# Materiais Geológicos e Geodinâmica

## Volume I

**Fabricia Benda de Oliveira**

**Calvin da Silva Candotti**

**Marcela Lopes Zanon**

**(Organizadores)**

**Fabricia Benda de Oliveira**

**Calvin da Silva Candotti**

**Marcela Lopes Zanon**

**(Organizadores)**

# MATERIAIS GEOLÓGICOS E GEODINÂMICA

## VOLUME I

**CAUFES**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M425 Materiais Geológicos e Geodinâmica [recurso eletrônico] / Fabricia Benda de Oliveira, Calvin da Silva Candotti, Marcela Lopes Zanon, Organizadores. - Dados eletrônicos. – Alegre, ES : CAUFES , 2022.
63 p. : il. (Geofísica Aplicada v.1)

ISBN: 978-65-86981-28-5
Modo de acesso: http://geologia.ufes.br/e-book

1. Rochas ornamentais. 2. Granito. 3. Petrografia. 4. Caracterização. 5. Dobras-falha. I. Oliveira, Fabricia Benda de, 1978-. II. Candotti, Calvin da Silva, 1985-. III. Zanon, Marcela Lopes, 1987.

CDU: 549

Elaborado por Raniere Barros Barreto – CRB-6 ES - 000861/O

# APRESENTAÇÃO

A produção deste trabalho é independente e surgiu da ideia e colaboração de professores, alunos e ex-alunos do curso de Geologia do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, da Universidade Federal do Espírito Santo. Estão contidos neste livro 4 trabalhos apresentados na forma de capítulos e que abrangem temas relacionados a Geologia. O material contido nesta obra servirá de auxílio para estudantes, professores e profissionais da área das geociências em seus trabalhos e pesquisas.

**REITOR – UFES**
**PAULO SÉRGIO DE PAULA VARGAS**

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE – UFES**
**TAIS CRISTINA BASTOS SOARES**

**ORGANIZADORES DESTA OBRA**
**FABRICIA BENDA DE OLIVEIRA**
**CALVIN DA SILVA CANDOTTI**
**MARCELA LOPES ZANON**

Os textos apresentados nesse livro são de inteira responsabilidade dos autores. Os organizadores não se responsabilizam pela revisão ortográfica e gramatical dos trabalhos apresentados.

## LISTA DOS ORGANIZADORES

**Fabricia Benda de Oliveira.** Professora Associanda no Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo / Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Alegre, ES, e-mail: fabricia.oliveira@ufes.br

**Calvin da Silva Candotti.** Estudante de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas (PPGGEO – UFAM), Manaus, AM, e-mail: calvindasilvacandotti@gmail.com

**Marcela Lopes Zanon.** Professora no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Congonhas, MG, e-mail: marcela.zanon@ifmg.edu.br

## LISTA DE AUTORES

**ANA CAROLINA CARPANEDO PAGANOTTI**
**ANA PAULA MEYER**
**CAIO VINÍCIUS GABRIG TURBAY RANGEL**
**CARLA HEMILLAY DE OLIVEIRA SANTOS**
**CAROLINE JANETTE SOUZA GOMES**
**CLÁUDIO EDUARDO LANA**
**EVANIZIS DIAS FRIZZERA CASTILHO**
**MARCELA LOPES ZANON**
**MARÍLIA BARBOSA VENÂNCIO**
**MICHEL PARIS MAGNAGO**
**SÉRGIO DE CASTRO VALENTE**

**Sumário**

**Capítulo 1**.....9

**Influência das características petrográficas no processo de desdobramento de blocos de rochas ornamentais**

*Ana Carolina Carpanedo Paganotti; Ana Paula Meyer; Evanizis Dias Frizzera Castilho; Marcela Lopes Zanon; Cláudio Eduardo Lana*

**Capítulo 2**.....21

**Defeitos e assinaturas genéticas das rochas ornamentais: abordagem a partir do estudo dos granitos cinza de Castelo-ES**

*Ana Paula Meyer; Marcela Lopes Zanon*

**Capitulo 3**.....35

**Estudo geológico da porção sudoeste do maciço Santa Angélica – ES: bases para o desenvolvimento de um modelo preliminar de caracterização do "Granito Preto Santa Angélica"**

*Marcela Lopes Zanon; Caio Vinícius Gabrig Turbay Rangel; Michel Paris Magnago; Sérgio de Castro Valente; Cláudio Eduardo Lana*

**Capítulo 4**.....49

**Dobras – falhas: uma breve revisão**

*Marcela Lopes Zanon; Caroline Janette Souza Gomes; Marília Barbosa Venâncio; Carla Hemillay de Oliveira Santos*

**Capítulo 1**

# Influência das características petrográficas no processo de desdobramento de blocos de rochas ornamentais

*Ana Carolina Carpanedo Paganotti [1]; Ana Paula Meyer[1]; Evanizis Dias Frizzera Castilho[1]; Marcela Lopes Zanon[2]; Cláudio Eduardo Lana[3]*

**RESUMO.**
O processo de desdobramento, conhecido também como beneficiamento primário, é uma importante etapa da produção de Rochas Ornamentais, caracterizado pela serragem dos blocos em chapas. As características petrográficas dos materiais rochosos podem afetar diretamente o tempo de serragem dos blocos, a qualidade das chapas produzidas e, consequentemente, os insumos utilizados no beneficiamento secundário, além do custo final de produção. À vista disto, neste capítulo é abordado a investigação da influência das características petrográficas no processo de desdobramento, de diferentes tipos de blocos rochosos, em um tear multifio. No total, foram analisados doze materiais comerciais, caracterizados como granitos, mármores e quartzito. Os resultados mostraram uma significativa relação entre o tempo de desdobramento e as características petrográficas de cada rocha, indicando que o comportamento do bloco durante a serragem pode ser estabelecido para fins de melhorar a etapa de beneficiamento de Rochas Ornamentais**.**

**PALAVRAS-CHAVE.** Beneficiamento; Granito; Mármore; Petrografia, Quartzito.

## INTRODUÇÃO

O setor de Rochas Ornamentais possui ampla representatividade na economia brasileira. Segundo o SINDIROCHAS (2020), de janeiro a dezembro de 2019 foram exportadas 2.153.455 toneladas, o que corresponde a U$ 1.012.067.398 em faturamento. O Estado do Espirito Santo,

**[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus Cachoeiro de Itapemirim, ES;**
**[2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Congonhas, MG;**
**[3]Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG**

por sua vez, possui grande participação nesse mercado. No mesmo período de 2019, exportou 1.655.090 toneladas de rochas, equivalente a 76,86 % da exportação brasileira e 81,78% do faturamento nacional (valor de U$827.710.904). Desse faturamento capixaba, U$ 10.967.834 representam exportações de blocos de mármores e similares, U$ 94.064.736 de blocos de granitos e similares, U$ 60.267.766 chapas e outras peças de mármores e similares, U$ 662.357.062 chapas e outras peças de granitos e similares e U$ 53.506 de outras rochas como ardósias e similares.

De acordo com Silveira *et al*. (2014), o beneficiamento de rocha ornamental é, em sua essência, a modificação da matéria prima em produtos finais acabados ou semiacabados, e pode ser dividido em beneficiamento primário e secundário. O beneficiamento primário consiste no desdobramento dos blocos em chapas, com 2 ou 3 cm de espessura, a partir da serrada em teares multilâminas ou convencionais, multifio e suplementarmente ou por talha-blocos e teares diamantados. No beneficiamento secundário, ocorre o acabamento das chapas, que pode ser realizado juntamente com o processo de resinar, escovar, flamear, dentre outros tipos de acabamento de superfície.

Na indústria de Rochas Ornamentais, a relação entre o tempo de desdobramento dos blocos e a qualidade das chapas produzidas pode auxiliar no controle do custo e na garantia de uma produtividade ideal, que evitaria retrabalhos durante o beneficiamento secundário devido às serradas consideradas de má qualidade durante o beneficiamento primário. Atualmente, o que se conhece sobre o tempo de desdobramento dos blocos pode ser considerado empírico, ou seja, é baseado em experiências anteriores realizadas pelas indústrias do setor nos materiais já serrados previamente em determinadas máquinas e insumos. Sendo assim, realizou-se um estudo com objetivo investigar a influência das características petrográficas no processo de desdobramento dos blocos de Rochas Ornamentais. Os resultados, apresentados neste capítulo, podem auxiliar na compreensão dos fatores que condicionam o comportamento das rochas durante o processo de serrada dos blocos, contribuindo para escolha do procedimento mais adequado que garanta a qualidade final da chapa durante o beneficiamento primário.

Na literatura, diversos autores reconhecem a influência das características petrográficas na qualidade e na aplicabilidade de diferentes litotipos como Rochas Ornamentais. Artur *et al.* (2001), Meyer (2003) e Meyer *et al.* (2014), por exemplo, reconheceram a relação existente entre as feições texturais e mineralógicas de uma rocha em suas propriedades tecnológicas. Já Silveira *et al.* (2012) investigaram como as propriedades petrográficas influenciaram no processo de polimento de chapas de Rochas Ornamentais (fase do beneficiamento secundário).

Na pesquisa aqui apresentada foi analisada como os aspectos petrográficos de uma rocha podem influenciar no tempo de desdobramento de blocos em um tear multifio (fase de beneficiamento primário). Neste caso, os litotipos estudados são utilizados como Rochas Ornamentais, identificados como de composição silicática (granitos e quartzito) e carbonática (mármores). A comparação entre o tempo máximo, mínimo e médio de serrada indicou uma forte relação entre a resistência do bloco à serrada e as características da rocha, tais como: homogeneidade composicional (composição e distribuição dos minerais), a presença de estruturas (como acamamento e foliação) e o grau de alteração das rochas (taxa de intemperismo).

## METODOLOGIA

Foram analisados doze tipos de Rochas Ornamentais, sendo oito comercialmente designadas como granito, três como mármore e uma como quartzito (Figuras 1 e 2). Os granitos utilizados para a pesquisa são: *Crema Bordeaux*, *Fiesta Gold*, *Napoli*, *Santa Cecilia Light*, *Nilo River*, *Salinas White*, *Serena White* e *Ocre* (Hora *et al*. 2008; Brasil & Barbosa 2010; Filho *et al*. 2013; Souza *et al.* 2017 e 2019). Os mármores são reconhecidos no mercado como *Avalanche*, *Nobilis* e *Mont Blanc* (denominado anteriormente como Brazilian Calacatta) (Basilio & Silveira 2015; Silveira & Santos 2015) e, por fim, o quartzito tem a designação comercial de *Wakanda* (Souza *et al.* 2018).

A análise petrográfica é apresentada na Tabela 1. A mesma envolveu a determinação da composição modal da rocha, sua classificação e suas características texturais. A classificação petrográfica baseou-se na compilação dos laudos cedidos pela empresa responsável pela comercialização desses materiais. Também utilizaram-se os dados apresentados pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), pelo Laboratório de Petrologia e Tecnologia das Rochas e do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED) da Faculdade de Tecnologia Cachoeiro de Itapemirim (FACI), além das informações disponíveis no ‘Manual de Caracterização, Aplicação, Uso e Manutenção das Principais Rochas Comerciais no Espírito Santo’ e do ‘Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo’.

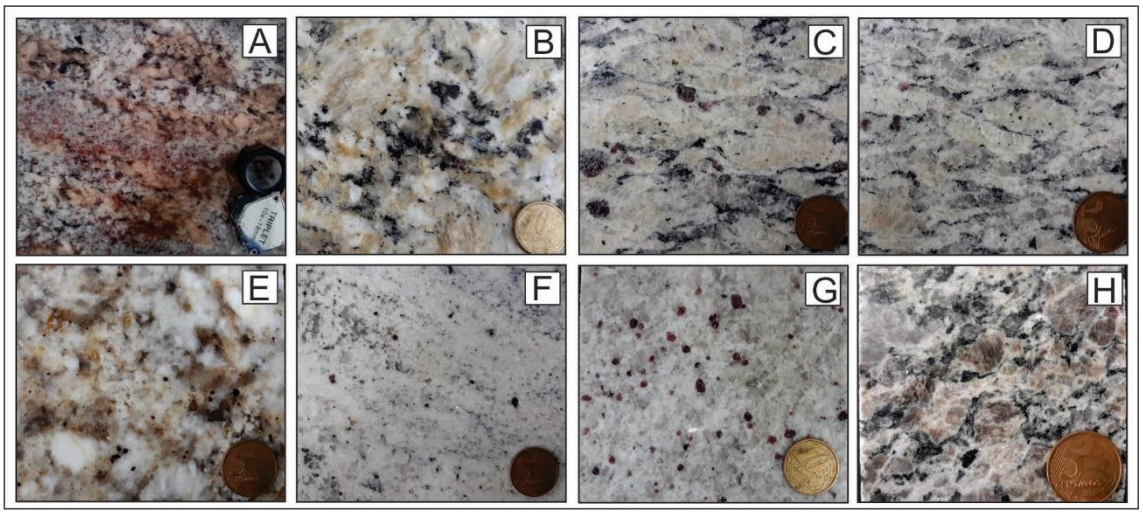


**Figura 1.** Granitos (A) Crema Bordeaux, (B) Fiesta Gold, (C) Napoli, (D) Santa Cecília Light, (E) Nilo River, (F) Salinas White, (G) Serena White e (H) Ocre.

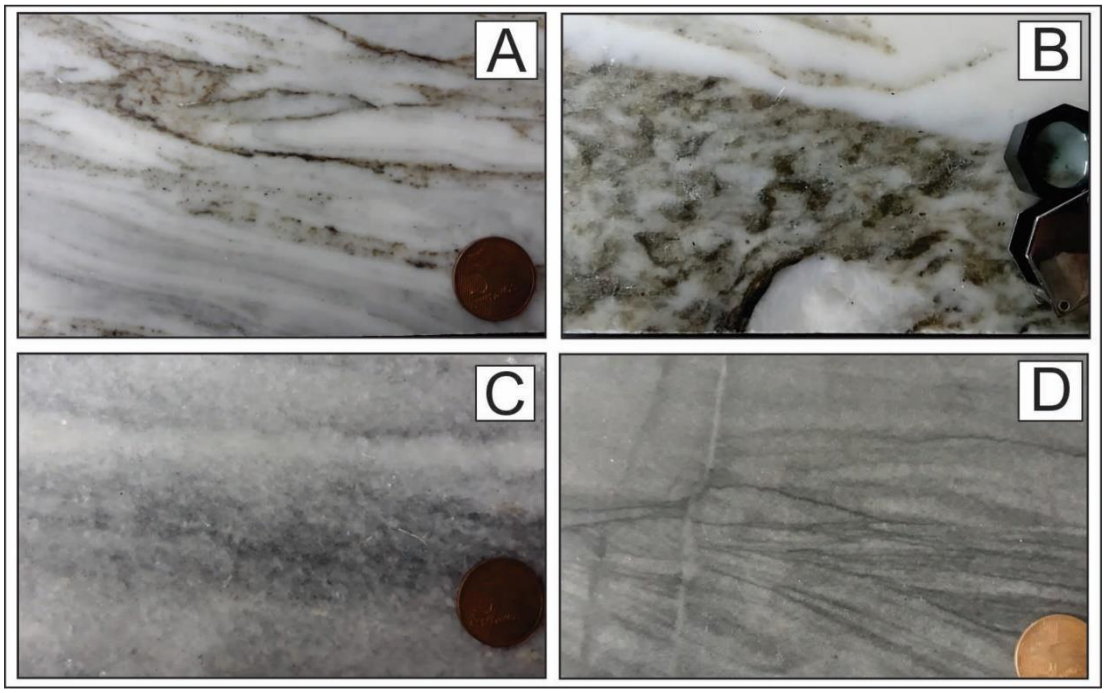


**Figura 2.** Mármores (A) Avalanche, (B) Nobilis e (C) Mont Blanc e o Quartzito (D) Wakanda.

| MINERALOGIA (%) | Designação comercial das rochas analisadas | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Avalanche // | Nobilis | Mont Blanc | Crema Bordeaux | Fiesta Gold | Napoli // | Santa Cecilia Light | Nilo River | Salinas White | Ocre | Serena White | Wakanda |
| Calcita | 80 | | 10 a 15 | - | - | | | - | | - | - | - |
| Dolomita | 5 | | 85 | - | - | | | - | | - | - | - |
| Feldspato | 5 | | - | 65 | 33 | | | 62 | | 65 | 62 | - |
| Quartzo | 5 | | - | 30 | 23 | | | 35 | | 5 | 33 | 100 |
| Oligoclásio | - | | - | - | 27 | | | - | | - | - | - |
| Granada | - | | - | - | 7 | | | 3 | | - | 4 | - |
| Biotita | - | | - | - | 6 | | | - | | 7 | 1 | - |
| Silimanita | - | | - | - | 4 | | | - | | - | - | - |
| Anfibólio | - | | - | - | - | | | - | | - | - | - |
| Hornblenda | - | | - | - | - | | | - | | 14 | - | - |
| Titanita | - | | - | - | - | | | - | | 4 | - | - |
| Zircão | - | | - | - | Traços | | | - | | - | - | - |
| Opacos | - | | - | - | Traços | | | - | | 5 | - | - |
| Minerais Secundários | 5 | | <5 | <5 | - | | | - | | - | | |
| Variação Granulação (mm) | - | | - | 1 a 30 | 0,15 a 4 | | | 0,4 a 2,2 | | - | 0,3 a 2,2 | 0,1 a 0,3 |
| **Classificação** | **Calcita Mármore** | | **Dolomita mármore** | **Gnaisse monzogranítico** | **Silimanita-biotita-granada-gnaisse** | | | **Granada gnaisse** | | **Hornblenda quartzo sienito** | **Gnaisse** | **Quartzito** |
| Textura | Granoblástica granular | | Inequigranular fina a média | Granoblástica inequigranular a porfiroblástica | Inequigranular Granoblástica | | | Inequigranular granoblástico | | Granulação fina a grossa | - | - |

**Tabela 1.** Análise petrográfica das Rochas Ornamentais analisadas.

**Influência das características petrográficas no processo de desdobramento de blocos de rochas ornamentais**

Os dados sobre o processo de desdobramento (serrada dos blocos em chapas) foram disponibilizados por uma empresa situada em Cachoeiro de Itapemirim – ES, que preferiu manter o anonimato. As informações utilizadas na pesquisa correspondem à duração (em horas) do desdobramento dos blocos rochosos a partir da serrada em um tear do tipo multifio da marca Pedrinim. Este equipamento possui capacidade máxima de produção de 63 chapas (com 2 cm de espessura) ou 47 chapas (de 3 cm), em uma única serrada, a partir do corte por fio diamantado (neste caso, de liga intermediária).

As informações sobre o desdobramento dos materiais rochosos resultaram da análise conjunta de sucessivos processos de serrada dos blocos. É importante destacar que a quantidade de serrada utilizada no estudo se deu em função dos dados disponíveis pela empresa. E a partir destes dados, obteve-se o número mínimo e máximo de horas, além da duração média do beneficiamento primário dos diferentes tipos de rochas analisadas (Tabela 2).

**Tabela 2.** Informações sobre o processo de desdobramento dos blocos em chapas

| MATERIAL ROCHOSO | DURACÃO MÍNIMA (H) | DURACÃO MÁXIMA (H) | INTERVALO MÁX.-MÍN. (H) | MÉDIA (H) | Nº DE SERRADA |
|---|---|---|---|---|---|
| Avalanche | 8,1 | 9,7 | 1,6 | 8,77 | 10 |
| Nobilis | 7,67 | 8,82 | 1,15 | 8,25 | 2 |
| Mont Blanc | 4,92 | 5,92 | 1,0 | 5,26 | 3 |
| Crema Bordeaux | 6,01 | 8,07 | 2,05 | 7,07 | 21 |
| Fiesta Gold | 6,24 | 8,57 | 2,33 | 7,23 | 28 |
| Napoli | 5,6 | 9,83 | 4,23 | 7,33 | 61 |
| Santa Cecilia Light | 5,42 | 8,96 | 3,54 | 6,95 | 114 |
| Nilo River | 5,53 | 8,77 | 3,24 | 6,83 | 26 |
| Salinas White | 5,85 | 10,47 | 4,62 | 7,33 | 265 |
| Serena White | 5,43 | 7,55 | 2,12 | 6,26 | 13 |
| Ocre | 7,13 | 10,46 | 3,33 | 9,06 | 40 |
| Wakanda | 22,53 | 37,3 | 14,77 | 29 | 31 |

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os materiais estudados podem ser agrupados em três tipos de rochas, conforme sua composição mineralógica predominante (Tabela 1), sendo eles: um conjunto de rochas carbonáticas, constituído pelos mármores *Avalanche*, *Nobilis* e *Mont Blanc*; um de rochas silicáticas, cujos nomes comerciais são granitos *Crema Bordeaux*, *Fiesta Gold*, *Napoli*, *Santa*

*Cecilia Light*, *Nilo River*, *Salinas White*, *Serena White* e *Ocre*; e a rocha silicosa, representada pelo quartzito *Wakanda*.

Os granitos designados de *Crema Bordeaux*, *Fiesta Gold*, *Napoli*, *Santa Cecilia Light*, *Nilo River*, *Salinas White* e *Serena White* são classificados petrograficamente como gnaisses. Além desses na categoria comercial de granito, também foi estudado o quartzo sienito, conhecido comercialmente como *Ocre*. Os mármores *Avalanche* e *Nobilis* classificam-se como calcita mármore, já o *Mont Blanc* como dolomita mármore. E, por fim, o quartzito com designação comercial de *Wakanda* manteve a mesma nomenclatura na classificação petrográfica.

Os granitos *Fiesta Gold*, *Napoli* e *Santa Cecília Light* são oriundos da mesma jazida. As chapas dos materiais *Napoli* e *Santa Cecília Light* são obtidas a partir do mesmo bloco, sendo o primeiro a favor a foliação e o segundo contra a foliação da rocha. Já o granito *Fiesta Gold* é diferenciado dos demais por apresentar coloração amarela mais intensa, resultante dos processos de alteração superficial.

Também pertencem a uma mesma jazida os granitos *Nilo River* e *Salinas White*, ambos classificados como granada gnaisse. Neste caso, o granito *Nilo River* é extraído na porção mais superficial da pedreira e por isto apresenta coloração amarelada, enquanto que o *Salinas White* está em níveis topográficos inferiores e sua cor é branca.

Da mesma forma, os mármores *Avalanche* e *Nobilis* representam o mesmo litotipo, diferenciados comercialmente em função da posição na qual se obtém a chapa. No *Avalanche*, a chapa é obtida a favor da foliação, enquanto que no *Nobilis* o corte é feito ao contrário.

O intervalo entre o tempo máximo e mínimo de desdobramento dos blocos variou significativamente entre as rochas analisadas, sendo menor nos mármores (na ordem de 1h) e maior no quartzito (atingindo até 15h) (Tabela 2). Tal diferença pode ser relacionada à dureza dos minerais que constituem estas rochas, capaz de modificar o desempenho máximo de corte dos fios durante a serrada. Outro fator a se destacar para o quartzito é a presença de estruturas primárias de deposição, caracterizadas como estratificações cruzadas. Dependendo da posição desta feição em relação ao fio diamantado, o desdobramento pode ser facilitado ou não. Contudo, essas informações não foram analisadas pela empresa durante o processo de serrada desses blocos.

Entre as rochas de composição silicática, o intervalo entre o tempo máximo e mínimo de serrada foi na ordem de 2 a 4 horas (Tabela 2). Os materiais que se destacaram com as maiores amplitudes foram os granitos *Napoli* e o *Salinas*, que são designados pela empresa como “materiais de afiar fio” no processo de desdobramento de blocos. Os mesmos são

submetidos à serrada quando os teares multifios estão perdendo sua capacidade de corte, promovendo o desgaste da liga que envolve os diamantes e melhorando seu funcionamento. Desta forma, os blocos destes materiais são serrados em "fios cegos", o que justifica a significativa diferença entre o tempo máximo e mínimo de desdobramento (que pode chegar até 4 horas).

Comparando o tempo de desdobramento dos materiais, notou-se que não há um padrão entre os valores que permita estabelecer uma relação significativa entre o intervalo médio de serrada e a composição mineralógica predominante de cada conjunto de rocha (carbonática, silicática e silicosa). No entanto, os materiais comerciais obtidos a partir de uma mesma jazida mostraram que o tempo de serrada pode ser controlado pela posição do fio diamantado em relação ao plano de foliação, como no caso dos granitos *Napoli* e *Santa Cecília* e dos mármores *Avalanche* e *Nobilis* (Tabela 2). O grau de alteração também interferiu no desdobramento dos blocos, como se observou nos granitos *Nilo River* e *Salinas White*.

Embora os mármores sejam considerados do ponto de vista geológico como rochas "macias" por sua composição (constituída por minerais carbonáticos, estes de baixa dureza na escala de Mohs), apenas o *Mont Blanc* registrou tempo médio de serrada inferior aos demais materiais analisados (Tabela 2). Os mármores calcíticos *Avalanche* e *Nobilis* apresentaram intervalo médio de serrada superior às rochas silicáticas (com exceção do granito *Ocre*), cuja mineralogia é representada principalmente por feldspatos e quartzo (minerais com elevado índice de dureza na escala de Mohs).

A comparação entre o tempo médio de desdobramento e a composição modal (Tabelas 1 e 2) sugere que os materiais rochosos cujos minerais ocorrem em proporção (porcentagens) mais homogêneas apresentam menores intervalos de duração da serrada. Esses foram os granitos *Serena White*, *Nilo River*, *Santa Cecília Light*, *Crema Bordeaux*, *Fiesta Gold*, *Napoli* e *Salina White* (classificados como gnaisses) e o mármore *Mont Blanc*. Em contrapartida, os blocos de granito *Ocre* (classificado como quartzo sienito) e mármores *Avalanche* e *Nobilis*, cujos minerais ocorrem em proporções heterogêneas e exibem diferentes índices de durezas (veja Tabela 1), mostraram maior resistência ao processo de serragem (Tabela 2).

Tais relações sugerem que a resistência do material rochoso ao processo de desdobramento está condicionada à composição modal, à variação do índice de dureza de seus minerais e também à distribuição dos grãos. Apesar de o quartzo ter elevado índice de dureza, quando o mesmo ocorre em proporções (porcentagem) equilibradas com os feldspatos, o processo de serrada dos blocos se dá com certa facilidade, como no caso dos gnaisses.

Nos mármores calcíticos, a proporção de 5% de quartzo e 5% de feldspato (estes distribuídos de forma heterogênea entre os grãos de calcita), torna a rocha mais resistente à serrada. Isto ocorre porque o material começa apresentar pontos de resistência de corte significativamente distintos da massa mineral de maior proporção (neste caso, da calcita), promovendo desvios do fio diamantado de acordo com a tensão estabelecida durante a serrada.

O mesmo ocorre no granito *Ocre*, no qual há uma diferença expressiva entre a porcentagem de quartzo e feldspatos. Nestes materiais, a velocidade de corte precisa ser diminuída para evitar tais desvios que comprometem a qualidade da chapa durante o beneficiamento primário. Apresentação dos resultados obtidos e suas relações com o tema estudado. Cada resultado tem significativa importância para a conclusão em geral. Dessa forma, a discussão acerca de qualquer resultado é feita utilizando referências de trabalhos semelhantes com a finalidade de criar uma base argumentativa que apoie a conclusão.

## CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que o tempo de desdobramento dos blocos pode ser influenciado pelos aspectos composicionais da rocha. O quartzito *Wakanda*, por exemplo, foi o material mais "duro" no processo de serrada, mostrando que sua composição (100% de quartzo, mineral de elevada dureza) interferiu no intervalo médio, no tempo mínimo e no tempo máximo de desdobramento dos blocos. Já os mármores apresentaram menor intervalo médio de serrada, uma vez que seus principais minerais apresentam baixo índice de dureza.

A homogeneidade composicional também influenciou diretamente no tempo de serrada. Os materiais cuja composição apresentou maior heterogeneidade (quanto à porcentagem e índice de dureza dos minerais, bem como a distribuição de seus grãos) apresentaram maior resistência ao desdobramento dos blocos, como no caso do granito *Ocre* e dos mármores *Avalanche* e *Nobilis*.

O desdobramento de materiais rochosos obtidos a partir de uma mesma jazida apresentou melhor desempenho na serrada em situações onde o fio diamantado ficou na posição paralela ao plano de foliação (ex. granito *Napoli* e mármore *Avalanche*). Neste caso, além da foliação agir como uma superfície de fraqueza, a exposição de minerais com dureza similar possibilita um corte mais eficiente.

O tempo de serrada também é influenciado pelo grau de alteração das rochas, como no caso do granito *Nilo River* em relação ao *Salinas White*. O maior grau de alteração no *Nilo River* possivelmente reduziu a resistência do bloco ao processo de serrada.

**Influência das características petrográficas no processo de desdobramento de blocos de rochas ornamentais**

As relações entre o processo de desdobramento das Rochas Ornamentais e a composição mineralógica, aspectos texturais, presença de estruturas planares (ex. foliação) e o grau de alteração descritas no presente capítulo indicam a necessidade de novos estudos visando à continuidade desta investigação. Tais conhecimentos são de grande importância, uma vez que os mesmos podem garantir uma melhor qualidade final da chapa, reduzindo os custos de produção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABIROCHAS.** Disponível em: https://www.abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/abinoticias/Setor_de_Rochas_Ornamentais.pdf. Acesso em 15 de fevereiro de 2020.

Artur, A. C, Meyer, A. P. Wernick, E. **Características tecnológicas de granitos ornamentais: A influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha**. Dados comparativos e implicações de utilização. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais e II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste. Museu Geológico da Bahia, Salvador, 13 – 19, 2001.

Basilio, M., Silveira, L. L.L. **Caracterização tecnológica de rocha comercialmente denominado Brazilian Calacatta da empresa Pemagran Mineração LTDA**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Cachoeiro de Itapemirim, 2015.

Brasil, V. A., Barbosa, A. C. **Determinação de índices físicos**. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento – CEPED, Camaçari, 2010.

Sardou Filho, R. **Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado do Espirito Santo**. In: FILHO, R.S. *et al*. Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espirito Santo, 1ª ed, Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Brasília, 2013.

Hora, C. V., Kanaciro, C., Nobrega, L. P. **Anexo A do relatório de ensaio nº 908 810**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, São Paulo, 2004.

Meyer AP. **A influência da petrografia no comportamento tecnológico de Rochas Ornamentais do Complexo Socorrro (SP) e Maciço Pedra Branca (MG).** Dissertação

(mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Estado de São Paulo, Rio Claro, 2003.

Meyer, A.P.; Zanon, M.L.; Artur, A.C.; Oliveira, N.P.L. **A influência da textura e da mineralogia na porosidade aparente, absorção de água e densidade aparente das rochas ígneas.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v.(11), 326 – 331, 2014.

Silveira, L.; Rodrigues, J.E.; Ribeiro, R. **Influence of the Petrographic Characteristics on the Industrial Polishing of Ornamental Granites Slabs.** Disponível em: https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2012/CAC00460012.pdf. Acesso em: 23 de agosto de 2021. Ano de publicação: 2012.

Silveira, L. L.L., Vidal, F.W.H., Souza, J.C. **Beneficiamento de Rochas Ornamentais**. In: Vidal, F.W.H., Azevedo, H.C.A., Castro, N.F. (Eds). Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento, 1ªed. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, 2014.

Silveira, L. L.L., Santos, E.S. **Análise petrográfica do material denominado comercialmente Iberê Avalanche para a empresa Pemagran Pedras Mármores e Granitos LTDA**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Cachoeiro de Itapemirim, 2015.

**Sindirochas.** Disponível em: https://www.sindirochas.com/downloads/relatorios/exportacoes-de-rochas-dezembro-2019.pdf. Acesso em 10 de fevereiro de 2020.

Souza, M.P.G., Almeida, C.L., Lorenzoni, C.B. **Relatório de ensaio 067 – R/2017**. Faculdade de Tecnologia Cachoeiro de Itapemirim, Cachoeiro de Itapemirim, 2017.

Souza, M.P.G., Almeida, C.L., Lorenzoni, C.B. **Relatório de ensaio 074 – R/2018**, Faculdade de Tecnologia Cachoeiro de Itapemirim, Cachoeiro de Itapemirim, 2018.

Souza, M.P.G., Almeida, C.L., Lorenzoni, C.B. **Relatório de ensaio 023 – R/2019**. Faculdade de Tecnologia Cachoeiro de Itapemirim, Cachoeiro de Itapemirim, 2019.

**Capítulo 2**

# Defeitos e assinaturas genéticas das rochas ornamentais: abordagem a partir do estudo dos granitos cinza de Castelo-ES

*Ana Paula Meyer[1]; Marcela Lopes Zanon[2]*

**RESUMO.**

Os granitos cinza do município de Castelo (ES) estão inseridos no Maciço Castelo, um corpo intrusivo associado ao magmatismo pós-colisional do Orógeno Araçuaí (entre 535 até 480 Ma), constituído por uma borda de composição granítica e um núcleo máfico. O processo de mistura entre os magmas félsico (da borda) e máfico (do núcleo) e de assimilação da encaixante resultaram em uma série de feições, entre elas: venulações de biotita, enclaves máficos e surmicáceos, além de xenólitos que descaracterizam o padrão textural dos granitos explotados na região. Apesar de serem designadas como "defeitos" no setor de Rochas Ornamentais, as mesmas não modificam o comportamento físico e tecnológico dos materiais rochosos. Sendo assim, o presente capítulo apresenta a descrição e a discursão acerca da origem destas diferentes feições texturais, visando incentivar o uso comercial dos granitos cinza de Castelo associados à tais "defeitos", o que, consequentemente, pode reduzir a quantidade de rejeitos nas lavras e aumentar a produtividade.

**PALAVRAS-CHAVE.** Diques; Enclaves; Pegmatitos; Vênulas

## INTRODUÇÃO

Os eventos magmáticos e metamórficos associados ao Orógeno Araçuaí estão diretamente relacionados à diversidade de materiais rochosos que compõem o Estado do Espírito Santo. Esta variedade de padrões de cores e de texturas proporcionaram vantagens

**[1]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Campus Cachoeiro do Campo, ES, Brasil;**
**[2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Congonhas, MG, Brasil**

competitivas no mercado de Rochas Ornamentais na região, que produz desde materiais comuns até os nobres de alta valorização no mercado exterior. A grande quantidade de maciços rochosos exumados, associados aos grandes desníveis topográficos na região (superiores a 500 m), facilita a extração dos blocos de rocha ornamental, onde as lavras são iniciadas a partir de matacões, evoluindo para lavra de maciço através de bancadas (Sardou Filho *et al*., 2013).

No Espírito Santo são catalogados cento e nove variedades de Rochas Ornamentais. A maioria das variedades de granitos comerciais estão relacionados a intrusões bimodais associadas à Supersuíte G5 (granitogenese pós colisional) do Orógeno Araçuaí. Os granitos nas cores cinza, verde, rosa e marrom, classificados petrograficamente como biotita monzogranitos, sienitos e charnockitos, ocorrem nas bordas graníticas destes corpos intrusivos. Já os materiais rochosos de coloração preta, denominados gabros, noritos e dioritos, são extraídos nos núcleos básicos (*In:* Atlas de rochas ornamentais do Estado do Espírito Santo 2013).

Segundo os registros do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a extração de granitos de cor cinza no Maciço Castelo se desenvolve há mais de trinta anos, o que coloca o município entre os principais polos de produção deste material rochoso. O processo de explotação ocorre na borda sudoeste do Maciço, onde se instalam lavras em bancadas e lavras de matacões. As diferentes feições, resultantes da mistura de magmas e de processo de assimilação, estão relacionadas aos processos genéticos de geração deste e de outros corpos intrusivos do Espírito Santo. No entanto, no setor de Rochas Ornamentais tais feições são categorizadas como “defeitos”, pois modificam o padrão textural das rochas.

Neste contexto, o estudo apresentado neste capítulo busca despertar uma reflexão sobre o aproveitamento das rochas extraídas neste corpo intrusivo, independente da presença ou não destas feições (que teoricamente ocasionam um defeito estético). Ainda que haja resistência do mercado consumidor por peças de materiais rochosos com heterogeneidade, a discussão do tema é pertinente, pois a rocha ornamental é um bem não renovável. Sendo assim, reduzir a quantidade de rejeito durante a fase de lavra e de beneficiamento pode favorecer uma atividade minerária mais sustentável.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Maciço Castelo corresponde a um pluton de aproximadamente 100 km$^2$ que assume forma elíptica, estrutura concêntrica e zoneamento inverso marcado por um núcleo diorítico e uma espessa borda granítica (Wiedemann-Leonardos *et al.*, 2000). Atualmente existem cerca de quinze pedreiras de extração de Rocha Ornamental, distribuídas na borda sudoeste deste

Maciço (Figura 1). Dessas frentes, três são pedreiras de maciço rochoso (lavra em bancadas) e as demais são do tipo matacão, sendo esta última desenvolvida sobre depósitos coluvionares (Figura 2).

As Rochas Ornamentais extraídas no Maciço de Castelo correspondem aos seguintes litotipos: monzogranito fino, monzogranito inequigranular fino a grosso e monzogranito porfirítico (com granulação variando de fino a muito grosso). Tais rochas são designadas comercialmente como Granito Cinza Andorinha, Corumbazinho e Cinza Corumbá (Figura 3).

Os materiais rochosos explotados nas diversas frentes de lavra existentes no corpo intrusivo Castelo podem demonstrar algumas variações no tamanho dos cristais, como é notado no Granito Cinza Corumbá, que apresenta textura porfirítica em algumas porções do maciço, enquanto que em outras pode assumir um aspecto inequigranular serial. A cor também pode variar, sendo o cinza predominante. Contudo, alguns materiais podem apresentar uma nuance rosa desenvolvida a partir de cristais de feldspato potássico róseo. Com relação ao Granito Cinza Andorinha, as variações na granulação são bem mais sutis, observada apenas a partir da comparação entre materiais de diferentes frentes de extração (cuja diferença entre o tamanho dos grãos não ultrapassa 5 mm).

No setor de Rochas Ornamentais, estes litotipos são considerados materiais comuns, de menor valor agregado por conta da sua coloração, mas que são amplamente comercializadas no mercado interno brasileiro como revestimentos (pisos e fachadas). Com relação ao comportamento tecnológico, as mesmas são consideradas de ótimo desempenho, indicadas para vários ambientes (Oliveira 2016). Algumas feições petrográficas, como xenólitos, veios, e principalmente as vênulas de biotita (estas associadas a misturas de magma e/ou restitos da fusão parcial da rocha fonte) podem desqualificar estes materiais no mercado por modificar o padrão estético do bloco, que passa a ser considerado de segunda linha (Figura 4). Neste caso, sendo vendido a preços mais baixos ou descartados como rejeito nas lavras. No entanto, Meyer & Ferriane (2020) desenvolveram um estudo de caracterização de rochas contendo as vênulas de biotita e demonstraram que tais feições não comprometem o uso dos materiais do ponto de vista de desempenho tecnológico.

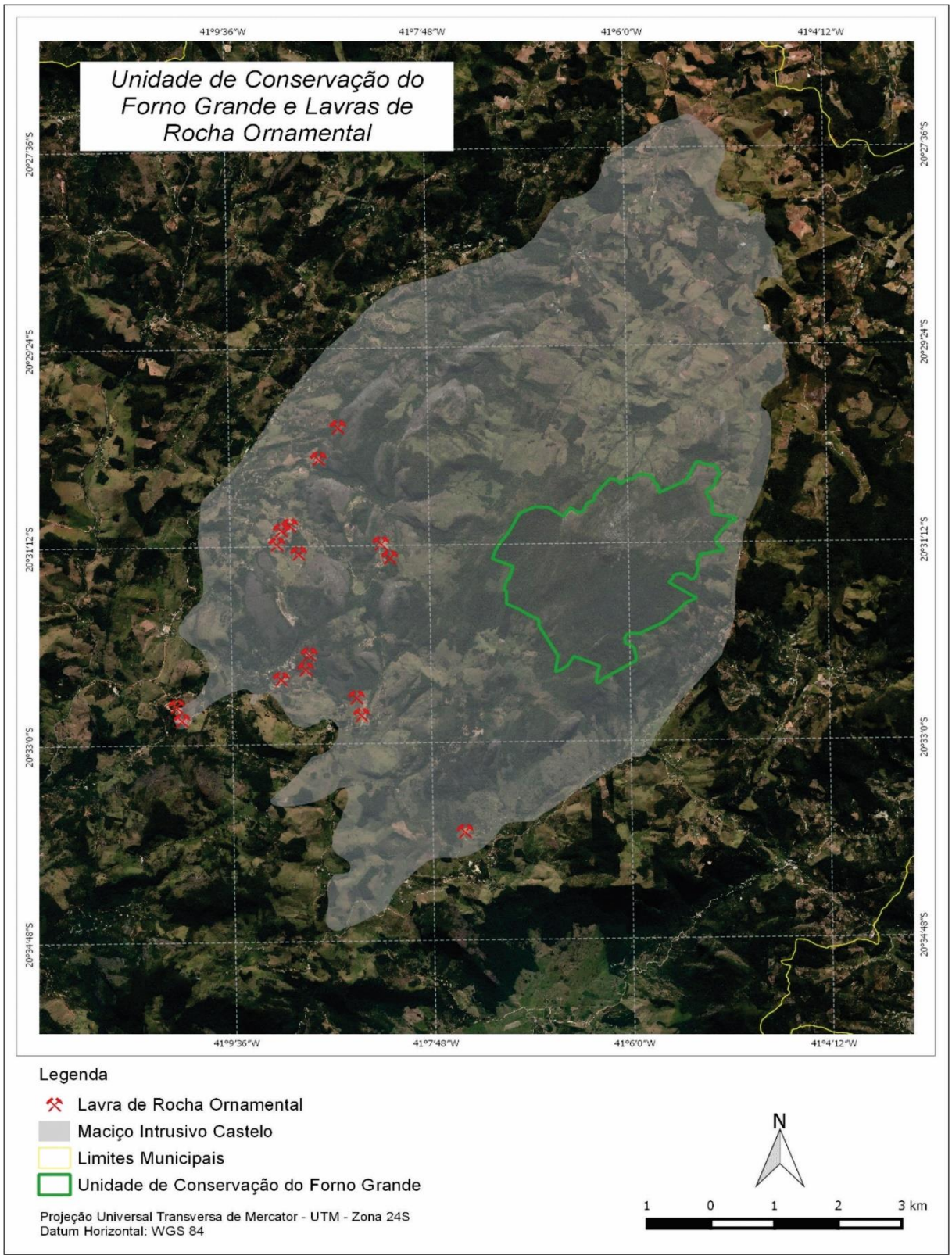


**Figura 1.** Distribuição das lavras de Rocha Ornamental de granitos cinza localizadas no Maciço Castelo (ES).

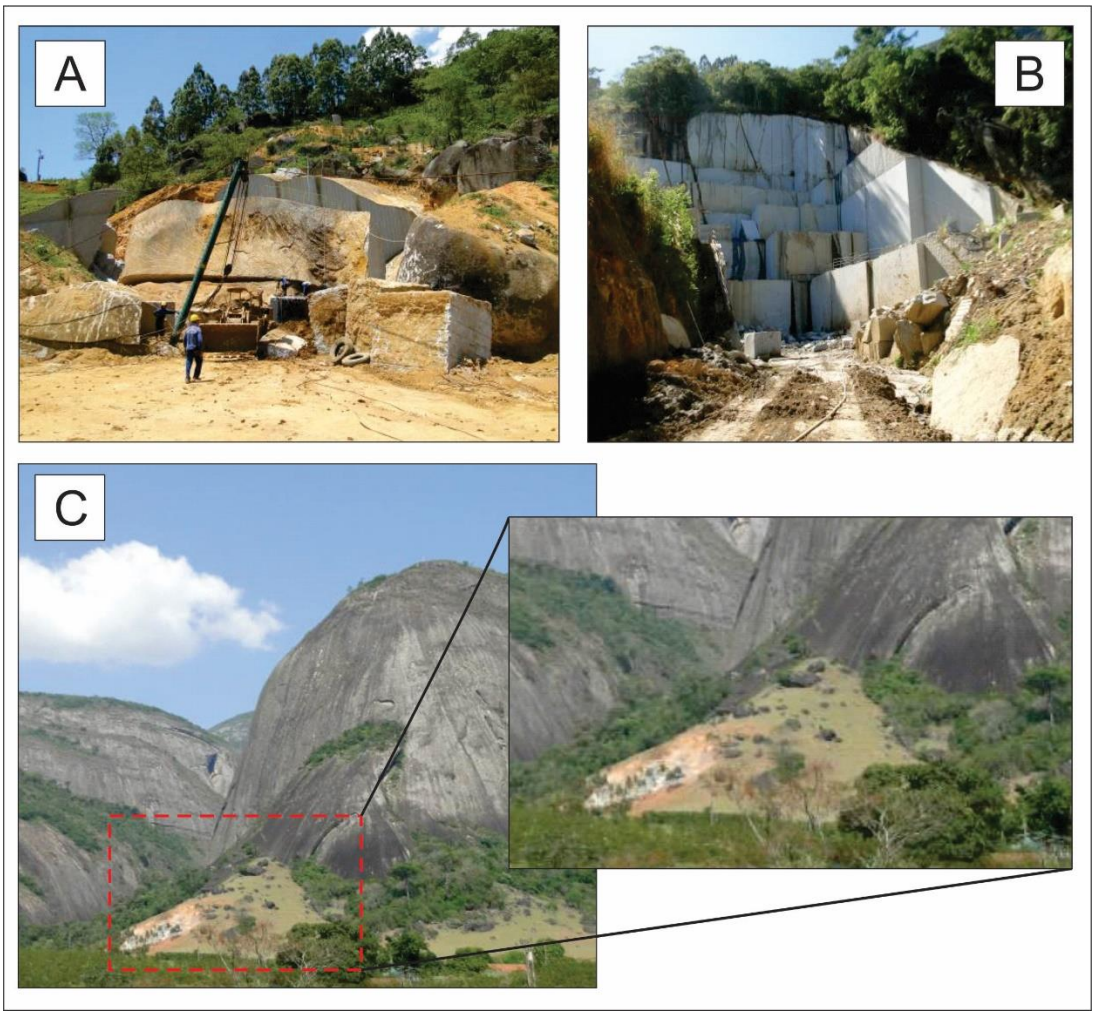


**Figura 2.** Pedreiras de granito Cinza Corumbá (A) do tipo matacão (UTM:0277173/7729289) e (B) tipo maciço, em bancadas, (UTM: 275762/7727484); (C) Exemplo de pedreira do tipo matacão desenvolvida nos depósitos coluvionares no Maciço Castelo.

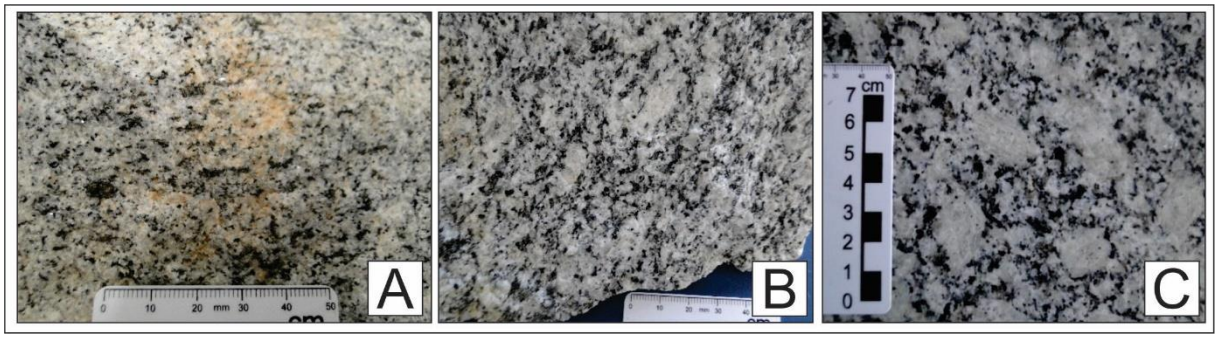


**Figura 3.** Exemplos de granitos cinza no Maciço Castelo: (A) Granito Cinza Andorinha; (B) Granito Corumbazinho; (C) Granito Cinza Corumbá.

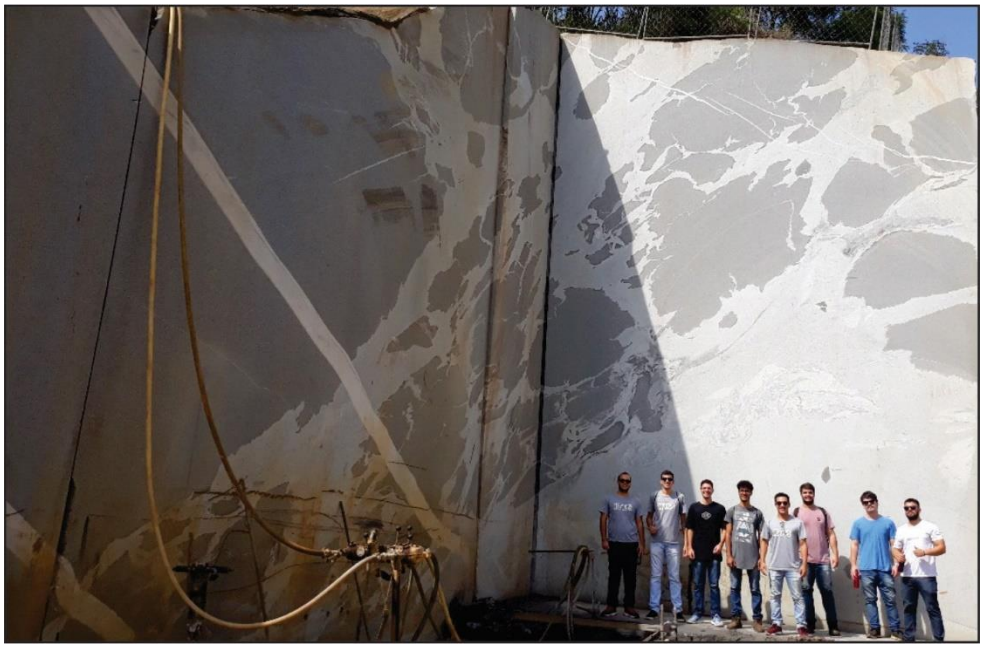

**Figura 4.** Exemplos de "Defeitos" encontrados em uma pedreira de Granito cinza no Maciço Castelo.

## METODOLOGIA

O estudo baseou-se na descrição petrográfica, feita em campo, de feições geológicas (consideradas como "defeitos" no setor de Rochas Ornamentais) nas diferentes pedreiras de extração de granitos comerciais de cor cinza instaladas na borda sudoeste do Maciço Castelo, conforme localização ilustrada na Figura 1. De acordo com as investigações de campo, os "defeitos" encontrados na região são classificados, com relação a sua genética, a dois processos: mistura de magma e assimilação parcial da encaixante.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Feições relacionadas ao processo de mistura de magmas

Os enclaves máficos apresentam composição monzodiorítica e são oriundos do núcleo máfico do maciço (monzodiorito). Os mesmos são observados tanto nos monzogranitos finos quanto naqueles com textura porfirítica e ocorrem sob forma arredondada, ovaladas (que se assemelham a *pillows*), por vezes, achatadas assumindo forma lenticulares (Figura 5). A variedade textural observada reflete o grau de assimilação/mistura entre os enclaves e o granito.

As vênulas de biotita, referidas popularmente no setor de Rochas Ornamentais como “rajas”, ocorrem distribuídas de maneira heterogênea (Figura 6), assumindo formas lenticulares, às vezes espiraladas, que tendem a acompanhar a foliação de fluxo magmático da rocha hospedeira. Estas feições ocorrem na maioria das vezes sob dimensões métricas (ver Figura 6A) e são bastantes inconstantes na área, sendo que em algumas frentes de lavra as mesmas são praticamente ausentes. De acordo com os afloramentos estudados, nota-se uma frequência maior das vênulas nos monzogranitos porfiríticos.

Os enclaves surmicáceos estão inseridos nos monzogranitos de textura fina e grossa, respectivamente. Comumente ocorrem dispostos de forma alinhada com a foliação de fluxo magmático das rochas hospedeiras (Figura 7), assumindo formas ovaladas a lenticulares com dimensões médias de 3 cm de comprimento, mas podendo ter até 20 cm de comprimento. Estas feições são constituídas essencialmente por cristais placóides de biotita associados à titanita de tamanho submilimétrico, de hábito losangular e cor marrom.

**Figura 5.** Exemplos de enclaves máficos encontrados nos Granitos cinza do Maciço Castelo.

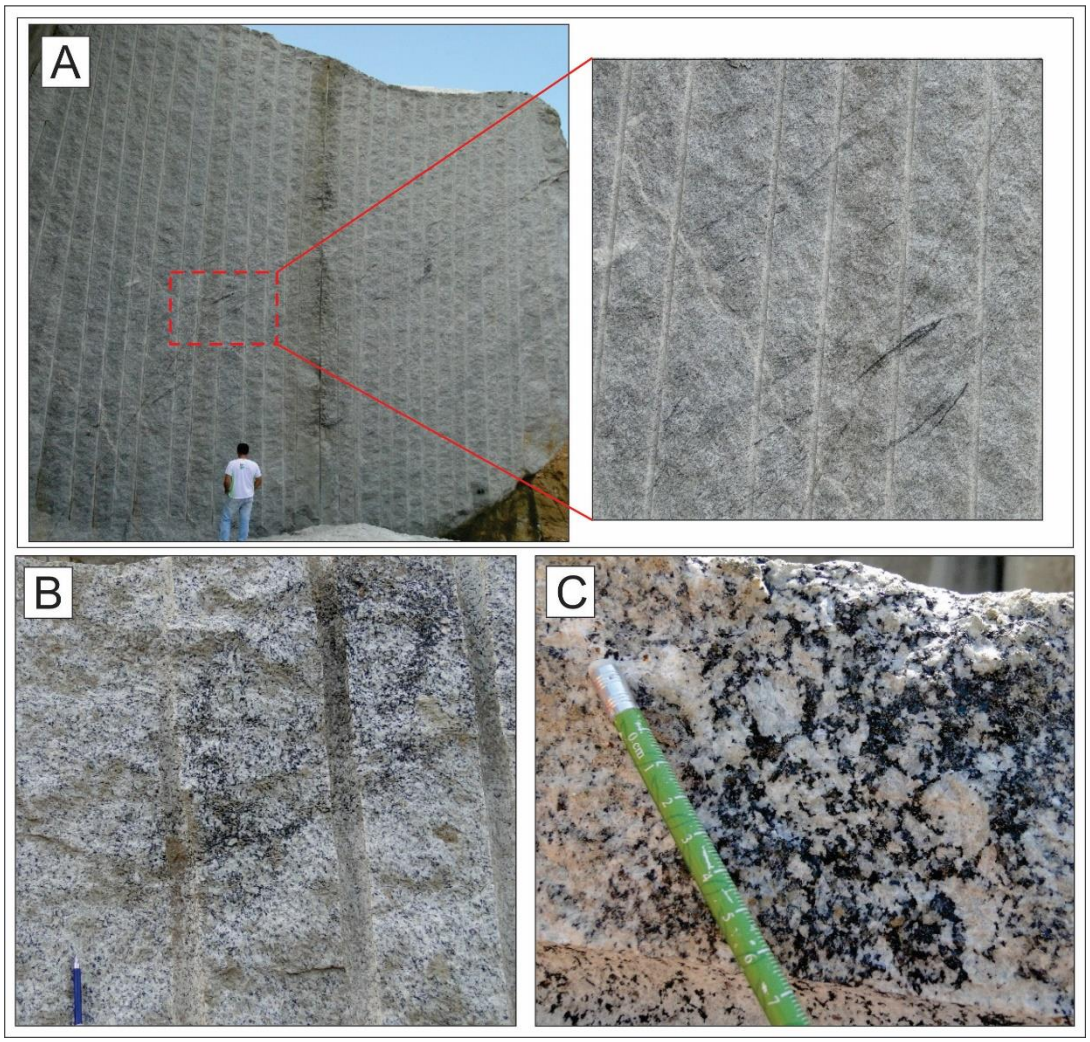


**Figura 6.** Vênulas de biotita encontradas nos Granitos cinza do Maciço Castelo.

**Figura 7.** Enclaves surmicáceos presentes nos Granitos cinza do Maciço Castelo.

**Feições relacionadas ao processo de assimilação parcial das rochas encaixantes**

Os xenólitos de ortognaisse possuem composição granodiorítica, apresentam contornos irregulares e dimensões centimétricas que, eventualmente, podem chegar a um metro de comprimento (Figura 8), e estão presentes principalmente no monzonito fino, que aflora na borda oeste do Maciço. Na área de estudo, esta feição também mostrou-se parcialmente assimilada pelo magma granítico, ocorrendo sob a forma de estruturas fantasmas conforme mostra as Figuras 8C e 8D. Neste caso, não se nota mais o contorno do xenólito, restando apenas a concentração discreta de biotita que ainda guarda vestígios do bandamento gnáissico.

Os xenólitos de anfibólio-biotita gnaisse também são observados no monzogranito fino da borda da intrusão e diferenciam-se daqueles de ortognaisse em função da maior porcentagem de minerais máficos, pela textura granoblástica mais fina (Figura 9) e por serem menos frequente na área de estudo. Estas feições mostram contornos angulosos a arredondados e, nesse último caso, apresentam formas alongadas, com foliação difusa e formação de aglomerações máficos dispersos (Figura 9B). Tambem foi observado no interior destes xenólitos a ocorrência de sombra de pressão enriquecida em minerais félsicos, acompanhadas de cristais milimétricos de sulfetos (pirita) e óxidos (magnetita) (Figura 9A).

Por fim, nos granitos de Castelo também são encontrados diques de composição granítica na forma de aplítico e veios de pegmatito. Os diques de aplito apresentam espessuras centimétricas a até métricas, ocorrendo de forma concordante e discordante da foliação de fluxo magmático, e com feições pegmatíticas nas bordas (Figura 10). Além de quartzo e feldspatos, os veios de pegmatito apresentam esporadicamente cristais placóides de biotita e octaédricos de magnetita.

**Relação entre os “defeitos” e a qualidade dos Granitos cinza de Castelo**

Entre as diversas feições geológicas descritas nos granitos cinza de Castelo como “defeitos”, os enclaves máficos e as vênulas de biotita são os mais expressivos, abrangendo grandes porções das rochas aflorantes da porção sul do Maciço Castelo, sobretudo, nos granitos de granulação grossa comercializados como Cinza Corumbá e Corumbazinho.

Os enclaves surmicáceos e os xenólitos (de ortognaisse e de anfibólio-biotita gnaisse) são comumente encontrados nos granitos finos (Cinza Andorinha) da borda do pluton. Os diques e veios também ocorrem nesta região do maciço, mas em menor frequência.

Com relação ao impacto negativo dessas feições no comércio das Rochas Ornamentais, as vênulas de biotita são as que mais comprometem a qualificação comercial dos blocos e chapas, pois abrangem grandes áreas e descaracterizam o padrão cinza das rochas.

Já a presença dos enclaves máficos, quando encontrados de forma sistemática, geram blocos com feições de mistura entre o material claro e o escuro, possibilitando que tal material seja comercializado como exótico.

Por se apresentarem de forma pontual quando comparado às demais feições, os xenólitos e os diques acabam proporcionando menor impacto no aproveitamento dos materiais comerciais. Essas feições não inviabilizam a venda das chapas, uma vez que, os granitos cinza de Castelo são todos destinados ao comércio interno para a confecção de revestimentos horizontais e verticais e, desta forma, acabam sendo recortados nas marmorarias, que podem fazer o descarte apenas das porções com as referidas feições, vendendo as demais peças como soleiras.

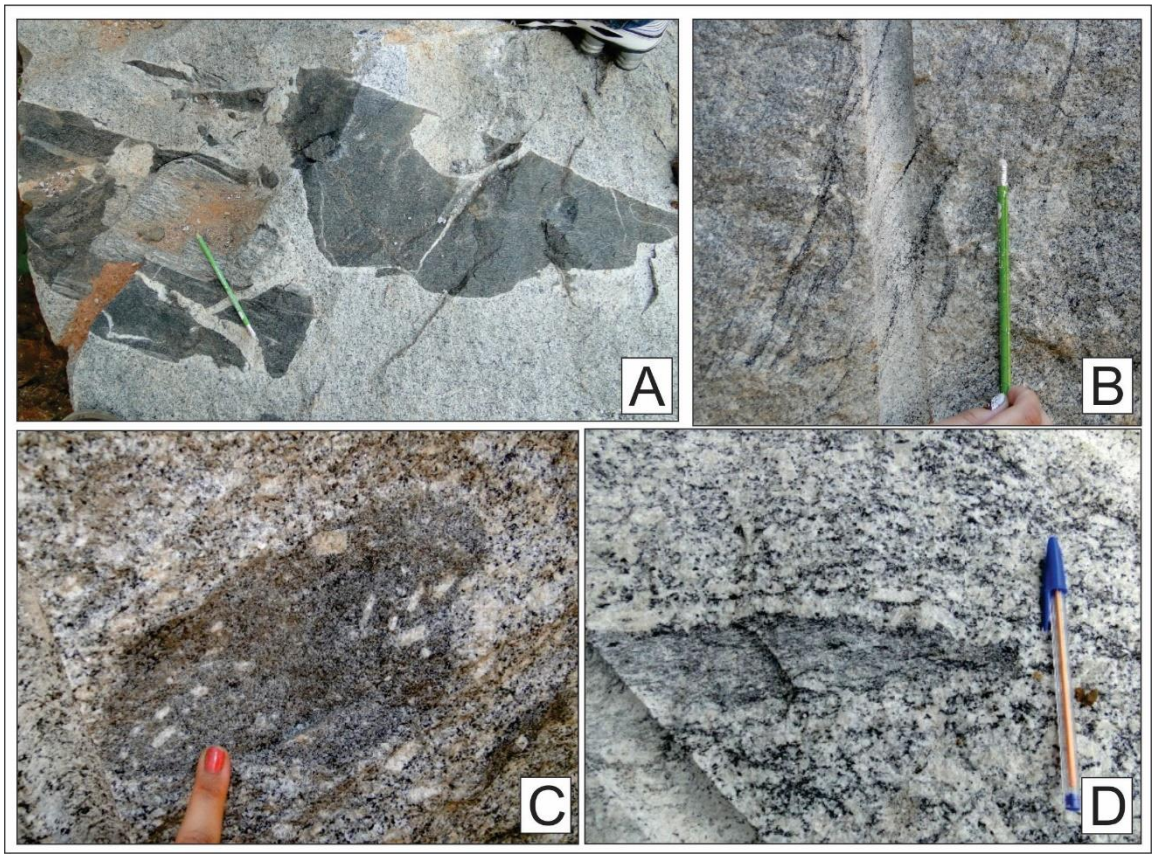


**Figura 8.** Exemplos de xenólitos de ortognaisse nos Granitos cinza do Maciço Castelo.

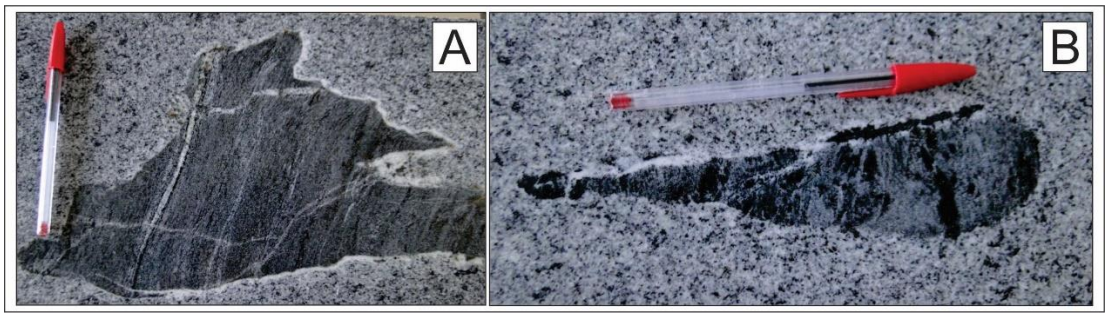


**Figura 9.** Exemplos de xenólitos de anfibólio-biotita gnaisse nos Granitos cinza do Maciço Castelo: (A) enriquecido em minerais félsicos e com bordas associado a pirita e magnetita; (B) apresentando concentrações de minerais máficos.

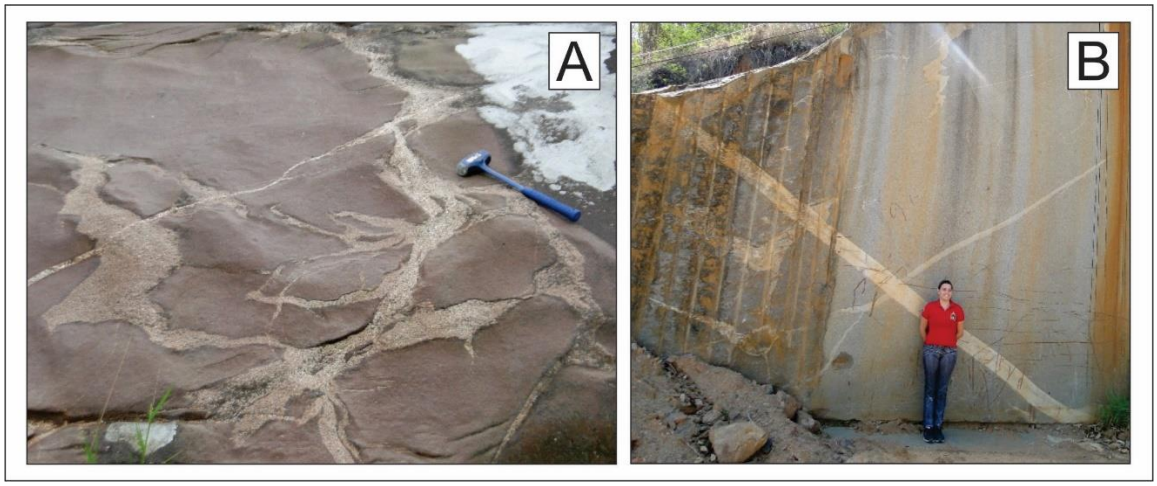


**Figura 10.** (A) diques de aplito e (B) injeções de diques de aplito de diferentes espessuras associados a bolsões pegmatítitcos.

## CONCLUSÃO

Geneticamente as feições presentes nos granitos cinza do Maciço Castelo estão relacionadas a formação deste corpo intrusivo bimodal, associado à granitogênese pós-colisional do Orógeno Araçuaí. Esse pluton foi originado a partir de cunhas mantélicas injetadas ao longo de zonas de cisalhamento durante fase distensiva da Orogenia Brasiliana, que promoveu a fusão parcial da crosta encaixante, ocasionando mistura entre os magmas (Wiedemann-Leonardos *et al*. 1997, 2000 e 2002; De Campos *et al*. 2004; Alkmim *et al.*, 2007; Zanon *et al.* 2015).

O processo de mistura de magmas resultou na geração de diferentes feições texturais, tais como: as vênulas de biotita, enclaves surmicáceos e máficos (Meyer 2017). Já os enclaves de ortognaisse estão relacionadas a assimilação parcial da rocha encaixante, tratadas neste

estudo como xenólitos. Os diques de aplito e veios pegmatíticos são injeções de magma granítico tardio, em alguns casos discordante da foliação de fluxo e das vênulas de biotita.

Dessa forma, as feições encontradas nos granitos cinza de Castelo, classificadas como "defeitos" no setor das rochas ornamentais, sob o ponto de vista geológico representam uma assinatura genética deste maciço. Quanto aos aspectos físicos e tecnológicos, as mesmas não modificam a qualidade dos blocos rochosos e, em muitos casos, confere ao mesmo um aspecto exótico que poderia ser melhor explorado, especialmente naqueles projetos arquitetônicos que buscam um designer exclusivo. Esse conceito estabelece um diferencial para as Rochas Ornamentais comparadas aos dos demais materiais concorrentes, como: porcelanatos e materiais artificiais. Além disto, este conceito pode garantir um desenvolvimento mais sustentável ao setor, otimizando o aproveitamento deste bem mineral que, na maior parte das pedreiras, não ultrapassa 30 % do material extraído.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akmim F. F., Marshak S., Pedrosa-soares A. C., Peres G. G., Cruz S. C. P., Whittington A. **Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana.** Precambrian Research, v(149), 43 – 63, 2006.

Alkmin F. F., Pedrosa-soares A. C., Noce C. M., Cruz S. C. P. **Sobre a evolução tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental.** Geonomos, Belo Horizonte, v(15(1)), 25 – 43, 2007.

De Campos C. M., Mendes J. C., Ludka I.P., Medeiros S. R., Moura J. C., Wallfass C. **A review of the brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on postcollisional magmatism.** Journal of the Virtual Explorer, v(17(1)), 35, 2004.

Meyer A.P. **Geologia e geoquímica da porção sul do Maciço Castelo-ES**. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil, 2017.

Meyer A.P., Ferriane A.L. **Qualificação dos desgaste abrasivo do Granito Ornamental Cinza Andorinha com feições texturais consideradas defeito.** Anais do I Simpósio de Meio Ambiente e Energia –Simae, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2020.

Oliveira N. P. L. **Avaliação das propriedades tecnológicas das rochas ornamentais cinza andorinha e cinza corumbá explotadas no município de Castelo-ES**. TCC (Graduação em Engenharia de Minas), Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, 42 f., 2016.

Sardou Filho R., Matos G. M., Mendes V. A., De Figueiredo Iza E. R. H. **Atlas de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo**. CPRM, Brasília, 2013.

Wiedemann-Leonardos C., Mendes J. C., Moura J. C., Costa Nascimento R. C., Andludka I.P. **Granitoids of the Espírito Santo Magmatic Arc**. In: ISGAM, International Symposium on Granites and associated mineralizations, 2, Excursions Guide, 57 – 76, 1997.

Wiedemann-Leonardos C. M., Ludka I. P., Medeiros S. R., Mendes J. C., Costa-De-Moura J. **Arquitetura de plutons zonados da Faixa Araçuaí-Ribeira**. Geonomos, v(15(1)), 25 – 38, 2000.

Wiedemann-Leonardos C. M., Medeiros S. R., Mendes J. C., Ludka I. P., Moura J.C. **Architecture of Late Orogenic Plutons in the Aracuaí-Ribeira Folded Belt, Southeast Brazil**. Gondwana Research, v(5(2)) 381 – 399, 2002.

Zanon, M.L., Chaves A.O., Rangel C.V.G.T., Gaburo L., Pires C.R. **Os aspectos geológicos do Maciço Santa Angélica (ES): uma nova abordagem.** Brazilian Journal of Geology, v.(45), 609 – 633, 2015.

**Capitulo 3**

# Estudo geológico da porção sudoeste do maciço Santa Angélica – ES: bases para o desenvolvimento de um modelo preliminar de caracterização do "Granito Preto Santa Angélica"

*Marcela Lopes Zanon[1]; Caio Vinícius Gabrig Turbay Rangel2; Michel Paris Magnago3, Sérgio de Castro Valente4, Cláudio Eduardo Lana5*

**RESUMO.** O Maciço Santa Angélica, localizado entre os municípios de Alegre, Cachoeiro de Itapemirim e Castelo (ES), é uma intrusão de caráter bimodal gerada no estágio pós-colisional (530 – 490 Ma) da orogênese Brasiliana. As características litológicas e estruturais desta intrusão fizeram com que esta região ganhasse destaque no setor de Rochas Ornamentais principalmente devido à extração do Granito Preto Santa Angélica. O presente capítulo apresenta os resultados da monografia de graduação da primeira autora que serviram à elaboração de propostas técnicas para otimizar a relação custo/benefício da lavra do Granito Preto Santa Angélica, além de definir os melhores usos comerciais a este material rochoso.

**PALAVRAS-CHAVE.** Estudo de campo; Gabro; Petrologia; Rocha ornamental.

## INTRODUÇÃO

O Maciço Santa Angélica está localizado na região sul do Estado do Espírito Santo, entre os limites geográficos dos municípios de Alegre, Cachoeiro de Itapemirim e Castelo (ES) (Figura 1). No contexto geológico, este complexo está inserido na Supersuíte G5 do Orógeno Araçuaí, cuja composição bimodal é caracterizada pela alternância de magmas félsicos nas bordas e por dois núcleos máficos, separados por uma extensa zona de mistura de magmas (Wiedemann *et al.*1997; Wiedemann-Leonardos *et al*. 2000; Zanon 2013 e Zanon *et al.* 2015).

**[1]Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Congonhas, MG;**
**[2]Universidade Federal do Sul da Bahia – BA;**
**[3]Magnitos-Magnago Granitos Ltda – Cachoeiro de Itapemirim, ES;**
**[4]Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Seropédica, RJ;**
**[5] Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto, MG.**

Nesta região, são extraídos alguns litotipos utilizados como Rochas Ornamentais, dentre eles o gabro, designado comercialmente de Granito Preto Santa Angélica. Embora a explotação de Rochas Ornamentais seja a principal atividade mineradora do Estado do Espírito Santo (excetuando-se a indústria do petróleo), a prospecção e lavra ainda são rudimentares.

A falta de planejamento técnico-científico na exploração de Rochas Ornamentais incentivou o desenvolvimento de uma monografia de graduação, cujo objetivo foi criar um Modelo Preliminar de Caracterização do Granito Preto Santa Angélica a partir de dados obtidos em trabalhos de campo e em estudos petrográficos. Os resultados deste estudo, apresentados neste capítulo, confirmaram que as características geológicas podem auxiliar na definição de melhores métodos de lavra e de uso do material, além de auxiliar na previsão do comportamento do material rochoso frente ao beneficiamento.

## LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A região estudada está situada na porção sudoeste do Maciço Santa Angélica, entre as coordenadas UTM 24400-24700 e 770800-771100 (*datum* WGS 84), correspondendo a uma área de 9km$^2$. Esta área abrange o distrito de Santa Angélica, pertencente ao município de Alegre. O acesso do município até a área de estudo pode ser feito pela BR-482 em direção à River, e posteriormente pela Estrada River até a região adjacente ao distrito.

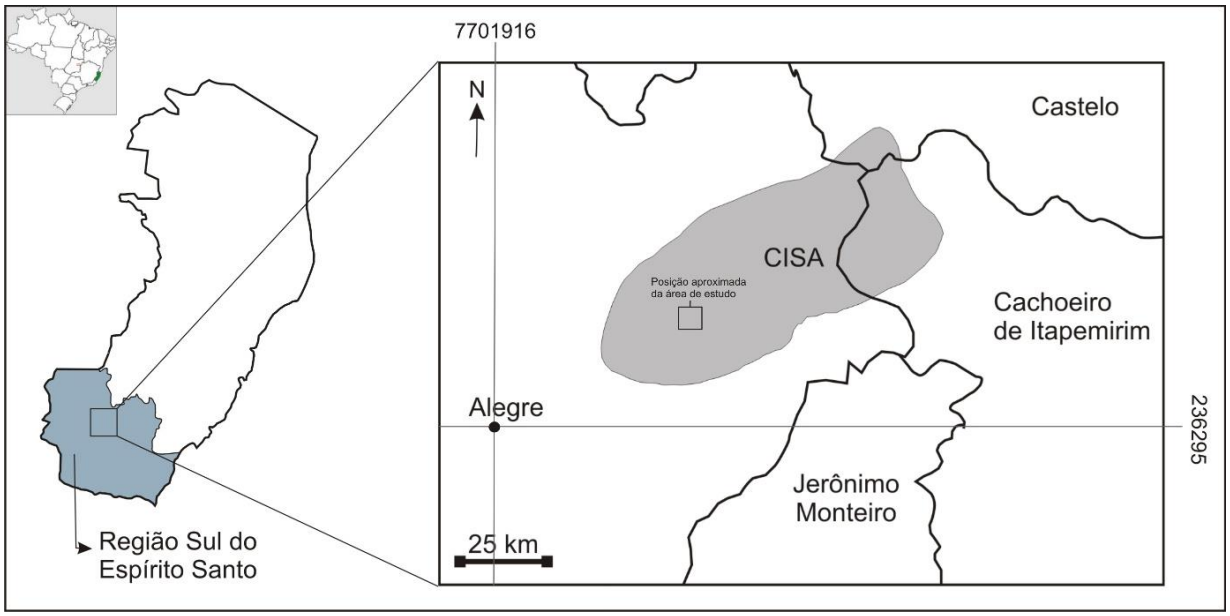


**Figura 1.** Localização do Maciço Santa Angélica e da área estudada.

Modificado de Zanon et al (2013).

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### Rochas Ornamentais

O setor de Rochas Ornamentais Brasileiro continua em expansão, principalmente nos últimos anos com o crescimento do mercado interno na Construção Civil. Em 2007, a produção de Rochas Ornamentais e de revestimento totalizou cerca de 8 mil toneladas, enquanto que em 2020 a produção atingiu 9 mil toneladas, mantendo o Brasil entre os 5 maiores produtores e exportadores mundiais (Chiodi Filho 2020).

O Espírito Santo é o principal produtor de Rochas Ornamentais no Brasil, sendo responsável por aproximadamente 31,1% da produção nacional, divididos entre granitos e mármores (Villas Bôas *et al.* 2003; Chiodi Filho 2020). Em 2019, o faturamento das exportações capixabas foi de US828 milhões.

São cerca de 3500 empresas capixabas no setor, dividas em diversos segmentos, desde a extração até o beneficiamento, responsáveis pela produção de mais de cem variedades comerciais de rochas, de mais de 25 mil empregos diretos e 100 mil empregos indiretos (*in:* Governo do Estado do ES e Findes). Estima-se que a reserva de Rochas Ornamentais no estado está distribuída entre 78 municípios, principalmente entre Colatina, Baixo Guandu, Castelo e Cachoeiro de Itapemirim (Koppe 2007).

### Geologia do Maciço Santa Angélica

O Maciço Santa Angélica está situado na região sul do Espírito Santo e possui aproximadamente 200km$^2$ de área. Do ponto de vista geológico, este maciço corresponde a uma intrusão bimodal, inserida na Supersuíte G5 (fase pós-colisional, 530 – 490 Ma) do Orógeno Araçuaí (Wiedemann *et al.* 1997, Wiedemann-Leonardos *et al.* 2000, Pedrosa-Soares *et al.* 2007, Zanon *et al*., 2015).

Tal corpo intrusivo é caracterizado por dois núcleos máficos e por bordas de composição essencialmente félsica. Entre os núcleos e a borda, ocorre uma extensa zona de mistura de magmas. Segundo Zanon *et al.* (2015), as rochas félsicas são representadas por sienogranito e quartzo sienito, enquanto que nos dois núcleos predominam o gabro. Já a zona de mistura de magmas caracteriza-se por porções mais homogêneas (representadas pelo quartzo monzonito) e por uma porção mais heterogênea. Já as rochas encaixantes estão inseridas na Supersuíte G1

(ortognaisses) e, em menor proporção, no Grupo Bom Jesus do Itabapuana (antigo Complexo Paraíba do Sul, sendo representado na área por paragnaisses).

## METODOLOGIA

O estudo foi dividido em cinco etapas metodológicas: revisão bibliográfica, mapeamento geológico, estudo petrográfico, confecção do mapa geológico e do Modelo de Caracterização do Granito Preto Santa Angélica.

A revisão bibliográfica propôs levantar dados sobre as Rochas Ornamentais (mercado, métodos de exploração, lavra e beneficiamento) e a Geologia Regional da área de estudo.

O mapeamento geológico objetivou identificar e caracterizar as rochas, as feições geomorfológicas e estruturais da região, bem como coletar de amostras para o estudo petrográfico (macroscópico e microscópico). A base cartográfica utilizada foi a folha Anutiba –ES (SD-24-V-A-V-1), do IBGE, na escala 1:25.000. No total foram descritos sessenta e um pontos e coletadas sessenta e nove amostras. As coordenadas UTM de cada ponto foram adquiridas com GPS de navegação e plotadas na base topográfica supracitada (Figura 2).

O estudo petrográfico baseou-se na descrição das amostras de mão e na análise microscópica de dezenove lâminas de amostras do gabro (correspondente ao Granito Preto Santa Angélica), dos quais foram relatados seus aspectos mineralógicos, texturais e estruturais, além de seu grau de alteração.

O mapa geológico e o projeto de caracterização do Granito Preto Santa Angélica foram desenvolvidos a partir da integração dos resultados de todas as etapas anteriores. As unidades litológicas representadas no mapa correspondem ao gabro, granito e a zona de mistura magmática.

A partir de todas as informações obtidas nas etapas descritas acima, foi elaborado um Modelo Preliminar de Caracterização do Granito Preto Santa Angélica, que compôs a Monografia de Graduação da primeira autora (Zanon, 2010).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Aspectos geológicos da área estudada

Durante o campo, foram reconhecidas duas unidades litológicas principais, o gabro e o granito, além de uma zona de mistura de magmas e de diques bimodais (Figuras 2 e 3). O gabro, rocha principal do presente estudo, possui cor entre o verde escuro ao preto, granulação variando de fina a média, é predominantemente isotrópico e bastante fraturado. No campo, esta rocha apresenta alterações superficiais, sendo caracterizada por uma capa de cor marrom escuro. Na porção nordeste da área, foram observados grãos de biotita orientados, dando ao gabro um caráter levemente anisotrópico.

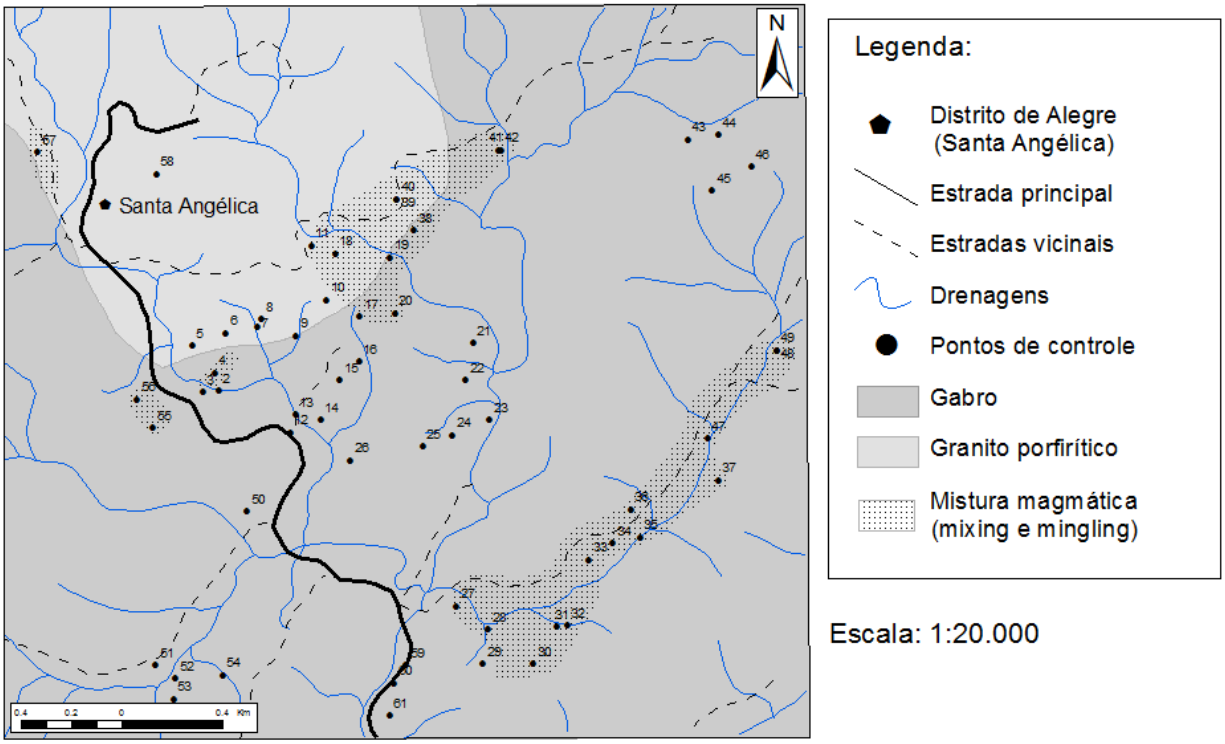


**Figura 2.** Mapa geológico da área de estudo.

As zonas de mistura magmática encontram-se entre os limites das rochas graníticas e gabróicas. São regiões representadas por enclaves máficos e graníticos, de 5 a 30 cm de comprimento, inclusos em um material heterogêneo (Figura 3C e 3D). Também foram identificados alguns veios de quartzo e vinte e dois diques, sendo dezessete constituídos de diabásio (Figura 3E) e cinco de granito (Figura 3F). Estas intrusões têm espessura variando entre 0.1 a 1.5 m e estão orientadas preferencialmente a NE/SW.

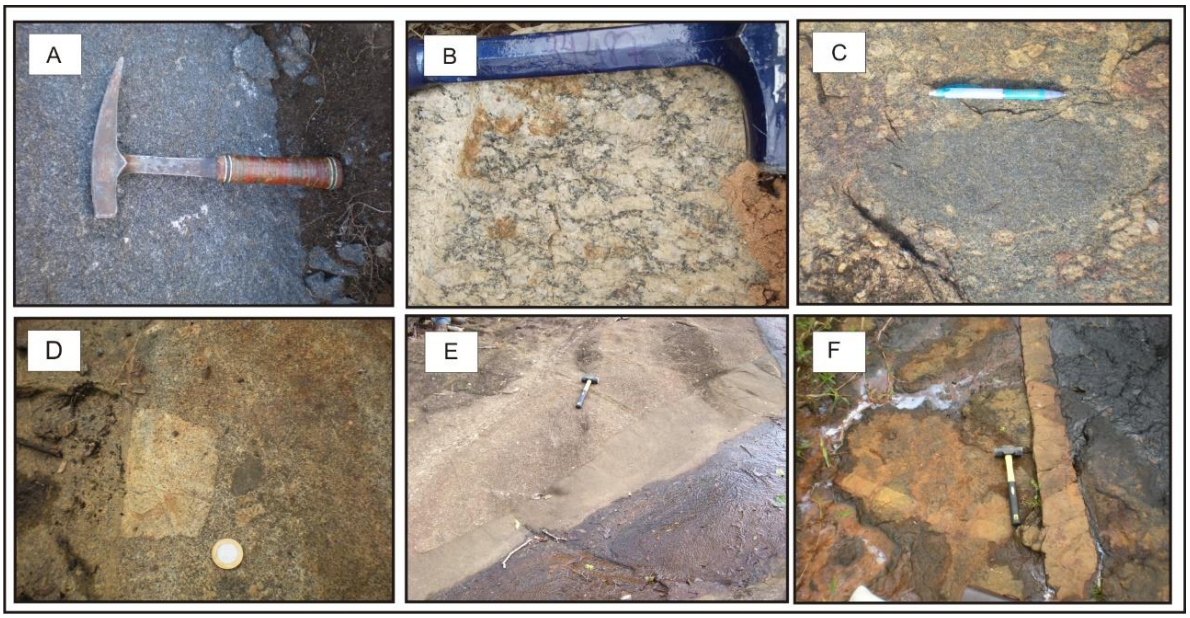


**Figura 3.** Unidades litológicas principais presentes na área de estudo: A, gabro; B, granito porfirítico; C e D, zonas de mistura magmática caracterizada pela presença de enclaves de composição granítica e gabróica inclusos em um material constituído por granito porfirítico e gabro; E, dique de diabásio com 2 cm de espessura; F, diques de granito com até 25 cm de espessura.

A área de estudo é marcada por intensos contrastes fisiográficos (Figura 4), onde as porções de composição granítica são mais altas e apresentam relevo escarpado, enquanto que as regiões rebaixadas (associadas ao gabro) caracterizam-se por feições convexas no topo e côncavas na parte inferior, ambas de baixa declividade e comumente associadas a depósito de talus. Os depósitos de talus (Figura 2B) são constituídos por espessas camadas de regolito de cor avermelhada, rico em argilominerais, e de seixos e matacões de gabro bem arredondados e com esfoliação esferoidal, sugerindo que os processos morfogenéticos foram mais atuantes onde predominavam rochas máficas.

Do ponto de vista estrutural, a área estudada é marcada por um sistema de fraturas, orientados preferencialmente a NE/SW. Apesar dos aspectos anisotrópicos observados pontualmente no gabro (orientação da biotita e presença de bandas claras intercaladas por bandas escuras), não é possível inferir a existência de outras estruturas e processos deformacionais na área estudada.

**Figura 4.** Aspectos geomorfológicos principais: A, feições côncavo-convexas de baixa declividade cercadas por feições íngremes e escarpadas (Ponto 38); B, depósito de talus comumente observado na área de estudo (Ponto 33).

## Análise Petrógrafica

As amostras analisadas no microscópio indicaram que o gabro apresenta textura inequigranular, com granulação variando de fina a média, e comumente está associado às texturas mirmequítica e gráfica. É constituído essencialmente por plagioclásio, piroxênio e biotita (Tabela 1) (Figura 5A, 5B e 5C). Quartzo, apatita e minerais opacos constituem a

assembléia de minerais acessórios. E não há minerais secundários, havendo apenas um pouco de saussurita sobre os cristais de plagioclásio.

Na região onde o gabro mostrou-se anisotrópico (caracterizado pela orientação dos cristais de biotita), as amostras indicaram uma mudança na composição mineral, onde o piroxênio é substituído pela hornblenda. Além disto, foi identificada a presença de bandas claras, formadas por plagioclásio e quartzo, alternadas por bandas escuras, formadas por biotita e hornblenda (Figura 5D).

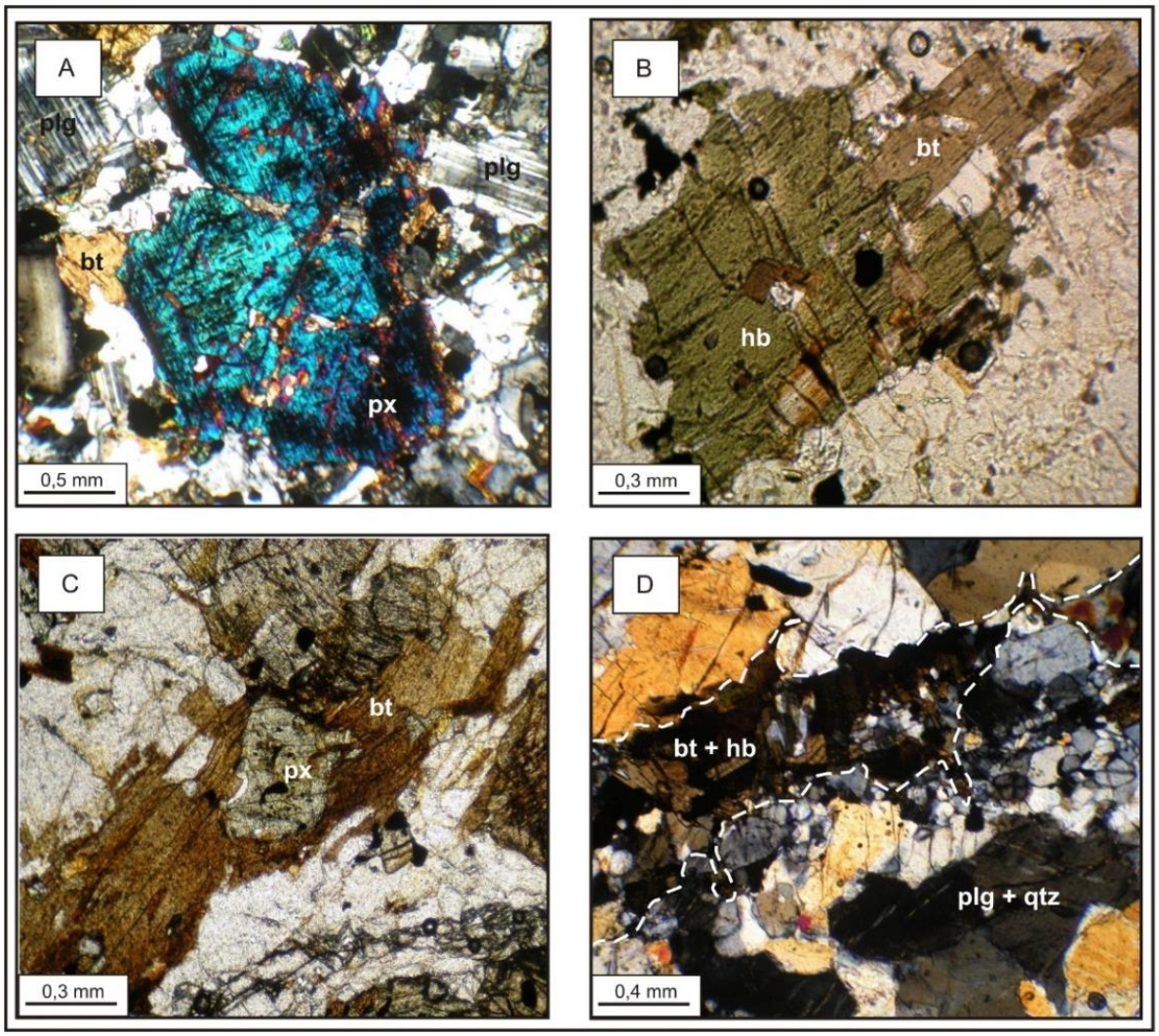


**Figura 5.** Aspectos petrográficos do gabro: A, grãos de piroxênio, plagioclásio e biotita (amostra 34, polarizadores cruzados); B, grãos de biotita e de piroxênio. (amostra 41b, polarizadores descruzados); C, grão de horblenda incluso na biotita (Amostra 41b, polarizadores descruzados); D, pequenos grãos de plagioclásio e quartzo intercalados por grãos de hornblenda e de biotita orientados (amostra 41b, polarizadores cruzados). Legenda: bt, biotita; plg, plagioclásio; hb, horblenda; px, piroxênio; qtz, quartzo.

**Tabela 1.** Composição modal do gabro.

| Mineral | % |
|---|---|
| Plagioclásio | 63 |
| Piroxênio | 20 |
| Biotita | 8 |
| Quartzo | 5 |
| Apatita | 2 |
| Minerais opacos | 2 |

**Modelo Preliminar de Caracterização do Granito Preto Santa Angélica**

A Caracterização Técnica do Maciço indicou que as feições côncavo-convexas e de baixa declividade associadas ao gabro favorecem a instalação de lavras por bancadas do tipo baixa. Apesar da ocorrência de grãos de biotita levemente orientados, pode-se dizer que o gabro é essencialmente isotrópico, possibilitando a extração de blocos homogêneos. Os matacões de composição gabróica presentes nos depósitos de talus não possuem dimensões suficientes para a produção de blocos em larga escala, portanto não são viáveis economicamente a não ser para a produção de outros materiais industriais (como britas).

As fraturas (Figura 6A), popularmente conhecidas como trincas, são consideradas defeitos graves na rocha. A partir da relação entre o ângulo e a distância entre as fraturas, é possível determinar a direção e a dimensão mais adequada a se cortarem os blocos, de modo a reduzir a perda de material. Neste caso, elas ocorrem em uma direção preferencial (NW/SE), sugerindo que os cortes devam ser feitos perpendicularmente e paralelamente a esta direção. Quanto ao tamanho dos blocos, torna-se difícil estimar, devido à grande variação do ângulo de mergulho, que vai de 30˚a 90˚.

Os veios (Figura 6B) e diques também são considerados defeitos na rocha, que reduzem seu valor comercial dependendo das suas dimensões. Na área de estudo os diques ocorrem preferencialmente a NE/SW, enquanto que os veios não apresentam direção preferencial, impossibilitando determinar quais são as áreas e a direção onde estes teriam mais probabilidade de aflorar.

Sobre a Caracterização Técnica do Gabro, a petrografia microscópica indicou que todas as amostras possuem padrão inequigranular. Entretanto esta variação não se mostra tão marcante a olho nú. Sendo assim, dentro dos padrões comerciais, pode-se dizer que o gabro possui granulação média e textura equigranular (Figura 7).

A pequena quantidade de quartzo presente no gabro indica uma alta resistência a tração (Merriam *et al.* 1970 *apud* Ribeiro 2005). Além disso, acredita-se que a velocidade de corte é mais rápida que a apresentada por rochas quartzosas, e que o consumo de anéis de pérolas diamantadas se apresente dentro dos padrões ditos normais.

O volume de minerais opacos (sulfetos e óxidos) não ultrapassa 1% da rocha, o que garante a qualidade da matéria-prima, uma vez que estes não causam grandes alterações na rocha durante a fase de beneficiamento secundário (acabamento das chapas) (Ribeiro 2005).

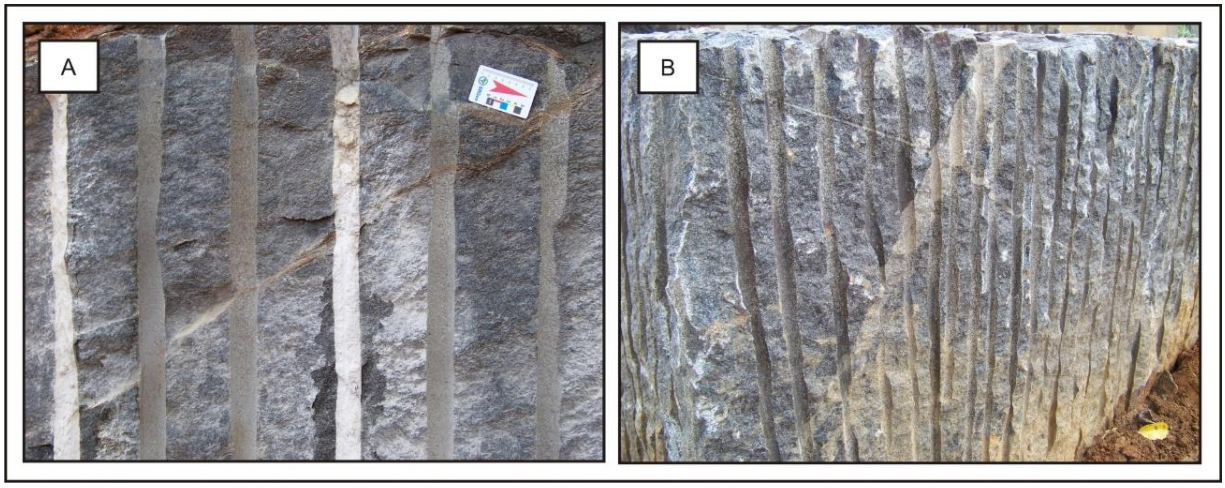


**Figura 6.** Principais defeitos presentes nos blocos de composição gabróica extraídos do Maciço Santa Angélica: A, fratura; B, veios.

O estudo petrográfico também indicou a ausência de microestruturas, tais como microdobras, microfalhas ou microfraturas. Estas características somadas aos aspectos texturais indicam que esta rocha possui alta resistência mecânica (Silveira 2003 e Ribeira 2005).

Quanto à qualidade estética, o Granito Preto Santa Angélica possui todas as características para ser bem aceito no mercado: coloração sem muitas alterações, homogeneidade e granulação média.

As características petrológicas (incluindo a ausência de minerais secundários) e microestruturais do gabro indicam que sua vulnerabilidade a alterações após o beneficiamento é baixa. Dentre estas deteriorações, estão:

- Caulinitização do plagioclásio através da utilização de produtos pulverulentos.
- Alteração dos minerais ferro-magnesianos com formação de manchas ou auréolas ferruginosas.

- Abrasão e perda do polimento pela utilização de produtos pulverulentos e pelo tráfego excessivo.

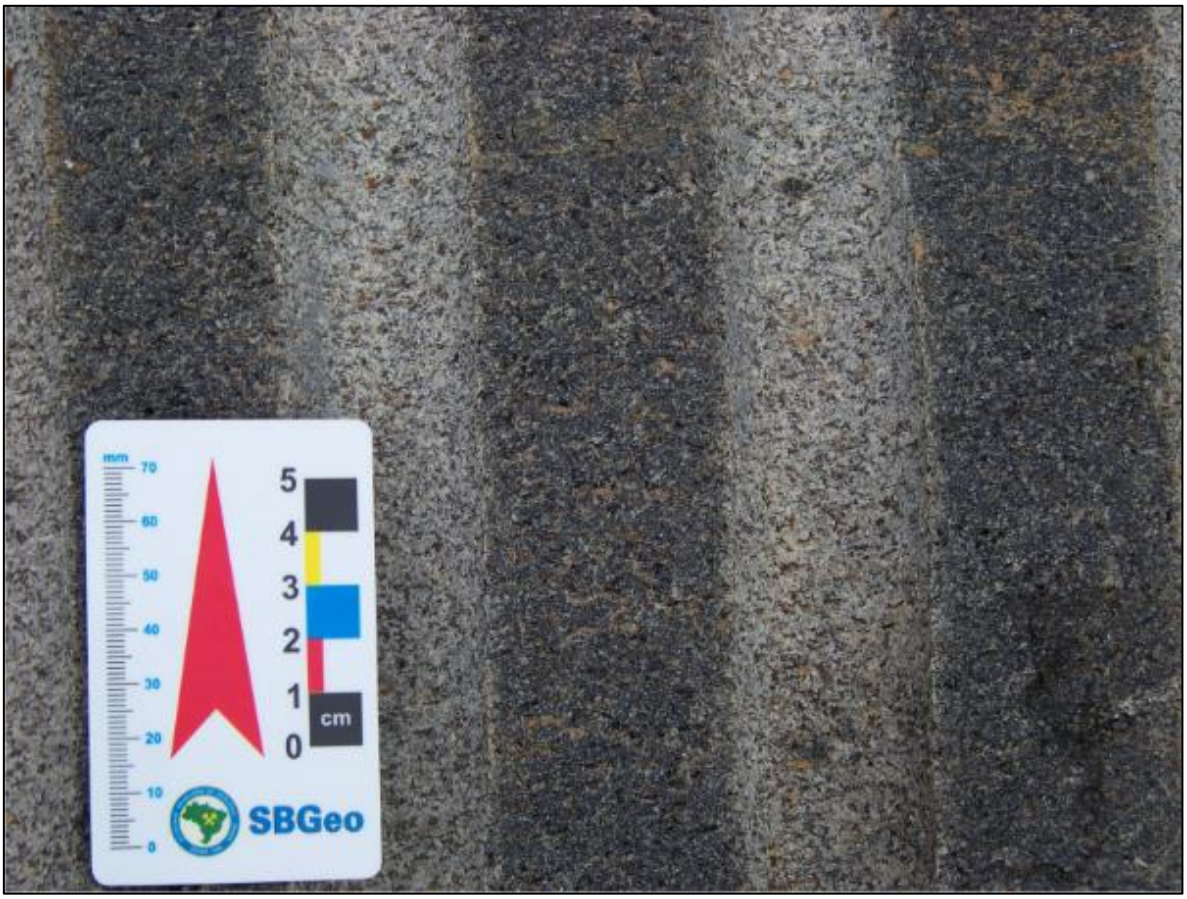


**Figura 7.** Face de bloco de gabro lavrado na área de estudo.

## CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu classificar o Granito Preto Santa Angélica como uma rocha ornamental de ótima qualidade, podendo ser utilizado para diversos fins, desde revestimentos, objetos de adorno, lápides, etc. Suas características estéticas a colocam como um dos litotipos mais caros do mercado, valendo aproximadamente R$1449,00/$m^3$ (no caso de blocos), segundo a Secretaria da Fazenda do Estado do Espírito Santo (2020).

O estudo também conduziu a uma melhor compreensão das feições morfológicas e estruturais associadas a este litotipo, facilitando a determinação do método de lavra mais adequado e os equipamentos necessários à prospecção desta rocha, de modo a otimizar este bem mineral e reduzir os gastos de operação e o volume de rejeitos.

Após a definição do Granito Preto Santa Angélica como rocha promissora, recomenda-se novos estudos de campo em outras regiões do Maciço Santa Angélica onde o gabro ocorre e onde há a extração de outros litotipos para uso como Rochas Ornamentais. Também se recomenda a aplicação de testes físico-mecânicos a esta rocha visando determinar outros parâmetros importantes que ainda não foram definidos na literatura, tais como resistência a compressão e a tração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Koppe, J. C. **A lavra e a Indústria Mineral - estado da arte e tendências tecnológicas.** In: Tendências tecnológicas Brasil 2015; geociências e tecnologia mineral. CETEM/MCT, 86 – 107, Rio de Janeiro, 2007.

Chiod Filho C. **Situação atual e perspectivas brasileiras no setor de Rochas Ornamentais**. Informe ABIROCHAS (Associação Brasileira de Rochas Ornamentais), v(02), 2008.

Chiod Filho C. **O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais.** Informe ABIROCHAS (Associação Brasileira de Rochas Ornamentais), 2021.

**Federação da Indústria do Espírito Santo (Findes).** Disponível em: https://findes.com.br/espirito-santo-e-o-lider-no-pais-em-exportacao-de-rochas-ornamentais/. Acesso em 17 de maio de 2022.

**Governo do Estado do Espírito Santo**. Disponível em: https://www.es.gov.br/rochas-ornamentais#:~:text=O%20Esp%C3%ADrito%20Santo%20possui%20uma,ornamentais%20at%C3%A9%20a%20sua%20exporta%C3%A7%C3%A3o. Acesso em 17 de maio de 2022.

Moura A.C. **Algumas notas para o conhecimento e utilização das Rochas Ornamentais portuguesas.** Caracterização de Rochas Ornamentais, EXPORNOR, 2004.

Ordem de Serviço nº108, de 17 de Outubro de 2006. Governo do Estado do Espírito Santo, Secretaria de Estado da Fazenda.

Pedrosa-Soares, A.C.; Noce, C.M.; Alkmim, F.F.; Silva, L.C.; Babinski, M.; Cordani, U.; Castañeda, C. **Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida**. Geonomos, v.(15), n.(1), 01 – 16, 2007.

Ribeiro R.P**. Influencia das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos**. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Carlos, 131f., São Paulo, 2005.

Silveira P.R.; Paraguassú A.B.; Rodrigues J.E. **Aplicação de bases conceituais de tribologia no Beneficiamento de Granitos Ornamentais**. Revista Minerva, v.(1), n.(1), 45 – 50, 2003.

Vilas Bôas R.C.; Calvo B.; Peiter C.C. **Iberokasen Mármores y Granitos**. CETEM/CYTED/UIA, Rio de Janeiro, 210p., 2003.

Wiedemann, C.M., Medeiros, S.R., Mendes, J.C., Ludka, I.P., Moura, J.C. **Architecture of Late Orogenic Plutons in the Aracuaí-Ribeira Folded Belt, Southeast Brazil**. Gondwana Research, v.(5), nº(2), 381 – 399, 2002.

Wiedemann-Leonardos C.M.; Ludka I.P.; Medeiros S.R., Mendes J.C.; Costa-de-Moura J. **Arquitetura de plutons zonados da Faixa Araçuaí-Ribeira**. GEONOMOS, v.(15), n.(1), 25 – 38, 2007.

Zanon M.L. **Mapeamento Geológico de detalhe e petrografia de rochas do Maciço Santa Angélica, Alegre, ES: Bases para localização de áreas potenciais à exploração de Rochas Ornamentais.** Monografia de Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

Zanon, M.L., Chaves A.O., Rangel C.V.G.T., Gaburo L., Pires C.R. **Os aspectos geológicos do Maciço Santa Angélica (ES): uma nova abordagem.** Brazilian Journal of Geology, v.(45), 609 – 633, 2015.

**Capítulo 4**

# Dobras – falhas: uma breve revisão

*Marcela Lopes Zanon[1]; Caroline Janette Souza Gomes[2]; Marília Barbosa Venâncio[3], Carla Hemillay de Oliveira Santos[3]*

**RESUMO.** As dobras associadas a falhas (ou apenas dobras-falhas) são estruturas comumente presentes em cinturões compressivos, e são classificadas como: (1) dobra associada a uma falha preexistente com trajetória em degrau (*fault-bend fold*), (2) dobra de propagação de falha (*fault-propagation fold*) e (3) dobra gerada concomitantemente a uma falha horizontal (*detachment fold*). Por estarem relacionadas à reservas de hidrocarbonetos e depósitos minerais, tais feições vêm sendo investigadas desde a década de 30, nos quais diversos modelos cinemáticos já foram propostos. Neste capítulo, é apresentado uma breve revisão dos principais trabalhos sobre os *fault-bend folds* e os *fault-propagation folds*, com abordagem nos aspectos cinemáticos e nas condições de contorno de seu desenvolvimento em sistemas compressivos. O objetivo é apresentar um estado da arte simplificado, mas que possibilite ao leitor a compreensão sobre os processos deformacionais associados à geração dessas estruturas.

**PALAVRAS-CHAVE.** Fault-bend fold; Fault-propagation fold.

## INTRODUÇÃO

As dobras associadas a falhas (ou apenas dobras-falhas) ocorrem principalmente no interior de cunhas compressivas, gerando estruturas mais complexas, tais como sistemas imbricados, duplex e pilhas antiformais. A relação entre falhamento e dobramento possibilita classificar tais estruturas em:

*Fault-bend folds*: dobras que se formam por migração dos estratos sobre falhas preexistentes, com trajetórias em degrau (daí a origem do termo *bend*, que significa extremidade dos planos de falha (Rich 1934; Suppe 1983);

(1) *Fault-propagation folds*: dobras cujo desenvolvimento é simultâneo à geração das rampas de empurrão (Williams & Chapman 1983; Suppe & Medwedeff 1984);

(2) *Detachment folds*: dobras geradas sobre falhas horizontais, na base de camadas incompetentes (Jamison 1987).

Neste capítulo estão reunidas os principais estudos já realizados sobre os aspectos cinemáticos e estratigráficos dos *fault-bend folds* e dos *fault-propagation folds*, apresentados na Revisão Bibliográfica da tese da primeira autora (Zanon 2020), cuja finalidade principal foi investigar o desenvolvimento destas feições através de modelos analógicos em caixa de areia (*sandbox*).

O objetivo desta revisão é trazer aos pesquisadores brasileiros um resumido estado da arte sobre as dobras-falhas em sistemas compressivos, uma vez que tais estruturas estão associadas a importantes reservas de hidrocarbonetos (ex. Suppe 1983; Dahstron 1990; Epard & Grossong 1995; Salvini & Storti 2001), constituindo caminhos preferenciais para a migração de fluidos.

A relação entre dobras-falhas e processos geomorfológicos (pretéritos e/ou atuantes) e eventos sísmicos (ex. Rocklwell *et al.* 1984; Dolan & Avouac 2007) também reforça a importância de conhecer seus aspectos geométricos e cinemáticos, especialmente nos estudos de neotectônica.

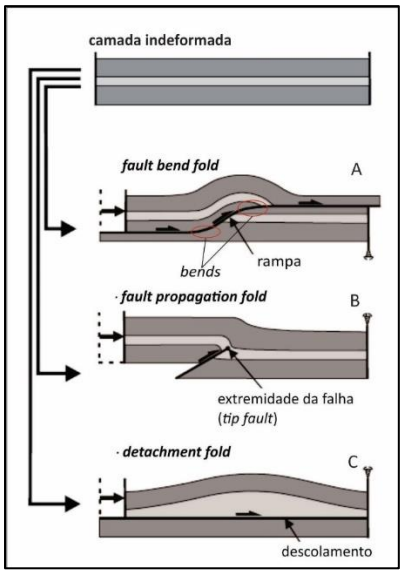


**Figura 1.** Os diferentes tipos de dobras-falhas (Zanon, 2020).

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As dobras-falhas são estruturas da crosta superior rúptil, resultantes de processos de dobramento envolvendo a evolução de falhas, especialmente em ambientes compressivos (mas também distensivos), que ocorrem em diferentes escalas. São divididas em: *fault-bend fold* (FBF), *fault-propagation fold* (FPF) e *detachment fold* (DF). Além destas, existem as dobras-falhas híbridas, com transição entre as FPF e DF e as dobras de arrasto (*drag folds*) (Suppe 1983; Marrett & Bentham 1997; Brandes & Tanner 2014).

A seguir são apresentados os principais estudos relacionados aos *fault-bend folds* e aos *fault-propagation folds*.

### *Fault-bend fold* (FBF)

O *fault-bend fold* foi a primeira dobra-falha estudada e reconhecida na literatura. Rich (1934), que analisou a região de Cumberland, localizada nos Pine Montains dos Apalaches (E.U.), percebeu a existência de dobras formadas a partir da flexão de pacotes sedimentares em resposta ao movimento de blocos de falha. Seu trabalho envolveu, inicialmente, a construção e posterior restauração do perfil estrutural de Cumberland (Figura 2A e 2B). Em seguida, os perfis foram simulados através de modelos analógicos rudimentares feitos com pilhas de papel (Figura 2C). A semelhança entre o produto final da modelagem e o perfil geológico balizou a ideia do autor quanto à relação entre dobras e falhas.

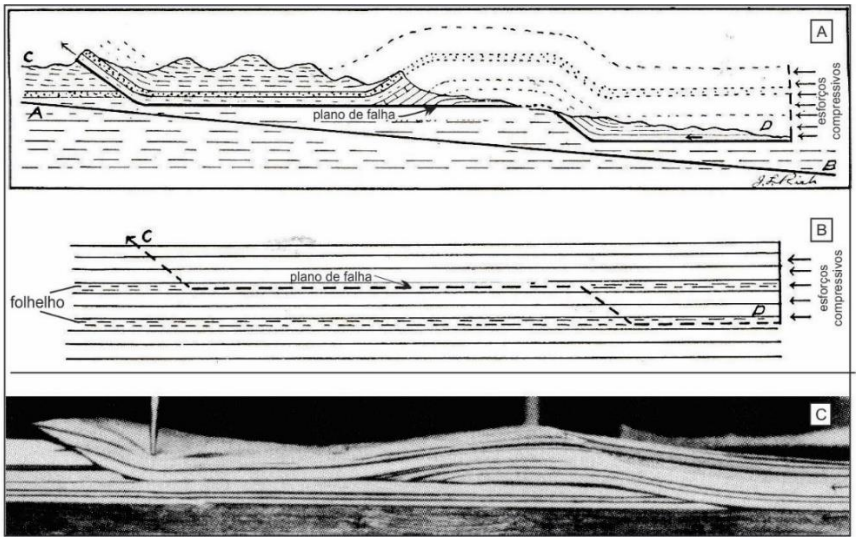


**Figura 2.** Primeiro estudo sobre os fault-bend folds, de Rich (1934): (A) Perfil estrutural do Pine Motains (E.U.); (B) Restauração do perfil (A); (C) Modelo analógico do perfil (A). Zanon (2020).

Anos mais tarde, estas estruturas foram denominadas por Suppe (1983), de *fault-bend fold*, que desenvolveu o modelo do tipo *kink-style* (*kink folding* ou modelo *kink*), que se apoia nas relações angulares entre dobras e falhas. O modelo *kink* de Suppe (1983), posteriormente, modificado para FPFs por Suppe & Medwedeff (1984), Suppe (1985) e Suppe & Medwedeff (1990), considera que a espessura das camadas permanece constante durante a formação da dobra e, sendo assim, a morfologia da dobra depende da geometria da falha. A principal característica deste modelo é a migração lateral de superfícies axiais (As) ao longo dos planos de falha, conforme observado na Figura 3.

Jamison (1987) observou que durante o desenvolvimento das dobras-falhas, as camadas mantêm a espessura constante em escala regional, mas localmente podem sofrer afinamento ou espessamento em função da presença de pequenas falhas imbricadas, dobras menores ou fluxo dúctil das camadas. O autor apresentou cálculos trigonométricos e gráficos que quantificam a variação da espessura das camadas na dobra, relacionando seu ângulo interflanquial e o ângulo de mergulho da rampa.

Anos depois, Medwedeff & Suppe (1997) criaram o termo *multibend folds* para as FBFs cujo plano da rampa apresentam mais de duas quebras no mergulho (ou seja, mais de dois *bends*). Neste caso, os autores consideraram que tais estruturas são resultantes do mesmo mecanismo de dobramento das FBFs simples, de migração lateral das superfícies axiais (Sa).

A distribuição da deformação no interior de FBFs e de FPFs foi analisada por Salvini & Storti (2001), que consideraram o modelo cinemático *kink* de Suppe (1983). O estudo revelou que em ambas as dobras-falhas a deformação se concentraria nos flancos, o que foi importante para as pesquisas em hidrocarbonetos em ambientes de domínio rúptil.

Em 2004, Suppe propôs um novo modelo cinemático para os FBFs que considera o mecanismo de deformação do tipo cisalhamento simples ao invés do deslizamento flexural (do modelo *kink* de 1983 e 1985). No modelo denominado de *shear fault-bend folding model*, a deformação é distribuída ao longo de uma camada de descolamento basal, fraca e de espessura finita por mecanismos de *simple-shear* e de *pure-shear fault-bend folding.*

Dos trabalhos mais recentes, Tavani *et al.* (2005) merece destaque por propor um modelo para FBFs curvilíneos como alternativa para o estilo *kink* (Figura 6). Apesar de os autores assumirem conservação de área e linhas e dobramento por deslizamento flexural (assim como descrito por Suppe (1983)), a trajetória das partículas é diferente. Enquanto que no dobramento *kink* há uma transição instantânea do estado indeformado para o deformado das camadas mergulhantes, nesta proposta a mudança do mergulho das camadas é gradual em

função de um movimento curvilinear das partículas, resultando em uma zona de charneira curva.

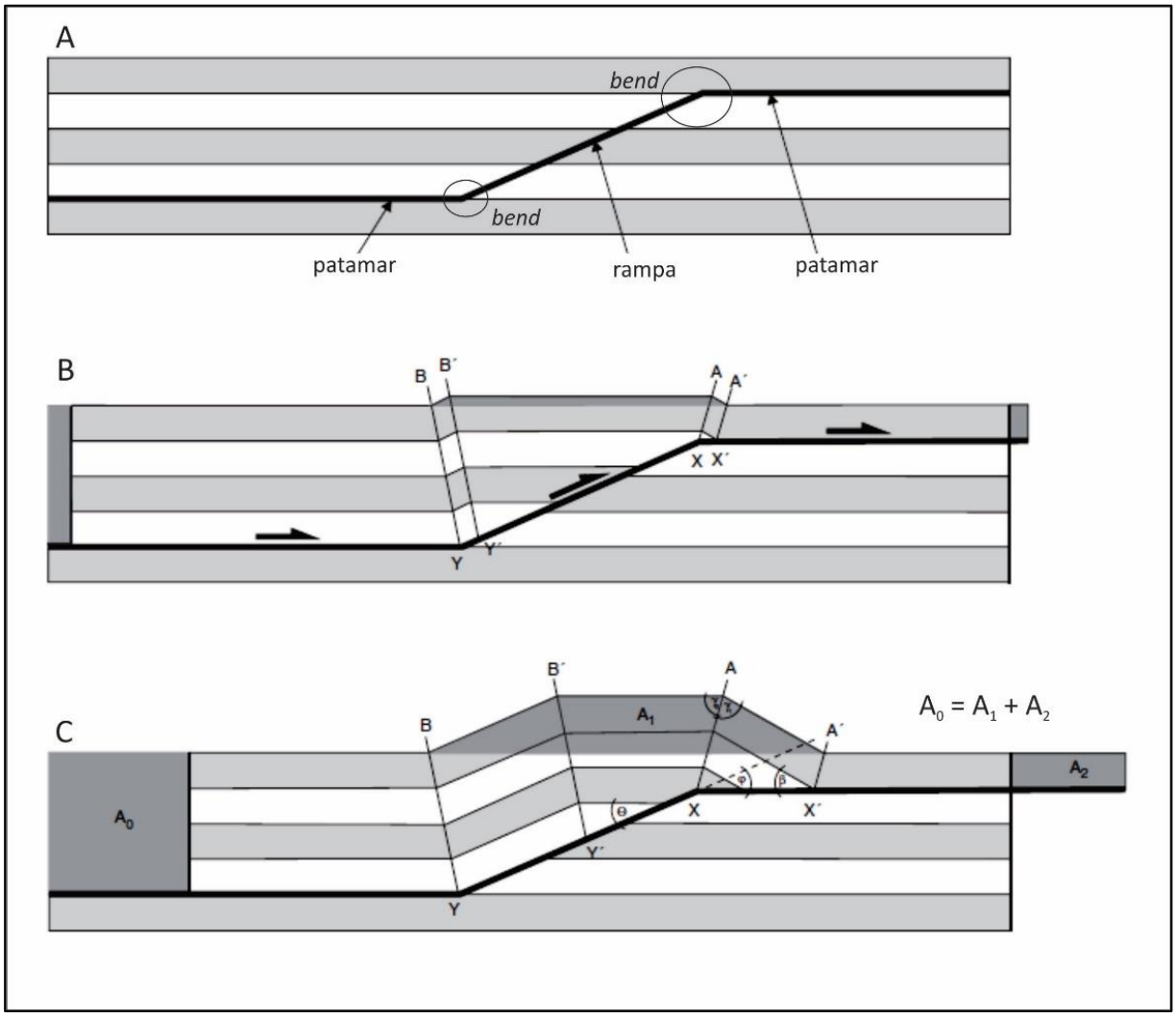


**Figura 3.** O modelo *kink* de Suppe (1983 e 1985) para os *fault bend folds*, segundo os critérios de balanceamento de área e comprimento: (A) geometria da falha com trajetória em degrau; (B) desenvolvimento das bandas *kink* e início do dobramento; (C) crescimento das bandas *kink* e da amplitude da antiforme. As regiões em cinza indicam o balanceamento de áreas, isto é, Ao = A1 + A2. Zanon (2020).

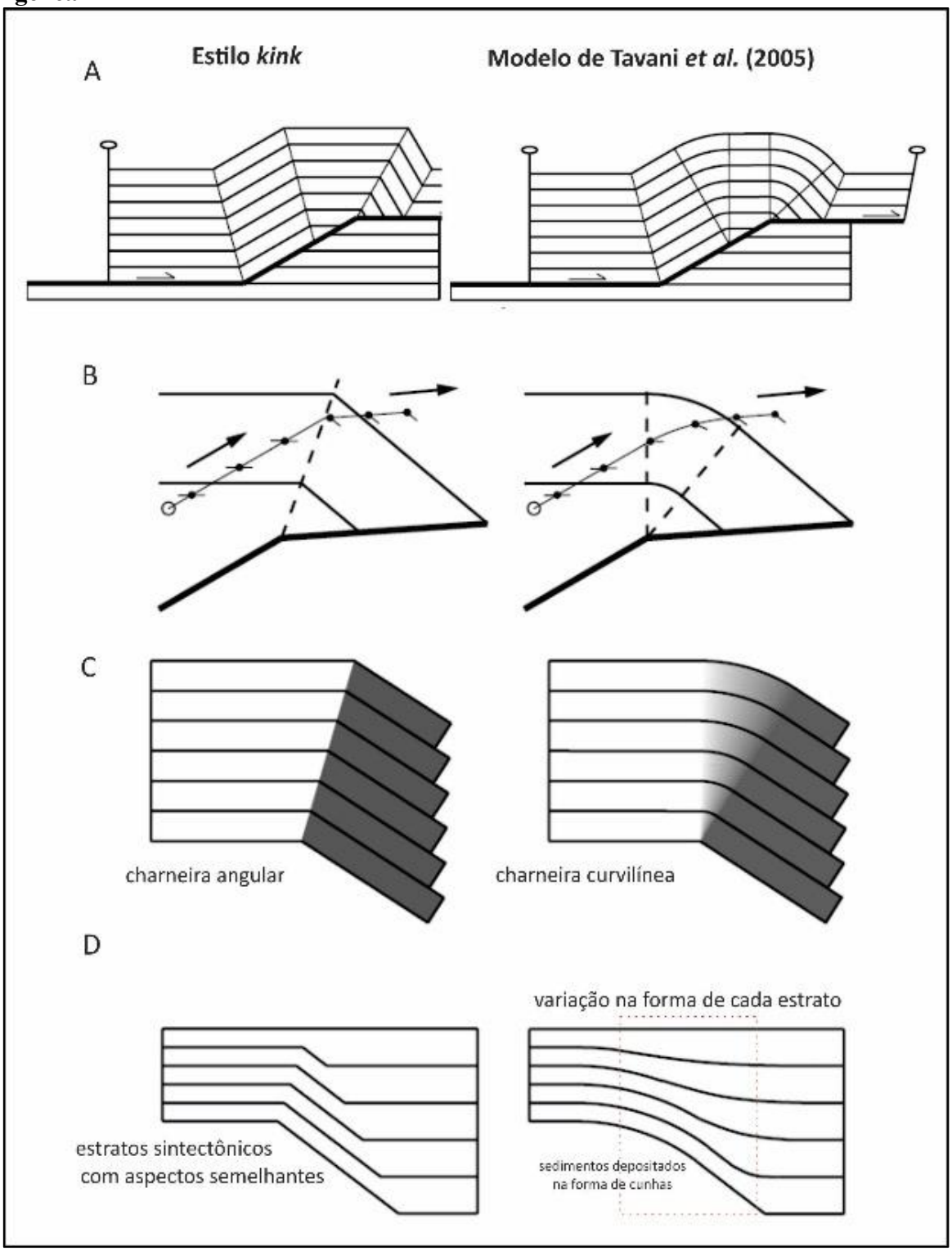


**Figura 4.** Comparação entre *fault-bend folds do* tipo *kink* e com estilo curvilíneas: (A) aspectos geométricos; (B) trajetória das partículas; (C) distribuição final do layer-parallel slip; (D) geometria dos estratos sintectônicos (ou seja, depositados durante a deformação progressiva). Os tons de cinza mostram o grau de intensidade da deformação (crescente à medida que o tom se torna mais escuro). Zanon (2020).

***Fault-propagation fold* (FPF)**

O *fault-propagation fold* foi definido por Williams & Chapman (1983) como estrutura cujo dobramento ocorre, por *layer-parallel shortening*, na terminação da rampa de empurrão, em uma zona de deformação plástica denominada "*ductile bead*". Os autores buscaram quantificar os aspectos cinemáticos das "dobras assimétricas com vergência para a direção do transporte nos cinturões compressivos" descritas no trabalho de Dahlstrom (1969).

A partir desta definição, surgiram dois importantes modelos cinemáticos: o primeiro se baseia no mecanismo de *layer-parallel simple shear* de Suppe & Medwedeff (1984) e Suppe (1985) para províncias *thin-skinned* (Figura 5A), e o segundo fundamenta-se em uma deformação mais distribuída, em territórios *thick-skinned*, por processo de cisalhamento simples oblíquo às camadas (Figura 5B). Neste último modelo, definido por Erslev (1991) e descrito adiante, a deformação se concentra em uma zona triangular na extremidade da falha, denominada de "*trishear*", e é influenciada pela espessura e comprimento das camadas.

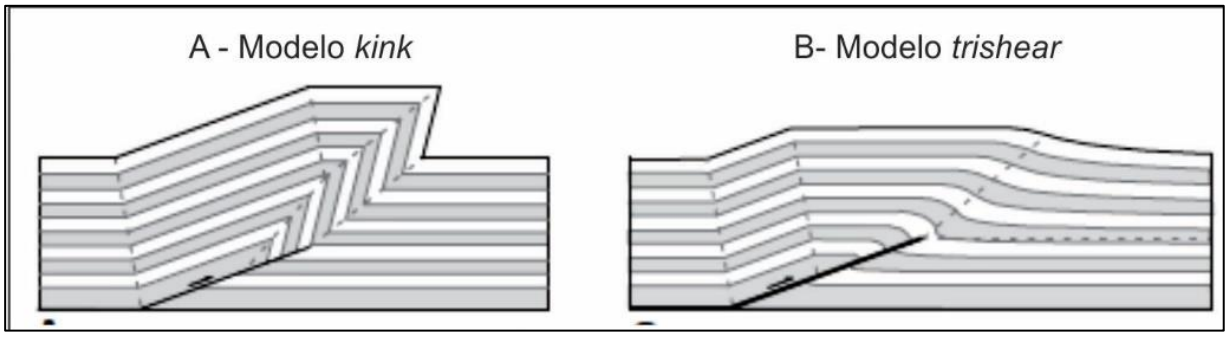


**Figura 5.** Principais modelos cinemáticos para as *fault-propagation folds*: (A) modelo *kink* e (B) modelo *trishear* (Zanon 2000).

Assim como nos FBFs, o modelo cinemático do tipo *kink* de Suppe & Medwedeff (1984) e Suppe (1985) assume que durante o desenvolvimento dos FPFs a espessura das camadas mantém-se constante. Mas Jamison (1987) novamente mostrou através de cálculos trigonométricos entre os ângulos interflanquial e da rampa que as camadas não permanecem constante.

A ideia de que a espessura das camadas não permanece constante durante o dobramento foi novamente apresentada por Mitra (1990). O autor propôs o "*área-balanced model*", no qual

a variação na espessura pode ocorrer em toda a camada, não apenas na região do *forelimb* como os estudos anteriores previam (Figura 6). Mais tarde, Jabor *et al.* (2012) reformulou esta análise, que recebeu o nome de *time-variant model*.

No mesmo ano da publicação de Mitra, Chester & Chester (1990) observaram alguns exemplos de FPFs cujas camadas do backlimb da dobra não apresentavam mergulho constante. E assim propuseram que a flexura poderia ocorrer sobre uma falha preexistente, ou seja, não necessariamente a dobra e a rampa seriam contemporâneos (Figura 7). Sendo assim, quando a falha encontrar uma mudança reológica no pacote estratigráfico ocorreria a geração da FPF.

Ainda em 1990, Suppe & Medwedeff (1990) também apresentaram um outro modelo descrevendo novos tipos de FPFs: os tipos de *simple-step* FPFs e o *breakink through*. No primeiro caso, os autores relacionaram a geometria da falha e da dobra e propuseram um modelo sem variação de espessura das camadas e outro com variação na espessura na região do *forelimb*. Já o *breaking through* consiste em um tipo de FPF que envolve a contínua propagação da rampa, e que pode ser classificado, segundo a Figura 8, como: (A) *decollement breakthrough*, (B) *synclinal e anticlinal breakthrough* e (C) *breakthrough complexos*. Anos depois, Mercier *et al.* (1997) analisaram as *breaking through* FPFs das Montanhas Atlas, da Algéria, empregando um programa de computador para modelar tais feições tão comuns em sistemas compressivos.

Tavani *et al.* (2006) elaboraram o modelo cinemático e geométrico para os FPFs, denominado *double-edge fault-propagation folding*, no qual a nucleação da rampa de empurrão ocorre no interior das camadas e não na terminação do descolamento basal (como descrito por Suppe & Medwedeff 1993, por exemplo), por deslizamento flexural, envolvendo conservação na espessura das camadas (Figura 9). E assim como os modelo dos FBFs (Tavani *et al.* 2005), os autores também caracterizam os FPFs com geometria tanto circular (Tavani *et al.* 2005) quanto angular (por exemplo, Suppe 1983).

Conforme descrito anteriormente, os FPFs também são estudados através do modelo *trishear*, desenvolvido inicialmente por Erslev (1991) (Figura 5). Neste modelo, os estudos baseiam-se em modelagens numéricas, desenvolvidas em programas computacionais diversos que simulam as condições presentes em materiais incompetentes, tais como rochas metamórficas dúcteis.

Segundo Erslev (1991), os FPFs se desenvolvem progressivamente através de uma zona triangular (a *trishear zone*), na qual a deformação heterogênea resulta no estiramento das camadas próxima à terminação da falha, enquanto as camadas superiores sofrem espessamento

(Figura 10). Existe um grupo de pesquisa na Universidade de Cornel, fundado por Allmendinger (um dos pioneiros no estudo das *trishears* FPFs), que divulga uma síntese dos estudos realizados em um site (http://www.geo.cornell.edu/RWA/trishear/), afirmando que tais estruturas são influenciadas por cinco fatores: o ângulo da rampa, a direção e propagação da falha, a posição da extremidade da falha, o ângulo apical formado na zona triangular e a razão rejeito/propagação da falha.

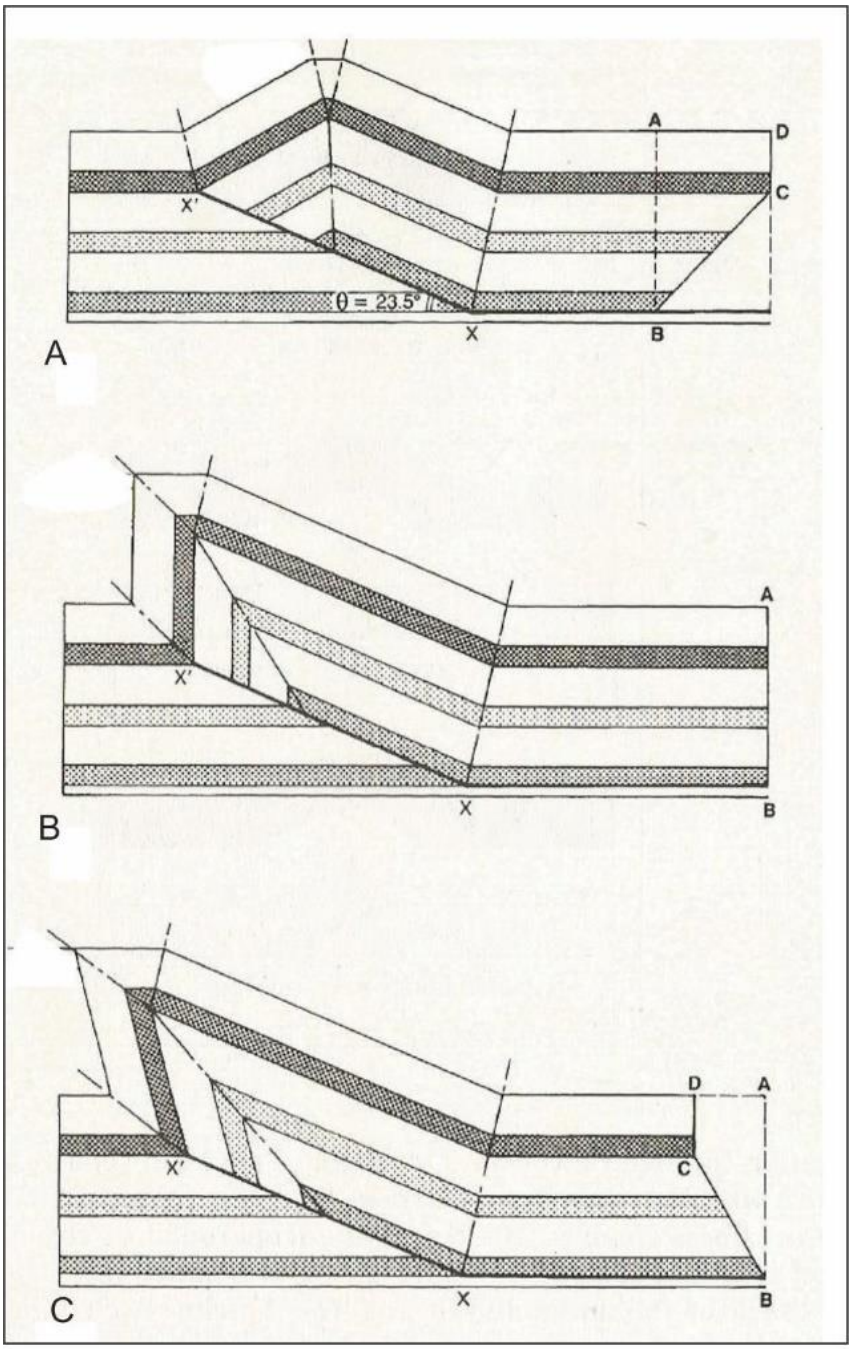


**Figura 6.** *Area-balanced model* de Mitra (1990): (A) e (C) mostram perfis com variação na espessura, enquanto em (B) as camadas se mantiveram constante. Para haver balanceamento

de área em (A), o espessamento teve que ser maior nas camadas superiores do que nas inferiores, já em (C) ocorreu o contrário. Zanon (2020).

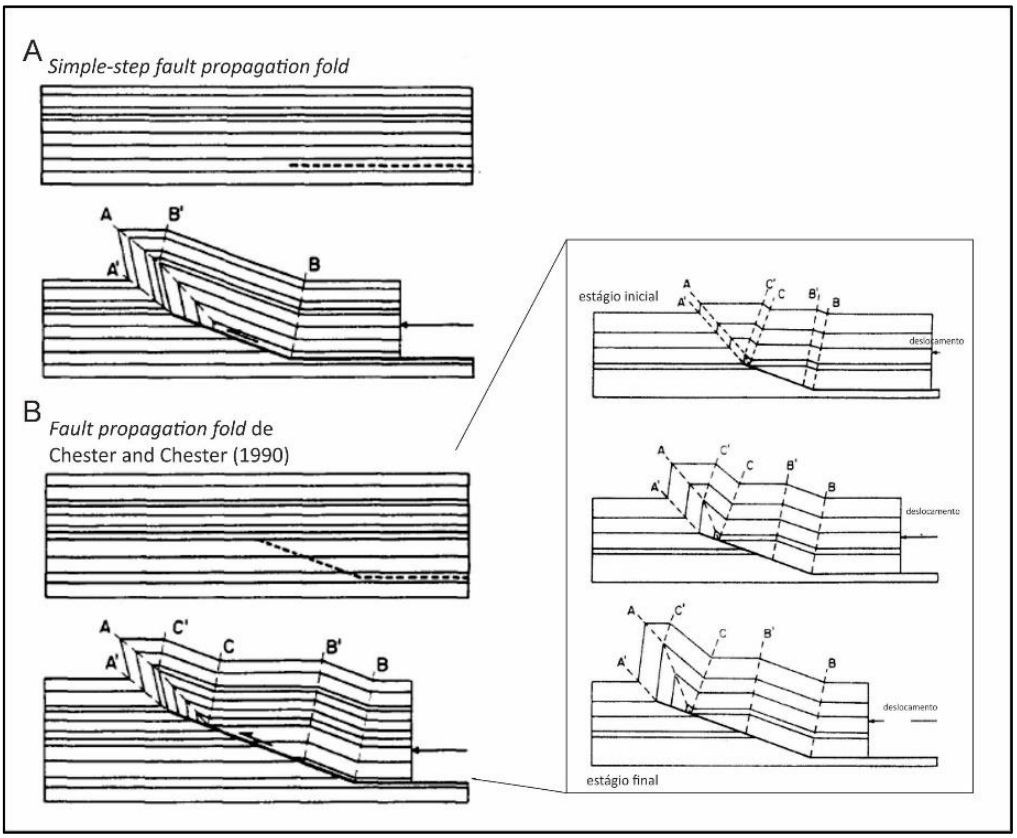


**Figura 7.** Comparação entre o modelo 'tradicional' e o modelo de Chester & Chester (1990) para os *fault-propagation folds*. Zanon (2020).

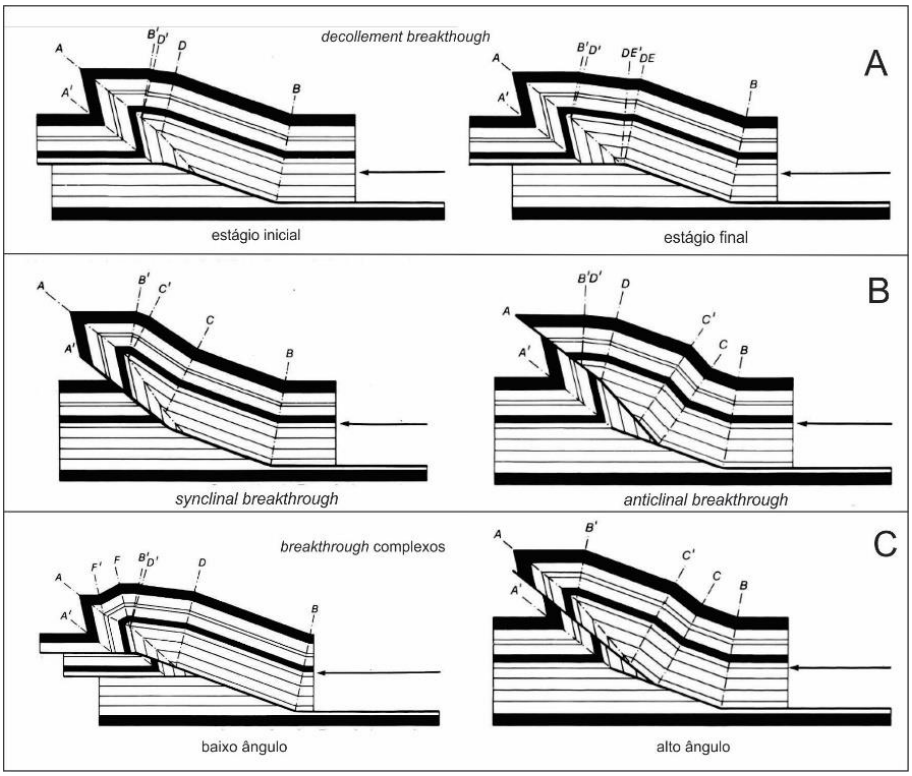


**Figura 8.** Os diferentes tipos de *breaking through*. Zanon (2020)

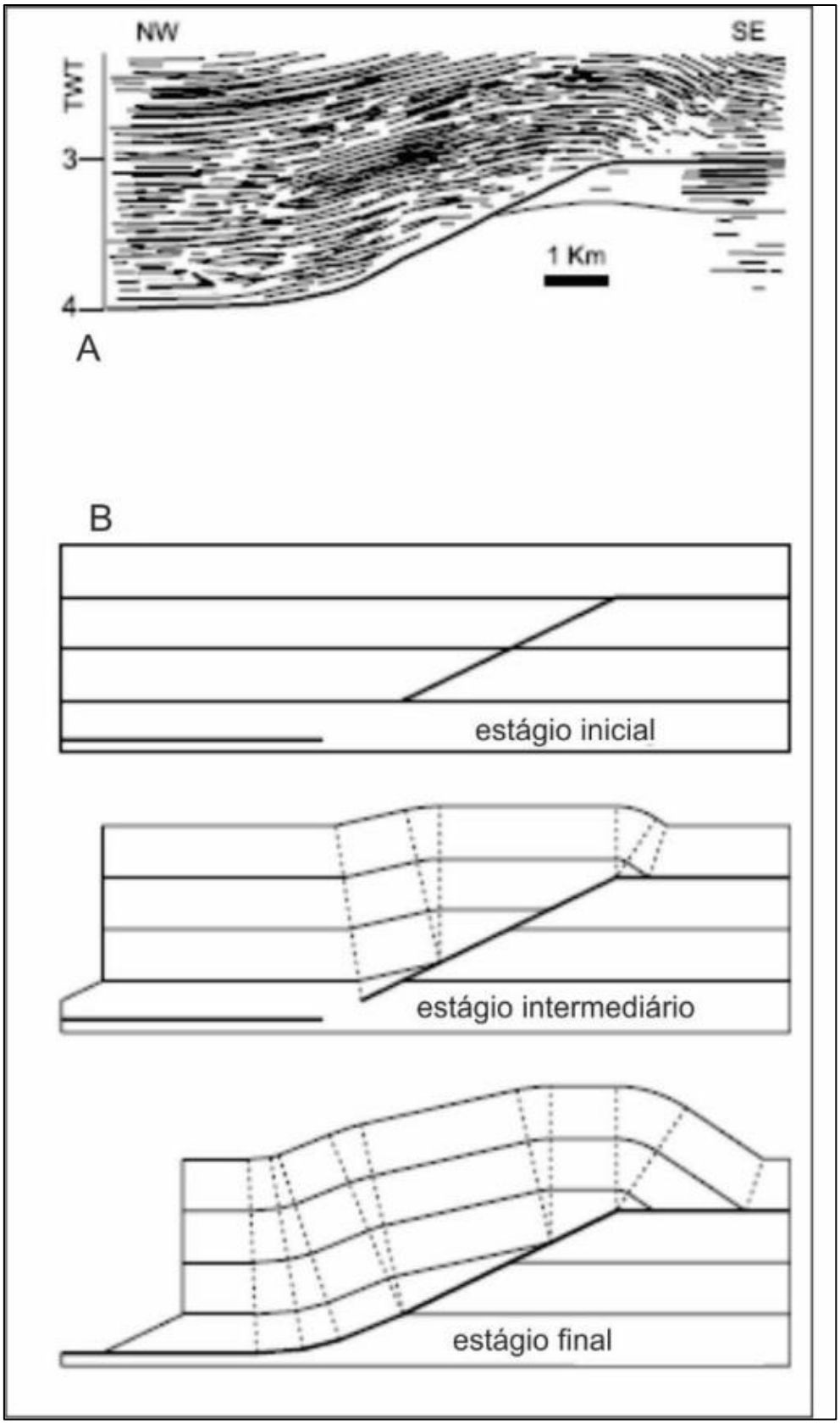


**Figura 9.** Estudo do FPF da Bacia Maracaibo (Venezuela): (A) Seção sísmica esquemática da e (B) reconstrução da seção, dividida nos diferentes estágios evolutivos. Zanon (2020).

**Figura 10.** Desenvolvimento progressivo dos FPFs segundo o modelo *trishear*. Zanon (2020).

## CONCLUSÃO

As dobras-falhas são estruturas que constituem as cadeias de montanhas e, eventualmente, sistemas distensivos, ambos comumente associados à importantes reservas de hidrocarbonetos. Sendo assim, o presente capítulo reuniu uma síntese dos principais trabalhos publicados sobre os *fault-bend folds* e *fault-propagation folds*, destacando desde autores pioneiros aos principais modelos já propostos. Acredita-se que conhecer os aspectos geométricos e cinemáticos destas estruturas possibilitam a reconstrução de secções geológicas e a compreensão dos processos tectônicos pretéritos e presentes em estudos com diferentes finalidades, desde eventos neotectônicos aos mecanismos de migração de hidrocarbonetos e outros fluidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adam J., Lohrmann J., Hoth S., Kukowski N., Oncken O. **Strain variation and partitioning in thrust wedges: high-resolution data from scaled sandbox experiments by 2D–3D PIV analysis**. Bollettino di Geofisica teorica ed applicata, v.(42), 123 – 126, 2002.

Adam J., Uraib J.L., Wienekec B., Onckena O., Pfeifferc K., Kukowskia N., Lohrmanna J., Hotha S., Van der Zeeb W., Schmatzb J. **Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting - new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques**. Journal of Structural Geology, v(27), 283 – 301, 2005.

Allmendinger, R.W. **Inverse and forward numerical modelling of trishear fault propagations folds.** Tectonics, v(17), 640 – 656, 1998.

Brandes, C., Tanner, D.C. **Fault-related folding: A review of kinematic models and their application**. Earth-Science, v(138), 352 – 370, 2004.

Boletim de Geociências da Petrobrás 2007

Buiter, S. **A review of brittle compressional wedge models.** Tectonophysics, v(530), 1 – 17, 2012.

Chester, J.S., Chester, F.M. **Fault-propagation folds above thrusts with constant dip**. Journal of Structural Geology, v(12(7)) ,903 – 910, 1990.

Dahlstron, C.D.A. **Balanced cross-sections**. Can. J. Earth Sci., v(6), 743 – 757, 1969.

Dolan, J.F., Avouac, J.P. **Introduction to special section: Active Fault-Related Folding: Structural Evolution, Geomorphologic Expression, Paleoseismology, and Seismic Hazards**. Journal of Geophysical Research, v(112), B03S01, 2007.

Eisenstadt, G., De Paor, D.G. **Alternative model of fault propagation**. Geology, 15: 630 – 633, 1987.

Epard, J. L., Groshong, Jr. R.H. **Kinematic model of detachment folding including limb rotation,fixed hinges and layer-parallel strain**. Tectonophysics, v(247) 85 - 103, 1995.

Erslev E.A. **Trishear fault-propagation folding**. Geology, 19: 617 – 620, 1991.

Fossen H. **Geologia Estrutural**. Oficina de Textos, 584p. São Paulo, Brasil, 2012.

Jabbour, M., Dhont, D., Hervouët, Y., Deroin, J.P. **Geometric and Kinematics of fault-propagation folds with variable interlimb angle.** Journal of Structural Geology, v(42), 212 – 226, 2012.

Jamison, W.R. **Geometric analysis of fold development in overthrust terranes**. Journal of Structural Geology, v(9) 207 – 219, 1987.

Marrett, R., Bentham, P.A. **Geometric analysis of hybrid fault-propagation/detachment folds.** Journal of Structural Geology, v(19), 243–248. 1997.

Medwedeff, D.A., Suppe J. **Multibend fault-bend folding.** Journal of Structural Geology, v(19), 279 – 292, 1997.

Mitra, S. **Fault-Propagation folds: Geometry, Kinematics Evolution and Hydrocarbon Traps.** American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v(74(6)), 921 – 945, 1990.

Rich, J.L. **Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block Virginia, Kentucky and Tennessee**. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, v(18(12)), 1584 – 1596, 1934.

Salvini, F., Storti, F. **The distribution of deformation in parallel fault-related folds with migrating axial surfaces: comparasion between fault-propagation and fault-bend folding.** Journal of Structural Geology, v(23), 25 – 32, 2001.

Suppe, J. **Geometry and kinematics of fault-bend folding**. American Journal of Science v(283), 684 – 721, 1983.

Suppe, J. **Principles of Structural Geology.** Prentice-Hall, 537p., New Jersey, 1985.

Suppe, J. **Reactivated normal faults in the western Taiwan fold-and-thrust belt.** Mem. Geol. Soc. China, 7: 187 – 200, 1986.

Suppe, J., Medwedeff, D.A. **Fault-propagation folding.** Geological Society of America. Abstracts with Programs, v(16), 670, 1984.

Suppe, J. Medwedeff, D.A. **Geometry and kinematics of fault-propagation folding**. Eclogae Geologicae Helvetiae, v(83), 409 – 454, 1990.

Suppe, J., Connors, C.D., Zhang Y. **Shear Fault-bend Folding.** *In*: McClay K. R. (ed.) Thrust tectonics and hydrocarbon systems, AAPG Memoir, v(82), 303 – 323, 2004.

Tavani, S., Storti, F., Salvani, F. **Rouding hinges to fault-bend folding geometric and kinematic implications**. Journal of Structural Geology, v(27), 3 – 22, 2005.

Tavani, S., Storti, F., Salvani, F. **Double-edge fault-propagation folding: geometry and kinematics**. Journal of Structural Geology, v(28), 19 – 45, 2006.

Tavani, S., Storti, F. **Fault-bend folding as an end-member solution of (double-edge) fault-propagation folding.** Terra Nova, v(18(4)), 270 – 275, 2006.

**Trishear Research at Cornell**: <http://www.geo.cornell.edu/RWA/trishear/>. Disponível em 19 de setembro de 2015 acesso às 23h.

Williams, G., Chapman, T. **Strains developed in the hangingwalls of thrusts due to their slip/propagation rate: a dislocation model**. Journal of Structural Geology, v(5) 563 – 571, 1983.

Zanon, M.L. **A análise do mecanismo de formação de Fault-Bend Folds e Fault-Propagation Folds por meio da modelagem física analógica**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil, 2020.