



**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DOS QUARTZITOS E MÁRMORES DO
COMPLEXO PORONGOS PARA O SEU APROVEITAMENTO COMO ROCHA
ORNAMENTAL E DE REVESTIMENTO NA REGIÃO DE CACHOEIRA DO SUL,
RS**

Porto Alegre, 2018

JEFERSON LEAL KARCZESKI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DOS QUARTZITOS E MÁRMORES DO
COMPLEXO PORONGOS PARA O SEU APROVEITAMENTO COMO ROCHA
ORNAMENTAL E DE REVESTIMENTO NA REGIÃO DE CACHOEIRA DO SUL,
RS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadores: Prof.Dr. Ruy Paulo Philipp
Prof.Dr. Clóvis Gonzatti

Porto Alegre, 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Karczeski, Jeferson Leal

Avaliação do potencial dos quartzitos e mármore do Complexo Porongos para o seu aproveitamento como rocha ornamental e de revestimento na região de Cachoeira do Sul, RS. / Jeferson Leal Karczeski. – Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

72 f. il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientadores: Ruy Paulo Philipp
Clóvis Gonzatti

1. Complexo Porongos. 2. Rocha ornamental. 3. Quartzitos 4. Mármore. 5. Ensaio tecnológico. I. Título.

CDU 549

Catálogo na Publicação
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS
Sônia Teresinha Duarte de Oliveira

CRB 10/2310

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso **Avaliação do potencial dos quartzitos e mármorees do Complexo Porongos para o seu aproveitamento como rocha ornamental e de revestimento na região de Cachoeira do Sul, RS** elaborado por Jeferson Leal Karczeski, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo Renner

Prof. Dr. Marcus Vinicius Dorneles Remus

Prof. Dr. Norberto Dani

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Antonio Karczeski (*in memorian*), que recentemente nos deixou, mas lutou intensamente até o último segundo... E esse foi o principal ensinamento que o senhor deixou, nunca desistir, por mais que a luta seja inglória! Por várias vezes eu pensei em desistir, estruturalmente não tinha mais forças pra seguir logo após a sua partida... Mas nunca vou me esquecer da sua promessa, que em um simples gesto, um dos únicos que conseguia fazer, apertou a minha mão e balançou a cabeça com sinal de positivo quando lhe fiz prometer estar comigo na minha formatura, e isso pai, foi o único motivo, a única força que me fez seguir! E eu tenho certeza, que o senhor estará do meu lado no dia da minha formatura! Pai, cuida de mim, que eu luto por nós!

Eu te amo...

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a minha família, por todo o suporte dado durante a graduação, e durante a minha vida. Passamos por momentos complicados esse ano, mas unidos conseguiremos superar tudo, como sempre foi, amo vocês incondicionalmente.

Minha noiva Priscila, por estar ao meu lado em todos os momentos sempre me apoiando, e se dedicando ao máximo ao nosso relacionamento. Eu te amo, obrigado por existir. A minha família emprestada, que veio junto com a minha noiva, Nenê, Claudio, Paty, vocês são a minha segunda família, obrigado por tudo.

Meus amigos da vida, que não são poucos, e sou muito grato a isso, não vou citar nomes para não esquecer de ninguém, mas vocês sabem o meu sentimento por vocês.

Aos amigos que a geologia me proporcionou, Lu, Leticia, Lari, Jojo, Mari, Duda, Maurício, Elisa, obrigado pela parceria, pelos campos, e pela difícil jornada que passamos dentro da UFRGS.

Aos amigos que conquistei na minha passagem pela CPRM, Luciano, Lucy, Provenzano, Laux, Oscar, Paloma, Carla, Rodrigo Peixoto, obrigado pela oportunidade de dividir o mesmo ambiente de trabalho, obrigado por todo ensinamento, obrigado pela oportunidade de estágio.

Aos meus grandes amigos Maílson e Mineiro, que depositaram em mim sua confiança e amizade, obrigado pela oportunidade, tenho certeza que ainda vamos conquistar tudo o que planejamos, com muito trabalho e dedicação. Ao Geól. Reischl, pelos ensinamentos e pelas conversas durante esse ano.

Aos meus orientadores Ruy e Clóvis, pela paciência, parceria e dedicação que tiveram comigo durante esse último ano.

A todos que trabalham no IGEO e na UFRGS, que ofereceram todo suporte necessário para minha formação.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo um estudo integrado geológico e tecnológico de rochas ornamentais nas áreas de ocorrência dos quartzitos e mármore da Antiforme Capané - Complexo Porongos, localizadas próximo ao município de Cachoeira do Sul, na porção central do Estado do Rio Grande do Sul. Geologicamente, a Antiforme Capané compreende espessas camadas de quartzitos com uma vasta área de ocorrência na forma de cristas por vezes quilométricas, lentes de mármore de até 150 metros, além de metapelitos intercalados com rochas metavulcânicas ácidas a intermediárias e corpos graníticos intrusivos. A metodologia envolveu a caracterização de campo com detalhamento estrutural, amostragem de blocos, petrografia e análise tecnológica desses materiais. A caracterização tecnológica dos quartzitos e mármore da região de Cachoeira do Sul foi realizada por meio de ensaios diversos, com objetivo de obter parâmetros físicos e mecânicos afim de permitir a qualificação dessas rochas para seu aproveitamento em rocha ornamental e de revestimento. Estes ensaios foram executados segundo procedimentos normatizados pelas entidades (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas) e (ASTM – *American Society for Testing and Materials*) e comparados a valores recomendados pelas mesmas. Os resultados obtidos permitiram concluir que tanto o quartzito quanto o mármore apresentam indicações favoráveis para o uso como rocha ornamental e de revestimento, portanto, sugere-se a continuidade dos estudos para a melhor caracterização da área que sustentem a abertura de jazidas na região.

Palavras-Chave: Complexo Porongos, rocha ornamental, quartzitos, mármore, ensaios tecnológicos.

ABSTRACT

This work aimed at an integrated geological and technological study of ornamental rocks in the occurrence areas of quartzites and marbles of the Capané Antiform, of the Porongos Complex, located near the city of Cachoeira do Sul, in the central portion of the Rio Grande do Sul State. The Antiforme Capané comprises thick layers of quartzite with a large area of occurrence in the form of crests, lenses of marble up to 150 meters, and metapelites interspersed with acidic to intermediate metavolcanic rocks and intrusive granitic bodies. The methodology involved the field characterization with structural detailing, block sampling, petrography and technological analysis of these materials. The technological characterization of the quartzites and marbles of the region of Cachoeira do Sul was carried out by means of several tests, aiming to obtain physical and mechanical parameters in order to allow the qualification of these rocks for their use in ornamental rock. These tests were carried out according to the standard procedures (ABNT - Brazilian Association of Technical Standards) and (ASTM - American Society for Testing and Materials) and compared to values recommended by them. The results obtained allowed to conclude that both the quartzite and the marble have favorable indications for the use as ornamental rock, therefore, it is suggested the continuity of the studies to better characterize the area that sustain the opening deposits in the region.

Palavras-Chave: Porongos Complex, ornamental rocks, quartzites, marbles, technological tests.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Localização da área de estudo A = Localização relativa ao Rio Grande do Sul; B = Detalhe da área de estudo em azul e principais vias de acesso em relação à Porto Alegre.....13
- Figura 2: Reconstrução do paleocontinente Gondwana Cinturões orogênicos: A = Araçuaí; B = Brasília; D = Damara; DF = Dom Feliciano; G = Gariep; K = Kaoko; R = Ribeira; S = Saldania; CO = Congo Oriental16
- Figura 3: Mapa com as principais unidades geotectônica da região sul do Brasil e Uruguai com destaque em vermelho para a área de estudo. Zonas de Cisalhamento Dúcteis: 1 – Itajai- Perimbó, 2 – Major Gercino, 3 – Caçapava do Sul, 4 – Dorsal de Canguçu, 5 – Passo do Marinheiro, 6 – Ibaré, 7 – SarandídelYí, 8 – SierraBallena, 9 – Cerro Amaro, 10 – Arroio Grande.....17
- Figura 4: Mapa geológico do Terreno Tijucas com destaque em vermelho para a área aproximada de estudo. ZCDC = Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu, ZCPM = Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro, ZCSBV = Zona de Cisalhamento Santana da Boa Vista.....24
- Figura 5: Detalhe de corpos de prova com esforços aplicados (à esquerda) e paralelamente (à esquerda) e paralelamente (à direita) à estruturação da rocha..... 29
- Figura 6: Corpo de prova e dispositivo de ensaio para determinação do módulo de ruptura da rocha por flexão em 3 pontos. 1 = suporte do rolete superior; 2 = rolete superior; 3 = rolete inferior; 4 = suporte do rolete inferior. L = distância entre os roletes.....32
- Figura 7: Representação da passagem das ondas longitudinais ou de compressão (Ondas P) por um meio.....33
- Figura 8: Ilustração das medições de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na direção paralela (à esquerda) e perpendicular (a direita) da foliação da rocha.....33
- Figura 9: Banco de dados organizados em ambiente SIG analisados com a utilização do software ArcMap© do programa ArcGIS© 10.1.....35
- Figura 10: Campanha de campo I: A = Afloramento de quartzito foliado; B = Afloramento de mármore em antiga cava de calcário; C = Antiga cava de calcário; D = Crista de quartzito.....36
- Figura 11: Campanha de campo II. A = Amostragem de blocos do mármore e antiga cava de calcário; B = Detalhe do bloco37
- Figura 12: A =Tentativa de amostragem no quartzito. O fraturamento principal se dá no plano da foliação devido ao alívio de pressão. B = Detalhe da chapa polida do mármore; C = Detalhe da chapa polida do quartzito.....38
- Figura 13: A = Prensa Hidráulica CONTROLS ADVANTEST 9 utilizada para a realização do ensaio. B = Corpos de prova ensaiados (amostras escuras referentes ao mármore, e claras ao quartzito.....42

Figura.14: Corpo de prova de quartzito submetido ao carregamento perpendicularmente à foliação.....	44
Figura 15: Ensaio de velocidade ultrassônica realizado nos corpos de prova antes do ensaio de compressão uniaxial	46
Figura 16: Mapa geológico da Antiforme Capané e pontos de campo e de amostragem.....	47
Figura 17: Cristas de quartzito afetadas por fraturamentos ocasionando a descontinuidade das mesmas.....	48
Figura 18: A = Afloramento de quartzito em forma de crista; B = Afloramento de quartzito branco em forma de lajeado; C = Bloco de quartzito de coloração branca; D = Detalhe da lineação de estiramento (L_x).....	49
Figura 19: A = Afloramento de biotita-muscovita xisto em corte de estrada; B = Detalhe da textura e composição do biotita-muscovita xisto	50
Figura 20: A = Antiga cava de extração de calcário; B = Detalhe do bandamento composicional do mármore	51
Figura 21: Desenvolvimento de clivagem de crenulação S_2 a partir do dobramento isoclinal da foliação S_1	52
Figura 22: A = Afloramento em forma de lajeado na beira de drenagem de metavulcânica; B = Detalhe do bandamento composicional e boudins de agregado de quartzo	53
Figura 23: A = Afloramento em forma de lajeado do Metagranito Capané; B = Foliação milonítica marcada pelo estiramento e orientação dos porfiroclastos.....	54
Figura 24: A = Diagrama de roseta de frequência e B = diagrama de roseta de comprimento	55
Figura 25: Croqui esquemático mostrando a relação do paralelismo das foliações S_1 e S_2 afetadas posteriormente pela fase de deformação D_3 (S_3) de escala regional representada por clivagens de fratura em escala de campo.....	56
Figura 26: Estereogramas de diferentes estruturas identificadas nos metassedimentos da AC. A= Estereogramas de projeção dos pólos do plano de foliação S_x (foliação metamórfica $S_1//S_2$); B=Estereogramas de projeção das lineações de estiramento (L_x); C = Relação entre a moda da foliação, S_x , com a lineação, L_x , mais frequente. D = Representação de eixo de dobras (Lb_2).....	57
Figura 27: Relação entre S_1/S_2 que representa a foliação principal da antiforme e S_3 e S_4 ., fases posteriores de deformação produzindo clivagens de fratura.....	58
Figura 28: Detalhe da lineação de estiramento mineral nos quartzitos com baixo ângulo mergulhando para SW, indicando transporte tectônico oblíquo.....	58
Figura 29: Estereogramas de diferentes estruturas identificadas nos metassedimentos da AC. A= Representação da projeção estereográfica com a distribuição dos polos dos planos da estrutura S_3 .; B = Estereogramas representando os polos dos planos de fraturas S_4 ; C = Estereogramas de linhas dos eixos de dobras (Lb_3); D = Estereogramas de linhas dos eixos de dobras (Lb_4).....	59

Figura 30: A e B = Aparência geral da lâmina com nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. C e D = Detalhe do nível mais espesso com porfiroclasto de quartzo em nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. E e F = Detalhe do nível mais fino rico em muscovita. Qz = Quartzo e Ms = Muscovita.....60

Figura 31: A e B = Detalhe da feição mica-*fish* a nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. C e D = detalhe de zircão detrítico como elemento traço nicóis decruzados a esquerda e cruzados a direita. Qz = Quartzo, Ms = Muscovita e Zr = Zircão.....61

Figura 32: A e B = Aparência geral da lâmina com nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. C e D = Detalhe do nível rico em calcita e dolomita com porfiroclastos de calcita em descruzados a esquerda e cruzados a direita. E e F = Detalhe do nível rico em flogopita e quartzo. Dol = Dolomita, Qz = Quartzo, Fl = Flogopita.....62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaio sugeridos para a escolha e utilização de rochas em revestimento, conforme seu emprego.....	28
Tabela 2: Especificações e métodos de ensaio para rochas destinadas a revestimentos conforme normas da ABNT e ASTM: ρ_a = densidade aparente (kg/m ³); a_a = absorção d'água (%); η_a = porosidade aparente (%); σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); σ_{f3} = resistência à flexão em 3 pontos (MPa); σ_{f4} = resistência à flexão em 4 pontos (MPa); V = velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; n.e. = não especificado.....	29
Tabela 3: Índices físicos referentes ao quartzito, e especificações conforme as normas ABNT e ASTM. ρ_a = densidade aparente (g/cm ³); a_a = absorção d'água (%); η_a = porosidade aparente (%); n.e = não especificado.....	63
Tabela 4: Índices físicos referentes ao mármore, e especificações conforme as normas ABNT e ASTM. ρ_a = densidade aparente (g/cm ³); a_a = absorção d'água (%); η_a = porosidade aparente (%); n.e = não especificado.....	64
Tabela 5: Valores de resistência à compressão uniaxial referentes ao quartzito σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); n.e = não especificado.....	65
Tabela 6: Valores de resistência à compressão uniaxial referentes ao mármore σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); n.e = não especificado.....	66
Tabela 7: Valores de resistência à flexão em três pontos referentes ao quartzito. σ_{f3} = resistência à flexão em três pontos (MPa); n.e = não especificado.....	64
Tabela 8: Valores de resistência à flexão em três pontos referentes ao mármore. σ_{f3} = resistência à flexão em três pontos (MPa); n.e = não especificado.....	67
Tabela 9: Valores de velocidade de ondas ultrassônicas referentes ao quartzito. V_{\perp} = velocidade perpendicular à foliação; $V_{//}$ = velocidade paralela à foliação; n.e = não especificado.....	67
Tabela 10: Valores de velocidade de ondas ultrassônicas referentes ao mármore. V_{\perp} = velocidade perpendicular à foliação; $V_{//}$ = velocidade paralela à foliação; n.e = não especificado.....	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 LOCALIZAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 JUSTIFICATIVA	14
2 ESTADO DA ARTE	16
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	16
2.1.2 TERRENO TAQUAREMBÓ	18
2.1.3 TERRENO SÃO GABRIEL	19
2.1.4 BATÓLITO PELOTAS.....	20
2.2.1 COMPLEXO PORONGOS – TERRENO TIJUCAS	21
2.2.2 MÁRMORES E QUARTZITOS DO COMPLEXO PORONGOS.....	25
2.3 BREVE PANORAMA BRASILEIRO PARA ROCHAS ORNAMENTAIS.....	27
2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TECNOLÓGICA.....	27
3 METODOLOGIA	33
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
3.2 SENSORIAMENTO REMOTO.....	34
3.3 TRABALHO DE CAMPO	35
3.4 ANÁLISE PETROGRÁFICA	39
3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	40
3.5.1 ÍNDICES FÍSICOS	40
3.5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	42
3.5.3 RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À FLEXÃO – FLEXÃO POR CARREGAMENTO EM TRÊS PONTOS	43
3.5.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS.....	45
4 RESULTADOS	46
4.1 GEOLOGIA DA ANTIFORME CAPANÉ	46
4.1.1 METASSEDIMENTOS	48
4.1.2 METAVULCÂNICAS	52
4.1.3 METAGRANITO CAPANÉ.....	54
4.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL	55
4.3 PETROGRAFIA	60
4.3.1 QUARTZITO	60
4.3.2 MÁRMORE	61
4.4 ENSAIOS TECNOLÓGICOS	63
4.4.1 ÍNDICES FÍSICOS	63
4.4.2 RESISTENCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	65

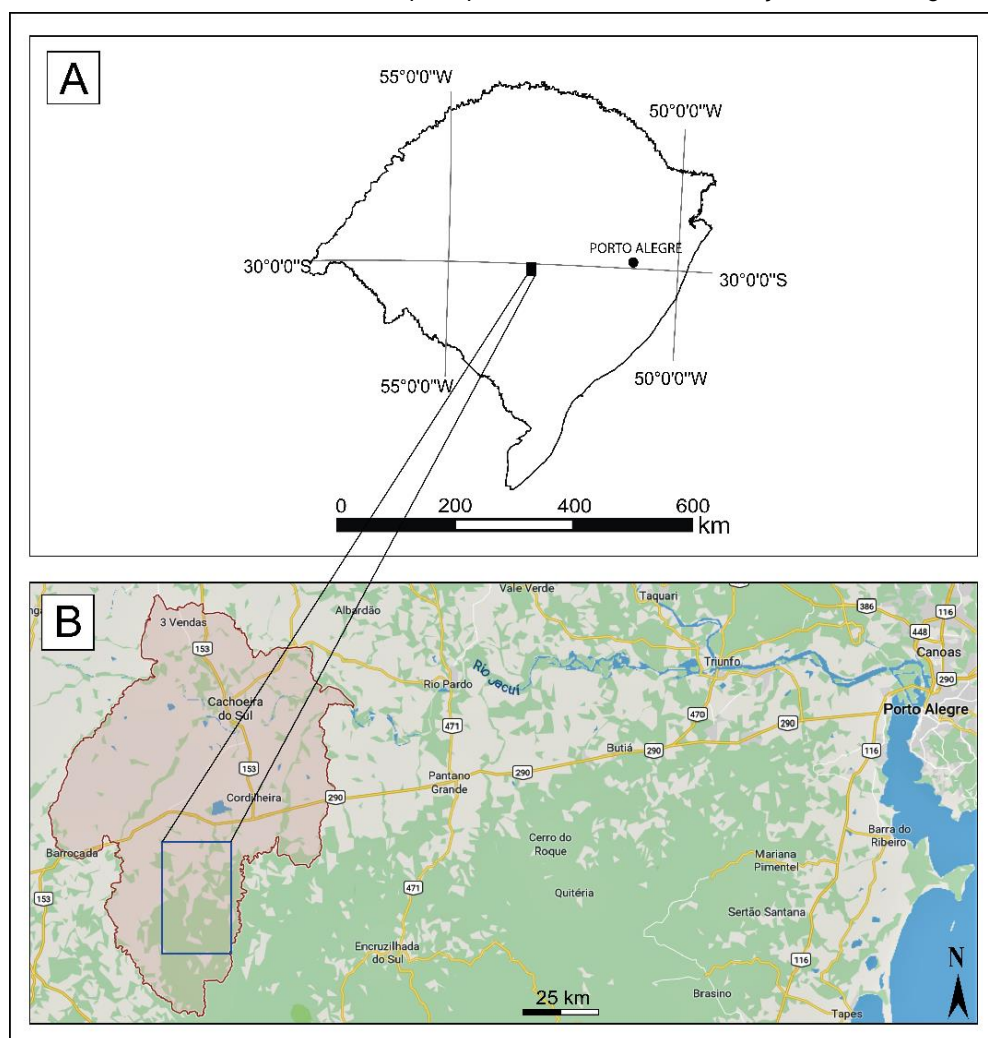
4.4.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO – FLEXÃO POR CARREGAMENTO EM TRÊS PONTOS.....	66
4.4.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS.....	67
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada na parte sul do município de Cachoeira do Sul, na porção central do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), aproximadamente 190 km a oeste da cidade de Porto Alegre. O acesso pode ser realizado partindo da capital Porto Alegre pela rodovia federal BR-116 e BR-290, acessando estrada vicinal à 500 metros após a entrada de Cachoeira do Sul no sentido sudoeste por cerca de 20 km.

Figura 1:Localização da área de estudo. A = Localização relativa ao Rio Grande do Sul; B = Detalhe da área de estudo em azul e principais vias de acesso em relação à Porto Alegre.



Fonte: A = Desenvolvido pelo autor; B = Modificado de *Google Maps*.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho visa avaliar o potencial dos quartzitos e mármore do Complexo Porongos (CP) na região de Cachoeira do Sul, RS, para o seu aproveitamento em rocha ornamental e de revestimento. Poucos estudos nesse contexto foram realizados até o presente momento, refletindo na inexistência de exploração desses materiais na região.

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia empregada terá como base a caracterização geológica da área de através de mapeamento geológico de áreas alvos pré-definidas, e a realização de ensaios de caracterização tecnológica executados segundo procedimentos normatizados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ASTM (*American Society for Testing and Materials*), e comparados à valores estabelecidos pelas mesmas

1.3 JUSTIFICATIVA

O Complexo Porongos, situado na porção central do Escudo Sul-rio-grandense, é composto por uma associação de rochas metavulcano-sedimentares neoproterozoicas que foram intensamente deformadas e metamorfizadas, em condições de baixo a médio grau, entre as fácies xisto verde inferior a anfibolito superior (JOST e BITENCOURT, 1980; CAMOZZATO *et al.*, 2012). O complexo ocorre na forma de uma faixa alongada de orientação NE-SW com cerca de 170 km de comprimento e 20 km de largura e constitui a principal unidade do Terreno Tijucas do Cinturão Dom Feliciano. A diversidade litológica do CP compreendendo espessas camadas de xistos pelíticos e quartzitos, lentes de mármore, xistos calci-silicáticos intercalada com rochas metavulcânicas ácidas a intermediárias e corpos graníticos intrusivos (JOST e BITENCOURT, 1980; REMUS *et al.*, 1986; ZVIRTES, 2017).

Uma vasta área de ocorrência de quartzitos é observada na região de Cachoeira do Sul, no flanco leste da denominada Antiforme Capané. Os quartzitos ocorrem na forma de cristas com dezenas a centenas de metros de comprimento com espessuras de até 350 metros (MARQUES *et al.*, 1998), de forma geral apresentam

coloração branca a bege, são fortemente foliados e deformados, possuem intenso fraturamento centimétrico a métrico causado por clivagens de fratura, que poderiam prejudicar sua exploração como blocos, porém, levando em consideração trabalhos de campo realizados na região, levanta-se a hipótese de que o fraturamento seja menos proeminente, com fraturas mais seladas, possibilitando a exploração como blocos. Além disso, técnicas atuais como envelopamento e blocos e telamento de chapas, podem ser usadas nos processos de exploração e beneficiamento, aumentando a resistência da rocha e permitindo o uso de matérias fraturadas como rochas de revestimento.

Os mármoreos do CP ocorrem na forma de lentes com até 150 metros de comprimento (MARQUES *et al.*, 1998) e eram explorados anteriormente para a produção de calcário. Na região são observadas pelo menos nove cavas abertas de antigas minas desativadas, o que facilita a observação da geometria, grau de fraturamento, bem como as litologias encaixantes das lentes, propriedades fundamentais pois são as condicionantes para o aproveitamento de uma possível jazida.

O Brasil está entre os maiores produtores de rocha ornamental do mundo, com cerca de 9,3 milhões de toneladas no ano de 2016, representando 7,5% da produção mundial (CHIODI *et al.*, 2016), com destaque para os estados de Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia e Ceará. Mármoreos e quartzitos somam cerca de 32% do total de produção, atrás apenas de granitos (CHIODI *et al.*, 2013). Estes materiais rochosos apresentam grande demanda no mercado consumidor interno e externo e, portanto, justificam a realização de pesquisas em busca de novas jazidas.

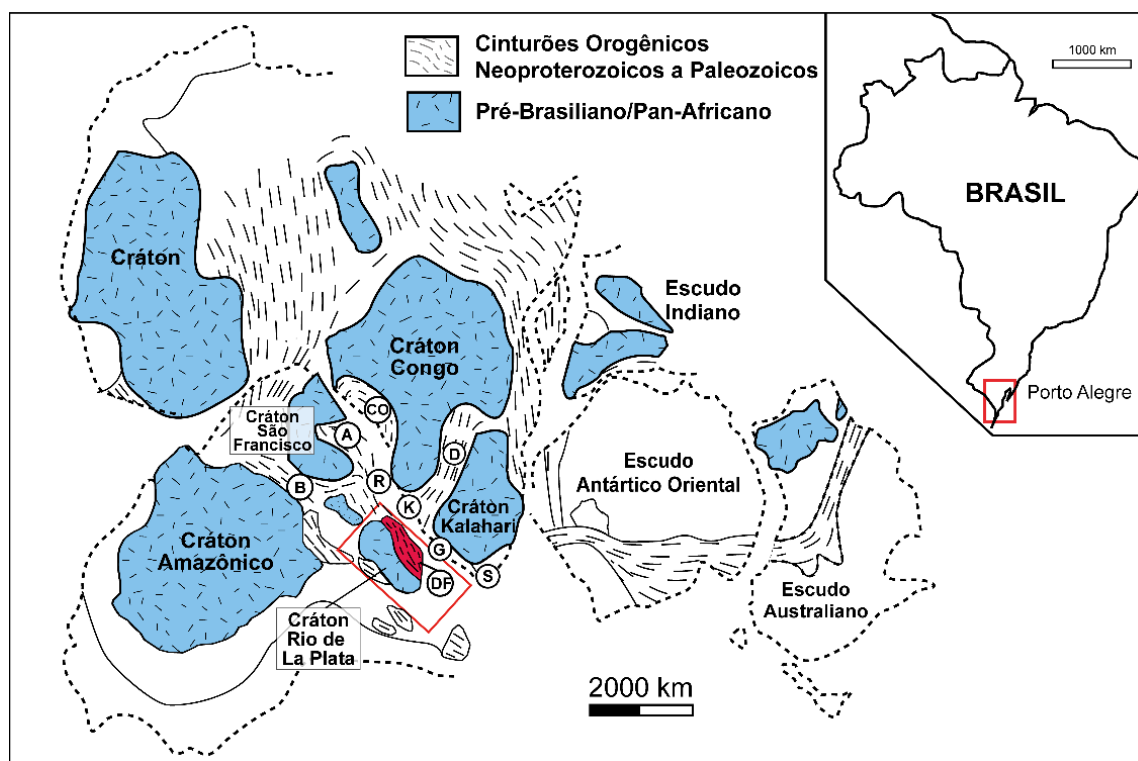
A avaliação das áreas de exposição de quartzitos e mármoreos no estado do Rio Grande do Sul pode fomentar a economia da metade centro-sul do estado e contribuir com a geração de empregos para a região.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Escudo Sul-rio-grandense (ESRG) compreende o setor Meridional da Província Mantiqueira (ALMEIDA e HASUI, 1977), é formado por associações de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares em um complexo arranjo tectono-estratigráfico, segmentado e controlado por zonas de cisalhamento regionais dúcteis com direções N20-40°E, N30-40°W e N60-80°E, (CHEMALE JR., 2000; HARTMANN *et al.*, 2007). O ESRG é interpretado como resultado de geração e deformação de crosta continental e de fontes mantélicas, cuja contribuição maior ocorreu em dois ciclos orogênicos, Ciclo Transamazônico (2,37-2,00 Ga) e Ciclo Brasileiro/Panafricano (900-534 Ma), constituindo a porção oeste do paleocontinente Gondwana (Figura 2) (CHEMALE JR., 2000, HARTMANN *et al.*, 2007., PHILIPP *et al.*, 2016).

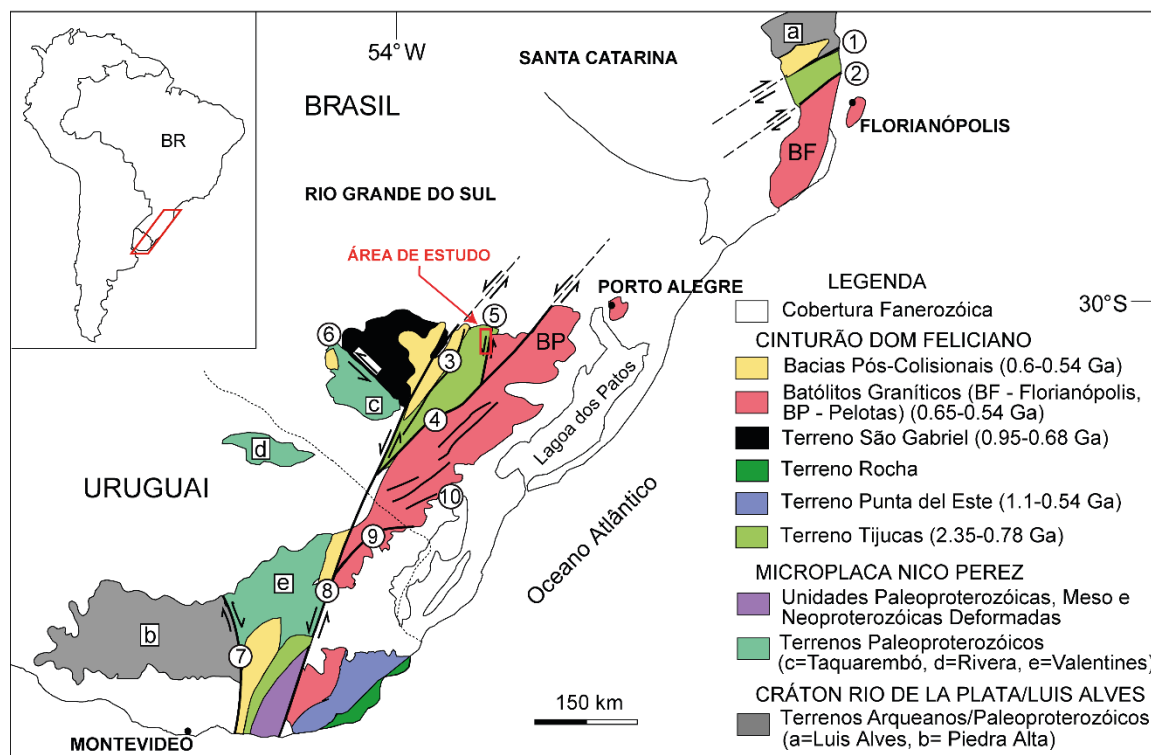
Figura 2: Reconstrução do paleocontinente Gondwana. Cinturões orogênicos: A = Araçuaí; B = Brasília; D = Damara; DF = Dom Feliciano; G = Gariep; K = Kaoko; R = Ribeira; S = Saldania; CO = Congo Oriental



Fonte: Modificado de Philipp *et al.* (2016)

De acordo com suas características estruturais, petrológicas, geofísicas e geocronológicas o ESRG é subdividido por duas unidades geotectônicas principais: o Cráton Rio de La Plata (CRLP), representado por um fragmento denominado de Terreno Taquarembó e por septos menores, e o Cinturão Dom Feliciano (CDF) constituído pelos terrenos Tijucas e São Gabriel e pelo Batólito de Pelotas (Figura 3).

Figura 3: Mapa com as principais unidades geotectônicas da região sul do Brasil e Uruguai com destaque em vermelho para a área de estudo. Zonas de Cisalhamento Dúcteis: 1 – Itajai- Perimbó, 2 – Major Gercino, 3 – Caçapava do Sul, 4 – Dorsal de Canguçu, 5 – Passo do Marinheiro, 6 – Ibaré, 7 – SarandídelYí, 8 – SierraBallena, 9 – Cerro Amaro, 10 – Arroio Grande.



Fonte: Modificado de Philipp *et al.*, (2016)

Os fragmentos do CRLP ficaram preservados no escudo como complexos orto e paragnáissicos de idade paleoproterozóica sendo eles, Complexo Santa Maria Chico (Terreno Taquarembó), Complexos Encantadas, Arroio dos Ratos, Imbicuí, Vigia além do anortosito Capivarita. A construção do CDF envolveu três eventos orogênicos, conhecidos como: Evento Passinho (890-860 Ma), responsável pelo início do fechamento do oceano Charrua, que separava o CRLP da microplaca Nico Perez, gerando o Arco do Passinho, o evento São Gabriel (770-680 Ma), com o final do fechamento deste paleo-oceano causando a construção de uma margem continental ativa denominada Arco de São Gabriel, e por fim, a colisão entre os Crátons Rio de La Plata/Nico Perez, Kalahari e Congo, com o fechamento do oceano Adamastor

durante a orogênese Dom Feliciano, ocorrida no final da evolução do Ciclo Brasileiro (650 – 620 Ma) (CHEMALE JR., 2000; HARTMANN *et al.*, 2007, PHILIPP *et al.*, 2016). Após o pico do metamorfismo colisional seguiu-se uma intensa granitogênese de caráter pós-colisional responsável pela formação do Batólito de Pelotas (BITTENCOURT e NARDI, 2000; PHILIPP *et al.* 2000, 2007; PHILIPP e MACHADO, 2005, PHILIPP *et al.*, 2016).

As unidades do embasamento foram intensamente deformadas e metamorfisadas durante o final do processo colisional, gerando a intercalação tectônica entre domínios infra e supracrustais com ampla concordância estrutural.

2.1.2 TERRENO TAQUAREMBÓ

O Terreno Taquarembó (TT), ocorre no extremo sudoeste do ESRG, representa a maior parte exposta do CRLP, sendo limitado ao norte pela Zona de Cisalhamento Ibaré, ao leste pela a Sutura de Caçapava do Sul, e ao oeste e a sul é coberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná.

O TT é constituído por um complexo gnaiss-granulítico Paleoproterozóico, chamado Complexo Santa Maria Chico (CSMC) intrudido por um extenso magmatismo pós-colisional neoproterozoico representado por granitoides subalcalinos alto-K, shoshoníticos (Granito Passo da Chácara e das suítes Santo Afonso e Vauthier) com idades entre 600-580 Ma e alcalinos a peralcalinos (Suíte Saibro) com idades de 560-540 Ma (CAMOZZATO *et al.*, 2013) além de rochas vulcânicas, sub-vulcânicas.

O CSMC compreende uma associação gnaisses calci-silicáticos e quartzo-feldspáticos, metamorfizados em fácies anfíbolito superior a granulito, gnaisses tonalíticos e trondjemíticos de fácies anfíbolito, e uma associação máfica-ultramáfica de fácies granulito (UFRGS, 2016), com bandamento gnáissico predominantemente E-W.

São conhecidos quatro eventos metamórficos principais no TT (HARTMANN, 1998). Os dois primeiros M1 e M2, são eventos de metamorfismo regional de idade Paleoproterozoica, alcançando condições de fácies granulito, o M3 representado por

metamorfismo retrógrado de fácies anfibolito e M4 de fácies xisto verde, sendo ambos relacionados ao magmatismo/deformação no Ciclo Brasileiro através da intrusão de granitos e coberto por rochas vulcânicas e sedimentares do mesmo evento.

As idades U-Pb em zircão realizadas com SHRIMP no CSMC, datam 2486 ± 6 Ma (granulito) e 2006 ± 3 Ma para o metamorfismo da fase M2, com pico metamórfico de 2366 ± 8 Ma e de 2035 ± 9 Ma. Os resultados indicam um metamorfismo regional granulítico entre 2,03 e 2,06 Ga em rocha formada no final do Arqueano a partir de uma acreção juvenil (HARTMANN, 1987). Philipp (2009) obteve a idade de 2,48 e 2,36 Ga em U-Pb (SHRIMP) de zircões para o intervalo de cristalização ígnea relacionadas a evolução de um arco insular, e de 2,05 e 2,0 Ga para eventos metamórficos de alto grau de natureza colisional de magmas graníticos Neoproterozoicos.

2.1.3 TERRENO SÃO GABRIEL

O Terreno São Gabriel (TSG) localiza-se na parte oeste do ESRG, é limitado ao sul do Terreno Taquarembó pela Zona de Cisalhamento de Ibaré, ao norte e ao oeste é recoberto pela Bacia do Paraná e ao leste é colocado em contato tectônico com o Terreno Tijucas através da Sutura de Caçapava do Sul e recoberto pela Bacia do Camaquã.

O TSG é composto por associações de rochas relacionadas a ambientes de sistemas de arco intra-oceânico e arco continental respectivamente ao evento Passinho e ao evento São Gabriel. Leite *et al.*, (1998) obteve idades de 879 ± 14 por SHRIMP U-PB em uma amostra de metadiorito da região sul do Cerro Mantiqueiras para o evento Passinho, além disso, zircões detríticos de um albita-muscovita-clorita xisto da Formação Passo Feio foram datadas entre 908 a 774 Ma por SHRIMP U-Pb, relacionada ao mesmo evento (REMUS *et al.*, 2000).

A Formação passo feio inclui rochas como metabasaltos, metapelitos, metarenitos, metapelitos, metatufos e clorita xistos aflorantes na região de Caçapava do Sul, próximo ao granito Caçapava. Sua idade é ainda desconhecida dificultando a sua correlação com as demais formações do TSG (PETRY, 2014).

O evento São Gabriel inclui rochas metavulcanossedimentares, lascas ofiolíticas e rochas plutônicas de arcos de margem continental ativa e arco de ilhas oceânicas composta pelo Complexo Cambaí constituído por ortognaisses e granitoides, Grupo Palma, uma associação metavulcânica máfica-ultramáfica intercaladas com xistos e paragnaisses pelíticos e quartzíticos (HARTMANN *et al.*, 2011) e pelo Complexo Bossoroca, que consiste principalmente de rochas metavulcânicas e metavulcanoclásticas andesíticas a dacíticas

As rochas do TSG apresentam valores positivos de ϵNd indicando o desenvolvimento de um sistema de arcos magmáticos (arco de ilhas e de margem continental) durante o evento São Gabriel (SAALMANN *et al.*, 2005; PHILIPP *et al.*, 2008). O Complexo Bossoroca, representa a principal parte vulcânica desse arco apoiada pelas idades de cristalização de metadacitos 753 ± 2 Ma TIMS e SHRIMP U-PB, muito semelhantes as idades dos granitóides (MACHADO *et al.*, 1990; REMUS *et al.*, 1999).

2.1.4 BATÓLITO PELOTAS

O Batólito de Pelotas (BP) situa-se na parte leste do ESRG, recobrimdo a maior parte do escudo, sendo um dos mais expressivos batólitos graníticos brasileiros da região sul-sudeste brasileira. É limitado a leste do Complexo Porongos pela Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu, ao norte é recoberto pela Bacia do Paraná e a leste pelos sedimentos Fanerozoicos da planície costeira.

O BP é composto por rochas plutônicas multintrusivas polifásicas geradas no intervalo entre 630 e 550 Ma, divididas em sete suítes graníticas, Pinheiro Machado, Erval, Cordilheira, Viamão, Piquiri, Encruzilhada do Sul e Dom Feliciano (VASQUEZ, 1997; PHILIPP, 1998; HARTMANN *et al.*, 2000; PHILIPP e MACHADO., 2005; PHILIPP *et al.*, 2007), com pequenas intrusões intermediárias a básicas, sendo elas, gabro Passo da Fabiana (FRAGOSO 1991) e o diorito Capim Branco, além de rochas vulcânicas e sub-vulcânicas ácidas, os enxames de diques Asperezas, as rochas piroclásticas Ana Dias (FRAGOSO, 1986), e septos do embasamento (PHILIPP, 1998).

Diferentes modelos foram propostos para a evolução do magmatismo do BP. FERNANDES *et al.*, (1995) sugere que a gênese desse massivo granítico é produto de um ambiente de arco magmático acima da zona de subducção do Oceano Adamastor, já CHEMALE JR. (2000) levantou a hipótese de um oceano localizado a oeste do BP mergulhando para leste. Porém, PHILIPP e MACHADO (2005) PHILIPP (2007) e BITTENCOURT e NARDI (2000), propõem que a geração do magmatismo do Batólito Pelotas ocorreu principalmente em ambiente pós-colisional relacionados e controlados pela atuação de zonas de cisalhamento dúcteis, principalmente pela Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu no final da orogênese Dom Feliciano.

São reconhecidos três eventos magmáticos principais no BP durante e após o clímax da orogênese Dom Feliciano. As idades mais antigas (630-610) são pertencentes à suíte Pinheiro Machado, a qual é relacionada a uma subducção de crosta oceânica sob crosta continental espessa em um arco magmático pré-colisional (PHILIPP e MACHADO, 2005). O magmatismo posterior com idades mais jovens entre 600–570 Ma, é interpretado como fases tardi-tectônicas correspondendo ao evento tectônico responsável pela construção de zonas de cisalhamento de alto ângulo (PHILIPP e MACHADO, 2005). Por fim, o magmatismo da suíte Dom Feliciano (550 – 570 Ma) interpretado como pós-orogênico.

Três eventos tectônicos são descritos no BP, sendo dois deformacionais dúcteis (D1 e D2) e um rúptil (D3) (PHILIPP e MACHADO, 2005). O evento D1 é marcado por zonas de cisalhamento de baixo ângulo com direção NW com cinemática de movimentação topo para leste. O D2 é representado por zonas de cisalhamento de alto ângulo para NE, com cinemática indicando movimento sinistral. O último evento D3, é relacionado à reativação das zonas de cisalhamento D1 e D2, em um regime extensional de nível crustal mais raso.

2.2.1 COMPLEXO PORONGOS – TERRENO TIJUCAS

O CP está localizado no setor meridional da Província Mantiqueira na porção centro-leste do Cinturão Dom Feliciano (ALMEIDA *et al.*, 1977; FRAGOSO CESAR, 1980), sendo a principal unidade litoestratigráfica do Terreno Tijucas. Apresenta-se na forma de uma faixa alongada de direção N30°E, com 170 km de comprimento e 15 a

30 km de largura. É limitado ao leste com o BP pelas Zonas de Cisalhamento Dorsal de Canguçu e Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro, ao oeste pela Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul com recobrimento sedimentar da Bacia do Camaquã (sub-bacias Guaritas, ao oeste e Piquiri-Boici, no centro) e ao norte recoberto pelas rochas fanerozoicas da Bacia do Paraná (CHEMALE JR. 2000). Compreende uma associação de rochas supracrustais, de idade Neoproterozóicas, metamorfas em condições de grau baixo a médio (JOST e BITTENCOURT, 1980) que recobrem o embasamento granito-gnáissico Paleoproterozoico do Complexo Encantadas (SOLANI JR., 1986; HARTMANN *et al.*, 2003; PHILIPP *et al.*, 2008).

O CP é constituído por uma sucessão metavulcano-sedimentar com intercalações ou lentes de ortognaisses e rochas metaultramáficas, submetido a metamorfismo regional orogênico resultado dos eventos tectônicos convergentes entre os crátons Rio de La Plata e Kalahari no final do Ciclo Brasileiro (CHEMALE JR. 2000; HARTMANN *et al.*, 2007; SAALMANN *et al.*) As rochas metassedimentares são compostas por metapelitos, xistos carbonosos, quartzitos, mármore e lentes de metamargas além de corpos graníticos intrusivos (JOST e BITTENCOURT, 1980; REMUS *et al.* 1986; MARQUES ET AL. 1998; CAMOZZATO *et al.* 2012, ZVIRTES, *et al.*, 2017). As rochas metavulcânicas constituem metandesitos, metariolitos, metadacitos, ocorrendo intercaladas com os metassedimentos e registrando as mesmas condições metamórficas (JOST e BITTENCOURT, 1980; MARQUES *et al.*, 1998a, 1998b; CAMOZZATO *et al.*, 2012) A idade do magmatismo de aproximadamente 780 Ma sugere uma atividade vulcânica sin-deposicional (HARTMANN *et al.*, 2007).

O CP é dividido estruturalmente por quatro estruturas antiformais principais (Figura 4), de escala quilométrica, definidas como: (a) Domo de Santana da Boa Vista na região central, (b) Antiforme Serra dos Pedrosas a leste do Domo de Santana da Boa Vista, (c) Antiforme Capané no extremo norte, e (d) Antiforme do Godinho, ao sul do Domo de Santana da Boa Vista (JOST e BITTENCOURT, 1980).

O Domo de Santana da Boa Vista é uma estrutura alongada com direção N45°E e eixos com caimento de baixo ângulo para SW e NE, com núcleo composto por rochas do embasamento paleoproterozoico (Gnaisses Encantadas e Granitóides Milonitizados de Santana da Boa Vista) coberto por metapelitos, quartzitos e mármore neoproterozoicos. A Antiforme Serra dos Pedrosas possui direção N20°E

e eixos caídos com baixo ângulo para NE, é composto principalmente por rochas metavulcânicas intermediárias a ácidas e metapelitos e xistos grafitosos subordinados (JOST e BITTENCOURT, 1980; JOST, 1981; MARQUES e CARAVACA, 1994). A Antiforme Capané, objeto desse estudo, consiste em uma estrutura antiformal com eixo com caimento de 20° para SW, composta por rochas metavulcânicas máficas e félsicas, metapelitos, quartzitos, lentes de mármore, rochas metaultramáficas (MARQUES et al., 1998) e granitóides milonitizados denominados como Metagranito Capané (ZVIRTES et al., 2017). A Antiforme Serra do Godinho apresenta direção N20°E com eixo caindo suavemente para SW, e também expõe o embasamento paleoproterozoico do Complexo Encantadas e as rochas supracrustais neoproterozoicas.

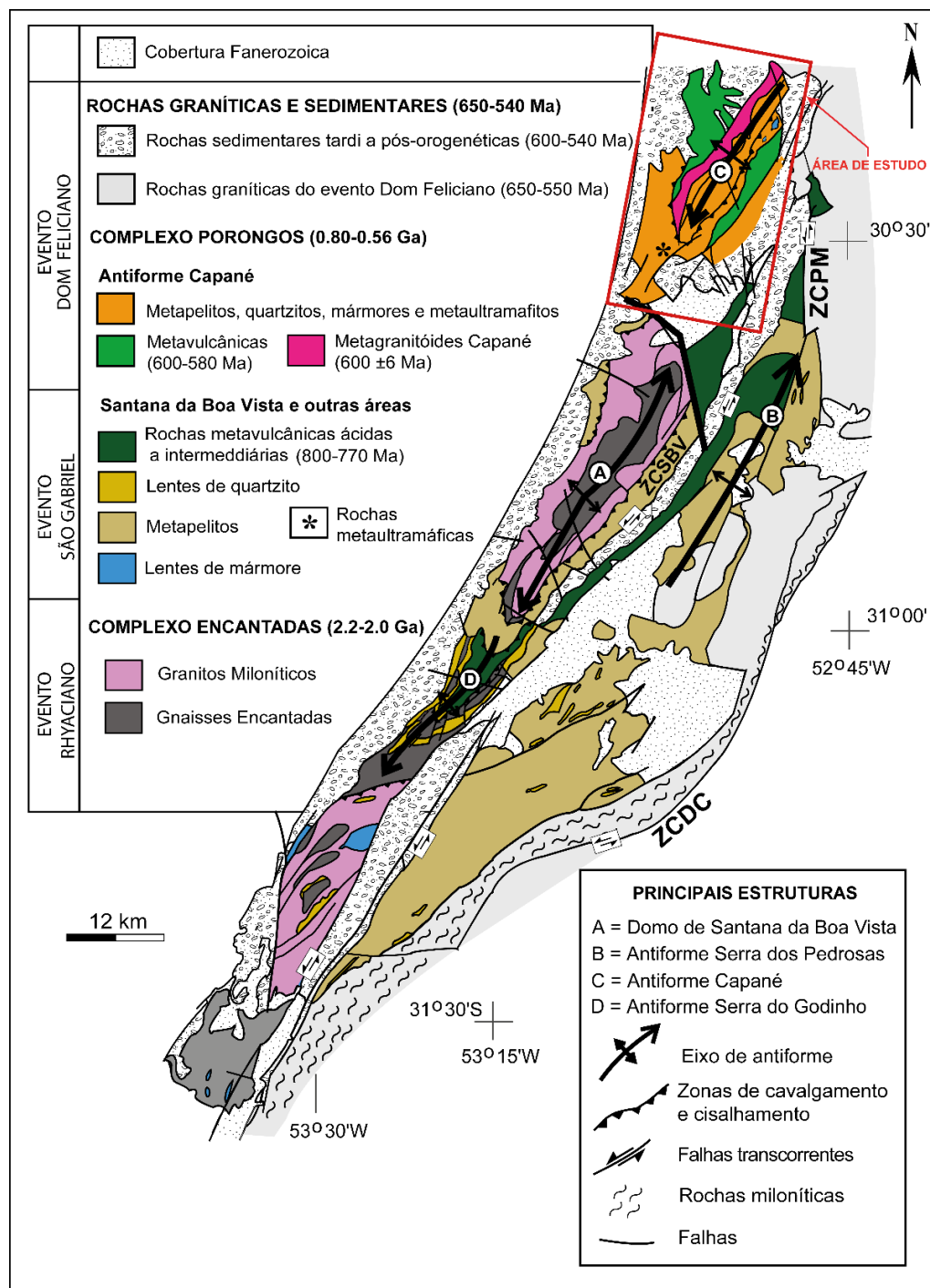
O CP é caracterizado por uma complexa trama estrutural marcada por diversos eventos deformacionais (JOST e BITTENCOURT, 1980, REMUS *et al.* 1986, SALMANN *et al.*, 2006). O primeiro evento (D1) representa a primeira foliação (S₁) gerada a partir do acamamento S₀ dos metapelitos com veios e segregação de quartzo e dobras isoclinais centimétricas, associada com o primeiro episódio de dobramento F₁. A D₂ consiste em dobras isoclinais (F₂) associadas ao desenvolvimento de uma clivagem de crenulação gerando a foliação S₂, devido a transposição do acamamento S₀ com a S₁, atingindo condições metamórficas de fácies xistos verdes inferior a médio (JOST, 1981), com deformação não coaxial e milonítica (MARQUES et al. 1998). A lineação mineral e/ou de estiramento com direção predominante NNE-SSW presente na S₂ pode ser um indicador cinemático remanescente, sugerindo um sentido de cisalhamento de topo para NNE (Hartmann *et al.*, 2007).

O terceiro evento (D3) é responsável pela estruturação do CP em megaestruturas antiformais, e representa o redobramento da F₂ gerando um padrão de dobras abertas a fechadas (F₃) de escala quilométrica, com eixos mergulhando para NE e SW (JOST e BITTENCOURT, 1980) produzindo uma clivagem de fratura nas superfícies axiais das dobras, representando um evento de caráter mais rúptil que D1 e D2 (ZVIRTES, 2012).

O quarto evento (D4) representa dobras abertas a fechadas em condições metamórficas retrogressivas, com seus eixos orientados NW-SE, associadas a um empurrão para NW ocasionando à colocação de *nappes* de cavalgamento com o

transporte das unidades da porção sudoeste sobre as unidades da porção noroeste do CP (HARTMANN et al., 2007) e, posteriormente cortadas por falhas semi-rúpteis a rúpteis durante o evento D5 em um regime de cisalhamento transcorrente sinistral (HARTMANN et al., 2007.)

Figura 4: Mapa geológico do Terreno Tijucas com destaque em vermelho para a área aproximada de estudo. ZCDC = Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu, ZCPM = Zona de Cisalhamento Passo do Marinheiro, ZCSBV = Zona de Cisalhamento Santana da Boa Vista



Fonte: Modificado de Philipp et al., (2016).

Muitos ambientes foram propostos para a bacia do Porongos, incluindo margem passiva (JOST e BITENCOURT, 1980), margem ativa (CHEMALE JR., 2000) e bacia de retro-arco (FERNANDES *et al.*, 1995; HARTMANN *et al.*, 2007; PHILIPP *et al.*, 2013). Os dados isotópicos e de elementos-traço das rochas metavulcânicas e dos metassedimentos indicam um retrabalhamento do embasamento pré-Brasiliano, sugerindo a deposição em crosta continental distendida ou em um arco magmático continental, com retrabalhamento de crosta continental paleoproterozoica (HARTMANN *et al.*, 2007). Dados geocronológicos de U-Pb em zircões detríticos dos metassedimentos do CP mostram três fontes principais com idades paleo, meso e neoproterozoica (HARTMANN *et al.*, 2003; GRUBER *et al.*, 2011; PERTILLE *et al.*, 2015), indicando uma evolução de uma margem passiva para uma bacia de retro-arco (JOST e BITENCOURT, 1980) ou de foreland (PERTILLE *et al.*, 2015). PHILIPP *et al.* (2016) considera que as rochas do Complexo Porongos representem os sedimentos da margem passiva do Oceano Adamastor sobre o Terreno Nico Perez.

Análises de isótopos de oxigênio e U-Pb, Lu-Hf obtidas em zircões detríticos do CP por PERTILLE *et al.*, (2015) corroboram com a existência de duas associações distintas de metassedimentos no CP. Os metassedimentos da região de Santana da Boa Vista apresentam uma composição química compatível com sedimentos de margem passiva de proveniência paleo a mesoproterozoica, enquanto os metassedimentos da região de Capané possuem uma composição geoquímica compatível com rochas fontes relacionadas à arcos magmáticos e com proveniência detrítica predominantemente neoproterozoica.

2.2.2 MÁRMORES E QUARTZITOS DO COMPLEXO PORONGOS

Os quartzitos se dão na forma de cristas por vezes quilométricas normalmente alongadas com direção NE-SW e com espessuras que variam de dezenas a centenas de metros, representando as principais elevações topográficas do CP, como os cerros Partido, Porongos, Isidoro, Papileti e Garcia (CPRM, 2009) Em geral, os quartzitos menos cisalhados apresentam pouca resistência ao intemperismo, diferentemente dos quartzitos intensamente deformados, que sustentam as maiores cristas

(MARQUES *et al.*, 1998). São reconhecidos dois grupos de quartzitos, quartzitos puros e quartzitos impuros. Os quartzitos puros são de coloração branca, maciços pouco foliados com granulação fina a média composto por quartzo e muscovita subordinada. Os impuros possuem granulação média a fina constituídos por quartzo, feldspato e muscovita com acessórios. Os quartzitos fortemente deformados possuem intensa trama milonítica recristalizada, e podem ser caracterizados como tectonitos dos tipos $L > S$ a $L \geq S$ resultando em uma lineação com ângulo de caimento duplo inferior a 20° (MARQUES *et al.*, 1998).

Segundo Dryer (2016), os quartzitos apresentam indicações favoráveis para o seu aproveitamento como rocha ornamental ou de revestimento. Possui um aspecto estético agradável e um valor intermediário de índice de absorção de água, sendo mais aconselhado o seu uso como piso para ambientes internos ou externos mais secos, ou como revestimento de paredes. Porém, o mesmo autor salienta que os quartzitos da região da vila Torrinhas na cidade de Pinheiro Machado, apresentam alto grau de faturamento, impossibilitando sua exploração como grandes blocos, portanto, o aproveitamento destas rochas é controlado pelo fraturamento e pelas variações composicionais em suas camadas (presença de micas principalmente).

Os mármore do CP na área da Antiforme Capané constituem de lentes de centenas de metros de comprimento e espessuras que variam de metros até dezenas de metros cortadas por venulações espaçadas de quartzo, ocorrem entre os metapelitos, alguns calcíferos intercalados com quartzitos, situadas em um mesmo horizonte estratigráfico (MARQUES *et al.*, 1998). Os mármore do CP variam de puros a impuros, com composição mineralógica formada principalmente por dolomita e subordinadamente quartzo e mica branca. Apresenta granulação fina a média com bandamento composicional marcado pela alternância de finos leitos brancos e cinza claro a escuro, ou mesmo de metamargas, essas formadas por carbonato, flogopita, talco, pirita, quartzo e serpentina (MARQUES *et al.*, 1998)

Existem cerca de 9 (nove) cavas abandonadas de antigas minas na região de Cachoeira do Sul, onde os mármore do CP eram beneficiados para a produção de calcário. Não existem estudos referentes à caracterização tecnológica para o aproveitamento dos mármore do CP para rocha ornamental publicados até o

momento sendo este o primeiro trabalho a avaliar o seu potencial para rocha ornamental e de revestimento.

2.3 BREVE PANORAMA BRASILEIRO PARA ROCHAS ORNAMENTAIS

O Brasil é um dos grandes produtores e exportadores mundiais de rochas ornamentais e de revestimento. Sua produção totalizou cerca de 9,3 milhões no ano de 2016, 7,5% da produção mundial (CHIOD *et al*, 2016), abrangendo mais de 1.200 variedades comerciais extraídas de \pm 1000 frentes ativas de lavra. Os mármore e quartzitos (objetos desse estudo) somam cerca de 32% do total de produção, atrás apenas de granitos (CHIOD *et al*, 2013). No mercado mundial, o Brasil situa-se entre os sete principais países produtores atrás de China, Turquia, Índia, Itália Espanha e Egito respectivamente (CHIOD *et al*, 2016).

As reservas brasileiras estão estimadas em cerca de 400.000 m³ de granitos, 200.000 m³ de mármore e 120.000 m³ de outros materiais em cerca 1000 frentes de lavras. Os principais estados produtores do Brasil em ordem de importância são: Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Ceará e Rio Grande do Sul (DNPM, 2003). As exportações do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, totalizaram US\$ 217,5 milhões em 2001. O Espírito Santo consolidou sua posição de principal produtor e exportador, respondendo por cerca de 46% em peso e valor, do total das exportações brasileiras. (CHIOD, 2002), em 2016 segundo CHIOD (2016) o Espírito Santo alcançou a marca de 75% do volume total de materiais exportados.

2.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E TECNOLÓGICA

A caracterização mecânica e tecnológica de rochas ornamentais é realizada através de ensaios e análises que simulam as mais variadas solicitações que determinado material é submetido, tais como ação das intempéries (ventos e chuvas), atrito ou desgaste, impactos, ataques químicos por líquidos agressivos, produtos de limpeza, flexão, variação da temperatura, entre outros. O objetivo principal de tais ensaios e análises, é a obtenção de parâmetros que permitam qualificar a rocha para

determinado uso específico (FRASCÁ, 2003), como demonstrado na tabela 1, portanto, é essencial que se tenha o devido conhecimento das propriedades tecnológicas para obter uma garantia de segurança em que a rocha empregada mantenha suas características técnicas e estéticas ao longo do tempo de uso (MESQUITA, 2012).

Tabela 1: Ensaios sugeridos para a escolha e utilização de rochas em revestimento, conforme seu emprego.

FUNÇÃO DE REVESTIMENTO	PISOS		PAREDES		FACHADAS	TAMPOS
	Ext.	Int.	Ext.	Int.		
Tipo de rocha	X	X	X	X	X	X
Absorção d'água	X	X	X	X	X	X
Desgaste Abrasivo	X	X				
Flexão	X	X			X	X
Compressão			X	X	X	
Dilatação Térmica	X	X	X	X	X	
Acabamento Superficial	X	X			X	
Alterabilidade	X	X	X		X	X

Fonte: Modificado de Frascá (2002).

Os ensaios de caracterização mecânica e tecnológica para rochas ornamentais e de revestimento são realizados segundo procedimentos normatizados por entidades nacionais como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), internacionais como *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Comissão Europeia de Normalização (CEN), *British Standard Institution* (BSI), entre outras. Os resultados dos ensaios realizados devem ser comparados com os valores fixados nas especificações a fim de validar a qualidade da rocha. As normas técnicas visam à padronização dos ensaios tecnológicos que permitem a qualificação das rochas para diversos usos, possibilitando a caracterização dos mais diversos materiais de acordo com procedimentos pré-estabelecidos, propiciando a efetiva comparação entre produtos semelhantes e sua adequada comercialização. Os principais ensaios, suas entidades normalizadoras e especificações recomendadas são rerepresentados na Tabela 2.

Tabela 1: Especificações e métodos de ensaio para rochas destinadas a revestimentos conforme normas da ABNT e ASTM: ρ_a = densidade aparente (kg/m³); a_a = absorção d'água (%); η_a = porosidade aparente (%); σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); σ_{f3} = resistência à flexão em 3 pontos (MPa); σ_{f4} = resistência à flexão em 4 pontos (MPa); V = velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; n.e. = não especificado.

NORMA	TIPO DE ROCHA	USO	ρ_a^{**}	a_a^{**}	η_a^{**}	σ_c^{**}	σ_{f3}^{**}	σ_{f4}	V^{**}
NBR 15844	Rochas Silicáticas*	n.e.	>2.550	1,0	<0,4	>100	>10,0	>8,0	≥4000
ASTM C 615	Granitos	n.e.	≥2.560	n.e.	≤0,4	131	10,34	8,27	n.e.
ASTM C 503	Mármore Cacítico	Exterior	≥2.595	≤0,20	n.e.	≥52	≥7	≥7	n.e.
	Mármore Dolomítico		≥2.800						
ASTM C 568	Calcário	I - Baixa densidade	≥1.760	≤12	n.e.	≥12		n.e.	n.e.
		II - Média densidade	≥2.160	≤7,5	n.e.	≥28			
		III - Alta densidade	≥2.560	≤3	n.e.	≥55			
ASTM C 1527	Travertino	I - Exterior	≥2.305	≤2,5	n.e.	≥52		≥6,9	n.e.
		II - Interior			n.e.	≥34,5		≥4,8	
ASTM C 616	I – Arenito (≥60% sílica livre)		≥2.003	≤8	n.e.	≥27,6		n.e.	n.e.
	II – Arenito quartzítico (≥90% sílica livre)		≥2.400	≤3	n.e.	≥68,9			
	III – Quartzito (≥95% sílica livre)		≥2.560	≤1	n.e.	≥137,9	≥13,9		

Fonte: Modificado de Vidal *et al.*, (2014).

* Granitos, gnaisses, granodioritos, charnockitos, sienitos, dioritos, gabros, noritos, piroxenitos, anfíbolitos, basaltos, monzonitos e monzodioritos.

** Ensaios realizados no presente trabalho.

ÍNDICES FÍSICOS

Este ensaio determina a porosidade, absorção d'água e densidade da rocha analisada através da massa específica aparente seca e saturada. Uma alta densidade representa maior resistência mecânica, já uma baixa densidade pode indicar elevado grau de alteração da rocha, conseqüentemente diminuindo sua resistência (ABGE, 2013, FRASCÁ, 2003).

A elevada absorção de água, e porosidade podem propiciar o aparecimento de patologias na rocha como crescimento de minerais secundários nos poros, além do aparecimento de manchas pela ação dos fluídos (FRASCÁ, 2002), e, por conseguinte favorecendo a baixa durabilidade do material ao longo do tempo de uso.

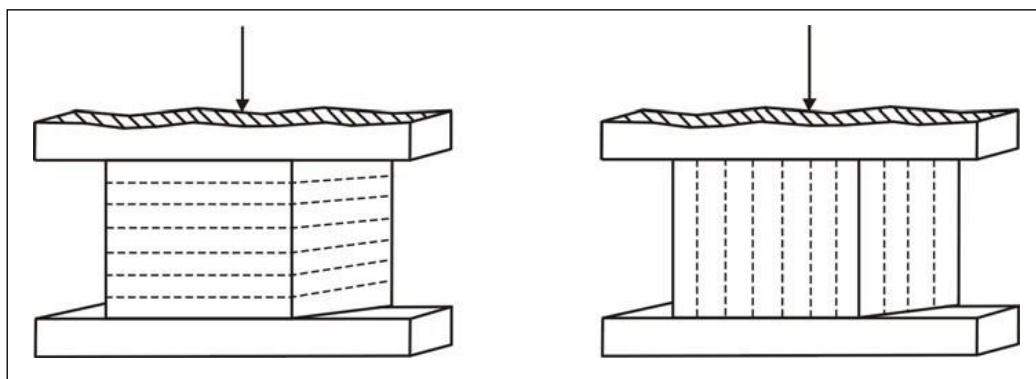
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência a compressão uniaxial determina a capacidade do material de receber esforços mecânicos compressivos em um ponto, avaliando a tensão máxima em megapascal (Mpa) responsável pela ruptura da rocha. Característica importante quando o material tem finalidades estruturais em construções, como colunas e pilares (FRASCÁ, 2003).

PARAGUASSÚ *et al.*, (2014) salienta que as dimensões dos grãos da rocha, a trama estrutural da mesma (fissuras, fraturas, estratificação ou bandamento, etc.), o grau de alteração, bem como os índices físicos já mencionados anteriormente, influenciam diretamente na capacidade de resposta a tensão aplicada.

Desse modo, quando a rocha apresenta estruturação não homogênea, fissuras não seladas, elevado valor de porosidade e absorção de água e estado de alteração, o valor da máxima resistência a compressão tende a diminuir, e o rompimento do corpo de prova nesse caso será nos planos de fraqueza influenciado por essas características. Portanto, a tensão de ruptura será maior quando a força de carregamento é aplicada perpendicularmente aos planos de maior fraqueza da rocha (FRASCÁ, 2002). Assim, rochas mais sãs, menos fraturadas e isotrópicas tendem a oferecer um melhor comportamento à resistência a compressão (MAIA, 2004).

Figura 5: Detalhe de corpos de prova com esforços aplicados perpendicularmente (à esquerda) e paralelamente (à direita) à estruturação da rocha.



Fonte: Extraído de Frascá (2003)

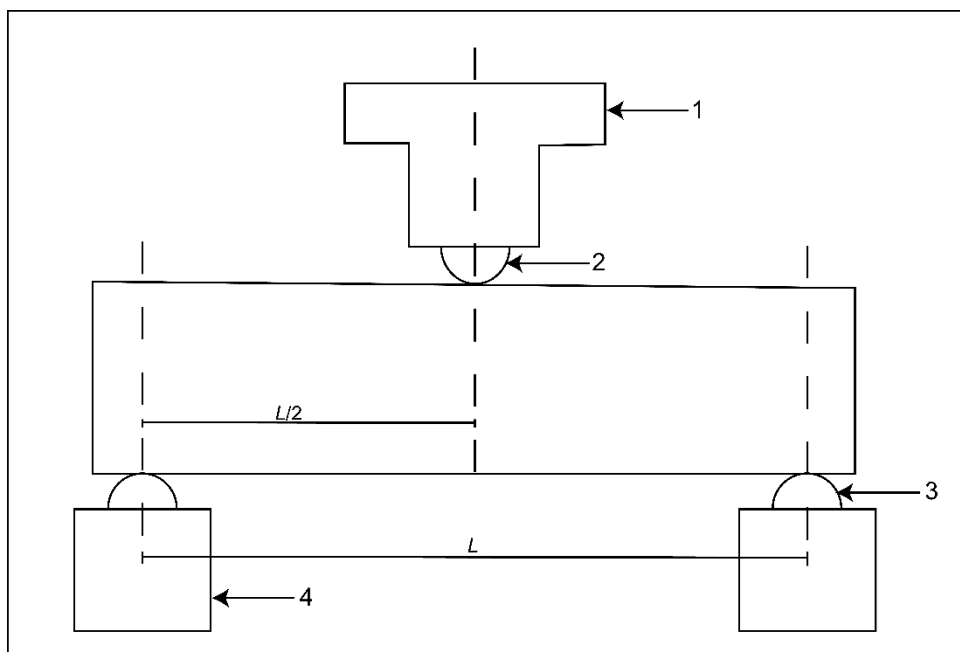
RESISTÊNCIA A FLEXÃO EM 3 PONTOS

Assim como a compressão uniaxial, a resistência a flexão por carregamento em três pontos determina a tensão máxima (Mpa) suportada pela rocha quando submetida a esforços flexores antes da sua ruptura (VIDAL *et al.*, 2013). Também avalia a elasticidade, tenacidade e resistência do material, fatores importantes para a determinação da finalidade do uso da rocha bem como a dimensão da espessura das chapas (FRASCÁ, 2002).

Os esforços de flexões solicitados pelas rochas empregadas em edificações, ocorrem principalmente quando as mesmas são utilizadas como pisos elevados, degraus de escada, tampos de balcões e pias, telhas (ardósias) ou em placas de rochas fixadas nas fachadas com ancoragem metálica – flexão provocada devido a força dos ventos – (VIDAL *et al.*, 2013) portanto, é de suma importância que as amostras de rochas ensaiadas destinadas a esses fins, tenham preferencialmente as mesmas características (espessura e acabamento) daquelas que serão empregadas na obra (VIDAL *et al.*, 2013).

O corpo de prova apoia-se em dois cutelos inferiores e nele é aplicada uma carga crescente através do cutelo central (Figura 6), apoiado na parte superior do corpo de prova, até que ocorra a ruptura da rocha (MAIA, 2004).

Figura 6: Corpo de prova e dispositivo de ensaio para determinação do módulo de ruptura da rocha por flexão em 3 pontos. 1 = suporte do rolete superior; 2 = rolete superior; 3 = rolete inferior; 4 = suporte do rolete inferior. L = distância entre os roletes.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15845:2010 - Anexo F

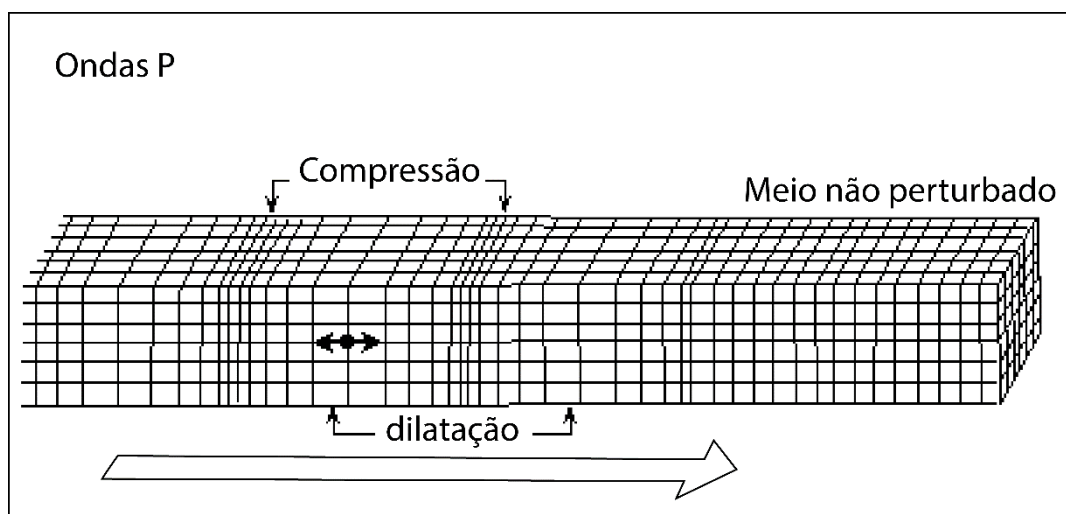
VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

Este ensaio permite avaliar de forma indireta o grau de coesão da rocha, indicando a possível presença de descontinuidades internas como fissuras, fraturas, vesículas, grau de alteração, entre outros (FRASCÁ, 2003,). A determinação da velocidade (em m/s) é medida com base no tempo de percurso de uma onda sonora – ondas longitudinais ou de compressão denominadas como ondas primárias ou ondas P (Figura 7) – entre um emissor e um receptor a uma distância conhecida (dimensões do corpo de prova) com a utilização do equipamento *Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Teste (PUNDIT)*, equipado com transdutores de frequência de pulso de 54 KHz.

A propagação das ondas elásticas através das rochas é influenciada tanto pelas suas propriedades intrínsecas tais como fissuras, fraturas, textura, etc., como pelas propriedades extrínsecas (presença de água). A velocidade de propagação das ondas P em amostras secas é menor do que em amostras saturadas, isso se dá devido ao módulo de incompressibilidade é maior no meio saturado (BESSA, 2004) do que no meio seco ou insaturado.

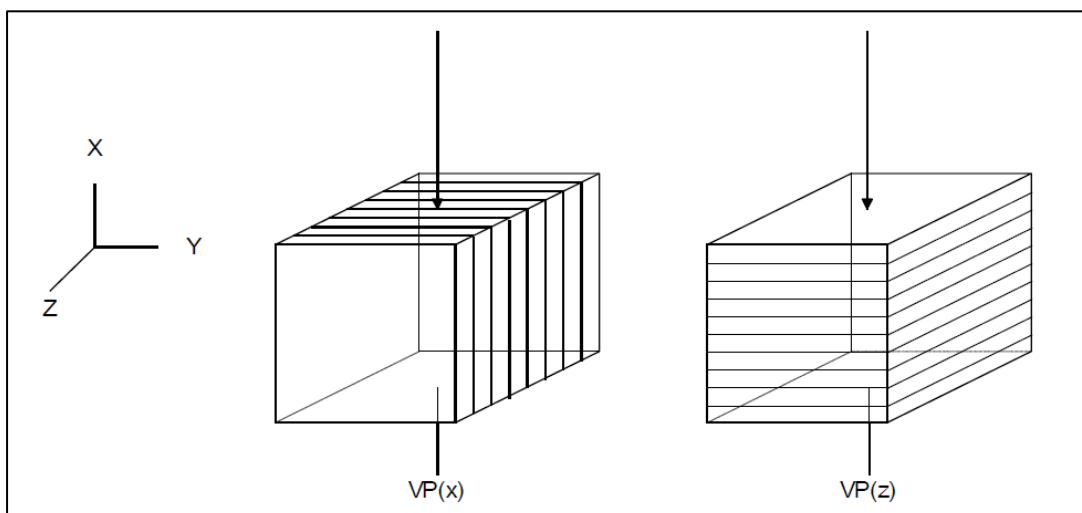
Geralmente valores altos de velocidade representam maior grau de coesão entre os minerais da rocha, a inexistência ou não influencia de fraturas ou fissuras e também um menor grau de alteração. Além disso, a presença de foliação ou acamadamento também influenciam no valor da velocidade das ondas, quando o ensaio é realizado perpendicularmente à foliação ou acamadamento da rocha, o tempo de percurso entre o emissor e o receptor tende a ser maior, conseqüentemente diminuindo a velocidade de propagação, pois essas estruturas dificultam a passagem das ondas pelo meio (Figura 8).

Figura 7: Representação da passagem das ondas longitudinais ou de compressão (Ondas P) por um meio.



Fonte: Extraída de Kearey *et al.*, (2009).

Figura 8: Ilustração das medições de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na direção paralela (à esquerda) e perpendicular (a direita) da foliação da rocha.



Fonte: Extraída de Frascá (2003).

3 METODOLOGIA

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica consistiu em reunir e analisar, durante toda a construção do trabalho, todos os dados possíveis da área de estudo e do tema abordado, como teses, dissertações, artigos científicos, livros, mapas geológicos e estruturais, normas técnicas, que ajudaram a compor o embasamento teórico sobre a geologia local e regional, bem como os métodos e análises que foram realizados para alcançar os objetivos propostos.

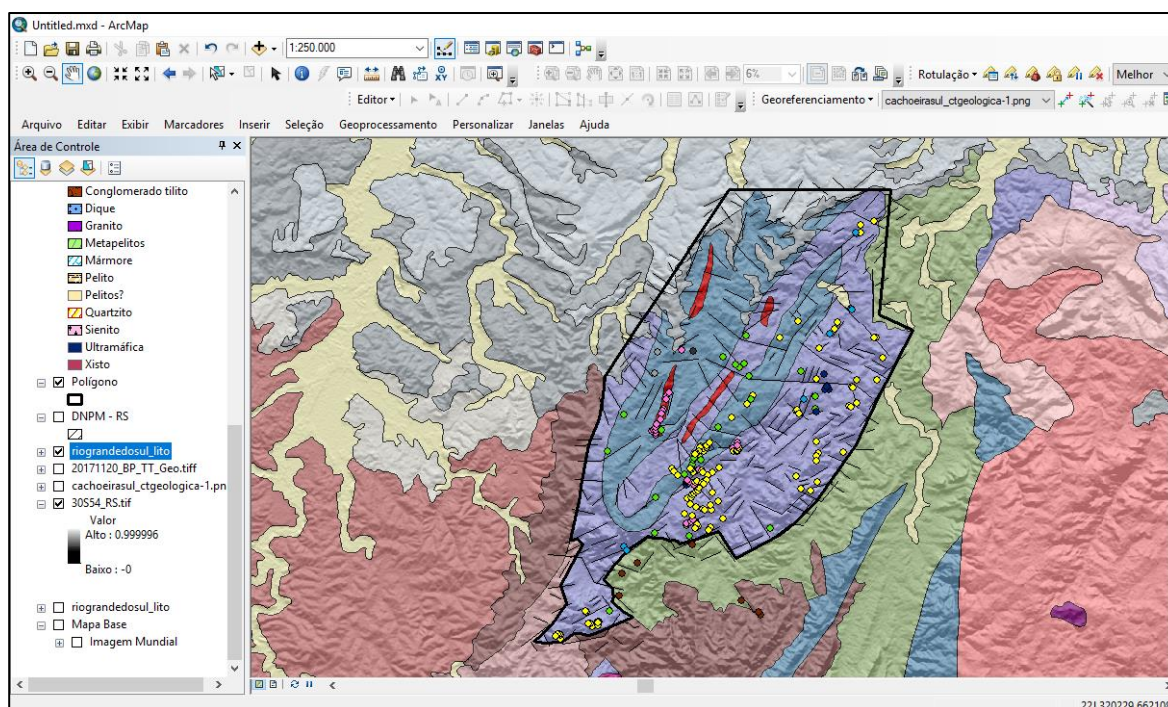
3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

Esta etapa teve como objetivo a interpretação e caracterização de dados de sensoriamento remoto com intuito de verificar a topografia, identificar as principais estruturas geológicas e geomorfológicas como lineamentos negativos e positivos, a fim de avaliar a intensidade e densidade do fraturamento, identificação de possíveis zonas de falhas e/ou zonas de cisalhamento, bem como a delimitação dos corpos de quartzitos e potenciais áreas de afloramentos, informações que foram substanciais para o planejamento da etapa de campo.

Para tal, foram utilizadas imagens de satélite do programa *GoogleEarthPRO*® e mapas base do programa ArcGIS© juntamente com modelo digital de terreno (MDT) com sombreamento de montanha (*Hill Shade Relief*) a partir de dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução de 30 metros. Estes dados, assim como mapas geológicos da região do estudo e informações coletadas nas etapas de campo, foram organizados em um banco de dados e analisados com a utilização do *software* ArcMap© do programa ArcGIS© 10.1 (ESRI) (Figura 9).

Os lineamentos traçados, foram convertidos em tabelas com o auxílio da ferramenta *AzimuthFinder*© que transforma as *shapes* de lineamentos em tabelas azimutais. Posteriormente tratados e analisados estatisticamente a partir de diagramas de intensidade e comprimento através do programa *Estereonet 10*©.

Figura 9: Banco de dados organizados em ambiente SIG analisados com a utilização do software ArcMap© do programa ArcGIS© 10.1.



Fonte: Próprio autor.

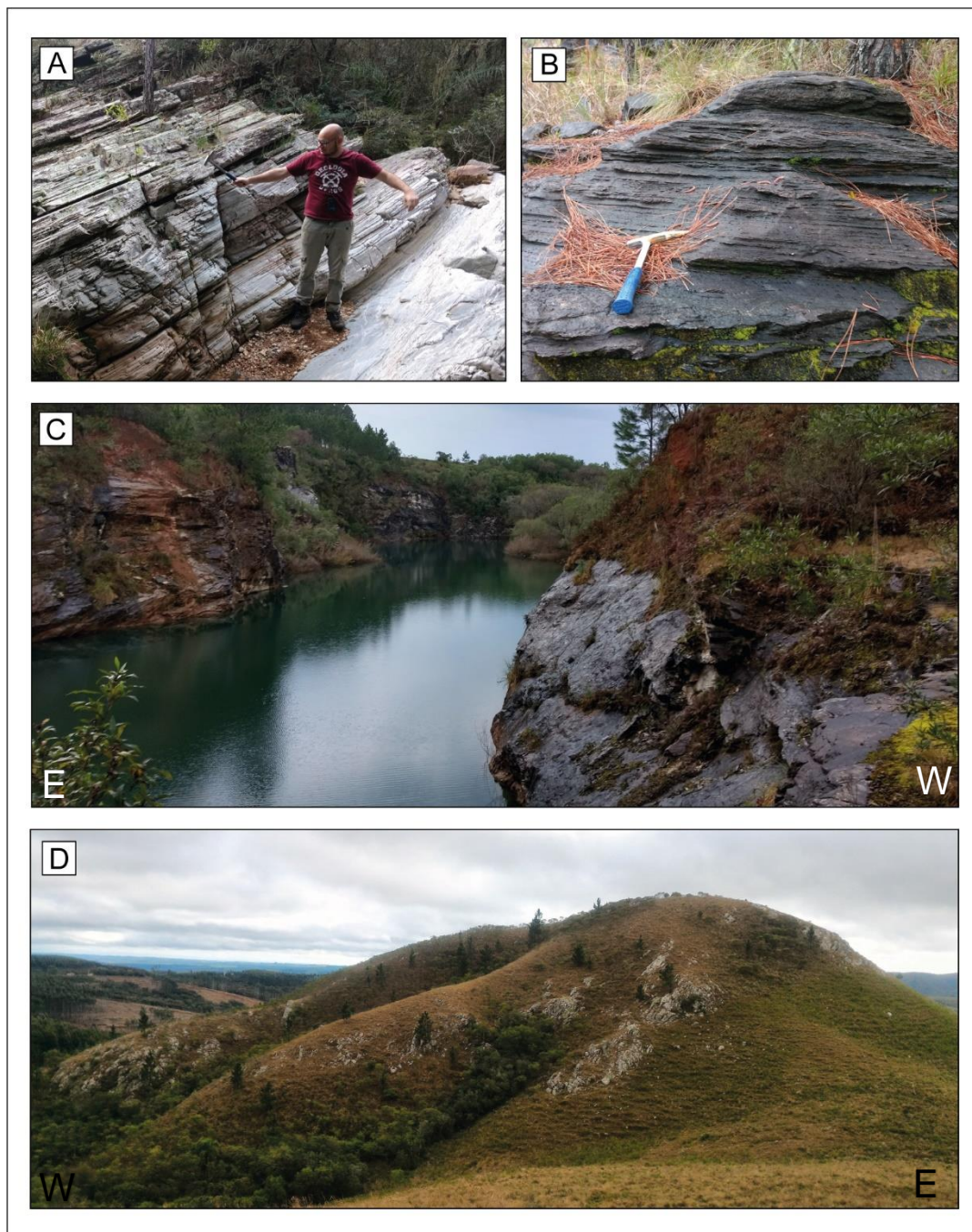
3.3 TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo foi dividido em três campanhas, sendo (i) reconhecimento geológico, (ii) amostragem de blocos experimentais (iii) detalhamento geológico/estrutural e amostragem para os ensaios tecnológicos e para petrografia.

A primeira campanha (Figura 10) de campo foi realizada entre os meses de agosto e outubro de 2017, junto a Mineração Serra Geral Ltda (MSG) com o intuito de reconhecimento geológico e avaliação prévia do potencial da área para rocha ornamental, verificando principalmente a mineralogia (quando possível), coloração, alteração e fraturamento. propriedades fundamentais, pois, são as condicionantes para o aproveitamento de uma possível jazida.

Foram identificados 17 pontos apresentando possível potencial para exploração de blocos para rocha ornamental e de revestimento. Com isso, a MSG, realizou o requerimento de pesquisa das áreas de interesse junto à Agência Nacional de Mineração (antigo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM) para que os estudos pudessem continuar de forma legal.

Figura 10: Campanha de campo I: A = Afloramento de quartzito foliado; B = Afloramento de mármore em antiga cava de calcário; C = Antiga cava de calcário; D = Crista de quartzito.



Fonte: Próprio autor.

A segunda etapa foi realizada entre janeiro e fevereiro de 2018, e teve como finalidade a seleção dos melhores afloramentos para a realização de amostragem de blocos para a confecção de chapas de diferentes tamanhos, a fim de obter uma avaliação estética das rochas após o beneficiamento. Essa etapa é de grande importância, pois baliza a viabilização de uma possível jazida, onde todos os elementos são avaliados, como autorização de pesquisa junto aos proprietários das

terras, vias de acesso para o maquinário, distância das fontes de água e aspectos ambientais que poderiam causar a inviabilização de um empreendimento no local.

As amostragens foram realizadas em dois locais, sendo um para a avaliação do mármore (52°53'19"W – 30°23'59"S) (Figura 11). e outro para a avaliação do quartzito (52°54'33"W – 30°26'50"S) (Figura 12). A amostragem de blocos no mármore foi realizada em uma antiga cava de calcário, onde foi possível extrair três blocos para a confecção de chapas. No quartzito os blocos retirados foram de menor tamanho pois, superficialmente a rocha se encontra com grau de faturamento que impediram a extração de blocos com tamanhos representativos.

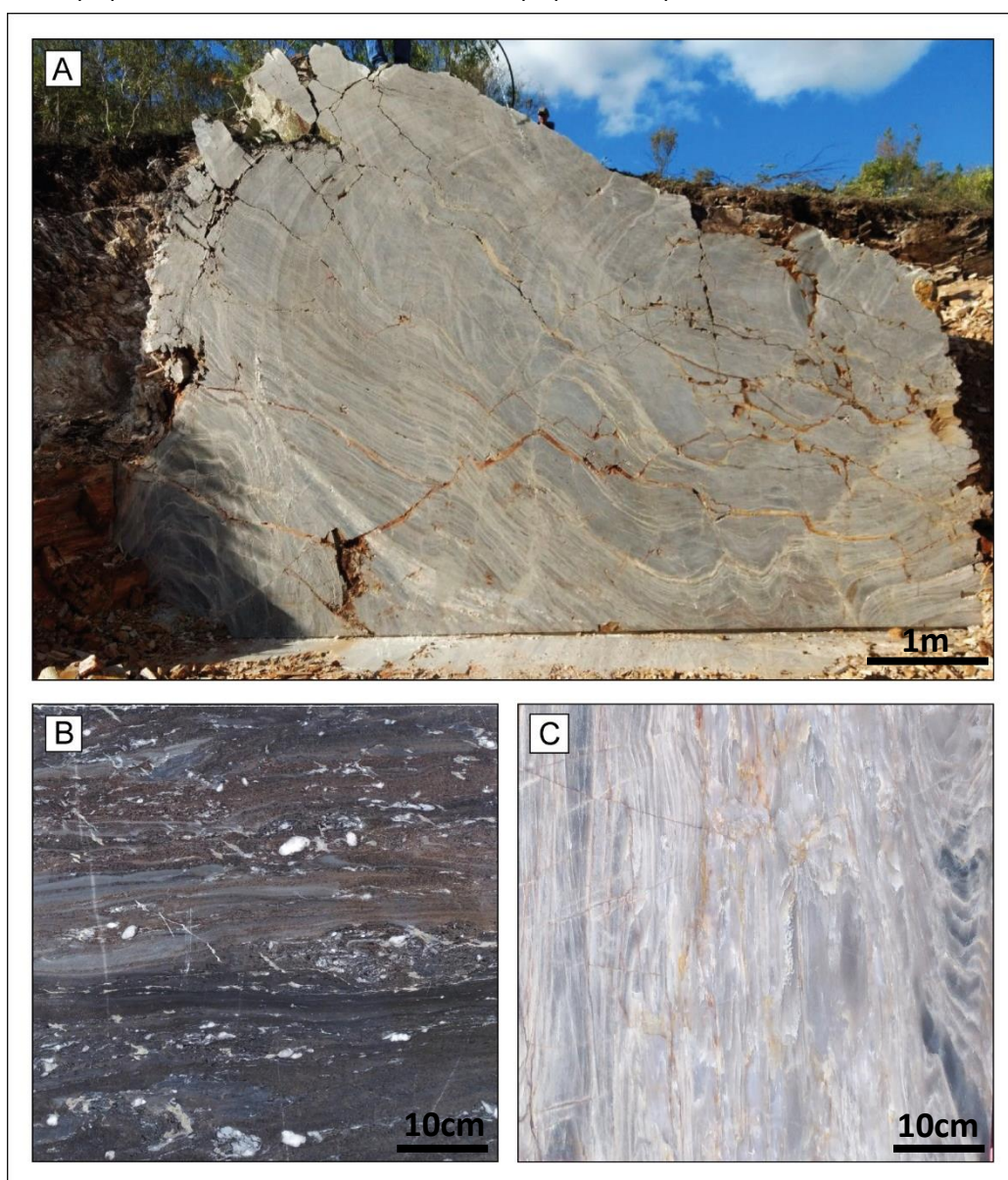
Figura 11: Campanha de campo II. A = Amostragem de blocos do mármore e antiga cava de calcário; B = Detalhe do bloco.



Fonte: Próprio autor.

O método de extração dos blocos se deu a partir da utilização de martelos de perfuração comprimidos a ar, e máquina de 'fio diamantado', que consiste em um fio de aço envolto por pequenas esferas de diamante movimentado por polias. Essa técnica possibilita uma menor agressão na rocha comparando com os métodos com a utilização de explosivos, além de se obter um corte preciso e com melhor acabamento, aumentando também o percentual de aproveitamento da rocha.

Figura 12: A = Tentativa de amostragem no quartzito. O fraturamento principal se dá nos planos da foliação devido ao alívio de pressão e alteração das camadas ricas em muscovita. B = Detalhe da chapa polida do mármore; C = Detalhe da chapa polida do quartzito.



Fonte: Próprio autor.

A terceira campanha se deu entre os dias 9 a 11 de julho de 2018, e teve como objetivo o detalhamento geológico e estrutural da área de estudo, além coleta de amostras para análise petrográfica e para os ensaios tecnológicos.

Os pontos de campo foram nomeados sequencialmente utilizando a sigla 'JK' antes da numeração, portanto, ficaram denominados como JK-01, JK,02 e assim sucessivamente. Para o devido georreferenciamento e coleta das coordenadas de cada ponto foi utilizado o GPS *Garmim - Etrex Legend-H*.

A amostragem para os ensaios tecnológicos foi feita de acordo com as especificações das normas técnicas dos referentes ensaios realizados neste trabalho, para isso, foram coletadas cerca de 30 kg de amostras de cada litologia em dois pontos principais JK-02 (quartzito) e JK-09 (mármore), que se referem aos pontos onde a etapa de amostragem de blocos foi realizada. Para a petrografia, as amostras também foram coletadas nos mesmos pontos.

Os dados estruturais de campo como foliações, lineações, atitude de zonas de fraturas e planos axiais de dobras, foram coletados com o auxílio de bússola do tipo *Brúnton* utilizando o método da 'mão esquerda' posteriormente foram tratados e analisados a partir de estereogramas com o auxílio do programa *Estereonet 10©* produtos essenciais que foram utilizados para a interpretação e entendimento da geologia estrutural da área.

3.4 ANÁLISE PETROGRÁFICA

A análise petrográfica tem como objetivo avaliar, por meio da técnica de microscopia óptica, as características petrográficas e mineralógicas das rochas estudadas, como textura e estrutura (forma e arranjo dos minerais), microfissuração (tanto intercrystalina como intracrystalina, bem como a avaliação da presença de preenchimento ou não das fissuras), deformação, grau de alteração, etc., que podem influenciar no comportamento do material tanto na fase de beneficiamento quanto na sua utilização com o decorrer do tempo (SALES, 2003).

Foram selecionadas 2 amostras referentes aos locais de amostragem de blocos para confecção de lâminas delgadas, que foram encaminhadas para o

Laboratório de Preparação de Amostras do Instituto de Geociências (IGEO) – UFRGS, e descritas com o auxílio do microscópio petrográfico binocular de luz transmitida MEIJI – ML9720 nas dependências do Departamento de Mineralogia e Petrografia (DEMIPE) – UFRGS

3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas – LPM-FLE da Escola de Engenharia de Minas da UFRGS e nas dependências do IGEO da mesma universidade, e seguiram procedimentos de caracterização e padronização dos métodos de ensaio e especificações das normas ABNT e ASTM.

A orientação das amostras para a realização dos ensaios (perpendicularmente e/ou paralelamente à foliação da rocha), bem como a espessura dos corpos de prova para o ensaio de flexão em três pontos foram adequadas de acordo com a confecção das chapas já beneficiadas. Para o quartzito os ensaios foram realizados na direção perpendicular a foliação, para o mármore, na direção paralela à foliação.

3.5.1 ÍNDICES FÍSICOS

O ensaio de índices físicos foi executado conforme a norma ABNT NBR 12766:1992 (Rochas para revestimento – Determinação para massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água aparente). Foram ensaiados dez corpos de prova de cada litologia (mármore e quartzito) com diâmetro em torno de 7 cm.

Aparelhagem:

- Balança BEL 2kg com dispositivo para pesagem hidrostática, com precisão de 0,01 g;
- Estufa NOVUS – N1040.

Procedimentos:

- Lavar os corpos de prova em água corrente;
- Manter os corpos de prova em estufa à temperatura de (110 ± 5) °C por 24 horas;
- Retirar os corpos de prova e deixá-los esfriar;
- Pesar os corpos de prova ao ar individualmente em balança; anotar a massa (massa seca);
- Colocar os corpos de prova em uma bandeja e adicionar água, até alcançar 1/3 da altura dos corpos de prova, após 4 horas até 2/3. Após mais 4 horas adicionar água até a submersão completa dos corpos, e deixá-los por mais 24 horas em submersão;
- Retirar e enxaguar os corpos de prova com um pano levemente úmido e pesar ao ar. Anotar a massa (massa saturada).
- Pesar os corpos de prova submersos, por meio do dispositivo da balança para pesagem hidrostática. Anotar a massa (massa submersa);

Após anotados os valores, os resultados foram calculados com as seguintes expressões:

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 1000 \quad \eta_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100$$

$$\alpha_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100$$

Onde:

ρ_a – Densidade aparente do corpo de prova (Kg/cm³);

η_a – Porosidade aparente (%);

α_a – Absorção de água (%)

M_{sec} – Massa do corpo de prova seco(g);

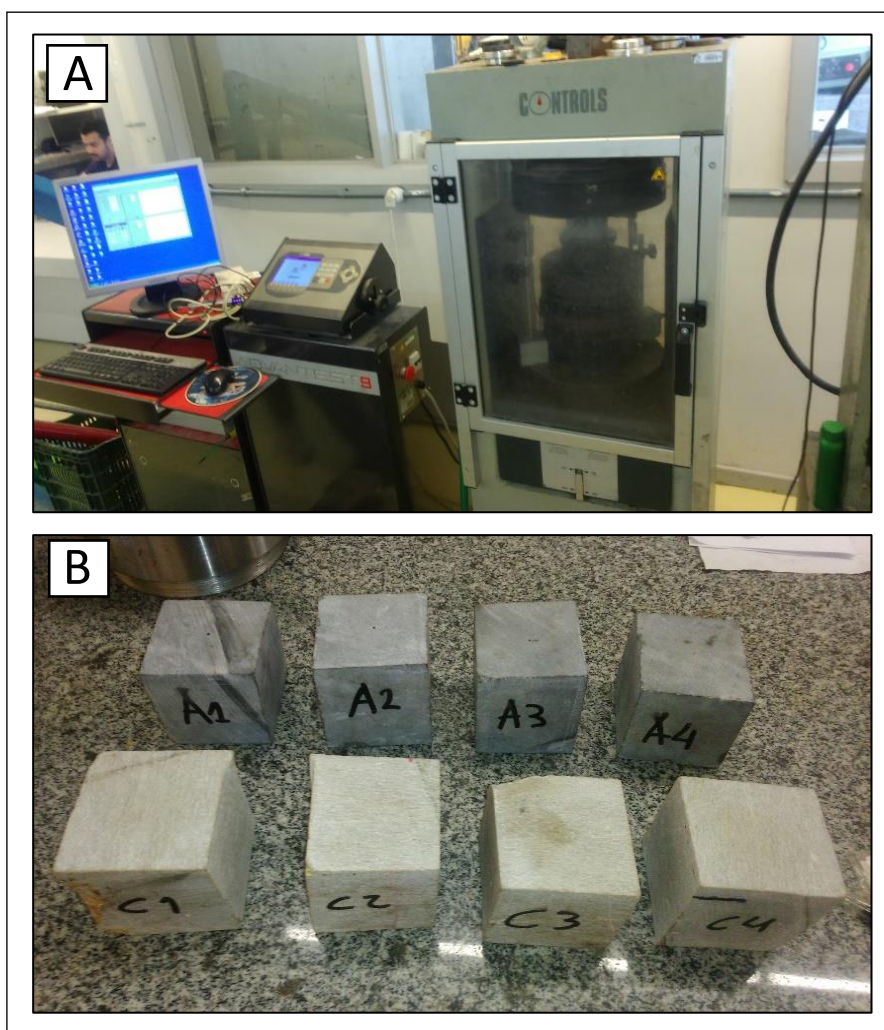
M_{sat} – Massa do corpo de prova saturado(g);

M_{sub} – Massa do corpo de prova submerso em água (g);

3.5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Os métodos e parâmetros utilizados para o ensaio de resistência a compressão uniaxial foram seguidos conforme a norma ABNT NBR 15845:2010 (Rochas para revestimento – Métodos de ensaio – Resistência à compressão uniaxial - Anexo E). Foram avaliados quatro corpos de prova de formato cúbico com dimensões entre (70 ± 5) mm de cada litologia (Figura 13B). Para o quartzito, o ensaio foi realizado na direção perpendicular à foliação, e no mármore na direção paralela a foliação.

Figura 13: A = Prensa Hidráulica CONTROLS ADVATEST 9 utilizada para a realização do ensaio. B = Corpos de prova ensaiados (amostras escuras referentes ao mármore, e claras ao quartzito).



Fonte: Próprio autor.

Aparelhagem:

- Prensa hidráulica CONTROLS ADVANTEST 9 (Figura 13B)
- Paquímetro digital STARFER 150mm com resolução de 0,05 mm, utilizado para medir os corpos de prova;
- Estufa NOVUS – N1040 para a secagem das amostras.

Procedimentos:

- Colocar o corpo de prova no centro do prato da prensa;
- Aplicar força em uma taxa menor que 0,7 Mpa/s ou, 1,3 mm/min até a ruptura da rocha;
- Anotar a força de ruptura (KN).

Para calcular a tensão de ruptura, a seguinte equação foi utilizada:

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Onde:

σ_c – Tensão de ruptura na compressão (MPa);

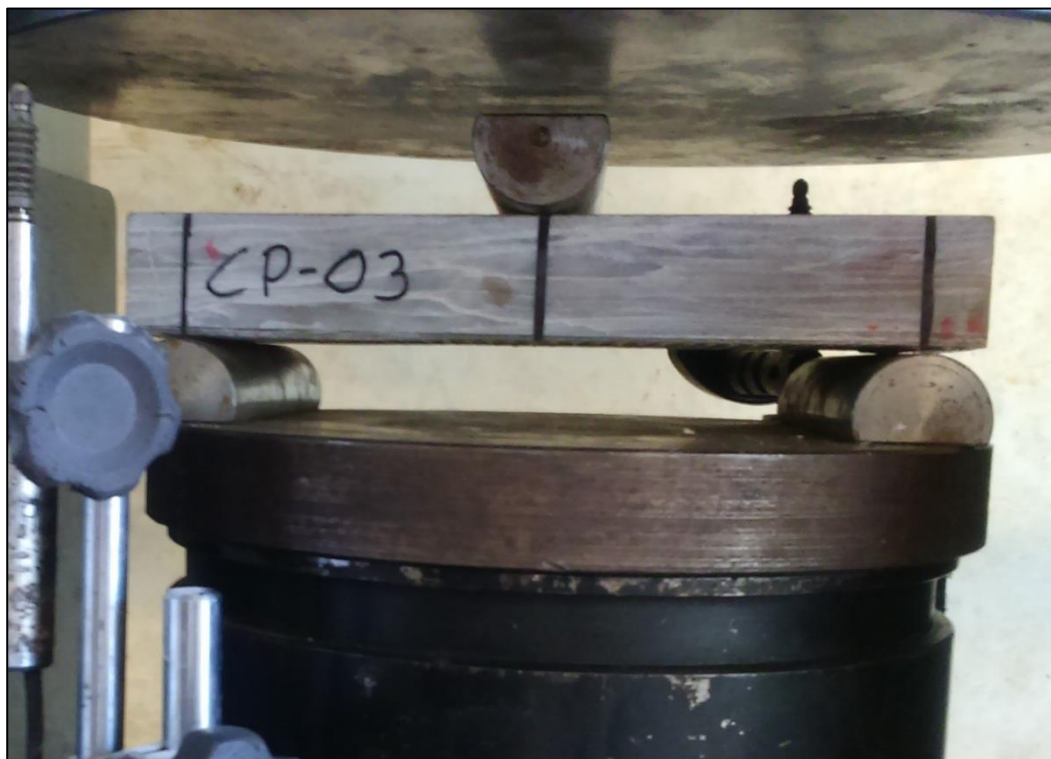
P – Força máxima de ruptura (KN);

A – Área da face do corpo de prova (m²).

3.5.3 RESISTÊNCIA À RESISTÊNCIA À FLEXÃO – FLEXÃO POR CARREGAMENTO EM TRÊS PONTOS

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15845:2010 (Rochas para revestimento – Métodos de ensaio – Modulo de ruptura (flexão por carregamento em três pontos - Anexo F). Para o quartzito, quatro corpos de prova com dimensões aproximadas de 200x100x28 mm (comprimento, largura e espessura) para o quartzito, os corpos de prova foram submetidos ao carregamento perpendicularmente à foliação (Figura 14), para o mármore, os corpos de prova foram ensaiados paralelamente à foliação com dimensões aproximadas de 200x100x22 mm.

Figura 14: Corpo de prova de quartzito submetido ao carregamento perpendicularmente à foliação.



Fonte: Próprio autor.

Aparelhagem:

- Prensa hidráulica CONTROLS ADVANTEST 9,
- Paquímetro digital STARFER 150mm com resolução de 0,05 mm, utilizado para medir os corpos de prova;
- Estufa NOVUS – N1040 para a secagem das amostras.
- Três cutelos, sendo dois inferiores para assentar a rocha e um superior para transmitir esforço da prensa no centro do corpo de prova;

Procedimentos:

- Traçar uma linha transversal no centro do corpo de prova, e outras duas paralelas e equidistantes da linha média;
- Assentar o corpo de prova pela sua largura sobre os cutelos inferiores, nas linhas paralelas à linha central demarcadas;
- Assentar o cutelo superior sobre a linha central; aplicando uma pequena força para estabilizar o sistema corpo de prova-cutelos
- Aplicar força de forma lenta e progressiva com uma taxa de carregamento de 4450 N/min, até a ruptura da rocha. Anotar o resultado.

Após anotados os valores, os resultados foram calculados com a seguinte expressão:

$$\sigma_f = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2}$$

Onde:

σ_f – Valor numérico do módulo de ruptura (resistência à flexão por carregamento em três pontos) em megapascals (MPa);

P – Valor numérico da força de ruptura (KN);

L – Valor da distância entre os cutelos inferiores (m);

b – Valor da largura do corpo de prova (m);

d – Espessura do corpo de prova (m);

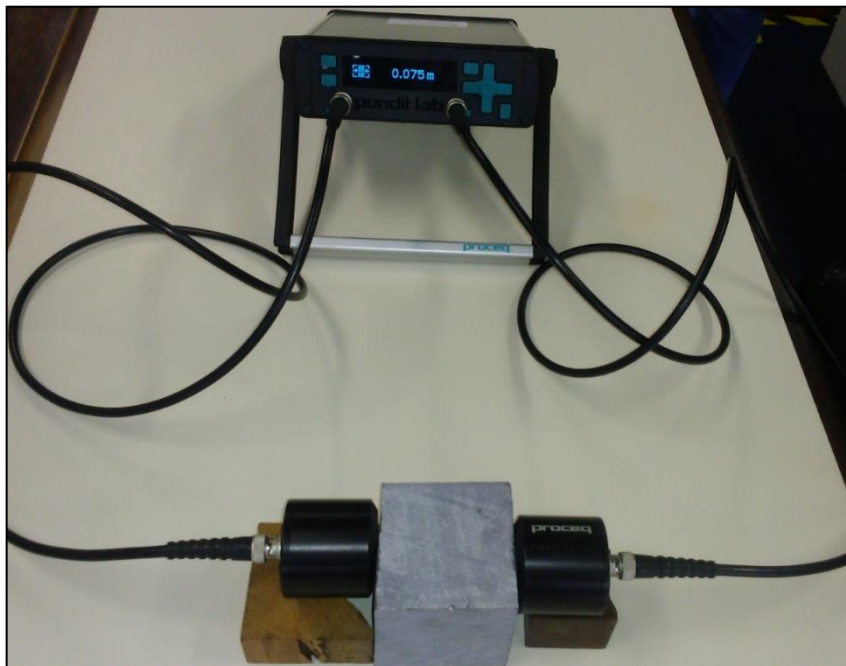
3.5.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D 2845, onde a mesma prevê a utilização de um equipamento denominado *Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Teste (PUNDIT)*, com transdutores com frequência de pulso de 54 KHz com vibrações fixadas em 60 repetições/segundo.

Para a realização do ensaio (Figura15), foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de compressão uniaxial, antes de serem ensaiados, e as medições foram realizadas tanto na direção perpendicular quanto na direção paralela à foliação.

A determinação da velocidade (em m/s) é medida com base no tempo de percurso de uma onda sonora entre um emissor e um receptor a uma distância conhecida (dimensões do corpo de prova).

Figura 15: Ensaio de velocidade ultrassônica realizado nos corpos de prova antes do ensaio de compressão uniaxial.



Fonte: Próprio autor.

Após a realização dos ensaios citados acima, calcula-se a média aritmética (\bar{x}) e desvio padrão (s) com os valores obtidos de cada corpo de prova para cada ensaio, seguindo as seguintes equações.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \qquad S = \sqrt{\frac{\sum x - \bar{x}}{n-1}}$$

Onde:

x – Valores observados;

n – Quantidade de corpos de prova ensaiados.

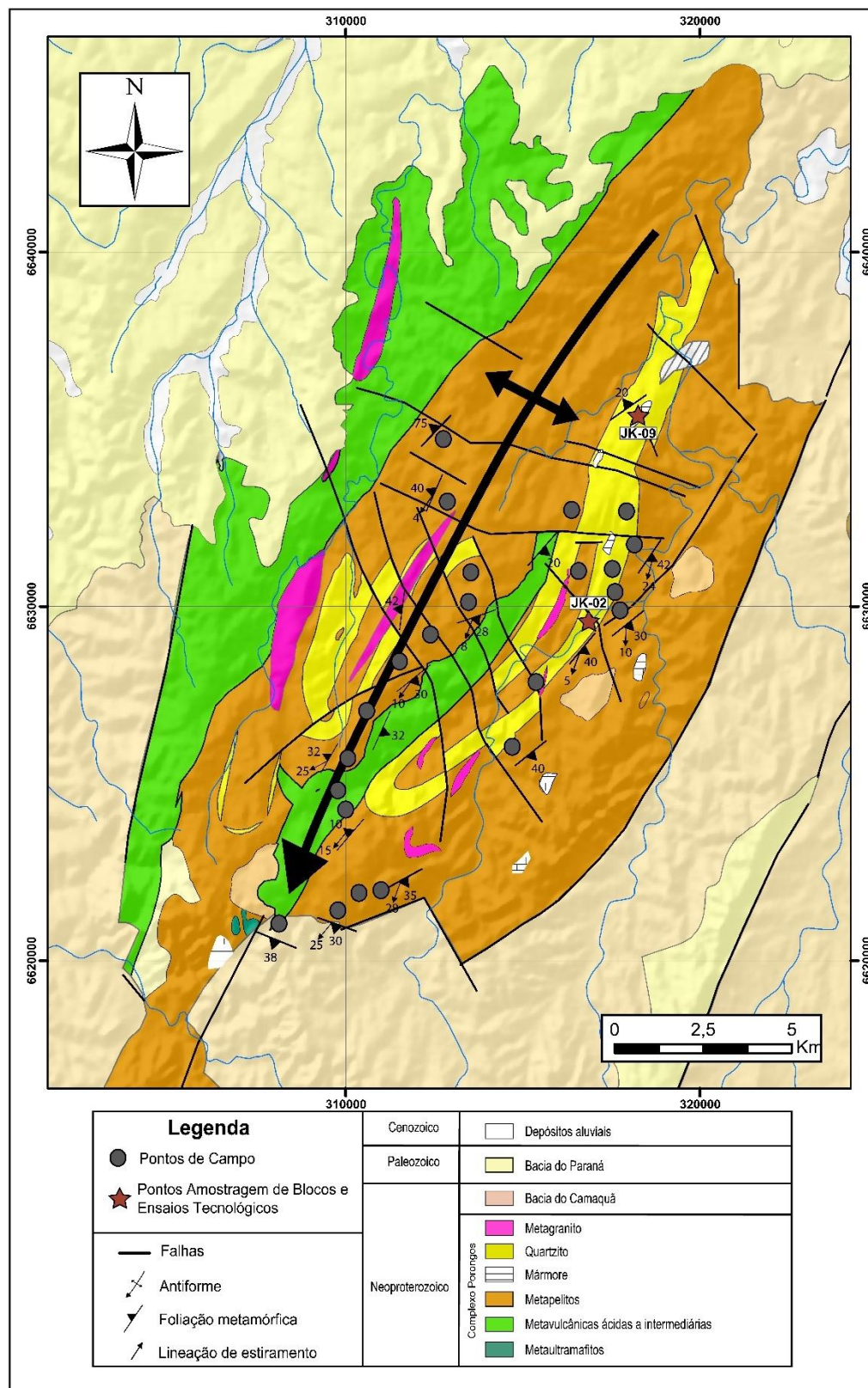
4 RESULTADOS

4.1 GEOLOGIA DA ANTIFORME CAPANÉ

A Antiforme Capané (Figura 16) é uma estrutura antiformal composta predominantemente por rochas metassedimentares como metapelitos, quartzitos e lentes de mármore, com ocorrência subordinada de rochas metavulcânicas ácidas a

básicas, e pequenas lentes de rochas metaltramáficas e granitoides milonitizados (JOST e BITENCOURT, 1980; MARQUES *et al.*, 1998).

Figura 16: Mapa geológico da Antiforme Capané e pontos de campo e de amostragem em destaque.



Fonte: Modificado de Zvirtes (2012)

4.1.1 METASSEDIMENTOS

As rochas metassedimentares ocorrem como corpos alongados segundo a direção NE-SW, destacando a presença de cristas de quartzitos com dezenas a centenas de metros de comprimento e com espessuras que variam de dezenas até cerca de 350 metros (Figura 17). Estas cristas estão alongadas segundo a direção da xistosidade (NE-SW) e afloram principalmente no flanco leste da antiforme como lajeados (Figura 18B) e cortes de estrada. As cristas de quartzitos apresentam um intenso fraturamento de direção NW-SE aproximadamente ortogonal a foliação metamórfica, que ocasionaram a descontinuidade das mesmas.

Figura 17: Cristas de quartzito afetadas por fraturamentos, ocasionando a descontinuidade das mesmas



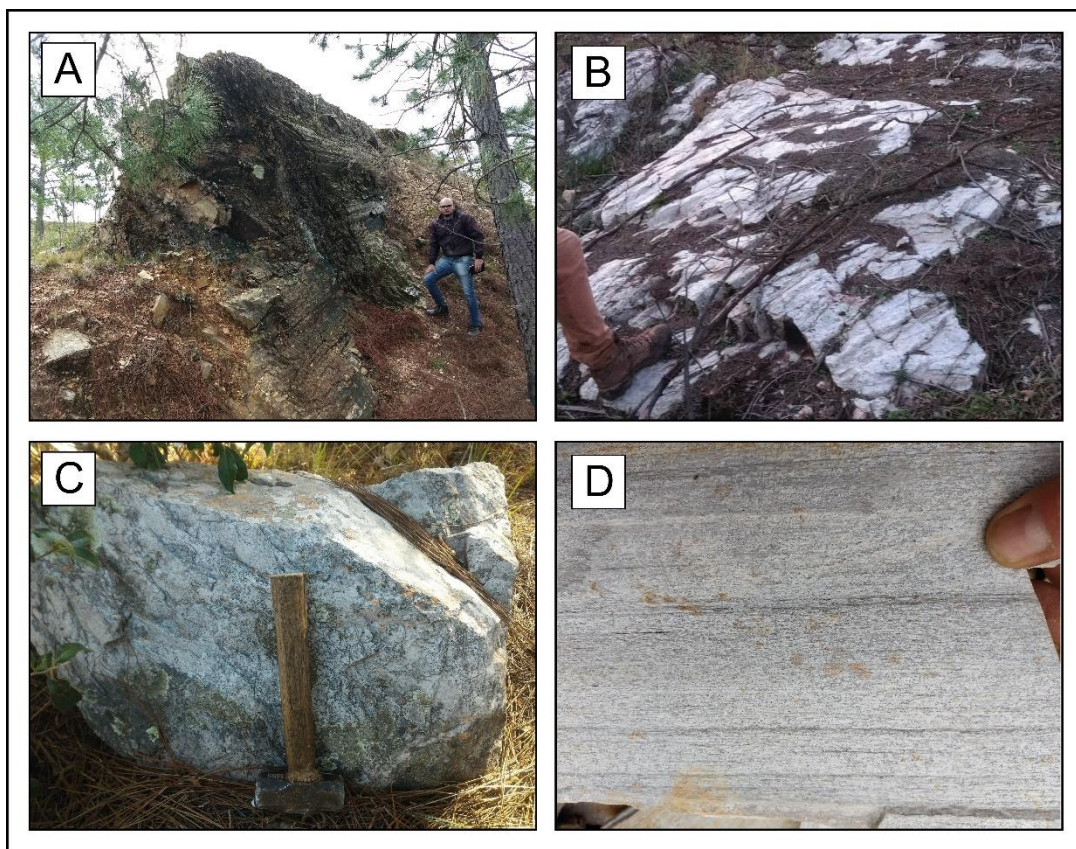
Fonte: Próprio autor.

Os quartzitos têm cor branca (Figura 18C) a bege, apresentam uma foliação milonítica marcada pela orientação e estiramento dos cristais de muscovita e quartzo, e textura granoblástica inequigranular ocorrendo finos níveis (<0.5 mm) ricos em muscovita caracterizando uma textura lepidoblástica média (0,1 a 0,5 mm).

Na maioria dos afloramentos observa-se uma pronunciada lineação de estiramento (L_x) (Figura 18D) caracterizada por porfiroclastos estirados de quartzo e por muscovita “fish”. A mineralogia é composta por quartzo (95 a 98%) e muscovita (2 a 5%), além de acessórios como zircão e turmalina. A foliação milonítica combinada

com a xistosidade dos níveis mais ricos em muscovita tem orientação média segundo a direção N30°E com mergulhos em média de 40° para WNW e WSW.

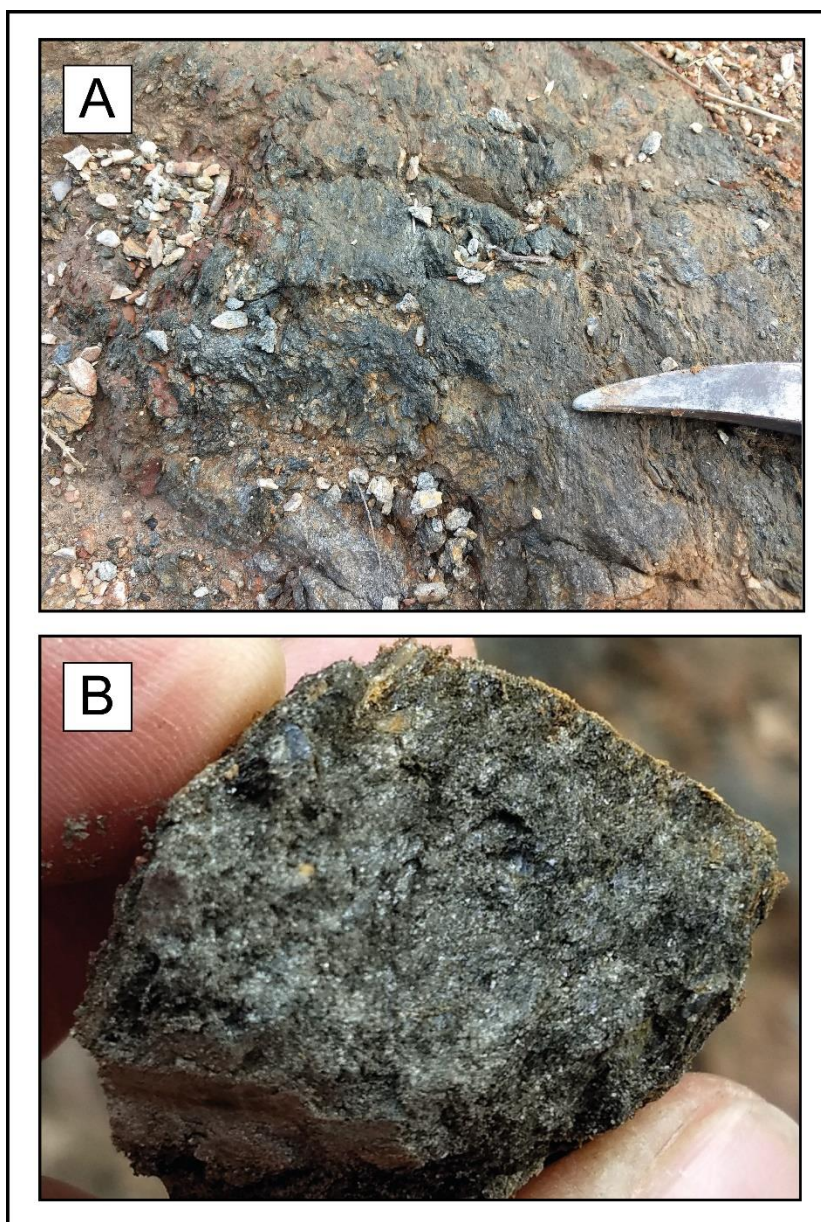
Figura 18: A = Afloramento de quartzito em forma de crista; B = Afloramento de quartzito branco em forma de lajeado; C = Bloco de quartzito de coloração branca; D = Detalhe da lineação de estiramento (L_x)



Fonte: Próprio autor.

Os metapelitos ocorrem em áreas topograficamente mais baixas e estão representados por muscovita xistos, biotita-muscovita xistos (Figura 19A) e quartzo-muscovita xistos de coloração acizentada escura e esverdeada, que quando alterados adquirem colorações amareladas a avermelhadas. Os afloramentos são escassos e ocorrem em cortes de estrada e em lajeados de drenagens. Por vezes, observa-se a intercalação dos mica xistos com camadas métricas de quartzito. Possuem xistosidade bem desenvolvida definida pela orientação de muscovita e biotita, com ocorrência restrita de finos níveis (1 e 3 mm) ricos em quartzo. A textura principal é textura lepidoblástica média a grossa (1 a 6 mm) marcada por agregados orientados de muscovita ou biotita. De modo geral são compostos por muscovita e/ou biotita (70 a 80%), quartzo (20 a 30%) (Figura 19B).

Figura 19: A = Afloramento de biotita-muscovita xisto em corte de estrada; B = Detalhe da textura e composição do biotita-muscovita xisto



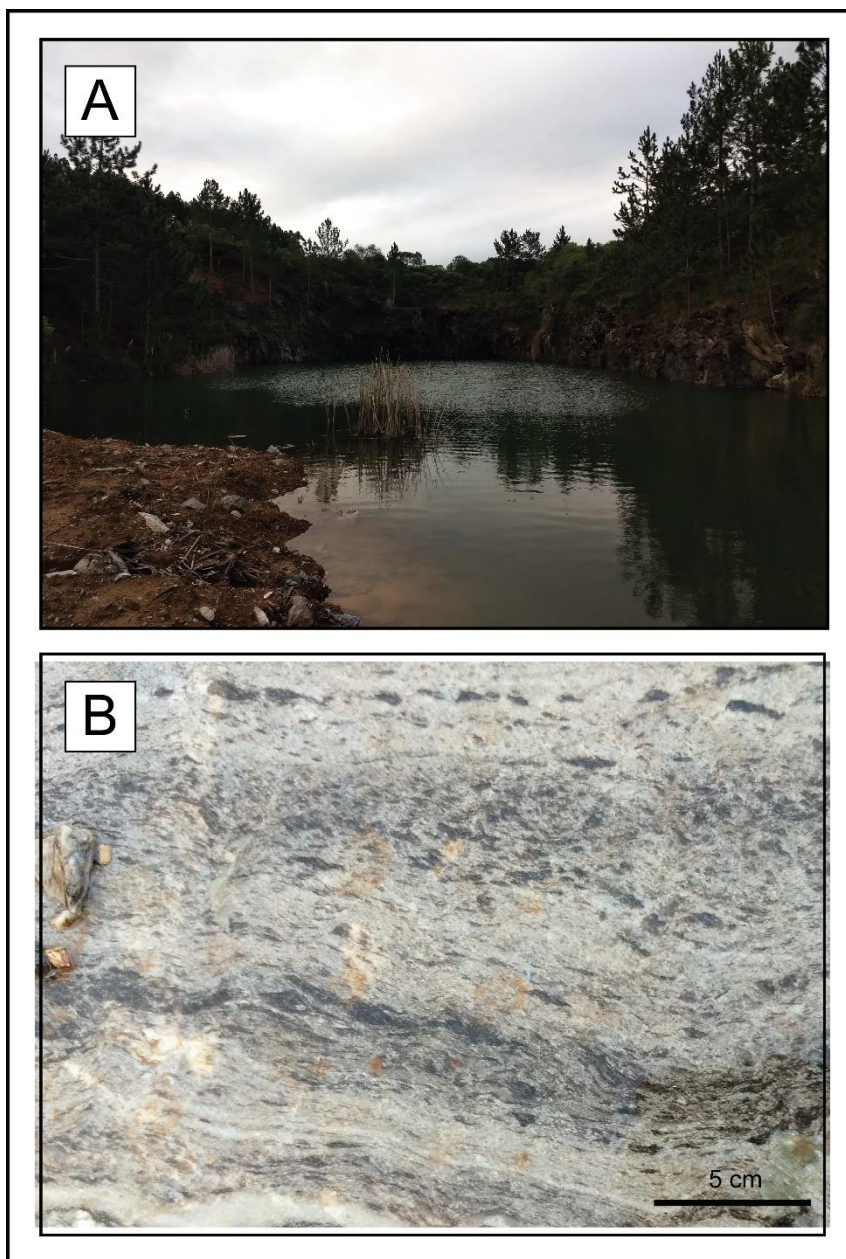
Fonte: Próprio autor.

Os mármore afloram na forma de lentes de até 150 metros de comprimento entre as camadas de metapelitos e quartzitos com ótimas exposições em cavas antigas (Figura 20A) onde os mesmos foram explorados para beneficiamento de calcário dolomítico. Os afloramentos principais são caracterizados por lajeados e antigas cavas de exploração.

Possuem cor cinza clara e textura granoblástica média, com um bandamento composicional centimétrico (1 a 3 cm) regular e contínuo marcado pela alternância de bandas de coloração clara composta por calcita e dolomita, quartzo e mica branca, e

níveis margosos composto principalmente por flogopita, talco e quartzo (Figura 20B). Apresentam um padrão de fraturamento caracterizado por fraturas retilíneas com superfícies lisas, descontínuas e com espaçamento decimétrico a métrico, por vezes preenchidas por carbonato de cálcio e/ou óxidos de ferro.

Figura 20: A = Antiga cava de extração de calcário; B = Detalhe do bandamento composicional do mármore.



Fonte: Próprio autor.

Como observado na Figura 21, é possível identificar a presença da foliação S_1 em dobras F_2 do tipo isoclinais e apertadas, associadas ao desenvolvimento de clivagem de crenulação S_2 .

Figura 21: Desenvolvimento de clivagem de crenulação S_2 a partir do dobramento isoclinal da foliação S_1 .



Fonte: Próprio autor.

Os metassedimentos do CP estão amplamente afetados por duas direções de fraturas de direção NW-SE e NE-SW, representando as clivagens de fraturas S_3 e S_4 , como descrito por ZVIRTES *et al.* (2017). A clivagem de fratura S_3 é caracterizada por superfícies retilíneas, lisas e descontínuas, com um espaçamento entre 20 e 50 cm. A clivagem de fratura S_4 também possui superfícies lisas e descontínuas, porém são mais penetrativas e mais abundantes, em afloramento possui espaçamentos que variam de 2 cm a 1 metro. Nos quartzitos ainda são observadas fraturas paralelas à foliação causada pelo alívio de pressão e alteração dos níveis ricos em muscovita. Em locais topograficamente mais baixos, nota-se a diminuição da quantidade de fraturas ou o selamento das mesmas.

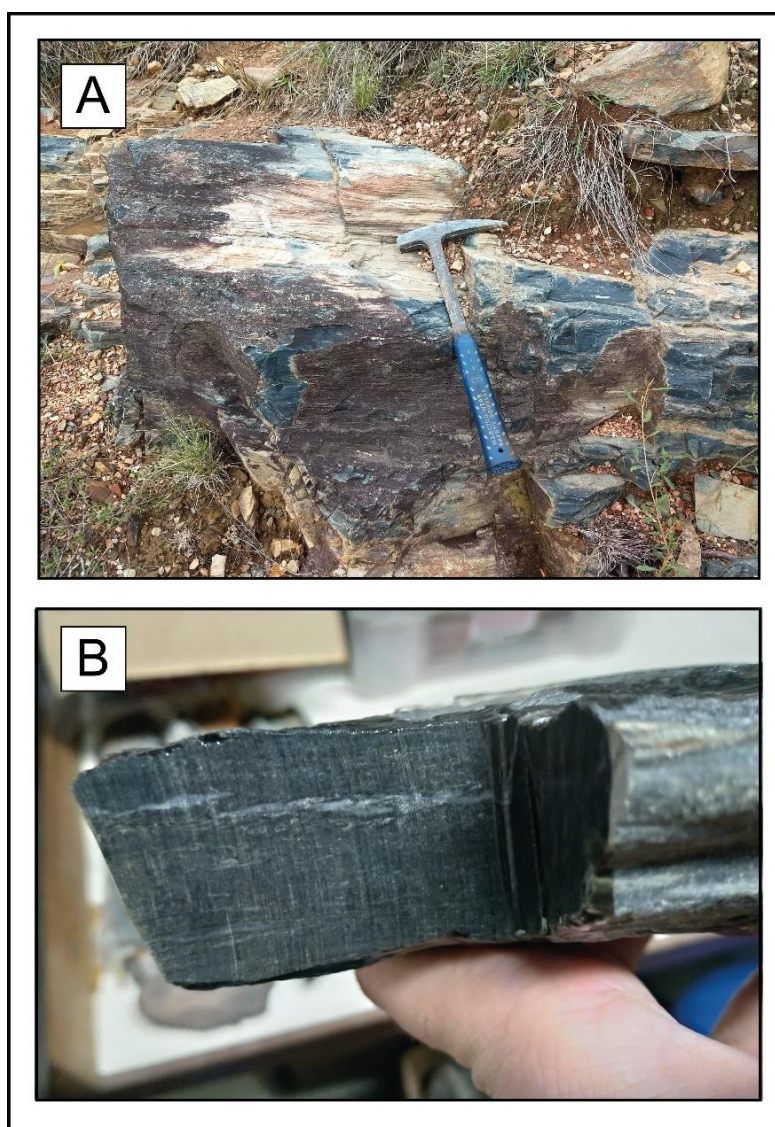
4.1.2 METAVULCÂNICAS

As rochas metavulcânicas estão expostas em lajeados ao longo de drenagens e como cortes de estradas alterados (Figura 22A). Mostram cor cinza escura a verde escuras com acamamento marcado pela diferença composicional, com bandas mais claras ricas em quartzo de 1 a 3 mm descontínuas por vezes em forma de *boudins*

(Figura 22B). e bandas máficas predominantes ricas em biotita e muscovita e com até 5 mm de espessura.

As bandas máficas apresentam entre 20 a 30% de fenoclastos de plagioclásio com formas prismáticas pouco alongadas, subédricos e com diâmetros entre 0,3 a 3,0 mm, envoltos por uma matriz fina com textura lepidoblástica e granoblástica composta por plagioclásio (25-30%), anfibólio (30 a 35%), clorita (15-20%), biotita (10-15%) e quartzo (3-5%).

Figura 22 A = Afloramento em forma de lajeado na beira de drenagem de metavulcânica; B = Detalhe do bandamento composicional e *boudins* de agregado de quartzo.



Fonte: Próprio autor.

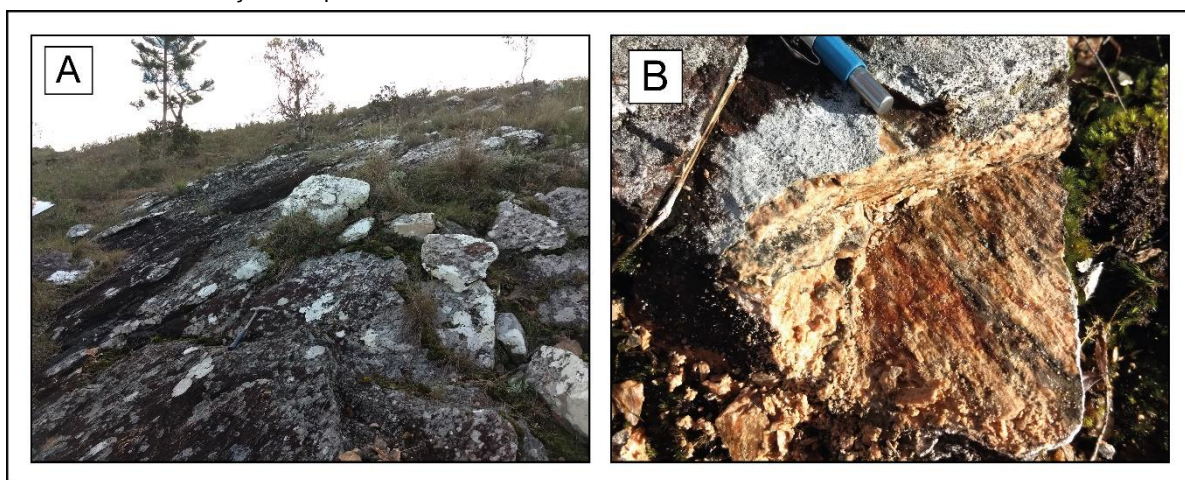
De forma geral, as rochas metavulcânicas, apresentam a mesma estruturação dos metassedimentos, com foliação principal de direção $N34^{\circ}E$, com mergulhos de 24° para WNW e WSW faturamento principal (S_4) de direção NW-SE subvertical.

4.1.3 METAGRANITO CAPANÉ

O Metagranito Capané (MC) classificado em campo como K-feldspato granito a sienogranito, aflora na forma de lajeados e matacões (Figura 22A). O principal corpo ocorre no flanco oeste da Antiforme Capané corpo alongado de direção $N20^{\circ}E$ com cerca de 4 km de comprimento e 600 metros de largura (ZVIRTES *et al.*, 2017). No flanco leste, o mesmo apresenta-se como corpos menores intrudindo as rochas metavulcano-sedimentares.

Em campo os metagranitos apresentam uma foliação milonítica (Figura 22B) marcada pelo estiramento e orientação de porfiroclastos de K-feldspato, quartzo e do piroxênio com orientação principal $N20^{\circ}E$, variando até $N20^{\circ}W$, com mergulhos em média 40° para WNW (ZVIRTES *et al.*, 2017).

Figura 23 A = Afloramento em forma de lajeado do Metagranito Capané; B = Foliação milonítica marcada pelo estiramento e orientação dos porfiroclastos.



Fonte: Próprio autor.

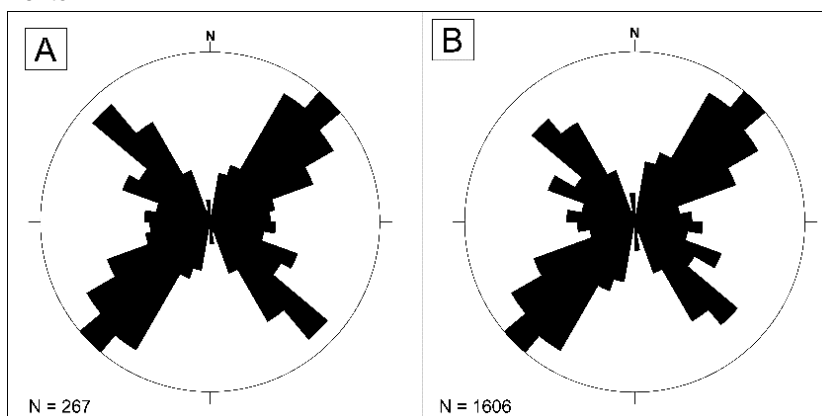
As litologias do MC possuem lineação de estiramento bem marcada pelo estiramento do quartzo e do feldspato, mergulhando cerca de 10° para $S30^{\circ}W$. afetado por fraturas de direção NW-SE e NE-SW (S_3 e S_4), os quais geram uma clivagem de fratura com espaçamento decimétrico por vezes preenchidas por óxidos (ZVIRTES *et al.*, 2017).

4.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL

A análise dos lineamentos traçados da área de abrangência da Antiforme Capané a partir das imagens de satélite *GoogleEarthPRO*® e *ArcGIS*© juntamente com a geração do modelo digital de terreno (MDT) com sombreamento de montanha (*Hill ShadeRelief*), permitiu identificar duas populações de lineamentos com estruturas principais de direção NE-SW e NW-SE e, subordinadamente lineamentos de direção N-S menos frequente e de menor comprimento.

Segundo a Figura 24A, os lineamentos mais intensos têm direção NE-SW, com uma variação entre N25°E e N55°E e representam o traço principal da foliação metamórfica e os principais sistemas de falhas que afetam a Bacia do Camaquã e o Batólito Pelotas. Em menor escala ocorrem lineamentos de direção NW-SE, com uma variação entre N50°W e N60°W caracterizados por fraturas de extensão associadas aos eventos deformacionais que afetaram as rochas do Cinturão Dom Feliciano.

Figura 24: A = Diagrama de roseta de frequência e B = diagrama de roseta de comprimento.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 24B diagrama de roseta de comprimento, podemos observar que os lineamentos mais extensos possuem direção NE-SW, variando entre N40°E e N60°E, enquanto os lineamentos de direções NW são menos contínuos.

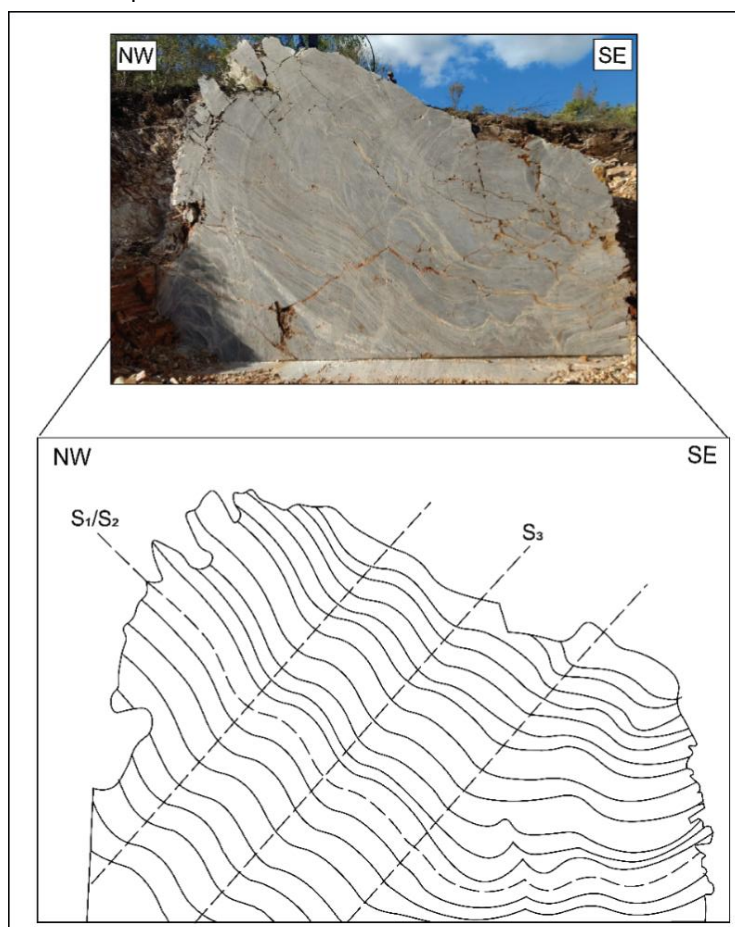
As cristas de quartzitos são a principal feição geomorfológica da antiforme e possuem direção NE-SW, são alongadas e descontínuas afetadas por falhamentos e fraturas de direção NW-SE, com maior exposição no flanco leste da antiforme, com cerca de 3 km de comprimento. Assim como os corpos de metagranito e as áreas

deprimidas associadas a erosão diferencial dos metapelitos, essas estruturas são responsáveis pelo controle principal do sistema de drenagens da região.

Os dados estruturais obtidos na etapa de campo indicam a atuação de quatro eventos deformacionais nos metassedimentos do CP na Antiforme Capané, distintos entre si pelas suas relações espaciais e geométricas. A foliação principal denominada como S_1 é caracterizada pelo paralelismo da foliação metamórfica S_1 gerada a partir do acamamento S_0 dos metassedimentos, e dobras F_2 intrafoliais isoclinais milimétricas a centimétricas, representando uma clivagem de crenulação da S_1 associadas ao desenvolvimento da foliação S_2 (Figura 25) de orientação $N30^\circ E$ variando até $N30^\circ W$, com mergulhos em média de 40° para WNW e WSW.

Esta foliação apresenta uma lineação de estiramento (L_x) mergulhando em baixo ângulo para NE e principalmente para SW, indicando que seu desenvolvimento se deu por uma movimentação tectônica transcorrente.

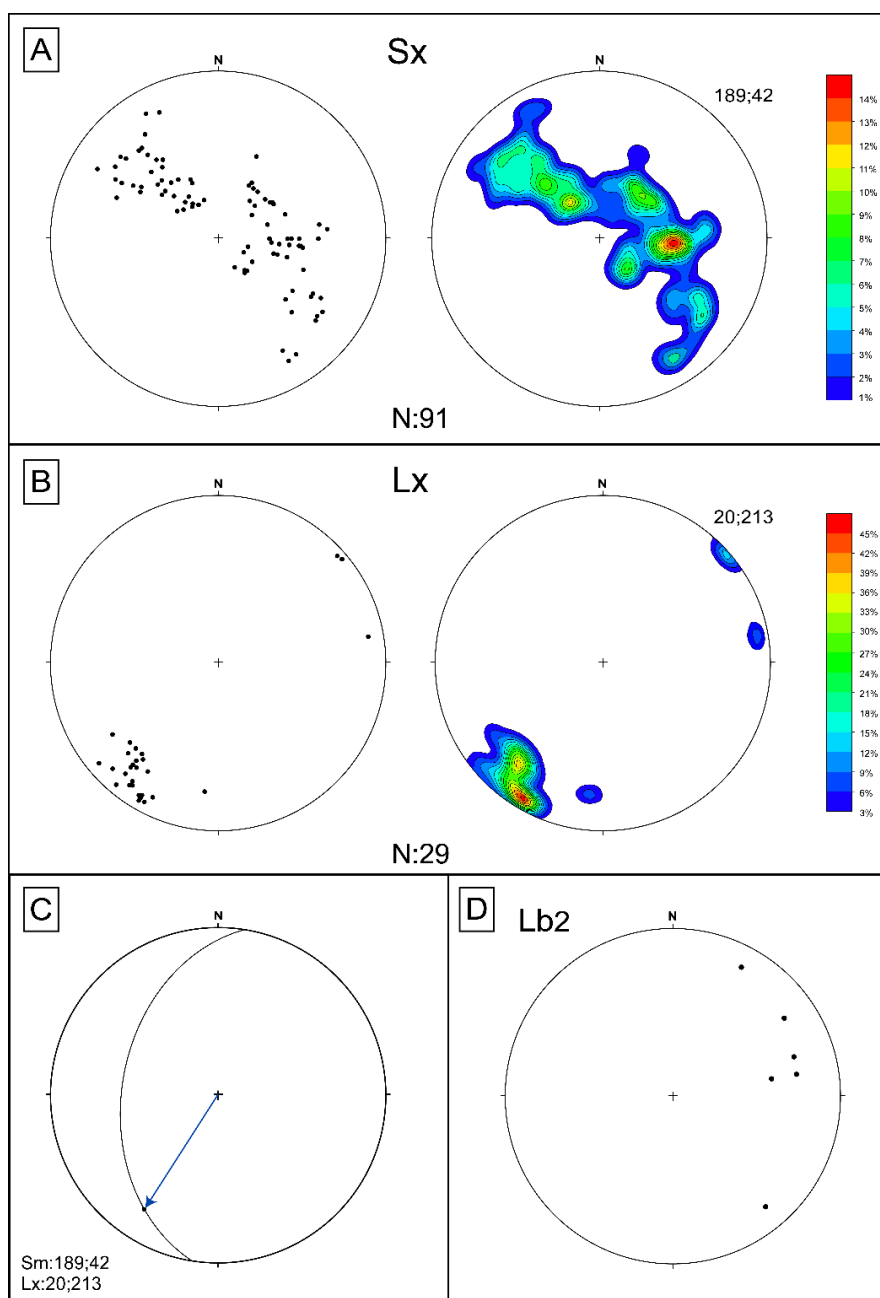
Figura 25: Croqui esquemático mostrando a relação do paralelismo das foliações S_1 e S_2 afetadas posteriormente pela fase de deformação D_3 (S_3) de escala regional representada por clivagens de fratura em escala de campo



Fonte: Próprio autor.

Como observado na Figura 26A, o estereograma mostra uma rotação da S_1 , que mergulha NW e segue até SE, representando uma guirlanda, indicando o dobramento da foliação S_2 gerando a foliação S_3 (D_3). Estas dobras controlam o relevo regional da área e estão associadas a formação da Antiforme Capané. A S_3 está associada ao desenvolvimento de dobras F_3 com formas abertas a fechadas produzindo uma clivagem de fratura (CF_3) nas superfícies axiais das mesmas (Figura 27).

Figura 26: Estereogramas de diferentes estruturas identificadas nos metassedimentos da AC. A= Estereogramas de projeção dos pólos do plano de foliação S_x (foliação metamórfica $S_1//S_2$); B=Estereogramas de projeção das lineações de estiramento (L_x); C = Relação entre a moda da foliação, S_x , com a lineação, L_x , mais frequente. D = Representação de eixo de dobras (Lb_2).



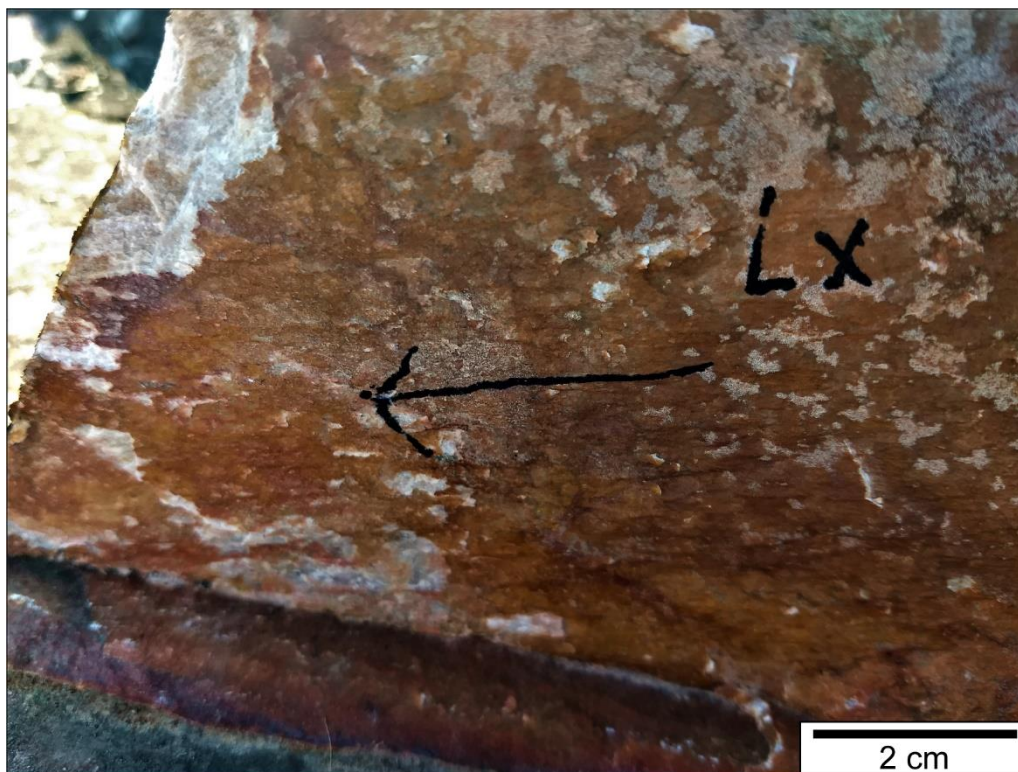
Fonte: Próprio autor.

Figura 27: Relação entre S_1/S_2 que representa a foliação principal da antiforme e S_3 e S_4 , fases posteriores de deformação produzindo clivagens de fratura.



Fonte: Próprio autor.

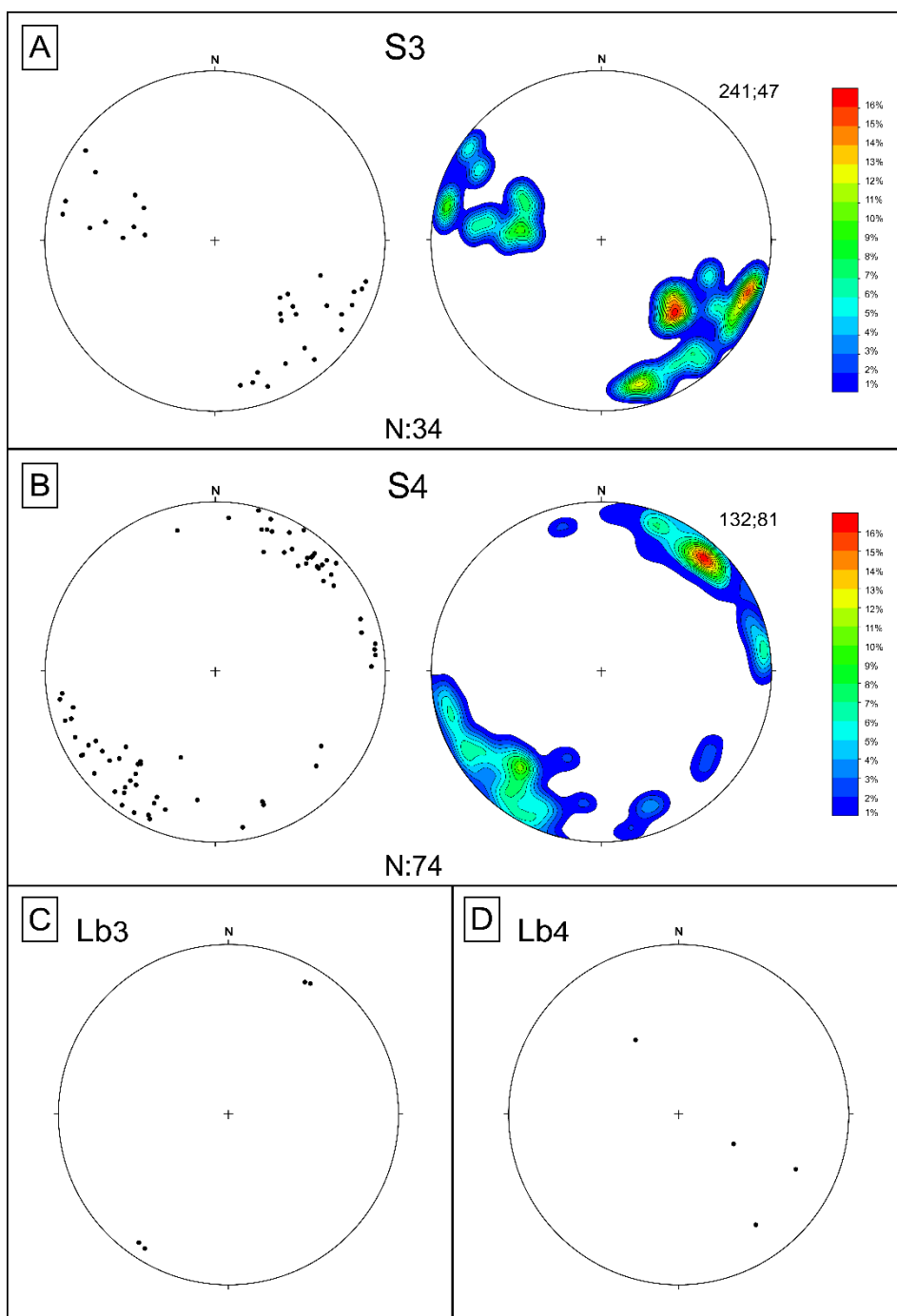
Figura 28: Detalhe da lineação de estiramento mineral nos quartzitos com baixo ângulo mergulhando para SW, indicando transporte tectônico oblíquo.



Fonte: Próprio autor.

A quarta fase de deformação (D_4) representa o dobramento dos eixos das dobras F_3 , gerando uma clivagem de fratura (CF_4) em escala de afloramento (Figura 29B) de orientação NW-SE com mergulho subvertical. Esta fase de deformação é responsável pelo principal sistema de fraturas da região e pela fragmentação e descontinuidades das cristas de quartzito.

Figura 29: Estereogramas de diferentes estruturas identificadas nos metassedimentos da AC. A= Representação da projeção estereográfica com a distribuição dos polos dos planos da estrutura S3.; B = Estereogramas representando os polos dos planos de fraturas S4; C = Estereogramas de linhas dos eixos de dobras (Lb3); D = Estereogramas de linhas dos eixos de dobras (Lb4).



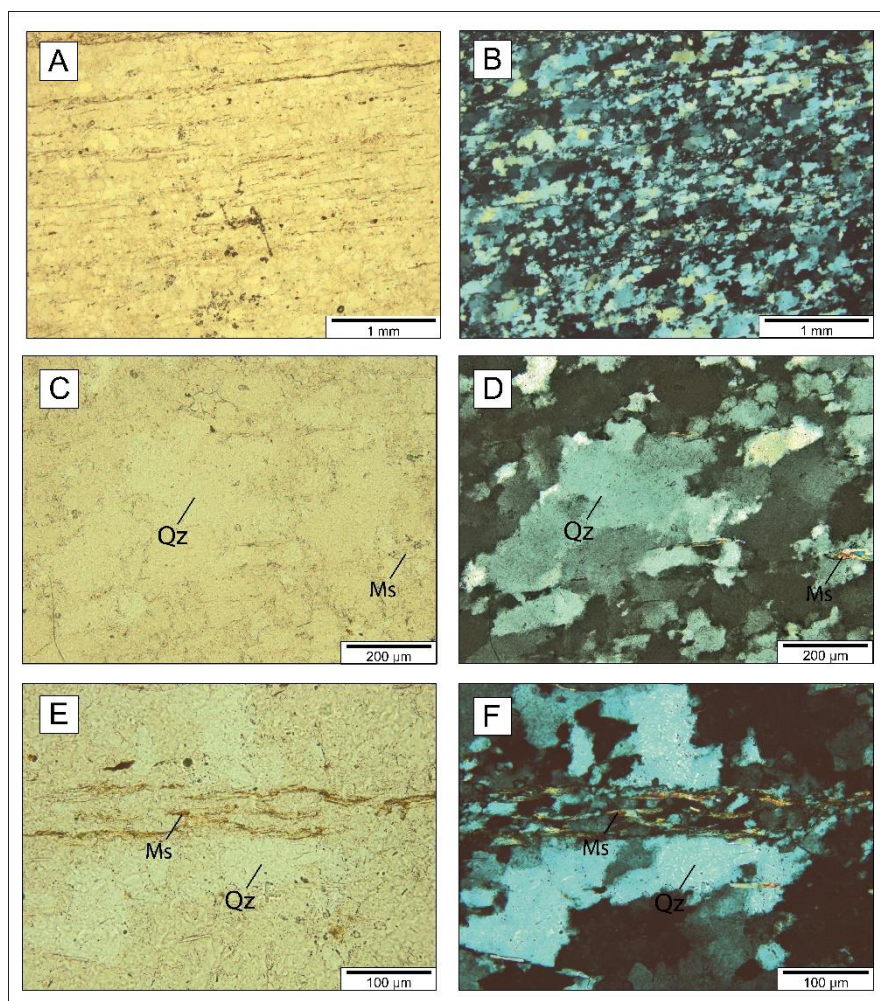
Fonte: Próprio autor.

4.3 PETROGRAFIA

4.3.1 QUARTZITO

O quartzito possui um acamamento primário, marcado pela alternância de camadas contínuas e irregulares de 0,5 mm a 2 mm de espessura compostas predominantemente por quartzo com textura granoblástica equigranular interlobada média com grãos que variam entre 0,2 mm e 0,4 mm (Figura 30C e D), e níveis mais finos (0,1- 0,2 mm) subordinados compostos por muscovita e quartzo com textura granoblástica equigranular interlobada fina a média (0,05 – 0,1 mm) e lepidoblástica representada pela orientação da muscovita (figura 30E e F).

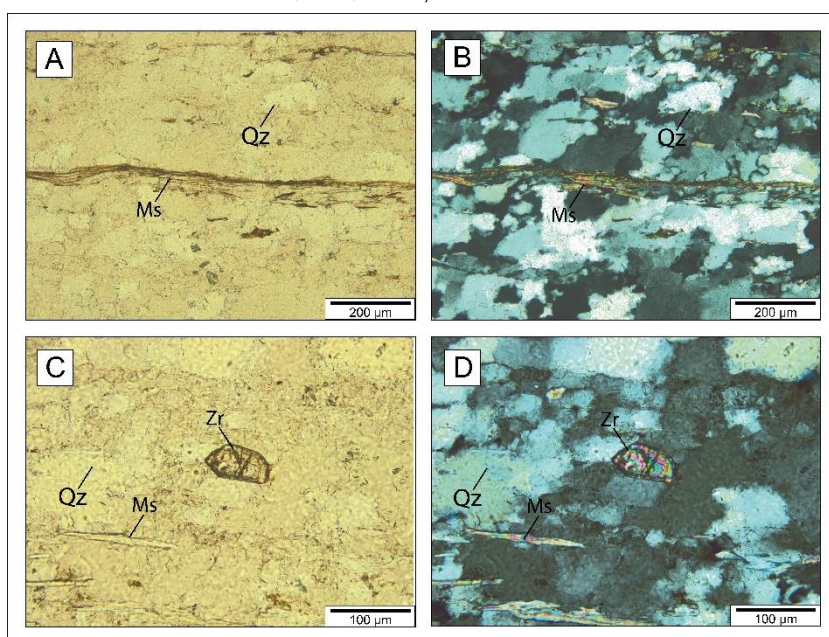
Figura 30: A e B = Aparência geral da lâmina com nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. C e D = Detalhe do nível mais espesso com porfiroclasto de quartzo em nicóis cruzados a esquerda e descruzados a direita. E e F = Detalhe do nível mais fino rico em muscovita. Qz = Quartzo e Ms = Muscovita.



Fonte: Próprio autor.

Os níveis mais finos ricos em muscovita apresentam feições do tipo-*fish* (Figura 31A e B) caracterizando uma deformação milonítica, representada também no estiramento dos porfiroclastos de quartzo que estão amplamente recristalizados e envolvidos por uma matriz com textura granoblástica poligonal inequigranular fina a média (<0,1 a 0,15 mm) das camadas mais espessas. Caracterizando a rocha como um quartzito milonítico. Os níveis finos de muscovita definem o principal plano de fraqueza da rocha, devido a sua facilidade de alteração.

Figura 31: A e B = Detalhe da feição mica-fish a níóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. C e D = detalhe de zircão detritico como elemento traços níóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. Qz = Quartzo, Ms = Muscovita e Zr = Zircão



Fonte: Próprio autor.

A mineralogia da rocha é composta por: quartzo (97%), muscovita (2 a 3%), tendo zircão (figura 31C e D) e turmalina como minerais acessórios.

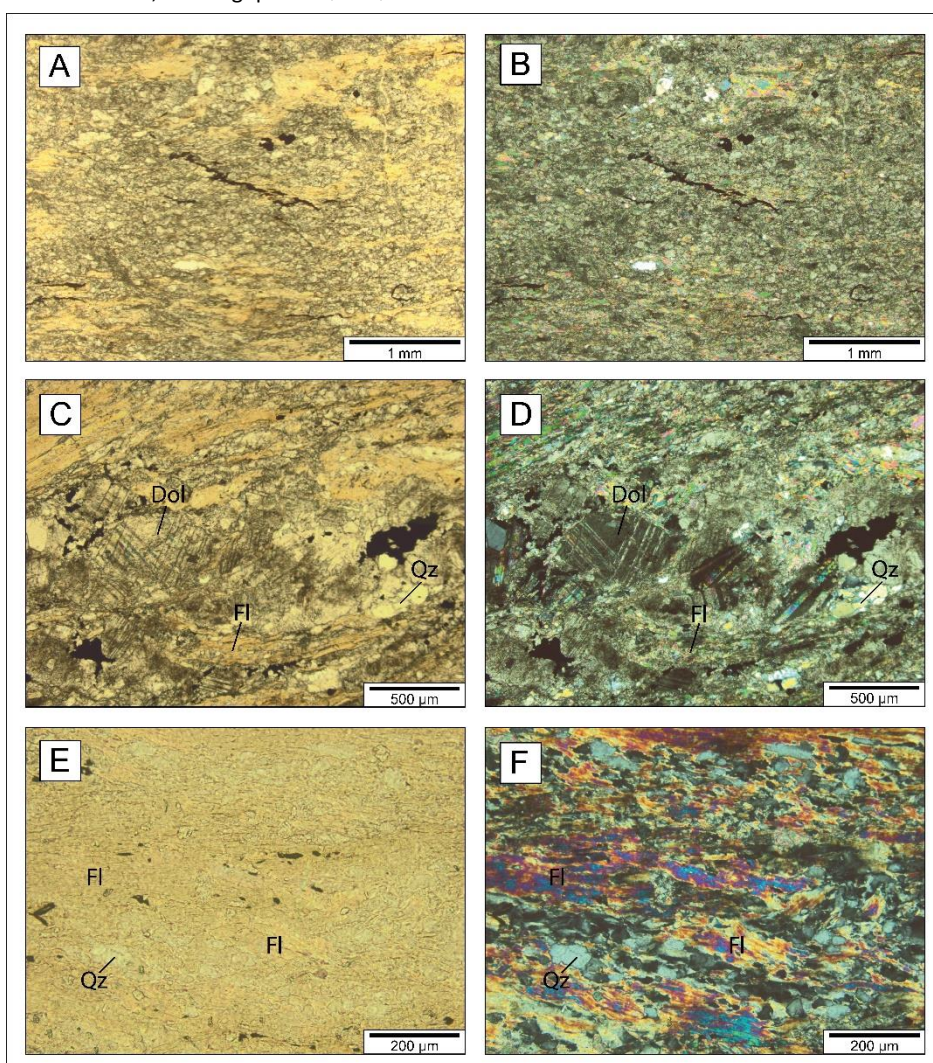
4.3.2 MÁRMORE

Rocha com bandamento composicional representando o acamadamento primário da rocha e caracterizado por bandas irregulares e descontínuas com alternância de níveis dominantes ricos em calcita e dolomita com pouco quartzo de textura granoblástica interlobada inequigranular média, com tamanho de grão de 0,1 a 0,3 mm e porfiroclastos de calcita (Figura 32C e D) e subordinadamente intercalados com níveis de 1 a 3 mm ricos em flogopita apresentando feição tipo mica-*fish* e quartzo

com textura lepidoblástica média com grãos entre 0,2 a 0,4 mm representando níveis margosos entre as camadas de calcáreo (Figura 32E e F) .

O acamadamento primário é superposto por uma deformação milonítica caracterizada pelo estiramento da flogopita (feição tipo *mica-fish*) e dos porfiroclastos de calcita e dolomita levemente estirados envoltos por matriz de carbonato fino produto da recristalização dinâmica. A matriz milonítica representa cerca de 20% da rocha, caracterizando a mesma como um protomilonito.

Figura 32: A e B = Aparência geral da lâmina com nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. C e D = Detalhe do nível rico em calcita e dolomita com porfiroclastos de calcita e dolomita em nicóis descruzados a esquerda e cruzados a direita. E e F = Detalhe do nível rico em flogopita e quartzo. Dol = Dolomita, Fl = Flogopita e Qz = Quartzo



Fonte: Próprio autor.

A composição mineralógica da rocha é constituída por calcita e dolomita (72%), flogopita (15%), quartzo (10%) e opacos (3%) disseminados e/ou preenchendo fraturas (figura C e D).

4.4 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

4.4.1 ÍNDICES FÍSICOS

Os resultados do ensaio de índices físicos para o quartzito e para o mármore, conforme a norma ABNT NBR 12766:1992 estão representados na tabela 3 e tabela 4, respectivamente.

Tabela 3: Índices físicos referentes ao quartzito, e especificações conforme as normas ABNT e ASTM. ρ_a = densidade aparente (g/cm^3); a_a = absorção d'água (%); η_a = porosidade aparente (%); n.e = não especificado.

QUARTZITO	ρ_a	a_a	η_a
CP-01	2,7985767	0,35423	0,99136
CP-02	2,5921470	0,55648	1,44248
CP-03	2,5690463	0,48990	1,25859
CP-04	2,5748770	0,55640	1,43266
CP-05	2,5868508	0,50282	1,30073
CP-06	2,5811749	0,60963	1,57357
CP-07	2,6007743	0,40268	1,04729
CP-08	2,5882920	0,31116	0,80538
CP-09	2,5685562	0,33838	0,86917
CP-10	2,5792897	0,45343	1,16952
MÉDIA	2,6039586	0,457516	1,18908
DESVIO PADRÃO	0,065582	0,09752	0,24450
ABNT 12766	n.e	n.e	n.e
ASTM C 503	$\geq 2,560$	≤ 1	n.e

Fonte: Próprio autor.

O valor médio de densidade aparente seca obtido para o quartzito foi de 2,603 g/cm^3 , portanto, encontra-se dentro dos valores recomendados pela norma ASTM que são valores de $\geq 2,560 \text{g}/\text{cm}^3$. A absorção d'água aparente também apresentou valores satisfatórios, tendo como média 0,457%, de acordo como previsto pela norma ASTM ($\leq 1\%$).

A análise da porosidade aparente para o quartzito obteve resultados entre 0,805% a 1,573% e média de 1,189%. Porém, para o ensaio de porosidade aparente de quartzitos, as normas ABNT e ASTM não predefinem nenhum valor de recomendação, contudo o valor obtido neste trabalho encontra-se dentro do esperado

para esse tipo de rocha comparado com outros quartzitos utilizados como rocha de revestimento, que podem variar de 0,5% a 2,5% (FERNANDES, *et al.*, 2003)

Tabela 4: Índices físicos referentes ao mármore, e especificações conforme as normas ABNT e ASTM. ρ_a = densidade aparente (g/cm³); a_a = absorção d'água (%); η_a = porosidade aparente (%); n.e = não especificado.

MÁRMORE	ρ_a	a_a	η_a
CP-01	2,7865404	0,01507	0,04200
CP-02	2,7768209	0,01225	0,03403
CP-03	2,7837791	0,02331	0,06491
CP-04	2,7939860	0,13964	0,39017
CP-05	2,7769295	0,10120	0,2810
CP-06	2,7988234	0,06505	0,18208
CP-07	2,8067259	0,05446	0,15286
CP-08	2,8425207	0,04804	0,13678
CP-09	2,8601626	0,03802	0,10876
CP-10	2,8231512	0,06083	0,17174
MÉDIA	2,8049440	0,05579	0,15643
DESVIO PADRÃO	0,02704	0,03767	0,10496
ABNT 12766	n.e	n.e	n.e
ASTM C 503	$\geq 2,800$	$\leq 0,2$	n.e

Fonte: Próprio autor.

Para o mármore, os valores de densidade aparente seca variam de 2,786 g/cm³ a 2,860 g/cm³ com média de 2,804 g/cm³, e respeitam as recomendações da norma ASTM que admite valores $\geq 2,800$ g/cm³ para mármore dolomíticos. A absorção d'água para o mármore teve média de 0,055% com valores entre 0,01% e 0,139%, dentro dos valores esperados pela norma ASTM, que sugere resultados de absorção d'água $\leq 0,2\%$.

A porosidade aparente apresentou resultado médio de 0,156% com desvio padrão de 0,104%, e assim como os quartzitos, não são especificados pelas normas ASTM e ABNT. Contudo, pode-se comparar os resultados deste trabalho com valores de porosidade aparente de mármore já estudados e/ou comercializados para fins ornamentais, como exemplo tem-se o Mármore Aqua Marine, Mármore Mudador, Mármore Cerro da Pedreira com valores de 0,04%, 0,3%, e 1,8% respectivamente (CIENEC, 2009, ALENCAR, 2013). Assim, observa-se que os valores de porosidade aparente obtidos neste estudo estão de acordo com os resultados disponíveis para outros materiais analisados de mesma litologia.

4.4.2 RESISTENCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de compressão uniaxial obtidos para o quartzito, a tabela 6 mostra os valores referentes ao mármore, conforme ABNT NBR 15845:2010.

Tabela 5: Valores de resistência à compressão uniaxial referentes ao quartzito. σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); n.e = não especificado.

QUARTZITO	σ_c
CP-01	97,14566
CP-02	25,92712
CP-03	109,6894
CP-04	108,2152
MÉDIA	105,0167
DESVIO PADRÃO	5,5981
ABNT 15845	n.e
ASTM C 503	$\geq 137,9$

Fonte: Próprio autor.

Conforme a tabela acima, as amostras de quartzito submetidas ao ensaio de compressão uniaxial obtiveram resultados entre 97,14 MPa e 108,21 MPa com média de 105,016 MPa, valores abaixo do especificado pela norma ASTM. O resultado corpo de prova CP-02 foi descartado, pois o mesmo apresentava problemas em relação a sua geometria, fazendo com que a prensa submetesse esforços somente em uma porção da amostra, ocasionando a ruptura precoce somente nessa parte da rocha.

Para o mármore (Tabela 6), observa-se que os valores obtidos variam de 70,08 MPa a 94,43 MPa com média 79,519 MPa. São superiores a ≥ 52 MPa conforme especificação recomendada pela norma ASTM, indicando, portanto, uma boa resposta à compressão uniaxial.

Tabela 6:Valores de resistência à compressão uniaxial referentes ao mármore. σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); n.e = não especificado.

MÁRMORE	σ_c
CP-01	73,91699
CP-02	70,08004
CP-03	94,43019
CP-04	79,65168
MÉDIA	79,51972
DESVIO PADRÃO	9,25793
ABNT 15845	n.e
ASTM C 503	≥52

Fonte: Próprio autor.

4.4.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO – FLEXÃO POR CARREGAMENTO EM TRÊS PONTOS

Segundo as especificações da norma ASTM, os valores recomendados para a resistência à flexão em três pontos para quartzitos é de $\geq 13,9$ MPa, neste trabalho, conforme a Tabela 7, obtiveram-se valores de 18,06 MPa a 24,0 MPa, portanto superiores ao especificado pela norma.

Tabela 7:Valores de resistência à flexão em três pontos referentes ao quartzito. σ_{f3} = resistência à flexão em três pontos (MPa); n.e = não especificado.

QUARTZITO	σ_{f3}
CP-01	18,060
CP-02	24,007
CP-03	22,217
CP-04	22,876
MÉDIA	21,790
DESVIO PADRÃO	2,2464
ABNT 15845	n.e
ASTM C 503	≥13,9

Fonte: Próprio autor.

A tabela 8 indica os valores relacionados ao ensaio realizado nos corpos de prova do mármore. Observa-se que os resultados de flexão alcançaram 21,335 MPa e média de 20,689 MPa, com desvio padrão de 0,393 MPa, resultados esses que se

encontram de acordo com as normas técnicas que especificam o valor de ≥ 7 MPa para resistência à flexão em três pontos para mármore (ASTM).

Tabela 8: Valores de resistência à flexão em três pontos referentes ao mármore. σ_{f3} = resistência à flexão em três pontos (MPa); n.e = não especificado.

QUARTZITO	σ_{f3}
CP-01	20,271
CP-02	21,335
CP-03	20,538
CP-04	20,613
MÉDIA	20,6892
DESVIO PADRÃO	0,39389
ABNT 15845	n.e
ASTM C 503	≥ 7

Fonte: Próprio autor.

4.4.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS

O ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado nos mesmos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão uniaxial. As amostras foram analisadas na tanto direção perpendicular quanto na direção paralela a foliação.

Tabela 9: Valores de velocidade de ondas ultrassônicas referentes ao quartzito. V_{\perp} = velocidade perpendicular à foliação; $V_{//}$ = velocidade paralela à foliação; n.e = não especificado.

QUARTZITO	V_{\perp}	$V_{//}$
CP-01	4779	5147
CP-02	4382	5100
CP-03	4683	5181
CP-04	4681	5260
MÉDIA	4631	5172
DESVIO PADRÃO	0,149423	0,058261
ABNT 15845	n.e	n.e
ASTM C 503	n.e	n.e

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10: Valores de velocidade de ondas ultrassônicas referentes ao mármore. V^{\perp} = velocidade perpendicular à foliação; V^{\parallel} = velocidade paralela à foliação; n.e = não especificado.

MÁRMORE	V^{\perp}	V^{\parallel}
CP-01	6314	6719
CP-02	6313	6688
CP-03	6278	6573
CP-04	6161	6417
MÉDIA	6266	6599
DESVIO PADRÃO	0,062604	0,118449
ABNT 15845	n.e	n.e
ASTM C 503	n.e	n.e

Fonte:Próprio autor.

Conforme a tabela 9, os resultados médios obtidos de velocidade propagação das ondas ultrassônicas nas direções perpendiculares e paralelas à foliação do quartzito foram de 4631 m/s e 5172 m/s respectivamente, comprovando a anisotropia da rocha, pois essas estruturas tendem a dificultar a passagem das ondas, diminuindo a velocidade das mesmas no meio.

O mesmo efeito é observado no mármore (tabela 10), com valores um pouco menores de velocidade perpendiculares à foliação da rocha, confirmando a anisotropia causada estrutura metamórfica.

A norma ASTM indica valores de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas como ≥ 4000 m/s para rochas em geral, portanto, tanto o quartzito quanto o mármore obedecem às especificações recomendadas pela norma em ambas as direções de propagação.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização geológica, estrutural e tecnológica dos quartzitos e mármore da Antiforme Capané, do Complexo Porongos avaliou as propriedades e o comportamento destas rochas para fins ornamentais e de revestimento.

Os quartzitos ocorrem em uma vasta área no flanco leste da antiforme na forma de cristas alongadas de direção NE-SW com dezenas a centenas de metros de comprimento. As cristas que ocorrem no flanco leste da antiforme, são alongadas e descontínuas afetadas por falhamentos e fraturas de direção NW-SE. Os quartzitos têm cor branca a bege quando alterado e composição a base de quartzo (98%).

A xistosidade marcada por finas camadas de muscovita formam planos de fraqueza incipientes e não afetam a rocha quando cortada para chapas.

A amostragem de blocos no quartzito enfrentou problemas devido ao fraturamento, principalmente pelos planos de fraqueza causados pela alteração da muscovita, porém observa-se que em profundidades maiores, esses planos de fraqueza tendem a diminuir.

Os índices físicos mostraram bons resultados, dentro das especificações recomendadas pelas normas. Assim como no ensaio de flexão em três pontos e de velocidade ultrassônica, porém, o ensaio de compressão uniaxial apresentou valores menores que especificados pela norma ASTM para esse tipo de rocha.

Os mármore ocorrem no flanco leste da antiforme como lentes de até 150 metros de comprimento. Possuem cor cinza clara e textura granoblástica média, com um bandamento composicional centimétrico regular e contínuo marcado pela alternância de bandas claras (calcita e dolomita, quartzo e mica branca) e bandas escuras representando níveis margosos ricos em flogopita.

O padrão de fraturamento é baixo e está definido por fraturas retilíneas com superfícies lisas, descontínuas e com espaçamento decimétrico a métrico favorecendo a exploração da rocha como blocos. Por vezes é possível observar a formação de dobras centimétricas isoclinais associadas ao desenvolvimento da clivagem de crenulação S_2 , essas dobras podem apresentar características estéticas favoráveis para a rocha.

A amostragem de blocos teve bons resultados, sendo possível a extração de três blocos com dimensões favoráveis para a confecção de chapas. As análises físicas e mecânicas do mármore apresentaram resultados dentro dos valores recomendados pelas normas, e podem ser comparadas com rochas de mesma litologia já exploradas para os mesmos fins.

Para o mármore, sugere-se trabalhos de sondagem para avaliar a profundidade das lentes e sua continuidade, a fim de se obter uma ideia inicial de cubagem do possível jazimento.

Ambas rochas após o polimento apresentaram características estéticas agradáveis e podem ser comparados com materiais já comercializados e com alto valor agregado.

O quartzito pode ser usado como piso em ambientes internos e externos com baixa e alta circulação, como bancadas, pias e balcões além do revestimento de paredes. Para o mármore recomenda-se a utilização como pisos internos com baixa circulação, balcões, pias e bancadas e revestimento de paredes, com restrições de uso de líquidos ácidos ou materiais de limpeza, devido à composição química da rocha rica em carbonato de cálcio, que é facilmente dissolvido.

Importante ressaltar que tecnologias como envelopamento de blocos, telamento e resinamento de chapas, possibilitam a extração de rochas fraturadas e conseqüentemente aumentam a resistência da mesma.

Destaca-se também a boa localização da área de estudo, estando cerca de 25 km da BR-290, com boas estradas vicinais constantemente reparadas pela prefeitura e por empresas que possuem áreas de reflorestamento na região.

Por fim, conclui-se que, em uma primeira avaliação, os quartzitos e mármore da região de Cachoeira do Sul possuem indicações geológicas e tecnológicas favoráveis para o uso como rocha ornamental e de revestimento. Recomenda-se ainda uma gama maior de ensaios para a melhor caracterização tecnológica dos materiais, além da continuidade dos estudos para maior detalhamento da área, afim de sustentar o investimento para abertura de jazidas na região.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15844-2015. Rochas para revestimento – Requisitos para granitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo.

ALMEIDA, F.F.M. O cráton do São Francisco. **Brazilian Journal of Geology**. 7 (4): 349-364. 1977

ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., & Fuck, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, 17(1), 1-29. 1981

ASTM D 2845. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken (USA). 1983

BITENCOURT, M. D. F., & NARDI, L. V. S.. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. **Revista Brasileira de Geociências**, 30(1), 184-187. 2000

CARVALHO P.F. de. Reconhecimento geológico do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, **Boletim do Instituto Geológico de Mineração Brasileira**, 66:1-72. 1932

CHIODI, D. K. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2012. **Informe Abirochas**, São Paulo, n. 01, 2013a.

CHIODI, D. K. Breve análise das exportações brasileiras de rochas ornamentais. **Informe Abirochas**, São Paulo, n. 08, 2013b.

CHIODI, D. K. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período de Janeiro a Setembro de 2016. **Informe Abirochas**, São Paulo, n. 15, 2016c.

FRAGOSO CESAR ARS. Tectonica de Placas no Ciclo Brasiliano: as orogenias dos Cintur.es Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul. **Tese de Doutorado**, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 366 p. 1991.

FRASCÁ, M.H.B.O., Qualificação de Rochas Ornamentais e para Revestimento de Edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. **II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste** – Anais, Salvador, p. 128-134. 2002.

FRASCÁ, M.H.B.O.; Rochas para Revestimento de Edificações: variedades, seleção, usos e durabilidade. **IV Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste**. Anais, Fortaleza, p. 332- 341. 2003.

HARTMANN LA, CHEMALE JR. F AND PHILIPP RP. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: FRANTZ JC ET AL. (Eds), **50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul**, Porto Alegre: Comunicação e Identidade, Porto Alegre, RS, Brasil, p. 97–123. 2007.

JOST H. & BITENCOURT M.F. Estratigrafia e tectônica de uma fração da Faixa de Dobramentos Tijucas no Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo. 11(7):27-59. 1980

MARQUES, J.C., JOST, H., ROISENBERG, A., FRANTZ, J.C. Eventos ígneos da Suíte Metamórfica Porongos na área da Antiforme Capané, Cachoeira do Sul – RS. **Revista Brasileira de Geociências** 28, 419-430. 1998a

MARQUES, J.C., JOST, H., ROISENBERG, A., FRANTZ, J.C. Rochas metassedimentares, geologia estrutural e metamorfismo da Suíte Metamórfica Porongos na área da Antiforme Capané, Cachoeira do Sul – RS. **Revista Brasileira de Geociências** 28, 467-472. 1998b

PARAGUASSÚ, A.B., Rodrigues, E.J., Ribeiro, R.P., Frazão, E.B (2014). Indústria da Pedra: Da Extração à Aplicação Final. São Carlos: EESC-USP. 130p.

PHILIPP, R. P., NARDI, L. V. S., & BITENCOURT, M. F. O Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul. **Geologia do Rio Grande do Sul**, 133-60. 2000.

PHILIP, R. P., MACHADO, R. The late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. 19(4): 461-478. 2005.

REMUS, M.V.D.; FACCINI, U.F.; TEDESCO, M.A. & PHILIPP, R.P.. Evolução estrutural dos metamorfitos Porongos a sul do Rio Camaquã. **III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia**, Atas, Curitiba, 1: 223-243. 1987

REMUS M.V.D., Philipp R.P., Faccini U.F., Junges S.L. Contribuição ao estudo geológico-estrutural dos Gnaisses Encantadas e das relações com as supracrustais Porongos na região de Santana da Boa Vista-RS. In: SBG, **Congresso Brasileiro de Geologia**, 36, Natal, Anais, 2:2358-2370. 1990.

SOLIANI JR. E. Os dados geocronológicos do Escudo Sul-riograndense e suas implicações de ordem geotectônica. São Paulo, **Tese de Doutorado em Geociências**, Universidade de São Paulo, 425p. 1986.

VIDAL, HÉLIO C. A. AZEVEDO, NURIA F. CASTRO. Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento – Rio de Janeiro: **CETEM/MCTI**, 700p.: il. 2013.

ZVIRTES, G. Evolução tectônica do metagranito capané, complexo porongos, Cachoeira do Sul – RS. **Monografia de Trabalho de Conclusão**, UFRGS, Porto Alegre, 99p. 2012.