.

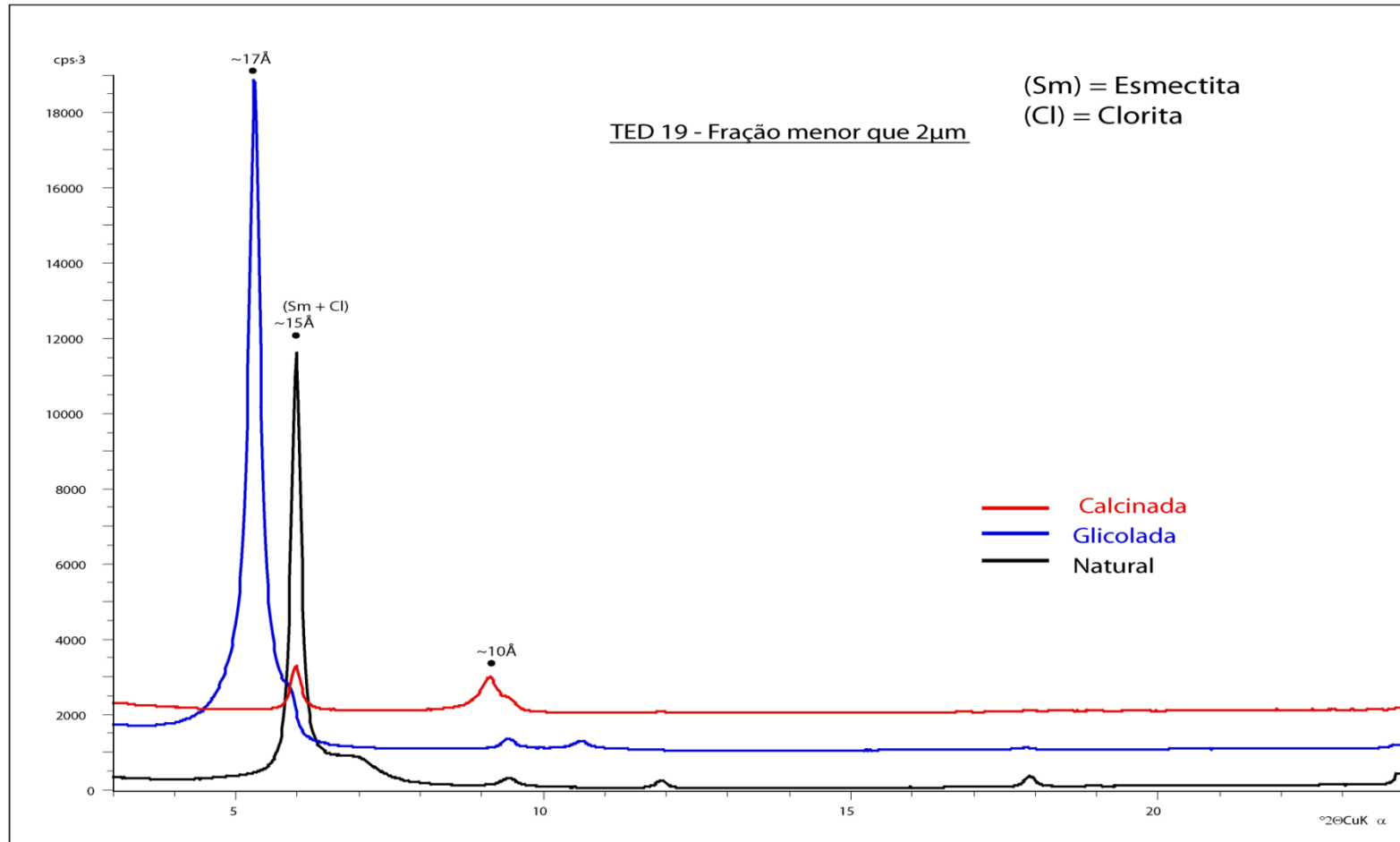


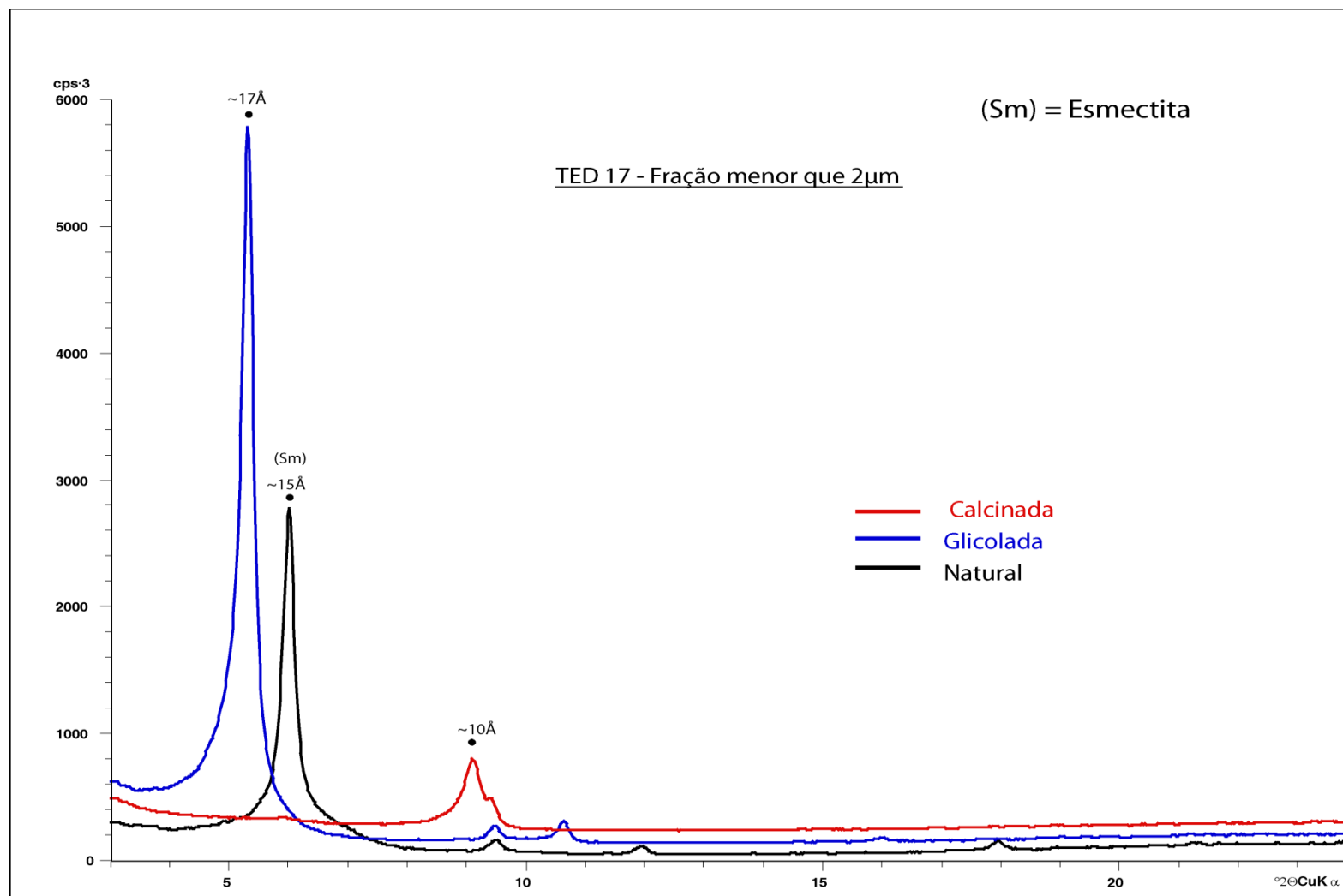


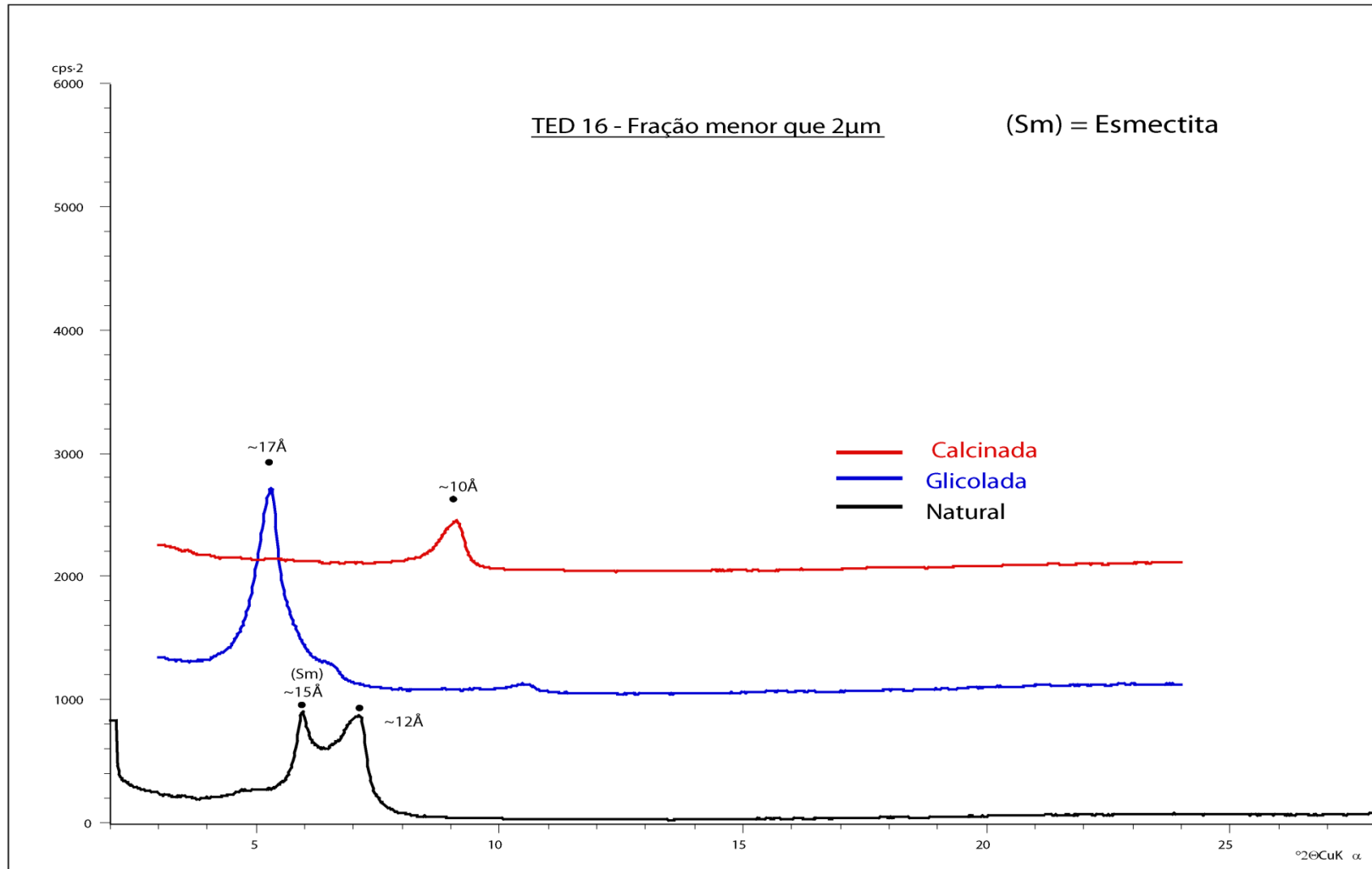


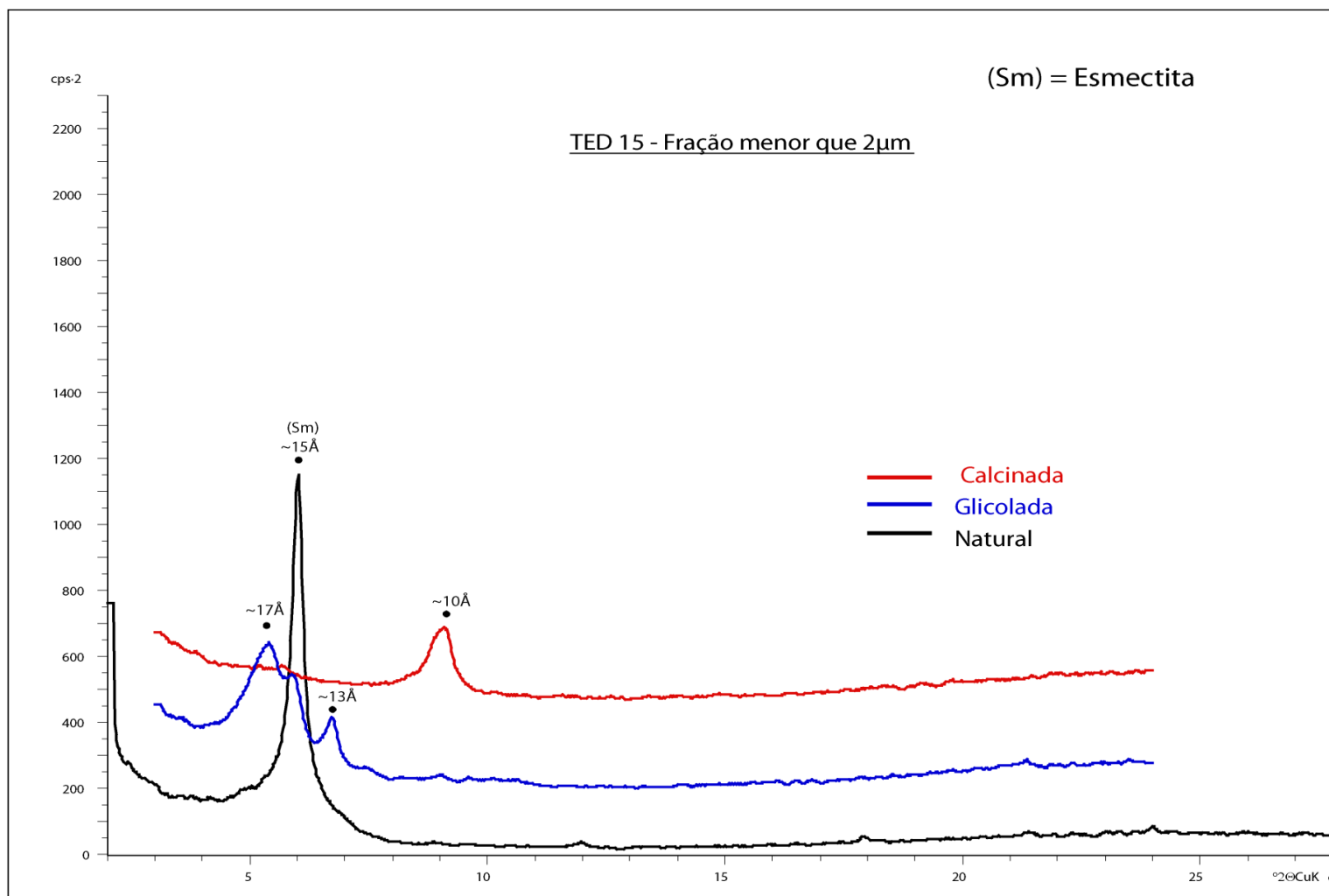
APÊNDICE L – DIFRATOGRAMAS DA FRAÇÃO MENOR QUE 2 μm DAS AMOSTRAS DA TRINCHEIRA, OBTIDOS PELA TÉCNICA DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.

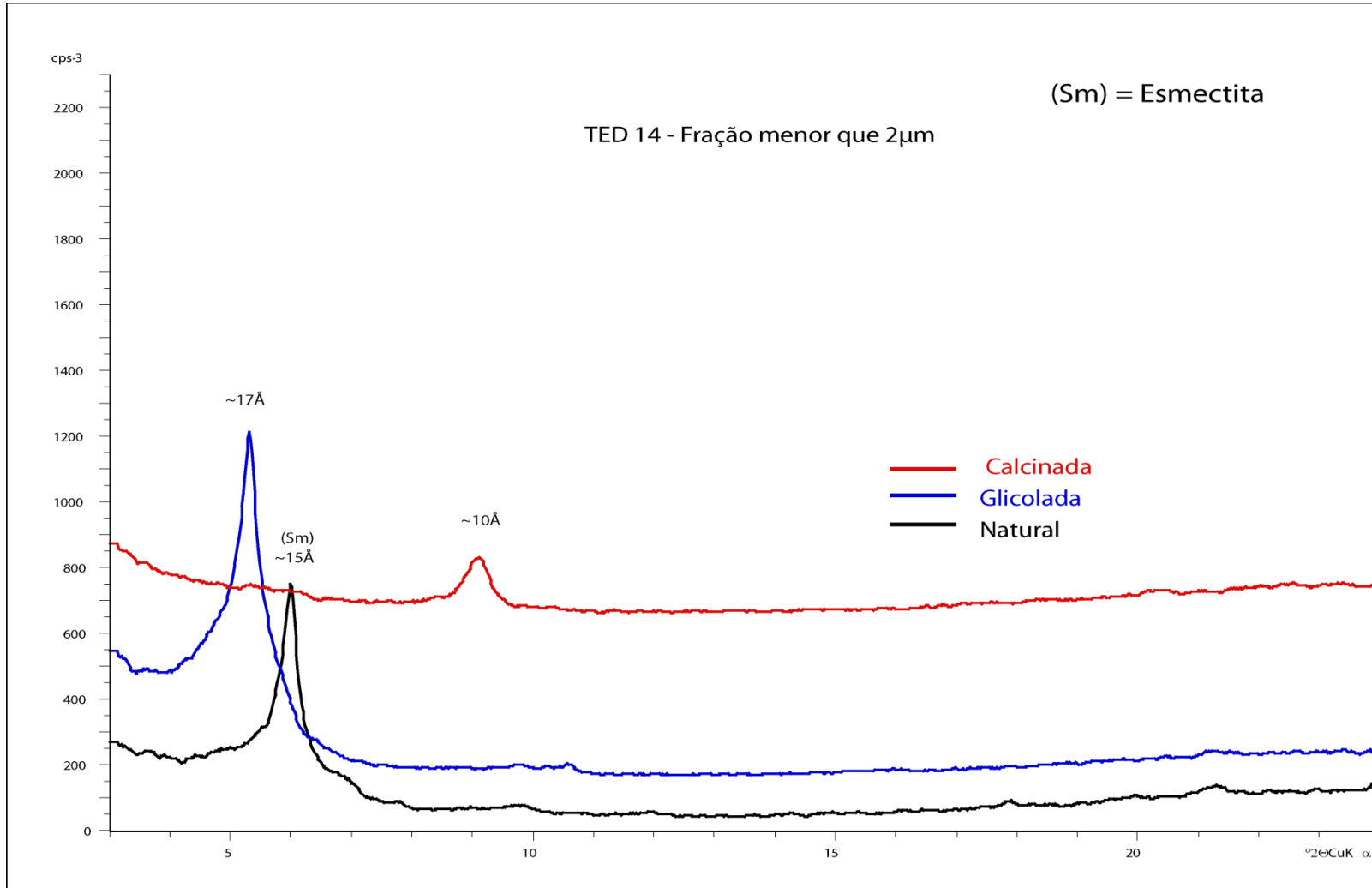


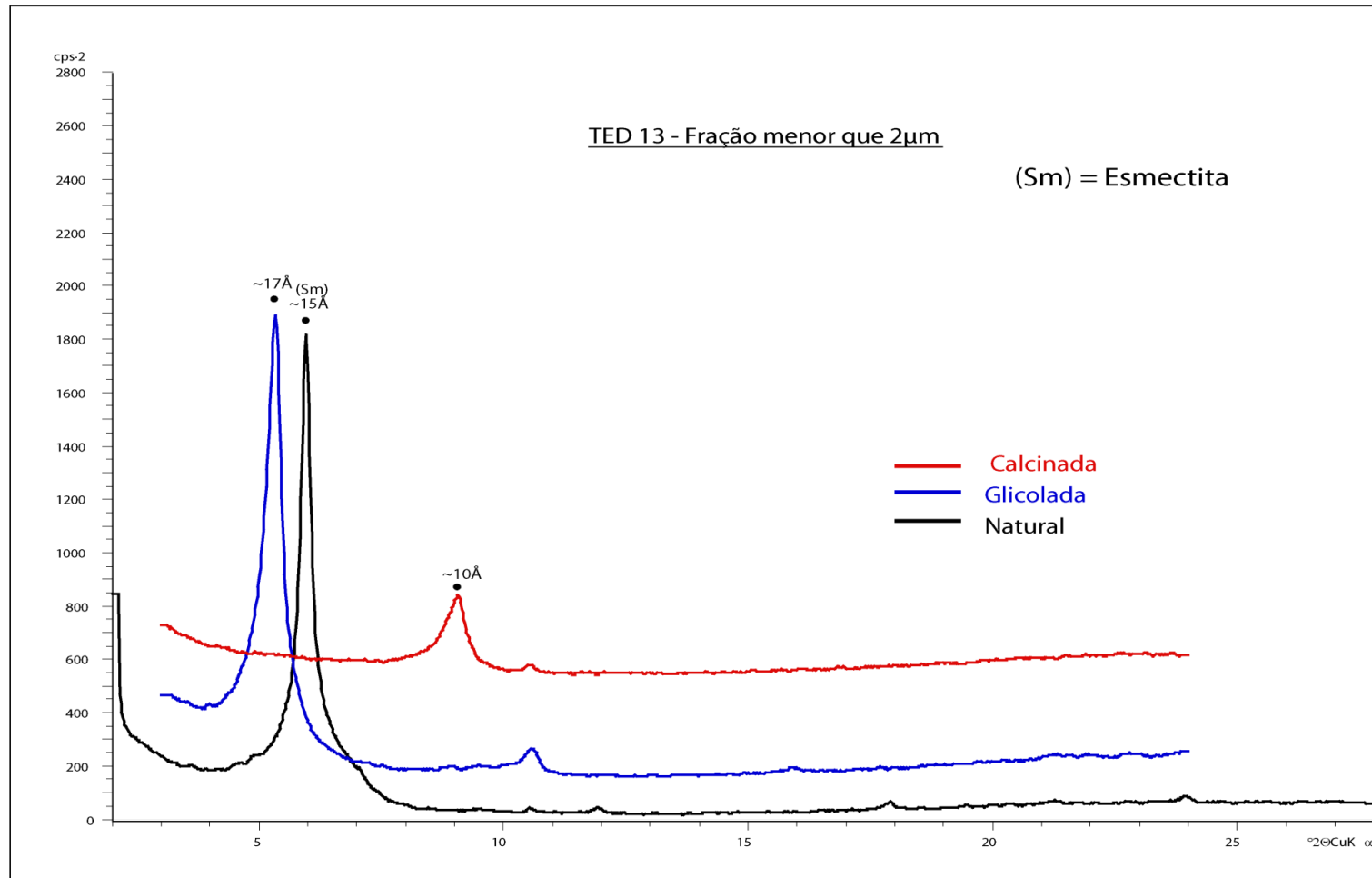


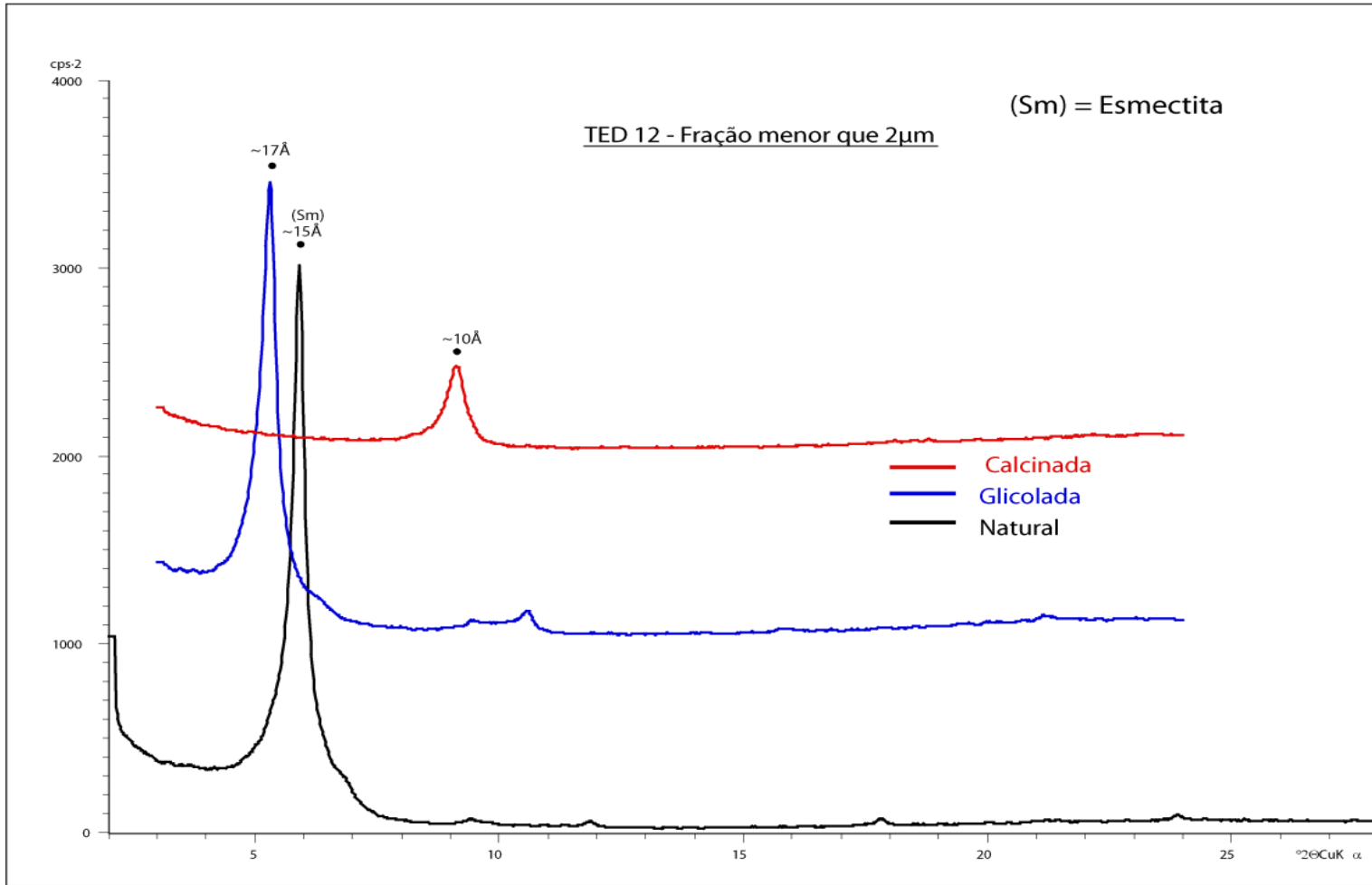


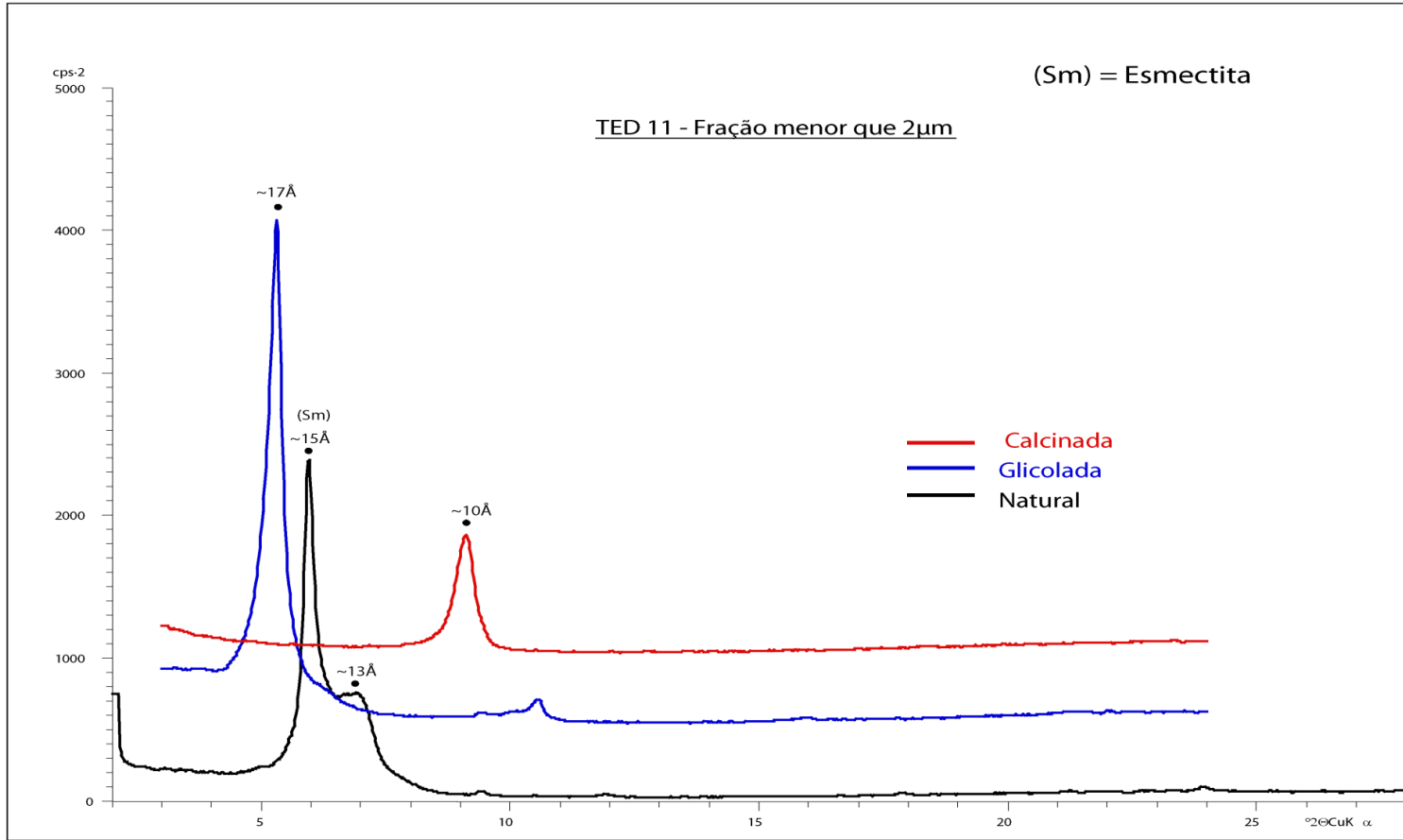


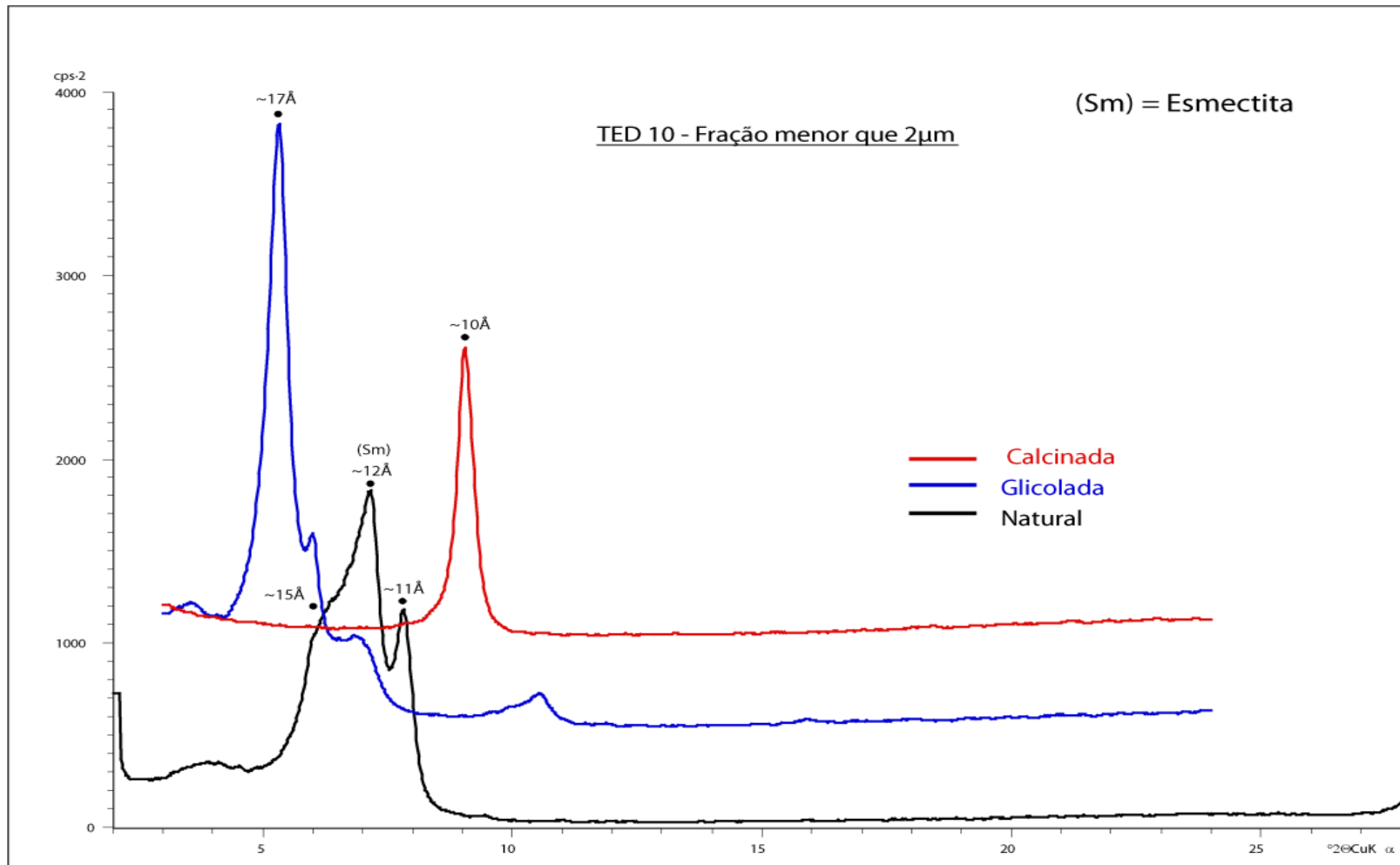


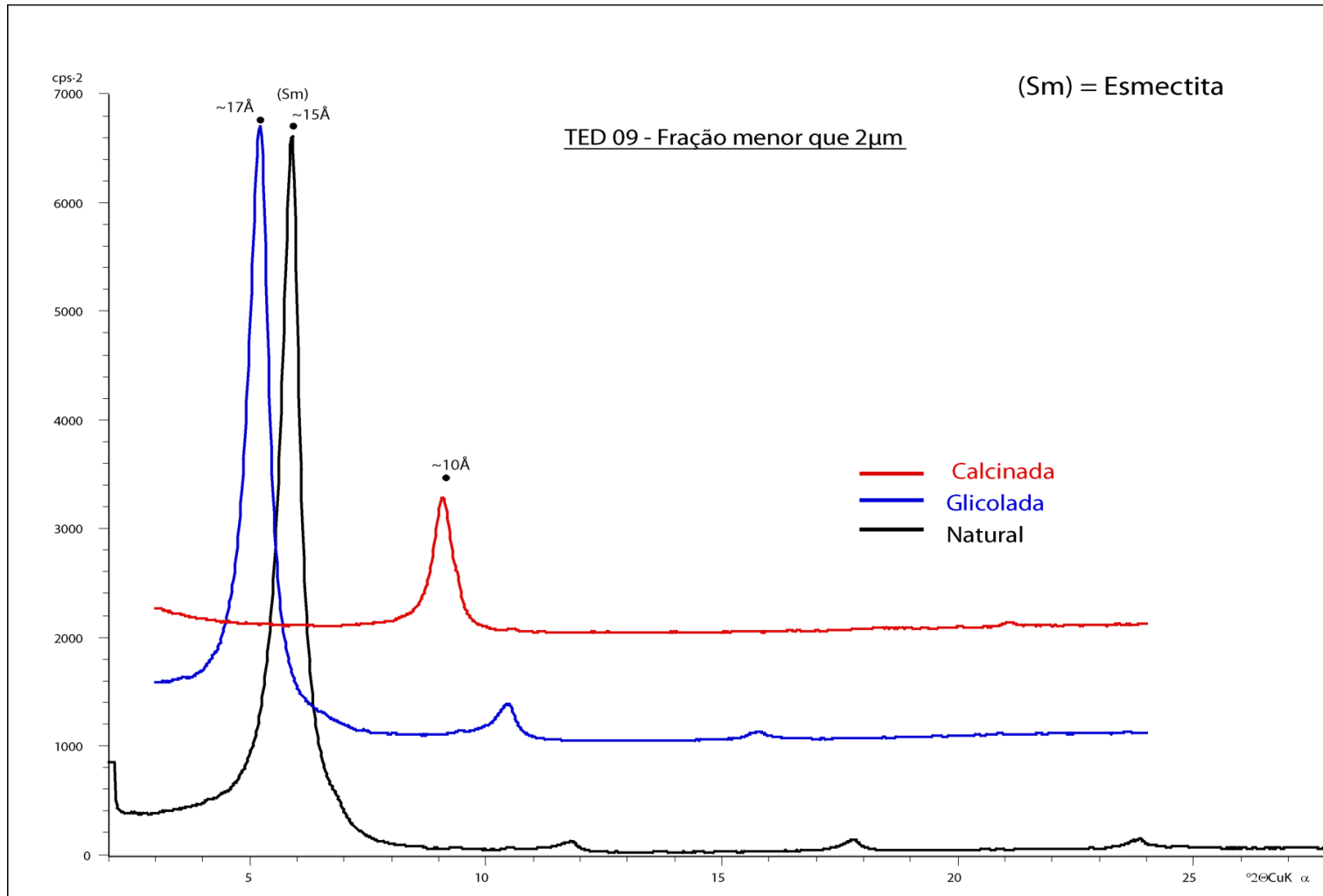


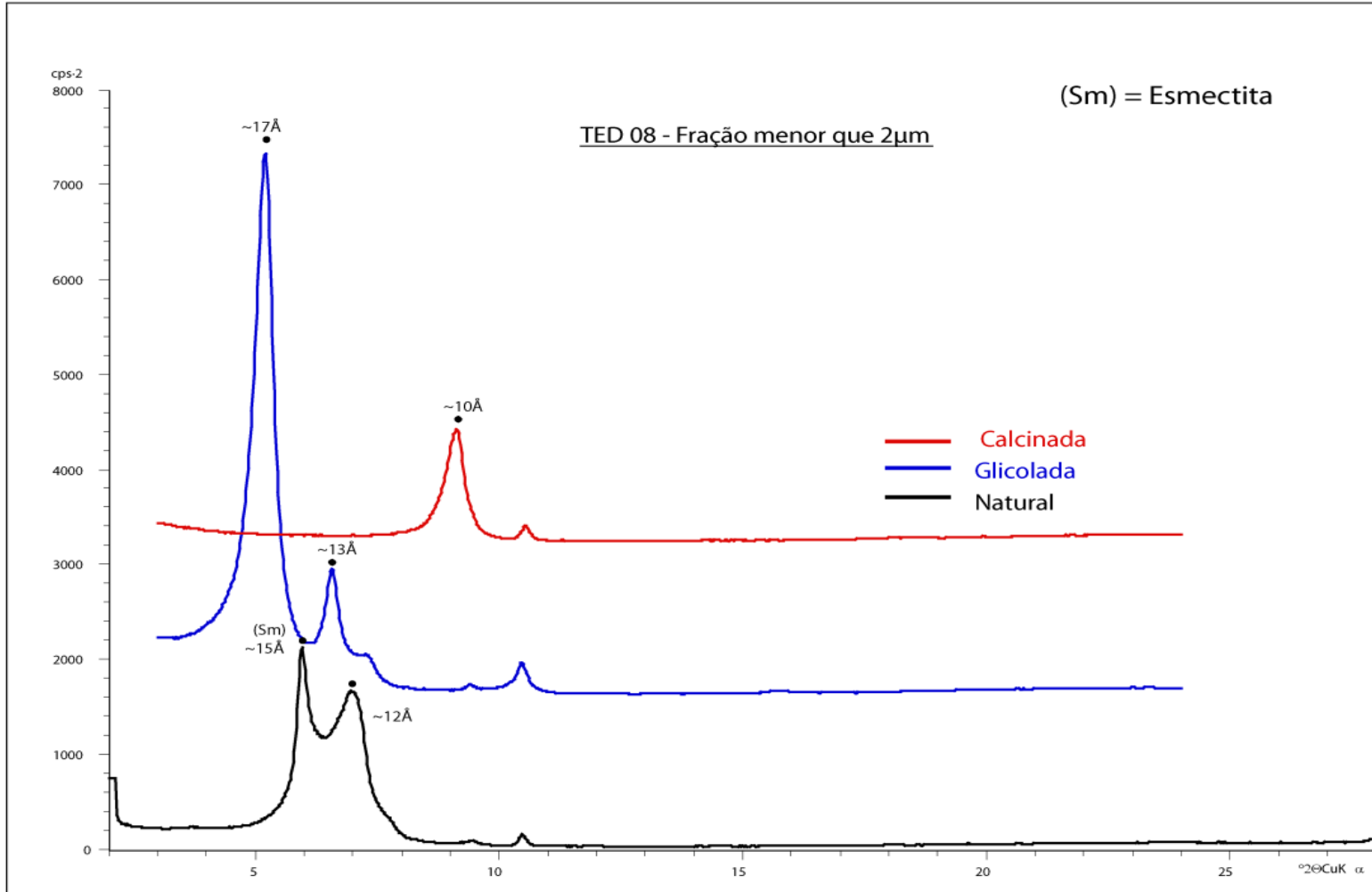


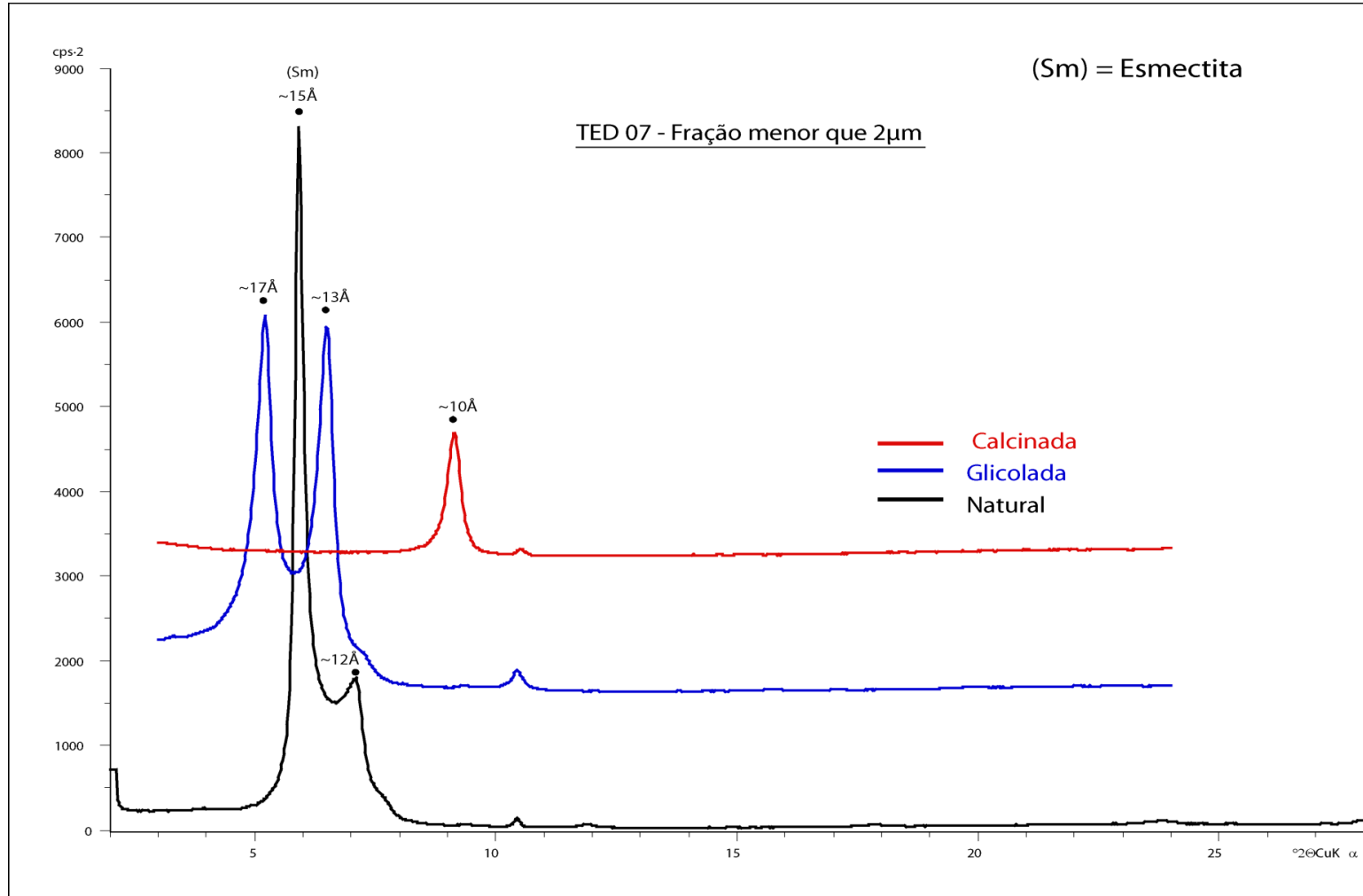


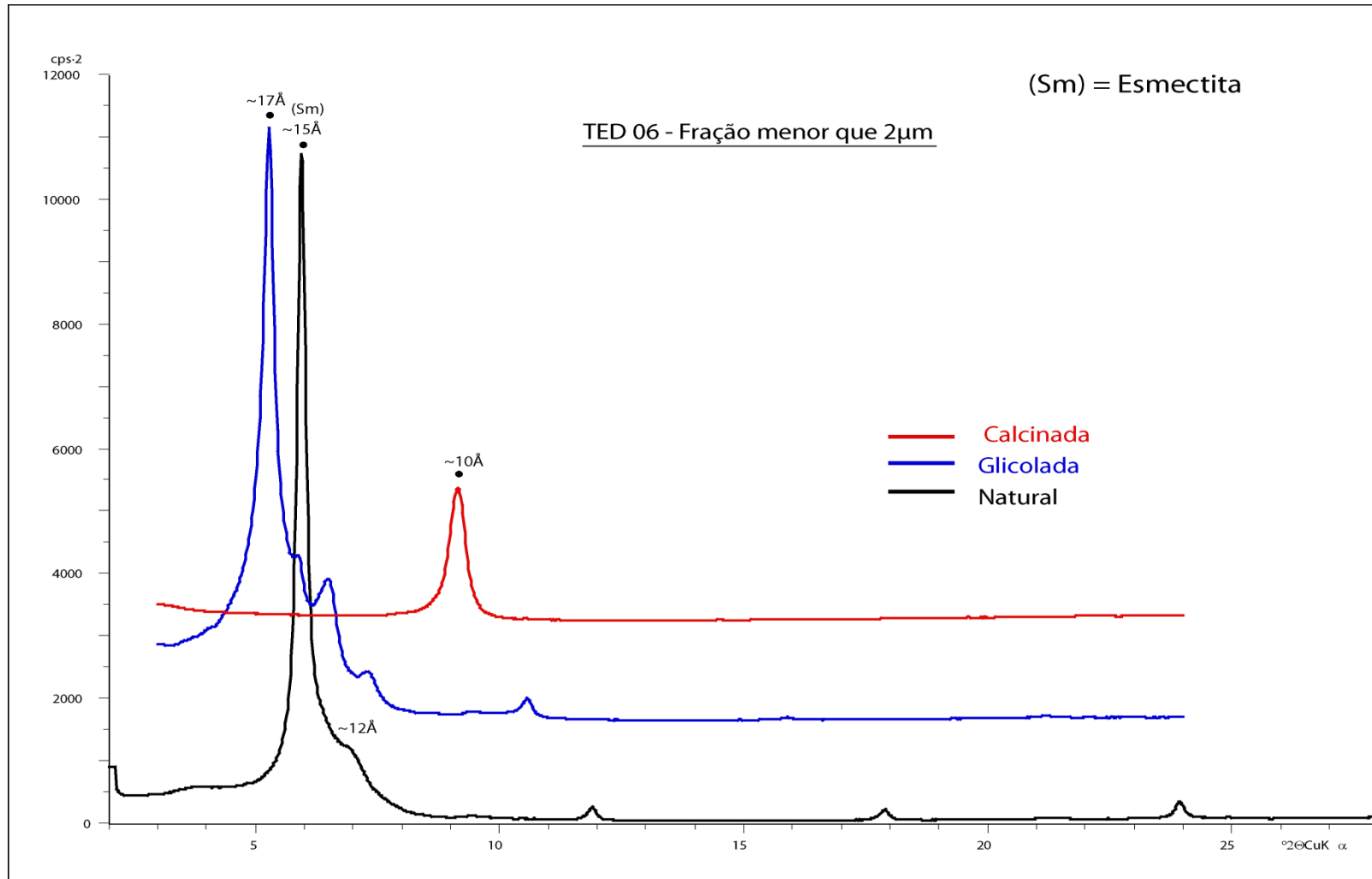


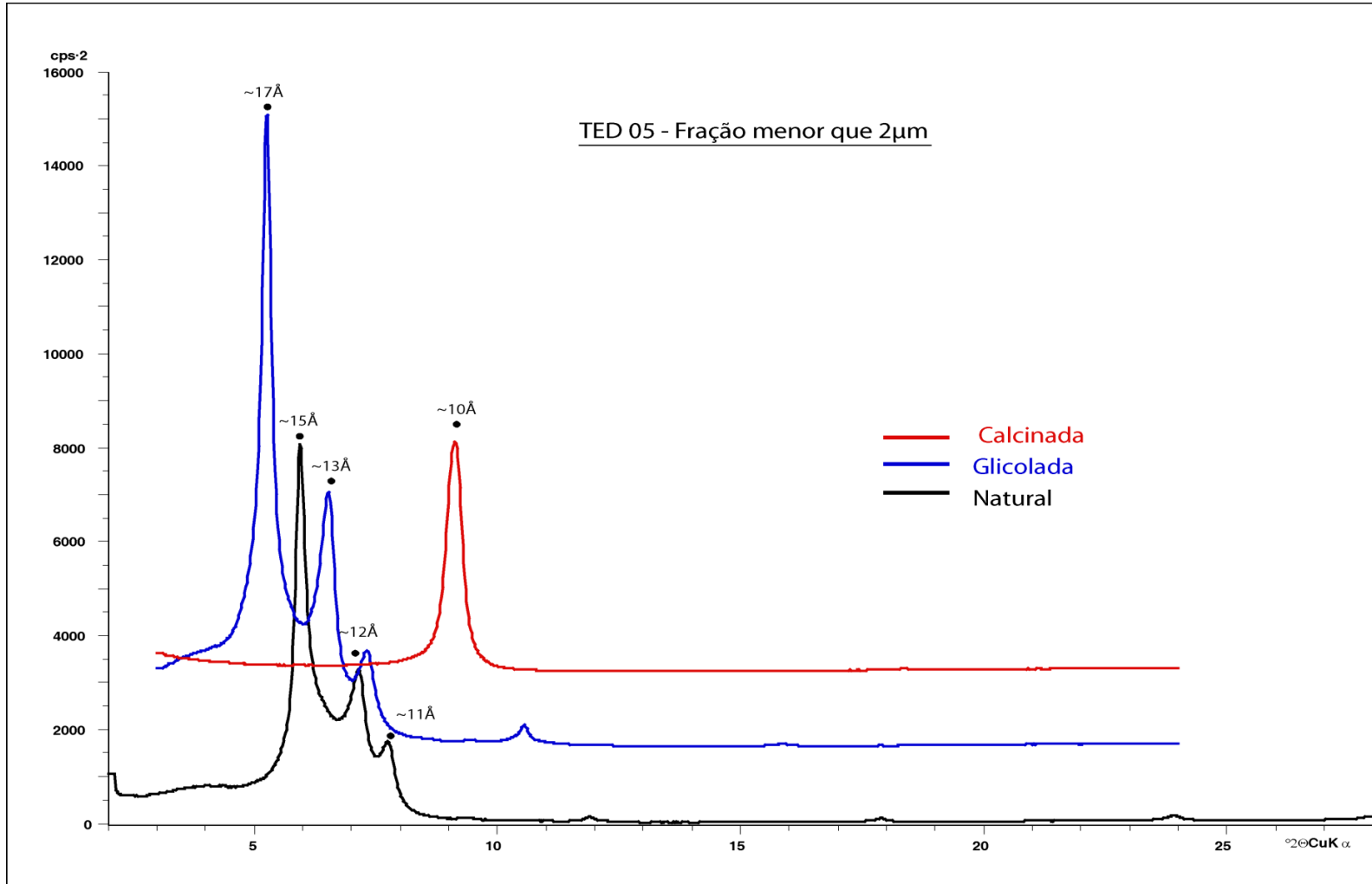


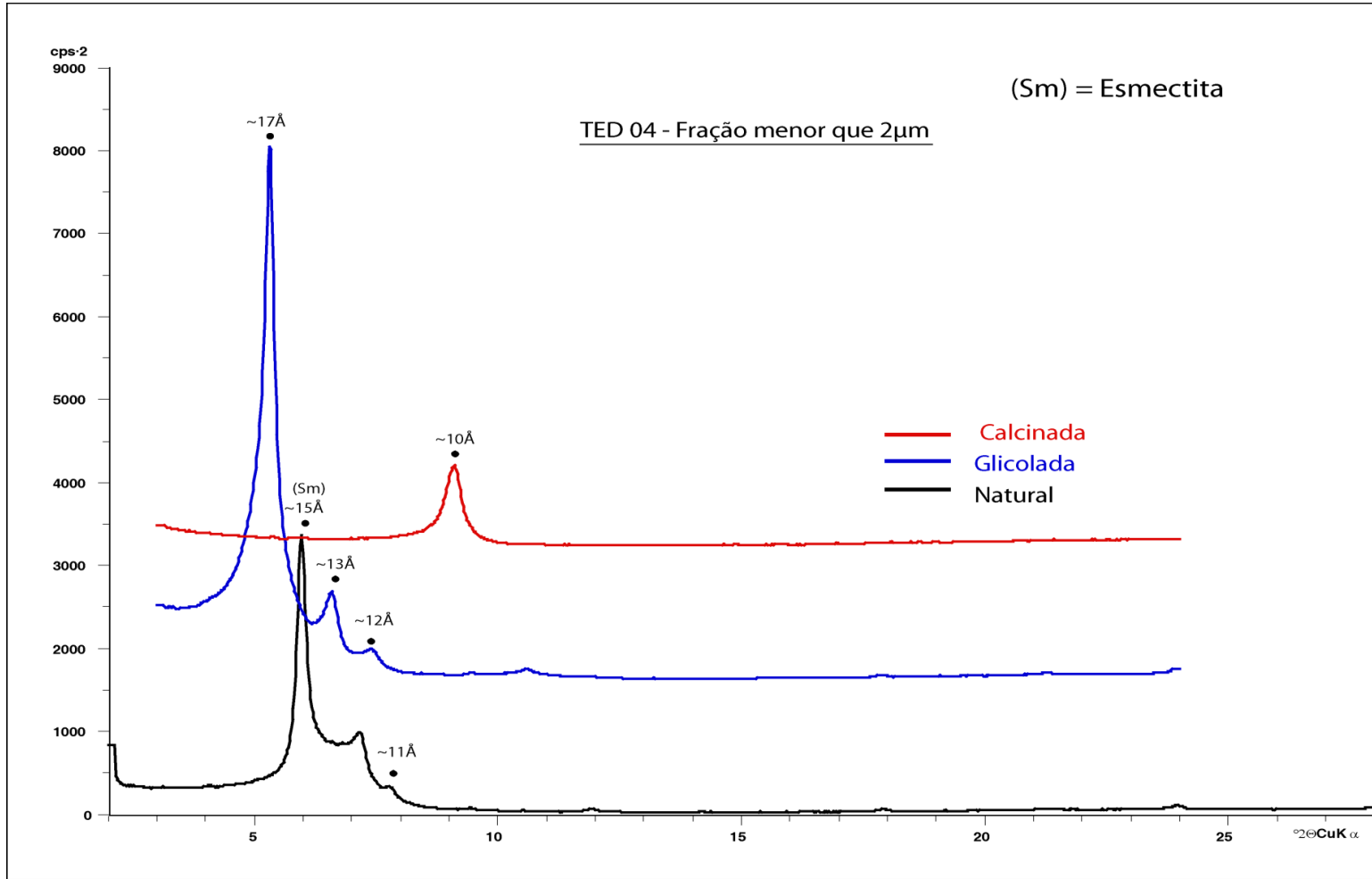


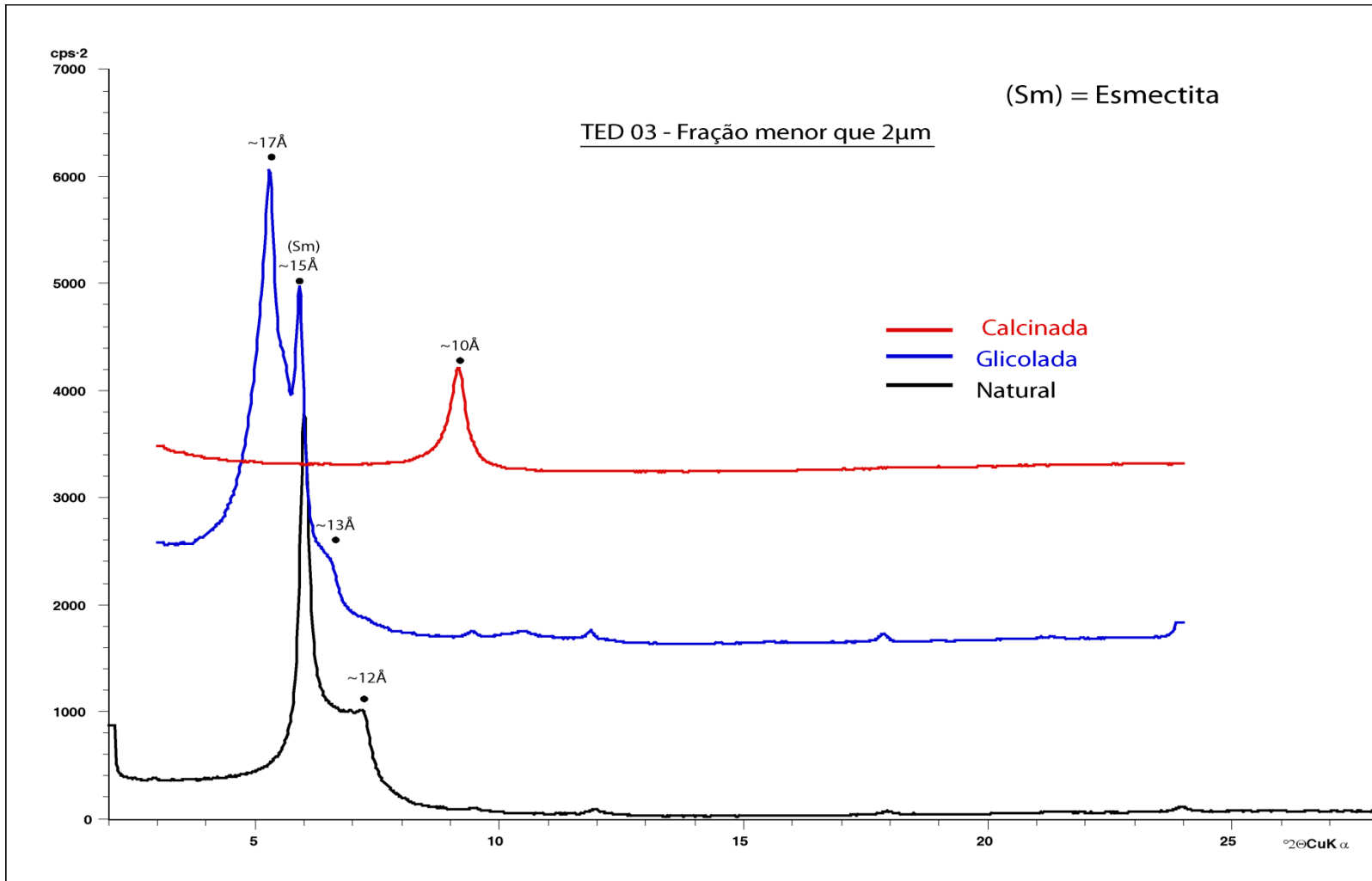


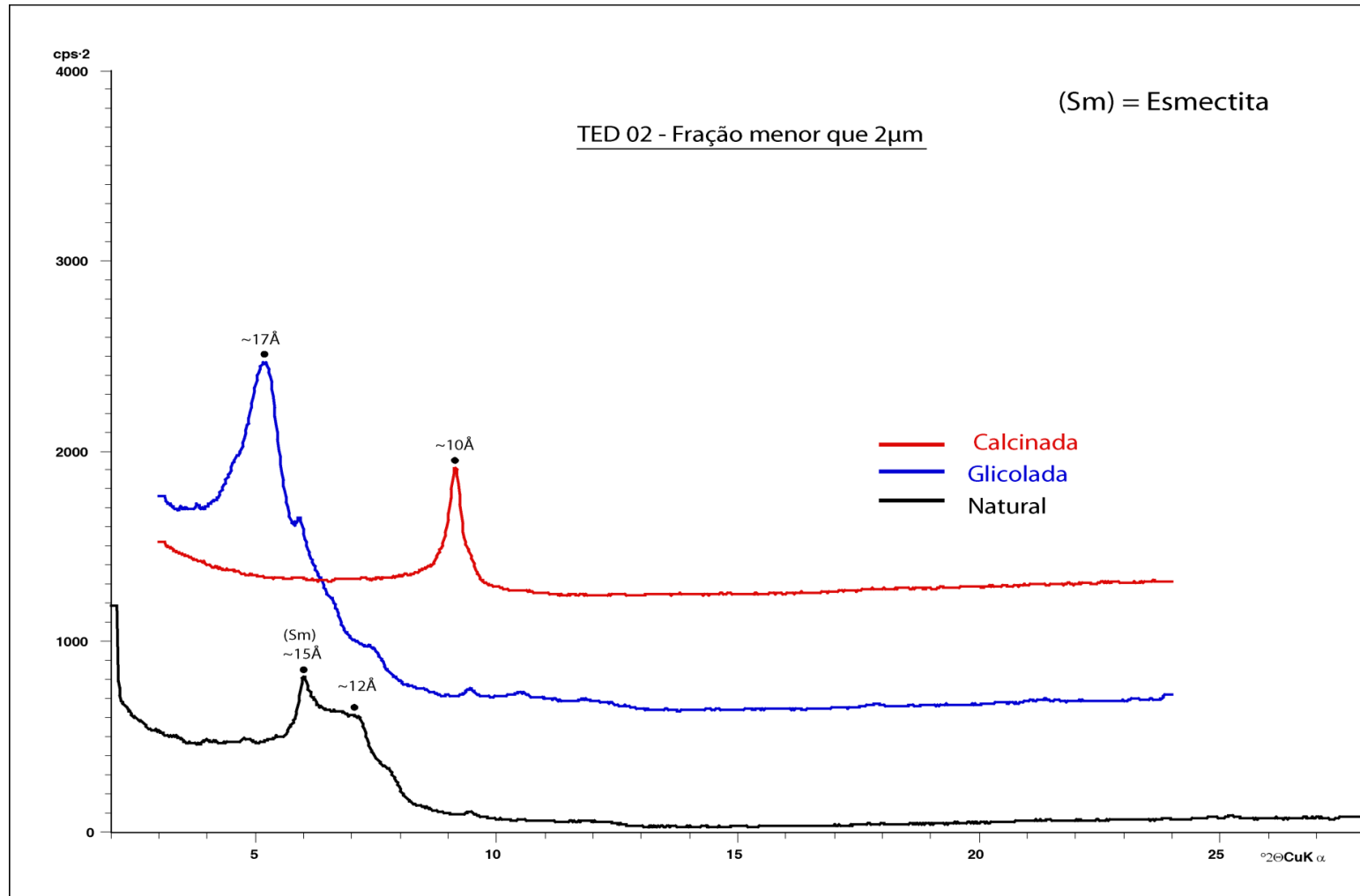


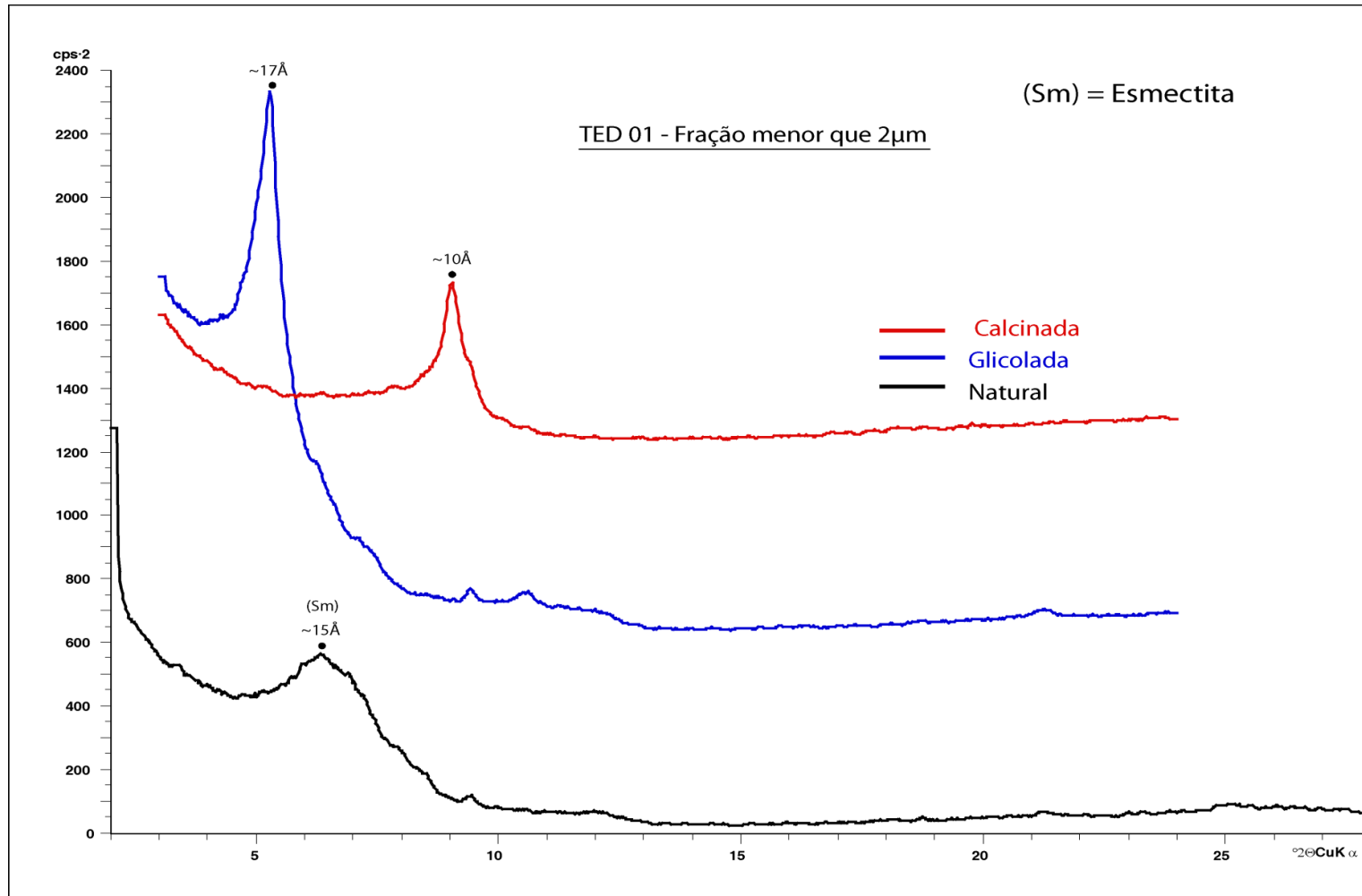












APÊNDICE M – DIFRATOGRAMAS DA FRAÇÃO MENOR QUE 2 μm SATURADA EM CÁLCIO DAS AMOSTRAS DO FURO DE SONDAGEM, OBTIDOS PELA TÉCNICA DA DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.

