
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**TEXTURAS E INCLUSÕES EM CROMITA DA MINA IPUEIRA:
CONTRIBUIÇÃO PARA O ENTENDIMENTO DA FORMAÇÃO
DE CROMITITOS NO COMPLEXO JACURICI, BA**

GREICE OLIVEIRA ROLOFF

ORIENTADOR – Prof. Dra. Juliana Charão Marques

Porto Alegre, 2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**TEXTURAS E INCLUSÕES EM CROMITA DA MINA IPUEIRA:
CONTRIBUIÇÃO PARA O ENTENDIMENTO DA FORMAÇÃO
DE CROMITITOS NO COMPLEXO JACURICI, BA**

GREICE OLIVEIRA ROLOFF

ORIENTADOR – Prof. Dra. Juliana Charão Marques

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Diego Machado Marques – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Irani Clezar Mattos – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Rodrigo Winck Lopes – Universidade Federal da Bahia

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para a obtenção
do Título de Mestre em Ciências.

Porto Alegre, 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Roloff, Greice Oliveira
TEXTURAS E INCLUSÕES EM CROMITA DA MINA IPUEIRA:
CONTRIBUIÇÃO PARA O ENTENDIMENTO DA FORMAÇÃO DE
CROMITITOS NO COMPLEXO JACURICI, BA / Greice Oliveira
Roloff. -- 2023.
50 f.
Orientador: Juliana Charão Marques.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2023.

1. Cromititos estratiformes. 2. Inclusões em
cromitas. 3. Gênese de cromitas. 4. Minério de cromo.
I. Marques, Juliana Charão, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de Pós-Graduação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por disponibilizar sua estrutura e seus recursos.

À prof. Dra. Juliana Charão Marques pela orientação.

Aos demais professores da Pós-graduação pelo conhecimento compartilhado ao longo do curso.

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 cromititos tem sido alvo de debate. No Brasil, o Complexo máfico-ultramáfico 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 magmático 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 Ipueira, área que abriga uma importante mina subterrânea. Os resultados corroboram 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 mafic-ultramafic 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 Ipueira segment, an area hosting a major underground mine. 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 semi-massive 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

SUMÁRIO

ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO	8
CAPÍTULO I	9
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
1.2 Geologia do Complexo Jacurici	10
1.2.1 Gênese dos depósitos	15
1.2.2. Formação da Camada de Cromitito Principal	17
CAPÍTULO II	20
2 MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1 Revisão bibliográfica	20
2.2 Amostragem	20
2.3 Análise petrográfica	20
2 RESULTADOS E CONCLUSÕES	21
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
CAPÍTULO III	26
5 ARTIGO CIENTÍFICO	26

ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno de um artigo submetido à publicação na Revista de Geociências do Nordeste – REGNE, classificada nos estratos Qualis-CAPES A2. A sua organização compreende os seguintes capítulos:

CAPÍTULO I: é apresentado o texto integrador contendo a introdução sobre o tema, objetivos da pesquisa, revisão do estado da arte abordando a geologia do Complexo Jacurici, gênese dos depósitos e formação da Camada de Cromitito Principal.

CAPÍTULO II: materiais e métodos utilizados e um breve resumo dos resultados e conclusões obtidos, assim como a lista de referências consultadas para a elaboração do texto desta dissertação.

CAPÍTULO III: Artigo científico intitulado: “Texturas e inclusões em cromita da Mina Ipueira: contribuição para o entendimento da formação de cromititos no Complexo Jacurici, BA.”

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A cromita é um mineral cúbico de cor marrom-escuro 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 e 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 camadas de cromita tem sido alvo de debate desde longa data. A formação de cromitito espesso em um sistema ígneo 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 (ver 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 metros de espessura em um corpo de rochas ultramáficas estratificadas que variam de peridotitos até máficas, com dimensões relativamente restritas, com cerca de apenas 300 metros de espessura. Para explicar esta questão, o Complexo Jacurici tem sido interpretado como um sistema magmático de maiores dimensões, sendo que os corpos mineralizados pertenceriam em origem a um conduto posteriormente rompido tectonicamente, com distribuição de diversos segmentos ao longo de um cinturão orientado N-S. Marques *et al.* (2017) apresenta uma revisão deste contexto. No entanto, estes processos ainda necessitam ser melhor compreendidos.

Friedrich *et al.* (2020) realizou um trabalho de detalhe em um dos segmentos do Complexo Jacurici, o corpo Monte Alegre Sul, situado na porção intermediária do

cinturão. Neste trabalho, foram descritas diversas inclusões em cromita, incluindo diversos minerais hidratados, o que sugere um papel fundamental dos voláteis para a cristalização exclusiva 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) de um testemunho de sondagem da área da atual Mina de 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 na discussão. Os achados corroboram o trabalho de Friedrich *et al.* (2020) e fortalecem as evidências de formação complexa para o depósito.

1.1 Objetivos

O mecanismo geológico envolvido na formação de camadas maciças de cromititos estratiformes segue em debate. Este trabalho teve como objetivo, caracterizar as relações texturais e inclusões minerais hospedadas nas cromitas. Para isso, foram investigados os níveis disseminados e maciço do testemunho I-328-55°, obtido junto a mina Ipueira Sul. Desta forma, buscou-se fazer uma avaliação comparativa que permita identificar variações ao longo da seção vertical e assim contribuir com o debate acerca dos processos envolvidos na formação de camadas espessas de cromititos.

1.2 Geologia do Complexo Jacurici

O Complexo Máfico-ultramáfico Jacurici, localizado na porção nordeste do Cráton São Francisco (Fig. 1A) é considerado o maior depósito de cromo do Brasil, sendo configurado por 22 corpos intrusivos, alongados em sua maioria na direção N-S, que se estendem ao longo de uma faixa de mais de 70 km de extensão por 20 km de largura.

O Complexo Jacurici (Fig. 1B) faz parte dos remanescentes fortemente desnudados de uma grande província ígnea, deformada e metamorfoseada durante o Paleoproterozóico, que tem sido descrita como um enxame de soleiras máfico-ultramáficas ricas em cromita. As intrusões do complexo são encaixadas nas rochas do embasamento arqueano, composto por gnaisses quartzo-feldspáticos, mármore, metacherts e rochas calci-silicáticas (Barbosa de Deus e Viana 1982).

Em seu trabalho, Jardim de Sá (1984), aponta que Complexo Jacurici é intrusivo em uma sequência supracrustal de grande variabilidade litológica. Na região predominam gnaisses leucocrático granodiorítico a tonalítico, intercalados com anfibolitos, formações ferríferas, olivina-mármore, calcisilicáticas ricas em diopsídio, quartzitos, gnaisses granadiníferos e metacherts (Marinho *et al.* 1986).

Jardim de Sá (1984) e Marinho *et al.* (1986) consideram os ortognaisses como intrusões posteriores às rochas ultramáficas do Complexo Jacurici. Porém, os trabalhos realizados pela empresa FERBASA, que explora a área desde 1973, consideram o complexo como intrusivo em três grandes conjuntos litológicos: um conjunto de migmatitos e gnaisses muito deformados, de ocorrência restrita, um conjunto de paragnaisses e um conjunto de ortognaisses (Silveira *et al.* 2015). O conjunto denominado de paragnaisses inclui as lentes intercaladas de metassedimentares citadas. Silveira *et al.* (2015) realizaram estudos geocronológicos na área e demonstraram que os ortognaisses são, pelo menos parte, mais antigos que os paragnaisses. Marques *et al.* (2017) considera o complexo intrusivo no contato entre ortognaisses e sequências metassedimentares.

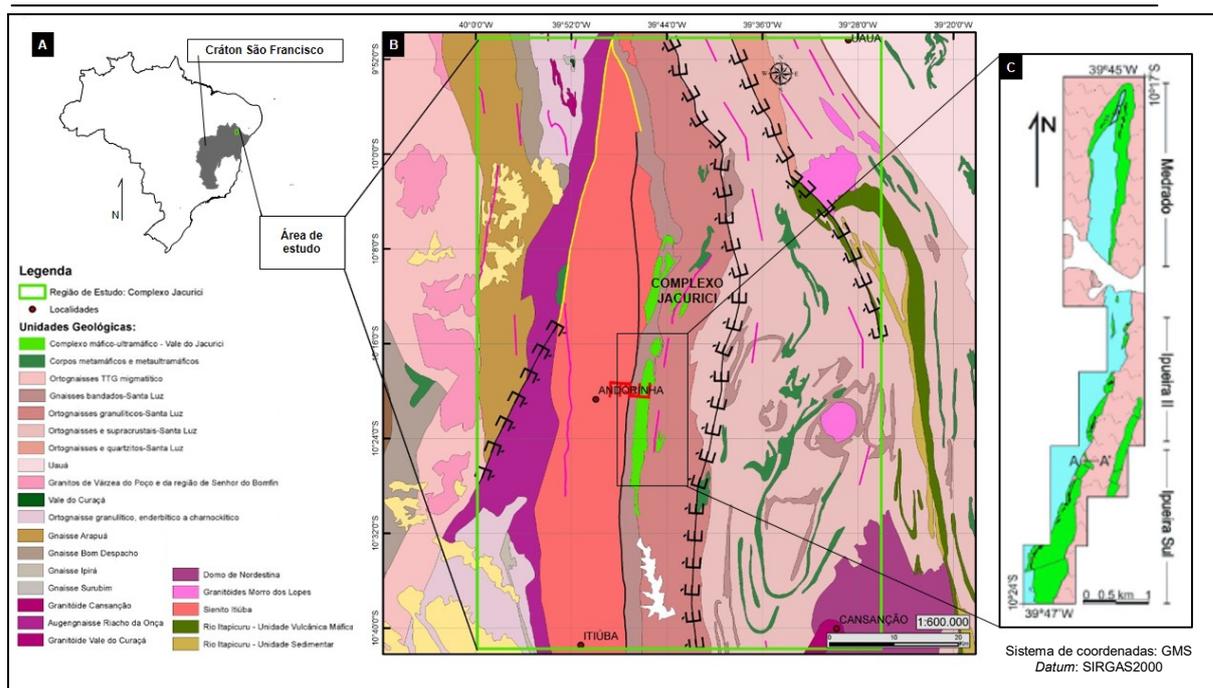


Figura 1 - Mapa de localização. A) Delimitação do Cráton São Francisco (adaptado de Marinho *et al.*, 1986), B) Mapa geológico regional (modificado de Souza *et al.*, 2003), C) seção Ipueira Sul, Ipueira I e Medrado (Adaptado da Divisão de Geologia da FERBASA, modificado de Marques *et al.*, 2017).

A idade mínima atribuída para as intrusões é igual ou superior a 2,1 Ga. Inicialmente foi estimada em 2.085Ma pela datação de zircões (U-Pb – SHRIMP) das rochas máficas do topo da sequência (Oliveira *et al.* 2004). Apesar de não haver uma idade magmática bem definida, Dias *et al.* (2022), associam a idade de 2,1 Ga obtida em zircões (LA-ICP-MS) com o pico metamórfico regional.

O complexo foi deformado e afetado pelo metamorfismo de fácies anfibolito a granulito resultando em alguns segmentos tectonicamente invertidos. Entretanto, a textura, mineralogia e as variações químicas próprias das rochas cumuláticas estão geralmente bem preservadas, sugerindo que o metamorfismo regional não foi eficaz nesses casos (Almeida *et al.* 2017; Dias *et al.* 2014; Marques e Ferreira Filho 2003; Ferreira Filho e Araújo 2009; Marques *et al.* 2017).

O sill Ipueira-Medrado, neste contexto, aflora como uma estrutura sinforme com 7 km de comprimento, 0,5 km de largura e 300m de espessura, sendo orientada N-S, paralelamente a foliação do embasamento regional (Marques *et al.* 2003). O

corpo rochoso é subdividido em três segmentos principais, de sul para norte, denominados Ipueira Sul, Ipueira II e Medrado (Figura 1C).

A partir do estudo integrado realizado por Marques (2001) e Marques *et al.* (2003), os autores propuseram o empilhamento estratigráfico (Fig. 2) dos segmentos em três zonas principais: (1) Zona Marginal, composta por rochas gabróicas altamente cisalhadas e que podem representar a porção inferior do corpo rochoso, (2) Zona Ultramáfica (até 250 m de espessura) composta principalmente de dunito, harzburgito, lherzolito e piroxenitos, e (3) Zona Máfica (até 40 m de espessura), na parte superior, representada por norito e gabronoritos. A zona ultramáfica foi dividida em três unidades: Unidade Ultramáfica Superior (UUS), Camada de Cromitito Principal (CCP) e a Unidade Ultramáfica Inferior (UUI).

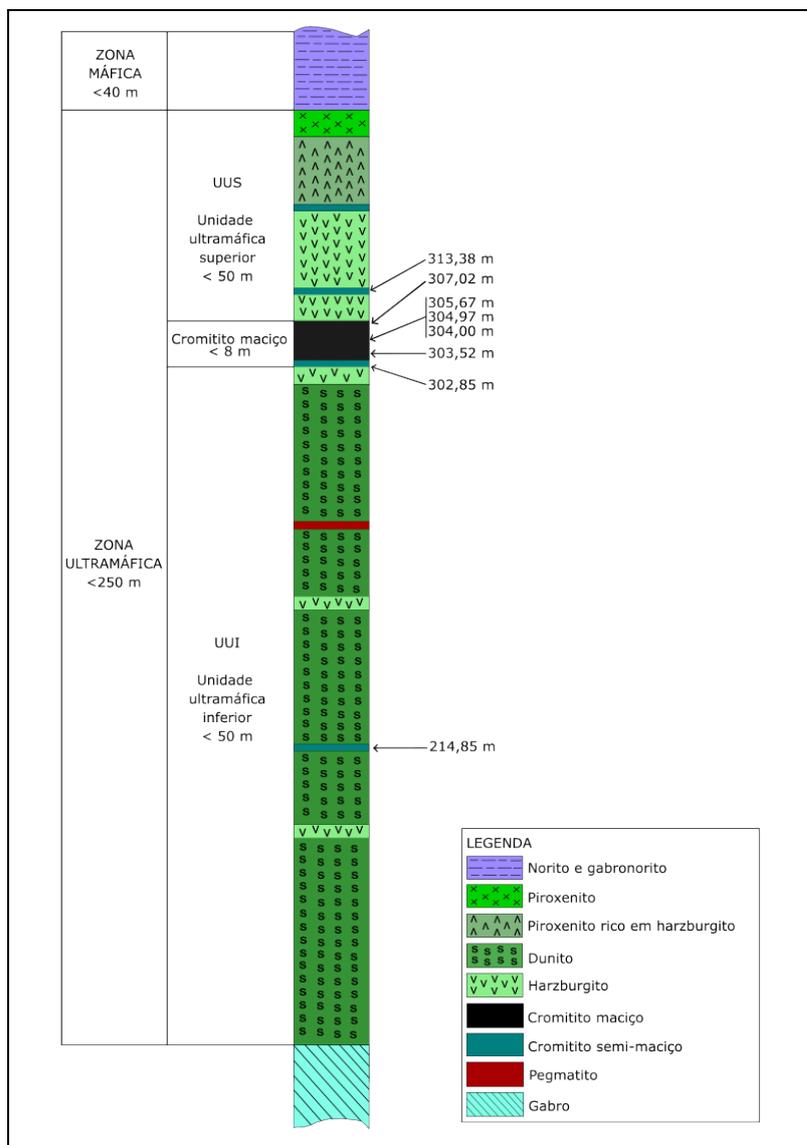


Figura 2 - Seção esquemática representativa do segmento Ipueira Sul, mostrando a sucessão estratigráfica do furo I-328-55o utilizado no trabalho de Marques e Ferreira Filho (2003). Estão marcados os intervalos utilizados no presente estudo. Note que a profundidade aumenta para o topo uma vez que neste intervalo a intrusão está invertida. 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).

As unidades Ultramáfica Inferior (UII) e Unidade Ultramáfica Superior (UUS) hospedam o minério nos harzburgitos de forma disseminada em camadas com textura em cadeia com até 0,5 e 1 m de espessura, respectivamente.

O minério de cromo (*lump*) está hospedado na Camada de Cromitito Principal (CPP), com < 8m de espessura, localizada próximo a base de cumulatos ricos em ortopiroxênio (Fig. 2). A cromita atinge >80% da rocha com ortopiroxênio parcial a totalmente alterado para serpentina e clorita.

1.2.1 Gênese dos depósitos

O modelo petrogenético discutido por Marques e Ferreira Filho (2003) para o depósito, com base no conteúdo de Mg das olivinas e ortopiroxênio, sugere que a cristalização do magma se deu em dois regimes distintos (Fig. 3).

Na UUI foi considerado um sistema aberto onde injeções de magma fresco e primitivo entraram na câmara enquanto o fracionamento foi transferido para câmaras mais rasas (pode ser notado o aumento na proporção de Mg tanto na olivina (fosterita) quanto no ortopiroxênio (enstatita). Desta forma, o aumento lento na proporção de Mg evidencia cristalização fracionada num sistema magmático aberto.

Na unidade superior (UUS) houve uma rápida diminuição da razão de Mg no *trend* composicional. Os autores apontam que a cristalização se deu num sistema fechado, constantemente abastecido por insignificantes injeções de magma primitivo e o fracionamento em direção a uma composição mais evoluída, evidenciada pela cristalização de plagioclásio, terminando numa sequência composta por noritos e gabronoritos da zona máfica. Dessa forma, a CCP representa um importante marcador petrológico, refletindo a transição de um regime magmático aberto para um regime magmático fechado.

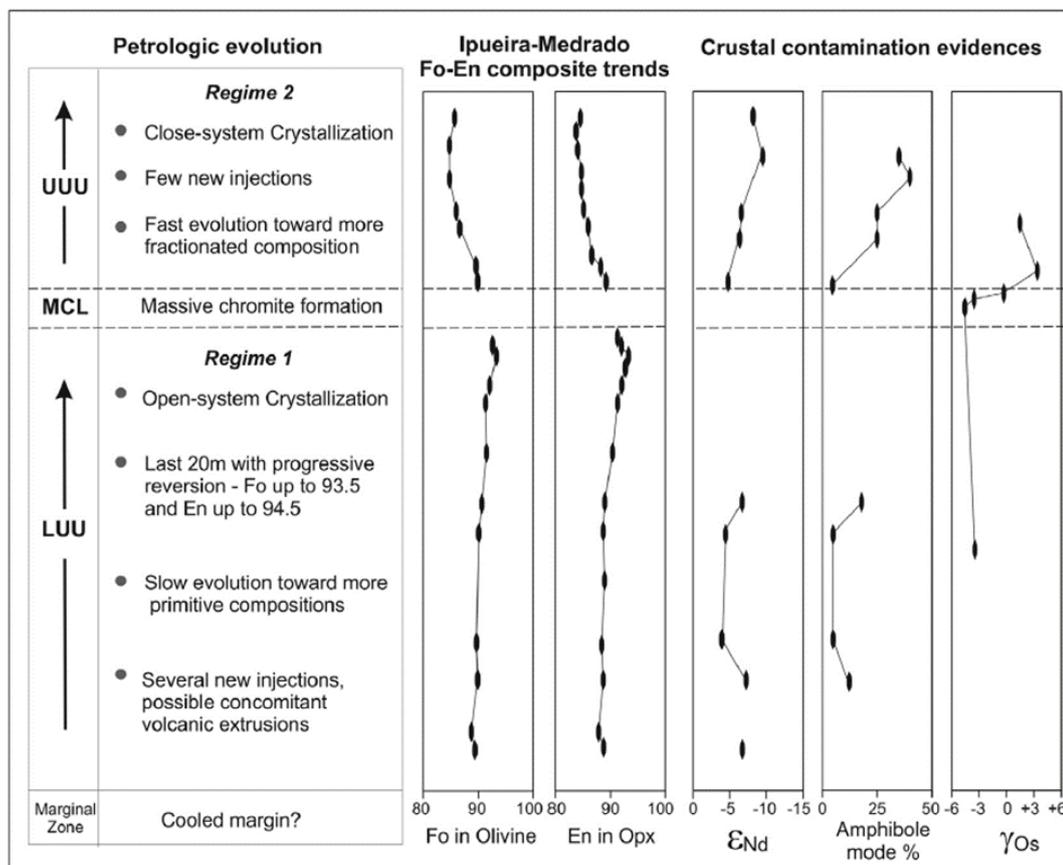


Figura 3 - Evolução petrológica esquemática sugerida para a intrusão mineralizada do complexo Jacurici com base na variação da estratigrafia ascendente na composição de olivina e ortopiroxênio, petrografia e composição isotópica de Nd (rocha total) e Os (separados de cromita). Fonte: Marques *et al.* (2017) a partir de dados de Marques e Ferreira Filho (2003) e Marques *et al.* (2003).

Oliveira Jr. (2001) atribui a gênese dos corpos máficos-ultramáficos à fusão de um manto hidratado em regime tectônico sin-colisional com a colocação desses corpos em zonas de controle estrutural. As elevadas razões Sr/Sr e ϵ_{Nd} muito negativas obtidas por Oliveira Jr. (2001) são compatíveis com contaminação crustal.

Com base em Re-Os combinado com ϵ_{Nd} , Marques *et al.* (2003) chegaram à conclusão que o magma parental para essa sequência ultrabásica é resultado de um alto grau de fusão do manto litosférico subcontinental arqueo metassomatizado com subsequente contaminação crustal.

A partir da afinidade geoquímica evidenciada em modelamentos utilizando elementos traço, os autores sugerem o magma parental da CCP como boninito baixo

Ti e alto magnésio ($\text{MgO} \cong 18$) ou basalto silicoso. Por meio de simulações utilizando dados de química mineral e rocha total, Ströher (2022) caracteriza o magma parental como boninito.

1.2.2. Formação da Camada de Cromitito Principal

O mecanismo geológico envolvido na formação de camadas maciças de cromititos estratiformes segue em debate. Diversos modelos têm sido propostos. Alguns autores sugerem que as principais condições estão relacionadas às mudanças químicas ou físicas do magma. Lipin (1993) relaciona às mudanças na pressão geradas por influxo de magma. Ulmer (1969) atribui à fugacidade de oxigênio.

Ao longo de muitos anos, os petrólogos tentaram encontrar fatores que controlassem a precipitação de cromititas. Uma possibilidade levantada é a interação entre fundidos e manto hidratado (Borisova *et al.* 2012). Latypov *et al.* (2018) argumentam sobre a importância na redução da pressão para a produção do magma supersaturado em cromita. Leshner (2017) e Leshner *et al.* (2019) sugerem assimilação de rochas ricas em óxido de ferro. Irvive (1975, 1977), propôs que magmas supersaturados em cromita foram produzidos a partir da mistura de magmas ou resultado de contaminação crustal.

Alternativamente, outros mecanismos para a formação de cromitita foram propostos, como pastas de cromita (Eales, 2000; Mondal e Mathez, 2007; Voordouw *et al.*, 2009) ou queda de cumulados semiconsolidados causando estratificação e espessamento (Maier e Barnes 2008; Maier *et al.* 2013). A ideia central do modelo de pasta de cromita considera uma intrusão de uma quantidade de magma carregando grãos de cromita previamente cristalizados (Eales 2000; Mondal e Mathez 2007).

A formação de tais camadas é problemática quando o balanço de massa é considerado. Para as intrusões do Complexo Jacurici, Marques *et al.* (2003) sugeriram que a câmara magmática atuou como um conduto para explicar a enorme quantidade de cromita hospedada em poucos metros de rochas silicáticas acumuladas. A hipótese de que a soleira atuou como um conduto foi concebida

considerando que seria necessária uma coluna de magma com mais de 10 km de espessura para formar um cromitito maciço de 5 a 8 m de espessura.

Marques *et al.* (2017) propôs um modelo combinado para os cromititos maciços do Complexo Jacurici (Fig. 4), onde a cromita cristalizou ao longo das margens do conduto (Fig. 4), produzindo assim uma pasta semiconsolidada que caiu para o fundo da câmara magmática formando a espessa camada de cromitito.

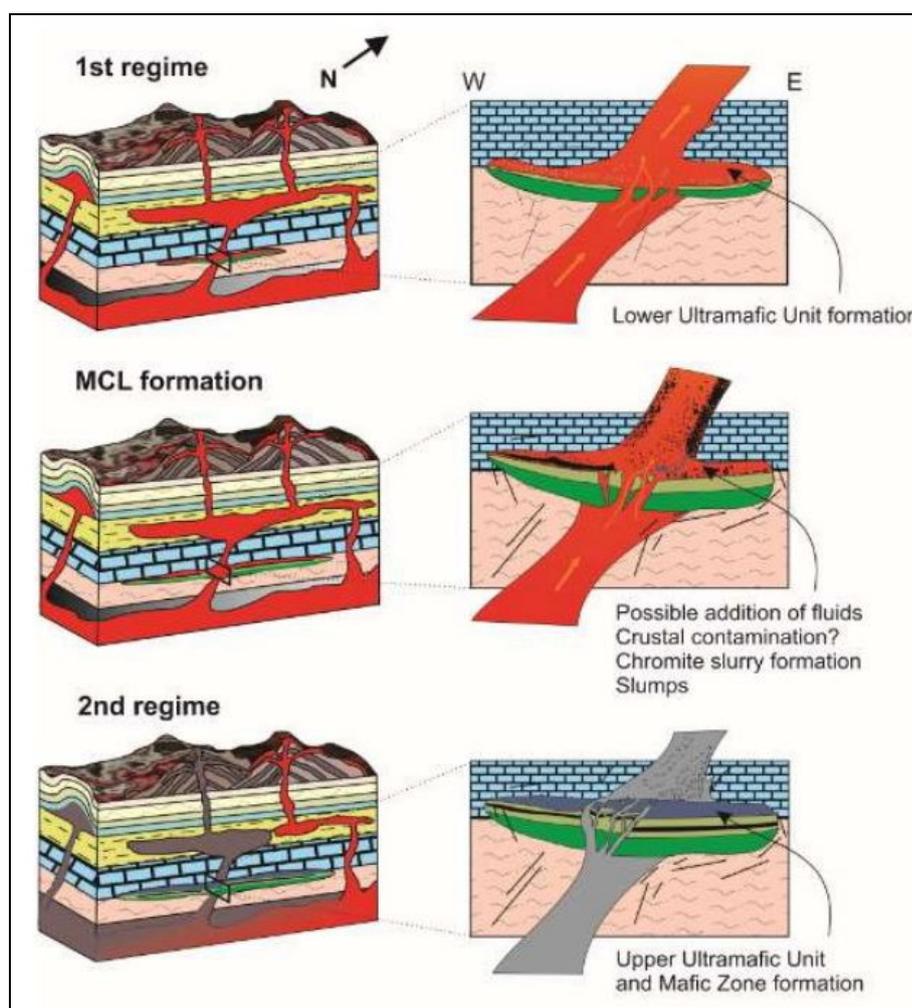


Figura 4 - Diagrama esquemático ilustrando a formação do depósito de cromita do Complexo Jacurici considerando uma câmara em formato de conduto. A cromita cristalizou *in situ* ao longo das margens do conduto criando uma pasta de cromita semi-consolidada que desmoronou e formou uma cromitita espessa dentro da parte alargada da câmara onde as rochas ultramáficas em camadas foram previamente formadas. Posteriormente, o conduto foi obstruído e o magma residente fracionou-se e cristalizou produzindo rochas mais evoluídas. Fonte: Marques *et al.* (2017).

Supondo que a intrusão tenha agido como um conduto, não está evidente qual o mecanismo necessário para formar a espessa camada maciça. Marques *et al.* (2003) consideraram difícil explicar a formação da CCP com base no modelo de mistura de magma (por exemplo, Campbell e Murck 1993; Irvine 1977), que envolve novos influxos de fusão primitiva entrando em uma câmara de magma e misturando-se com um magma residente fracionado.

A CCP está localizada em um intervalo onde o fundido na câmara magmática atingiu sua composição mais primitiva. É seguido por um intervalo mais fracionado, o oposto do que seria esperado do modelo de mistura. A composição isotópica mais radiogênica de Nd e Os no topo da CCP e nas camadas acima, além da relação direta entre a composição mais radiogênica e o aumento modal nas fases hidratadas (anfíbólio) nos harzburgitos, foram consideradas características principais (Marques *et al.* 2003). A ocorrência de inclusões minerais, incluindo silicatos hidratados inclusos em cromitas da CCP, somado à abundância de anfíbólio magmático, suporta o modelo de contaminação crustal e adição de fluídos, proposta anteriormente (Marques *et al.* 2017). A presença de fases de silicato hidratado como inclusões na cromita, e o aumento de anfíbólio próximo à CCP e em direção ao topo da intrusão são características importantes que sugerem que o magma foi hidratado nesses intervalos.

Ferreira Filho e Araújo (2009) sugeriram que a participação da contaminação crustal por rochas carbonáticas, marcadas pela presença de xenólitos calci-silicáticos, como também pela associação das rochas do complexo com encaixantes carbonáticas tenha exercido papel importante formação do cromitito.

O segmento Monte Alegre Sul, posicionado na região central do Complexo, aproximadamente 20 km foi investigado por Friedrich *et al.* (2020). Os autores argumentam sobre o papel fundamental dos voláteis para a cristalização exclusiva da cromita. A assimilação das rochas carbonáticas pelo magma primitivo em ascensão pode ter promovido desvolatilização e introduzido CO₂ e provavelmente liberado água no sistema. Assim sendo, os autores propuseram um modelo na qual o intervalo basal seja o resultado da cristalização *in situ* com material adicionado por deslizamentos de lama cromitífera remobilizada localmente, processo facilitado pela presença de voláteis.

CAPÍTULO II

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Revisão bibliográfica

A etapa de levantamento bibliográfico se estendeu ao longo de todo o período de mestrado, e foi baseada na pesquisa, leitura e interpretação de artigos científicos e publicações inerentes aos processos de formação de cromititos em complexos máfico-ultramáficos. Foram investigados modelos de formação de cromititos, relações texturais entre cristais de cromitas e inclusões minerais, assim como o contexto geológico e geotectônico da porção nordeste do Cráton São Francisco.

2.2 Amostragem

Com base no testemunho I-328-55° retirado da mina Ipueira Sul, oito (08) seções delgadas polidas foram criteriosamente selecionadas para o propósito deste estudo. A escolha das amostras teve como critério avaliar quantitativamente a presença de inclusões minerais nas cromitas das camadas maciça e disseminadas ao longo da zona ultramáfica. Desta forma, foram selecionadas amostras que abrangem os níveis disseminados contidos nas Unidade Ultramáfica Inferior (UUI) e Unidade Ultramáfica Superior (UUS) e em diferentes profundidades da Camada de Cromitito Principal (CCP).

2.3 Análise petrográfica

A análise petrográfica dos grãos de cromita e das inclusões minerais foi efetuada por meio da aquisição de imagens sob Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo 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 - UFRGS. O equipamento

foi operado com tensão de aceleração de 15 kV e uma distância de trabalho de 11 mm. Metalização com ouro foi utilizada na preparação.

De forma sistemática, foram observadas as características relacionadas à textura, forma e contato entre os grãos de cromita, assim como a forma, volume estimado e distribuição das inclusões.

A microtomografia computadorizada de raios X (uCT) consiste em uma análise que utiliza as ondas eletromagnéticas raios X para obtenção de imagens de sólidos em alta resolução que, quando interpoladas, resultam em um modelo tridimensional digital. Neste trabalho, a técnica foi utilizada para a obtenção de um modelo digital tridimensional da amostra 310,63 do furo I-765-90° do corpo Ipueira. Para a análise, a amostra foi serrada até as dimensões de 2 cm de altura x 4 cm de largura x 10 cm de comprimento.

Com a intenção de visualizar somente os cristais de cromita no modelo, foram delimitados os picos de densidade dos silicatos e da cromita e selecionado apenas o pico de densidade da cromita retirando os silicatos do modelo. As análises foram realizadas no microtomógrafo *Skyscan 1173, Bruker*, do Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (IPR-PUCRS). As condições analíticas consideraram 130kV, 61 μ A, resolução de 15 μ m, passo de 0,20° e uso de filtro Brass 0.25mm. Para o aperfeiçoamento do modelo foram utilizados os *softwares Data Viewer e MeshLab*; no *Data Viewer* o modelo foi seccionado a partir de cortes estratégicos nos eixos (X, Y, Z) para visualizar o interior da amostra. Com o *MeshLab* foram aprimoradas a resolução e coloração do sólido e determinado o modelo final.

2 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Com suporte de Microscopia Eletrônica de Varredura em amostras do furo I-328-55° do segmento Ipueira, observou-se que a cromita perfaz cerca de 30 a 40% em volume nos cromititos semimaciços, hospedados nos dunitos na Unidade Ultramáfica Inferior (UUI) e nos harzburgitos da Unidade Ultramáfica Superior (UUS). Texturalmente são similares e demonstram cristais mais finos (0,1 a 0,2 mm),

quando próximos dos silicatos e mais grossos (até 0,8 mm) quando afastados, porém esse comportamento pode variar.

A ocorrência de cromita portando ao menos uma inclusão representa <5% em relação ao volume total de cristais desse minério. Quanto à tipologia das inclusões, foi identificado apenas ortopiroxênio. A única diferença petrográfica observada entre estas camadas semimaciças foi a presença de magnetita tardia nos contatos entre alguns cristais de cromita na amostra da UUS.

A Camada de Cromitito Principal (CCP) é composta na base por cromitito semimaciço, contendo até 60% de volume em cromita. Desse volume, entre 10 e 20% dos cristais portam inclusões. A amostra da base da CCP se assemelha às características texturais observadas nas demais camadas semimaciças. A cromita ocorre como agregados finos (0,2 a 0,8 mm) e entre 10% e 20% dos cristais portam ao menos um inclusão.

As amostras da porção maciça da CCP podem alcançar até 90% em volume de cromita e portarem entre 20 e 90% de cristais contendo inclusões. Dentro dessa sequência foram observadas cromitas entre 0,01 e 0,6 mm e porções exibindo compactação expressiva e características de *annealing*, o que não é incomum em camadas maciças de cromitito. No topo da CCP, próximo ao contato com harzburgito da UUS, o volume de cromitas fica em torno de 80%, porém o volume de cristais contendo inclusões diminui, representando entre 15% e 25%. A tipologia das inclusões na CCP é semelhante à reportada por Friedrich *et al.* (2020), com presença de silicatos não hidratados como olivina e ortopiroxênio. De forma menos comum ocorre clinopiroxênio em pequenos cristais. Inclusões de silicatos hidratados são comuns e geralmente estão representadas por anfibólio (hornblenda). Os eixos cristalográficos podem hospedar tanto inclusões hidratadas quanto não hidratadas de silicatos. 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.

O modelo digital tridimensional obtido por meio da microtomografia de raios-X na amostra do furo I-765-90° do corpo Ipueira, demonstra a transição abrupta da porção semimaciça para maciça na CCP.

Os resultados corroboram 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.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, H. L. de; Cabral, E. B.; Bezerra, F. X. 2017. Evolução deformacional das rochas do Vale do Jacurici: implicações para a estruturação dos corpos cromitíferos máfico-ultramáficos. *Geologia USP. Série Científica*, 17(2), 71-88.

Barbosa J.S.F., Mascarenhas S.J.F., Gomes L.C.C. 2012. *Geologia da Bahia: pesquisa e atualização*. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. 562p.

Barnes, S. J. Chromite in komatiites. 2017. Magmatic controls on crystallization and composition. *Journal of Petrology*, 39(10), 1689-1720.

Borisova, A.; Ceuleneer, G.; Kamenetsky, V.; Arai, S.; Béjina, F.; Bindeman, I.; Polvé, M.; De Parseval, P.; Aigouy, T.; Pokrovski, G. 2012. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions. *Journal of Petrology*, 53(12), 2411–2440.

Dias J.R.V.P., Marques J.C., Bertolini G., Frantz J.C., Friedrich B., Paim J.C.S., Silveira C.J.S., Queiroz W.J.A. 2022. Regional highgrade metamorphic peak imprint in zircons from the mafic-ultramafic Jacurici Complex, São Francisco Craton, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52(1):e20210007

Eales, H.V. 2000. Implications of the chromium budget of the Western Limb of the Bushveld Complex. *South African Journal of Geology*. 103(2): 141–150.

Ferreira Filho, C.F., Araujo, S.M. 2009. Review of Brazilian Chromite Deposits Associated with Layered Intrusions: Geological and Petrological Constraints for the Origin of Stratiform Chromitites. *Applied Earth Science*. 118(3–4):86-100.

Friedrich, B.M.; Marques, J.C; Olivo, G. R.; Frantz, J.C.; Alegria, B.; Queiroz, J. A. Q. 2020. Petrogênese da camada maciça de cromita do Complexo Jacurici, Brasil: evidências de inclusões em cromita. *Mineralium Deposita*. 55(6):1105-1126.



Irvine TN. 1975. 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*, 39(6-7):991–1020.

Irvine TN. 1977. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other layered intrusions: a new interpretation. *Geology*, 5(273–277).

Jardim de Sá, E.F 1984. *Geologia da região do Vale do Jacurici*. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Relatórios Técnicos, 17 p.

Latypov, R.; Costin, G.; Chistyakova, S.; Hunt, E.J.; Mukherjee, R.; Naldrett, T. 2018. Platinum-bearing chromite layers are caused by pressure reduction during magma ascent. *Nature Communications*, 9(462).

Latypov, R., Chistyakova, S., Barnes, S.J. *et al.* 2022. Chromitite layers indicate the existence of large, long-lived, and entirely molten magma chambers. *Nature Scientific Reports*, 12(4092).

Leshner, C.M. 2017. Roles of xenomelts, xenoliths, xenocrysts, xenovolatiles, residues, and skarns in the genesis, transport, and localization of magmatic Fe-Ni-Cu-PGE sulfides and chromite. *Ore Geology*, 90:465–484.

Leshner, C.M.; Carson, H.J.E.; Houlié, M.G. 2019. Genesis of chromite deposits by dynamic upgrading of Fe±Ti oxide xenocrysts. *Geology*, 47:207–210.

Lipin B.R. 1993. Pressure increases, the formation of chromite seams, and the development of the ultramafic series in the Stillwater Complex, Montana. *Journal of Petrology*, 4:955–976.

Maier WD, Barnes S-J, Grooves. 2013. The Bushveld Complex, South Africa: formation of platinum-palladium, chrome- and vanadium-rich layers via hydrodynamic sorting of a mobilized cumulate slurry in a large, relatively slowly cooling, subsiding magma chamber. *Mineralium Deposita*, 48(3):1–56.

Maier, W.D., Prevec, S.A., Scoates, J.S. *et al.* 2018. The Uitkomst Intrusion and Nkomati Ni-CuCr-PGE Deposit, South Africa: Trace Element Geochemistry, Nd Isotopes and High-Precision Geochronology. *Mineralium Deposita*, 53(1): 67–88.

Marinho MM, Rocha GF, Deus PB, Viana JS. 1986. Geologia e Potencial cromitífero do Complexo Jacurici. 34º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Goiânia, p. 2074–88.

Marques J.C., Ferreira Filho C.F., Carlson RW, Pimentel MM. 2003. 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*, 44(4): 659-678.

Marques J.C., Ferreira Filho C.F. 2003. The chromite deposit of the Ipueira-Medrado Sill, São Francisco Craton, Bahia State, Brazil. *Economy Geology*, 98: 87–108.

Marques J.C., Dias JRVP, Friedrich B.M., Frantz J.C., Queiroz W.J.A., Botelho N.F. 2017. Thick Chromitite of the Jacurici Complex (NE Craton São Francisco, Brazil): cumulate chromite slurry in a conduit. *Ore Geology Reviews*, 9:131–147.

Naldrett, A.J., Wilson, A., Kinnaird, J., Yudovskaya, M., and Chunnett, G. 2012.. The origin of chromitites and related PGE mineralization in the Bushveld Complex: *Mineralium Deposita*, 47:209-232.

Oliveira E.P., Windley B.F., McNaughton N., Pimentel M., Fletcher I.R. 2004. Contrasting copper and chromium metallogenic evolution of terranes in the Paleoproterozoic Itabuna-Salvador-Curaçá orogen, São Francisco Craton, Brazil: New zircon (SHRIMP) and SmNd (model) ages and their significance for orogen parallel escape tectonics. *Precambrian Research*, 128:143–165.

Papp, J.F.; Lipin, B.R. 2010. Chromium and Chromium Alloys. *In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, (Ed.).

Souza J.D.; Melo, R. C; Kosin M. 2003. *Mapa geológico do estado da Bahia*. Bahia. Escala 1:1000 000. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

Ströher, M. 2022. *Formação de cromitito do Complexo Jacurici, Cráton São Francisco, Bahia: modelamento petrogenético a partir de simulações com uso do software melts*. Porto Alegre, 79p. Monografia de Conclusão de Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

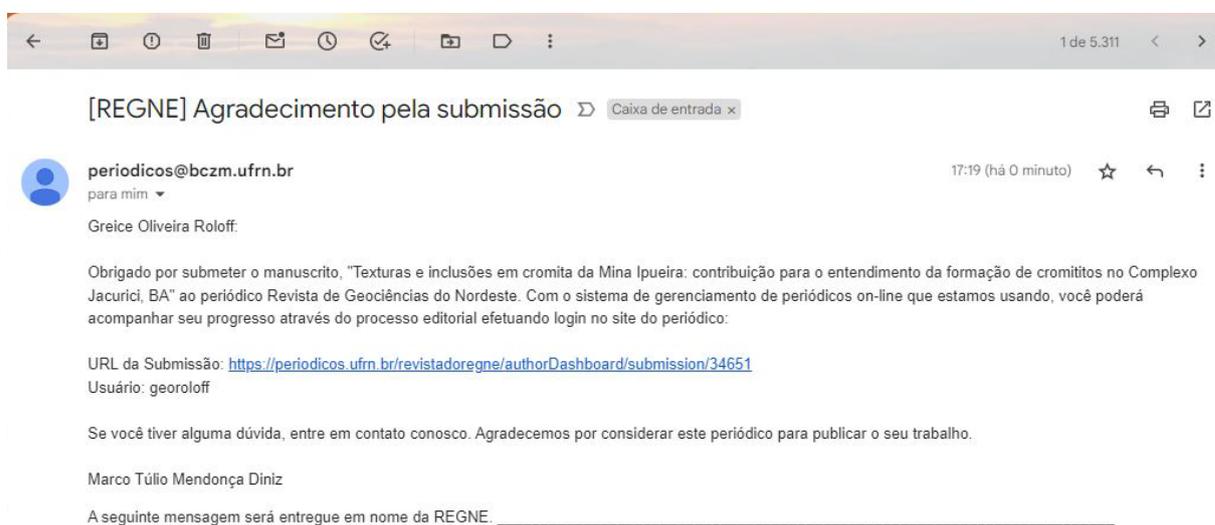
Ulmer G.C. 1969. Experimental investigations of chromite spinels. *In WILSON HDB (ED) MAGMATIC ORE DEPOSITS, A SYMPOSIUM ECONOMY GEOLOGY*. Montreal v.4, 114p.

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*, 97:75–94.

CAPÍTULO III

5 ARTIGO CIENTÍFICO

Neste capítulo é apresentado o corpo principal desta dissertação, confeccionado na forma de artigo produzido pela autora e colaboradores e submetido à Revista do Nordeste de Geociências – REGNE. O e-mail de submissão pode ser observado abaixo:



Texturas e inclusões em cromita da Mina Ipueira: contribuição para o entendimento da formação de cromititos 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.

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 cromititos tem sido alvo de debate. No Brasil, o Complexo máfico-ultramáfico 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 magmático 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 Ipueira, área que abriga uma importante mina subterrânea. Os resultados corroboram 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 mafic-ultramafic 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 Ipueira segment, an area hosting a major underground mine. 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 semi-massive 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 e 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 camadas de cromita tem sido alvo de debate desde longa data. A formação de cromitito espesso em um sistema ígneo 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 (ver 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 metros de espessura em um corpo de rochas ultramáficas estratificadas que variam de peridotitos até máficas, com dimensões relativamente restritas, com cerca de apenas 300 metros de espessura. Para explicar esta questão, o Complexo Jacurici tem sido interpretado como um sistema magmático de maiores dimensões, sendo que os corpos mineralizados pertenceriam em origem a um conduto posteriormente rompido tectonicamente, com distribuição de diversos segmentos ao longo de um cinturão orientado N-S. Marques *et al.* (2017) apresenta uma revisão deste contexto. No entanto, estes processos ainda necessitam ser melhor compreendidos.

Friedrich *et al.* (2020) realizou um trabalho de detalhe em um dos segmentos do Complexo Jacurici, o corpo Monte Alegre Sul, situado na porção intermediária do cinturão. Neste trabalho, foram descritas diversas inclusões em cromita, incluindo diversos minerais hidratados, o que sugere um papel fundamental dos voláteis para a cristalização exclusiva 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) de um testemunho de sondagem da área da atual Mina de 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 na discussão. Os achados corroboram o trabalho de Friedrich *et al.* (2020) e fortalecem as evidências de formação complexa para o depósito.

2. Contexto geológico

O Complexo Máfico-ultramáfico Jacurici, localizado na porção nordeste do Cráton São Francisco (Figura 1), no estado da Bahia, hospeda o maior depósito de cromo do Brasil, sendo configurado por 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).

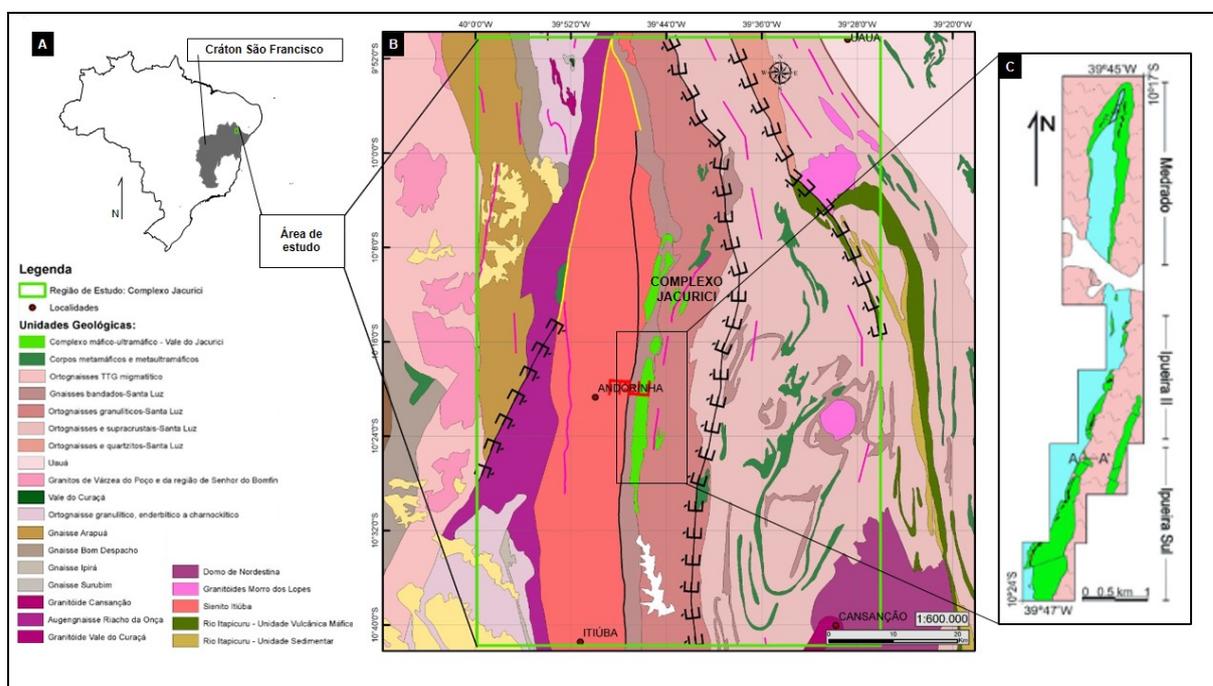


Figura 1 – A. Delimitação do Cráton São Francisco; B. Mapa geológico regional, C. Seção Ipueira Sul, Ipueira I e Medrado. Fonte: A. modificado de Souza *et al.*, 2003 e B. adaptado da Divisão de Geologia da FERBASA (relatório interno), modificado de Marques *et al.*, (2017).

O Complexo Jacurici faz parte dos remanescentes de uma grande província ígnea, deformada e metamorfoisada 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 enorme maciço alcalino Paleoproterozoico N-S de 150 km de

extensão. As intrusões do complexo são encaixadas nas rochas do embasamento arqueano, composto por gnaisses quartzo-feldspáticos, mármores, *metacherts* e rochas calci-silicáticas (DE DEUS e VIANA, 1982, *SILVEIRA et al.*, 2015, *DIAS et al.*, 2022). A idade mínima atribuída 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 anfíbolito 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 alguns segmentos tectonicamente invertidos. Entretanto, a textura, mineralogia e as variações químicas das rochas cumuláticas estão localmente bem preservadas, embora serpentização seja intensa de um modo geral (*BARBOSA DE DEUS e VIANA*, 1982, *MARQUES E FERREIRA FILHO*, 2003; *DIAS et al.*, 2014; *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 três zonas principais, da base para o topo: (1) Zona Marginal, composta por rochas gabróicas altamente cisalhadas, (2) Zona Ultramáfica (até 250 m de espessura) composta principalmente de dunito, harzburgito e piroxenito, e (3) Zona Máfica (até 40 m de espessura), na parte superior, representada por norito. A zona ultramáfica foi subdividida em três unidades: Unidade Ultramáfica Inferior (UUI), Camada de Cromitito Principal (CCP) e a Unidade Ultramáfica Superior (UUS). A Zona Marginal foi posteriormente descartada como parte do magmatismo principal devido a composição química distinta (*MARQUES et al.*, 2003).

As Unidade Ultramáfica Inferior e Superior hospedam camadas semi-maciças de cromitito, de 0,5 e 1 metro de espessura, com textura em rede marcada por cristais maiores de olivina/ortopiroxênio já totalmente serpentizados contornados por cromita euédrica de tamanhos menores. A Camada de Cromitito Principal tem até 7 metros de espessura, geralmente tendo na base uma porção de cerca de 1 metro de cromitito semimaciço que é seguida por minério de cromo maciço (*lump*) com cromita perfazendo até 90% da rocha. O minério semimaciço tem tendência a formar textura em rede com olivina/ortopiroxênio já totalmente serpentizado e o maciço é

caracterizado por apresentar ortopiroxênio intersticial e/ou poiquilítico pouco preservado, geralmente também transformado para serpentina.

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

Marques *et al.* (2003) realiza estudo petrológico com isótopos de Os e Nd e sugere, como fonte do magmatismo, uma antiga litosfera subcontinental. O magma primitivo gerado teria sofrido contaminação crustal próximo ao intervalo da CCP. As inclusões minerais, descritas por Friedrich *et al.* (2020) em cromita no segmento Monte Alegre Sul, apresentam evidências de magma enriquecido com H₂O e CO₂ durante a formação do minério o que levou a sugestão de que paredes ricas em carbonato das encaixantes teriam sido assimiladas, elevando a fO₂ e desencadeando a cristalização de cromita. Foi entendido que a cristalização teria iniciado *in situ*, mas teria sido seguida por acumulação devido a deslizamentos de acumulados de cristais (slurry), processo facilitado pela presença de voláteis.

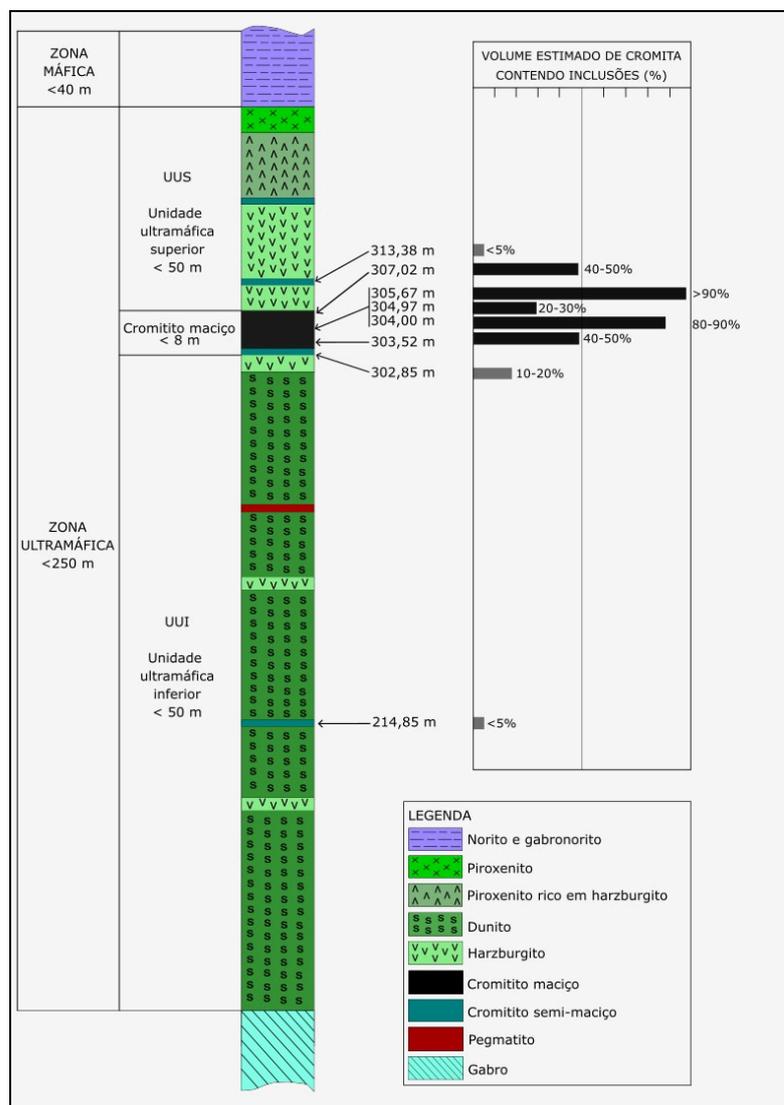


Figura 2 – Seção esquemática representativa do segmento Ipueira Sul, mostrando a sucessão estratigráfica do furo I-328-55° utilizado no trabalho de Marques e Ferreira Filho (2003). Estão marcados os intervalos utilizados no presente estudo. Note que a profundidade aumenta para o topo uma vez que neste intervalo a intrusão está invertida. 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 para o propósito deste estudo, sendo as mesmas obtidas a partir de amostras estudadas previamente por Marques e Ferreira Filho (2003) referente ao testemunho de sondagem I-328-55°. A

escolha das amostras teve como critério a existência de estudos prévios e objetivou avaliar a textura dos cristais de cromita e presença de inclusões ao longo da estratigrafia do segmento Ipueira, com detalhamento da camada maciça. Foram selecionadas amostras de 3 diferentes camadas, sendo duas amostras de camadas semi-maciças que ocorrem abaixo e acima do cromitito principal, respectivamente, nas Unidade Ultramáfica Inferior (UII) 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 da aquisição de imagens sob Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo 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 - UFRGS. O equipamento foi operado com tensão de aceleração de 15 kV e uma distância de trabalho de 11 mm. Metalização com ouro foi utilizada na preparação. De forma sistemática, foram observadas as características relacionadas à textura, forma e contato entre os grãos de cromita, assim como a forma, distribuição das inclusões e estimativa de volume de cristais portadores de inclusões em relação aos não portadores.

A microtomografia computadorizada de raios X (uCT) em alta resolução foi utilizada para a obtenção de um modelo digital tridimensional da amostra 310,63 do furo I-765-90° do corpo Ipueira. Para a análise, a amostra foi serrada até as dimensões de 2 cm de altura x 4 cm de largura x 10 cm de comprimento. Com a intenção de visualizar somente os cristais de cromita no modelo, foram delimitados os picos de densidade dos silicatos e da cromita e selecionado apenas o pico de densidade da cromita retirando os silicatos. 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 consideraram 130kV, 61 μ A, resolução de 15 μ m, passo de 0,20° e uso de filtro Brass 0.25mm. Para o aperfeiçoamento do modelo foram utilizados os *softwares Data Viewer* e *MeshLab*; no *Data Viewer* o modelo foi seccionado a partir de cortes estratégicos nos eixos (X, Y, Z) para visualizar o interior da amostra. Com o *MeshLab* foram aprimorados a resolução e coloração do sólido e determinado 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 UII (amostra 214,85 m) e em harburgitos na UUS (amostra 313,38), são texturalmente similares. 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, por vezes com relictos preservados, circundados por cristais mais finos de cromita. Os cristais de cromita são, em geral, finos (0,1 a 0,2mm) quando próximos aos silicatos e mais grossos (até 0,8mm) quando afastados, embora isto possa variar. A cromita tende a ser subédrica, pouco fraturada e com bordos arredondados a retos, por vezes irregulares (Figura 3). A ocorrência de cromita portando 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.

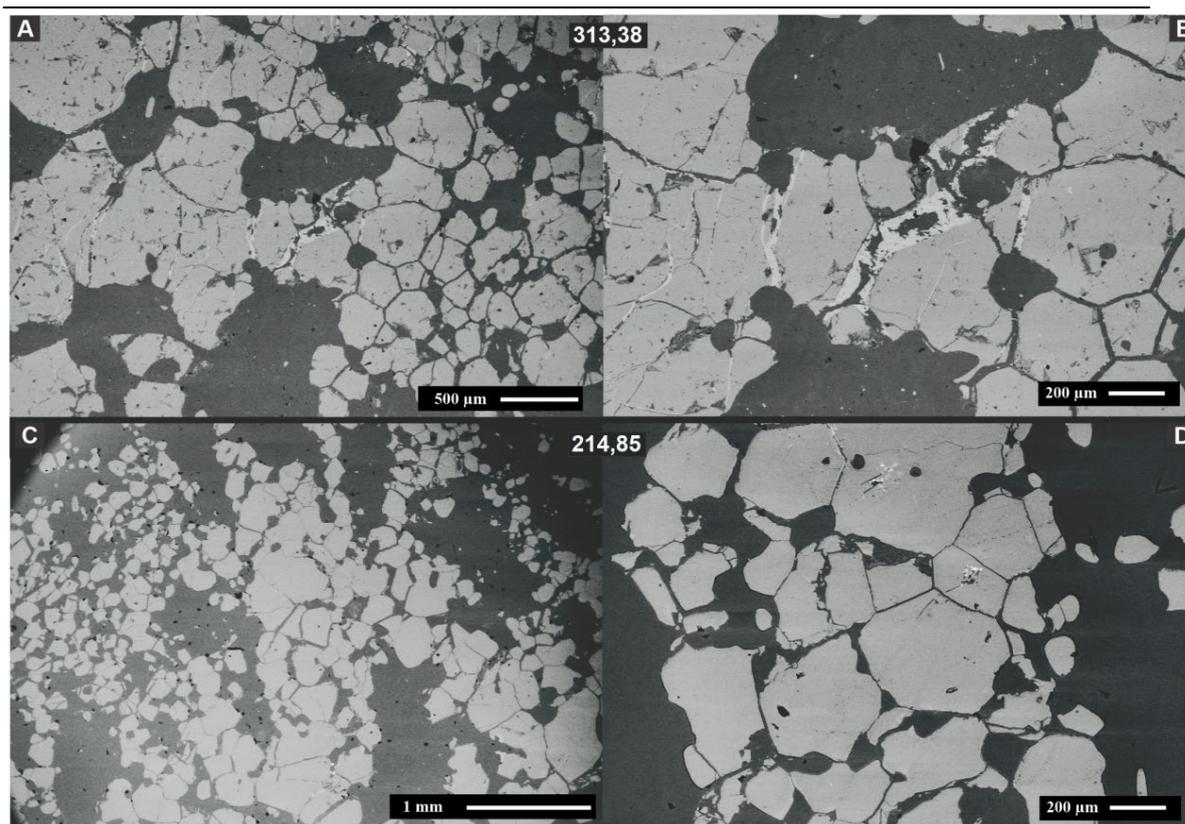


Figura 3: Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) mostrando o aspecto geral dos cristais de cromita ao longo da camada de cromitito principal. A e B. Amostra 313,38 que representa cromitito semimaciço da camada acima do cromitito principal, na UUS, com textura em rede e ocorrência de magnetita tardia entre cristais de cromita. C e D. Amostra 214,85 que representa cromitito semimaciço da camada abaixo do cromitito principal, na UUI, com textura em rede. Fonte: os autores.

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 retroespalhados 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 (%)
Ultramáfica	UUS	313,38	semimaciço	<5
	CCP	307,02	maciço	15 - 25
		305,67		> 90 (alguns com muitas)
		304,97		20 - 30
		304,00		80-90 (alguns com muitas)
		303,52		40 - 50
		302,85		semimaciço
	UII	214,85	semimaciço	< 5

Fonte: elaborada pelos autores.

A amostra 302,85 representa a porção semimaciça (Figura 4 J, L). Em geral, se assimila as características texturais observadas nas demais camadas semimaciças. A cromita ocorre como agregados relativamente finos (0,2 a 0,8mm) 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 dos cristais.

A primeira amostra da porção maciça é a 303,52 (Figura 4H e 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, 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 tendem a ocorrer agrupados ao redor de espaços que lembram textura em rede, porém achatadas. Apresentam algumas fraturas e podem ter borda irregular, porém predomina bordas retas. O destaque nesta amostra é o volume de cristais com inclusões que chega a ser de 80 a 90%. Alguns cristais têm dezenas de pequenas inclusões que podem estar concentradas no núcleo ou formar anéis na borda, ou mesmo distribuídas em todo o cristal (Figura 4G). Alguns cristais têm 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 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 subédrico. 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 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 5D). 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 5E),

Em relação ao topo da CCP, a amostra 307,02 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, variam de 0,1 a 0,5mm, 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.

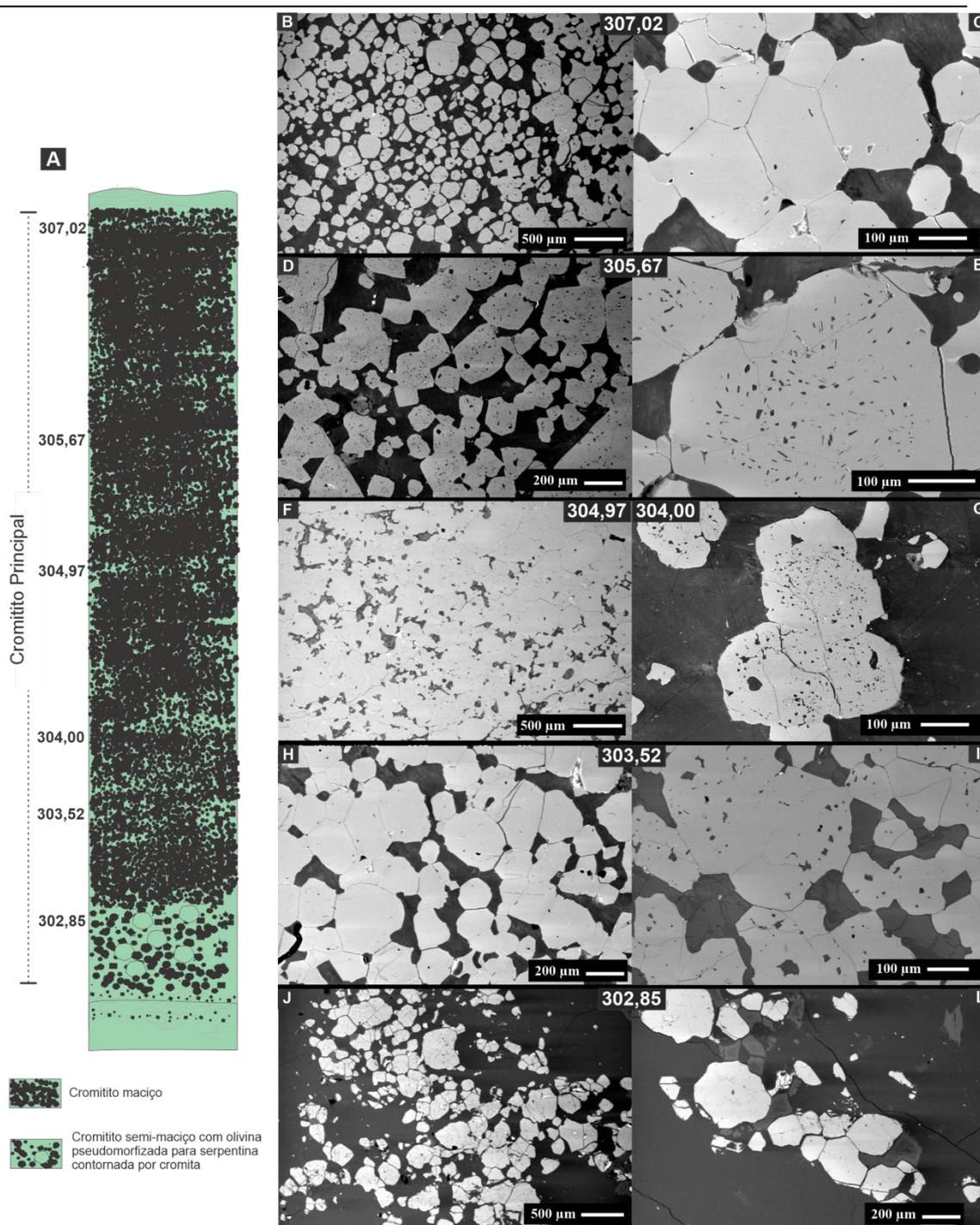


Figura 4: Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) mostrando o aspecto geral dos cristais de cromita ao longo da camada de cromitito principal. A. Perfil esquemático ilustrando base com cromitito semimacioso com contato abrupto para cromitito maciço. B e C. Amostra 307,02, topo da camada, com cromita com pouca inclusão e sem compactação. D e E. Amostra 305,67, intervalo com mais de 90% dos cristais contendo muitas inclusões com distribuições variadas. F. Aspecto geral da amostra 304,97 mostrando compactação, alguns cristais com inclusões, mas não abundantes. G. Detalhe da amostra 304,00 mostrando intervalo com menor

compactação e cristais com abundantes inclusões, embora ocorram vários sem inclusões. H e I. Amostra 303,52, aspecto geral e detalhe, mostrando cristais com inclusões, mas não abundantes. J e L. Amostra 302,85 representativa do intervalo semimacizo da base, mostrando distribuição dos cristais e quase ausência de inclusões. São cromitas formando textura em rede, B. cristal de cromita contendo raras inclusões, C. aumento na ocorrência de cromitas na base da CCP; D. Cromitas portando poucas inclusões; E, F. Cromitas na mesma seção contendo ou não inclusões; G. Cromitas intensamente fraturadas; H. Detalhe da abundância e formas variadas das inclusões num mesmo cristal. Fonte: os autores.

Com relação a tipologia das inclusões, foi observada uma variação similar a reportada por Friedrich et al. (2020) 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. 5^a 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.

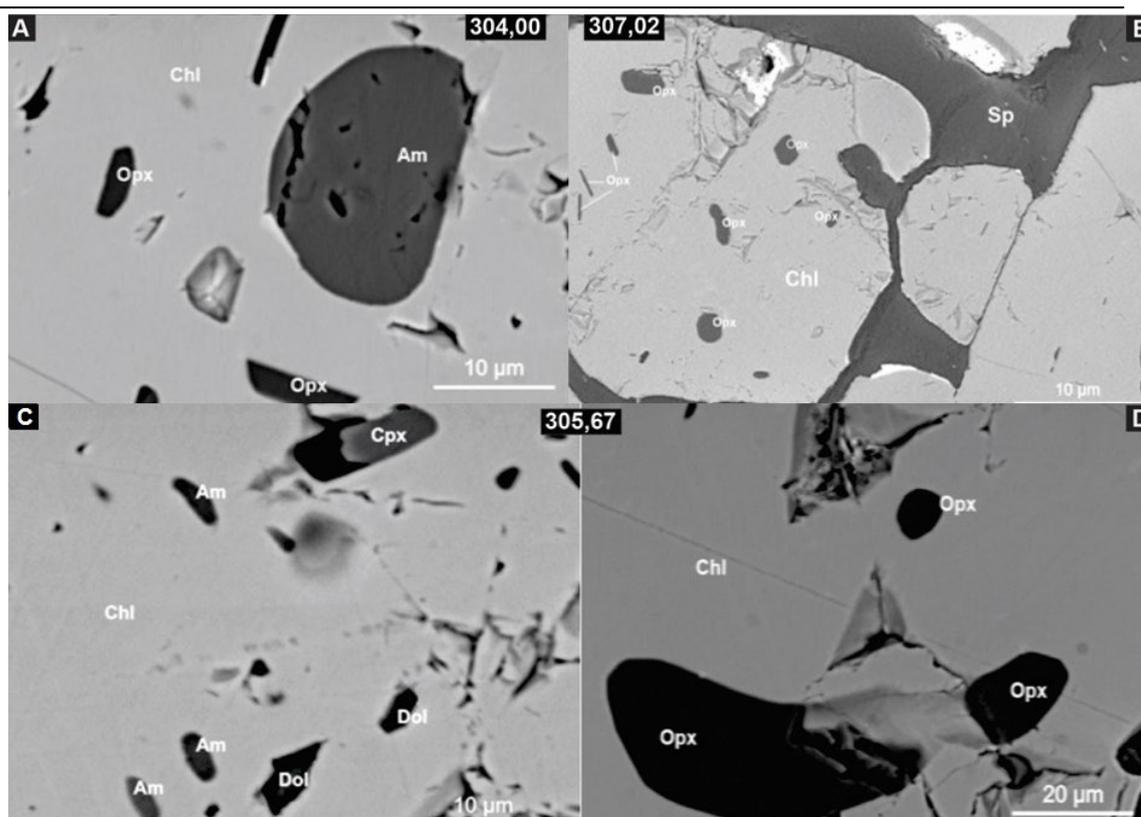


Figura 5: Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) mostrando as inclusões mais frequentes encontradas em cromita na camada maciça do corpo Ipueira. A. Amostra 304,00 exibindo uma inclusão relativamente grande de anfibólio (am) e também ortopiroxênio (opx) alongado no eixo cristalográfico de cromita. B. Amostra 307,02 mostrando cristal com distribuição aleatória de inclusões de ortopiroxênio. C. e D. Amostra 305,67 mostrando diferentes minerais inclusos no mesmo cristal de cromita (C), incluindo ortopiroxênio, anfibólio, clinopiroxênio e dolomita (dol) e, uma inclusão de dimensões relativamente grande de ortopiroxênio (D). Fonte: os autores.

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 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.

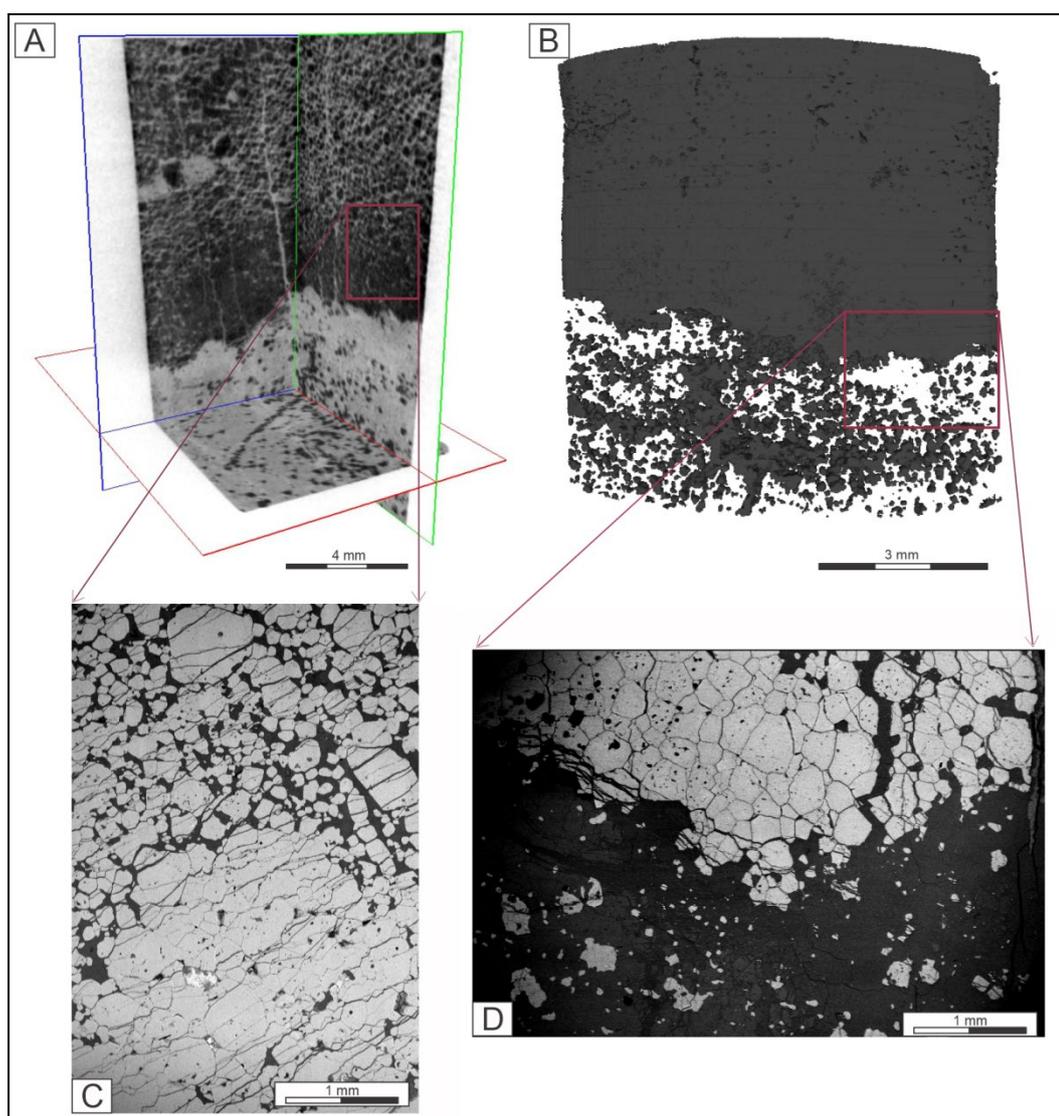


Figura 6. Amostra 310,63 do furo I-765-90° do corpo Ipueira evidenciando o contato entre a porção semimaciosa e maciça da base da CCP. A e B. Modelo tridimensional obtido por microtomografia computadorizada de raios X (uCT) em alta resolução. C e D. Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) mostrando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

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.* 2020).

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 ascensão preenchendo a câmara magmática e seguindo para uma cristalização *in situ* explicando a formação de grandes proporções de uma fase mineral como os cromititos (LATYPOV e CHISTYAKOVA, 2020).

A Camada de Cromitito Principal no testemunho estudado é constituída na base por uma subcamada de cromitito semimacioso 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 pouco 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 o da 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 cromitio semimaciço tem textura “chicken-wire” e que a transição para o maciço é abrupta.

Os cromititos maciços da CCP têm 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. 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 anfibólio (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 pouco presentes na amostra 307,02 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.* 2020). Os achados de minerais hidratados e dolomita também em inclusões em cromita da CCP do corpo Ipueira corroboram esta hipótese.

Friedrich *et al.* (2020), baseada em estudos prévios de Prichard *et al.* (2015), sugere que a supersaturação em cromo poderia explicar a presença de abundantes inclusões em cromita uma vez que favoreceria uma rápida cristalização esquelética 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.* (2020) 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 (436963/2018-3) e aporte financeiro à primeira autora (130837/2021-0) e à segunda autora (316460/2021-4). Agradecimentos também ao Daniel Triboli Vieira, técnico do Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo suporte na realização dos experimentos e na análise dos dados e William Freitas, pesquisador do IPR (Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais – 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.

Borisova, A.; Ceuleneer, G.; Kamenetsky, V.; Arai, S.; Béjina, F.; Bindeman, I.; Polvé, M.; De Parseval, P.; Aigouy, T.; Pokrovski, G. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions. *Journal of Petrology*, v. 53, n. 12, 2411–2440, 2012.

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.

Dias, J.R.V.P., Marques JC, 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., Frantz J.C., Friedrich B., Paim J.C.S., Silveira C.J.S., Queiroz W.J.A. 2022. Regional highgrade metamorphic peak imprint in zircons from the mafic-ultramafic Jacurici Complex, São Francisco Craton, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52(1):e20210007

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.

Ferreira Filho, C.F., Araujo, S.M. Review of Brazilian Chromite Deposits Associated with Layered Intrusions: Geological and Petrological Constraints for the Origin of Stratiform Chromitites. *Applied Earth Science*, v.118, n.3–4, 86-100, 2009.

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, 2019.

Irvine TN. 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 TN. Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other layered intrusions: a new interpretation. *Geology*, v. 5, 273–277, 1977.

Jardim de Sá, E.F 1984. *Geologia da região do Vale do Jacurici*. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Relatórios Técnicos, 17 p.

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. e 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. *et al.* Chromitite layers indicate the existence of large, long-lived, and entirely molten magma chambers. *Nature Scientific Reports*, v.12, n.4092, 2022.



Leshner, C.M. Roles of xenomelts, xenoliths, xenocrysts, xenovolatiles, residues, and skarns in the genesis, transport, and localization of magmatic Fe-Ni-Cu-PGE sulfides and chromite. *Ore Geology*, v.90, 465–484, 2017.

Leshner, C.M.; Carson, H.J.E.; Houlié, 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 WD, 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.

Marinho MM, Rocha GF, Deus PB, Viana JS. Geologia e Potencial cromitífero do Complexo Jacurici. *34º Congresso Brasileiro de Geologia*, Goiânia, p. 2074–88, 1986.

Marques J.C., Ferreira Filho C.F., Carlson RW, Pimentel MM. 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 JRVP, 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., Yudovskaya, M., McQuade, S., Chunnnett, 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., and Chunnnett, 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 HM, Barnes SJ, Godel B, Reddy SM, Vukmanovic Z, Halfpenny A, Neary CR, Fisher PC. 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.

Souza J.D.; Melo, R. C; Kosin M. 2003. *Mapa geológico do estado da Bahia*. Bahia. Escala 1:1000 000. CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

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.

ANEXO I
Título da Dissertação:
“TEXTURAS E INCLUSÕES EM CROMITA DA MINA IPUEIRA: CONTRIBUIÇÃO PARA O ENTENDIMENTO DA FORMAÇÃO DE CROMITITOS NO COMPLEXO JACURICI, BA”
Área de Concentração: Geoquímica
Autora: Greice Oliveira Roloff
Orientadora: Prof. Dra. Juliana Charão Marques
Examinador: Prof. Dr. Diego Machado Marques
Data: 22/12/2023
Conceito: C
<p style="text-align: center;">A dissertação de mestrado de PARECER:</p> <p>A dissertação de mestrado de Greice Oliveira Roloff, embora aborde um tema de significativa relevância tanto para o campo científico quanto para o setor econômico, ao explorar um mineral importante para a indústria, apresenta-se com certas limitações em sua estrutura e desenvolvimento argumentativo. Destaca-se a relevância do assunto escolhido, mas nota-se uma falta de aprofundamento na argumentação dos objetivos, na descrição dos procedimentos executados e nas conclusões alcançadas.</p> <p>No entanto, o capítulo inicial que aborda o estado da arte e a contextualização teórica do tema mostra-se bem alinhado com o propósito da dissertação, evidenciando uma seleção de referências bibliográficas atualizadas e pertinentes ao estudo. A estrutura do documento está em conformidade com as normas do PPGeo, compreendendo um capítulo introdutório seguido de um artigo científico, este último constituindo o núcleo principal do trabalho.</p> <p>O artigo, por sua vez, embora apresente as informações de maneira clara e com linguagem apropriada, peca pela superficialidade com que trata os dados, apesar de conseguir definir com precisão a localização da área de estudo e o contexto geológico, o que favorece a compreensão das informações relacionadas à pesquisa. A revisão bibliográfica realizada se mostra adequada e relevante para a dissertação.</p> <p>Em termos de contribuição, o estudo oferece dados valiosos para a avaliação de cromitas no Complexo Jacurici, destacando-se pela petrografia detalhada das amostras selecionadas e pela análise dos dados geoquímicos obtidos. Contudo, percebe-se uma limitação na apresentação dos resultados e, sobretudo, na interpretação e discussão desses, aspectos cruciais em trabalhos de mestrado. Essa observação visa contribuir para o aprimoramento do estudo, sem desmerecer o esforço e o trabalho já realizado. Diante disso, atribui-se à dissertação o conceito C, com a intenção de encorajar melhorias futuras.</p>

Assinatura:

Diego M. Moraes

Data: 22/12/2023

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação:

“TEXTURAS E INCLUSÕES EM CROMITA DA MINA IPUEIRA: CONTRIBUIÇÃO PARA O ENTENDIMENTO DA FORMAÇÃO DE CROMITITOS NO COMPLEXO JACURICI, BA”

Área de Concentração: Geoquímica

Autora: **Greice Oliveira Roloff**

Orientadora: Prof. Dra. Juliana Charão Marques

Examinadora: Profa. Dra. Irani Clezar Mattos

Data: 20 de dezembro de 2023

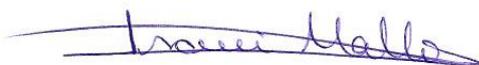
Conceito: **BOM**

PARECER:

A dissertação apresenta inicialmente uma fartamente análise bibliográfica atualizada, aprofundada e direcionada ao tema. As metodologias utilizadas são pertinentes, gerando dados que permitiram um extenso detalhamento descritivo sobre os aspectos texturais e inclusões minerais nas concentrações de cromita, atingindo plenamente o objetivo proposto. Contudo, os referidos dados gerados, pela sua importante análise comparativa realizada, poderiam ainda, embasar discussões e conclusões mais elaboradas e aprofundadas; contribuindo assim, de forma mais efetiva, na interpretação dos processos de concentração do minério de cromita. Assunto que foi apresentado por diversos autores e vastamente registrado no presente estudo.

Assinatura:

Data: 20 de dezembro de 2023



Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I	
Título da Dissertação:	
“TEXTURAS E INCLUSÕES EM CROMITA DA MINA IPUEIRA: CONTRIBUIÇÃO PARA O ENTENDIMENTO DA FORMAÇÃO DE CROMITITOS NO COMPLEXO JACURICI, BA”	
Área de Concentração: Geoquímica	
Autora: Greice Oliveira Roloff	
Orientadora: Prof. Dra. Juliana Charão Marques	
Examinador: Prof. Dr. Rodrigo Winck Lopes	
Data: 20/12/2023	
Conceito: A	
PARECER:	
<p>Os objetivos apresentados foram atingidos e a discente possui domínio sobre o tema abordado. O texto está claro e bem escrito com poucos erros de tipologia. Encaminho um arquivo em .pdf onde fiz as principais recomendações que poderão contribuir na revisão ou aceite do manuscrito submetido.</p> <p>O tema da dissertação é muito importante pois trata-se de um estudo no maior depósito explorado de cromo do Brasil, e contribui para o entendimento da gênese de cromitito no Complexo Jacurici, BA. Algumas partes do texto apresentado na monografia são idênticas ao do manuscrito submetido. As figuras são boas, entretanto precisam ser melhor citadas no texto e em ordem. Algumas figuras precisam ajustar o tamanho da fonte e algumas eu recomendo uma indicação dos minerais dentro da figura. Recomendo que seja acrescentado ou organizado um tópico de conclusão no artigo. As referências não seguem um padrão nem na monografia nem no artigo. Recomendo uma revisão do padrão das referências seguindo as normas da revista submetida.</p> <p>Por fim, agradeço pelo convite e parabêniso a discente e a orientadora pelo excelente trabalho e fico à disposição para qualquer dúvida em relação às minhas recomendações</p>	
Assinatura:	Data: 20/12/2023
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>RODRIGO WINCK LOPES Data: 20/12/2023 18:50:52-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>Documento assinado digitalmente</p> </div> </div>	
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	