

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 14/05/2020.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Câmpus de Rio Claro



Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente

CONTROLES ESTRUTURAIS DO DEPÓSITO DE ZINCO E CHUMBO
DE BONSUCESSO, GRUPO VAZANTE, BRASIL

EDSON RICARDO MAIA FERRAZ

Orientador: Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Rio Claro (SP)

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

EDSON RICARDO MAIA FERRAZ

CONTROLES ESTRUTURAIS DO DEPÓSITO DE ZINCO E CHUMBO DE
BONSUCESO, GRUPO VAZANTE, BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: George Luiz Luvizotto

Rio Claro – SP

2018

F381c Ferraz, Edson Ricardo Maia
Controles estruturais do depósito de zinco e chumbo de
Bonsucesso, Grupo Vazante, Brasil / Edson Ricardo Maia
Ferraz. -- Rio Claro, 2018
60 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro
Orientador: George Luiz Luvizotto

1. Zinco. 2. Geologia estrutural. 3. MVT. 4. Faixa
Brasília. 5. Formação Morro do Calcário. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CONTROLES ESTRUTURAIS DO DEPÓSITO DE ZINCO E CHUMBO DE
BONSUCESSO, GRUPO VAZANTE, BRASIL

CANDIDATO: EDSON RICARDO MAIA FERRAZ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Profa. Dra. Lena Virgínia Soares Monteiro

Prof. Dr. Luiz Sérgio Amarante Simões

RESULTADO: APROVADO

Rio Claro, 14 de novembro de 2018

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço a Nexa Resources pela oportunidade do mestrado em um dos seus projetos, especialmente aos geólogos Helber Thomazella, Juliano Alex, Paulo Ravacci, Lúcio Molinari e Jones Belther. O aprendizado proporcionado pelos desafios geológicos durante estes anos de trabalho é enorme, sou grato também a Nexa pela confiança depositada em mim.

Agradeço aos meus pais, Cida e Edinho, por todo o apoio e amor e por desde muito cedo me mostrarem que o caminho é a educação.

A minha querida Lana, por ser a companheira que eu jamais imaginei que seria capaz de encontrar.

Ao meu grande amigo e grande geólogo Denis Batiston, sua amizade e contribuição para este mestrado são inestimáveis.

Ao professor George pela confiança e orientação, a Juliana Okubo pelas correções e empolgação com a boa ciência e a Regiane pelos mapas do XMapTools.

A todos os geólogos e a todas as geólogas, técnicos e auxiliares da Nexa que contribuíram para este trabalho. Agradecimentos especiais ao fenomenal geólogo Rafael Caixeta, ao geólogo, e agora também doutor, Saulo Batista e ao grande entusiasta e excelente geólogo de exploração Gustavo Oliveira.

Aos meus amigos e companheiros de Faixa Vazante: Aline Carlin, Augusto César, Célio Rodrigues, Jéssica Arruda, Jéssica Ilária, Junio Areda, Laura Rodrigues, Leidiene Bárbara, Mariana Leite, Mario Borges e Vinicius Araújo..

E por último aos meus amigos fundamentais (alguns citados novamente): Eric, Daniel, Denis, Fernando, João Guilherme, Mario, Matheus (amigo da vida e patagônico), Eduardo Hansen, Eduardo Camargo, Glauber, Otávio e Vinicius Rocha.

*“Say not 'This is the truth' but ' So it seems to me to be as
I now see the things I think I see.’”
David Love quoting some German inscription above some door
From Rising From The Plains by John McPhee*

*“You can't do geology in a hurry”
David Love in Rising From The Plains by John McPhee*

Para Cida, Edinho e Lana

RESUMO

O recém-descoberto depósito sulfetado de zinco (Zn) e chumbo (Pb) de Bonsucesso está hospedado em rochas carbonáticas do Grupo Vazante em Paracatu, noroeste de do Estado de Minas Gerais, Brasil. Embora a idade do Grupo Vazante ainda seja matéria de debate, há ao menos um consenso de que este está posicionado na transição do Mesoproterozoico para o Neoproterozoico. Desenvolvida sobre a margem passiva da Paleoplaca São Francisco após a quebra de Rodínia, esta unidade é uma sequência sedimentar de primeira ordem. Este trabalho concentrou-se na avaliação dos controles estruturais do depósito de Zn e Pb de Bonsucesso e buscou entender a relação da mineralização com as estruturas e as rochas encaixantes. O Grupo Vazante foi afetado pela tectônica “thin-skinned” da zona de “foreland” do Orógeno Brasília e empurrado sobre a Paleoplaca São Francisco. Este longo processo orogênico foi o gatilho tectônico das várias mineralizações hospedadas nas rochas do Grupo Vazante. A mineralização de Bonsucesso é controlada por uma zona de falha de alto ângulo. Esta estruturação indica que a zona de falha aumentou a permeabilidade local e serviu como conduto para os fluidos mineralizantes.

Palavras-chave: zinco, geologia estrutural, MVT, Faixa Brasília, Formação Morro do Calcário

ABSTRACT

Recently discovered zinc (Zn) and lead (Pb) sulfide Bonsucesso deposit is hosted in carbonate rocks of Vazante Group, northwest of Minas Gerais State, Brazil. Although, the Vazante Group age is still a matter of debate, there is a general agreement that it is positioned in the transition of the Mesoproterozoic to the Neoproterozoic time. Developed over a passive margin of São Francisco Paleoplate after Rodinia break-up, this unit is a first-order sedimentary sequence. This work was focused on the assessment of the structural controls of Zn-Pb Bonsucesso deposit and evaluated the relationship between the mineralization, structures and host rocks. Vazante Group was affected by the thin-skinned tectonics of the foreland zone of Brasília Orogen and thrust over São Francisco Paleoplate. This long orogenic process was the tectonic trigger of Zn-Pb mineralization hosted in Vazante Group rocks. Bonsucesso mineralization is controlled by a high-angle fault zone. This setting indicates that fault zone increased local permeability and acted as conduit for mineralizing fluids.

Keywords: zinc, structural geology, MVT, Brasília Belt, Morro do Calcário formation

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
Lista de figuras.....	10
CAPÍTULO 1.....	12
1.1. Introdução.....	12
1.2. Métodos.....	14
1.3. Estrutura da dissertação.....	16
1.4. Referências.....	16
CAPÍTULO 2.....	19
1. Introduction.....	19
2. Methods.....	20
3. Geological setting.....	21
4. Geology of the Bonsucesso deposit.....	26
4.1. Lithologies and stratigraphy.....	26
4.2. Soil.....	26
4.3. Serra do Garrote Formation.....	26
4.4. Morro do Calcário Formation.....	27
4.5. Hydrothermal dolomitic breccia – Bonsucesso Zn-Pb mineralization.....	28
5. Ore mineralogy.....	31
6. Structures.....	31
6.1. Structural framework.....	31
6.2. Faults.....	34
6.3. Folds.....	37
6.4. Mineralized veins.....	39
7. Discussions.....	40
7.1. Paragenetic sequence.....	40
7.2. Deformation history.....	41
7.3. Timing of mineralization.....	42
7.3.1. Scenario 1.....	43
7.3.2. Scenario 2.....	44
7.3.3. Scenario 3.....	45
7.4. Bonsucesso deposit x Vazante Belt deposits.....	45
7.5. Bonsucesso deposit x Tectonic settings of MVT Pb-Zn deposits on Earth history ..	48
7.6. Implications for mineral exploration.....	49
8. Conclusions.....	50
9. References.....	50
CAPÍTULO 3.....	60

Lista de figuras

Figure 1: Generalized geological map of Brasília Belt showing units and tectonic compartments according to Pimentel (2016): I – Goiás magmatic Arc, II - Syn-orogenic basins (fore-arc?) and metamorphic core, III - Passive margin, and IV - Foreland basin. Vazante Group (outlined) is on the east of the Southern Brasília Belt. On the upper left corner, location of Brasília Belt in the West Gondwana (ca 550 Ma). Curved lines: Neoproterozoic Brasiliano/Pan-African orogens. Cratons: A – Amazonian, SFC – São Francisco Congo, P – Rio de la Plata, WA – West Africa, K – Kalahari (ALKMIM et al., 2001)..... 22

Figure 2: Map of Brazil showing the location of Brasilia Fold Belt and part of the Eastern Brasília Fold Belt with the location of the major Zn-Pb sulfide deposits (Morro Agudo, Ambrósia, Bonsucesso and Fagundes) and Zn silicate deposit (Vazante). It is also showed the geological map of Bonsucesso deposit..... 23

Figure 3: Lagamar thrust fault juxtaposed older sediments of Vazante group and younger sediments of Bambuí group. Original cross-section from Dardenne and Freitas-Silva (1999). Stratigraphic column of Vazante group (after Dardenne, 2001). Bonsucesso Zn-Pb deposit is hosted in the same unit (Morro do Calcário) as Morro Agudo, Ambrosia and Fagundes deposits. U-Pb detrital zircon ages from Rodrigues et al. (2012); Re-Os ages from Geboy et al. (2013) and Azmy et al. (2008)..... 24

Figure 4: Lithotypes and textures of Bonsucesso deposit. A. Metamarl. Bedding marked by alternating mm to cm thick carbonate-rich layers and mica-rich layers. Note on thin section the presence of clasts of muscovite and quartz. Cross polarized light. B. Fine dolostone with discrete bedding. C. Diamictite. Core sample exhibits mixture of coarse clasts of carbonate rocks and well-rounded quartz sand in a fine black matrix. Thin section shows a heterogeneous origin for quartz sand, including lithic clasts and quartz with wavy extinction. Microcrystalline phosphate (P) also occurs in matrix as cement. D. Carbonaceous phyllite with bedding marked by quartz-rich layers and carbonaceous mica-rich layers (Serra do Garrote Formation).Cross polarized light. E. Transition of metamarl to black carbonaceous phyllite. These rocks occur interbedded within Morro do Calcário Formation. 27

Figure 5: The relationship between the mineralized zones in the hangingwall with no shearing and the footwall with strong shearing along the fault strike and dip..... 29

Figure 6: A. Hydrothermal dolomitic breccia almost entirely cemented by gray and yellow sphalerite (Sp). B. Sulphide and gangue-minerals (mainly dolomite – Do) filling of inter-fragment open spaces in dolomitic breccia. Thin section (reflected light at top; transmitted light at bottom): Colloform sphalerite replaced colloform pyrite (Py). 30

Figure 7: At left, sphalerite replaced colloform pyrite and later same sphalerite was substituted by carbonate mineral (note rhombohedral crystal indicated by green arrows). At right, other example of sphalerite replacing early phase of colloform pyrite. Both thin sections a contains a late phase of euhedral pyrite. 31

Figure 8: A. Sp-bearing extensional vein. B. EDS image showing pyrobitumen in contact with Sp Red arrow indicates location of EDS image. C. Mineralized breccia texture: Colloform Sp and Gn and also gangue minerals filling space between clasts of dolostone. 32

Figure 9: Schematic cross-section depicting a foreland basin system (modified from DeCelles; Giles, 1996) and corresponding tectonic architecture on refraction seismic lines run by Petrobras over the São Francisco Basin and Vazante Group. Note that foreland basin sediments of Bambuí are also strongly affected by thin skinned tectonics. 1 – Espinhaço supergroup/Canastra group, 2 – Paranoá and Macaúbas groups, 3 – Bambuí group, and 4 – Allochthonous units: Vazante, Canastra and Bambuí groups (ROMEIRO-SILVA; ZALÁN, 2007).33

Figure 10: 370 m elevation geologic map showing the mineralized reverse fault truncated by strike-slip faults. At right, lower-hemisphere equal-area stereographic projections of the structures in the Bonsucesso area. “Phyllite/fault” stereonet shows attitude of Serra do Garrote formation rocks emplaced between the two faults blocks.35

Figure 11: 3-D model of the Bonsucesso reverse fault. Note that the mineralized hydrothermal breccia is segmented by Serra do Garrote formation rocks.36

Figure 12: A. Slickenlines observed in reverse faults. B. Reverse fault plain and C. Sigmoid dolomite clast indicates movement to the east.36

Figure 13: Perspective view of cross sections along Bonsucesso deposit. 3D layers of carbonate mudstone show a clear duplication generated by the reverse fault. Black line above the sections represents the fold traces. Black arrows point down at the low-angle axis of gently open folds (For legend and cross sections location see geologic map on figure 10). ...38

Figure 14: Folds on phyllites of Serra do Garrote Formation inserted between Morro do Calcário faulted blocks. A. Hinge zone of a metric fold. Dashed white lines indicate planes of intersection of bedding surfaces with core samples. Fault-related isoclinal fold within shear zone. C. Low-plunge axis of isoclinal folds.39

Figure 15: High angle extensional mineralized vein comprised of borders of pyrite (Py) with sphalerite (Sp) and galena (Gn) core. Growth direction is perpendicular to fracture. At the upper right, photograph of Zn and Pb sulfides from vein’s core. At this scale it is not possible to distinguish any crystallization order or zonation. And at the lower right corner, lower-hemisphere equal-area stereographic projection of poles of Sp-bearing veins showing at least two major families, they are: (i) high-angles veins and (ii) low to middle dip angle veins. Strike orientation of veins is subparallel to Bonsucesso-fault strike.....40

Figure 16: Paragenetic map and compositional maps of an extensional mineralized vein (See location of map on figure 8). C = carbon, Cd = cadmium, Si = silica, Fe = iron, Mn = manganese, Zn = zinc.41

Figure 17: Simplified genetic model of mineralization-related structures at Bonsucesso, Ambrósia and Ambrosia Sul deposits. Stage 1: Extensional fault system took place and formed the bulk mineralization of all three deposits. Stage II: Advance of thrust front took over ancient extensive structures; formation of reverse faults; strike-slip displacements.47

CAPÍTULO 1

1.1. Introdução

O recém-descoberto depósito de zinco (Zn) e chumbo (Pb) de Bonsucesso está hospedado em rochas carbonáticas do Grupo Vazante em Paracatu, noroeste de Minas Gerais (Figura 1). Embora a idade do Grupo Vazante ainda seja matéria de debate, há ao menos um consenso de que esteja posicionado na transição do Mesoproterozoico para o Neoproterozoico (DARDENNE, 2000; MISI et al., 2014). Desenvolvida sobre a margem passiva da Paleoplaca São Francisco após a quebra de Rodínia, esta unidade é uma sequência sedimentar de primeira ordem (MARTINS-NETO, 2009; ALKMIM et al., 2001) com metamorfismo muito baixo (VALERIANO et al., 2004, VALERIANO et al., 2008; CARVALHO et al., 2016). Esta megassequência é correlacionável com outra unidade de mesma ordem depositada na margem oposta do cráton, o Grupo Macaúbas (ALKMIM; MARTINS NETO, 2012; REIS; ALKIMIN, 2015). As rochas do Grupo Vazante foram afetadas pela tectônica “*thin-skinned*” da zona de “*foreland*” do Orógeno Brasília e empurradas sobre a Paleoplaca São Francisco. Este longo processo orogênico foi o gatilho tectônico das várias mineralizações de Zn-Pb hospedadas nas rochas do Grupo Vazante. Junto com os conhecidos depósitos de Morro Agudo, Vazante, Ambrósia e Fagundes, esta nova descoberta integra o maior distrito produtor de Zn no Brasil. O novo corpo de minério é resultado da pesquisa mineral conduzida pela Nexa Resources, antiga Votorantim Metais, no “*trend*” enriquecido em metais (Zn e Pb) e comumente chamado pelos geólogos de exploração como Faixa Vazante.

A relevância de sistemas de falhas como estruturas hospedeiras de mineralizações hidrotermais é conhecida há muito tempo (COX, 2005; SIBSON, 1996; NEWHOUSE, 1942; MCKINSTRY, 1948). E a associação entre regimes tectônicos extensivos e mineralizações tem sido estabelecida em muitos depósitos minerais hidrotermais (SIBSON, 1996, 2000). Entretanto, depósitos de metais-base associados em sua gênese com falhas contracionais também tem sido reportados, embora pouco estudados (ZHANG et al., 2017; HOU; ZHANG, 2015; GHAZBAN et al., 1994; LIAGHAT et al., 2000).

O estudo teve como objetivo caracterizar os controles estruturais do minério na escala de depósito e formular hipóteses para a sua formação. Adicionalmente, pretendeu-se dar significado às estruturas controladoras e modificadoras em seu contexto tectônico regional.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em três capítulos. O capítulo 1 é uma breve introdução do problema e também apresenta o objetivo da pesquisa. O capítulo 2 é um manuscrito a ser enviado a revista *Ore Geology Reviews*. O foco do artigo é a história deformacional do depósito e a caracterização dos controles estruturais da mineralização. O capítulo 3 contém conclusões gerais do estudo.

1.4. Referências

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S., FONSECA, M.A. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: clues from the São Francisco craton region, Brazil. **Geology**, v. 29, n.4, p. 319–322, 2001.

ALKMIM, F.F., MARTINS-NETO, M.A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 33, n. 1, p. 127–139, 2012.

CARVALHO, M. O.; VALERIANO, C. M.; GONZÁLEZ, P. A. A.; OLIVEIRA, G. D.; IMPICCINI, A. The thrust contact between the Canastra and Vazante groups in the Southern Brasília Belt: structural evolution, white mica crystallinity and implications for the Brasiliano orogeny. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 4, 567-583, 2016.

COX, S.F., 2005. **Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust**. *Econ. Geol.* 100, 39–75.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2003. Escala 1:1.000.000.

DARDENNE M.A. The Brasília fold belt. In: CORDANI U.G.; MILANI E.J.; THOMAZ FILHO A.; CAMPOS D.A. (Eds.) **Tectonic evolution of South America**. Rio de Janeiro, 31^o International Geological Congress, p. 231-263, 2000

GHAZBAN, F., MCNUTT, R.H., SCHWARCZ, H.P. Genesis of sediment-hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh District, Esfahan area, west-central Iran. **Economic Geology**, 89, 1262–1278, 1994.

HOU, Z.; ZHANG, H., 2015. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain. **Ore Geology Reviews**. 70, 346–384.

REIS, H. L. S.; ALKMIM, F. F. Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 66, p. 711-731, 2015.

LANARI, P., VIDAL, O., DE ANDRADE, V., DUBACQ, B., LEWIN, E., GROSCHE, E. G., & SCHWARTZ, S. XMapTools: A MATLAB©-based program for electron microprobe X-ray image processing and geothermobarometry. *Computers & Geosciences*, 62, 227-240, 2014.

LANARI, P., VHO, A., BOVAY, T., AIRAGHI, L., & CENTRELLA, S. Quantitative compositional mapping of mineral phases by electron probe micro-analyser. **Geological Society, London, Special Publications**, 478(1), 39-63, 2019.

LIAGHAT, S., MOORE, F., JAMI, M. The Kuh-e-Surmeh mineralization, a carbonate-hosted Zn-Pb deposit in the Simply Folded Belt of the Zagros Mountains, SW Iran. *Mineralium Deposita* 35, 72–78, 2000.

MCKINSTRY, H. E. *Mining Geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1948.

MARJORIBANKS, R. **Geological Methods in Mineral Exploration and Mining**. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, Second Edition, p 183-204, 2010.

MARTINS-NETO, M.A. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 26, n. 2, p. 163–176, 2009.

MISI, A.; AZMY, K.; KAUFMAN, A.J.; OLIVEIRA, T.F.; SANCHES, A.L.; OLIVEIRA, G.D. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: Implications to metallogenic and phosphogenic models. **Ore Geology Reviews**, v. 63, p. 76–90, 2014.

NEWHOUSE, W. H. **Ore Deposits as Related to Structural Features**. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1942.

SIBSON, R.H. Fluid involvement in normal faulting. **Journal of Geodynamics**, 29(3-5), pp.469-499, 2000

SIBSON, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. **Journal of Structural Geology**, 18, 1031–1042.

VALERIANO, C.M.; DARDENNE, M.A.; FONSECA, M.A.; SIMÕES, L.S.A., SEER, H.J. A evolução tectônica da Faixa Brasília. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELI A. (Eds.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca, p. 575-593, 2004.

VALERIANO, C.M.; PIMENTEL, M.M.; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J.C.H.; TROUW, R.A.J. Tectonic evolution of the Brasília Belt, central Brazil, and early assembly of Gondwana. In: PANKHURST, R.J.; TROUW, R.A.J.; BRITO NEVES, B.B.; WIT, M.J. (Eds.). **West Gondwana: Pre-cenozoic correlations across the South Atlantic region**. London, Geological Society, p. 197-210, 2008.

ZIMMER, P.W. Orientation of small diameter core. **Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1313–1325, 1963.

ZHANG, H.; YANG, T.; HOU, Z., SONG, Y, LIU, Y, YANG, Z., TIAN, S. Structural controls on carbonate-hosted Pb–Zn mineralization in the Dongmohazhua deposit, central Tibet. **Ore Geology Reviews** 90 (2017): 863-876.

8. Conclusions

- Mineralization was likely formed in an extensional regime setting in breccia zones controlled by flexurally-induced normal faults
- Current Zn-Pb sulfide ore is hosted in a hydrothermal dolomitic breccia controlled by a high-angle reverse fault striking N20W and dipping 60° to SW.
- Mineralization is hosted mainly in the breccia-matrix, but mineralization is also hosted in high-angle extensional veins
- Slickenlines indicate a transport of top to East in a thrust system with detachment zone in phyllites of Serra do Garrote Formation
- Phosphate-bearing carbonate mudstone layer was duplicated by the reverse fault
- Strike-slip faults offset the mineralization zones and host rocks
- Search for mineralization extensions controlled by faults should take into account an early normal faulting setting deformed by basin inversion.

9. References

ALKMIM, F. F. O que faz de um craton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito-Neves, B. B. de (org.) **Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca, 17-35, 2004.

ALKMIM, F.F., MARTINS-NETO, M.A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 33, n. 1, p. 127–139, 2012.

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S., FONSECA, M.A. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: clues from the São Francisco craton region, Brazil. **Geology**, v. 29, n.4, p. 319–322, 2001.

ALKMIM, F.F., CHEMALE JR., F., ENDO, I. A deformação das coberturas proterozoicas do Craton do São Francisco e o seu significado tectônico. *Revista Escola de Minas*, 49 (1), p 22-38, 1996.

ALKMIM, F.F., MARSHAK, S., FONSECA, M.A. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: clues from the Sao Francisco craton region, Brazil. *Geology* 29, p 319-322, 2001

ALMEIDA F.F.M.; HASUI Y.; FUCK R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth Sciences Review**, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.

ALMEIDA, F. F.M.; BRITO NEVES, B. B.; CARNEIRO, C.D.R. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews**, v. 50, p. 7-111, 2000.

AMARAL, G., KAWASHITA, K. Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb/Sr. Congresso Brasileiro de Geologia, SBG. Anais 21, 214–217, 1967.

APPOLD, M.S. AND MONTEIRO, L.V.S. Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil. *Geofluids*, 9(2), pp.96-115, 2009.

ARAÚJO, V. **Caracterização dos solos no depósito de zinco e chumbo de Bonsucesso, Grupo Vazante, Paracatu, Brasil.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Campinas, 97 p, 2018.

AZMY, K.; KENDALL, B.; CREASER, R.A.; HEAMAN, L.; DE OLIVEIRA, T.F. Global correlation of the Vazante Group, Sao Francisco Basin, Brazil: Re–Os and U–Pb radiometric age constraints. **Precambrian Research**, v. 164, n.3-4, p. 160–172, 2008.

Bradley, D.C., and Leach, D.L. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands: *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 652–667, 2003.

BRITO-NEVES, B.B. A historia dos continentes: trajetórias e tectônicas. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., de Brito-Neves, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flavio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, p. 123-149, 2004.

BRITO NEVES, B.B., FUCK, R.A. Neoproterozoic evolution of the basement of the South-American platform. *Journal of South American. Earth Sciences*. 47, 72–89, 2013.

BRITO NEVES B. B., WINGE, M., CARNEIRO, M.A. 1996. Orogêneses precedendo e Tafrogêneses sucedendo Rodínia na América do Sul. B. IG-USP, São Paulo, **Série Científica**, v. 27, p.1-40, 1996.

BRITO NEVES, B.B., CAMPOS NETO, M.C., FUCK, R.A. From Rodinia to Western Gondwana: an approach to the Brasiliano-Pan African cycle and orogenic collage. *Episodes* 22 (3), 155-199, 1999.

CAMPOS NETO M.C. Geometria e fases de dobramento brasileiros superpostos no oeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 14, n.1, p. 60-68, 1984.

CARVALHO, M.D.O., VALERIANO, C.D.M., GONZÁLEZ, P.A.A., OLIVEIRA, G.D. AND IMPICCINI, A., 2016. The thrust contact between the Canastra and Vazante groups in the Southern Brasília Belt: structural evolution, white mica crystallinity and implications for the Brasiliano orogeny. **Brazilian Journal of Geology**, 46(4), p.567-583, 2016.

CARVALHO, M. D. O., VALERIANO, C. D. M., AGUIAR NETO, C. C., OLIVEIRA, G. D., & HEILBRON, M. The Vazante and Canastra groups revisited: Sm-Nd and Sr isotopes-evidence for contribution from Tonian intraplate magmatism during passive margin development along the SW São Francisco margin, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, 49(1), 2019.

CATUNEANU, T.O.; MARTINS-NETO, M.A.; ERIKSSON, P.G. Precambrian sequence stratigraphy. **Sedimentary Geology**, v. 176. n. 1-2, p. 67–95, 2005.

CAXITO, F.A., UHLEIN, A., STEVENSON, R., UHLEIN, G.J. Neoproterozoic oceanic crust remnants in the northeast Brazil. **Geology** 42 (5), 387-390, 2014.

CHOROWICZ, J. Transfer and transform fault zones in continental rifts: examples in the Afro-Arabian rift system. Implications of crust breaking. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 8(2-4), p.203-214, 1989.

CORDEIRO, P.F., OLIVEIRA, C.G., PANIAGO, L.N., ROMAGNA, G. AND SANTOS, R.V. The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. *Ore Geology Reviews*, 101, p.437-452, 2018.

COWAN, E.J. 'X-ray Plunge Projection' - Understanding Structural Geology from Grade Data. AusIMM Monograph 30: Mineral Resource and Ore Reserve Estimation — The AusIMM Monograph, Guide to Good Practice, second edition, v. 30, p. 207-220., 2014.

COX, S.F., 2005. **Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust.** *Econ. Geol.* 100, 39–75.

CUNHA, I.A., COELHO, C.E.S., MISI, A. Fluid inclusion study of the Morro Agudo Pb–Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 318– 321, 2000.

CUNHA, I.A., MISI, A., BABINSKI, M. Lead isotope constraints on the genesis of Pb–Zn deposits of the Neoproterozoic Vazante Group, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Res.* 11, 382–395, 2007.

DARDENNE, M.A. 1974. Geologia da região de Vazante, Minas Gerais, Brasil. In: SGB, XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, Resumos, p.182-185, 1974.

Dardenne, M.A. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (eds). **The Tectonic Evolution of South America.** 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, 231–263, 2000.

DARDENNE, M.A., FREITAS-SILVA, F.H., SOUZA, J.C.F. DE, CAMPOS, J.E.G. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Sociedade Brasileira de Geologia, Belo Horizonte, Anais, Resumos 26, 1998.

DARDENNE, M.A. Lithostratigraphic sedimentary sequences of the Vazante Group. In: MISI, A.; TEIXEIRA, J.B.G. (Org.). **1st IGCP 450 Workshop, Proterozoic Sediment-Hosted Base Metal Deposits of Western Gondwana,** Belo Horizonte, Abstracts, p. 48-50, 2001.

DARDENNE M.A. The Brasília fold belt. In: CORDANI U.G.; MILANI E.J.; THOMAZ FILHO A.; CAMPOS D.A. (Eds.). **Tectonic evolution of South America. 31.º International Geological Congress.** Rio de Janeiro, p. 231-263, 2000.

DARDENNE M.A.; FREITAS-SILVA F.H.; SOUZA J.C.F.; CAMPOS J.E.G. Evolução tectono-sedimentar do Grupo Vazante no contexto da Faixa de Dobramentos Brasília. In: SBG, XL **Congresso Brasileiro de Geologia**, Belo Horizonte, Resumos, p. 26, 1998.

DARDENNE, M.A.; FREITAS-SILVA, F.H. Pb–Zn ore deposits of Bambuí and Vazante Groups in the São Francisco Craton and Brasilia Fold Belt, Brazil. In: SILVA, M.G.; MISI, A. (Eds.), **Base Metal Deposits of Brazil, MME-Brazil**, p. 75–83, 1999.

DECELLES, P.G.; GILES, K.A. Foreland basin systems. **Basin Research**, v. 8, n. 2, p. 105–123, 1996.

FREITAS-SILVA F.H. **Enquadramento lito-estratigráfico e estrutural do depósito de ouro de Morro do Ouro, Paracatu/MG**. Dissertação (mestrado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 151 p. 1991.

GEBROY, N.J.; KAUFMAN, A.J.; WALKER, R.J.; MISI, A.; OLIVEIRA, T.F.; MILLER, K.E.; AZMY, K.; KENDALL, B.; POUTON, S.W. Re–Os age constraints and new observations of glacial deposits in the Mesoproterozoic Vazante Group Brazil. **Precambrian Research**, v. 238, p. 199–213, 2013.

GHAZBAN, F., MCNUTT, R.H., SCHWARCZ, H.P. Genesis of sediment-hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh District, Esfahan area, west-central Iran. **Economic Geology**, 89, 1262–1278, 1994.

HARDMAN, R.F.P., BOOTH, J.E. The significance of normal faults in the exploration and production of hydrocarbons. In: Roberts, A.M., Yielding, G., Freeman, B. (Eds.), **The Geometry of Normal Faults**, vol. 56, Geological Society, London, pp. 1–13 (Special Publication), 1991.

HOU, Z.; ZHANG, H., 2015. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain. **Ore Geology Reviews**. 70, 346–384.

LANARI, P., VIDAL, O., DE ANDRADE, V., DUBACQ, B., LEWIN, E., GROSCH, E. G., & SCHWARTZ, S. XMapTools: A MATLAB©-based program for electron microprobe X-ray image processing and geothermobarometry. **Computers & Geosciences**, 62, 227–240, 2014.

LANARI, P., VHO, A., BOVAY, T., AIRAGHI, L., & CENTRELLA, S. Quantitative compositional mapping of mineral phases by electron probe micro-analyser. **Geological Society, London, Special Publications**, 478(1), 39-63, 2019.

LEACH, D.L., BRADLEY, D.C., HUSTON, D., PISAREVSKY, S.A., TAYLOR, R.D. AND GARDOLL, S.J. Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history. *Economic Geology*, 105(3), p.593-625, 2010.

LIAGHAT, S., MOORE, F., JAMI, M. The Kuh-e-Surmeh mineralization, a carbonate-hosted Zn-Pb deposit in the Simply Folded Belt of the Zagros Mountains, SW Iran. *Mineralium Deposita* 35, 72–78, 2000.

MARCIA, L. **Studio Geologico Strutturale del Settore della Faixa Brasileira compreso tra Paracatu e Vazante (Minas Gerais - Brasile)**. Universita' degli Studi di Cagliari. Facolta di Scienze. 93 p. 2014.

MARTINS-NETO, M.A. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 26, n. 2, p. 163–176, 2009.

MARJORIBANKS, R. **Geological Methods in Mineral Exploration and Mining**. Springer Science & Business Media, Second Edition, p 183-204, 2010.

MCKINSTRY, H. E. *Mining Geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1948.

MONTEIRO, L.V.S., BETTENCOURT, J.S., SPIRO, B., GRACA, R. AND DE OLIVEIRA, T.F. The Vazante zinc mine, Minas Gerais, Brazil; constraints in willemite mineralization and fluid evolution. *Exploration and Mining Geology*, 8(1-2), pp.21-42, 1999.

MONTEIRO L.V.S. **Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais**. 317 p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MONTEIRO, L.V.S.; BETTENCOURT, J.S.; JULIANI, C.; OLIVEIRA, T.F. Geology, petrography, and mineral chemistry of the Vazante non-sulfide and Ambrósia and Fagundes

sulfide-rich carbonate-hosted Zn-(Pb) deposits, Minas Gerais, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 28, n.2. p. 201-234, 2006.

MONTEIRO, L.V.S.; BETTENCOURT, J.S.; JULIANI, C.; OLIVEIRA, T.F. Nonsulfide and sulfide-rich zinc mineralizations in the Vazante, Ambrósia and Fagundes deposits, MG, Brazil: mass balance and stable isotope constraints on the hydrothermal alterations. **Gondwana Research**, v. 11, n. 3, p. 362-381, 2007.

MILANI, E.J. AND DAVISON, I. Basement control and transfer tectonics in the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, Northeast Brazil. **Tectonophysics**, 154(1-2), pp.41-70, 1988.

MISI, A., IYER, S.S., KYLE, J.R., COELHO, C.E.S., FRANCA-ROCHA, W.J.S., GOMES, A.S.R., CUNHA, I.A., CARVALHO, I.G. Geological and isotopic constraints on the metallogenic evolution of the Proterozoic sediment-hosted Pb–Zn (Ag) deposits of Brazil. **Gondwana Research** 2, 47– 65, 1999.

MISI, A., IYER, S.S.S., COELHO, C.E.S., TASSINARI, C.C.G., FRANCA-ROCHA, W.J.S., CUNHA, I.D., GOMES, A.S.R., DE OLIVEIRA, T.F., TEIXEIRA, J.B.G., FILHO, V.M.C. Sediment-hosted lead–zinc deposits of the Neoproterozoic Bambuí Group and correlative sequences, São Francisco craton, Brazil: a review and a possible metallogenic evolution model. **Ore Geology Reviews**. 26, 263–304, 2005.

MISI, A.; AZMY, K., KAUFMAN, A.J.; OLIVEIRA, T.F.; SANCHES, A.L.; OLIVEIRA, G.D. Review of the geological and geochronological framework of the Vazante sequence, Minas Gerais, Brazil: Implications to metallogenic and phosphogenic models. **Ore Geology Reviews**, v. 63, p. 76–90, 2014.

NETO, B.B. Análise estrutural e principais controles de mineralização do depósito de Ambrósia Sul-Paracatu/MG. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

NEWHOUSE, W. H. **Ore Deposits as Related to Structural Features**. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1942.

PAULA-SANTOS, G. M.; BABINSKI, M. Sedimentary provenance in the southern sector of the São Francisco Basin, SE, **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 1, p. 51-74, 2018.

PEDROSA-SOARES, A.C., NOCE, C.M., WIEDEMANN, C.M., PINTO, C.P. The Araçuaí-West Congo orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Res.* 110, p 307-323, 2001.

PEDROSA-SOARES, A.C., NOCE, C.M., ALKMIM, F.F., SILVA, L.C.DA, BABINSKI, M., CORDANI, U.G., CASTANEDA, C., 2007. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. **Geonomos** 15 (1), 1-16, 2007.

PEREIRA, L.; DARDENNE, M. A.; ROSIÈRE, C. A.; PEDROSA-SOARES, A. C. Evolução Geológica dos Grupos Canastra e Ibiá na região entre Coromandel e Guarda-Mor, MG. **Revista Geonomos**, v.2, n. 1, p. 22-32, 1994.

PIMENTEL, M. M. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 1, p. 67-82, 2016.

PINHO, J. M. M. **Evolução Tectônica da mineralização de zinco de Vazante**. Dissertação de Mestrado, UnB, 115p, 1990.

REIS, H.L.S., ALKMIM, F.F. Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: the Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. **Marine and Petroleum Geology**. 66 (4), 711–731, 2015.

REIS, H.L.S., SUSS, J.F. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: an example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco basin, Brazil. **Sedimentary Geology**. 339, 83–103, 2016.

REIS, H.L., SUSS, J.F., FONSECA, R.C. AND ALKMIM, F.F., 2017. Ediacaran forebulge grabens of the southern São Francisco basin, SE Brazil: Craton interior dynamics during West Gondwana assembly. **Precambrian Research**, 302, p.150-170, 2017.

RODRIGUES, J.B.; PIMENTEL, M.M.; BUHN, B.; MATTEINI, M.; DARDENNE, M.A.; ALVARENGA, C.J.S.; ARMSTRONG, R.A. Provenance of the Vazante Group: New U–Pb,

Sm–Nd. Lu–Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt. **Gondwana Research**, v. 21, n.2-3, p. 439–450, 2012.

ROMEIRO-SILVA, P.C.; ZALÁN, P.V. Contribuição da sísmica de reflexão na determinação do limite oeste do Cráton do São Francisco. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 561–571, 2007.

ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; REIS NETO, J. M.; FIGUEIRA, E. G.; ARAÚJO, E. C. Análise estrutural da mina de vazante e adjacências: geometria, cinemática e implicações para a hidrogeologia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 1, p. 59-68, 2002.

SIBSON, R.H. Fluid involvement in normal faulting. **Journal of Geodynamics**, 29(3-5), pp.469-499, 2000

SIBSON, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. **Journal of Structural Geology**, 18, 1031–1042.

SIBSON, R. H.; ROBERT, F.; POULSEN, K. H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. **Geology**, v. 16, n. 6, p. 551-555, 1988.

VALERIANO C.M.; DARDENNE M.A.; FONSECA M.A.; SIMÕES L.S.A.; SEER H.J. A evolução tectônica da Faixa Brasília. In: MANTESSO-NETO V.; BARTORELI A. (Eds.). **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca, p. 575-593, 2004.

VALERIANO C.M.; PIMENTEL M.M.; HEILBRON M.; ALMEIDA J.C.H.; TROUW R.A.J. Tectonic evolution of the Brasília Belt, central Brazil, and early assembly of Gondwana. In: PANKHURST R.J.; TROUW R.A.J.; BRITO NEVES B.B.; WIT M.J. (Eds.). **West Gondwana: Pre-cenozoic correlations across the South Atlantic region**. London, Geological Society, p. 197-210, 2008.

WARREN, L.V.; QUAGLIO, F.; RICCOMINI, C.; SIMÕES, M.G.; POIRÉ, D.G.; STRIKIS, N.M.; ANELI, L.E.; STRIKIS, P.C. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. **Geology**, v. 42, n. 5, p. 391–394, 2014.

ZHANG, H.; YANG, T.; HOU, Z., SONG, Y, LIU, Y, YANG, Z., TIAN, S. Structural controls on carbonate-hosted Pb–Zn mineralization in the Dongmohazhua deposit, central Tibet. *Ore Geology Reviews* 90 (2017): 863-876.