

Texturas e inclusões em cromita da Mina Ipueira: contribuição para o entendimento da formação de chromititos no Complexo Jacurici, BA

Chromite textures and inclusions in the Ipueira Mine: contribution to the understanding of the chromitite formation of the Jacurici Complex, BA

Greice Oliveira Roloff¹; Juliana Charão Marques²; Adriana Vitória Jacomini³; Eraldo Bulhões Carvalho⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Geociências/Departamento de Geologia, Porto Alegre/RS, Brasil.
Email: georoloff@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0812-0619>

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Geociências/Departamento de Geologia, Porto Alegre/RS, Brasil. Email: juliana.marques@ufrgs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0143-6925>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Geociências/Departamento de Geologia, Porto Alegre/RS, Brasil. Email: adrianajacomini2013@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8314-4656>

⁴ Companhia de Ferro Ligas da Bahia-FERBASA, Andorinha/BA, Brasil. Email: eraldo.bulhoes@ferbasa.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3964-603X>

Resumo: A cromita é um mineral do grupo dos espinélios e constitui a única fonte de cromo metálico, sendo essencial na produção de aço inoxidável. A formação de chromititos tem sido alvo de debate. No Brasil, o Complexo Jacurici, explorado pela Companhia de Ferro Ligas da Bahia – FERBASA, abriga o maior depósito de cromo do país e tem sido interpretado como um sistema magnático de grandes dimensões com minério formado em um conduto posteriormente rompido tectonicamente. Estudos prévios sugerem influência de contaminação crustal e voláteis na cristalização exclusiva da cromita com possível concentração mecânica na formação da camada mais espessa. Neste trabalho, foram realizadas análises petrográficas com suporte de Microscopia Eletrônica de Varredura e microtomografia de raios-X em amostras do segmento denominado Mina Ipueira. Os resultados corroboram com estudos anteriores e sugerem que a supersaturação em cromo está refletida no estágio mais maciço da camada que apresenta maiores volumes de cromita com múltiplas inclusões hidratadas. O contato abrupto entre as porções semimaciça e maciça, e compactação na camada principal, sugerem uma mudança no processo de formação, possivelmente iniciando com cristalização *in situ* e evoluindo para um processo mais complexo com transporte e acumulação de cristais.

Palavras-chave: Cromita; Inclusões; Jacurici.

Abstract: Chromite is a mineral belonging to the spinel group and constitutes the sole source of metallic chromium, essential in stainless steel production. The formation of chromitites has been a subject of debate. In Brazil, the Jacurici Complex, exploited by the Companhia de Ferro Ligas da Bahia - FERBASA, hosts the country's largest chromium deposit and has been interpreted as a large magmatic system with ore formed in a conduit, subsequently tectonically ruptured. Previous studies suggest the influence of crustal contamination and volatiles in the exclusive crystallization of chromite with possible mechanical concentration in the formation of the thicker layer. In this study, petrographic analyses supported by Scanning Electron Microscopy and X-ray microtomography were conducted on samples from the Mina Ipueira segment. The results support previous studies and suggest that chromium supersaturation is reflected in the denser stage of the layer, which exhibits higher volumes of chromite with multiple hydrated inclusions. The abrupt contact between the semimassive and massive portions, and compaction in the main layer, suggest a change in the formation process, possibly starting with in-situ crystallization and evolving into a more complex process involving the transport and accumulation of crystals.

Keywords: Chromites; Inclusions; Jacurici.

1. Introdução

A cromita é um mineral cúbico de cor marrom-escura do grupo dos espinélios. É única fonte de cromo metálico, metal essencial na produção de ligas de alta resistência a calor, abrasão, corrosão e oxidação. Grande parte da produção é destinada à fabricação de aço inoxidável, embora também seja relevante na indústria química (PAPP; LIPIN, 2010). No Brasil, o maior depósito de cromita está localizado no Complexo Jacurici, porção nordeste do Cráton São Francisco, e minerado atualmente na Mina Ipueira pela Companhia de Ferro Ligas da Bahia S.A (FERBASA).

O mecanismo geológico envolvido na formação de cromititos tem sido alvo de debate desde longa data. A formação de camada espessa é particularmente problemática quando o balanço de massa é considerado. O magma máfico e mesmo ultramáfico solubiliza pouco Cr_2O_3 e a concentração observada em muitos exemplos, mesmo de grande escala como o Complexo de Bushveld na África do Sul, requer volumes de magma que superam em muito o efetivamente preservado nas antigas câmaras magmáticas (NALDRETT *et al.*, 2012; LATYPOV *et al.*, 2022). Neste sentido, o Complexo Jacurici consiste de um estudo de caso interessante por hospedar uma camada de cromitito com 5 a 8 m de espessura em um corpo de rochas ultramáficas estratificadas que variam de peridotitos até máficas, com espessura relativamente restrita, de apenas 300 m. Para explicar esta questão, o Complexo tem sido interpretado como um sistema magmático de maiores dimensões, sendo que os corpos mineralizados pertenceriam em origem a um conduto posteriormente rompido tectonicamente. Uma revisão desse contexto, realizada por Marques *et al.*, (2017), ressalta que ainda há muito a ser compreendido.

Friedrich *et al.*, (2019) realizou um trabalho de detalhe em um dos segmentos do Complexo, o corpo Monte Alegre Sul, situado na porção intermediária do cinturão. Foram descritas diversas inclusões em cromita, incluindo diversos minerais hidratados, o que sugere um papel fundamental dos voláteis na cristalização da cromita. De forma a dar continuidade ao estudo, este trabalho caracteriza, através de petrografia detalhada com apoio de Microscopia Eletrônica de Varredura, as relações texturais e inclusões hospedadas em cromita de camadas do segmento Ipueira, mais a sul. O trabalho utilizou as mesmas amostras previamente estudadas por Marques e Ferreira Filho (2003) e Marques *et al.*, (2003) da área da atual Mina Ipueira, com objetivo de traçar comparações ao descrito no segmento Monte Alegre Sul. Adicionalmente, foi realizado um estudo por microtomografia de alta resolução para visualização 3D de aspectos texturais considerados relevantes. Os achados corroboram o trabalho de Friedrich *et al.*, (2019) e fortalecem as evidências de formação complexa para o depósito.

2. Contexto geológico

O Complexo Jacurici, localizado na porção nordeste do Cráton São Francisco (Figura 1), no estado da Bahia, hospeda o maior depósito de cromo do Brasil, tendo 15 corpos mineralizados dispostos na direção N-S ao longo de uma faixa de mais de 70 km de extensão por 20 km de largura, explorados pela FERBASA desde 1973. Atualmente a FERBASA opera uma mina subterrânea no município de Andorinhas (Mina Ipueira).

O Complexo Jacurici faz parte dos remanescentes de uma grande província ígnea, deformada e metamorfizada durante o Paleoproterozóico (BARBOSA *et al.*, 2012). As idades e o contexto tectônico não estão bem definidos. Ele está localizado no limite entre dois terrenos principais, o Bloco Serrinha (a leste, Arqueano) e o Cinturão Salvador-Curaçá (a oeste, Paleoproterozoico). Aflora a leste e paralelo ao Sienito Itiúba, um maciço alcalino Paleoproterozoico N-S de 150 km de extensão. As intrusões máficas-ultramáficas são encaixadas nas rochas do embasamento arqueano, composto por gnaisses quartzo-feldspáticos, mármore, *metacherts* e rochas calci-silicáticas (DEUS e VIANA, 1982, SILVEIRA *et al.*, 2015; DIAS *et al.*, 2022). A idade mínima para o Complexo é de cerca de 2,1 Ga (DIAS *et al.*, 2022), embora esta idade seja associada também ao pico metamórfico regional.

O Complexo Jacurici foi deformado e afetado pelo metamorfismo de fácies anfibolito a granulito (CUNHA *et al.*, 2012, MARQUES *et al.*, 2017) com deformação que evolui para formação de sinformes seguida por boudinagem (ALMEIDA *et al.*, 2017), resultando em segmentos tectonicamente invertidos. Entretanto, a textura, mineralogia e as variações químicas das rochas cumuláticas estão localmente bem preservadas apesar da serpentinização (DEUS e VIANA, 1982, MARQUES E FERREIRA FILHO, 2003; DIAS *et al.*, 2014; MARQUES *et al.*, 2017).

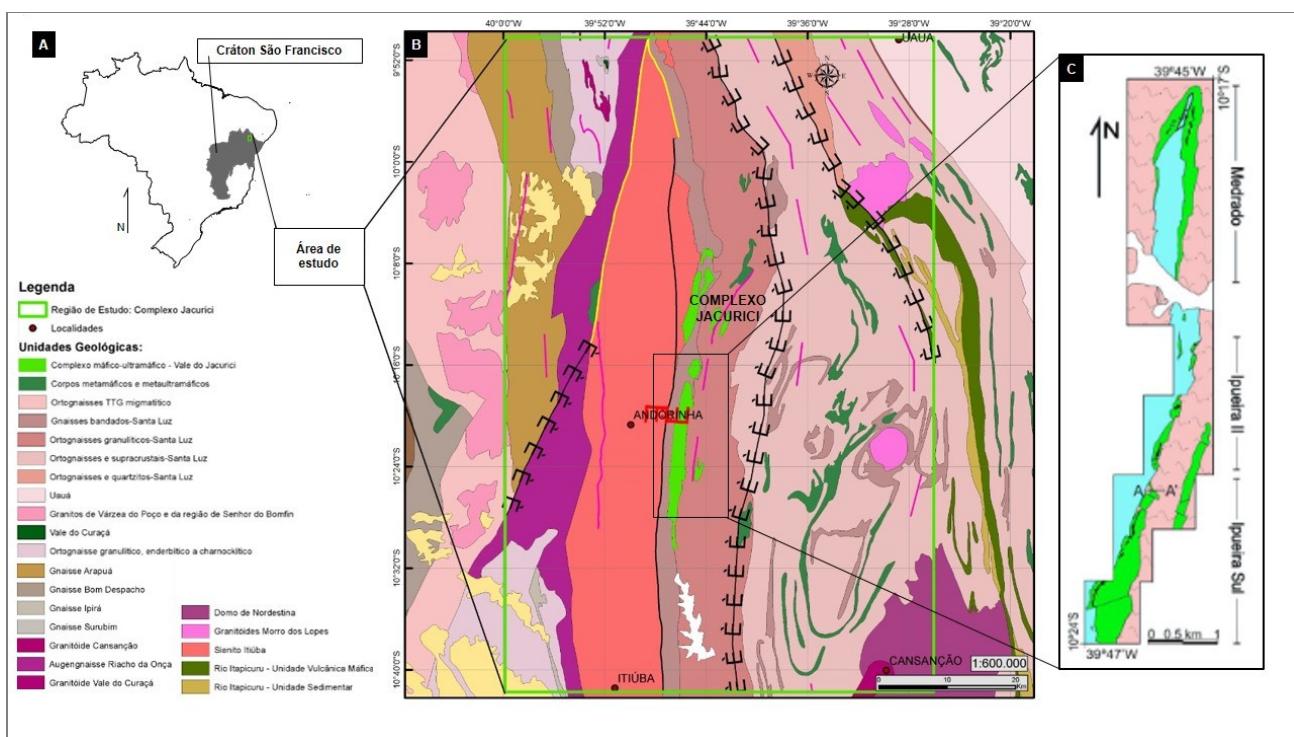


Figura 1 – A. Delimitação do Cráton São Francisco; B. Mapa geológico regional, C. Seção Ipueira Sul, Ipueira I e Medrado.

Fonte: A. modificado de CPRM (2003) e B. adaptado da Divisão de Geologia da FERBASA (relatório interno), modificado de Marques et al., (2017).

O segmento Ipueira possui aproximadamente 6 km de extensão, 500 metros de largura e 300 metros de espessura. Marques e Ferreira Filho (2003) propuseram duas zonas principais, da base para o topo: (1) Zona Ultramáfica (até 250 m de espessura) composta principalmente de dunitos, harzburgitos e piroxenitos, e (2) Zona Máfica (até 40 m de espessura), na parte superior, representada por noritos. A zona ultramáfica tem três unidades: Unidade Ultramáfica Inferior (UUI), Camada de Cromitito Principal (CCP) e a Unidade Ultramáfica Superior (UUS) (Figura 2).

As unidades Ultramáfica Inferior e Superior hospedam camadas semimaciças de cromitito, 0,5 e 1 m de espessura, com textura em rede marcada por cristais de olivina/ortopiroxênio já totalmente serpentinizados contornados por cromita euédrica. A Camada de Cromitito Principal tem até 7 m de espessura, sendo a base composta por cromitito semimaciço (~1 m), seguido por maciço (*lump*). O minério semimaciço tem textura em rede com olivina/ortopiroxênio já totalmente serpentinizados. Já o maciço tem ortopiroxênio intersticial ou poiquilitico, serpentinizado.

A variação críptica de olivina e ortopiroxênio ao longo da estratigrafia indica uma mudança petrológica relacionada ao intervalo de cristalização única de espinélio (CCP). Abaixo do cromitito principal, observa-se uma evolução constante nos teores de Fo (89-92) e En (88-91), sugerindo cristalização concomitante a injeções de magma em um sistema aberto. Acima da CCP, há uma evolução rápida, com decréscimo de Fo 90-82 e En 90-84 para o topo, indicativa de fracionamento normal. Marques e Ferreira Filho (2003) interpretam o sistema magmático como um conduto.

Marques et al., (2003) realizaram estudo petrológico com isótopos de Os e Nd e sugerem, como fonte do magmatismo, uma antiga litosfera subcontinental. O magma primitivo teria sofrido contaminação crustal próximo ao intervalo da CCP. As inclusões minerais em cromita, descritas por Friedrich et al., (2019) no segmento Monte Alegre Sul, apresentam evidências de magma enriquecido com H_2O e CO_2 o que levou a sugestão de contaminação por digestão de carbonatos das encaixantes (mármore), elevando a fO_2 e desencadeando a cristalização de cromita. A cristalização teria iniciado *in situ*, sendo seguida por acumulação de cristais (*slurry*), processo facilitado pela presença de voláteis.

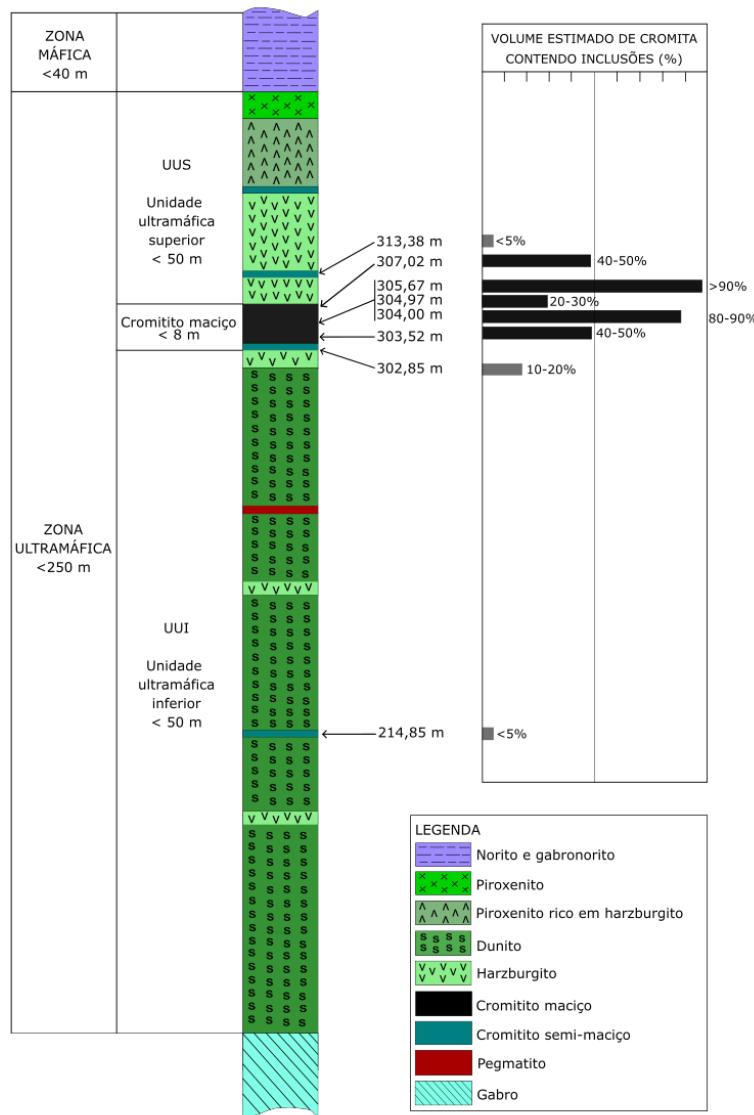


Figura 2 – Seção esquemática do segmento Ipueira Sul, mostrando sucessão estratigráfica do furo I-328-55°. Estão marcados os intervalos utilizados no presente estudo. Na coluna da direita está representado o volume percentual estimado de cristais de cromita contendo inclusões por amostra analisada, resultado deste estudo.

Fonte: Modificado de Marques *et al.*, (2017).

3. Amostragem e procedimentos analíticos

Oito seções delgadas polidas foram confeccionadas a partir de amostras estudadas previamente por Marques e Ferreira Filho (2003) - furo I-328-55°. A escolha objetivou avaliar a textura de cromita e presença de inclusões ao longo da estratigrafia em amostras com dados prévios. Foram selecionadas amostras de 3 diferentes camadas, sendo duas amostras de camadas semimaciças que ocorrem abaixو e acima do cromitito principal, respectivamente, nas Unidade Ultramáfica Inferior (UUI) e Unidade Ultramáfica Superior (UUS), e cinco amostras da Camada de Cromitito Principal (CCP) (Figura 2).

A análise petrográfica dos cristais de cromita e das inclusões minerais foi efetuada por meio de imagens de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), JEOL 6610-LV, equipado com Espectrômetro de Dispersão de Energia

(EDS) e Detector Bruker Nano Xflash 5030, no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LGI/UFRGS). O equipamento operou com tensão de aceleração de 15 kV e distância de trabalho de 11 mm. Foi utilizada metalização de ouro. De forma sistemática, foram observadas as características texturais, forma e contato entre os grãos de cromita, forma e distribuição de inclusões e realizada estimativa de volume de cristais portadores de inclusões em relação aos não portadores.

A microtomografia computadorizada de raios X (uCT) em alta resolução objetivou a obtenção de um modelo digital tridimensional da amostra 310,63 - furo I-765-90° - Ipueira. A amostra foi serrada até as dimensões de 2x4x10 cm. As análises foram realizadas no microtomógrafo Skyscan 1173 da Bruker, do Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (IPR/PUCRS). As condições analíticas foram 130kV, 61 μ A, resolução de 15 μ m, passo de 0,20° e uso de filtro Brass 0.25mm. Foram delimitados os picos de densidade dos silicatos e da cromita e selecionado apenas o pico de densidade da cromita retirando os silicatos. Para o aperfeiçoamento do modelo foram utilizados os softwares *Data Viewer* e *MeshLab*; no *Data Viewer* o modelo foi seccionado a partir de cortes nos eixos (X, Y, Z) para visualizar o interior da amostra. Com o *MeshLab* foram aprimorados a resolução e coloração do sólido e realizado o modelo final.

4. Resultados

4.1 Petrografia dos cromititos semimaciços das Unidades Ultramáficas Inferior e Superior

As camadas de cromitito semimaciço hospedadas em dunitos na UUI (amostra 214,85 m) e em harzburgitos na UUS (amostra 313,38 m), são texturalmente similares (Figura 3A, C). A cromita perfaz cerca de 30 a 40% em volume. A textura em rede pode ser observada mesmo na superfície dos testemunhos de sondagem, e é caracterizada por cristais de ortopiroxênio/olivina serpentinizados, circundados por cristais mais finos de cromita. A cromita tende a ser subédrica, pouco fraturada e com bordos arredondados a retos, por vezes irregulares (Figura 3B, D). A ocorrência de cromita com ao menos uma inclusão representa < 5 % em relação ao volume total de cristais deste mineral. As inclusões são arredondadas a alongadas e estão distribuídas aleatoriamente nos cristais (Figura 3B, D). Uma única diferença petrográfica foi observada entre estas camadas – a presença de magnetita nos contatos entre alguns cristais de cromita na amostra da camada superior (Figura 3B). Esta magnetita é interpretada como tardia, possivelmente correlata ao metamorfismo/serpentinização. Quanto à tipologia das inclusões, foi apenas identificado ortopiroxênio.

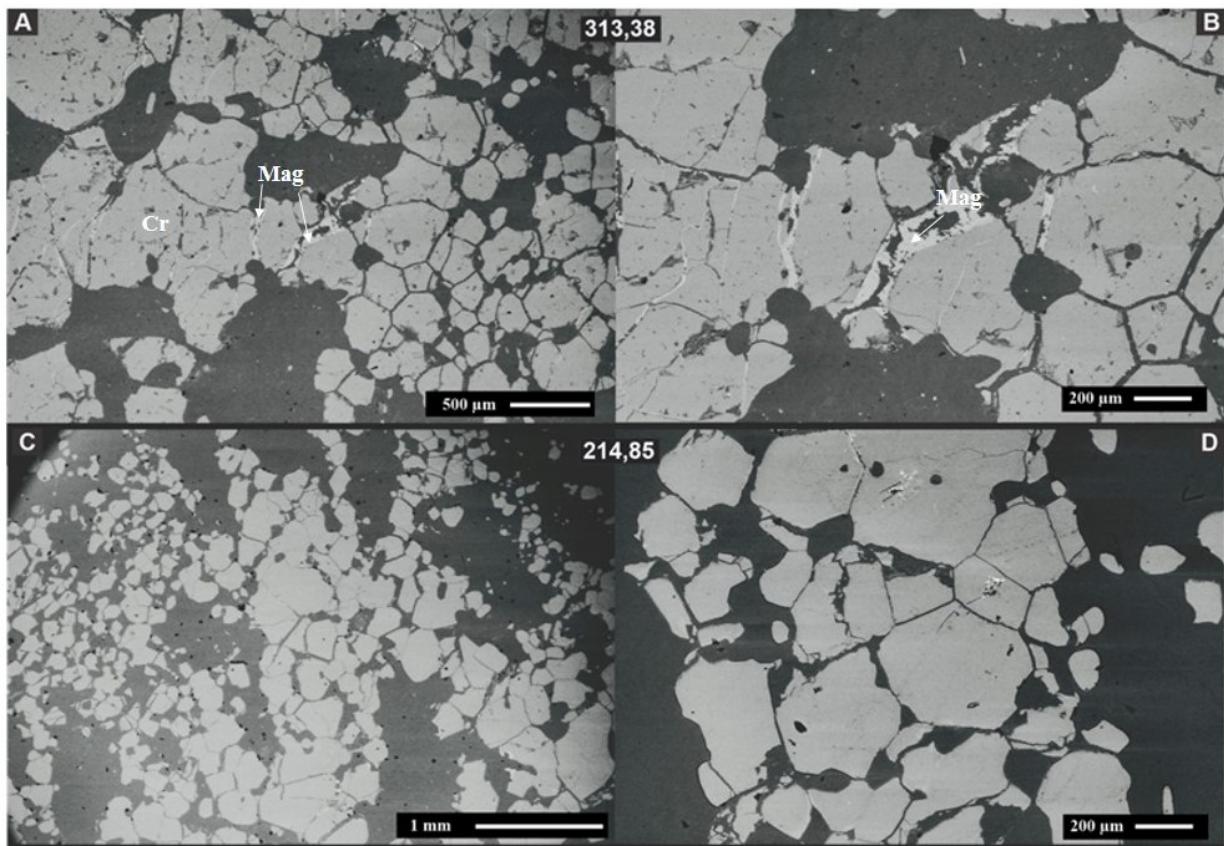


Figura 3 – Imagens de elétrons retroespelhados (BSE) mostrando o aspecto textural dos cristais de cromita (Cr). A e B. Amostra 313,38 m que representa cromitito semimaciço da camada acima do cromitito principal, na UUS, com textura em rede e ocorrência de magnetita (Mag) tardia. C e D. Amostra 214,85 m que representa cromitito semimaciço da camada abaixo do cromitito principal, na UUI, com textura em rede.

Fonte: Autores (2022).

4.2 Petrografia da Camada de Cromitito Principal

A Camada de Cromitito Principal no testemunho estudado é constituída na base por uma subcamada de cromitito semimaciço com textura em rede e espessura de cerca de 0,6 metros seguida por minério maciço de cromita, referido também como *lumpy* na Mineração do Vale do Jacurici, com cerca de 5 metros de espessura. A camada semimaciça varia até um máximo de 60% em volume de cromita enquanto que a porção maciça pode alcançar até mais de 90% em volume. A figura 4 mostra imagens de elétrons retroespelhados representativas mostrando a variação textural e de volume de inclusões ao longo da camada. A tabela 1 resume as informações incluindo também as camadas da UUI e UUS.

Tabela 1 – relação das profundidades e posicionamento das amostras ao longo do perfil litológico.

Zona	Unidade	Profundidade (m)	Ocorrência	Volume estimado de cromitas contendo inclusões (%)
	UUS	313,38	semimaciço	<5
	CCP	307,02		15 - 25
		305,67		> 90 (alguns com muitas)

Ultramáfica	304,97		20 - 30
	304,00		80-90 (alguns com muitas)
	303,52		40 - 50
	302,85	semimaciço	10 - 20
	214,85	semimaciço	< 5

Fonte: Autores (2023).

A amostra 302,85 m representa a porção semimaciço (Figura 4J,L). Em geral, a textura é similar às demais camadas semimaciços. A cromita ocorre como agregados relativamente finos (0,2 a 0,8 mm) ao redor de olivina/ortopiroxênio serpentinizados com dimensões maiores que 1mm. Os cristais tem bordos que variam de retos a arredondadas, eventuais bordas irregulares. Os cristais podem ocorrer de forma isolada ou estarem conectados em contatos retos, sem sinais de compactação (Figura 4L). Com relação ao volume de inclusões, cristais que apresentem ao menos uma inclusão totalizam entre 10% e 20%. Em geral, as inclusões exibem formas irregulares a alongadas, dispostas de forma aleatória ao longo dos cristais.

A primeira amostra da porção maciça é a 303,52 m (Figura 4H, I). Nesta, os cristais de cromita tem tendência subédrica, variam de 0,01 a 0,05 mm, estão em contato por ao menos uma face, não apresentam compactação. Ocorrem fraturas, mas não são abundantes. O volume de cromita estimado é de cerca de 80% e as inclusões ocorrem em cerca de 40 a 50% dos cristais de cromita, dispostas de maneira aleatória, podendo se concentrar na borda de cristais maiores. Na mesma lâmina, nota-se porções com cristais com poucas ou nenhuma inclusão (Figura 4H) e porções com cristais com dezenas de inclusões (Figura 4I).

Na sequência, foi analisada a amostra 304,00 m, que apresenta um volume um pouco menor de cromita, com cerca de 70% em volume. Os cristais tendem a ter formato euédrico a subédrico, variam de 0,01 a 0,04 mm e apresentam um arranjo que parecer textura em rede, porém achatada. Apresentam algumas fraturas e podem ter borda irregular, porém predominam bordas retas. O destaque nesta amostra é o volume de cristais com inclusões que chega a ser de 80 a 90%. Alguns cristais tem dezenas de pequenas inclusões que podem estar concentradas no núcleo ou formar anéis na borda, ou mesmo distribuídas ao longo de todo o cristal (Figura 4G). Alguns cristais tem inclusões maiores, globulares a prismáticas, que tendem a estar no centro. Quando próximas das bordas, as inclusões podem estar orientadas paralelamente ao eixo cristalográfico.

Ainda na porção intermediária da CCP, a amostra 304,97 m apresenta volume maior de cromita, com até 90% em volume e apresenta porções com compactação expressiva e características de *annealing* (Figura 4G), o que não é incomum em camadas maciças de cromitito. Individualmente os cristais tendem a ser de 0,2 a 0,6 mm e nas porções menos compactadas preservam formato euédrico a subérico. Nota-se menor volume de cristais com inclusões, apenas 20 a 30%. Quando ocorrem, se distribuem de forma aleatória, poucas por cristal, com formato arredondado ou prismático.

A porção intermediária superior da CCP é representada pela amostra 305,67 m que apresenta volume de cromita na ordem de 70 a 80%, sem sinais de compactação. Os cristais tendem a estarem mais isolados ou em contato reto em uma ou duas faces (Figura 4D). Varia de 0,1 a 0,4 mm e tendem a ser euédricos a subédricos. A quase totalidade dos cristais é portadora de inclusões sendo que muitos cristais tem dezenas de pequenas inclusões. O formato das inclusões varia podendo ser prismáticas, alongadas a ovóides e se distribuem preferencialmente no centro dos grãos ou orientadas paralelamente aos eixos cristalográficos (Figura 4E),

Em relação ao topo da CCP, a amostra 307,02 m é representativa estando já próxima ao contato com harzburgito da UUS. O total de cromita fica em torno de 80% em volume, e os cristais tendem a estar isolados ou em contato por até mais de 3 faces, mas sem sinais de compactação. Os cristais são subéricos a euédricos, variando de 0,1 a 0,5 mm, pouco fraturados, com arestas retas ou eventualmente irregulares. O volume de inclusões é menor, com cerca de 15 a 25% dos cristais portando 1 ou mais inclusões. As inclusões são alongadas a ovóides, de tamanho e distribuição aleatória. Raros cristais mostram um volume relativamente maior (>10 unidades) de inclusões pequenas e prismáticas ao longo de eixos cristalográficos.

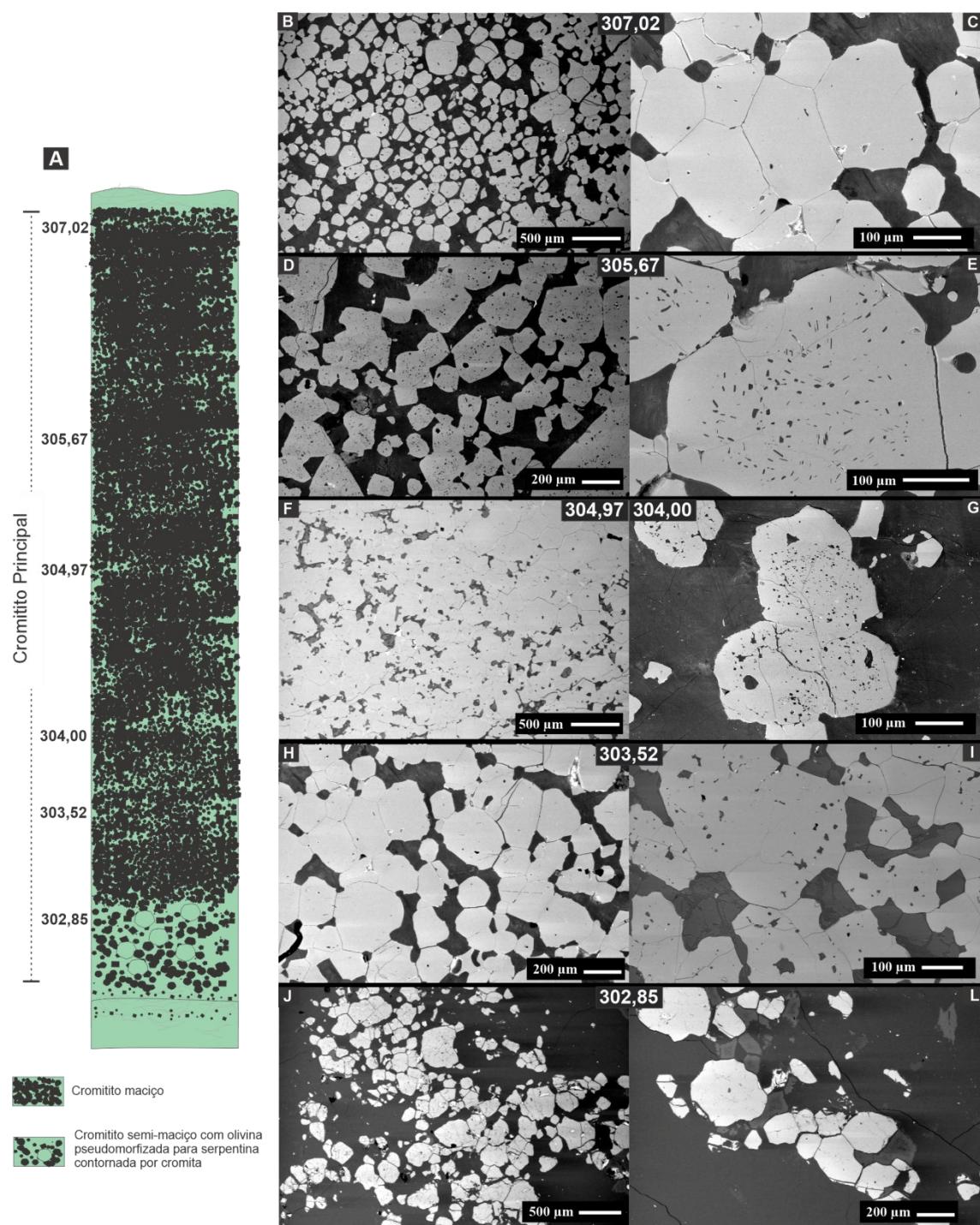


Figura 4 – Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) mostrando o aspecto geral dos cristais de cromita ao longo da camada de cromitito principal. A. Perfil esquemático ilustrando base com cromitito semimaciço com contato abrupto para cromitito maciço. B e C. Amostra 307,02 m, topo da camada, com cromita com pouca inclusão e sem compactação. D e E. Amostra 305,67 m, intervalo com mais de 90% dos cristais contendo muitas inclusões com distribuições variadas. F. Aspecto geral da amostra 304,97 m mostrando compactação, alguns cristais com inclusões, mas não abundantes. G.

Detalhe da amostra 304,00 m mostrando intervalo com menor compactação e cristais com abundantes inclusões, embora ocorram vários sem inclusões. H e I. Amostra 303,52 m, aspecto geral e detalhe, mostrando cristais com inclusões, mas não abundantes. J e L. Amostra 302,85 m representativa do intervalo semimaciço da base, mostrando distribuição dos cristais e quase ausência de inclusões.

Fonte: Autores (2022).

Com relação a tipologia das inclusões, foi observada uma variação similar a reportada por Friedrich *et al.*, (2019) na CCP, com presença de silicatos não hidratados como olivina e ortopiroxênio, em geral formando inclusões ovóides a alongadas, geralmente isoladas (Figura 5A, B, D) de tamanho que varia de 5 a 40 μm . De forma menos comum ocorre clinopiroxênio em pequenos cristais. Inclusões de silicatos hidratados são comuns e geralmente estão representadas por anfibólio (hornblenda) prismáticos ou ovóides alongados e isolados que variam de tamanho, podendo alcançar até 20 μm . Os eixos cristalográficos podem hospedar tanto inclusões hidratadas quanto não hidratadas de silicatos (Fig. 5A e C). A cromita do Ipueira, embora de forma menos comum do que o reportado para o segmento Monte Alegre Sul, também apresenta inclusões de carbonato (dolomita) e pode ter raros sulfetos de Fe e Ni.

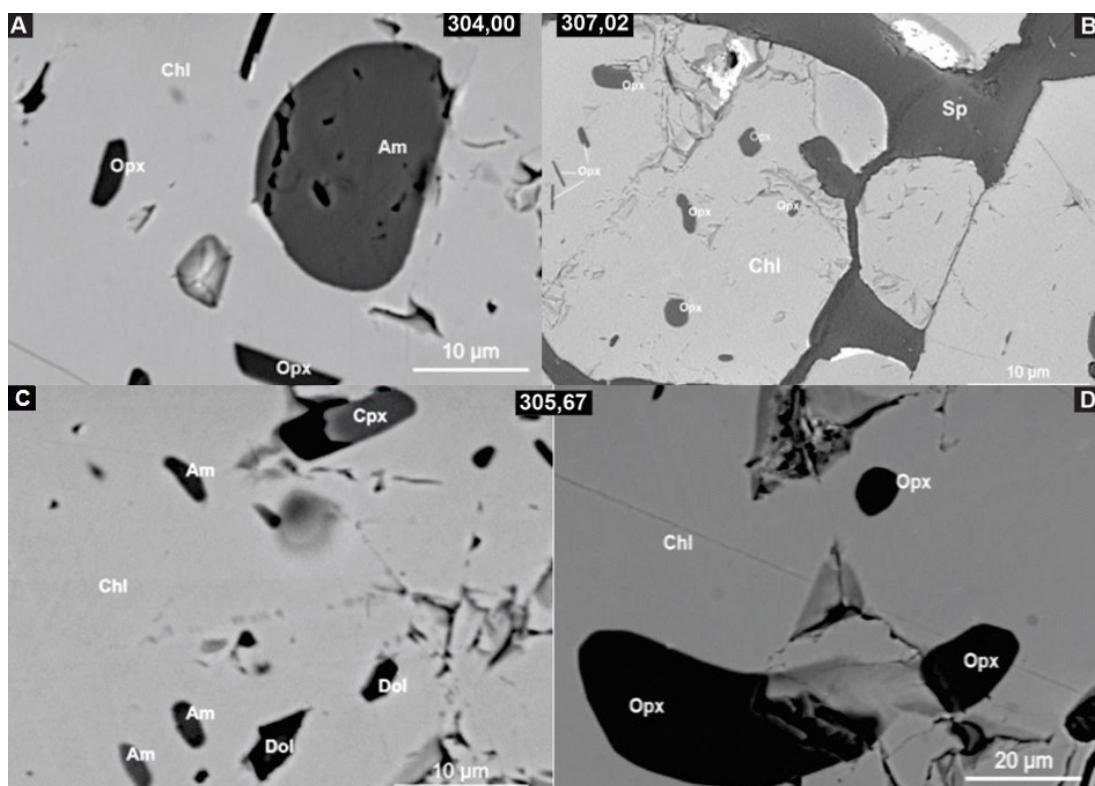


Figura 5 – Imagens de elétrons retroespelhados (BSE) mostrando as inclusões mais frequentes encontradas em cromita na camada maciça do corpo Ipueira. A. Amostra 304,00 exibe inclusão relativamente grande de anfibólio (am) e também ortopiroxênio (opx) alongado no eixo cristalográfico de cromita. B. Amostra 307,02 mostra cristal com distribuição aleatória de inclusões de ortopiroxênio. C. e D. Amostra 305,67 mostra diferentes minerais inclusos no mesmo cristal de cromita (C), incluindo ortopiroxênio, anfibólio, clinopiroxênio e dolomita (dol) e, uma inclusão de dimensão relativamente grande de ortopiroxênio (D). Chl – clorita; Cpx – clinopiroxênio; Sp – serpentina.

Fonte: Autores (2022).

4.3 Resultados de microtomografia computadorizada de raios X (uCT)

A microtomografia computadorizada de raios X (uCT) em alta resolução foi realizada na amostra 310,63 m do furo I-765-90° do corpo Ipueira, outra seção geológica, para observar a transição da porção semimaciça para maciça na CCP

(Figura 6). Este intervalo transicional não estava disponível no furo I-328-55°. O modelo digital tridimensional destaca em cinza escuro os cristais de cromita (Figura 6 A, B). É possível notar que na porção semimaciça os cristais se distribuem de forma isolada ou conectados por duas ou mais faces formando uma textura que lembra a textura “*chicken-wire*” descrita por Barnes (1998) quando a cromita se conecta formando uma estrutura que lembra uma corrente de cristais (Figura 6 B, D). O que chama atenção é o contato brusco entre esta porção de cristais mais dispersos e a porção maciça com feições de compactação. O contato é irregular entre estas porções. Para o topo da camada maciça, nota-se que diminui a compactação, embora os cristais sigam em contato uns com os outros por mais de 2 faces (Figura 6 C). O fraturamento observado é interpretado como uma feição tardia.

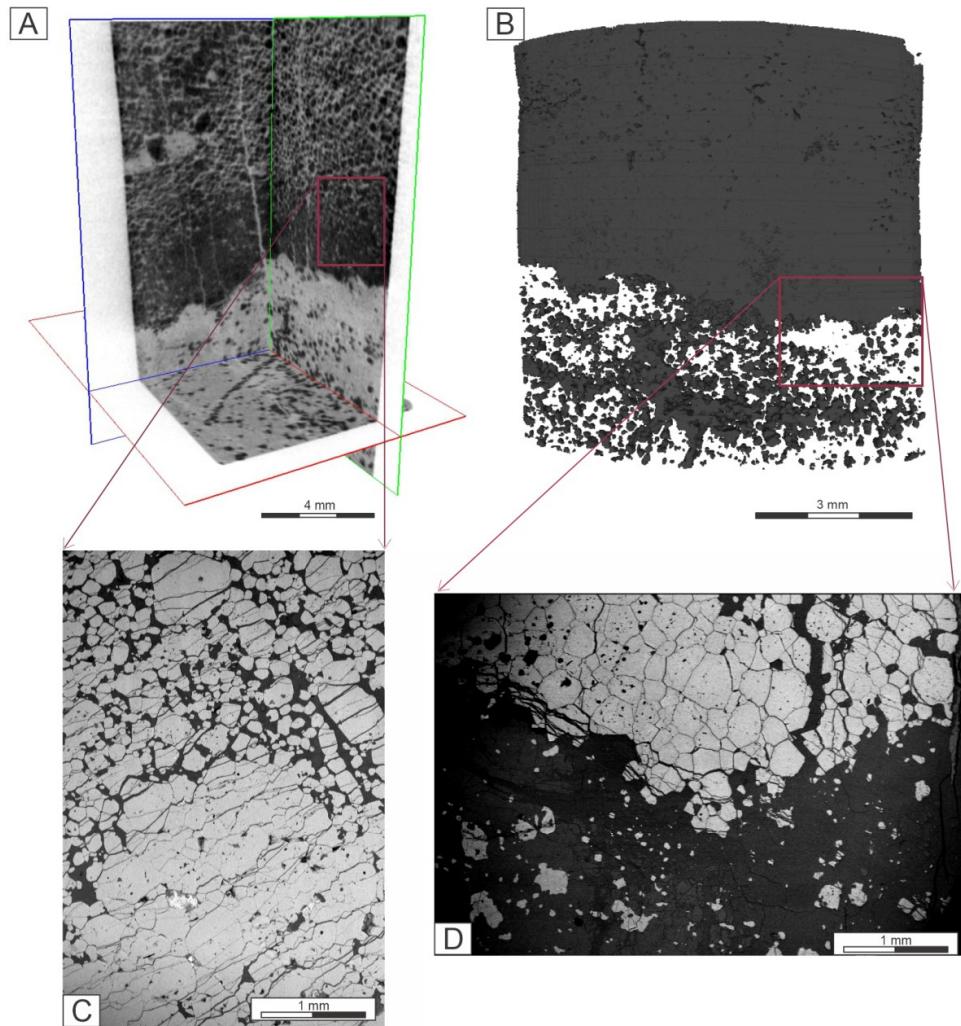


Figura 6 – Amostra 310,63 do furo I-765-90° do corpo Ipueira evidenciando o contato entre a porção semimaciça e maciça da base da CCP. A e B. Modelo tridimensional obtido por microtomografia computadorizada de raios X (uCT) em alta resolução. C e D. Imagens de elétrons retroespelhados (BSE) mostrando detalhes das texturas nas duas porções e na transição para o topo da porção maciça.

Fonte: Autores (2023).

5. Discussão e considerações finais

O modelo petrogenético considerado para o Complexo Jacurici sugere que a formação da camada espessa de cromita ocorreu através de uma combinação de processos com cristalização *in situ* disparada por hidratação e contaminação

crustal (MARQUES e FERREIRA FILHO 2003, MARQUES *et al.*, 2003) seguida de remobilização e transporte mecânico de cristais ao longo de um conduto magmático (MARQUES *et al.*, 2017, FRIEDRICH *et al.*, 2019).

No entanto, o mecanismo capaz de cristalizar cromita e formar camadas maciças não é consensual na literatura. Diversos modelos foram sugeridos desde a década de 60. De forma geral, os modelos podem ser agrupados nos que consideram a formação como um processo de cristalização *in situ* e nos que consideram a formação de cromititos a partir de transporte de cristais. Fatores como variações na fugacidade de oxigênio (ULMER, 1969), variação de pressão (e.g. LIPIN 1993, LATPOV *et al.*, 2018), mistura de magmas (IRVINE 1977, NALDRETT *et al.*, 2009) e contaminação crustal (e.g. IRVINE 1975, MARQUES *et al.*, 2003, LESHER *et al.*, 2019) são todos considerados possíveis para justificar a cristalização *in situ*. Já os problemas para explicar o balanço de massa favorecem modelos que consideram transporte como principal mecanismo de concentração uma vez que concentrar cromo a partir de um magma que solubiliza relativamente pouco deste metal é uma tarefa complexa. O transporte poderia ocorrer a partir de concentrações prévias do mineral em uma espécie de lama magmática (*slurry*) posteriormente introduzida no seu posicionamento final (EALES 2000, VOORDOUW *et al.*, 2009) ou da reconcentração de cristais por processos de concentração envolvendo escorregamentos para o centro da câmara magmática (MAIER *et al.*, 2013, 2018). Mais recentemente, tem sido proposta uma alternativa na qual os cristais se formariam em relações não-cotéticas no magma durante a ascenção preenchendo a câmara magmática e seguindo para uma cristalização *in situ* explicando a formação de grandes proporções de uma fase mineral como os cromititos (LATPOV e CHISTYAKOVA, 2020).

A Camada de Cromitito Principal no testemunho estudado é constituída na base por uma subcamada de cromitito semimaciço com textura em rede e espessura de cerca de 0,6 metros seguida por minério maciço de cromita, referido também como *lumpy* na Mineração do Vale do Jacurici, com cerca de 5 metros de espessura. A camada semimaciça varia de 60 a 85% em volume de cromita enquanto que a porção maciça pode alcançar até mais de 90% em volume. Se considerado os cálculos de balanço de massa realizados por Naldrett *et al.*, (2012) para formação de cromititos no Complexo de Bushveld, considerando um magma com cerca de 0,25% wt% de Cr₂O₃ solubilizado e as relações cotéticas entre os minerais que se formam, o volume de magma necessário para gerar uma camada de 6 metros com cerca de 80% de volume de cromita, estimado para o volume da cromita preservada na CCP do Complexo Jacurici, seriam necessário cerca de 8km de coluna de magma, sendo que o corpo tem poucos metros de rochas cumuláticas preservadas acima do CCP. Isto ratifica a idéia de conduto proposta por Marques e Ferreira Filho (2003), mesmo se considerada situações excepcionais de solubilidade (em alta fugacidade de O₂). O conduto justifica a ausência de preservação da quantidade de magma estimado, mas o mecanismo de concentração ainda permanece em aberto.

Os trabalhos petrográficos detalhados nesta contribuição mostram que as seções dos cromititos semimaciços, tanto da porção inferior (UUI) quanto superior (UUS) e mesmo da base da camada principal (CCP) tem características similares. A cromita perfaz cerca de 30 a 40% em volume nos cromititos da UUI e UUS, e cerca de até 60% no semimaciço da base da CCP. Todos apresentam uma textura em rede, cristais subédricos a euédricos e pouca presença de inclusões, embora a base do CCP tenha um volume um pouco maior de inclusões se comparado aos demais. O modelo 3D obtido por microtomografia computadorizada de raios X (uCT) em alta resolução sugere que o cromitito semimaciço tem textura “*chicken-wire*” e que a transição para o maciço é abrupta.

Os cromititos maciços da CCP tem uma textura variada, ora marcada por bandas maciças de cromita formadas por muitos cristais densamente compactados e não tão bem classificados, ora por porções com cristais mais dispersos e com tendência subédrica euédrica associados a olivina/ortopiroxênio, majoritariamente serpentinizados. Do início da parte maciça para o meio da camada, há um aumento na quantidade de cristais de cromita com inclusões e de número de inclusões em cada cristal, sendo alguns níveis com quase a totalidade dos cristais contendo múltiplas inclusões, como é o caso da amostra 305,67 m. Estas inclusões variam enormemente em distribuição e tamanho podendo ser diminutas, prismáticas e orientadas nos eixos cristalográficos ou com distribuição aleatória. Por vezes concentradas no núcleo dos cristais de cromita e por vezes nas bordas. São comuns também inclusões de formato ovalado. Uma análise mais detalhada de composição evidenciou maior frequência de minerais como ortopiroxênio e anfibólito (hornblenda), também identificadas menores proporções de clinopiroxênio e dolomita. Para o topo da camada nota-se diminuição na quantidade de inclusões em cromita sendo bem presentes na amostra 307,02 m que finaliza a camada.

A presença de minerais hidratados e dolomita no segmento Monte Alegre Sul, mais a norte, justificou a interpretação de que assimilação de rochas carbonáticas poderia ter contribuído para introdução de CO₂ e liberado água no sistema magmático, causando aumento de fugacidade de oxigênio, o que favoreceria a cristalização de cromita (FRIEDRICH *et al.*, 2019). Os achados de minerais hidratados e dolomita também em inclusões em cromita da CCP do corpo Ipueira corroboram esta hipótese.

Friedrich *et al.*, (2019), baseados em estudos prévios de Prichard *et al.*, (2015), sugerem que a supersaturação em cromo poderia explicar a presença de abundantes inclusões em cromita uma vez que favoreceria uma rápida cristalização esqueletal do cristal incorporando inclusões em espaços que depois seriam fechados no decorrer da cristalização. A pouca presença de inclusões nas camadas de cromitito semimaciços e no topo da CCP contrastando com o abundante volume de inclusões para o meio do CCP parecem sugerir que, de fato, o pico de cristalização e acumulação ocorreu quando da formação da porção mais maciça, possivelmente refletindo este estágio de supersaturação.

Já o contato abrupto da porção semimaciça com a maciça da CCP, ilustrado na figura 6, e o início da camada marcado por textura de compactação sugere uma mudança no processo de acumulação. O processo parece ter iniciado *in situ*, com presença de textura em rede e possível textura “chicken-wire”, textura observada em outros complexos e utilizada para sugerir cristalização *in situ* (ver LATYPOV *et al.*, 2022) e, posteriormente ter sido substituída por um processo de acumulação mais complexo para gerar a camada maciça. A presença de agrupamentos de cromita rica em inclusões e outros com poucas inclusões numa mesma seção sugere mistura de cristais formados em diferentes condições. Da mesma forma, o abundante volume de inclusões para o meio do CCP corrobora para a interpretação de um evento turbulento e com grande presença de voláteis durante a formação deste intervalo. Os dados aqui obtidos parecem reforçar a sugestão de Friedrich *et al.*, (2019) que a abundância de voláteis poderia ter favorecido o escorregamento de cristais e concentração para formação dos intervalos maciços.

Agradecimentos

Agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento (projeto universal 436963/2018-3) e bolsa de mestrado à primeira autora (130837/2021-0) e de produtividade em pesquisa à segunda autora (316460/2021-4). Agradecimentos também ao Daniel Triboli, técnico do LGI/UFRGS pelo suporte na realização dos experimentos e na análise dos dados e William Freitas, pesquisador do IPR/PUCRS pelo suporte na análise por microtomografia computadorizada.

Referências

- Almeida, H. L. de; Cabral, E. B.; Bezerra, F. X. Evolução deformacional das rochas do Vale do Jacurici: implicações para a estruturação dos corpos cromitíferos máfico-ultramáficos. *Geologia USP. Série Científica*, v. 17, n. 2, 71-88, 2017.
- BARBOSA J.S.F.; MASCARENHAS S.J.F.; GOMES L.C.C.; Geologia da Bahia: pesquisa e atualização. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. 2012. 562p.
- Barnes, S. J. Chromite in komatiites. Magmatic controls on crystallization and composition. *Journal of Petrology*, v.39, n.10, 1689-1720, 1998.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Mapa geológico do estado da Bahia*. Bahia. Autores: Souza J.D.; Melo, R. C; Kosin M. Mapas, 2003.
- CUNHA J.C.; BARBOSA J.S.F.; MASCARENHAS J.F. Greenstone belts and similar sequences. In: BARBOSA J.S.F.; MASCARENHAS S.J.F.; CORREA GOMES L.C. (Eds.). *Geologia da Bahia: pesquisa e atualização*. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, 2012. p. 203-326.
- DEUS P.B.; VIANA J.S.; DUARTE P.M.; QUEIRÓZ J.A. Distrito cromítífero de Campo Formoso. In: SBG, *Congresso Brasileiro de Geologia*, Salvador, Roteiro de Excursões, v. 3, p. 52-59. 1982.
- Dias, J.R.V.P.; Marques J.C.; Queiroz W.J.A. O corpo Várzea do Macaco e as mineralizações de cromo, níquel e cobre, Complexo Máfico-ultramáfico Jacurici, Cráton São Francisco, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geologia*, v. 44, n.2, 289-308, 2014.

- Dias, J.R.V.P.; Marques J.C.; Bertolini G.; et al. Impressão regional de pico metamórfico de alto grau em zircões do Complexo máfico-ultramáfico de Jacurici, Cráton do São Francisco, Brasil. *Braz. J. Geol.*. 2022. Vol. 52(1).
- Eales, H.V. Implications of the chromium budget of the Western Limb of the Bushveld Complex. *South African Journal of Geology*, v.103, n.2, 141–150. 2000.
- Friedrich, B.M.; Marques, J.C.; Olivo, G. R.; Frantz, J.C.; Alegria, B.; Queiroz, J. A. Q. Petrogênese da camada maciça de cromita do Complexo Jacurici, Brasil: evidências de inclusões em cromita. *Mineralium Deposita*, v. 55, n. 6, 1105-1126, 2020.
- Irvine T.N. Crystallization sequences in the muskox intrusion and other layered intrusions-II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores. *Geochimica Cosmochimica Acta*, v.39, n.6-7, 991–1020, 1975.
- Irvine T.N. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other layered intrusions: a new interpretation. *Geology*, v. 5, 273–277, 1977.
- Latypov, R.; Costin, G.; Chistyakova, S.; Hunt, E.J.; Mukherjee, R.; Naldrett, T. Platinum-bearing chromite layers are caused by pressure reduction during magma ascent. *Nature Communications*, v.9, n.462, 2018.
- Latypov, R.; Chistyakova, S. Origin of non-cotectic cumulates: A novel approach. *Geology*, v. 48, n.6, 604-608, 2020.
- Latypov, R.; Chistyakova, S.; Barnes, S.J. Chromitite layers indicate the existence of large, long-lived, and entirely molten magma chambers. *Nature Scientific Reports*, v.12, n.4092, 2022.
- Lesher, C.M.; Carson, H.J.E.; Houlé, M.G. Genesis of chromite deposits by dynamic upgrading of Fe±Ti oxide xenocrysts. *Geology*, v. 47, 207–210, 2019.
- Lipin B.R. Pressure increases, the formation of chromite seams, and the development of the ultramafic series in the Stillwater Complex, Montana. *Journal of Petrology*, v.34, 955–976, 1993.
- Maier W.D.; Barnes S-J, Grooves. The Bushveld Complex, South Africa: formation of platinum-palladium, chrome- and vanadium-rich layers via hydrodynamic sorting of a mobilized cu- mulate slurry in a large, relatively slowly cooling, subsiding magma chamber. *Mineralium Deposita*, v. 48, n.3, 1–56, 2013.
- Maier, W.D., Prevec, S.A., Scoates, J.S. et al. The Uitkomst Intrusion and Nkomati Ni-CuCr-PGE Deposit, South Africa: Trace Element Geochemistry, Nd Isotopes and High-Precision Geochronology. *Mineralium Deposita*, v.53, n.1, 67–88, 2018.
- Marques J.C.; Ferreira Filho C.F.; Carlson R.W.; Pimentel M.M. Re-Os and Sm-Nd isotope and trace element constraints on the origin of the chromite deposit of the Ipueira-Medrado Sill, Bahia, Brazil. *Journal of Petrology*, v. 44, n.4, 659-678, 2003.
- Marques J.C.; Ferreira Filho C.F. The chromite deposit of the Ipueira-Medrado Sill, São Francisco Craton, Bahia State, Brazil. *Economy Geology*, v.98, 87–108, 2003.
- Marques J.C.; Dias J.R.V.P.; Friedrich B.M.; Frantz J.C.; Queiroz W.J.A.; Botelho N.F. Thick Chromitite of the Jacurici Complex (NE Craton São Francisco, Brazil): cumulate chromite slurry in a conduit. *Ore Geology Reviews*, v. 90, 131–147, 2017.
- NALDRETT, A.J., KINNAIRD, J.A., WILSON, A., YUDOVSAYA, M., MCQUADE, S., CHUNNETT, G., STANLEY, C. Chromite composition and PGE content of Bushveld chromitites: Part 1—the Lower and Middle Groups. *Applied Earth Science (Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy)*, v. 118, 131–161, 2009.

-
- Naldrett, A.J.; Wilson, A.; Kinnaird, J., Yudovskaya, M., Chunnett, G. The origin of chromitites and related PGE mineralization in the Bushveld Complex: *Mineralium Deposita*, v.47, 209-232, 2012.
- PAPP, J.F.; LIPIN, B.R. Chromium and Chromium Alloys. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, (Ed.), 2010.
- Prichard H.M.; Barnes S.J.; Godel B.; Reddy S.M; Vukmanovic Z.; Halfpenny A.; Neary C.R.; Fisher P.C. The structure of and origin of nodular chromite from the Troodos ophiolite, Cyprus, revealed using high-resolution X-ray computed tomography and electron backscatter diffraction. *Lithos*, v. 218-219, 87–98, 2015.
- Ulmer G.C. Experimental investigations of chromite spinels. In Wilson HDB (ed) Magmatic ore deposits, a symposium. *Economy Geology*. Montreal v.4, 114p, 1969.
- Voordouw, R.; Gutzmer, J.; Beukes, N.J. 2009. Intrusive origin for Upper Group (UG1, UG2) stratiform chromitite seams in the Dwars River area, Bushveld Complex, South Africa. *Mineralogy and Petrology*, v.97, 75–94, 2009.