

## Parâmetros Típicos da Rocha Intacta para Litotipos Associados a Jazidas Minerais

Bárbara Emilly V. F. E Souza

Geóloga M.a Geotecnia, Vale S.A, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Belo Horizonte, Brasil, [e.barbara@yahoo.com](mailto:e.barbara@yahoo.com)

Isabela Maria Maia Bernardes

Engenheira Civil, Vale S.A, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Belo Horizonte, Brasil, [isabelammbernardes@gmail.com](mailto:isabelammbernardes@gmail.com)

Inácio Diniz Carvalho

Geólogo, Vale S.A, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, [inacio.carvalho@vale.com](mailto:inacio.carvalho@vale.com)

**RESUMO:** Buscando maior qualidade e confiabilidade nos resultados de ensaios geotécnicos de rochas, o primeiro Laboratório de Mecânica das Rochas da Vale (LGV) foi implementado em Minas Gerais, no Centro de Desenvolvimento Mineral – CDM. A análise de mecânica das rochas se inicia com ensaios não destrutivos de preparação dos testemunhos, onde se obtém corpos de provas perfeitamente cilíndricos e paralelos que seguirão para os ensaios de caracterização, nos fornecendo medidas de grandezas que nos permitem calcular absorção aparente de água, densidade aparente, porosidade aparente, coeficiente de Poisson dinâmico e Módulo de Young dinâmico. Estes dados serão importantes para cálculos ao final do processo de análise. Já os ensaios de resistência e deformabilidade são partes destrutivas da análise, onde os corpos de prova, após passarem pela determinação física, seguem para ruptura em prensas MTS que permitem obter como resultados o valor da força aplicada e consequentemente a resistência máxima suportada axialmente, como também a deformação diametral associada a resistência à compressão da rocha por meio de extensômetros laterais e diametrais capazes de nos fornecerem estes dados com extrema precisão. Dentre os diferentes tipo de rochas ensaiados os altos valores de tensão de pico chamam a atenção pois estão acima de 400MPa tendo o máximo valor de tensão à compressão uniaxial, 604,05 MPa, em um Piroxenito. Todos os dados gerados ao final dos ensaios de resistência a compressão, irão subsidiar cálculos matemáticos que serão capazes de auxiliar os geotécnicos na tomada de importantes decisões quanto a abertura, exploração e fechamento de minas, cavas e barragens, sejam elas subterrâneas ou abertas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaios, Parâmetros, Rochas, Jazidas.

**ABSTRACT:** Seeking greater quality and reliability in the results of geotechnical rock tests, Vale's first Rock Mechanics Laboratory was implemented in Minas Gerais, at the Mineral Development Center – CDM. The rock mechanics analysis begins with non-destructive tests to prepare the samples, where perfectly cylindrical and parallel specimens are obtained that will go on to the characterization tests, providing us with measurements of quantities that allow us to calculate apparent water absorption, density apparent porosity, dynamic Poisson's ratio and dynamic Young's Modulus. This data will be important for calculations at the end of the analysis process. The resistance and deformability tests are destructive parts of the analysis, where the specimens, after undergoing physical determination, proceed to rupture in MTS presses that allow obtaining as results the value of the applied force and consequently the maximum resistance supported axially, as also the diametrical deformation associated with the rock's compressive strength using lateral and diametrical extensometers capable of providing us with this data with extreme precision. Among the different types of rocks tested, the high values of peak stress draw attention as they are above 400MPa, with the maximum stress value at uniaxial compression, 604.05 MPa, in a Pyroxenite. All data generated at the end of the testing tests compressive strength, will support mathematical calculations that will be able to assist geotechnicians in making important decisions regarding the opening, exploration and closing of mines, pits and dams, whether underground or open.

KEYWORDS: Tests, Parameters, Rocks, Deposits.

## 1 INTRODUÇÃO

A Mecânica das Rochas é uma área da ciência que busca, dentre outros objetivos, compreender a relação entre as tensões naturais e induzidas a qual um maciço rochoso é submetido e estudar o seu comportamento frente a deformabilidade e resistência. Segundo a Associação Internacional de Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas (ISRM, 1985), a Mecânica das Rochas é a ciência teórica e aplicada do comportamento mecânico (resistência e deformabilidade) das rochas. É o ramo da mecânica interessado na resposta das rochas aos campos de forças do seu ambiente físico.

Em 2021, a Vale S.A implantou o Laboratório de Geotecnia Vale (LGV) e o primeiro Laboratório de Mecânica das Rochas da empresa. Desde então, o laboratório executa ensaios de ondas P e S (ISRM, 1985) não destrutivos, compressão triaxial (ASTM D7012-14) compressão uniaxial (ASTM D2938-95) e de tração indireta (ASTM D3967-16/ISRM 1985).

A resistência à compressão e a deformabilidade são parâmetros importantes para definição do comportamento mecânico das rochas. Existem diversos fatores que influenciam no comportamento e na resistência das rochas, como por exemplo, mineralogia, microfissuras, entre outros (Milli, 2021).

Conforme comentado por Azevedo & Marques (2002) o ensaio de Compressão Uniaxial (UCS) permite a obtenção da resistência de corpos de prova não confinados que são adquiridas na direção a maior tensão de cisalhamento exercida. Os ensaios UCS são comumente realizados na área de Mecânica das Rochas por serem simples e com bom custo benefício.

A progressiva execução dos testes nos variados tipos rochosos e constante análise interpretativa dos resultados, corresponde a uma importante boa prática na rotina do laboratório. Essa rotina pode apoiar a confirmação testes válidos ou mesmo na identificação de resultados anômalos.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é apresentar uma análise dos resultados obtidos nos últimos dois anos, e investigar as principais tendências e as faixas de valores típicos para os litotipos analisados. O intuito é identificar eventuais padrões e direcionar trabalhos futuros em depósitos minerais com arcabouço geológico semelhante.

## 3 METODOLOGIA

Os ensaios executados tiveram como base as diretrizes dos métodos sugeridos pela Associação Internacional de Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas (ISRM, 1985) – “*SM for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials – 1979*” e “*SM for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression – 1999*”.

O Laboratório de Geotecnia Vale (LGV) recebe amostras de diferentes minas da Vale, no Brasil. Normalmente provenientes de furos de sondagem ou blocos indeformados das cavas. O processo de preparação dos corpos de prova (CP) tem início na recepção das amostras, nessa etapa há a verificação do que foi recebido. No caso de blocos indeformados há a definição dos pontos que serão extraídos os CP's levando em consideração anisotropia das rochas e direção das descontinuidades. Já nos testemunhos de sondagem esse processo consta com a marcação dos CP's levando em consideração a relação entre altura e diâmetro preconizado pelas normas e conselhos internacionais.

Após esse processo, as amostras são encaminhadas para o processo de usinagem, onde serão serradas, torneadas e retificadas. O processo da usinagem é um fator importante para a execução de um ensaio com qualidade, visto que, CP's com baixo paralelismo de topo e base pode ocasionar efeito de borda e flexões parasitas nos CP's. Além disso, um torneamento sem zelo pode gerar leituras de pontos de má usinagem.

A etapa seguinte é a verificação da usinagem com paquímetro e relógio comparador e o agrupamento dos CP's (Figura 1). O agrupamento leva em consideração litologias com características geotécnicas similares (grau de resistência, grau de alteração, grau de fraturamento e descontinuidade principal).



Figura 1- Corpos de prova após usinagem.

Após as definições, os ensaios não destrutivos são executados. Nessa fase, os parâmetros obtidos são: densidade aparente, porosidade aparente, absorção aparente, tempo de trânsito da onda P e tempo de trânsito da onda S.

Posteriormente os CP's são direcionados para os ensaios destrutivos. Os ensaios de compressão uniaxial (UCS) são executados na prensa MTS 816.04 (Figura 2) com controle de deformação, que possibilitam a leitura das deformações axiais e radiais visto que os corpos de prova são instrumentados com extensômetros que possuem precisão de  $10^{-4}$  mm nos resultados, isso possibilita a obtenção de parâmetros elásticos como por exemplo Módulo de Young e Coeficiente de Poisson.

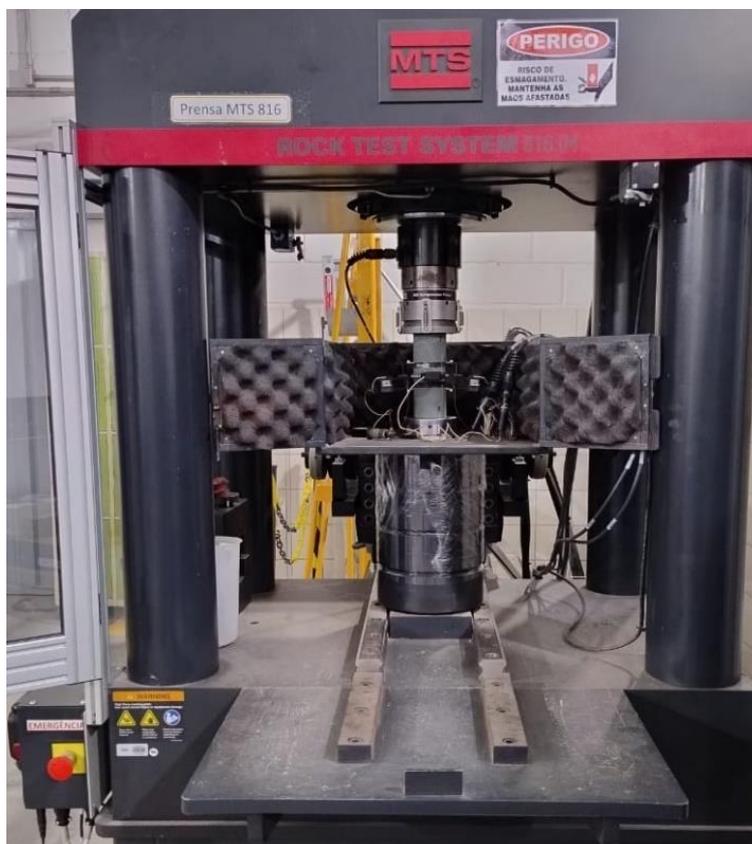


Figura 2 - Ensaio UCS com controle de deformação.

Os ensaios de compressão uniaxial podem ser executados por dois métodos distintos: A) Método em duas etapas: (1) Etapa com controle de deformação radial, até aproximadamente 50% da carga de ruptura, para determinação de parâmetros elásticos ou até a curva volumétrica torna-se assintota. (2) Etapa com controle de força até a ruptura do CP e B) Método em etapa única: controle de deformação radial até a ruptura.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados os resultados de 251 ensaios de compressão uniaxial em 15 litologias diferentes espalhadas nas três principais Províncias Minerais do Brasil: Quadrilátero Ferrífero, Carajás e Corumbá (Figura 3).

A metodologia utilizada na execução dos ensaios UCS no Laboratório de Mecânica das Rochas é agrupar os corpos de provas, ou seja, para cada ensaio UCS são considerados 5 corpos de provas, conforme os conselhos da ISRM (1985). Isso é realizado pois em algumas situações os corpos de prova terão a ruptura em uma descontinuidade preexistente, como por exemplo, falhas, fraturas, veios, foliações e xistosidades. Nesses casos os ensaios são comumente desconsiderados durante as análises pois a ruptura ocorreu em uma zona de fraqueza. Os agrupamentos levam em consideração a litologia, localização dos corpos de provas e a localização dos mesmos dentro da cava/mina e também o grau de resistência. Quando possível, considera-se também grau de fraturamento e grau de alteração.

Nesse estudo, como o objetivo é avaliar a faixa de valores possíveis de resistência à compressão uniaxial não se levou em consideração os agrupamentos e conseqüentemente os parâmetros de grau de resistência e localização dos corpos de prova no furo de sondagem ou dentro da cava. O critério adotado foi a classificação litológica, ou seja, os agrupamentos de análise levaram em consideração o tipo de litologia.

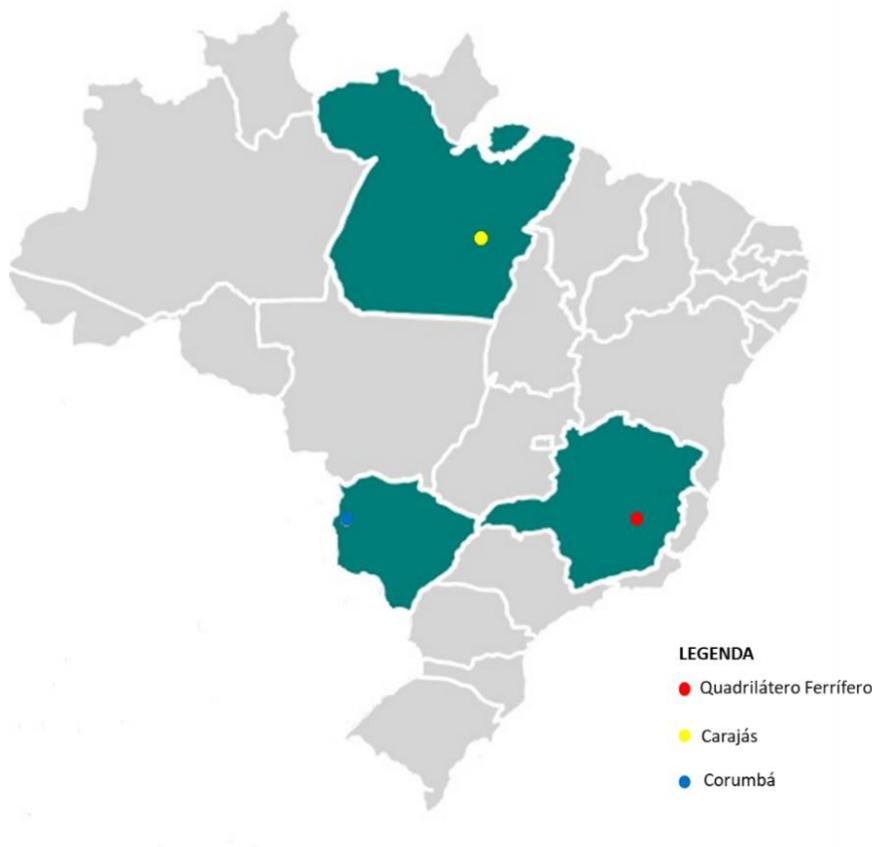


Figura 3 - Principais Províncias Minerais do Brasil.

A Tabela 1 ilustra as litologias analisadas e o quantitativo de ensaios verificados em cada uma delas.

Tabela 1 - Quantidade de ensaios analisados por litologia.

<b>Litotipo</b>	<b>Quantidade de Ensaios</b>
Arenito	40
Canga	15
Gabro	14
Hematita Compacta	29
Itabirito	11
Jaspilito	24
Máfica Sã	5
Meta-Vulcânica	44
Peridotito	13
Piroxenito	12
Quartzito	10
Quartzito Xisto	6
Rocha Intrusiva	5
Serpentinito	7
Xisto Compacto	14

As rochas são sistemas sólidos compostos por um conjunto de minerais, vazios e água, além disso, a maioria das rochas brasileiras foram submetidas a um ou mais evento metamórficos. Sendo assim, os valores de resistência à compressão uniaxial possuem uma ampla variabilidade. O gráfico da Figura 4 tem como objetivo ilustrar a variabilidade de valores da tensão de pico em cada litologia avaliada.

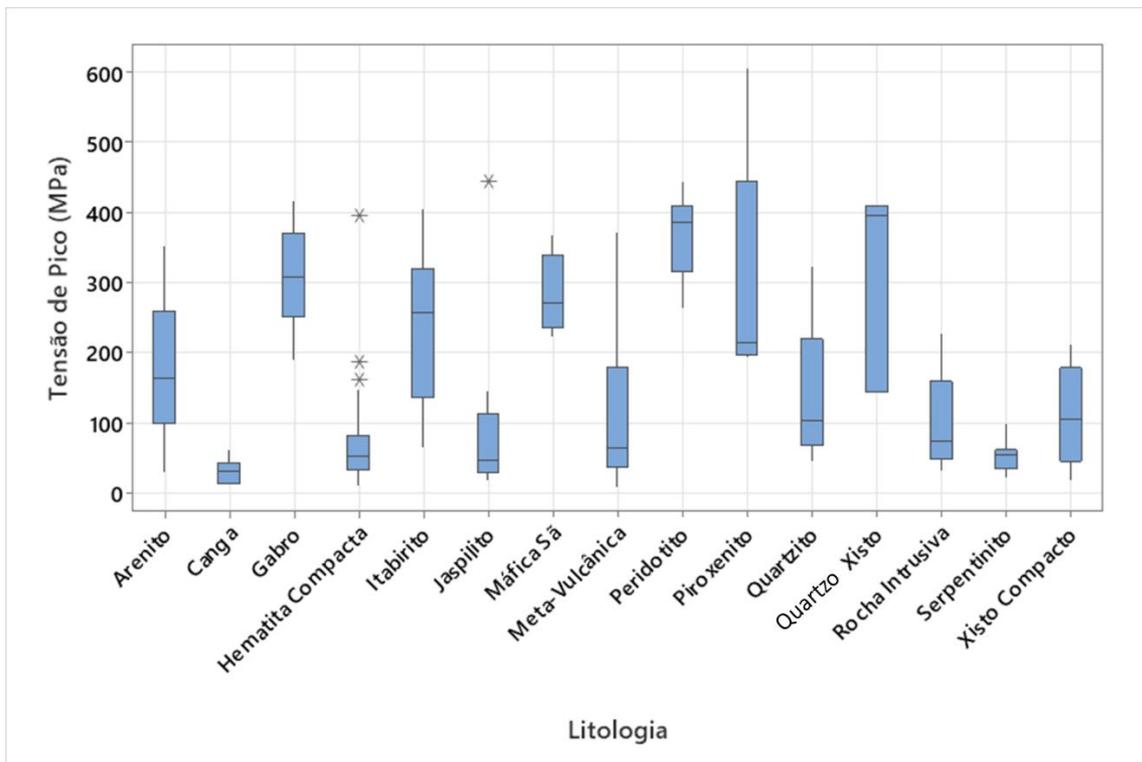


Figura 4 - Variação dos valores de tensão de pico no ensaio UCS para diferentes litologias.

Algumas litologias apresentaram pouca dispersão de tensão de pico, como por exemplo a Canga e o Serpentinito. Já os ensaios executados em Piroxenito, Itabirito e Quartzo Xisto apresentaram variância alta, ou seja, houve um desvio padrão superior a 100, conforme Tabela 2. Outro ponto importante, que vale ressaltar, são os *outliers* nos valores de tensão de pico na Hematita Compacta e no Jaspilito, ambas são rochas compostas por alto teor de ferro com baixo teor de sílica, porém com diferentes processos de formação e localização.

Dentre os diferentes tipo de rochas ensaiados os altos valores de tensão de pico do Piroxenito, Gabro, Itabirito, Jaspilito, Peridotito e Quartzo Xisto chamam a atenção pois são tensões de pico acima de 400 MPa tendo o Piroxenito com a máxima tensão entre eles, 604,05 MPa.

Em contra partida a Canga, Hematita Compacta e as rochas Meta-vulcânicas possuem as menores tesões de picos, tendo como mínimo 9,75 MPa na Meta-vulcânica.

Tabela 2 - Relação entre desvio padrão, coeficiente de variação e valores mínimos e máximos de tensão de pico (MPa) em ensaios UCS.

Litologia	Tensão de Pico Média (MPa)	Tensão de Pico Mediana (MPa)	Desvio Padrão	Valor Máximo de Tensão de Pico (MPa)	Valor Mínimo de Tensão de Pico (MPa)	Coeficiente de Variação
Arenito	179,99	162,92	91,87	353,23	30,08	51,04%
Canga	30,49	31,35	15,04	63,02	11,33	49,34%
Gabro	307,52	308,32	64,85	417,27	190,34	21,09%

Hematita Compacta	74,91	53,54	75	396,46	10,01	100,12%
Itabirito	241,09	256,7	101,57	404,42	64,37	42,13%
Jaspilito	80,16	47,35	85,37	444,09	19,05	106,50%
Máfica São	284,68	270,21	50,66	367,83	223,31	17,80%
Meta-Vulcânica	108,66	64,66	92,25	371,51	9,75	84,90%
Peridotito	363,53	385,05	58,51	443,59	263,63	16,10%
Piroxenito	305,06	215,05	146,47	604,05	193,8	48,01%
Quartzito	133,25	103,29	86,21	322,71	44,84	64,70%
Quartzo Xisto	316,07	394,6	121,85	409,64	143,96	38,55%
Rocha Intrusiva	98,2	74,73	67,63	227,93	31,72	68,87%
Serpentinito	54,99	55,44	22,2	99,38	22,91	40,38%
Xisto CoMPacto	110,15	104,68	63,09	211,61	18,16	57,28%

## 5 CONCLUSÃO

Esse artigo visa contribuir e incentivar a sociedade geológica-geotécnica a investir mais nos ensaios laboratoriais. O Brasil é um país com diversos tipos de rochas e com diferentes graus de metamorfismo e gênese, sendo assim é de extrema importância o conhecimento de parâmetros básicos do substrato rochoso e que em grande maioria são as litologias que são encontradas nas minas.

A análise estatística feita à variabilidade dos ensaios de compressão uniaxial mostrou que há uma grande dispersão de resultados principalmente nas amostras que possuem corpos de provas com valores de resistência muito diferentes ou porque o grupo amostral era grande. Isso ocorreu porque não foi possível subdividir os grupos litológicos de acordo com as classes de resistência mais alteradas. Esse fato implica na necessidade de haver mais resultados levando em consideração, além do tipo litológico o grau de resistência.

O grupo amostral desse estudo foi restrito, mas apresentou resultados satisfatório a respeito de uma faixa de tensão de pico em ensaios de compressão uniaxial para diferentes litotipos. É importante ressaltar os altos valores de resistência a compressão uniaxial dos Piroxenitos e Jaspilitos. Esses resultados agregam valor principalmente em situações de desmonte e dimensionamento de britador. Além de contribuir no desenvolvimento mais robusto de modelos geológicos e geomecânicos.

Os ensaios começam na coleta de amostras, quando é realizada uma seleção criteriosa levando em consideração o grau de resistência, grau de alteração e grau de fraturamento das rochas tem-se resultados com maior qualidade e acurácia.

Propõe-se para pesquisas futuras o estudo o aumento do grupo amostral de análise e uma separação das litologias por Províncias Mineraias e também por Grau de Metamorfismo, por exemplo, a porção Oeste do Quadrilátero Ferrífero foi submetida a processos metamórficos e estruturais diferentes da porção Leste. Esse fator pode ter influência nos valores de resistência à compressão uniaxial em litologias similares.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, I. C. D. & Marques. E. A. G. (2002). *Introdução à Mecânica das Rochas* – Caderno Didático 85, Viçosa: UFV.
- ISRM (1985). *SM for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. International Society for Rock Mechanics. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol. 15.

- ISRM (1985). *SM for Determining Sound Velocity*. International Society for Rock Mechanics. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol. 15.
- ISRM (1985). *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. International Society for Rock Mechanics. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol. 15.
- ISRM (1985). *Suggested Methods for the Complete Stress-Strain Curve for Intact Rock in Uniaxial Compression*. International Society for Rock Mechanics. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol. 15.
- ISRM (1985). *SM for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression*. International Society for Rock Mechanics. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol. 15.
- ISRM (1985). *SM for Determining Tensile Strength of Rock Materials*. International Society for Rock Mechanics. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol. 15.
- Milli, C. B. (2021). *Análise dos fatores condicionantes da resistência à compressão dos litotipos da mina Ingá, Crixás (GO)*. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Geologia, Escola de Minas / UFOP, 87 p.