UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ABILIANE DE ANDRADE PAZETO

Caracterização experimental de soluções de reforço para placas de rochas ornamentais

São Carlos

2017

ABILIANE DE ANDRADE PAZETO

Caracterização experimental de soluções de reforço para placas de rochas ornamentais

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutora em Ciências,
Programa de Pós-graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú

São Carlos

2017

Versão Corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o programa

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P348c Pazeto, Abiliane de Andrade
Caracterização experimental de soluções de reforço
para placas de rochas ornamentais / Abiliane de Andrade
Pazeto; orientador Antenor Braga Paraguassú. São
Carlos, 2007.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

1. Rochas exóticas. 2. Reforço. 3. Teste de flexão.
4. Tensão de serviço. 5. Correlação digital de imagem.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Tecnóloga **ABILIANE DE ANDRADE PAZETO**.

Título da Tese: "Caracterização experimental de soluções de reforço para placas de rochas ornamentais".

Data da defesa: 20/03/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular. **Antenor Braga Paraguassu**
Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Rogério Pinto Ribeiro**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Titular **Eduvaldo Paulo Sichieri**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU-USP)

APROVADA

Prof. Dr. **Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral**
(Universidade Técnica de Lisboa/UTL)

P. APROVADA

Profa. Dra. **Vera Lucia Cordeiro Pires**
(Instituto Superior Técnico de Lisboa/IST)

P. APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Ao meu avô, Sylvio Andrade, o amado “Seu Teco” (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Antenor Braga Paraguassú, meu orientador, pela confiança, suporte financeiro à pesquisa e ajuda incansável nos trabalhos laboratoriais.

À minha família, pelo apoio, por ser meu porto seguro e o incentivo para sempre seguir adiante.

Ao Levi, meu companheiro e melhor amigo, pelas horas de trabalho compartilhada e pelas belas fotografias da tese.

Aos amigos doutorandos e doutores, Phillipe Fernandes, Rafaela Faciola, Paola Arab e Sérgio Trajano, pelo companheirismo e ajuda com as dificuldades da tese.

Aos professores do Departamento de Geotecnia: Cintra, pelo exemplo de educador e pelo conhecimento fundamental adquirido na disciplina “Didática e Oratória”; ao professor Çula pelas revisões nos artigos e opiniões dadas à pesquisa; ao professor Osni, pela oportunidade e orientação durante o Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE).

Ao professor Eduvaldo Sichieri do Instituto de Arquitetura e Urbanismo pelas conversas técnicas, auxílio na elaboração de artigos e pelas considerações valiosas feitas no exame de qualificação.

Aos técnicos do Departamento de Geotecnia: Zé, Dito, Décio e Seu Antônio pela imensa ajuda prestada aos ensaios de laboratório ao longo dos 4 anos de doutorado. Aos técnicos Paulo e Sérgio do Laboratório de Construção Civil do Instituto de Arquitetura e Urbanismo pelo auxílio na execução dos ensaios de aderência com argamassas.

Ao Instituto Superior Técnico de Lisboa, na pessoa do professor Dr. Pedro Miguel A. Amaral pela confiança, oportunidade, acolhida, suporte financeiro à pesquisa e orientação durante o estágio sanduíche.

À Frontwave e sua “equipa”: Isabel Ferreira, Nuno Reis, Andreia Martins, Suzana Lourenço, Adriano Coelho e Cristina Nunes. Todos foram tão queridos e ajudaram com minha adaptação durante meu estágio na empresa e com os trâmites da vida no exterior. Um agradecimento especial: ao Joel Pinheiro (Gordo), por ter se tornado, além de amigo, coorientador, pela companhia e ajuda diária na rotina de laboratório, pelas “boleias” e pela consultoria em música alternativa; ao João Banha, pelo *expertise* em Excel, processamento de dados do Vic-2D e pelas piadas; e ao André Peneda pela confecção dos infinitos corpos de prova e auxílio no manuseio dos equipamentos de laboratório; e àquelas que além de colegas de trabalho se tornaram amigas, Vera Pires e Ana Isabel Silva.

À Granitos de Maceira S.A., na pessoa de seu diretor Armando Ramos e de seus colaboradores pela confecção dos provetes e suporte logístico.

Ao LabHercules da Universidade de Évora, na pessoa do Professor Dr. José Mirão, por ceder o uso da lupa e dos microscópios do laboratório, pelas conversas técnicas e pela análise petrográfica. À doutoranda Patricia Moita pela confecção das lâminas petrográficas e pelo relatório da petrografia.

Ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia – LNEG de Lisboa, na pessoa do Dr. Fernando Oliveira, pelo auxílio na realização do ensaio de frequência de ressonância.

A Capes, pelo suporte financeiro prestado à pesquisa através da bolsa de estudos de doutorado e à bolsa doutorado sanduíche (processo 10097/2014-7).

*O exotismo das cores e texturas das rochas
brasileiras guardam identidade com a multiplicidade
cultural e étnica que caracterizam o Brasil. Ampliar sua
presença no visual urbano mundial é também uma forma
de afirmação desta nossa identidade.*

Carlo Montani

RESUMO

Pazeto, A. A. **Caracterização experimental de soluções de reforço para placas de rochas ornamentais**. 2017. 175 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Um grande número de rochas de granulação grosseira tem valor agregado muito alto quando usadas como materiais de construção, as chamadas rochas exóticas. No entanto, existem problemas com a utilização desses materiais dado a sua fragilidade, que está relacionada com a sua textura muito heterogênea. No Brasil é empregado empiricamente um reforço (compósito) que utiliza resina epóxi e fibra de vidro para melhorar o desempenho mecânico de tais rochas quando empregadas como materiais de construção. Os objetivos da presente pesquisa foram estudar o reforço tradicional brasileiro (telagem) para determinar sua eficiência e, ao mesmo tempo, propor outras soluções de reforço alternativas e mais eficientes, e avaliá-las através da caracterização mecânica experimental. Foi proposto um critério denominado Declive Global para avaliar as tensões de serviço dos materiais pegmatíticos estudados, quando os reforços propostos foram aplicados. Para validar esse critério foi utilizado um sistema de correlação digital de imagem (CDI) para observar e medir o comportamento de deformação e fratura durante a realização de testes de flexão em 4 pontos. Tanto o critério proposto como a CDI mostraram que a propagação de fissuras ocorre muito antes do material atingir a carga máxima. O reforço alternativo proposto, que emprega resina epóxi e uma fibra de vidro 600 g/m² apresentou o melhor desempenho mecânico, elevando a carga de ruptura até 6x em comparação com as amostras onde nenhum reforço foi aplicado. Os resultados demonstrados pelos reforços propostos são promissores e aumentam a possibilidade de aplicar rochas exóticas frágeis como materiais de construção, além do critério proposto fornecer uma ferramenta importante para a compreensão mecânica prévia de produtos de rocha que utilizam reforços compósitos.

Palavras-chave: Rochas exóticas. Reforço. Teste de flexão. Tensão de serviço. Correlação digital de imagem.

ABSTRACT

Pazeto, A. A. **Experimental characterization of reinforcement to ornamental stones slabs**. 2017. 175 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

A great number of coarse-grained natural stones have very high added-value when used as building materials, the so called exotic stones. However, problems using these materials arise from its brittleness behavior, which are related to its very heterogeneous texture. Glass fiber-reinforced epoxy composite (GFRC) is being used to improve mechanical performance of such stones when employed as building materials. The objectives of this present investigation it were studying the Brazilian traditional reinforcement to determinate its efficiency and, at the same time, a number of alternative solutions were proposed and evaluated through experimental mechanical characterization. It was proposed a slope-based criterion to evaluate the useful service loads of pegmatitic materials when glass fiber-reinforcement is applied. To validate the proposed criterion, a digital image correlation (DIC) system was employed to observe and measure strain and fracture behavior during the realization of 4-point bending tests. Both proposed criterion and DIC show that crack propagation occurs long before the material reaches maximum load. GFRC acts as a crack inhibitor, raising the breaking load up to 6x in comparison with the specimens where no reinforcement was applied. The results from this study enhance the capability to apply such materials as building materials and provide an important tool to perform prior mechanical understanding of stone products using GFRC.

Key-words: Coarse-grained exotic stones. Reinforcement. Bending test. Useful service load. Digital image correlation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ranking dos maiores produtores de rochas em 2013.	34
Figura 2.2. Evolução das exportações brasileiras de rochas brutas (RB) e processadas (RP) - participação percentual no faturamento do período 1998-2015.	36
Figura 2.3. Consumo interno (em milhões de m ²) por tipo de rocha em 2014.	37
Figura 2.4. Fluxograma das principais etapas e processos envolvidos na cadeia produtiva de rochas.	38
Figura 2.5. Vista panorâmica de uma pedreira sendo lavrada pelo método de bancadas altas. (A) isolamento de grandes painéis de rocha; (B) blocos sendo subdivididos por maquinário de perfuração contínua.	39
Figura 2.6. (A) Bloco a ser desdobrado em tear multilâminas; (B) chapas brutas após serragem.	40
Figura 2.7. (A) Multifio diamantado; (B) detalhe do corte sendo realizado.	40
Figura 2.8. Politriz automática multicabeça exibindo rebolos abrasivos fixados nos cabeçotes.	41
Figura 2.9. Linha de resinagem automática de uma grande empresa de Cachoeiro de Itapemirim – ES: (A) chapa levigada; (B) aplicador do sistema epóxi; (C) secador onde as chapas são curadas.	43
Figura 2.10. Forno automático a gás.	43
Figura 2.11. Forno automático elétrico.	44
Figura 2.12. Maçarico a gás (pela-porco).	44
Figura 2.13. (A) Pesagem e (B) aplicação do sistema epóxi.	45
Figura 2.14. Ladrilho sendo dimensionado em cortadeira de disco diamantado.	46
Figura 2.15. Layout geral do StoneCut.	47
Figura 2.16. Sistema de revestimento de fachadas com placas de rocha, onde: (a) estrutura da edificação; (b) insert; (c) placa de rocha e (d) colchão de ar.	49
Figura 2.17. Chapa polida (A) e detalhe (B) do sienogranito de nome comercial Vermelho Brasília.	51
Figura 2.18. Pegmatito de nome comercial Iberê Crema Bordeaux.	52
Figura 2.19. A infinidade de aplicações que a rocha ornamental oferece.	53
Figura 2.20. Espessura da Light Stone® (0,6 cm) comparada com a de um telefone celular.	54
Figura 2.21. Puff retroiluminado feito em mármore.	55
Figura 2.22. Possibilidades de fachadas 3D produzidos pela empresa Solancis S.A – PT.	56
Figura 2.23. Estrutura geral de uma resina DGEBA, em que <i>n</i> corresponde ao grau de polimerização.	58
Figura 2.24. Mecanismo clássico de cura de uma resina epóxi mediante reação com amina secundária.	58
Figura 2.25. Reações para obtenção de resina poliéster termofixa.	59
Figura 2.26. Processo de telagem de chapas de rochas em uma grande indústria de Cachoeiro de Itapemirim, estado do Espírito Santo: (A) aplicação do sistema epóxi sobre a chapa a ser telada; (B) distribuição por toda extensão da chapa; (C) aplicação da tela de fibra de vidro e (D) fixação da tela sobre a resina.	62
Figura 2.27. Chapa do material de nome comercial Bronzzo: (A) vazios que foram preenchidos com o “estruque” e (B) aspecto da chapa polida após o processo de estucamento.	63
Figura 2.28. Reforço com argamassa.	64
Figura 2.29. Rodding.	65
Figura 2.30. Aspecto geral de uma estrutura honeycomb montada (A), suas camadas de revestimento (B) e o núcleo favo de mel (C).	68
Figura 2.31. Pannel SPP feito com mármore Saint Laurent.	68
Figura 2.32. Tecnologia Slimstone, com honeycomb em polipropileno.	69
Figura 2.33. Composição do Stork: pedra com 5mm (A), tecido de fibra de vidro (B) e cortiça (C).	70
Figura 2.34. Ensaio de flexão por carregamento em 3 (esquerda) e 4 pontos (direita) segundo Lewis (1995): configuração (A), esquema estático (B), diagrama de esforço cortante (C) e diagrama de momento fletor (D).	73

Figura 2.35. Strain gage que mede deformações no sentido horizontal.	74
Figura 2.36. Visão parcial do padrão pintado na superfície frontal de uma amostra para ensaio de flexão.	76
Figura 2.37. Imagem de corpo de prova após ensaio de flexão e análise do Vic-2D.	77
Figura 2.38. Curva de tensão-deformação ideal obtida durante teste de compressão uniaxial (BOGUSZ & BUKOWSKA, 2015): σ - tensão; ε - deformação; σ_{cr} - tensão crítica; σ_{res} - tensão residual; ε_{cr} - deformação crítica; ε_{res} - deformação residual; E - módulo de Young; E_s - recuperação do módulo de elasticidade; M - módulo de falha pós-pico.	78
Figura 2.39. Modelo de comportamento tensão-deformação segundo a resistência de pico.	79
Figura 2.40. Típico diagrama tensão-deformação para comportamento de um material quase-frágil.	
Figura 2.41. Modelo da fratura coesiva de Hillerborg.	82
Figura 3.1. Megacristal de quartzo extraído do Pegmatito do Sapo (MG).	88
Figura 3.2. Corpos pegmatíticos; (A) perfil transversal de pegmatito em forma de balão, com alto ângulo de mergulho e (B) perfil transversal de pegmatito lenticular, horizontal.	89
Figura 3.3. Classificação estrutural de pegmatitos segundo Johnston (1945) e Rolff (1945): (A) homogêneo, (B) heterogêneo e (C) misto.	90
Figura 3.4. Províncias pegmatíticas brasileiras. No mapa: Província Pegmatítica do Nordeste (destaque laranja), Província Pegmatítica Oriental (destaque azul) e Província Meridional (destaque verde).	93
Figura 3.5. Chapa do pegmatito de nome comercial “Delicatus Gold”, ainda hoje muito bem aceito no mercado externo.	96
Figura 3.6. Painel paginado do Ônix de nome comercial Facination.	101
Figura 3.7. Bancada confeccionada em rocha exótica de nome comercial Mirage.	102
Figura 3.8. Detalhe de uma lareira confeccionada em material exótico de nome comercial Fusion.	102
Figura 3.9. Cuba e pia de banheiro confeccionada em ônix de nome comercial Bianco Andino.	103
Figura 3.10. Escada confeccionada em quartzito de nome comercial Gaya.	103
Figura 3.11. Zona de ruptura em corpo de prova do pegmatito Iberê Plantus segundo clivagem da biotita (detalhe pontilhado).	105
Figura 3.12. Zona de ruptura no pegmatito Tropical Treasure com alteração intempérica, após ensaio de tração na flexão.	106
Figura 4.1. Fluxograma do programa experimental da etapa 1.	109
Figura 4.2. Fluxograma do programa experimental da etapa 2.	110
Figura 4.3. Macrocristal de quartzo (A) e feldspato (B) .	111
Figura 4.4. Chapa polida (A) e detalhe (B) do sienito de nome comercial Ocre Itabira.	112
Figura 4.5. Chapa polida (A) e detalhe (B) do pegmatito de nome comercial Iberê Plantus.	113
Figura 4.6. Fotomicrografia do Iberê Plantus: (Pl) plagioclásio, (Ms) muscovita e (Bt) biotita. Nicóis cruzados.	113
Figura 4.7. Chapa polida (A) e detalhe (B) do pegmatito de nome comercial Tropical Treasure.	114
Figura 4.8. Fotomicrografia do material Tropical Treasure: (Pl) plagioclásio e (Tm) turmalina; Nicóis cruzados.	114
Figura 4.9. Fotomicrografia do material Iberê Crema Bordeaux: (Mc) microclínio e (Bt) biotita; Nicóis cruzados.	115
Figura 4.10. Placa polida do pegmatito Carnaval.	116
Figura 4.11. Fotomicrografias do pegmatito Carnaval: A - arrancamento no microclínio associado à clivagem (seta); B - contato lobulado entre microclínio (mcr) e quartzo (qtz) e C - macla do microclínio (mcr) e exsolução de plagioclásio sódico (plg) (pertitas).	117
Figura 4.12. Placa antes (A) e depois (B) do teste com líquido penetrante.	118
Figura 4.13. Em a) típico contato planar entre um cristal de quartzo (Q) e microclínio (M) e em b) pobre imbricamento denotado por contatos semilobulados. Notar os planos de clivagem e as microfissuras preenchidas por caulinita no microclínio.	119
Figura 4.14. Fibra de vidro de (A) 150 e (B) 600g/m ² .	121
Figura 4.15. Fibras curtas de sisal (10mm).	121
Figura 4.16. Ilustração esquemática do sistema de canaletas.	123

Figura 4.17. Resultado dos ensaios de tração dos compósitos com (A) 1, (B) 3 e (C) 5% de fibra de sisal.	126
Figura 4.18. Vista parcial de corpo de prova reforçado com o novo sistema de canaletas preenchido apenas por epóxi.	127
Figura 4.19. Primeira adaptação do ensaio: (A) base com sulcos concêntricos e topo do dispositivo de acoplamento, e (B) impressão da superfície do dispositivo de alumínio deixada na resina sobre os macrocristais.	127
Figura 4.20. Ilustração esquemática da segunda adaptação.	128
Figura 4.21. Amostras dos tipos de reforço aplicados nas rochas exóticas: TT - rocha ao natural; TTTV - rocha reforçada com epóxi e fibra de vidro 150g/m ² ; TTCS - rocha com canaletas, reforçada com compósito de fibra de sisal com 10mm e TTSSm - rocha reforçada com compósito de fibra de sisal com 10mm.	129
Figura 4.22. Sistema Vic-2D: (A) software de aquisição, (B) câmera para aquisição de imagens, (C) amostra a ser ensaiada e (D) célula de carga da máquina de ensaios.	131
Figura 4.23. Amostras posicionadas sobre os roletes da máquina de ensaio antes do de flexão. O esquema ilustra a AOI para cálculo da deformação para as amostras (A) sem reforço, ou reforçadas somente com as resinas e (B) reforçadas com a fibra de vidro 600g/m ² .	132
Figura 4.24. Execução do ensaio para determinação da frequência de ressonância na flexão: A- amostra, B- microfone e C- software de aquisição de dados.	134
Figura 5.1. Macrocristal de (A) quartzo e (B) de feldspato após o arrancamento (pull-out).	136
Figura 5.2. Resistência à flexão em 4 pontos para a rocha piloto Ocre Itabira no estado natural (R) e com os cinco tipos de reforço estudados.	138
Figura 5.3. Visão parcial de um corpo de prova reforçado com fios de sisal (RFS). Notar falta de paralelismo na disposição dos fios; S- extensômetro.	139
Figura 5.4. Resistência à flexão em 4 pontos calculada para as rochas exóticas ao natural e reforçadas de três maneiras distintas.	140
Figura 5.5. Corpo de prova do pegmatito de nome comercial Tropical Treasure após ensaio de flexão em 4 pontos. Notar alteração intempérica e megacristal de schorlita.	141
Figura 5.6. Corpo de prova do pegmatito de nome comercial Iberê Plantus após ensaio de flexão em 4 pontos. Notar plano de ruptura segundo leito de biotita.	142
Figura 5.7. Corpo de prova do gnaisse de nome comercial Iberê Crema Bordeaux após ensaio de flexão em 4 pontos. Notar plano de ruptura segundo megacristal de microclínio.	143
Figura 5.8. Resistência à flexão 4 pontos calculada para o pegmatito Carnaval ao natural (K) e reforçado de dez formas distintas. A linha preta corresponde à resistência à flexão mínima preconizada pela NBR 15844 (ABNT, 2015) para o uso de granitos ornamentais.	147
Figura 5.9. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval sem reforço (K); Max. S: máximo declive, Max. S-7%: máximo declive decrescido em 7% e S: declive global.	150
Figura 5.10. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com epóxi Tenax (KE1). Max. S: máximo declive, Max. S-7%: máximo declive decrescido em 7% e S: declive global.	151
Figura 5.11. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com epóxi Tenax e tecido de vidro 600g/m ² (KE1Fv). Max. S: máximo declive, Max. S-7%: máximo declive decrescido em 7% e S: declive global.	151
Figura 5.12. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com epóxi Tenax e tecido de vidro 150g/m ² (KE1Tv). Max. S: máximo declive, Max. S-7%: máximo declive decrescido em 7% e S: declive global.	152
Figura 5.13. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com o sistema de canaletas e o epóxi Tenax (KE1C). Max. S: máximo declive, Max. S-7%: máximo declive decrescido em 7% e S: declive global.	153
Figura 5.14. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com epóxi Tenax e tecido de vidro (KE1S). Max. S: máximo declive, Max. S-7%: máximo declive decrescido em 7% e S: declive global.	154
Figura 5.15. Evolução da deformação horizontal (ϵ_x) para o pegmatito sem reforço (K) em diferentes fases de carregamento.	155
Figura 5.16. Evolução da deformação horizontal (ϵ_x) para o pegmatito reforçado com epóxi e	

fibra de vidro 600 g/m² (KE1Fv) em diferentes fases de carregamento.

155

Figura 5.17. Análise microestrutural da superfície das amostras: **A-** típica fissura de alívio de tensão devido à nucleação de microfissuras em um megacrystal de microclínio; **B-** falha da amostra de pegmatito sem reforço (K) originada no contato entre um cristal de quartzo e feldspato; **C-** uma fissura surge na amostra reforçada com epóxi e fibra de vidro 600 g/m² (KE1Fv) devido à delaminação; **D-** Ruptura da amostra reforçada (KE1Fv) relacionada ao plano de fraqueza no megacrystal de microclínio (notar clivagem em duas direções).

156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades das resinas epóxi e poliéster.	60
Tabela 2.2. Propriedades físicas e mecânicas das fibras de vidro Tipo E e Tipo S	60
Tabela 3.1. Rochas exóticas comercializadas por indústrias brasileiras.	98
Tabela 3.2. Materiais exóticos e propriedades petrográficas relacionadas.	104
Tabela 4.1. Dados de caracterização tecnológica do sienito Ocre Itabira (PAZETO, 2011).	112
Tabela 4.2. Propriedades físicas das rochas exóticas estudadas.	116
Tabela 4.3. Propriedades físicas do pegmatito Carnaval.	118
Tabela 4.4. Propriedades físico-mecânicas das resinas estudadas.	120
Tabela 5.1. Tipos de reforço estudados.	137
Tabela 5.2. Resistência à flexão em 4 pontos para a rocha piloto Ocre Itabira (R) no estado natural e com os cinco tipos de reforço estudados; δ : desvio padrão e C_v : coeficiente de variação.	137
Tabela 5.3. Siglas e tipos de reforço estudados para as rochas exóticas Tropical Treasure (TT), Iberê Plantus (IP) e Iberê Crema Bordeaux (CB).	139
Tabela 5.4. Resistência à flexão em 4 pontos calculada para as rochas exóticas Tropical Treasure (TT), Iberê Plantus (IB) e Crema Bordeaux (CB) ao natural, e reforçadas de três maneiras distintas; δ : desvio padrão e C_v : coeficiente de variação.	140
Tabela 5.5. Siglas e tipos de reforço estudados para o pegmatito de nome comercial Carnaval (K).	146
Tabela 5.6. Incremento na resistência à flexão 4 pontos ($\Delta\sigma$) para os tipos de reforço efetuados, em relação ao pegmatito sem reforço (K).	147
Tabela 5.7. Módulo de elasticidade (E) obtido pelo modo estático e dinâmico para o pegmatito sem reforço (K) e reforçado de cinco formas distintas.	155

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

AOI – Area of Interest (área de interesse)

CEI – Companhia de Equipamentos Industriais

CNC – Computer Numeric Control

CMP – Compósitos de Matriz Polimérica

EUA – Estados Unidos da América

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

KE1 – rocha Karnaval reforçada com epóxi Tenax

KE2 – rocha Karnaval reforçada com epóxi Resoltech

KPo – rocha Karnaval reforçada com poliéster

KUr – rocha Karnaval reforçada com uretano-acrilato

KE1Tv – rocha Karnaval reforçada com epóxi Tenax e fibra de vidro 150g/m²

KE1Fv – rocha Karnaval reforçada com epóxi Tenax e fibra de vidro 600g/m²

KE2Fv – rocha Karnaval reforçada com epóxi Resoltech e fibra de vidro 600g/m²

KPoFv – rocha Karnaval reforçada com poliéster e fibra de vidro 600g/m²

KE1S – rocha Karnaval reforçada com compósito de sisal 3%

KE1C – rocha Karnaval com canaletas reforçadas com epóxi Tenax

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

MFF – Modelo de Fissura Fictícia

MIA – Marble Institute of America

NBR – Norma Brasileira

PMEK – Peróxido Orgânico Metil Etil Cetona

PVC – Policloreto de Vinila

UV – Ultravioleta

SPP – Stone Performance Process

TS – Tensão de Serviço

TT – rocha Tropical Treasure ao natural

TTTV – rocha Tropical Treasure reforçada com epóxi e fibra de vidro 150g/m²

TTCS – rocha Tropical Treasure com canaletas, reforçada com compósito de fibra de sisal com 10mm

TTSSm – rocha Tropical Treasure reforçada com compósito de fibra de sisal com 10mm.

LISTA DE SÍMBOLOS

Abs – coeficiente de absorção d'água

b – largura

b – distância à linha neutra

d – altura

Δy – média dos deslocamentos ao longo do eixo y

E – módulo de Young

E_a – epóxi à base d'água

E_s – epóxi à base de solvente

E_s – recuperação do módulo de elasticidade

ε – deformação

ε_x – deformação Lagrange

ε_{cr} – deformação crítica

ε_{res} – deformação residual

f_f – frequência fundamental de ressonância na flexão

G – módulo cisalhante

G – taxa de liberação de energia

G_c – taxa de liberação de energia crítica de fratura

I – segundo momento de área da seção transversal

K – módulo de Bulk

L – comprimento inicial

L – vão do ensaio

M – momento entre roletes

M – módulo de falha pós-pico

m – massa

n – grau de polimerização

P – carga de ruptura

P_t – quantidade total de resina

P_r – quantidade de resina calculada com base na área da amostra

P_f – peso da fibra

ρ – raio de curvatura

λ – coeficiente de Lamé

δ – variação no comprimento

R_0 – resistência inicial

T_I – fator de correção para ondas na flexão

t – espessura

σ_t – tensão de ruptura na flexão

σ_{cr} – tensão crítica

σ_{res} – tensão residual

σ – tensão máxima

σ_c – tensão de ruptura

u – deslocamentos ao longo do eixo x

ν – coeficiente de Poisson

v – deslocamentos ao longo do eixo y

w – deslocamento

w_c – deslocamento crítico

SUMÁRIO

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	28
1.1. Justificativa e Caracterização do Problema	28
1.2. Hipótese	30
1.3. Objetivos	30
Capítulo 2 – ESTADO DA ARTE	32
2.1. Panorama da Indústria de Rochas Ornamentais	32
2.1.1. Perfil econômico mundial	33
2.1.2. Perfil econômico brasileiro	35
2.1.3. Cadeia produtiva	37
2.1.3.1. Extração	38
2.1.3.2. Serragem	39
2.1.3.3. Polimento	41
2.1.3.4. Resinagem	42
2.1.3.5. Corte final	45
2.1.3.6. Sistemas de fixação	47
2.1.3.6.1. Sistema aderente	47
2.1.3.6.2. Sistema não aderente	48
2.1.4. Tipos comerciais de rochas ornamentais	49
2.1.4.1. “Granitos”	50
2.1.4.2. Pegmatito	51
2.1.4.3. Aplicações e produtos em rocha ornamental	52
2.2. Metodologias para Reforço em Placas de Rochas Ornamentais	56
2.2.1. Materiais de reforço tradicionais	57
2.2.1.1. Resinas epóxi	57
2.2.1.2. Resinas de poliéster insaturado	58
2.2.1.3. Fibra de vidro	60
2.2.2. Técnicas de reforço tradicionais	61
2.2.2.1. Telagem	61
2.2.2.2. Estucamento	62
2.2.2.3. Consolidação	63
2.2.2.4. Mastique	63
2.2.2.5. Reforço com argamassa	64
2.2.2.6. Rodding	65
2.2.3. Novas Tendências	65
2.2.3.1. Resinas epóxi em emulsão aquosa	66
2.2.3.2. Poliuretano á base de mamona	66
2.2.3.3. Estruturas honeycomb	67
2.2.3.4. Stork®	70
2.2.4. Compósitos reforçados com fibra natural	70
2.3. Comportamento Mecânico de Rochas Ornamentais com e sem Reforço	72
2.3.1. Metodologias de ensaio para avaliação do comportamento mecânico	72
2.3.2. Soluções para análise da deformação	74
2.3.2.1. Strain gages	74
2.3.2.2. Vic-2D	75
2.3.3. Análise de Propriedades Mecânicas	77

2.3.3.1. Curvas tensão – deformação	77
2.3.3.2. Constantes elásticas	82
2.3.4. Relação entre comportamento mecânico e propriedades petrográficas das rochas	84
2.3.4.1. Adesão mineral	85
Capítulo 3 – ROCHAS ORNAMENTAIS EXÓTICAS: RELAÇÃO ENTRE GEOLOGIA E INDÚSTRIA	86
3.1. Geologia dos Pegmatitos	86
3.1.1. Definições	86
3.1.2. Ocorrência e morfologia	88
3.1.3. Classificação, mineralogia e zoneamento	89
3.1.4. Gênese	91
3.1.5. Importância econômica	92
3.1.6. Províncias pegmatíticas no Brasil	93
3.1.6.1. Província Pegmatítica Oriental	93
3.1.6.2. Província Pegmatítica do Nordeste	94
3.1.7. Aplicação dos pegmatitos como rochas ornamentais.	95
3.2. Aplicações na Arquitetura	100
3.3. Problemas de Engenharia	104
Capítulo 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	108
4.1. Rochas e Principais Minerais Constituintes	110
4.1.1. Macrocristais das rochas exóticas	110
4.1.2. Rocha piloto	111
4.1.3. Rochas exóticas	112
4.1.3.1. Iberê Plantus	113
4.1.3.2. Tropical Treasure	114
4.1.3.3. Iberê Crema Bordeaux	115
4.1.3.4. Karnaval	116
4.2. Resinas (matrizes)	119
4.3. Fibras (reforço)	120
4.3.1. Sintéticas	120
4.3.2. Natural	121
4.4. Metodologias de Reforço	122
4.4.1. Procedimentos na 1ª etapa	122
4.4.1.1. Reforço industrial	122
4.4.1.2. Reforço com sisal	122
4.4.2. Procedimentos na 2ª etapa	123
4.4.2.1. Reforço industrial	124
4.4.2.2. Reforço com sisal	124
4.5. Ensaios Mecânicos	127
4.5.1. Teste de aderência (pull-out)	127
4.5.2. Flexão em 4 Pontos	128
4.5.2.1. Procedimentos na 1ª etapa	128
4.5.2.2. Procedimentos na 2ª etapa	129
4.5.3. Análise do comportamento elástico	130
4.5.3.1. Set-up Vic-2D	130

4.5.3.2 Sincronização dos dados	132
4.5.3.3. Critério de análise proposto	132
4.5.3.4. Determinação do módulo de elasticidade na flexão	133
Capítulo 5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	136
5.1. Aderência dos Minerais (pull-out)	136
5.2. Resistência à Flexão 4 Pontos	137
5.2.1. Primeira etapa	137
5.2.2. Segunda etapa	146
5.2.2.1. Tensão de serviço x tensão máxima	149
5.2.2.2. Análise do comportamento elástico	154
5.2.2.2.1. Vic-2D	154
5.2.2.2.2. Análise da rigidez	156
Capítulo 6 - CONCLUSÕES	160
REFERÊNCIAS	164

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa e Caracterização do Problema

A indústria de rochas ornamentais possui importância econômica mundial, dada sua estreita relação com o macrossetor da construção civil. Dentro desse cenário, o Brasil ocupa uma posição estratégica, pois é o único líder ocidental do setor. Segundo Montani (2016), a estimativa de produção global em 2015 foi de 140 milhões de toneladas, sendo o Brasil o 4º maior produtor (8,2 milhões de ton.) e o 5º maior exportador de rochas silicáticas.

Na indústria brasileira, os produtos que possuem maior valor agregado recebem a classificação comercial de “rochas exóticas”, denominação que faz referência ao padrão de cores e texturas peculiares desses materiais. Os pegmatitos graníticos (composição quartzo-feldspática), muito bem aceitos pelo mercado norte-americano, são os principais representantes dessa categoria. Em média, uma rocha exótica de boa aceitação comercial custa US\$180,00/m², mas há materiais que podem alcançar o dobro deste valor. Os preços elevados praticados pela indústria não devem-se somente ao apelo visual, mas sobretudo pelo alto custo de produção dos materiais exóticos.

Pegmatitos são rochas de textura grossa, extremamente heterogêneas, o que faz com que sejam muito frágeis do ponto de vista mecânico (FENER; INCE, 2012; ONODERA; KUMARA, 1980; SINGH, 1981; TUĞRUL; ZARIF, 1999; YILMAZ; GOKTAN; KIBICI, 2010). Durante o beneficiamento, as placas de rocha são submetidas a diferentes solicitações de carga, principalmente impacto, vibrações e flexão, que podem causar a quebra do material (LÓPEZ-BUENDÍA et al., 2013), fazendo com que a taxa de aproveitamento seja baixa e consequentemente aumentando o custo do produto final.

É importante mencionar que a inserção das rochas exóticas no mercado está diretamente relacionada com o desenvolvimento da técnica de reforço, mais conhecida na indústria como “telagem”. O processo consiste basicamente da aplicação de um sistema epóxi e uma tela de fibra de vidro no tardo¹ da chapa, e busca atenuar o surgimento de quebras ou trincas durante o acabamento e o transporte das chapas (LÓPEZ-MONTEAGUDO et al., 2004).

¹Superfície contrária à que receberá o polimento.

A técnica de reforço surgiu no Brasil na década de 90 e foi a primeira solução tecnológica desenvolvida pelo setor para viabilizar o beneficiamento e a comercialização dos materiais frágeis (ALENCAR, 2013). No entanto, ainda existem muitas lacunas críticas com relação ao processo que necessitam ser aprimoradas.

Assim como a maioria dos processos produtivos adotados pela Indústria da Pedra, o reforço vem sendo feito desde o início de forma empírica. Os estudos sobre consolidação de rochas silicáticas são escassos na literatura (DELGADO RODRIGUES; COSTA, 1996a; 1996b; 2008; MOSQUERA, 2000), principalmente as de gênese brasileira (PAZETO; PARAGUASSÚ, 2013), o que implica na necessidade de pesquisas científicas aprofundadas e quantitativas que poderão proporcionar melhorias nessa prática industrial.

Além disso, durante o programa de visitas técnicas desta pesquisa, pelo menos três problemas industriais foram identificados no processo de reforço tradicional que denotam sua baixa eficácia:

- Segundo relatado por fabricantes², mesmo após reforçadas ocorre uma taxa de 15% de quebras inesperadas em placas de granitos exóticos durante a movimentação rotineira dentro da indústria;
- Existem materiais com demanda e valor de mercado, mas que estão estocados no pátio das empresas porque o reforço atualmente praticado é insuficiente para que as placas resistam à etapa de polimento. Relacionado a isto há ainda o fato de que em média 75% das placas de exóticos são serradas com 30mm de espessura, para prevenir quebras no polimento, o que encarece 35% o custo do m² em relação à espessura de 20mm.
- Para alguns tipos de materiais exóticos, a telagem por si só não é suficiente para conferir estabilidade mecânica à placa, sendo necessário ainda uma espécie de reforço dirigido, conhecido como estucamento (*filling*). Este processo consiste no preenchimento das fissuras abertas presentes na chapa com resina epóxi e pó da própria rocha, antes da telagem.

O somatório dos problemas industriais apresentado demonstra a necessidade de se desenvolver outras soluções de reforço, mais eficientes. A crescente tendência do mercado em produzir chapas de espessuras cada vez mais finas (12 – 5mm) para se reduzir custos com

² Comunicação verbal feita com 5 empresas exportadoras do estado do Espírito Santo em janeiro de 2013.

transporte e ampliar o uso das rochas, incluindo as exóticas, evidencia ainda mais essa necessidade.

1.2.Hipótese

As rochas ornamentais são materiais naturalmente heterogêneos, com propriedades petrográficas que variam em função do ambiente geológico formador. Nos materiais exóticos, essa heterogeneidade é ainda mais pronunciada, resultando em propriedades de engenharia (resistência à tração e/ou flexão) inferiores quando comparados às rochas comuns.

As indústrias exportadoras geralmente comercializam uma ampla gama de materiais exóticos, que geologicamente correspondem a tipos rochosos distintos (pegmatitos, gnaisses, quartzitos, etc.). Apesar disto, o reforço desses materiais é feito da mesma forma, o que implica, muitas vezes, em um processo ineficaz ou insuficiente.

Diante do baixo desempenho da telagem industrial atualmente praticada, são propostas outras configurações de reforço, inclusive empregando sistemas termorígidos e fibras de vidro de qualidade superior aos insumos tradicionais. Espera-se com isto estabelecer uma metodologia embasada para reforço de rochas frágeis, e que possibilite a utilização de materiais não comercializáveis em produtos com um comportamento mecânico que esteja em conformidade com as normas de desempenho aplicáveis.

1.3. Objetivos

Os objetivos fundamentais desta pesquisa foram avaliar o resultado da técnica de telagem aplicada tradicionalmente na indústria por meio da caracterização mecânica experimental das rochas exóticas selecionadas, e estudar soluções de reforço alternativas e eficientes que permitam ampliar o uso dos materiais frágeis.

Como objetivos específicos, pode-se apontar:

- Definir bases científicas para o reforço de rochas ornamentais frágeis que diminuam o empirismo do processo (Quais os insumos mais adequados? Como se aplicam? Em que quantidades? Quais as condições críticas?)
- Estabelecer relações entre o comportamento mecânico e as propriedades petrográficas das rochas.

- Entender como cada componente do sistema (rocha-resina-fibra) interage com os demais e o grau de influência que exerce nos resultados.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

2.1. Panorama da Indústria de Rochas Ornamentais

Segundo a NBR 15012 (ABNT, 2013), as rochas ornamentais compreendem uma grande diversidade de materiais naturais que podem ser extraídos, cortados em formas variadas e ter suas faces beneficiadas por meio de polimento, esquadrejamento, e outras formas de industrialização para serem utilizadas com fins estéticos. Quando aplicadas no acabamento de superfícies são especificamente chamadas rochas de revestimento.

Desde a Pré-História cada civilização usou e trabalhou a rocha de acordo com as suas necessidades: como instrumento de trabalho e para sua própria defesa, como matéria prima para confecção de obras de arte, e posteriormente na construção civil, empregando-a como constituintes estruturais (colunas e arcos). Atualmente destaca-se o constante crescimento do emprego das rochas no setor imobiliário, em pisos e fachadas (ALENCAR, 2013; MONTANI, 2015).

As rochas ornamentais consolidaram-se como materiais de construção nobres pelo seu requinte, excelentes propriedades funcionais e versatilidade na obtenção de diferentes elementos. Além disso, são distinguidos dos produtos industrializados por seus atributos estéticos naturais, como as diferenciadas combinações de estruturas (desenhos, movimentos), texturas (dimensão e arranjo de cristais) e padrões cromáticos.

Segundo Alencar (2013), a indústria de transformação brasileira ganhou impulso significativo a partir da década de 50, quando começaram a ser desenvolvidos os teares multilâmina e as outras tecnologias necessárias à produção em grande escala. Numa perspectiva um pouco mais recente, Montani (2015) qualifica o panorama da indústria de rochas no Brasil como “um período de progresso acelerado, resultando em uma evolução silenciosa e persistente nos últimos 30 anos”.

Atualmente, projeções de órgãos oficiais do setor brasileiro de rochas ornamentais consideram a existência de mais de 10.000 empresas integradas à cadeia produtiva do setor, incluindo 400 empresas exportadoras, que geram juntas mais de 120.000 empregos.

Pela sua constante expansão, as perspectivas de Chiodi Filho (2017) são positivas, pois consideram a Indústria da Pedra como uma das mais promissoras áreas de negócios no

seguimento minero-industrial, devido especialmente à última década que tem apresentado evoluções tecnológicas muito significativas, dando destaque às seguintes:

- Incremento na utilização de fios diamantados na lavra e beneficiamento;
- Aumento das importações brasileiras de teares, primeiro dos multilâmina convencionais e, mais recentemente, dos multifio diamantados.
- Constante substituição das politrizes manuais e semiautomáticas pelas politrizes automáticas multicabeça.
- Diversificação da produção de rochas, envolvendo os denominados materiais exóticos;

O esforço da indústria de rochas brasileira é admirável e os investimentos no parque tecnológico fizeram com que o país se tornasse o líder ocidental do setor e o principal fornecedor para o mercado dos EUA, gerando US\$ 792 milhões de exportações líquidas em 2015 (CHIODI FILHO, 2017).

O grau de maturidade deste setor parece ter sido atingido, no entanto Montani (2015) faz importantes observações quanto aos desafios desta indústria para os próximos anos. Segundo o autor, a estratégia de crescimento deve passar pela conquista de novos mercados e de novos desenvolvimentos tecnológicos visando a “terceira onda de exportação”, que é a mais desafiadora, pois envolve o fornecimento de produtos finais de elevado valor agregado para obras de grande porte físico.

Há ainda de se salientar que a Indústria da Pedra necessita de muitos estudos acadêmicos, em toda sua cadeia produtiva. Esta carência justifica-se principalmente no fato de que as técnicas de produção do setor foram se estabelecendo de forma empírica ao longo dos anos. Além disso, embora já existam alguns estudos sobre os processos de extração (MARCON; CASTRO; VIDAL, 2012; REGADAS, 2006), serragem (COIMBRA FILHO, 2006; RIBEIRO, 2005; SOUZA; VIDAL; CASTRO, 2014) e polimento (CAMARGO, 2013; NEVES, 2010; SILVEIRA, 2007), a gama de materiais brasileiros hoje disponíveis no mercado é muito vasta, ampliando cada vez mais o campo a ser estudado.

2.1.1. Perfil econômico mundial

As informações abaixo são todas baseadas no relatório global de Montani (2016).

A Indústria da Pedra representa um dos segmentos com maior relevância econômica em nível mundial. Somente em 2015, as transações comerciais do setor movimentaram

globalmente mais de US\$ 22,7 bilhões, não estando incluídos nesse montante os negócios com máquinas, equipamentos, insumos e serviços que constituem outra receita de grande valor.

A produção mundial de rochas ornamentais e para revestimento atingiu 140 milhões de toneladas em 2015. Os mármore e demais rochas carbonáticas corresponderam a 58% desse montante, os granitos, quartzitos e similares compreenderam 38%, enquanto que as demais rochas, sobretudo as ardósias, atingiram 4% da produção total. Se transformada, a produção global equivale a mais de 1,5 bilhão de m² de chapas com 2cm de espessura, que corresponde ao consumo mundial de rochas em 2015. Desse total, 75% foram utilizados em edificações, principalmente nas formas de pisos e fachadas.

A Figura 2.1 apresenta o ranking dos dez maiores produtores com seus respectivos volumes físicos produzidos. É interessante observar que ao longo dos anos a participação de países extraeuropeus tem crescido e ocupado o lugar dos líderes tradicionais, como Itália e Espanha.

Figura 2.1. Ranking dos maiores produtores de rochas em 2015.

Fonte: O Autor.

Em relação às exportações, o Brasil colocou-se como o 6º maior exportador mundial, em volume físico total, atrás de China, Índia, Turquia, Itália e Espanha, nesta ordem. No entanto posicionou-se em 2º lugar como exportador de blocos de granitos e o 5º maior exportador de chapas polidas. A Turquia apresentou-se como maior exportador mundial de rochas carbonáticas; a Índia de blocos de rochas silicáticas; a China de produtos de

processamento simples e especial (chapas e produtos acabados) e, a Espanha, de produtos de ardósia.

Quanto ao fluxo comercial, tem-se que as vendas de blocos de rochas carbonáticas, pela Turquia, assim como as de blocos de granitos e similares, pela Índia e Brasil, são fortemente direcionadas para a China. As vendas chinesas de chapas polidas têm como principal destino o abastecimento interno de Taiwan e Hong Kong, seguindo-se os EUA e a Alemanha em um patamar inferior. Os principais mercados das ardósias espanholas, sobretudo na forma de telhas, são os da França, Reino Unido e Alemanha, respectivamente.

Os maiores importadores foram a China (blocos, sobretudo de granito), EUA e Coreia do Sul (chapas acabadas).

Há ainda alguns fatores importantes a se considerar. Desde 2011 o Brasil é o principal fornecedor de rochas para os EUA. No entanto, este posicionamento diz respeito ao volume físico. Quando se compara o preço médio/ton importado pelos EUA, nota-se que os produtos acabados, com um valor agregado muito superior, são provenientes da China e Itália, fornecedores secundários. Tal fato destaca a necessidade do Brasil investir em tecnologia para produção de produtos especiais, cujo faturamento poderia ser, só nos EUA, de no mínimo US\$ 1 bilhão/ano considerando os preços médios praticados pelo atuais fornecedores (US\$ 880-1200).

Neste sentido, vale destacar a iniciativa da ABIROCHAS em parceria com a Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos (Apex-Brasil) para promover a atuação global da indústria de rochas brasileira.

Além do estabelecer diretrizes estratégicas de atuação e co-financiar a participação das empresas produtoras em feiras internacionais, está em fase final a elaboração do Estudo de Competitividade Setorial. Um dos produtos resultantes do estudo é a *branding* “Brasil Original Stones”, cuja criação busca a promoção e a valorização dos materiais nacionais, a fim de ampliara presença das rochas brasileiras na arquitetura mundial, principalmente sob a forma de produtos acabados de alto valor agregado.

2.1.2. Perfil econômico brasileiro

Embora não seja (ainda) o maior produtor mundial, o Brasil possui a riqueza geológica que não se encontra em nenhum outro país e isto o torna o fornecedor da maior diversidade de rochas ornamentais do mundo.

As características da natureza brasileira formam rochas de coloração única, como as que têm os tons amarelados ou verde escuro, tipicamente formadas pelo clima tropical brasileiro. Há ainda rochas que podem ser consideradas “endêmicas” – ou pelo menos só exploradas no Brasil como os pegmatitos e os quartzitos maciços.

A geodiversidade brasileira tem se mostrado como um fator estratégico; não só para suprir a demanda do mercado externo, que exige que novos materiais sejam continuamente colocados em produção, mas principalmente para superar os efeitos da crise imobiliária de 2008 que afetou amplamente os negócios no setor. Nesse contexto, o apelo estético vinculado às rochas exóticas foi decisivo para manter a competitividade brasileira e hoje constituem o principal grupo de produtos de exportação do país. Como resultado desse processo, o Brasil tornou-se o maior fornecedor mundial dessa categoria de rochas, tendo colocado no mercado internacional, ao longo dos últimos dez anos, uma variedade de materiais maior do que toda a Europa em 500 anos (CHIODI FILHO, 2014).

O histórico de exportação de rochas brasileiras já passou por duas fases: a primeira ocorrida no período conhecido como Nova Idade da Pedra (a partir do fim da década de 80), em que o bloco era principal produto de exportação, e a segunda, iniciada no período pré-crise em 2006 e prolongada até a atualidade, em que a chapa polida tem o lugar no mercado consolidado, principalmente o norte-americano (Figura 2.2). O início da terceira fase do setor encontra na abundância geológica brasileira, na expansão e modernização do parque tecnológico e nas políticas setoriais as bases necessárias para o avanço, que passa pela ampliação de mercados e o fornecimento de produtos especiais acabados.

Figura 2.2. Evolução das exportações brasileiras de rochas brutas (RB) e processadas (RP) - participação percentual no faturamento do período 1998-2015.

Fonte: Chiodi Filho (2015).

No Brasil são registradas atividades de extração em cerca de 400 municípios, assumindo-se a existência de 1.200 frentes ativas de lavra e a produção de 1.500 variedades comerciais de rochas (CHIODI FILHO, 2015).

As cerca de 10.000 empresas integradas à cadeia produtiva do setor são responsáveis por aproximadamente 120 mil empregos diretos e 360 mil empregos indiretos. Do total de empresas, cerca de 400 são exportadoras.

O Brasil posicionou-se como 4º maior produtor mundial de rochas ornamentais em 2015, tendo produzido 9,5 milhões de toneladas. Segundo Chiodi Filho (2017), deste montante 65% é destinado ao abastecimento do mercado interno, ou o equivalente a 70 milhões de m², sendo o estado de São Paulo responsável por absorver 45% da produção. A Figura 2.3 ilustra o consumo interno por tipo de rocha, incluindo-se os materiais importados:

Figura 2.3. Consumo interno (em milhões de m²) por tipo de rocha em 2015.

Fonte: Chiodi Filho (2017).

Do montante produzido pelo país, metade é de rochas graníticas, sendo que só o estado do Espírito Santo é responsável por mais de 50% da produção. É aí também que se concentra o maior parque de beneficiamento de chapas da América Latina, com mais de 1.500 teares (CAMARGO, 2013), dos quais 320 são multifio diamantado (CHIODI FILHO, 2017).

2.1.3. Cadeia produtiva

Uma cadeia produtiva possui como característica principal a sucessão de etapas e os processos industriais que visam transformar a matéria-prima bruta em produto acabado.

Na Indústria da Pedra a cadeia produtiva compõe-se basicamente das etapas de extração de blocos do maciço rochoso, seu transporte até as unidades de beneficiamento, a serragem do bloco em chapas e o polimento e recorte das mesmas (Figura 2.4). Como produto final destacam-se as chapas e os ladrilhos (pisos) e seu processo de fixação.

Figura 2.4. Fluxograma dos principais etapas e processos envolvidos na cadeia produtiva de rochas.

Fonte: O Autor.

2.1.3.1. Extração

Na extração, o processo tecnológico inicia-se nas pedreiras, termo utilizado exclusivamente para denominar as minas a céu aberto de rochas ornamentais ou de agregados. Nas pedreiras são extraídos blocos de rocha de dimensões padronizadas (em geral 2,90 x 1,90 x 1,80m), de matacões ou, como na maioria dos casos, do maciço rochoso, pelo método de bancadas. Neste último caso, primeiro são isolados grandes painéis por meio de furação e explosivos, ou mais atualmente por corte com fio diamantado. Os painéis são, posteriormente, subdivididos em blocos por perfuração contínua ou fio diamantado (Figura 2.5).

Figura 2.5. Vista panorâmica de uma pedreira sendo lavrada pelo método de bancadas altas: **(A)** isolamento de grandes painéis de rocha e **(B)** blocos sendo subdivididos por maquinário de perfuração contínua.

Fonte: O Autor.

2.1.3.2. Serragem

Após a extração, os blocos são transportados para as indústrias, onde se inicia a etapa de beneficiamento, constituída de serragem e polimento. A primeira é caracterizada pelo processo de desdobramento dos blocos de rochas em chapas brutas, mediante o uso de maquinário de corte específico, geralmente teares multilâmina (também denominados convencionais) ou os multifio diamantados, uma tecnologia mais recente.

Nos teares multilâmina (Figura 2.6), o bloco é serrado por lâminas de aço tensionadas em um quadro metálico de movimento pendular descendente, com auxílio de uma mistura ou lama abrasiva composta de granalha de aço, cal, água e o próprio pó da rocha serrada que vai sendo acrescido à mistura. O corte das chapas se dá pela compressão e impacto das lâminas sobre o bloco e o atrito entre as lâminas, a lama abrasiva e a rocha.

Figura 2.6. (A) Bloco a ser desdobrado em tear multilâminas; (B) chapas brutas após serragem.

Fonte: O Autor.

Por sua vez, os teares multifio consistem basicamente de uma estrutura metálica com um suporte cilíndrico sobre o qual são dispostos fios diamantados de uma forma equidistante entre si (Figura 2.7). O fio diamantado é constituído por um cabo de aço sobre o qual são fixadas pequenas pérolas diamantadas, distanciadas entre si por uma estrutura de plástico ou borracha. O corte do bloco de rocha é realizado pelo movimento rotatório descendente do suporte, provocando o atrito dos fios sobre a rocha, e utiliza apenas água para refrigeração das pérolas diamantadas.

Figura 2.7. (A) Multifio diamantado; (B) detalhe do corte sendo realizado.

Fonte: O Autor.

Segundo Souza, Vidal e Castro (2014), nos últimos anos tem-se observado uma tendência em substituir os teares multilâmina pelos multifio diamantados, por ser esta uma tecnologia mais limpa, de maior produtividade e que confere uma serrada de melhor qualidade. À propósito, o parque industrial brasileiro de teares multifio diamantado já é o

maior do mundo, com 320 unidades, 100 deles de fabricação nacional (CHIODI FILHO, 2017).

Após passarem pelo processo de serragem, as chapas brutas são direcionadas para o polimento, ou para a telagem, quando se tratar de chapas de materiais exóticos. Por se tratar do foco desta pesquisa, o último processo será detalhado no subitem 2.2.

2.1.3.3. Polimento

O polimento é realizado em equipamentos denominados politrizes (geralmente semiautomáticas ou automáticas multicabeça) e tem por objetivo eliminar a rugosidade superficial das chapas, remanescente do processo de desdobramento. Além da planicidade, tal procedimento visa conferir ao material rochoso fechamento dos poros e brilho.

A primeira etapa do processo de polimento corresponde ao levigamento ou desbaste, em que ocorre o desengrossamento das chapas, com a criação de superfícies planares e paralelas. Tanto o levigamento, quanto as etapas subsequentes (polimento e lustro) são efetuadas com o auxílio de rebolos abrasivos, constituídos à base de carbetto de silício e/ou diamante, em diferentes granulometrias (mais grossos para o levigamento e cada vez mais finos para o polimento e lustro final). Os rebolos, fixados em cabeçotes rotativos na politriz (Figura 2.8), circulam sobre a superfície da chapa, utilizando-se um fluxo constante de água para eliminação de resíduos e refrigeração da face tratada. Após a etapa de levigamento, a maioria dos materiais é submetida ao processo de resinagem, retornando em seguida para a finalização do polimento.

Figura 2.8. Politriz automática multicabeças exibindo rebolos abrasivos fixados nos cabeçotes.

Fonte: O Autor.

Segundo Alencar (2013), o polimento é o acabamento superficial mais generalizado, mas as chapas podem ainda ser submetidas a outros processos como, por exemplo, jateamento, flamagem, escovação, apicoamento, etc. O detalhamento desses processos pode ser consultado na obra citada.

2.1.3.4. Resinagem

Conforme citado, o processo de acabamento das chapas é dividido em três etapas: levigamento, polimento e lustro. Após levigadas, as chapas de determinados tipos de materiais são direcionadas para o processo de resinagem por razões tecnológicas e/ou estéticas.

No primeiro caso, as rochas que recebem esse tratamento são aquelas que apresentam uma quantidade elevada de microfissuras, como os materiais exóticos (pegmatitos, quartzitos) ou alguns materiais já consagrados no mercado interno, mas que apresentam a mesma peculiaridade (o charnockito de nome comercial Verde Labrador, por exemplo). No segundo caso, a resinagem é feita apenas para enaltecer a cor natural da rocha.

A resinagem consiste na aplicação de um sistema epóxi sobre a superfície da chapa a ser polida que, após a cura, proporciona o aumento da resistência mecânica e química (contra agressões intempéricas) da rocha através do preenchimento de seus poros e microdescontinuidades. Como consequência da redução da porosidade, a chapa resinada também terá seu padrão cromático intensificado e poderá exibir o máximo de brilho possível após passar pelo processo final de polimento.

De forma resumida, a resinagem se dá em três etapas: secagem das chapas levigadas, aplicação do sistema epoxídico e cura. O processo pode ser manual ou completamente automatizado (comum apenas nas grandes indústrias).

No processo automatizado (Figura 2.9), um sistema robótico apanha as chapas levigadas que ficam dispostas em cavaletes e alimentam o forno. Após secas, as chapas seguem dentro do sistema até o aplicador do sistema epóxi, que depois as transfere para outro forno onde a cura é acelerada, levando metade do tempo convencional. Todo processo é feito apenas com a observação dos operadores das máquinas, sendo que a produtividade pode chegar a uma chapa/1,5 min (CENTRO TECNOLÓGICO DO MÁRMORE E GRANITO, 2004).

Figura 2.9. Linha de resinação automática de uma grande empresa de Cachoeiro de Itapemirim – ES: (A) chapa levigada; (B) aplicador do sistema epóxi; (C) secador onde as chapas são curadas.

Fonte: O Autor.

No sistema manual, as chapas podem ser desumidificadas em forno automático a gás (Figura 2.10) ou elétrico (Figura 2.11), ou com maçaricos de gás GLP, conhecidos no setor como “pela-porco” (Figura 2.12). Nos fornos automáticos, além da maior produtividade, há a vantagem da garantia quanto à retirada de umidade das chapas, fundamental para a adesão do sistema epóxi. A temperatura de secagem verificada nos fornos é de 70° C.

Figura 2.10. Forno automático a gás.

Fonte: O Autor.

Figura 2.11. Forno automático elétrico.

Fonte: O Autor.

Figura 2.12. Maçarico a gás (“pela-porco”).

Fonte: O Autor.

Após secas, as chapas são movimentadas e dispostas horizontalmente em bancadas onde irão receber o sistema epóxi na superfície levigada. Este sistema é constituído pela mistura de uma resina epoxídica e um endurecedor em proporções de peso que variam de acordo com o tipo de material e as indicações do fabricante. Por exemplo, para uma medida de 100 partes de resina (ou 100 g), aquela que varia é a do catalisador a ser dosado e acrescentado. Para isso têm-se catalisadores a 25, 30, 44 e 50%. Sendo assim, a mistura total será de 100 g de resina + 25 g de catalisador (total 125 g), e assim por diante.

As proporções de resina e catalisador devem ser pesadas em balança eletrônica e bem homogeneizadas, sendo que o consumo da mistura pode variar de 80 a 150 g/m² em função do tipo de rocha. Em seguida a mistura é espalhada com um rolo ou desempenadeira de aço por

toda superfície da chapa ainda quente (Figura 2.13), sendo que a temperatura ideal para operação é de 35 a 45° C.

Figura 2.13.(A) Pesagem e (B) aplicação do sistema epóxi.

Fonte: O Autor.

Depois de espalhado o sistema epoxídico, normalmente espera-se um tempo médio de 3 horas até que a chapa possa ser colocada novamente em cavaletes (pré-secagem), dando-se a cura total em 24 horas, quando a chapa pode retornar para a finalização do polimento.

2.1.3.5. Corte final

As chapas acabadas são encaminhadas para comercialização, incluso aí a exportação, ou a processos de corte; neste último caso utilizam-se normalmente cortadeiras de discos diamantados (Figura 2.14) para dimensionar as chapas em ladrilhos ou outros produtos como pias, bancadas, tampos de mesa, entre outros.

Figura 2.14. Ladrilho sendo dimensionado em cortadeira de disco diamantado.

Fonte: O Autor.

Durante o período de estágio sanduíche decorrido em Portugal, observou-se que na Indústria da Pedra deste país, há um enorme avanço tecnológico em relação ao Brasil, principalmente no que diz respeito aos maquinários para acabamento.

Uma das visitas técnicas foi realizada na empresa Solancis S.A., na cidade de Benedita. Trata-se da empresa mais importante de Portugal, com mais de 100 anos de tradição no ramo da pedra natural. Toda infraestrutura da Solancis conta com equipamentos de ponta, mas destaca-se o setor de acabamentos onde a tecnologia CNC (*Computer Numeric Control*) está presente em todos os maquinários.

É interessante mencionar que as tecnologias de acabamento adquiridas pela Solancis provêm da CEI (Companhia de Equipamentos Industriais Ltda.), empresa também portuguesa especializada no desenvolvimento de máquinas para a indústria da pedra. A sinergia entre estas empresas significa a autosuficiência portuguesa na cadeia produtiva de rochas e torna-se fator chave no fortalecimento do produto nacional, que no caso são representados pelos calcários portugueses.

Uma das máquinas que poderiam ser adquiridas pelas indústrias brasileiras é o StoneCut (Figura 2.15). Trata-se de uma serra ponte inteligente que conta com um sistema de câmera *live-view* acoplado. O equipamento é programado para realizar automaticamente a carga da chapa polida, e em instantes suas dimensões e defeitos (manchas, veios) podem ser detectados pelo software Artificial Vision que processa as imagens recebidas da câmera. Com a ajuda de um *stick* wifi, o operador do equipamento pode ainda selecionar outras áreas indesejadas.

Após esta triagem, o StoneCut realiza o corte das peças somente na área útil da chapa, sendo que podem ser feitos múltiplos formatos e ângulos na mesma chapa de acordo com a programação inserida no equipamento. Ao fim da linha de produção existe ainda um sistema de impressão de código de barras para o controle das peças.

A experiência dos fabricantes relata que o equipamento produz 4 vezes mais que uma serra ponte convencional.

Figura 2.15. Layout geral do StoneCut.

Fonte: CEI (2016).

2.1.3.6. Sistemas de fixação

Atualmente as rochas ornamentais tem seu maior emprego como ladrilhos ou placas em edificações. Em revestimentos de paredes e fachadas as placas podem ser fixadas na estrutura com argamassas colantes (sistema aderente) ou inserts metálicos (não aderente).

No assentamento com argamassa, o dorso das placas de rochas entra em contato direto com as argamassas (adesão física) que as fixam à edificação, enquanto que na fixação com inserts a placa de rocha é presa à estrutura com um perfil metálico em forma de chapa ou de pino. Esta ultima técnica é usada em edifícios altos e segue normas e especificações próprias (MOREIRAS; PARAGUASSÚ; RIBEIRO, 2005).

2.1.3.6.1. Sistema aderente

Nos revestimentos de edificações podem ser utilizados vários materiais, dentre eles, placas cerâmicas e de rochas. Cabe aqui ressaltar que existem várias pesquisas, normas e

especificações para a fixação de material cerâmico, o que não ocorre quando se trata de placas de rocha.

As placas de rochas podem ser fixadas com argamassas comuns, compostas de cimento, areia e cal, feitas em canteiros de obras ou com argamassas colantes, que atualmente são as mais usadas por oferecem maior qualidade, rapidez e homogeneidade no processo de fixação.

O Grupo de Tecnologia de Rochas (GTR) da área de Pós-Graduação em Geotecnia da EESC/USP tem realizado importantes pesquisas quanto à fixação de placas de rochas com argamassas colantes, como o trabalho de Nogami (2012) que obteve importantes resultados sobre a aderência de alguns “granitos” com argamassa colante. A autora comparou o valor de aderência de 3 rochas diferentes fixadas com 3 argamassas distintas: a argamassa de canteiro, uma argamassa comercial (a mais utilizada) e uma argamassa colante para porcelanatos (A4). Os resultados mostraram que a argamassa comum deve ser usada com cautela, pois apresentou resultados de aderência abaixo do 1 MPa exigido pela norma NBR 14081-4 (ABNT, 2012). Já a argamassa A4 para assentamento de porcelanato apresentou para todas as rochas estudadas o dobro dos valores de aderência obtidos para a argamassa industrializada, demonstrando ser mais adequada para a colocação de rochas graníticas que as outras argamassas estudadas.

2.1.3.6.2. Sistema não aderente

Atualmente, o método mais eficaz para revestimento de fachada de altos edifícios se dá por meio da aplicação dos inserts metálicos. A fixação de placas de granito e outros tipos de pedras com esses dispositivos começou a ser executada no Brasil a partir da década de 1980, passando a substituir, gradativamente, o sistema convencional de assentamento com argamassa.

Os inserts metálicos são peças de aço projetadas para fixação de placas de rocha em revestimentos de fachadas, principalmente de edifícios com alturas acima de 15 metros (fachadas ventiladas). Os inserts são ancorados na estrutura do edifício e engastados nas placas do revestimento. Além de suportarem o peso próprio das placas, cumprem também a função de absorverem as tensões provenientes da dilatação térmica linear entre a estrutura e o revestimento. A fachada ventilada também proporciona isolamento térmico e acústico, evita o trincamento e queda de placas e possui produtividade elevada.

Nesse sistema, não há contato direto entre a estrutura da edificação e a placa de rocha, sendo que o insert tem a função de ser o elemento de ligação entre eles. Conforme a Figura

2.16, a ancoragem do insert na estrutura é feita através de chumbadores metálicos e a fixação da placa se dá por um prolongamento do insert que é introduzido na rocha (MOREIRAS, 2005).

Figura 2.16. Sistema de revestimento de fachadas com placas de rocha, onde: (a) estrutura da edificação; (b) insert; (c) placa de rocha e (d) colchão de ar.

Fonte: Moreiras (2005).

Moreiras, Paraguassú e Ribeiro (2005) aplicaram o critério das tensões admissíveis, a teoria dos elementos finitos e o software *Strap* para dimensionar a espessura de placas de rocha para revestir fachadas altas, obtendo resultados satisfatórios para a metodologia proposta. Trata-se de uma contribuição para o desenvolvimento de normas dos componentes do sistema de fixação de placas de rocha com inserts metálicos.

Atualmente, além das fachadas ventiladas, os pisos elevados são as tecnologias de revestimento com sistemas não aderentes que mais empregam placas de “granitos”. Na busca por ações de inovação tecnológica que agreguem função estrutural à placa, Moreiras e Paraguassú (2012) e Moreiras, Paraguassú e Ribeiro (2013) estudaram a viabilidade do emprego de placas de rocha como laje estrutural. Nesse sistema, placas de grandes dimensões são apoiadas pelas arestas sobre sistemas de vigas de concreto, com a principal vantagem da rocha exercer ao mesmo tempo função estrutural e de revestimento.

2.1.4. Tipos comerciais de rochas ornamentais

A diversidade dos ambientes geradores das rochas, sejam sedimentares, magmáticos ou metamórficos, conferem padrões estéticos únicos a cada tipo litológico, a partir da combinação de diferentes estruturas, texturas e padrões cromáticos.

No entanto, do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais e para revestimento são basicamente subdivididas em granitos e mármore. Como granitos enquadram-se genericamente, além dos granitos geológicos, as rochas silicáticas enquanto os mármore englobam, *lato sensu*, as rochas carbonáticas, sejam elas de origem sedimentar ou metamórfica.

Neste subitem são feitas considerações apenas acerca dos granitos e pegmatitos, por tratar-se respectivamente do grupo e subgrupo de rochas foco da pesquisa. Informações detalhadas sobre os outros tipos de rochas podem ser encontradas na obra de Alencar (2013).

2.1.4.1. “Granitos”

No senso comercial enquadra-se na classe dos “granitos” toda rocha silicática, magmática ou metamórfica, não xistosa, portadora ou não de quartzo e passível de polimento, usada como revestimento de edificações ou como elemento ornamental. São então considerados como granitos, além do *strictu sensu*, os sienitos, charnockitos, dioritos, gabros e basaltos e gnaisses (ABNT, 2015).

Em termos geológicos, a NBR 15012 (ABNT, 2013) define granito como rocha magmática, de granulação média a grossa, constituída por quartzo e feldspato (potássico e plagioclásio) e, acessoriamente, por biotita, muscovita, anfibólios e raramente piroxênios. Acrescenta-se que a classificação petrográfica de Streckeisen (1976) subdivide os granitos em monzo ou sienogranitos, em função do teor de feldspatos em sua composição.

A grande variedade no padrão cromático (avermelhada, rosada, acinzentada) dos granitos está relacionada com a presença dos feldspatos. Destaca-se que os granitos amarelos, consagrados no mercado, possuem essa coloração em função da alteração dos feldspatos que o compõe e/ou oxidação dos minerais ferromagnesianos, como a biotita.

Os granitos são materiais que possuem resistência mecânica alta, pequena alterabilidade e boa resistência ao impacto e desgaste em geral, o que permite que sejam aplicados de diversas formas na construção civil, desde os clássicos revestimentos horizontais e verticais até pias, tampos de mesa, bancadas, etc.

A Figura 2.17 ilustra a chapa polida de um sienogranito de grande aceitação comercial.

Figura 2.17. Chapa polida (A) e detalhe (B) do sienogranito de nome comercial Vermelho Brasília.

Fonte: O Autor.

2.1.4.2. Pegmatito

Pegmatito é a designação dada a uma rocha ígnea intrusiva com granulação muito grossa, comumente encontrada como veios, diques ou lentes em batólitos graníticos. O Capítulo 3 descreve detalhadamente a gênese e outras peculiaridades desse tipo de rocha.

A maioria dos pegmatitos possui mineralogia semelhante ao granito, sendo compostos por quartzo, feldspatos e micas, mas frequentemente podem ocorrer outros minerais de terras raras e gemas como água-marinha, turmalina, topázio, fluorita e apatita, muitas vezes acompanhados por minerais de estanho e tungstênio, entre outros.

Devido ao seu diferenciado apelo estético essas rochas são as os principais representantes dos materiais “exóticos” no setor das rochas ornamentais, sendo comercializados com alto valor agregado, principalmente no mercado externo. Sua aplicação se dá principalmente em peças isoladas como bancadas, tampos de mesa e pias, mas a utilização como revestimento vem se tornando comum.

Apesar da beleza, são materiais de baixa resistência mecânica, dada sua textura grossa e seu estado microfissural, o que torna necessário a realização do reforço nas chapas serradas antes do acabamento.

A Figura 2.18 ilustra a chapa polida de um pegmatito comercializado por uma grande empresa de Cachoeiro de Itapemirim - ES.

Figura 2.18. Pegmatito de nome comercial Iberê Crema Bordeaux.

Fonte: O Autor.

Além dos pegmatitos, nos últimos anos tem-se observado a inserção de inúmeros materiais no mercado de rochas, também pertencentes à classe dos exóticos. Dentre esses materiais encontram-se os granitos infiltrados (oxidados), quartzitos coloridos, rochas vulcânicas, jaspes, cherts, sillexitos, ônix, conglomerados, brechas sedimentares e tectônicas, além de itabiritos e xistos diversos. Tais rochas apresentam padrões estéticos de beleza única, com grande valorização comercial, o que incentiva sua promoção no mercado externo junto a outros materiais de exportação.

Destaca-se que a comercialização dos materiais exóticos foi possibilitada pela especialização das indústrias quanto à sua extração, principalmente através do emprego do fio diamantado, já que na maioria se tratam de materiais duros ou demasiadamente frágeis. No segundo caso, o desenvolvimento de tecnologias de reforço mais eficientes do que a telagem tradicional tem se mostrado um dos maiores desafios do setor, e que permitiria inserir novos materiais no mercado, com diferentes possibilidades de uso.

2.1.4.3. Aplicações e produtos em rocha ornamental

Um dos fatores que consagrou as rochas ornamentais como material de construção foi sua versatilidade na obtenção de produtos diversos. Tal fator conjugado à disponibilidade de cores e padrões torna o campo de utilização extremamente vasto (Figura 2.19), embora majoritariamente sua aplicação esteja distribuída 75% em obras civis (pisos e fachadas), 15%

em arte funerária e 10% em aplicações diversas (pias, mesas, bancadas, etc.) (ALENCAR, 2013).

Figura 2.19. A infinidade de aplicações que a rocha ornamental oferece.

Fonte: O Autor.

As obras civis tornaram-se o campo de aplicação mais importante das rochas ornamentais, dado os volumes e quantias financeiras movimentados ao redor do mundo, principalmente em fachadas, pisos e pavimentos urbanos. Este campo de aplicação tem como principais produtos as placas e ladrilhos *cut-to-size*.

Não obstante a pluralidade de criações possível quando se pensa em rocha ornamental, é interessante notar que ao acessar a página na internet da maioria das indústrias brasileiras, mesmo aquelas líderes em exportação, a seção descrita “produtos” não contém nada mais do que o catálogo das rochas comercializadas.

O que se observa é que o setor desenvolveu uma certa cultura engessada quanto à comercialização da rocha tal como ela é, sob um formato padrão em que os únicos processos tecnológicos agregados são corte e polimento, ou quando muito, a tríade corte-polimento-recorte para o caso dos ladrilhos. Qualquer outro nível de industrialização fica a cargo de marmorarias especializadas ou outros prestadores de serviços. Dessa forma, apesar de todo avanço industrial que as empresas vêm realizando, o principal produto de rocha no Brasil ainda é representado por uma chapa de rocha polida de 5 m² em média.

Partindo-se deste conceito básico de produto existem algumas iniciativas em inovação, mas que ainda não ocorrem em escala para representar o setor. Uma delas é a tendência em produzir chapas de rocha de espessuras mais finas que as de 2 ou 3cm convencionais, cuja redução pode chegar em até 70% (0,6cm). Embora a produção destas chapas esteja restrita há apenas alguns materiais (em geral granitos geológicos de textura fina a média), algumas vantagens podem ser citadas em relação às chapas convencionais:

- Produto final mais leve;
- Maior ovação de container (até 1100m²)¹;
- Redução no custo do transporte;
- Maiores possibilidades de aplicação;
- Manuseio facilitado, aumentando a produtividade na fixação do material e reduzindo o cansaço dos operários;
- Redução no custo e sobrecarga da obra;

No Brasil, a empresa Pedra Rio Mármore e Granitos foi a pioneira na produção das chapas finas em 2012, cujo nome comercial foi denominado Light Stone[®] (Figura 2.20).

Figura 2.20. Espessura da Light Stone[®] (0,6 cm) comparada com a de um telefone celular.

Fonte: Pedra Rio Mármore e Granitos (2015).

Em Pêro Pinheiro – Portugalfoi visitado o Grupo Galvão que possui um produto semelhante chamado Paper Stone[®]. Trata-se de lâminas de 2mm de quartzito ou ardósia que

¹Quando se trata de placas de rocha, a ovação do container é feita em m².

recebem um reforço de resina poliéster e fibra de vidro. Neste caso, é a estrutura foliada dessas rochas que possibilita a fabricação de placas tão finas.

Além das chapas de espessuras reduzidas, outras tendências têm sido pontualmente desenvolvidas visando obter um produto com maior valor agregado. É o caso da aplicação da rocha no setor mobiliário e de decoração (Figura 2.21). A Slimstone é uma empresa de Garibaldi – RS que desenvolveu um produto homônimo. O diferencial da empresa está em utilizar a retroiluminação para trazer sofisticação para a pedra e criar projeções.

Figura 2.21. Puff retroiluminado feito em mármore.

Fonte: Slimstone (2014).

Outro exemplo de grande valorização da pedra que tem se tornado muito comum na Europa são os acabamentos 3D em placas para fachadas (Figura 2.22). Utilizando maquinários com tecnologia CNC é possível trabalhar o design de superfície para criar infinitas possibilidades de texturas e conferir exclusividade à obra. Segundo Zampirolli (2015), nesse contexto é interessante pensar na integração de arquitetos e designers no quadro de recursos humanos da indústria de rochas, como forma de criar projetos inovadores e atuar em sinergia na especificação de rochas ornamentais.

Figura 2.22. Possibilidades de fachadas 3D produzidos pela empresa Solancis S.A - PT.

Fonte: O Autor.

2.2. Metodologias para Reforço em Placas de Rochas Ornamentais

Os materiais exóticos começaram a ser explorados como rochas ornamentais há pouco mais de vinte anos, pois até a década de 90 eram considerados material de refugio, em função da fragilidade mecânica.

Como o comércio de rochas é movido por tendências, a partir dos anos 2000 os EUA começaram a demonstrar interesse pelo aspecto peculiar dos exóticos, principalmente dos pegmatitos, e abre-se então um novo nicho de mercado. É importante destacar que a inserção dos materiais exóticos no mercado coincidiu com o desenvolvimento do processo de reforço. No Brasil este processo é conhecido como telagem, e será descrito detalhadamente nos próximos subitens conforme a prática nas indústrias.

Há uma grande lacuna na literatura especializada sobre métodos de reforço para a indústria de rochas ornamentais. A maioria dos estudos publicados limita-se a descrever o que já é praticado na indústria.

Os principais termos encontrados nas bases de dados internacionais (Science Direct, Springer, Web of Science) que possuem conexão ou similaridade com a telagem praticada no Brasil são *reinforcement*, *impregnation* e *consolidation*. Este último retorna inúmeros resultados, mas praticamente todos estão relacionados às técnicas ou consolidantes para restauro de monumentos em pedra, distanciando-se portanto do foco desta pesquisa.

De forma geral, os principais métodos de reforço encontrados na Indústria da Pedra são baseados na aplicação de uma cobertura polimérica estrutural com alguma capacidade de penetração, a fim de unir grãos e preencher discontinuidades (GUILLEM; MARTIN, 2002).

É bastante plausível supor que a gênese carbonática ou silicática das rochas exija que sejam utilizadas resinas apropriadas para cada uma delas, devido ao fato de que as propriedades físico-químicas variam para cada material. Um granito strictu sensu, por exemplo, tem dureza muito superior que um calcário, fissuras microscópicas e um coeficiente de capilaridade diferente, e daí a necessidade de se utilizar resinas com propriedades otimizadas (maior tempo de gel, por exemplo), como as do tipo epóxi.

Selwitz (1992) estabelece que a o sucesso da consolidação da pedra depende da penetração profunda do consolidante, que por sua vez é afetada pelas características do substrato, tais como a porosidade, o tamanho dos poros e a polaridade superficial.

López-Buendía et al. (2013) destacam parâmetros como a adesão, molhabilidade, permeabilidade, capilaridade e propriedades mecânicas adesivas a serem considerados no reforço pela impregnação com polímeros.

Neste ponto existe um conflito que necessita ser abordado e esclarecido por pesquisas científicas: será que a pluralidade geológica de rochas disponíveis no mercado, agrupadas apenas sob as macroclasses dos “mármore e granitos”, são satisfatoriamente tratadas pelas únicas duas classes de resinas, epóxi ou poliéster, atualmente empregadas?

2.2.1. Materiais de reforço tradicionais

2.2.1.1. Resinas epóxi

A indústria de rochas brasileira começou a utilizar as resinas epóxi há pouco mais de 20 anos. No entanto, o emprego de termorrígidos na consolidação de rochas ornamentais em outros países, principalmente europeus, já é muito antiga (CLIFTON, 1980; GAURI, 1974; KOTLÍK; JUSTA; ZELINGER, 1983; WINKLER, 1975).

Segundo Goulding (2003), as resinas epóxi comerciais são obtidas via processo de polimerização por condensação entre a epicloridrina e o bisfenol A (Figura 2.23), comumente referidas como resinas DGEBA (diglicidil-éter de bisfenol A).

Figura 2.23. Estrutura geral de uma resina DGEBA, em que n corresponde ao grau de polimerização

Fonte: Goulding (2003).

Os tipos comerciais de resina são produtos de baixo peso molecular, em que n varia de 0 a 4. Quando n encontra-se entre 0 e 1, a resina é líquida, sendo esta a mais empregada para aplicações como adesivo. Conforme n aumenta, maior é o peso molecular e o produto se torna mais viscoso passando de líquido para semissólido ou sólido (LEE; NEVILLE, 1967).

As resinas epóxi são capazes de reagir com compostos que possuem grupos funcionais reativos, os chamados endurecedores, para formar um sistema ou polímero termorrígido. A escolha do endurecedor depende da aplicação pretendida, podendo ser aminas, amidas, mercaptanos, anidridos ou ácidos de Lewis. No caso específico das resinas epóxi empregadas na Indústria da Pedra para telagem, os endurecedores utilizados são aminas secundárias (TENAX, 2011).

Ao serem misturados, inicia-se uma reação que mediante a ação do calor provoca um processo de reticulação interna ou *crosslinking* irreversível, conhecido como cura. O produto final obtido é um sistema epóxi altamente entrelaçado que proporciona uma elevada resistência mecânica e química (LEE; NEVILLE, op. cit).

A Figura 2.24 ilustra a reação entre uma amina secundária e um grupo epóxi.

Fonte: Costa, Rezende e Padini (1999).

2.2.1.2. Resinas de poliéster insaturado

Na indústria do mármore e do calcário, principalmente na Itália, Espanha e Portugal, o uso de resinas poliéster insaturadas para preencher e reforçar placas tem sido uma solução aceita há mais de 50 anos. Mesmo não tendo boas propriedades mecânicas como a resina epóxi, o poliéster possui boa adesão com o mármore, devido à sua substância relativamente macia e porosa (STONE WORLD, 2003).

O baixo custo faz com que haja uma ampla utilização das resinas poliéster, o que também tem estimulado muitos estudos para melhorar a resistência mecânica (AZIZ et al., 2005; PATEL et al., 2014), viscosidade (MOROTE-MARTÍNEZ; TORREGROSA-COQUE; MARTÍN-MARTÍNEZ, 2011), inflamabilidade (TIBILETTI et al., 2011) e cura (JOHANSSON et al., 2000) dessas resinas.

A síntese do poliéster insaturado se dá em duas etapas (Figura 2.25). A primeira corresponde à obtenção do pré-polímero via condensação de ácidos carboxílicos e glicóis, no qual será adicionado um monômero, geralmente estireno, resultando numa resina solúvel. As insaturações do estireno serão então ativadas pela adição de um catalisador na segunda etapa (no caso, um peróxido orgânico) para reagirem com as insaturações do pré-polímero, dando origem às ligações cruzadas que caracterizam a resina termofixa (JONES, 1994).

Figura 2.25. Reações para obtenção de resina poliéster termofixa.

Fonte: Jones (1994).

As resinas poliéster mais comuns são as do tipo ortoftálicas e isoftálicas. As primeiras são de baixo peso molecular, com boa flexibilidade e resistência à tração, muito empregadas na fabricação de compósitos laminados, enquanto as últimas apresentam propriedades mecânicas e térmicas superiores, dado principalmente o maior peso molecular (SILAEX, 2015).

A Tabela 2.1 traz um comparativo entre as principais propriedades das resinas epóxi e poliéster segundo Bedi, Chandra e Singh(2013):

Tabela 2.1. Propriedades das resinas poliéster e epóxi.

	Poliéster	Epóxi
Adesão	boa	excelente
Estabilidade termal	moderada	boa
Resistência à tração		excelente
Resistência raios UV	pobre a moderada	pobre a moderada
Voláteis	alto	baixo
Retração	alta	baixa
Custo	baixo	alto

Fonte: Bedi, Chandra e Singh (2013).

2.2.1.3. Fibra de vidro

Os polímeros reforçados com fibra de vidro estão entre as classes de materiais compósitos mais produzidas do mundo.

As excelentes propriedades, como a facilidade de processamento, alta resistência, ampla disponibilidade e inércia química fazem com que a fibra de vidro tenha amplas aplicações na indústria madeireira (MOHAMAD; ACCORDI; ROCA, 2011), civil (COUTO, 2007; FELTRAN, 2008; HERTER, 2010) e aeronáutica (RIUL, 2009).

Na indústria são encontrados dois tipos principais de fibra de vidro, em função da composição: o Tipo E e o Tipo S (MURPHY, 1994):

A fibra de vidro tipo E (*eletrical*) é composta por cálcio, alumínio e borosilicato com baixo teor de componentes alcalinos, sendo a mais utilizada como reforço em compósitos. Suas principais características são razoável resistência mecânica e rigidez, bom isolamento elétrico e custo relativamente baixo. No entanto sua resistência ao impacto é baixa.

A fibra Tipo S (*strenght*) possui alto teor de sílica e óxido de magnésio e é capaz de resistir a temperaturas elevadas. Além disso, possui módulo de elasticidade e resistência à tração maiores que a primeira. Seu surgimento está ligado à demanda técnica da indústria aeroespacial e de defesa. A Tabela 2.2 apresenta as características físico-mecânicas destes dois tipos de fibra.

Tabela 2.2. Propriedades físicas e mecânicas das fibras de vidro Tipo E e Tipo S.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Tipo E	2,54	2,40	69	1,8 – 3,2
Tipo S	2,49	3,45	86	5,7

Fonte: Adaptado de Murphy (1994).

A fibra de vidro utilizada na Indústria da Pedra são malhas bidirecionais, em geral de baixa gramatura (150 g/m²), confeccionadas em teares especiais a partir dos monofilamentos de fibra de vidro.

2.2.2. Técnicas de reforço tradicionais

2.2.2.1. Telagem

A empresa Polimento Italiano (atual Granito Zucchi) foi pioneira no processo de telagem no Espírito Santo, o que ocorreu no fim da década de 90². A empresa surgiu no mercado para oferecer serviços de polimento, resinagem e telagem, sendo os dois últimos incorporados nas práticas industriais segundo a técnica utilizada na Itália. Os italianos já empregavam a telagem em mármore, o que foi adaptado para os granitos brasileiros. A Tenax (empresa italiana de resinas epóxi) desenvolveu muitos trabalhos de pesquisa com granitos em parceria com a Polimento Italiano buscando aprimorar seus produtos para as rochas silicáticas.

A telagem consiste basicamente da aplicação do sistema epóxi e uma tela de fibra de vidro no tardo da chapa, logo após a serragem, e antes do polimento. Nesse caso, além de preencher as microfissuras, o sistema epóxi também atua como agente colante da tela.

O processo ocorre de forma semelhante à resinagem, com a desumidificação das chapas em fornos previamente ao tratamento. O sistema epóxi (resina/catalisador) é então dosado e misturado de acordo com as características do material a ser telado. Em média são consumidos 1,5kg de mistura por chapa. A seguir, a mistura é espalhada no tardo da chapa e é aplicada a tela de fibra de vidro, conforme ilustra a Figura 2.26.

De acordo com o fabricante, o processo de cura do sistema epóxi leva 24 horas, que é quando a chapa poderá ser resinada e retornar para as etapas finais do acabamento (polimento e lustro). Neste ponto há um conflito, visto que a prática industrial não aguarda o tempo total de cura, movimentando a chapa para outros setores dentro de apenas 3 horas. Não é utilizado forno para acelerar a cura.

² Entrevista realizada com o Departamento de Exportação da Granito Zucchi em junho de 2013.

Figura 2.26. Processo de telagem de chapas de rochas em uma grande indústria de Cachoeiro de Itapemirim, estado do Espírito Santo: (A) aplicação do sistema epóxi sobre a chapa a ser telada; (B) distribuição por toda extensão da chapa; (C) aplicação da tela de fibra de vidro e (D) fixação da tela sobre a resina.

Fonte: O Autor.

2.2.2.2. Estucamento

Para alguns tipos de rochas a telagem por si só não é suficiente para conferir estabilidade mecânica à placa, sendo necessário ainda uma espécie de reforço dirigido. O material de nome comercial Bronzzo (jaspilito), comercializado pela empresa Santo Antonio Granitos, da cidade de Cachoeiro de Itapemirim - ES é um exemplo.

O jaspilito é uma rocha metamórfica paraderivada, formada por leitos alternados de jaspé e hematita. O material apresenta grande número de fissuras inter e intracristalinas, algumas abertas, e necessita, além da telagem, de outro tratamento conhecido como estucamento. Este processo consiste no preenchimento das fissuras abertas presentes na chapa com resina epóxi e pó da própria rocha, antes de ser telada (Figura 2.27).

Figura 2.27. Chapa do material de nome comercial Bronzzo: (A) vazios que foram preenchidos com o “estruque” e (B) aspecto da chapa polida após o processo de estucamento.

Fonte: O Autor.

2.2.2.3. *Consolidação*

A consolidação é um dos métodos tradicionais de reforço praticado pela indústria espanhola de rochas, principalmente para os calcários. O Crema Marfil (calcário bioclástico), produzido em Alicante, é uma das rochas mais bem aceitas no mercado mundial, mas também extremamente sensível ao processamento dada a presença de stilólitos (ORDOÑEZ et al., 1996)

A consolidação ocorre antes do polimento e consiste basicamente da impregnação das placas ou peças menores, como as tiras, com um termofixo que possa penetrar profundamente na massa da rocha. É bastante semelhante ao processo brasileiro, porém sem o uso da tela de fibra de vidro.

Segundo Arizo et al. (2004), a consolidação liga os grãos de cimento que permanecem livres na massa da rocha devido à alterações geológicas, melhorando assim a coesão, as propriedades mecânicas e a aderência ao substrato na massa de pedra. O processo também faz com que a pedra se torne à prova de água e resistente à posteriores ataques de agentes externos.

Em algumas fábricas ainda é utilizado o vácuo como um procedimento complementar, sendo aplicado após a impregnação a fim de facilitar a penetração através do sistema poroso e eliminar o ar na massa de resina.

2.2.2.4. *Mastique*

Os mastiques são revestimentos de alta viscosidade usados para preencher vazios superficiais de grandes dimensões. São constituídos por resinas poliéster e, ocasionalmente, de resinas epóxi com a adição de cargas minerais, geralmente carbonato de cálcio e silicatos.

As cargas minerais em mastiques buscam dois objetivos diferentes: em primeiro lugar, proporcionar a viscosidade certa para cobrir as cavidades na superfície, e evitar, total ou parcialmente, a retração produzida no processo de cura das resinas poliéster (LÓPEZ-MONTEAGUDO et al., 2004).

A aplicação do mastique geralmente é feito usando uma espátula. O procedimento de aplicação é semelhante ao anterior: as peças são secas, o mastique é espalhado sobre a superfície, espera-se o tempo de cura, e finalmente as peças de mármore são polidas para eliminar o excesso de revestimento remanescente na superfície.

2.2.2.5. *Reforço com argamassa*

Nesta técnica argamassa é preparada e aplicada no tardo da peça (Figura 2.28). É uma técnica pouco difundida e direcionada às rochas carbonáticas.

Figura 2.28. Reforço com argamassa.

Fonte: Arizo et al. (2004).

Segundo Arizo et al. (2004), o objetivo é que a argamassa possa proporcionar resistência mecânica suficiente para evitar a rachadura da peça enquanto está sendo polida. Além disso, a argamassa que é preparada deve ter propriedades, tais como coeficientes de

dilatação térmica semelhante aos coeficientes de mármore, fácil impregnação e boa adesão com adesivos cimentícios.

2.2.2.6. Rodding

Rodding é um tipo de reforço dirigido muito praticado por marmorarias norte-americanas, principalmente em produtos acabados como as bancadas (*countertops*). O termo não possui tradução exata para o português, mas assemelha-se na prática aos tirantes de protensão ou à armadura em vigas de concreto. Uma de suas vantagens é a possibilidade de ser aplicado também em áreas específicas, nas zonas de maior fragilidade mecânica dentro da peça (contatos entre grãos, fissuras, leitos de minerais alterados), configurando um reforço dirigido (tipo costura).

De acordo com o guia de instalação de bancadas residenciais do Marble Institute of America - MIA (2008), o *rodding* requer inicialmente um corte raso ou ranhura estreita no lado de baixo da peça. O corte é equipado com uma haste de metal ou fibra de vidro, que é então totalmente preenchido com resina epóxi ou poliéster (Figura 2.29). A haste tem uma maior resistência à flexão e ajuda a evitar que a rocha se curve. Uma faixa de apoio de tela de fibra de vidro é muitas vezes aplicada sobre a região para reforço adicional.

Figura 2.29. Rodding.

Fonte: MIA (2008).

2.2.3. Novas Tendências

Apesar da ampla utilização das resinas epóxi e poliéster nas metodologias de reforço utilizadas pela Indústria da Pedra, existe ainda uma preocupação quanto às questões ambientais e a saúde do trabalhador, dado que ambos polímeros possuem substâncias nocivas.

As resinas poliéster podem conter até 60% de estireno, que é considerada uma substância irritante e possivelmente cancerígena, enquanto as resinas epóxi contém bisfenol-A e utilizam amina na cura, sendo ambos tóxicos. Em função disso, atualmente tem surgido no mercado outros polímeros e tecnologias de reforço oriundos de fontes renováveis ou que buscam ser mais eficientes, ao mesmo tempo em que são menos nocivas.

2.2.3.1. Resinas epóxi em emulsão aquosa

Os revestimentos epóxi à base d'água ganharam ampla aceitação como alternativas ambientalmente amigáveis aos sistemas tradicionais à base de solvente, principalmente nos mercados para proteção de metal e em aplicações de revestimento industrial (RUFO; SHAH; RAYMOND, 2007).

Recentemente novas resinas epóxi em emulsão aquosa tem sido introduzidas na Indústria da Pedra europeia, modificadas com aditivos promotores de adesão, como o silano (GUILLEM et al., 2007; 2008). Ainda não existe na literatura estudos de resinas à base d'água adaptadas para o reforço de granitos.

López-Buendía et al. (2013) compararam os resultados da consolidação do calcário Crema Marfil com duas resinas epóxi, uma à base de solvente (Es) e outra à base d'água (Ea). A consolidação com ambas resinas proporcionaram aumento na resistência à tração, quando comparado ao calcário sem reforço. No entanto, a resina Ea apresentou melhor desempenho nas amostras com superfícies mais polares, tais como planos com argilas e óxido de ferro.

2.2.3.2. Poliuretano à base de mamona

Os óleos vegetais têm sido a proposta mais promissora dos últimos tempos na busca de materiais de engenharia renováveis. O óleo de mamona em particular tem atraído renovada atenção como matéria prima para a preparação de resinas e materiais poliméricos para substituir os polímeros tradicionais à base de petroquímicos (MILLEO et al., 2011; SHARMA; KUNDU, 2006).

O poliuretano à base de óleo de mamona é um material útil, versátil e amplamente utilizado devido a sua boa flexibilidade e elasticidade (LIU et al., 2008). Ele contém cerca de 90% (p/p) de ácido ricinoleico, um triglicéride com grupos hidroxila na sua cadeia que reagem com os grupos isocianato para formar ligações de uretano (TORIZ et al., 2005).

As aplicações mais nobres do poliuretano à base de mamona estão nos compósitos biodegradáveis, reforçados com fibras naturais, como a fibra de côco (FIORELLI et al., 2012), fibra de banana (MERLINI; SOLDI; BARRA, 2011), juta (MISTRI et al., 2011) e sisal (SILVA et al., 2006).

Nos últimos anos também tem sido desenvolvidos importantes estudos par a Indústria da Pedra brasileira para incorporar o poliuretano à base de mamona nos insumos utilizados para o beneficiamento de rochas.

Leitão e Silveira (2012; 2014) analisaram o desempenho de rebolos abrasivos para o polimento de rochas ornamentais confeccionados com matriz de resina vegetal. Os resultados mostraram que, além de atóxico, o abrasivo à base de poliuretano de mamona conferiu maior brilho final à chapa polida em comparação ao abrasivo convencional.

Seraco e Silveira (2015) acrescentaram carbetto de silício (SiC) à formulação do abrasivo estudado por Leitão e Silveira (2015) e obtiveram melhor performance quanto à resistência à abrasão.

Silveira, Porto e Bolonini (2015) realizaram ensaio de flexão em quatro pontos para testar a eficiência de dois traços de resina poliuretano à base de óleo de mamona no reforço de 3 “granitos” ornamentais. Os resultados mostraram que quanto maior o grau de isotropia das rochas estudadas, melhor é o desempenho da resina de mamona em comparação à resina epóxi tradicional.

Apesar dos aspectos auspiciosos da aplicação da resina à base de mamona no reforço de rochas ornamentais, o custo deste polímero ainda é mais elevado que o da resina epóxi, o que dificulta a ampliação de seu uso no setor. Além disto são necessários estudos mais aprofundados quanto à degradação e a eficiência da resina de mamona para rochas frágeis.

2.2.3.3. Estruturas *honeycomb*

Utilizados na construção de aeronaves desde a década de 40, os painéis-sanduíche do tipo *honeycombs* são estruturas cujo núcleo possui geometria parecida com a dos favos de mel,

o que permite a minimização da quantidade de material utilizado, diminuindo o peso e o custo de fabricação.

A configuração das estruturas *honeycomb* pode variar amplamente, mas a característica comum a todas elas é uma matriz formada de células ocas entre paredes verticais finas. As células são muitas vezes colunares e de forma hexagonal. Estas estruturas proporcionam um material com densidade mínima, elevada rigidez, resistência à flexão e ao cisalhamento (WAHL; MAAS; WALDMANN, 2012).

É possível utilizar uma ampla gama de materiais na fabricação das estruturas *honeycomb*, mas geralmente elas são compostas por um núcleo em alumínio, fibra de vidro ou polipropileno, ligada a duas camadas de revestimento por meio de um adesivo (Figura 2.30). A escolha desses materiais varia em função das solicitações do ambiente de aplicação.

Figura 2.30. Aspecto geral de uma estrutura *honeycomb* montada (A), suas camadas de revestimento (B) e o núcleo favo de mel (C)

Fonte: Bitzer (1997).

Inspirada na tecnologia aeroespacial, a empresa Stone Performance, de Sintra – Portugal, desenvolveu em 2012 a solução SPP (*Stone Performance Process*) para combinar a estética da pedra natural num produto de leveza e alta performance.

Os painéis SPP são constituídos de revestimentos em pedra com espessuras de 5 a 10mm ligados a um honeycomb de alumínio reforçado com tecido de fibra de vidro (Figura 2.31). Esta combinação proporciona um produto extremamente leve, homogêneo e indivisível,

com características mecânicas excepcionais que permitem a aplicação em ambientes onde o alto desempenho é necessário, como em fachadas. A tecnologia de fabricação permite utilizar uma ampla variedade de rochas, sejam mármore, travertinos, granitos ou ônix em formatos de até 1,70 x 3,20m.

Figura 2.31. Painel SPP feito com mármore Saint Laurent.

Fonte: Stone Performance (2015).

O SPP representa uma inovação em produto de pedra natural, seja em tecnologia de reforço, ou possibilidades de aplicação. No entanto o alto custo (US\$200/m², variando em função da rocha escolhida) ainda restringe sua difusão no mercado.

A empresa brasileira Slimstone possui um produto homônimo, que é equivalente ao SPP, porém ainda em fase de certificação. A diferença está no núcleo, que ao invés de alumínio é produzido em polipropileno (Figura 2.32).

Figura 2.32. Tecnologia Slimstone, com honeycomb em polipropileno.

Fonte: Slimstone (2014).

2.2.3.4. *Stork*[®]

Seguindo a linha de estruturas sanduíche, a Frontwave Stone Technology (Sintra-Portugal) lançou no mercado em 2016 o Stork. O nome provém da junção das palavras *stone* (pedra) e *cork* (cortiça), e trata-se de um compósito laminado que combina características diferentes dos dois materiais naturais: pedra (com espessura de 5 a 10mm) + cortiça (5 a 20mm) reforçada com tecido de fibra de vidro 600g/m² (Figura 2.33).

A proposta do produto é ser uma solução para revestimentos de pisos e fachadas leve, e com boas propriedades mecânicas para competir com as estruturas honeycomb. A vantagem está no emprego de um material natural como núcleo (a cortiça) e no preço mais competitivo.

Figura 2.33. Composição do Stork: pedra com 5mm (A), tecido de fibra de vidro (B) e cortiça (C).

Fonte: Frontwave (2016).

2.2.4. Compósitos reforçados com fibra natural

Nos últimos anos, há uma tendência crescente na utilização de materiais naturais em muitas aplicações da engenharia, motivada principalmente pelos eventos globais concernentes ao meio ambiente.

As fibras vegetais são utilizadas pela humanidade desde tempos remotos para confecção de cordas, fios, tecidos e tapetes. No entanto, nas últimas décadas tem-se investigado intensivamente o uso dessas fibras para aplicações mais nobres, principalmente como reforço em compósitos de matriz polimérica (CMP) para a indústria automobilística (MARSH, 2003; ZAH et al., 2007) e de construção civil (ALI et al., 2012; SAVASTANO; WARDEN; COUTTS, 2003), em substituição às fibras sintéticas como o vidro e o nylon.

Segundo Monteiro et al. (2009) e Spinacé et al. (2009), as fibras lignocelulósicas estão cada vez mais sendo aplicadas como reforço em CMP devido suas vantagens quando comparadas às fibras sintéticas. As fibras naturais são de custo relativamente baixo, de grande disponibilidade, renováveis, atóxicas e biodegradáveis.

Yan e Chouw (2013) realizaram a investigação experimental de uma coluna reforçada com epóxi e fibras de linho. Os resultados indicaram que o reforço aumenta a resistência à compressão e à ductilidade das colunas compostas em relação ao concreto simples, evidenciando o potencial das fibras naturais no reforço desse tipo de elemento estrutural.

Silva et al. (2010) estudaram a influência da concentração de fibras de celulose nas propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas de compósitos de poliuretano. A introdução de fibras de celulose com as espumas de poliuretano rígidas diminuiu ligeiramente a sua condutividade térmica. Esta modificação não alterou a resistência mecânica e estabilidade térmica do compósito.

Razera (2006) utilizou fibras de côco e de banana como agentes de reforço na preparação de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica. O fenol utilizado na formulação da matriz foi parcial e totalmente substituído por lignina extraída do bagaço de cana de açúcar. Os resultados demonstraram que a substituição total do fenol é viável e que, das duas fibras utilizadas, o compósito reforçado com a fibra de banana apresentou melhor desempenho quanto à resistência mecânica e impacto Izod, provavelmente devido ao maior conteúdo de celulose presente nesta fibra.

Ramesh, Palanikumarb e Hemachandra (2013) desenvolveram compósitos híbridos de poliéster reforçados com fibras de sisal, juta e vidro e avaliaram suas propriedades mecânicas tais como resistência à tração, resistência à flexão e a resistência ao impacto. Os resultados

indicaram que a incorporação de fibras de sisal e juta ao poliéster reforçado com fibra de vidro pode melhorar as propriedades do compósito, podendo ser utilizado como um material alternativo aos compósitos reforçados unicamente com fibras sintéticas.

Monteiro et al. (2013) realizaram o processamento e caracterização de compósitos laminados de poliéster com fibras alinhadas de curauá. Compósitos com 20% de fibra apresentaram altas propriedades de flexão, o que é atribuído a um complexo mecanismo de interação individual das microfibrilas com a matriz durante o início e posterior propagação de fissuras devido à geometria específica da interface fibra/matriz.

Por outro lado, os estudos de Beckwith (2003), John et al. (2008) e Monteiro et al. (2011) também enumeraram algumas desvantagens em relação às fibras sintéticas: a resistência à tração das fibras naturais é menor; sua natureza hidrofílica dificulta a dispersão em algumas matrizes poliméricas; não há uniformidade em suas dimensões e propriedades, além de possuírem baixa temperatura de processamento (≤ 200 °C) e alta absorção de umidade.

Nesse sentido, diversas técnicas têm sido sugeridas recentemente para melhorar o desempenho de compósitos modificados com fibras lignocelulósicas, principalmente o tratamento alcalino (FERREIRA et al., 2015; YOUSIF et al., 2009).

O Brasil possui uma grande variedade de fibras vegetais, algumas nativas, sendo as principais o sisal, o curauá, a juta, o bambu, o rami, a piassava e a fibra de coco. (MARINELLI et al., 2008; MATTOSO³, 1999 *apud* MARINELLI et al., 2008; MONTEIRO et al., 2011). O estudo das propriedades dessas fibras têm sido constantemente aprimorados no intuito de se conseguir melhorias no seu emprego como reforço em CMP, o que também incentiva a utilização das fibras vegetais como reforço das placas de rochas frágeis.

2.3.Comportamento Mecânico de Rochas Ornamentais com e sem Reforço

2.3.1.Metodologias de ensaio para avaliação do comportamento mecânico

A avaliação da resistência das placas rochosas à ruptura torna-se cada vez mais importante frente às modernas técnicas de revestimentos, como os pisos elevados e as fachadas ventiladas. Estudos de Moreiras, Paraguassú e Ribeiro (2013) e Moreiras e

³Mattoso, L. H. C.; Pereira, N. C. ; Souza, M. L. & Agnelli, J. A. M. - Brasília: EMBRAPA Produção e Informação, in: Odilon R R F da Silva; Napoleão E D M Beltrão. (Org.). O Agro Negócio do Sisal no Brasil. 1. ed. , p.161, 1999.

Paraguassú (2012) investigam a viabilidade do emprego de placas de rocha como laje estrutural. Nesse sistema, placas de grandes dimensões são apoiadas pelas arestas sobre sistemas de vigas de concreto.

Os três tipos de aplicação acima possuem como principais características a liberdade de movimentação do dorso e a atuação dos esforços no sentido perpendicular às placas. Essa combinação faz com que ocorram esforços de tração na face oposta ao carregamento, configurando grande susceptibilidade à ruptura nessa região.

A ABNT normatiza dois ensaios que determinam a resistência de tração na flexão da rocha: a flexão por carregamento em três pontos, ou módulo de ruptura (ABNT, 2015a) e flexão por carregamento em quatro pontos (ABNT, 2015b). Ambos os ensaios fornecem o mesmo parâmetro de resistência, porém com diferenças básicas entre eles.

Os valores determinados pelo ensaio de módulo de ruptura indicam a tensão máxima de flexão que a rocha natural suporta, enquanto a flexão por carregamento em 4 pontos fornece valores que dão subsídio à determinação do tamanho e espessura para os produtos acabados.

A forma de execução desses ensaios também é divergente em relação ao tamanho dos corpos de prova e dos acessórios e espaçamentos necessários. A Figura 2.34 faz a comparação entre os dois ensaios de flexão:

Figura 2.34. Ensaio de flexão por carregamento em 3 (esquerda) e 4 pontos (direita): configuração (A), esquema estático (B), diagrama de esforço cortante (C) e diagrama de momento fletor (D).

Fonte: Lewis (1995).

Simplificando-se a teoria de vigas de Euler-Bernoulli de acordo com Beer e Johnston (2006), calcula-se a tensão de resistência à flexão em 3 e 4 pontos de acordo com as equações 1 e 2, respectivamente:

$$\sigma_t = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{3PL}{4bd^2} \quad (2)$$

Em que P é a carga de ruptura, L é o vão do ensaio, b é a largura e d é a altura do corpo de prova.

É importante destacar que no ensaio de 3 pontos a ruptura da amostra nem sempre coincide com o ponto exato onde ocorre o momento atuante. Já no ensaio de 4 pontos, a ruptura sempre ocorre entre os dois roletes superiores, região na qual o momento é constante. Tem-se então que o parâmetro de resistência à flexão por 4 pontos representa mais fielmente o momento atuante.

2.3.2. Soluções para análise da deformação

Durante a realização de um ensaio mecânico, a carga aplicada sobre a seção transversal do corpo de prova produz uma deformação ε , que é definida por (3):

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (3)$$

E que L é o comprimento inicial e δ é a variação no comprimento.

Diversos instrumentos podem ser aplicados para se medir a deformação sofrida por um material, sendo abordados nos subitens seguintes uma técnica tradicional e outra que utiliza o sistema mais recente de Correlação Digital de Imagem (do inglês, *Digital Correlation System*).

2.3.2.1. Strain gages

Strain gage ou extensômetro elétrico é um resistor composto de uma finíssima camada de material condutor, cuja disposição determina a direção em que este é sensível à deformação (Figura 2.35).

Figura 2.35. Strain gage que mede deformações no sentido horizontal.

Fonte: Excel Sensores (2016).

Ao ser fixado sobre a estrutura em teste, as variações de dimensões nesta estrutura são transmitidas mecanicamente ao strain gauge, que as transforma em variações equivalentes de sua resistência elétrica, como indicado na equação 4 (HOFFMANN, 1989):

$$\frac{dR}{R_0} = \epsilon(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (4)$$

Em que dR representa a variação de resistência, R_0 a resistência inicial, ϵ a deformação, ν o coeficiente de Poisson, ρ a resistividade e $d\rho$ a respectiva variação.

As variações elétricas são transmitidas do strain gage para uma unidade complementar de aquisição, que as amplificando para leitura em um local remoto.

Apesar de bem aceitos pela Engenharia de Estruturas, os instrumentos convencionais utilizados para medir a deformação possuem desvantagens que tornam sua análise limitada.

No caso dos strain gages, por exemplo, a colagem pode estabelecer uma rigidez local que distorce as medições. Quando se trata de materiais muito heterogêneos, como as rochas de textura grossa, a porção selecionada para análise pode não representar globalmente as propriedades do material (PINHEIRO, 2014).

2.3.2.2. Vic-2D

O Vic-2D (CORRELATED SOLUTIONS, 2009) é uma tecnologia que utiliza algoritmos de correlação matemática para calcular a deformação de amostras planares. O

sistema é composto por uma câmera que registra imagens da superfície da amostra durante todo o teste mecânico, e por um software que processa as imagens para calcular os deslocamentos e construir um mapa de contorno das deformações.

A câmera capta imagens em preto e branco, sendo que sua velocidade máxima de captura é de 7,5 fotogramas/s em alta qualidade (2452x2056) e de 15 a baixa qualidade (1224x1028). Como o software trabalha com base no mapeamento e seguimento dos pixels das imagens, é necessário pintar as amostras de branco e preto (Figura 2.36) antes do teste, de forma que o programa consiga reconhecer o padrão gerado (*speckle pattern*).

Figura 2.36. Visão parcial do padrão pintado na superfície frontal de uma amostra para ensaio de flexão.

Fonte: O Autor.

Após a captura, devem ser feitas algumas calibrações para que o software processe as imagens. Inicialmente determina-se a área de interesse (AOI) a ser analisada. Essa seleção deve ser acompanhada da definição de uma reta com tamanho conhecido para que o Vic-2D converta o deslocamento dos pixels em mm. Uma pequena marcação no corpo de prova antes do teste elucida o problema.

É necessário também definir o tamanho do *subset* e do *step*. Estes parâmetros determinam a “malha” que é gerada, semelhante à um programa de elementos finitos. O *subset size* controla a área da imagem que é utilizada para controlar o deslocamento entre as imagens. Este parâmetro tem que ser grande o suficiente para garantir que não há um padrão característico contido na área utilizada para a correlação. O *step size* controla o espaçamento dos pontos que são analisados durante a correlação. Quanto menor o *step*, maior o tempo para efetuar a análise.

Após a análise, o programa fornece os deslocamentos em cada uma das direções, bem como um tratamento estatístico dos dados na zona de interesse. Ainda é possível aplicar o tensor de Lagrange para obter o cálculo da deformação para cada imagem analisada. Estas imagens são coloridas de acordo com uma escala que representa o gradiente de deformação (Figura 2.37).

Figura 2.37. Imagem de corpo de prova após ensaio de flexão e análise do Vic-2D.

Fonte: O Autor.

Como pode ser visto na figura acima, a maior vantagem em utilizar o Vic-2D está em obterum mapa de contornodas fissuras para a superfície analisada. A evolução do mapa de contorno também pode ser visualizada sob a forma de um vídeo gravado pelo software.

O Vic-2D têm sido aplicado por um número crescente de pesquisadores para medir a informação de campo total de materiais rochosos. Por exemplo, Ma et al. (2011) utilizaram uma câmera de alta velocidade junto com o Vic-2D para analisar a evolução do dano de um granodiorito no ensaio de compressão diametral (teste Brasileiro); Zhang et al. (2012) empregaram o Vic para investigar o mecanismo de fratura de um arenito sob teste de dureza; Yang et al. (2015) usaram o Vic para estabelecer o gradiente de deformação de um granito sob tração.

2.3.3. Análise de Propriedades Mecânicas

2.3.3.1. *Curvas tensão – deformação*

A elasticidade é uma propriedade ideal. Na prática, o comportamento elástico de um material depende de fatores fundamentais como anisotropia e a homogeneidade.

Quando se trata das rochas, todas têm algo de anisótropas, heterogêneas e descontínuas, e nenhuma delas é, por esse motivo, perfeitamente elástica (FARMER, 1968; VALLEJO et al., 2002). Assim, as rochas apresentam relações não lineares entre as forças aplicadas e as deformações produzidas a partir de um determinado nível de tensões, obtendo-se modelos de curvas distintos para cada tipo de rocha.

Muitos pesquisadores descreveram as características da resistência e deformação de rochas com base em testes de compressão uniaxial (BIENIAWSKI'S, 1970; OKUBO; NISHIMATSU, 1990; PEELS, 1993; WAWERSIK; FAIRHURST, 1970). Com base nestes estudos, Bogusz e Bokowska (2015) sintetizaram o comportamento tensão-deformação de rochas submetidas à compressão em duas fases: uma pré-crítica e uma pós-crítica (Figura 2.38).

Na parte pré-crítica da curva de tensão-deformação pode-se distinguir três fases principais que limitam comportamentos distintos da amostra:

- Fase I: fase de fechamento e selagem – o suporte da máquina de ensaio se ajusta à superfície da amostra, compactando-a e causando o fechamento progressivo dos poros e microfissuras. Como resultado, o módulo de elasticidade cresce, e o trecho se mostra curvo e ascendente.
- Fase II: fase elástica – a evolução da curva é linear. A transição da fase II para a fase III marca o início do processo de microfissuração.

Figura 2.38. Curva de tensão-deformação ideal obtida durante teste de compressão uniaxial: σ - tensão; ϵ - deformação; σ_{cr} - tensão crítica; σ_{res} - tensão residual; ϵ_{cr} - deformação crítica; ϵ_{res} - deformação residual; E - módulo de Young; E_s - recuperação do módulo de elasticidade; M - módulo de falha pós-pico.

Fonte: Adaptado de Bogusz e Bukowska (2015).

- Fase III: começa com o limite da dilatação e termina quando a amostra alcança sua resistência máxima. A evolução da curva nesta fase é não linear. O ângulo de inclinação da tangente com a curva diminui, ilustrando um comportamento mais dinâmico da deformação em relação à tensão. É também observado um rápido aumento na deformação volumétrica. Além disso, a fase III é o começo do processo de destruição da estrutura da rocha.

Na parte pós-crítica da curva de tensão-deformação, Wawersik e Fairhurst (1970) obtiveram duas curvas que refletem comportamentos distintos (Figura 2.38).

A curva pós-crítica de Classe I é caracterizada pela propagação de fratura "estável", no sentido de que trabalho adicional tem de ser feito sobre a amostra para que a capacidade de suporte de carga seja reduzida. Rochas com este comportamento mantêm alguma força mesmo após a resistência à compressão ser excedida.

Para rochas com o comportamento pós-crítico da Classe II, o processo de propagação da fratura é mantido espontaneamente até que a amostra perca toda a resistência, sendo característico de rochas muito frágeis.

Brady e Brown (1994), Goodman (1989) e Vallejo et al. (2002) classificam o comportamento tensão-deformação das rochas a partir do que acontece quando o carregamento aplicado supera a resistência de pico do material (Figura 2.39):

Figura 2.39. Modelo de comportamento tensão-deformação segundo a resistência de pico.

Fonte: Vallejo et al. (2002).

O comportamento frágil caracteriza-se pela queda drástica da resistência da rocha até valores inclusive próximos de zero; este comportamento é típico de rochas duras de alta resistência. A fratura frágil implica uma perda quase instantânea da resistência da rocha através de um plano sem nenhuma ou pouca deformação plástica.

No caso de um comportamento frágil-dútil, a resistência decresce até certo valor, depois de ter alcançado certo grau de deformação, típico de materiais argilosos pré-adensados.

Para os materiais com comportamento dútil, a deformação continua aumentando sem que aconteça perda de resistência, que é o caso de rochas brandas como os evaporitos.

Schock e Louis (1982) investigaram a deformação do granito Westerly e do arenito Lance sob tensão de tração e compressão. Os autores relatam que ambas as rochas exibiram comportamento inelástico antes da falha, sendo que no granito foi observada dilatação pronunciada e abrandamento no cisalhamento. O módulo de Young tangente inicial é semelhante para os estados de tensão de tração e compressão, o que implica que as fissuras desempenharam o mesmo papel para ambas tensões.

A mecânica da fratura moderna emprega o termo quase-frágil para descrever o comportamento mecânico à fratura de materiais com microestrutura desordenada, como é o caso do concreto, da cerâmica e das rochas (WIEJERMARS, 1997). Bazant, Xi e Reid (1991) também classificam os compósitos e estruturas reforçadas como quase frágeis.

Para materiais frágeis, duas situações simples são aceitas como o critério de falha (BORST, 2002):

1. Sob tensão uniaxial uniforme, a fratura acontece quando a tensão máxima atinge a tensão de ruptura do material:

$$\sigma \geq \sigma_c$$

2. Para sólidos incluindo uma microfissura, a fissura se propaga quando o critério de Griffith é cumprido:

$$G \geq G_c$$

Onde G e G_c são, respectivamente, a taxa de liberação de energia e seu valor crítico de fratura.

Segundo Borst (op.cit), foi reconhecido que o concreto e semelhantes não são materiais perfeitamente frágeis no senso de Griffith. Devido à sua microestrutura heterogênea, tais materiais desenvolvem zonas de plastificação e fraturamento, em função do aparecimento de microfissuras, e que se caracterizam por manter ainda alguma capacidade de transmissão de carga mesmo após alcançar a resistência máxima. Essa observação fez surgir os modelos numéricos de tensão-abrandamento que consideram a diminuição gradual da resistência à tração mediante uma maior abertura das fissuras.

Um diagrama tensão-deformação típico de materiais quase-frágeis é apresentado na Figura 2.40. Depois de uma porção linear inicial que dura até cerca de 30 - 40% da carga máxima, a curva torna-se não-linear, com grandes deformações sendo registrados para pequenos incrementos de tensão.

Figura 2.40. Típico diagrama tensão-deformação para comportamento de um material quase-frágil.

Fonte: Wiejermars (1997).

O modelo mais utilizado atualmente para descrever o comportamento à fratura de materiais quase-frágeis é o modelo de fissura coesiva, ou fictícia (MFF), introduzido por Hillerborg, Modéer e Peterson (1976). De acordo com o MFF, o material é caracterizado por uma relação de tensão-deformação linear (σ - ϵ), válida para as zonas intactas, e por uma relação de abertura de fissuras por tensão de deslocamento (σ - w , a lei da coesão), que descreve como a tensão diminui a partir do seu valor máximo σ_u para zero à medida que a distância entre os lábios da fissura aumenta de zero para o deslocamento w_c crítico (Figura 2.41).

Figura 2.41. Modelo da fratura coesiva de Hillerborg.

Fonte: Santos e Sousa (2015).

2.3.3.2. Constantes elásticas

Para definir elasticamente um material, pelo menos duas constantes são requeridas das cinco disponíveis: o módulo de Young (ou de elasticidade) E , o coeficiente de Poisson ν , o coeficiente de Lamé λ , o módulo cisalhante G e o módulo de Bulk K .

Na teoria elástica as mais convenientes são G e λ , mas em problemas de engenharia onde é requerida uma medida direta da rocha quando uma força é aplicada, E e ν são recomendadas, comumente obtidas a partir das curvas tensão-deformação.

Goodman (1989) discute a utilização do módulo de deformabilidade no lugar do módulo de Young, indicando que as propriedades de deformabilidade englobam deformações elásticas e inelásticas. O autor ainda salienta que quando calculada no trecho virgem da curva de carregamento, a constante deve ser considerada como módulo de deformabilidade, sendo o módulo de Young obtido na fase de descarregamento (o que na prática não é comum).

A rigidez de uma estrutura é de suma importância para se projetar materiais de engenharia, de forma que o módulo de Young é uma das propriedades primárias consideradas quando se seleciona um material. Genericamente, um elevado módulo de elasticidade é requerido quando a deflexão é indesejável, enquanto que um baixo módulo é necessário quando se busca flexibilidade.

No entanto, há de se considerar que módulo de elasticidade e rigidez são, na maioria dos casos, propriedades distintas. O módulo de Young é uma propriedade do material constituinte, enquanto a rigidez é uma propriedade de uma estrutura, dependente do material e das condições de forma e limites de contorno. Além disso, a rigidez não é uma medida fixa da estrutura, mas é dependente da posição e do tipo de carga e da localização e tipo de deformação (BAUMGART, 2000).

Para os testes de compressão ou tração uniaxial, a rigidez do material pode ser obtida na região elástica aplicando-se a lei de Hooke (6):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

Em que o módulo de Young E funciona corresponde à rigidez do material.

No caso dos ensaios de flexão em 4 pontos, a rigidez E é determinada pela curvatura da linha neutra do corpo de prova. A curvatura é definida pelo inverso do raio de curvatura que pode ser obtido resolvendo:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\sigma_m}{Eb} = \frac{1}{Ec} = \frac{Mb}{I} \quad (7)$$

Em que M é o momento entre roletes, I é o segundo momento de área da secção transversal, ρ é o raio de curvatura e b é a distância à linha neutra, obtendo-se:

$$E = \frac{M\rho}{I} \quad (8)$$

Além dos ensaios estáticos, o módulo de Young do material rochoso pode ser medido por meio de ensaios dinâmicos. O princípio dos métodos dinâmicos ou adiabáticos consiste em calcular os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros geométricos (KANEKO, 1960). Os ensaios mais conhecidos são

de determinação da frequência de ressonância e da velocidade de propagação de ondas ultrassom.

Por ser um ensaio prático e não-destrutivo, muitos pesquisadores utilizaram o método ultrassom para determinar o módulo de Young e estabelecer relações com as propriedades físicas e mecânicas das rochas (CERRILLO et al., 2014; DEL RIO, 2006; LIAO; HU; CHANG, 1997; SONG et al., 2004; VASCONCELOS et al., 2008).

Wiejermars (1997) aponta que o módulo de Young obtido por meio dos ensaios de frequência natural são mais precisos que o calculado nas curvas de tensão-deformação resultantes de ensaios estáticos. Cicotti e Mulargia (2004) relatam que os valores do módulo de Young dinâmico têm a reputação de ser superiores aos determinados por métodos estáticos.

Moreiras (2014) realizou a caracterização estrutural de três “granitos” brasileiros, Vermelho Capão Bonito (VCB), Preto São Gabriel e Branco Desireé (BD), e utilizou o método de propagação de ondas ultrassônicas e o de frequência de ressonância para determinar o módulo de Young dos materiais. Ao comparar os resultados obtidos pelos dois métodos, foi observado que o módulo de Young calculado por meio da frequência de ressonância apresentou acréscimos de 26% para o VCB, 22% para o PSG e 16% para o BD em relação ao método do ultrassom.

2.3.4. Relação entre comportamento mecânico e propriedades petrográficas das rochas

O comportamento mecânico das rochas quando submetidas a solicitações de carga, e por consequência, o formato das curvas tensão-deformação resultantes alteram-se em função de uma série de fatores externos e internos, respectivamente as condições do ensaio e as propriedades intrínsecas dos materiais.

Bogusz e Bukowska (2015) citam o tamanho e formato dos corpos de prova, o método usado para controlar a rigidez da máquina de teste, a taxa de deformação aplicada durante o ensaio e o teor de umidade como fatores externos que influenciam o desempenho mecânico do material rochoso.

Estudos experimentais de Van Vliet e Van Mier (2000) revelaram que a resistência à tração diminui com o tamanho da amostra, enquanto a energia de fratura apresenta valores mais elevados para estruturas maiores.

Uma série de investigações foram feitas sobre a influência das propriedades petrográficas das rochas no seu desempenho mecânico:

Miskovsky et al. (2004) analisaram a influência da composição mineralógica e propriedades texturais utilizando uma correlação estatística e modelos lineares. Os resultados indicam que um teor crescente de feldspato influencia negativamente a resistência ao impacto de granitoides. O feldspato potássico possui dois planos de clivagem bem desenvolvidos, o que prejudica a coesão e define planos de fraqueza na rocha (ULUSAY; SÖNMEZ⁴, 2002 *apud* FENER; INCE, 2012).

A textura da rocha, compreendida como o tamanho, formato e arranjo espacial dos grãos minerais é um parâmetro fundamental na compreensão da resistência da rocha. Os trabalhos de Akesson et al. (2003), Prikryl (2006), Tuğrul e Zarif (1999) e Yilmaz et al. (2011) revelam que cristais grandes tendem a apresentar um maior número de microfissuras intra e intercristalinas, e pobre imbricamento mineral, o que resulta numa baixa resistência mecânica.

Há ainda de se considerar a microestrutura da rocha como o mecanismo precursor da falha em ensaios mecânicos. Inúmeras microfissuras são geralmente distribuídos pelo volume da rocha e se propagam sob carregamento (ZHOU; LI, 2009). Por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e testes de emissão acústica, foi constatado que o crescimento e nucleação dessas fissuras determinam a falha e as propriedades mecânicas macroscópicas do material rochoso (HORI; NEMAT-NASSER, 1983;1985; SOUSA et al., 2005; XIA et al., 2008; WONG, 1985).

2.3.4.1. Adesão mineral

O processo de reforço de placas de rochas envolve o emprego de um sistema epóxi e tela de fibra de vidro. Além de preencher as microfissuras da rocha, o sistema epóxi atua como adesivo para fixar a tela na chapa. Dessa forma, a adesão entre o substrato (rocha) e o adesivo é um parâmetro fundamental para que haja transferência de esforços e o reforço do material seja efetivo.

O termo adesão assume definições distintas, em função do campo de aplicação. No estudo de Sekulic e Curnier (2010), a adesão é definida como a resistência *normal* oposta por dois materiais em uma interface à sua separação (ortogonal à interface). A aderência é a contrapartida *tangencial* (comportamento cisalhante) da adesão. Adesão e aderência são, portanto, dois aspectos do mesmo fenômeno.

⁴Ulusay, R. & Sönmez, H. Engineering properties of rock mass. TMMOB Chamber of Geological Engineers Publications: 60, Ankara (2002)

Segundo Chaudhury (2001), a adesão entre superfícies resulta de interações intermoleculares, podendo ser expressa em termos de variação na rede superficial e energias interfaciais no processo de junção de dois materiais (equação 9):

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (9)$$

Onde γ_1 e γ_2 são as energias superficiais livres dos materiais 1 e 2 e γ_{12} é sua energia interfacial livre. Num processo reverso de separação da interface, um trabalho externo W_{12} seria requerido, sendo portanto chamado trabalho de adesão.

Pazeto, Paraguassú e Ribeiro (2012) estudaram a resistência de aderência à tração (*pull-out test*) de macrocristais de quartzo e de feldspato potássico com uma resina epóxi do tipo DGEBA. Foi constatado que o quartzo apresentou maior resistência de aderência à tração. A clivagem do feldspato, que é proeminente em mais de uma direção, configura planos de fraqueza segundo os quais o mineral descola do substrato de ensaio.

Capítulo 3

ROCHAS ORNAMENTAIS EXÓTICAS: RELAÇÃO ENTRE A GEOLOGIA E A INDÚSTRIA

A Indústria da Pedra é uma das mais importantes áreas emergentes de negócios minero-industriais. Atualmente figuram como o 5º principal recurso mineral exportado pelo país (excluindo-se petróleo e gás), depois do minério de ferro, ouro em barras, ferro-nióbio e minério de cobre (CHIODI FILHO, 2017). No país existem atualmente cerca de 1500 frentes de lavra ativa, com produção de mais de 1200 tipos diferentes de materiais.

A partir da década de 1980 o Brasil colocou centenas de novos materiais graníticos no mercado internacional, o que o tornou mundialmente conhecido por sua excelente geodiversidade. Segundo Montani (2015), o desenvolvimento de tecnologias mais adequadas para lavra e beneficiamento de materiais duros fez com que a participação das rochas silicáticas no total da produção e exportação evoluísse de 10%, na década de 1920, para um patamar atual de quase 40%.

Nesse contexto, o Brasil tornou-se o maior produtor e fornecedor dos chamados “granitos” exóticos, como os pegmatitos, sendo estes atualmente o principal produto da pauta de exportações do setor.

Os materiais exóticos são assim denominados no intuito de descrever sua estética peculiar. São rochas que se destacam por possuírem cores diferenciadas e padrões de textura e estrutura especiais, muito bem aceitos no mercado externo, principalmente o norte americano.

Embora já amplamente conhecidas no setor, as rochas exóticas ainda são pouco exploradas na literatura especializada sob o ponto de vista comercial. Devido a isto, neste capítulo são tecidas considerações geológicas sobre os pegmatitos, representantes majoritários dos materiais exóticos brasileiros e os tipos litológicos escolhidos para essa pesquisa. Ao mesmo tempo são discutidos a ampla aplicação dessas rochas na arquitetura e os problemas de engenharia.

3.1. Geologia dos Pegmatitos

3.1.1. Definições

Embora muito discutidas na Petrologia, as explicações sobre a origem dos pegmatitos, de suas complexas estruturas, zonamento interno e as particularidades geoquímicas e mineralógicas que os distinguem de granitos comuns ainda são controversas.

O termo pegmatito foi aplicado pela primeira vez em 1822 por Häuy para denominar o intercrescimento de quartzo com feldspato, o que hoje é conhecido como textura gráfica.

Fersman (1931) e Landes (1933) definiram pegmatito como uma rocha holocristalina, intrusiva, composta essencialmente por minerais de granulometria grossa.

A definição apresentada no trabalho de Jahns (1955) é uma das mais difundidas e bem aceitas: “rochas holocristalinas que apresentam, pelo menos em parte, uma granulação muito grosseira, contendo como maiores constituintes minerais àqueles encontrados tipicamente em rochas ígneas comuns, mas com a característica de apresentarem extremas variações no que se refere ao tamanho dos grãos”.

Um conceito bastante abrangente, reunindo as definições anteriores, e também mais completo é dado por Thomas, Davidson e Beurlen (2012). De acordo com seus estudos, os pegmatitos tomados como um grupo possuem uma série de características que devem ser abordadas por qualquer modelo, começando por serem tipicamente rochas ígneas intrusivas de granulação grossa com grandes cristais engrenados (usualmente > 2 cm), mas que em ocasiões raras produzem cristais individuais de dezenas de metros. Com frequência apresentam cristais extremamente grandes e bem desenvolvidos (Figura 3.1), comumente de minerais raros, e podem conter concentrações extremamente altas de metais raros, às vezes depósitos de minérios.

O que se observa em campo, no entanto, é que mesmo em regiões que contém pegmatitos complexos ricos em elementos raros, os pegmatitos simples que contém somente quartzo, feldspato e possivelmente alguma mica são dominantes em número e volume.

Atualmente, além da conotação textural (granulação grosseira), o termo pegmatito também é empregado para denominar um corpo litológico.

Figura 3.1. Megacristal de quartzo extraído do Pegmatito do Sapo – MG.

Fonte: Liccardo (2008).

3.1.2. Ocorrência e morfologia

Segundo Cameron et al. (1949), os pegmatitos encontram-se no interior e/ou ao redor de maciços graníticos, dos quais constituem, em geral, seus prolongamentos. Apresentam-se geralmente sob a forma de diques ou veios, filões ou corpos de formas irregulares, especialmente ao longo das margens de batólitos, mostrando forte zonamento interno e estrutura anisotrópica. No exterior dos maciços graníticos, essas formações pegmatíticas sobressaem-se e prolongam-se em ramificações filonares, cortando as rochas encaixantes.

As massas pegmatíticas individuais ocorrem, frequentemente, em formas tabulares ou lenticulares e variam de poucos centímetros até centenas de metros de comprimento (Figura 3.2). Em alguns casos, os corpos mais maciços em formas de dique e *pipe* irregular, apresentam-se com vários quilômetros de comprimento e, localmente, com até 300 metros de espessura.

Figura 3.2. Corpos pegmatíticos; (A) perfil transversal de pegmatito em forma de balão, com alto ângulo de mergulho e (B) perfil transversal de pegmatito lenticular, horizontal.

Fonte: Adaptado de Cameron et al.¹ (1949) *apud* Liccardo (2008).

3.1.3. Classificação, mineralogia e zoneamento

Os pegmatitos são classificados em simples, complexos ou mistos. Os primeiros exibem uma estrutura homogênea, com minerais distribuídos uniformemente ao longo do corpo, enquanto os segundos têm os seus minerais organizados numa sequência zonal, ou seja, com uma estrutura heterogênea e muitos ocorrem em assembleias de minerais raros. O terceiro tipo constitui, segundo a classificação de Rolff (1945), um meio termo entre os pegmatitos simples e complexos, com a presença de bolsões de quartzo ao invés de núcleos individualizados.

A Figura 3.3 ilustra os três tipos de estruturas pegmatíticas:

¹CAMERON, E. N. et al. **Internal structure of granitic pegmatites.** Littleton: Society of Economic Geologists, 1949. (Economic Geology Monograph, 2).

Figura 3.3. Classificação estrutural de pegmatitos segundo Johnston (1945) e Rolff (1945): (A) homogêneo, (B) heterogêneo e (C) misto.

Fonte: Lima (2002).

Os pegmatitos simples ou homogêneos são compostos por minerais essenciais análogos às rochas graníticas, como quartzo, feldspato, muscovita e/ou biotita. Já os pegmatitos zonados, com alto grau de fracionamento podem apresentar uma assembleia com centenas de minerais, inclusive raros. Segundo Cerný (1993) essa diversidade é realçada pelas fases magmáticas finais, enriquecidas em componentes voláteis de grande mobilidade (F_2 , B_2O_3 , H_2O) e álcalis raros (Li, Rb, Cs) e uma ampla variedade de minerais acessórios, portadores de elementos traços, litófilos, caracterizando os chamados pegmatitos de elementos raros.

Os principais minerais acessórios encontrados em pegmatitos complexos ou diferenciados são: minerais de lítio (lepidolita, zinnwaldita, espodumênio, ambigonita, petalita, eucryptita, trifilita e litiofilita); minerais de berílio (berilo, crisoberilo, fenaquita); minerais de cério (pollucita e allanita); minerais de boro (turmalina); minerais de fósforo (apatita, arrojadita e triplita); minerais de nióbio e tântalo (columbita, tantalita e microlita); minerais de zircônio (zircão); minerais sulfetos (galena, esfalerita, calcosita associada à malaquita e azurita); minerais de urânio (uraninita, pechblenda e gummita) e minerais de terras raras (monazita, xenotima, fergusonita e outros).

A complexidade estrutural dos pegmatitos levaram vários pesquisadores a estabelecerem conceitos fundamentais de zoneamento interno relacionado com os corpos

pegmatíticos, de acordo com as suas fases minerais. A concepção básica divide os pegmatitos em não-zonados (com os elementos normais de formação distribuídos uniformemente por toda massa constituinte do corpo) e zonados (correspondem aos tipos complexos com grandes variações texturais, estruturais e mineralógicas ao longo do corpo litológico)

3.1.4. Gênese

A origem dos pegmatitos ainda é um tema complexo, com muitos estudos e modelos propostos para explicar sua gênese e evolução. No entanto, a maioria dos geólogos aceita que os pegmatitos são originados a partir de fusões silicatadas. A controvérsia reside em explicar se essas fusões são produto da fusão parcial (anatexia) de rochas metamórficas de alto grau, principalmente metassedimentares, ou da cristalização fracionada de magmas graníticos, em sua fase residual (CERNÝ, 1982; JAHNS, 1955).

Para o primeiro caso, considera-se que a maioria dos pegmatitos formados em grande profundidade é de origem anatética, gerados por remobilização crustal. Os pegmatitos estariam vinculados aos processos geradores de leucossomas em terrenos migmatíticos, característicos de fácies metamórfica de alto grau. Em geral são relativamente notáveis os teores de Ca, Ba e Sr em detrimento ao fracionamento de álcalis raros (CERNÝ, 1982). Segundo Fersman (1931), o resultado seriam pegmatitos de composição semelhante à granitos alcalinos supersaturados em sílica, com presença de quartzo, plagioclásio sódico em quantidades variáveis, feldspato potássico e muscovita.

No segundo caso, o modelo de Fersman (1931) explica que os pegmatitos seriam produtos de solidificação de um magma granítico residual, ocorrendo o processo de cristalização fracionada com eventos subsequentes de transformação parcial por meio dos fluidos mineralizantes. Para isso, seria fundamental a existência de uma fração residual altamente mineralizada por componentes voláteis e elementos raros. O líquido residual seria gerado durante a cristalização da massa granítica e, posteriormente, migraria em direção ascendente através das rochas encaixantes, preenchendo descontinuidades. O início do processo ocorreria entre 700 e 800° C e a evolução completa se daria em condições de um sistema físico-químico fechado (bolsões) com a água presente na fusão silicatada.

Jahns (1955) completa que o líquido viscoso presente na fração residual do magma é rico em álcalis e alumina, contendo água, componentes voláteis e elementos menores incompatíveis (Li, Be, Bo, Tn, Ga, St, Rb, etc.), os quais não se incorporam nos minerais

comuns das rochas ígneas e formariam os minerais raros presentes nos pegmatitos complexos. Nas condições de fluido descritas, os íons possuem grande mobilidade, favorecendo o crescimento dos cristais, e permitindo-lhes atingir até grandes dimensões.

De uma forma geral, são reconhecidos duas fases de evolução na formação dos pegmatitos: a fase magmática, onde as soluções pegmatíticas seriam alojadas e cristalizadas em sistema fechado, e a fase hidrotermal, durante o qual as soluções reagiriam com as assembleias primárias, provocando sucessivas substituições num sistema aberto. Esses sistemas seriam formados através da fusão parcial de material crustal ou como um líquido final, produzido durante o resfriamento de um batólito, no qual o líquido silicático granítico coexistiria com um fluido aquoso salino de baixa densidade. Uma das rochas estudadas, o pegmatito de nome comercial Tropical Treasure pertence a essas fases, sendo explorado na região de Conselheiro Pena - MG.

Atualmente os pesquisadores reconhecem a importância dos processos metassomáticos (tanto hidrotermais quanto pneumatolíticos) nas rochas graníticas, sem os quais é improvável a formação de pegmatitos ricos em minerais raros, de grande valor econômico (LONDON, 1992; 2005; THOMAS; DAVIDSON; BEURLIN, 2012).

3.1.5. Importância econômica

Os pegmatitos possuem expressiva importância na economia por estarem relacionados às ocorrências de depósitos minerais e pedras preciosas.

Os geodos são cavidades de ocorrência de minerais-gema nos pegmatitos. As maiores estão parcial ou totalmente preenchidas com minerais argilosos, agregados de feldspatos, cristais ou fragmentos de quartzo, turmalina, berilo e outras gemas. Jahns (1955) atribui a formação dos geodos aos fluidos hidrotermais percolantes nos corpos pegmatíticos durante os últimos estágios de cristalização. O conteúdo dos geodos seria formado por processos diversos, seja por resíduos de minerais primários ou como produtos de substituição, representados pelos minerais mais jovens.

Os pegmatitos heterogêneos e mistos possuem vital importância por serem as principais fontes de quartzo, feldspato e micas. O zoneamento desses pegmatitos implica na formação de bolsões desses minerais, que são amplamente explorados para fins de aplicação industrial, principalmente em eletrônica (quartzo), indústrias de refratários (micas) e porcelana (feldspato).

O aproveitamento econômico dos pegmatitos como rochas ornamentais é recente, mas de alto valor agregado, e sua relevância vem se destacando na última década. O tema será abordado mais detalhadamente nos próximos subitens.

3.1.6. Províncias pegmatíticas no Brasil

O Brasil possui três principais províncias pegmatíticas: a Província Pegmatítica do Nordeste, Província Pegmatítica Oriental e Província Meridional (Figura 3.4), sendo as duas primeiras mais estudadas e importantes.

Figura 3.4. Províncias pegmatíticas brasileiras. No mapa: Província Pegmatítica do Nordeste (destaque laranja), Província Pegmatítica Oriental (destaque azul) e Província Meridional (destaque verde).

Fonte: Liccardo (2008).

3.1.6.1. Província Pegmatítica Oriental

A Província Pegmatítica Oriental é a maior em área (~120.000 km²) e em importância. Os pegmatitos estão distribuídos pelo leste do estado de Minas Gerais, oeste do Espírito Santo, norte do Rio de Janeiro, e Sul da Bahia. A Província é caracterizada não só pela sua localização geográfica, mas também por seu posicionamento geotectônico particular num

cinturão orogênico Neoproterozóico-Cambriano gerado durante o ciclo Brasileiro-Pan-Africano, que consistiu de um conjunto de orogêneses com duração de 850 a 550 Ma (PINTO; PEDROSA-SOARES, 2001).

A maioria dos pegmatitos da Província Oriental está relacionada a intrusões de granito no cinturão móvel Brasileiro gerado durante a consolidação do supercontinente Gondwana. Eles são considerados fundidos residuais derivados de granitos do tipo-S (produto da fusão total ou parcial de uma fonte sedimentar) e tipo-I (derivados de fontes ígneas) (LOBATO; PEDROSA-SOARES, 1993; PEDROSA-SOARES et al., 1999; PINTO; PEDROSA - SOARES, 2001).

Bilal (2000) classificam os pegmatitos dessa Província em dois grupos: (1) portadores de lítio, ricos em gemas de turmalina e (2) portadores de berilo, às vezes na qualidade de gema, mas em sua maioria com ocorrências de feldspato para aplicação em cerâmica. De fato, a região nordeste de Minas Gerais é mundialmente famosa devido à ocorrência de minerais-gema excepcionais pela raridade e/ou por seus aspectos visuais, principalmente água-marinha, permitindo com que sejam comercializados no atrativo mercado de minerais para coleção e gemas para confecção de joias. Outros minerais-gemas exploradas nos pegmatitos da província Oriental são: topázio, alexandrita, kunzita, crisoberilo e minerais raros de fosfatos, como brazilianita, frondelita, gormanita, dentre outros (CHAVES; SCHOLZ, 2008).

3.1.6.2. Província Pegmatítica do Nordeste

A Província Pegmatítica do Nordeste encontra-se distribuída pelos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Ceará e contém mais de 1500 pegmatitos produtores de minerais raros (Be, Ta-Nb, Li e Sn), de minerais gemas, como a “Turmalina Paraíba”, e de minerais industriais, como feldspato cerâmico, caulim e quartzo (DA SILVA et al., 1995). A área de ocorrência dos pegmatitos engloba cerca de 10.000 km², constituindo o que Scorza (1944) denominou de Província Pegmatítica Borborema.

A região onde se insere a Província Borborema constitui uma entidade tectônica que teve sua configuração atual definida durante o Ciclo Brasileiro. Tal ciclo foi composto por uma série de eventos tectono-orogênicos, desencadeados no final do Proterozóico Superior, resultando na formação de unidades litoestruturais de rochas magmáticas consolidadas na parte superior da crosta (BRITO NEVES et al., 2000; JARDIM DE SÁ, 1994; SANTOS et al., 1999).

Na Província Pegmatítica Borborema está englobada a Subprovíncia Pegmatítica do Ceará, que possui três distritos pegmatíticos: (1) Cristais-Russas, (2) Itapiúna e (3) Solonópole-Quixeramobim, que é o mais importante.

Segundo Luz et al. (2003) a ênfase na exploração dos pegmatitos da Província Borborema foi direcionada por mais de quarenta anos à produção de minerais metalíferos. Por demanda das indústrias cerâmicas, e a concomitante deterioração dos preços dos metais, verifica-se nos anos recentes uma guinada em direção à produção dos minerais industriais, passando os minerais metalíferos a serem relegados a um segundo plano.

A exploração de minerais gemas ainda permanece forte, sendo que a região de São José da Batalha - PB é mundialmente conhecida por ter uma das únicas ocorrências no mundo de cobre-elbaíta ou “turmalina Paraíba”, como foi denominada regionalmente. A raridade e exclusividade faz com que a “turmalina Paraíba” seja uma das gemas mais cobiçadas e caras do mundo, podendo custar mais de US\$100 mil/ct.

3.1.7. Aplicação dos pegmatitos como rochas ornamentais e de revestimento

Segundo Chiodi Filho (2014), uma vez superada a crise de 2008 no setor imobiliário, a Indústria da Pedra seguiu em expansão, sendo caracterizada nos últimos anos pelo crescimento consistente da sua produção, pelo incremento nas exportações (principalmente de chapas polidas), por uma significativa expansão dos investimentos industriais (teares multifio diamantado) e pela agregação de valor aos produtos exportados.

Não menos importante, a demanda do mercado externo exigiu que novos materiais fossem continuamente colocados em produção, destacando-se as rochas exóticas, de alto valor agregado, que hoje constituem o principal grupo de produtos brasileiros de exportação. Como resultado desse processo, o Brasil tornou-se um dos maiores fornecedores mundiais, tendo colocado no mercado internacional, ao longo dos últimos dez anos, uma variedade de materiais maior do que toda a Europa em 500 anos (CHIODI FILHO, 2014).

Segundo comunicação verbal com grandes indústrias do estado do Espírito Santo, os materiais exóticos começaram a ser explorados como rochas ornamentais há pouco mais de duas décadas. Até o final dos anos 90, os pegmatitos encontrados eram considerados material de refugio, sendo explorados apenas por mineradores que forneciam feldspato para a indústria cerâmica.

Como o comércio de rochas é movido por tendências, a partir dos anos 2000 os EUA começaram a demonstrar interesse pelo aspecto peculiar dos pegmatitos e abre-se então um novo nicho de mercado. Atualmente no Brasil são exploradas muitas variedades de pegmatitos e outras rochas exóticas, mas inicialmente os materiais procurados eram os de tonalidade amarela (Figura 3.5), que na verdade correspondem a rochas alteradas. A coloração característica é resultado da oxidação do material ferroso presente na composição da rocha.

Figura 3.5. Chapa do pegmatito de nome comercial “Delicatus Gold”, ainda hoje muito bem aceito no mercado externo.

Fonte: O Autor.

Deve-se ressaltar que um dos pontos chave para a inserção dos materiais exóticos no mercado foi o desenvolvimento da técnica de telagem (reforço). Os compradores americanos, diante da constatação da fragilidade mecânica desse tipo de material exigiam que as chapas fossem teladas antes de serem comercializadas.

Uma das rochas exóticas brasileiras mais caras é o sodalita sienito de nome comercial Azul Bahia (Tabela 3.1). O aspecto visual desta rocha é muito heterogêneo, desde a fase de baixo teor de sodalita com textura similar a granito, de valor em torno de US\$ 600/m³ em preço de pedreira, até a fase de alto teor de sodalita com textura gnáissica de valor superior a US\$ 2500/m³.

Os EUA continuam sendo o principal comprador dos “granitos” exóticos brasileiros. Isto é particularmente relevante quando se sabe que os EUA permanecem como o maior importador mundial de rochas processadas especiais, com aquisições totais de US\$ 782 milhões em 2015 (MONTANI, 2015).

Além dos pegmatitos, que são carro chefe das exportações brasileiras, outros litotipos são incluídos na categoria de exóticos e possuem importância expressiva, como os quartzitos, gnaisses, granitos infiltrados, ônix, conglomerados, dentre outros. A Tabela 6.1 ilustra algumas rochas exóticas comercializadas pela indústria brasileira:

Tabela 3.1. Rochas exóticas comercializadas por indústrias brasileiras.

Aspecto Visual	Nome Comercial/Classificação Geológica/Empresa Fornecedora	Características
“Bianco Antico” Pegmatito Granitos e Mineração Itapoama	A coloração bege e a textura diferenciada denotada pelos megacristais de feldspato potássico fazem com que este seja um dos exóticos mais aceitos pelo mercado.
“Krystallys” Quartzito translúcido Granitos e Mineração Itapoama	A translucidez conferida pela presença de quartzo é tendência nas últimas feiras da área, e permite utilizar esse material principalmente de forma decorativa como painéis retro iluminados.
“Ônix Verde” Mármore Decolores Mármore e Granitos	O apelo estético desta rocha é oriundo da estrutura metamórfica e dos veios estratificados de coloração esverdeada denotada pelos minerais de carbonato de cálcio
“Azul Bahia” Sienito NEF Mármore e Granitos	A cor azul marcante denotada pelos cristais de sodalita confere o caráter exótico ao material, um dos mais famosos do Brasil.
“Gaya” Quartzito Marbrasa Mármore e Granitos	A coloração verde bastante pronunciada provém do mineral fuchsite, da família das micas. A resistência do material também é um fator relevante para sua aplicação em ambientes como bancadas e tampos de mesa.

Fonte: O Autor.

Tabela 3.1. Rochas exóticas comercializadas por indústrias brasileiras (continuação).

<p>“Copacabana” Migmatito</p> <p>Mameri Rochas</p>	As bandas claras (neossoma) e escuras (leucossoma) do migmatito aliadas à estrutura anisotrópica fizeram desse exótico um dos destaques da feira internacional Coverings nos EUA, em 2013.
<p>“Xango Red” Quartzito</p> <p>Cajugram Mármore e Granitos</p>	A presença de óxidos e hidróxidos de ferro na composição mineralógica da rocha confere a coloração vermelha peculiar.
<p>“Aspen White” Gnaisse</p> <p>Granito Zucchi</p>	Os gnaisses são um dos exóticos de maior aceitação comercial, dado sua estrutura bandada que dá sensação de movimento.
<p>“Solarius” Granito</p> <p>Magban Mármore e Granito</p>	O estado do Espírito Santo é conhecido no mercado internacional pelo fornecimento de granitos amarelos. O tom característico é devido ao hidróxido de ferro originado da desintegração intempérica da biotita.
<p>“Baltic Brown Dark” Conglomerado</p> <p>Antolini do Brasil</p>	Os seixos quartzo-feldspáticos em matriz escura conferem beleza única ao material que é usado principalmente em peças isoladas (tampos de emsa, pias, etc.).

Fonte: O Autor.

3.2. Aplicações na Arquitetura

Há muito tempo a versatilidade e a qualidade das rochas foram reconhecidas e utilizadas na arquitetura.

O período clássico da cultura grega, entre os séculos VI e IV a.C., onde os artistas constataram que o mármore apresentava propriedades de cor e textura que permitiam esculpir figuras humanas idênticas às reais, coincide com o auge da arquitetura grega, em que se construíram memoráveis monumentos em pedra, como o Parthenon.

Os romanos, por sua vez utilizaram a pedra em suas construções não somente na arquitetura, mas também em grandes obras de infraestrutura. A Via Ápia foi a primeira e principal estrada romana, construída em 312 a.C. para ligar Roma à cidade de Cápuia.

Embora tenha sido os gregos que levaram o uso da rocha para o domínio público, deve-se aos romanos sua aplicação em construção privadas, como símbolo de riqueza e status de seu proprietário. A *domus* era a residência urbana das famílias abastadas na Roma Antiga, e, portanto, na sua maioria, das patrícias, nome pela qual era denominada a nobreza romana. Eram construções sofisticadas e luxuosas em regiões residenciais em meio à cidade (ALENCAR, 1996).

Desde então, o uso da rocha se fez presente em quase todas as civilizações e sua aplicação na arquitetura adquire usos cada vez mais versáteis. Chiodi Filho (2008) caracteriza a década de 80 e 90 como a “Nova Idade da Pedra”, uma vez que neste período ocorreu um *boom* no comércio de rochas ornamentais e estas passaram a ser utilizadas principalmente como revestimento de pisos e fachadas em edificações.

Essa disseminação e constante crescimento da utilização da rocha na arquitetura deve-se, sobretudo, à versatilidade, beleza e durabilidade que esse material apresenta. Quando se trata dos materiais exóticos, a valorização estética que estes proporcionam ao ambiente é um dos critérios definitivos na sua escolha.

Segundo Schulmeister (2014, informação pessoal)², as rochas exóticas são revestimentos nobres que enaltecem um ambiente. Suas texturas e desenhos naturais e únicos ajudam a compor o projeto de maneira exclusiva. Também são mais resistentes que outras opções que o mercado da decoração oferece, como papéis de parede, porcelanatos, cerâmicas, acrílicos, vidros e madeiras beneficiadas. Além disso, como o valor é maior se comparado com as demais opções, o uso de rochas transmite a sofisticação e investimento do profissional e do seu cliente ao projeto.

² Comunicação via correio eletrônico efetuada com a arquiteta curitibana Erika Schulmeister em 06 de Junho de 2014.

Embora as rochas exóticas sejam mais comumente comercializadas no mercado externo, tem-se notado um gradual aumento no consumo interno desse tipo de material. As últimas feiras e eventos na área de rochas de revestimento no país (Expo Revestir, Casa Cor, Vitória Stone Fair, Cachoeiro Stone) tem desempenhado papel fundamental para disseminar a ideia da utilização dos exóticos também em obras brasileiras. O Guia de Especificação de Rochas lançado em 2009 pela APEX/Abirochas e o Manual de Rochas Ornamentais do IEL/ES de 2013 também foram iniciativas importantes para diminuir o gargalo comunicativo que existe entre as indústrias de rochas e especificadores.

Os arquitetos e designers brasileiros afirmam que a beleza peculiar da rocha exótica confere caráter de exclusividade ao projeto, pela possibilidade de personalização. O apelo estético do material exótico o transforma em uma obra de arte por si só, permitindo que ele seja inclusive utilizado como uma peça decorativa, como ocorre com os painéis paginados (Figura 3.6).

Figura 3.6. Painel paginado do Ônix de nome comercial Facination.

Fonte: Gransena (2014).

Ainda segundo Schulmeister (2014), a definição das cores, texturas e formatos das rochas acontece na concepção do projeto. Cores neutras como o branco e tons pastéis predominantes na peça são as que mais agradam os clientes e facilitam para o profissional a composição com demais objetos e itens. Cores mais fortes e texturas mais trabalhadas são utilizadas quando solicitadas pelo cliente ou selecionadas pelo profissional para harmonizar ou contrastar com os demais elementos.

Dado o alto valor agregado, essas rochas são utilizadas principalmente em peças isoladas, como se fossem objetos decorativos, mas que ao mesmo tempo conferem total requinte e sofisticação ao espaço onde é inserido. O mercado norte americano com frequência adquire chapas de materiais exóticos para fabricação de bancadas (*countertops*). No Brasil, além das bancadas, ocorre a aplicação sob a forma de pequenos revestimentos, escadas, tampos de mesa, lavabos, lareiras e outras peças isoladas (Figuras 3.7 a 3.10).

Figura 3.7. Bancada confeccionada em rocha exótica de nome comercial Mirage.

Fonte: Decolores Mármore e Granitos (2014).

Figura 3.8. Detalhe de uma lareira confeccionada em material exótico de nome comercial Fusion.

Fonte: Granito Zucchi (2014).

Figura 3.9. Cuba e pia de banheiro confeccionada em ônix de nome comercial Bianco Andino.

Fonte: Marmoraria Itaarte (2015).

Figura 3.10. Escada confeccionada em quartzito de nome comercial Gaya.

Fonte: Marbrasa Mármores e Granitos (2014).

3.3. Problemas de Engenharia

Não obstante a beleza estética, a maioria das rochas exóticas apresenta algum tipo de fragilidade mecânica quando comparada com as rochas comuns (um granito isotrópico, por exemplo). Esta propriedade de engenharia está intimamente relacionada com as características petrográficas do material, principalmente sua textura e estrutura. Nesse sentido, é importante que se tenha um bom conhecimento da rocha, por meio de ensaios tecnológicos, visto que

suas propriedades intrínsecas irão influenciar no modo de extração da rocha na pedreira e seu próprio uso como rocha de revestimento.

A Tabela 3.2 relaciona de forma sucinta os principais tipos de rochas exóticas com suas propriedades petrográficas que determinam baixa resistência mecânica, principalmente em relação aos esforços fletores e de tração:

Tabela 3.2. Materiais exóticos e propriedades petrográficas relacionadas.

Rocha Exótica	Propriedades Petrográficas
Pegmatito	Textura grossa Leitos micáceos Alteração intempérica
Gnaisse	Estrutura anisotrópica Leitos micáceos
Quartzito	Foliação
Conglomerado	Textura grossa
Ônix	Estrutura anisotrópica Alteração intempérica
Granitos infiltrados	Alteração intempérica

Fonte: O Autor.

De forma geral, tem-se estabelecido que quanto mais grossa for a textura da rocha, ou seja, maiores forem seus constituintes minerais, tanto menor é seu grau de imbricamento, o que favorece a fragilidade mecânica. Deve-se também considerar que quanto maior os cristais, mais pronunciados serão seus planos de fraqueza (microdescontinuidades), passíveis de serem fraturados por esforços mecânicos (ONODERA; KUMARA, 1980; TUĞRUL; ZARIF, 1999), o que permite uma analogia com os macrocristais das rochas exóticas Tropical Treasure e Iberê Plantus, estudadas nesta pesquisa.

Com relação ao feldspato, componente majoritário da maioria dos pegmatitos há ainda um estudo de Fener e Ince (2012) que reforça essa discussão ao considerar a influência dos planos de clivagem de fenocristais de ortoclásio na resistência mecânica verificada em ensaios de carga pontual. Foi observado que a ruptura dos cristais ocorreu na maioria das vezes ao longo desses planos de fraqueza, e que os valores de resistência encontrados diminuía conforme aumentava o tamanho do fenocristal.

A presença de alguns minerais na assembleia que compõe a rocha, tais como as micas também favorecem a diminuição da resistência última da rocha. Segundo Williard e McWilliams (1969), a clivagem mineral proeminente pode atuar como superfície de fraqueza, controlando a direção onde ocorre a fratura. A Figura 3.11 ilustra a superfície de ruptura de

um pegmatito rico em biotita, após submetido ao ensaio de resistência à tração na flexão em 4 pontos:

Figura 3.11. Zona de ruptura em corpo de prova do pegmatito Iberê Plantus segundo clivagem da biotita (detalhe pontilhado).

Fonte: O Autor.

A alteração química dos constituintes minerais também é outro fator que influencia o decaimento da resistência mecânica da rocha. O mineral alterado torna-se enfraquecido por ter seus elementos químicos lixiviados, principalmente pela água. Um bom exemplo é a formação de óxidos e hidróxidos de ferro a partir da desintegração intempérica da biotita, que resulta numa coloração amarelada na rocha (Figura 3.12).

Figura 3.12. Zona de ruptura no pegmatito Tropical Treasure com alteração intempérica, após ensaio de tração na flexão.

Fonte: O Autor.

Quanto à estrutura anisotrópica (seja ela bandada, foliada ou xistosa), esta é originada durante os processos metamórficos em que se produz orientação e/ou estiramento nos minerais, o que configura planos de fraqueza. Em função da direção do esforço que é aplicado sobre o material, este apresentará maior vulnerabilidade à ruptura.

Uma vez reconhecido que são fatores ligados à gênese que resultam na fragilidade mecânica da rocha exótica, a comercialização destes materiais depende do desenvolvimento de tecnologias que atenuem esse atributo.

No reforço industrial são empregados dois insumos: o sistema epóxi, que penetra nas discontinuidades da rocha preenchendo-as, além de agir como adesivo para a fixação da tela; e a própria tela de fibra de vidro, que atua no sentido de manter o material unido, mesmo se houver ruptura, para que a placa ou a peça não estilhace.

Por outro lado, segundo testes preliminares realizados em rochas desta pesquisa, em termos de resistência há um aumento de apenas 10% quando comparado com a rocha sem reforço. A placa torna-se apta para suportar os esforços decorrentes do processo de beneficiamento (como a compressão imposta pelos cabeçotes da politriz), no entanto sua confiabilidade como material de construção permanece duvidosa, restringindo as aplicações.

Diante desse fato, e da telagem sozinha se mostrar insuficiente como reforço para alguns materiais exóticos, é pertinente que se desenvolva outras soluções de reforço, como as que utilizam fibra de sisal e outras fibras sintéticas, propostas nesta pesquisa.

Capítulo 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

As rochas exóticas são materiais de grande complexidade, dado principalmente à heterogeneidade na composição mineral e na textura. Em função disto, e por esta pesquisa possuir caráter experimental, o desenvolvimento do trabalho ocorreu em duas etapas. Esta divisão foi de suma importância para se estabelecer uma metodologia consistente e para que os resultados finais tivessem credibilidade.

A primeira etapa pode ser caracterizada como uma pesquisa de triagem. O principal objetivo dessa etapa foi reproduzir o reforço tradicional feito nas indústrias em uma rocha comum, e quantificar sua eficácia por meio de testes mecânicos. Em paralelo foram gradualmente testadas outras metodologias de reforço, propostas por esta pesquisa, as quais basearam-se principalmente na construção de um sistema de canaletas preenchidas por resina epóxi e fibra de sisal.

Ao fim da primeira etapa foram definidos os pontos críticos do reforço tradicional, descartadas as técnicas propostas que se mostraram ineficazes e selecionadas as rochas exóticas para aplicar os reforços promissores. Também foi necessário um replanejamento dos métodos para refinar e conduzir a fase seguinte da pesquisa.

Por ocasião do estágio sanduíche, a segunda etapa do trabalho foi inteiramente desenvolvida no Instituto Superior Técnico de Lisboa-Portugal. Nesta fase foi selecionado um único material exótico para aplicar um programa de caracterização mecânica aprofundado, inclusive com o uso do Vic-2D para análise do comportamento elástico do material. Também foram selecionadas e testadas outras resinas e fibras, bem como definida uma metodologia padrão para se alcançar um reforço eficaz.

As Figuras 4.1 e 4.2 resumizam o programa experimental das etapas 1 e 2, respectivamente:

Figura 4.1. Fluxograma do programa experimental da etapa 1.

Legenda: **R+ETFV**- rocha reforçada com epóxi e tela de fibra de vidro; **R+CESI**- rocha com canaletas, reforçada com epóxi e sisal longo; **R+CE 1cm**- rocha com canaletas reforçada com compósito de epóxi e sisal curto (1cm); **R+ES 1cm**- rocha reforçada com compósito de epóxi e sisal curto (1cm) e **R+ES 2cm**- rocha reforçada com compósito de epóxi e sisal curto (2cm).

Fonte: O Autor.

4.1. Rochas e Principais Minerais Constituintes

4.1.1. Macrocristais das rochas exóticas

Para se conhecer a influência da composição mineralógica da rocha na aderência com a resina epóxi foram efetuados ensaios tipo *pull-out* com macrocristais de feldspato (microclínio) e quartzo, por serem estes os principais minerais constituintes das rochas exóticas estudadas.

Os macrocristais ensaiados foram escolhidos levando em consideração a pureza e a ausência de inclusões (Figura 4.3). Deve-se destacar que é comum a presença de minerais de grandes dimensões nos pegmatitos, principais representantes dos materiais exóticos, o que torna este teste necessário.

Figura 4.3. Macrocristal de quartzo (A) e feldspato (B).

Fonte: O Autor.

4.1.2. Rocha piloto

A rocha piloto escolhida é conhecida comercialmente como Ocre Itabira. Trata-se de um material muito bem aceito no mercado, que na indústria não é usualmente reforçado, mas cujas características físico-mecânicas já haviam sido amplamente estudadas por Pazeto (2011). Além disso, o fato dessa rocha possuir propriedades mais homogêneas que os exóticos contribuiu para a reprodutibilidade dos ensaios piloto realizados.

A extração do Ocre Itabira ocorre no município de Venda Nova do Imigrante, estado do Espírito Santo. Segundo Pazeto (2011), a rocha corresponde petrograficamente a um hornblenda sienito com quartzo, de coloração acastanhada denotada pelos megacristais de feldspato potássico, textura inequigranular e granulação média a grossa (Figura 4.4).

A composição mineralógica é dada por ortoclásio (66%), oligoclásio (14%), hornblenda (7%), biotita (4%), quartzo (2,5%), apatita (1,5%), titanita (2%), opacos (2,5%) e carbonatos (0,5%). Seu microfissuramento é moderado, majoritariamente do tipo intragrão, sendo a alteração incipiente.

Os dados de caracterização tecnológica são apresentados na Tabela 4.1.

Figura 4.4. Chapa polida (A) e detalhe (B) do sienito de nome comercial Ocre Itabira.

Fonte: O Autor.

Tabela 4.1. Dados de caracterização tecnológica do sienito Ocre Itabira.

Propriedade	Valor	δ
Densidade Aparente (kg/m ³)	2705	0,01
Porosidade (%)	0,73	0,24
Absorção d'água (%)	0,27	0,09
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)	137	9,02
Resistência à Flexão 3 Pontos (MPa)	12	0,85

δ : desvio padrão

Fonte: Pazeto (2011).

4.1.3. Rochas exóticas

Após os experimentos iniciais realizados com a rocha piloto, foram selecionadas três rochas exóticas (dois pegmatitos e um gnaiss) de ampla aceitação comercial, cuja destinação é principalmente o mercado externo. Dentre a classe de materiais exóticos, no Brasil os

pegmatitos são representantes majoritários, o que justifica a escolha de dois materiais desta tipologia. As rochas recebem a denominação comercial de Iberê Plantus, Tropical Treasure e Iberê Crema Bordeaux, respectivamente.

As análises petrográficas foram realizadas no Laboratório de Construção Civil/CT Obras, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e seguiram o preconizado pela NBR 15845-1 (ABNT, 2015).

4.1.3.1. Iberê Plantus

O material Iberê Plantus é extraído no município de Jaguarari Nova, estado da Bahia. Corresponde petrograficamente a um pegmatito tonalítico com muscovita de coloração branca acinzentada, textura granular a gráfica e granulometria média a média-grossa (Figura 4.5).

Figura 4.5. Chapa polida (A) e detalhe (B) do pegmatito de nome comercial Iberê Plantus.

Fonte: O Autor.

A composição mineralógica é dada por albita (56%), quartzo (26%), microclínio (12%), muscovita (5%) e biotita (1%). A matriz é essencialmente composta pelo plagioclásio com intercrescimento de quartzo hialino uniforme. A assembleia de duas micas ocorre como acessória, com cristais milimétricos a centimétricos apresentando-se em aglomerados ou leitos estirados (Figura 4.6). Assim como o estado microfissural, a alteração é incipiente, observando-se localizada presença de sericita como inclusões no plagioclásio.

Figura 4.6. Fotomicrografia do Iberê Plantus: (Pl) plagioclásio, (Ms) muscovita e (Bt) biotita. Nicóis cruzados.

Fonte: O Autor.

4.1.3.2. Tropical Treasure

A rocha de nome comercial Tropical Treasure é extraída no município de Conselheiro Pena, estado de Minas Gerais. A classificação petrográfica enquadra-o como pegmatito de álcali-feldspato granito, de coloração branca acinzentada e granulação grossa a muito grossa (Figura 4.7).

Figura 4.7. Chapa polida (A) e detalhe (B) do pegmatito de nome comercial Tropical Treasure.

Fonte: O Autor.

A assembleia mineral é composta por albita (40%), quartzo (35%), microclínio (15%), turmalina (10%) e muscovita (traços), sendo ilustrada na Figura 4.8. O estado microfissural é

moderado, transgranular, inter e intragranular no microclínio. Albita e turmalina acham-se por vezes preenchidas por clorita e hidróxido de ferro. A alteração intempérica é fraca, encontrando-se principalmente no plagioclásio que passa a sericita, muscovita e clorita.

Figura 4.8. Fotomicrografia do material Tropical Treasure: (Pl) plagioclásio e (Tm) turmalina; Nicóis cruzados.

Fonte: O Autor.

4.1.3.3. Iberê Crema Bordeaux

A rocha é extraída no município de Afonso Cláudio, estado do Espírito Santo. Corresponde a um gnaiss monzogranítico, de cor marrom amarelada, com fenocristais róseos de feldspato potássico. A estrutura é gnáissica bandada, com textura granoblástica, inequigranular interlobada a porfiroblástica e granulação média a grossa (Figura 4.9).

Figura 4.9. Chapa polida (A) e detalhe (B) do gnaiss de nome comercial Iberê Crema Bordeaux.

Fonte: O Autor.

A composição mineralógica é dada por microclínio (62%), presente na matriz e na forma de fenocristais, quartzo (25%), oligoclásio (10%) e em pequenas quantidades (3%) estão presentes granada, biotita e magnetita. Os constituintes estão afetados por fraturas transminerais de pequena intensidade, mais expressivas nos cristais de microclínio, e onde por vezes se alojam palhetas de muscovita. A alteração intempérica é incipiente, evidenciada pela turbidez do plagioclásio e fraca alteração em sericita. A Figura 4.9 ilustra uma fotomicrografia da rocha:

Figura 4.9. Fotomicrografia do material Iberê Crema Bordeaux: (Mc) microclínio e (Bt) biotita; Nicóis cruzados.

Fonte: O Autor.

As propriedades físicas das três rochas exóticas apresentadas na Tabela 4.2 abaixo foram gentilmente fornecidas pelo Grupo Pemagran, que as comercializa.

Tabela 4.2. Propriedades físicas das rochas exóticas estudadas.

	Iberê Plantus	Tropical Treasure	Iberê Crema Bordeaux
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,68	2,59	2,61
Porosidade (%)	0,86	1,03	0,94
Absorção d'água (%)	0,70	0,55	0,65

Fonte: O Autor.

4.1.3.4. Karnaval

Para a segunda etapa da pesquisa foi selecionado um pegmatito de nome comercial Karnaval, que também é tradicionalmente exportado e muito frágil. A extração do material ocorre em Sertânia, no estado do Pernambuco. A análise petrográfica foi gentilmente realizada pelo Laboratório Hércules, da Universidade de Évora – Portugal.

A rocha é classificada como um pegmatito de álcali-feldspato, com megacristais de microclínio róseo que denotam a coloração rósea em amostra de mão (Figura 4.10). A textura predominante é do tipo hipidiomórfica a alotriomórfica, com a generalidade das fases minerais exibindo cristais centimétricos, de acordo com o fato de se tratar de um pegmatito.

Figura 4.10. Placa polida do pegmatito Karnaval.

Fonte: O Autor.

A composição mineralógica é dada por microclínio (60%), quartzo (25%), albita (12%), biotita (2%) muscovita (1%), e granada e opacos como traços. O feldspato potássico forma cristais de grandes dimensões, cujos planos de clivagem são evidentes em amostras de mão e se refletem de igual modo nos arrancamentos observados em lâmina delgada (Fig. 4.11 A). As maclas entrecruzadas (xadrez) são típicas e apresentam vênulas que correspondem à exsolução de plagioclásio sódico (Fig. 4.11 C). Os cristais de microclínio não apresentam evidências significativas de alteração, mas ocorre algum desenvolvimento de minerais de argila, conferindo por vezes uma cor escura em nicóis paralelos. Os contatos predominantes são tipo reto ou lobulado, mais evidentes entre o microclínio e o quartzo (Fig. 4.11 B).

Quanto à deformação frágil observam-se algumas fraturas essencialmente intracristalinas no microclínio. Em especial, também nos feldspatos observa-se um forte sublinhado dos planos de clivagem que parecem propagar-se e conduzir à microfissuras intercristalinas. Importa referir que a distinção entre uma fraturação primária e uma fraturação induzida pela confecção das lâminas não é clara. No entanto, a clivagem do microclínio e os planos de exsolução parecem ser descontinuidades determinantes na fragilidade da rocha.

Figura 4.11. Fotomicrografias do pegmatito Karnaval: **A-** arrancamento no microclínio associado à clivagem (seta); **B-** contato lobulado entre microclínio (**mcr**) e quartzo (**qtz**) e **C-** macla do microclínio (**mcr**) e exsolução de plagioclásio sódico (**plg**) (pertitas).

Fonte: O Autor.

A caracterização petrofísica básica do pegmatito Karnaval foi realizada previamente para fornecer correlações apropriadas com o comportamento mecânico. Como esses dados amparam o objetivo principal desta pesquisa, eles são apresentados neste mesmo subitem.

Os índices físicos foram determinados de acordo com os procedimentos da norma C97 (ASTM, 2015), e são apresentados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3. Propriedades físicas do pegmatito Karnaval.

Propriedade	Valor
Densidade Aparente	2,57 g/cm ³
Absorção d'água	0,80 %
Porosidade	0,30 %

Fonte: O Autor.

As descontinuidades da rocha em macroescala foram observadas aplicando o teste não destrutivo por líquido penetrante (Figura 4.12). Para isso, uma placa heterogênea de 600 x

400mm foi selecionada e submetida aos processos de secagem e limpeza à base de solvente. O *spray* penetrante foi então aplicado na superfície da placa e o tempo de permanência para “encharcar” as microfissuras foi de 15 minutos. Depois de removido o excesso de penetrante com um solvente, um revelador não-aquoso foi aplicado na amostra.

Figura 4.12. Placa antes (A) e depois (B) do teste com líquido penetrante.

Fonte: O Autor.

Como pode ser observado na Figura 4.12, o líquido penetrante prova o caráter extremamente heterogêneo e descontínuo do material. As fissuras ocorrem em uma ampla gama de tamanhos, mas duas principais classes de discontinuidades podem ser determinadas: 1) falhas minúsculas ou médias dentro dos megacristais de feldspato, geralmente associada com os planos de clivagem, e 2) fissuras maiores ao redor dos contatos minerais.

Além das observações feitas na petrografia, um estéreo microscópio Leica M205C foi usado para caracterizar as microfissuras e contatos minerais do pegmatito. Há muito tempo (SMORODINOV; MOTOVILOV; VOLKOV, 1970) pesquisadores preocupam-se em caracterizar o tamanho, tipo de contato e o grau de imbricamento dos minerais em rochas graníticas devido ao importante papel que estes fatores desempenham na resistência mecânica.

O pegmatito sob estudo é uma rocha rica em quartzo e feldspato, e como ilustra a Figura 4.13, esses minerais têm pobre entrelaçamento (os contatos são em sua maioria do tipo planar), o que é um fator primário para o decréscimo da resistência (TUĞRUL; ZARIF, 1999).

Figura 4.13. Em a) típico contato planar entre um cristal de quartzo (Q) e microclínio (M) e em b) pobre imbricamento denotado por contatos semilobulados. É possível observar os planos de clivagem e as microfissuras preenchidas por caulinita no microclínio.

Fonte: O Autor.

4.2. Resinas (matrizes)

Ao todo foram utilizadas 4 resinas diferentes para as metodologias de reforço estudadas nesta pesquisa: 2 do tipo epóxi, 1 do tipo poliéster e 1 do tipo uretano.

Na primeira etapa foi empregada somente a resina epóxi Tenax (4030+MA25H), por ser esta uma resina tradicional e a mais utilizada pela Indústria da Pedra brasileira. Trata-se de um sistema bicomponente de média viscosidade e cura prolongada de 24 horas. A proporção da mistura é de 25% em peso de endurecedor em relação à resina.

Para a segunda etapa, além de mantida a resina Tenax, outras 3 resinas alternativas foram escolhidas para as metodologias de reforço, todas comumente empregadas na fabricação de compósitos laminados:

- a) resina epóxi bicomponente Castro (Resoltech 1050+endurecedor 1056), de baixa viscosidade, cuja proporção do endurecedor é de 35% em peso.
- b) resina de poliéster insaturado Castro (Recapoli 955) do tipo ortoftálica, curada com peróxido orgânico metil etil cetona (PMEK) à 2% em peso.
- c) resina de uretano-acrilato Castro (Crestapol 1250 LV), de baixa viscosidade, curada com hidroperóxido de cumeno (Trigonox 239) à 2% em peso.

Os critérios de seleção dessas resinas foram os preços competitivos e as distintas naturezas químicas, uma vez que a indústria brasileira emprega apenas resinas do tipo epóxi. A Tabela 4.4 abaixo traz as propriedades físico-mecânicas das resinas conforme fornecido pelos fabricantes:

Tabela 4.4. Propriedades físico-mecânicas das resinas estudadas.

Resina	Propriedades				
	Densidade (g/cm ³)	Viscosidade (P)	Tgel (min)	Tg (°C)	Resistência à tração (MPa)
epóxi <i>Tenax 4030</i>	1,10	8-10	18-20	-	60*
epóxi <i>Resoltech 1050</i>	1,10	3-4	90	75	71
poliéster <i>Recapoli 955</i>	1,05	1-1,5	40-50	60	60-70
uretano-acrilato <i>Crestapol 1250</i>	1,04	2,2	35	60	76

Legenda: Tgel- tempo de gel; Tglass- temperatura de transição vítrea.

*parâmetro não-fornecido pelo fabricante, determinado durante a segunda etapa da pesquisa.

Fonte: O Autor.

4.3. Fibras (reforço)

4.3.1. Sintéticas

Na primeira etapa da pesquisa foi utilizada a mesma tela de fibra de vidro utilizada para reforço na indústria da pedra. A tela possui malha quadrada de 5 mm com fios de 1 mm, e gramatura igual a 150 g/m².

Na segunda etapa foi selecionado um tecido de fibra de vidro de 600 g/m², empregado na fabricação de compósitos laminados. O tecido consiste em duas camadas unidirecionais, orientadas a 0° e 90°, respectivamente. A Figura 4.14 ilustra amostras das duas fibras:

Figura 4.14. Fibra de vidro de (A) 150 e (B) 600g/m².

Fonte: O Autor.

4.3.2. Natural

Uma das metodologias de reforço propostas por esta pesquisa consiste em substituir a fibra sintética usada como agente de reforço por fibra natural vegetal.

Embora o Brasil cultive uma grande variedade de fibras vegetais (curauá, juta, bambu, rami, piassava, etc.), foi escolhido o sisal dada a facilidade logística para adquirir a fibra, o baixo custo (R\$0,80/kg), além desta ser uma das mais resistentes quanto aos esforços de tração dentre as fibras vegetais (363-700 MPa).

Na primeira etapa da pesquisa o sisal foi utilizado de duas formas distintas: fibras curtas (Figura 4.15), de 10 e 20mm, e feixes longos, de 380 mm. Já na segunda etapa, o sisal foi usado somente sob a forma de fibra curta de 10mm.

Figura 4.15. Fibras curtas de sisal (10mm).

Fonte: O Autor.

4.4. Metodologias de Reforço

Assim como a maioria dos processos produtivos realizados pela Indústria da Pedra, o reforço é feito desde o seu surgimento de forma empírica. A primeira etapa da pesquisa, portanto, consistiu de observar esse procedimento *in loco* e reproduzi-lo em laboratório tal e qual é realizado rotineiramente, para então apontar lacunas e sugerir melhorias ao processo.

As informações coletadas durante o acompanhamento do reforço nas indústrias foram as seguintes:

- as indústrias que possuem forno automático realizam uma secagem parcial nas chapas (5min à 80°C) antes do reforço; nas empresas menores, as chapas permanecem algum tempo no pátio para secagem natural, o que muitas vezes só promove a desumidificação superficial;
- a quantidade da mistura aplicada (resina+endurecedor) é basicamente a mesma para qualquer material exótico, ao redor de 1600g. Esta quantidade é baseada no tamanho padrão da chapa comercial (5m²), ou seja, quanto é necessário para cobrir a chapa e fixar a fibra de vidro, e não em propriedades intrínsecas da rocha, como porosidade ou grau de microfissuramento;
- dependendo da ordem de pedidos da empresa, o tempo de cura não obedece o mínimo exigido pelo fabricante (24 horas). A observação empírica dos operários, que baseia-se no “toque seco”, faz com que as chapas retornem para a linha de produção depois de apenas 3 horas.

4.4.1. Procedimentos na 1ª etapa

4.4.1.1. Reforço industrial

No laboratório o reforço foi aplicado em amostras de 380 x 100mm (ou 0,0038m²), referente ao tamanho normatizado para o ensaio de flexão em 4 pontos. Utilizando uma simples regra de três, a quantidade do sistema epóxi utilizado na escala de laboratório foi reduzida para 12,1g. As amostras permaneceram em temperatura ambiente por dois dias para simular a secagem natural, e antes de receber o reforço (resina + fibra de vidro 150 g/m²) foram aquecidas por 5min em estufa à 80°C. O tempo de cura foi de 24 horas em temperatura ambiente.

4.4.1.2. Reforço com sisal

Em alternativa ao reforço industrial foram experimentadas mais 4 metodologias de reforço que basearam-se num compósito da matriz epóxi com a fibra de sisal. Este compósito foi aplicado diretamente sobre a superfície das amostras de rochas ou para preencher um sistema de canaletas proposto nesta pesquisa. Essa metodologia foi idealizada baseando-se na solução de reforço norte-americana conhecida como *rodding* (Cap. 2).

O sistema foi construído com serra diamantada na superfície não polida das amostras a serem submetidas ao ensaio de flexão em 4 pontos, sendo composto por quatro canaletas paralelas de 2 mm de largura por 5 mm de profundidade, e equidistância de 20 mm (Figura 4.16).

Figura 4.16. Ilustração esquemática do sistema de canaletas.

Fonte: O Autor.

As 4 metodologias de reforço alternativo foram então:

	Feixe de sisal	Sisal curto 10mm	Sisal curto 20mm
Rocha com canaletas	X	X	
Rocha sem canaletas		X	X

Foram preparados compósitos de 100g para cada amostra, cuja proporção de sisal foi definida experimentalmente em 3% (m/m); as fibras foram secas em estufa à 80° C por 24 horas, cortadas nos tamanhos definidos e incorporadas na matriz por mistura manual. Os compósitos de fibras contínuas foram preparados separando-se feixes de fibra de 380mm x 2mm de espessura, os quais foram depositados sobre a amostra e no interior das canaletas e impregnados com a resina (manteve-se os 97g). Para os 4 tipos de reforço foi necessário aplicar previamente uma fita adesiva ao redor das amostras para conter os compósitos.

4.4.2. Procedimentos na 2ª etapa

4.4.2.1. Reforço industrial

Em relação à primeira etapa, o reforço industrial foi alterado em quatro aspectos: aplicação de uma fibra de vidro com maior gramatura (600g/m²), emprego de resinas não convencionais, cálculo da quantidade de resina empregada com base nas propriedades petrográficas da rocha e realização de pós-cura.

A fim de se conhecer a eficácia da fibra de vidro padrão (150g/m²) usada na indústria, inicialmente o reforço foi realizado empregando-se somente as resinas selecionadas: epóxi tradicional, epóxi alternativo, poliéster e uretano. O cálculo da quantidade de resina necessária (P_t) foi efetuado com base na seguinte equação (10):

$$P_t = P_r + \left[P_r \cdot \left(1 + \frac{Abs}{100} \right) \right] \quad (10)$$

Em que P_r é a quantidade de resina em gramas calculada com base na área da amostra (0,038m²) e Abs é o coeficiente de absorção d'água da rocha.

Ao incorporar a fibra de vidro 600g/m² ao reforço, a quantidade de resina (P_t) aumenta em função da impregnação da fibra, sendo ajustada pela equação (11):

$$P_t = P_f \cdot \left(\frac{65}{50} \right) \cdot \left(1 + \frac{Abs}{100} \right) \quad (11)$$

Em que P_f é o peso da fibra ajustada à área da amostra de rocha, a razão 65/50 corresponde à proporção ideal matriz/fibra para compósitos laminados, e Abs é o coeficiente de absorção d'água da rocha.

Para garantir uma polimerização completa e uniforme, o processo de cura foi feito em duas etapas: as amostras reforçadas foram mantidas em temperatura ambiente por 24 horas e depois foi realizada a pós-cura num forno com controle de rampa à 60° C durante 6 horas.

Por fim os tipos de reforço realizados foram:

	Epóxi Tenax	Epóxi Resoltech	Poliéster	Uretano
Rocha	X	X	X	X
Fibra de vidro 600 g/m ²	X	X	X	
Fibra de vidro 150 g/m ²	X			

4.4.2.2. Reforço com sisal

O principal problema na utilização das fibras naturais para a produção de compósitos está associado ao caráter hidrofílico das fibras, que contrasta com o caráter hidrofóbico das matrizes poliméricas, prejudicando a adesão superficial (GEORGE; SREEKALA; THOMAS, 2001).

A modificação da superfície das fibras por meio de tratamento alcalino tornou-se uma solução bastante difundida, sendo reportadas significativas melhoras na adesão fibra/matriz e na resistência mecânica do compósito (KIM; NETRAVALI, 2010; MWAIKAMBO; ANSELL, 2001).

Na segunda etapa da pesquisa, o sisal recebeu tratamento alcalino antes da mistura com a resina. As fibras foram cortadas com 10mm de comprimento e mergulhadas em solução de NaOH a 2% (m/m), à temperatura ambiente por 1 hora. Após o tratamento as fibras foram lavadas com água destilada e secas em estufa à 80° C por 6 horas.

A definição da melhor proporção matriz/fibra a ser aplicada como reforço foi definida por meio de ensaios de tração. Utilizando-se molde aberto tipo *dog bone*, foram processados compósitos com os dois tipos de epóxi e o poliéster e proporções de 1, 3 e 5% (m/m) de fibra em relação a matriz. Após 24 horas em temperatura ambiente, os compósitos foram desmoldados e submetidos a pós-cura por 12 horas a 50° C. Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma D3039 (ASTM, 2014), obtendo-se os seguintes resultados:

Figura 4.17. Resultado dos ensaios de tração dos compósitos com (A) 1, (B) 3 e (C) 5% de fibra de sisal.

Fonte: O Autor.

Baseando-se no critério de melhor resistência, ou rigidez, a resina que apresentou melhor resultado foi a epóxi Tenax tradicional, com 3% de sisal. Não foi possível processar compósitos contendo 5% de fibra para essa matriz. Quando preparada esta proporção, ocorria um fenômeno de superaquecimento da mistura, provocado provavelmente pela quantidade demasiada de fibra. Foram testados outros tipos de moldes (silicone, alumínio) e quantidades maiores de mistura, mantendo-se a proporção de 5% de fibra, porém o problema ocorreu da mesma forma. Não foram encontrados na literatura fenômenos semelhantes ao observado.

Selecionada a melhor proporção (3%), a quantidade de resina (P_r) a ser aplicada na impregnação das fibras também foi corrigida de acordo com a equação (12):

$$P_t = P_r + \left[P_f \cdot \left(1 + \frac{65}{50} \right) \right] \quad (12)$$

Em que P_r é a quantidade de resina calculada com base na área e no coeficiente de absorção d'água da rocha (14,3g) e P_f é o peso em fibra correspondente à proporção de 3% em relação à P_r .

Por último, o sistema de canaletas proposto na primeira etapa também foi reajustado para utilizar menor quantidade de resina, ou seja, apenas o necessário para preencher o volume das canaletas. Optou-se também por fazer o reforço sem sisal, apenas com o epóxi.

A nova geometria passou a ter 3 canaletas centrais de 3mm de altura x 4mm de largura (Figura 4.18). Sabendo que a densidade do epóxi é 1,1 g/cm³, e que o volume total das 3

canaletas é $13,68\text{cm}^3$, a quantidade resina necessária foi de 15,04g (valor este acrescido dos 14,3g já necessários para cobrir a superfície sem canaletas).

Ao fim dessa metodologia resultaram dois tipos de reforços: rocha reforçada com compósito de epóxi e sisal à 3%, e rocha com nova geometria de canaletas reforçada somente com o epóxi.

Figura 4.18. Vista parcial de corpo de prova reforçado com o novo sistema de canaletas preenchido apenas por epóxi.

Fonte: O Autor.

4.5. Ensaaios Mecânicos

4.5.1. Teste de aderência (pull-out)

O objetivo deste teste foi quantificar a aderência da resina epóxi com minerais essenciais das rochas pegmatíticas estudadas, a fim de compreender a influência destes constituintes no processo de reforço.

Para isso, macrocristais de quartzo e de feldspato (microclínio) foram serrados na forma de prisma de base retangular (30 x 40 x 10mm) e em seguida colados sobre um disco de alumínio para permitir a retificação em torno mecânico da face a ser ensaiada. A rugosidade desta face foi medida utilizando-se um rugosímetro portátil de contato Taylor Robson, modelo Supertronic 3+.

As diretrizes para a realização do ensaio constam na NBR 14081-4 (ABNT, 2012), que originalmente foi desenvolvida para determinar a resistência de aderência de argamassas colantes para cerâmica. Sendo assim, foram efetuadas adaptações a fim de substituir a argamassa pela resina epóxi e determinar a resistência de aderência desta aos macrocristais.

A primeira adaptação consistiu da redução de 15mm na área do dispositivo de alumínio que acopla a amostra ao equipamento, seguido da abertura de três sulcos concêntricos na sua base (Figura 4.19 A). Isto foi feito para tornar a dimensão do dispositivo compatível com o tamanho dos cristais, e aumentar a área de contato do mesmo com a resina.

No entanto, o resultado de um experimento piloto mostrou que, para essa superfície, a aderência do dispositivo de acoplamento com a resina foi insuficiente para arrancá-lo da superfície dos cristais (Figura 4.19 B), sendo necessária uma nova adaptação.

Figura 4.19. Primeira adaptação do ensaio: (A) base com sulcos concêntricos e topo do dispositivo de acoplamento, e (B) impressão da superfície do dispositivo de alumínio deixada na resina sobre os macrocristais.

Fonte: O Autor.

Na segunda adaptação foram feitos orifícios na superfície de contato do dispositivo, os quais se comunicam com um sulco circular lateral para permitir a penetração da resina e a passagem de fios de sisal (Figura 4.20). Este reforço foi feito para que a resina ficasse totalmente aderida ao dispositivo de acoplamento, e ao mesmo tempo para já se testar a interação da resina epóxi com o sisal. Para confinamento e penetração da resina no dispositivo de acoplamento usou-se um anel de PVC, assentado sobre a superfície do cristal.

Figura 4.20. Ilustração esquemática da segunda adaptação.

Fonte: O Autor.

O extrator usado na determinação da resistência de aderência à tração é manual, e dispõe de uma manivela que regula a velocidade de carregamento com precisão de 0,05 kN.

4.5.2. Flexão em 4 Pontos

4.5.2.1. Procedimentos na 1ª etapa

O ensaio foi executado segundo as diretrizes da NBR 15845 – parte 7 (ABNT, 2015), utilizando prensa servo controlada modelo MTS 815, com capacidade de 2700 kN. A taxa de carregamento utilizada foi de 12 kN/min. A deformação dos corpos de prova foi medida com extensômetros de resistência elétrica (modelo PA-06-500BA-120-L) fixados longitudinalmente no centro da face inferior dos corpos de prova, de acordo com a norma C 1352 (ASTM, 2009). Foram ensaiados 12 corpos de prova nas dimensões de 380 x 100 x 30mm da rocha ao natural e pra cada tipo de reforço, conforme descreveu os subitens 4.4.1.1 e 4.4.1.2. Ao fim do ensaio, além da carga de ruptura foram obtidos a curva de tensão-deformação.

É importante mencionar que, no caso das amostras não reforçadas, a tensão na flexão pode ser adequadamente obtida usando a equação da teoria de vigas convencional. Por outro lado, quando um reforço com resina e fibra de vidro é aplicado, o material se torna uma viga composta, o que significa que, de acordo com a mecânica de materiais compósitos (JONES, 1998), a tensão nominal deve ser obtida usando a equação de equilíbrio ou qualquer outro método que valide a estimativa da tensão na flexão (DUTHINH; STARNES, 2004; MANALO; ARAVINTHAN, 2012; SORIANO; PELLISA; MASCIA, 2016; VERMA;

CHARIAR, 2013), normalmente calculada através de um método de área equivalente ou transformada. Como o objetivo deste trabalho não é definir a resistência estrutural de produtos de rocha reforçados através da avaliação de tensão de flexão, os resultados de resistência obtidos a partir da observação dos valores de carga nos testes realizados estão adequados para fins comparativos.

As modalidades de reforço foram inicialmente efetuadas na rocha piloto (Ocre Itabira) e após a fase experimental nos materiais exóticos selecionados (Iberê Plantus, Tropical Treasure e Iberê Crema Bordeaux). A Figura 4.21 ilustra os tipos de reforço feitos na rocha Tropical Treasure:

Figura 4.21. Amostras dos tipos de reforço aplicados nas rochas exóticas: **TT**- rocha ao natural; **TTTV**- rocha reforçada com epóxi e fibra de vidro 150g/m²; **TTCS**- rocha com canaletas, reforçada com compósito de fibra de sisal com 10mm e **TTSSm**- rocha reforçada com compósito de fibra de sisal com 10mm.

Fonte: O Autor.

4.5.2.2. Procedimentos na 2ª etapa

Na segunda etapa os ensaios de flexão foram conduzidos numa máquina de testes universal Instron (modelo 3369), mantendo-se a taxa de carregamento de 12 kN/min e o tamanho dos corpos de prova. Foram testadas 18 amostras, tanto do pegmatito Karneval ao natural (K), quanto para cada tipo de reforço, conforme abaixo:

Sigla	Descrição
KE1	rocha reforçada com epóxi Tenax
KE2	rocha reforçada com epóxi Resoltech
KPo	rocha reforçada com poliéster
KUr	rocha reforçada com uretano-acrilato
KE1Tv	rocha reforçada com epóxi Tenax e fibra de vidro 150g/m ²
KE1Fv	rocha reforçada com epóxi Tenax e fibra de vidro 600g/m ²
KE2Fv	rocha reforçada com epóxi Resoltech e fibra de vidro 600g/m ²
KPoFv	rocha reforçada com poliéster e fibra de vidro 600g/m ²
KE1S	rocha reforçada com compósito de sisal 3%
KE1C	rocha com canaletas reforçadas com epóxi Tenax

4.5.3. Análise do comportamento elástico

4.5.3.1. Set-up Vic-2D

Por ocasião do estágio sanduíche e da disponibilidade do equipamento no Instituto Superior Técnico de Lisboa, os deslocamentos e a deformação das amostras submetidas ao ensaio de flexão foram medidos empregando o Vic-2D (Correlated Solutions), já mencionado no Cap. 2.

Durante todo o ensaio de flexão, foram capturadas imagens da superfície das amostras por uma câmera CCD Stingray (Allied Solutions) em uma taxa de aquisição de 200ms (Figura 4.22). As imagens fornecidas têm resolução de 2452 x 2056 pixels. Em função do ensaio de flexão, um pacote de imagens dos melhores reforços foi posteriormente selecionado para ser analisado pelo software Vic-2D, que aplica algoritmos de correlação para fornecer os deslocamentos de campo total e calcular a distribuição da deformação. Considerando as características de deformação heterogênea das rochas, um pequeno *subset* (21 pixels) e *step* (5 pixels) foram escolhidos para aumentar a resolução espacial da medida.

Figura 4.22. Sistema Vic-2D: (A) software de aquisição, (B) câmera para aquisição de imagens, (C) amostra a ser ensaiada e (D) célula de carga da máquina de ensaios.

Fonte: O Autor.

A área de interesse (AOI) para o cálculo da deformação das imagens foi de 150 x 30mm para a rocha sem reforço e reforçadas apenas com as resinas, e de 210 x 30mm para as amostras reforçadas com fibra de vidro 600g/m² (Figura 4.23). A primeira AOI mencionada refere-se ao momento fletor, onde é esperado que ocorra a ruptura da amostra. No entanto, em testes piloto realizados com amostras reforçadas com a fibra 600g/m², a ruptura ocorria fora do momento fletor devido à esforços cortantes, de forma que a AOI teve de ser ampliada.

É importante mencionar que nesta caracterização mecânica experimental duas grandezas foram usadas do pós-processamento de imagens do Vic-2D: I) a deformação Lagrange ϵ_x , dado que a formação de fissuras ao longo do gradiente de deformação só é mostrada quando esta grandeza é calculada, e II) as médias dos deslocamentos v (ao longo da direção y) dos pontos no centro da AOI das amostras. A anisotropia nas amostras faz com que os deslocamentos u (ao longo do eixo x) sejam menores do que o desvio padrão medido, de forma que para se obter uma curva tensão-deslocamento precisa, foi considerado o Δy .

Figura 4.23. Amostras posicionadas sobre os roletes da máquina de ensaio antes do de flexão. O esquema ilustra a AOI para cálculo da deformação para as amostras (A) sem reforço, ou reforçadas somente com as resinas e (B) reforçadas com a fibra de vidro 600g/m².

Fonte: O Autor.

Um microscópio eletrônico de varredura (Jeol, JSM-7001F) foi utilizado para observar a microestrutura formada na superfície das amostras.

4.5.3.2 Sincronização dos dados

Ao fim do programa experimental foi necessário sincronizar os sinais provenientes da máquina de ensaios (tempo de teste, força medida) com aqueles do Vic-2D (deslocamento, tempo de teste) para construir a curva tensão-deslocamento das amostras ensaiadas.

Para se alcançar a sincronização foi utilizado o programa DBData, desenvolvido no Matlab[®]. O programa recebe como entrada um sinal compartilhado pelos dois sistemas (no caso, o tempo de teste), e os encaixa por interpolação linear entre valores vizinhos, obtendo assim os sinais de força e deslocamento para cada imagem das amostras.

Após a sincronização, as curvas tensão-deslocamento foram plotadas utilizando o DataCheck, outra interface do DBData. Informações detalhadas sobre o programa mencionado podem ser encontradas em Banha (2015).

4.5.3.3. Critério de análise proposto

Uma tensão aplicada induz a propagação das microfissuras ao longo da rocha (WONG, 1982). No entanto, a evolução do dano nesses materiais é geralmente anisotrópica e seu acompanhamento muito complexo (ZHOU; LI, 2009). Quando um reforço é aplicado na rocha, outra variável é adicionada e monitorar a evolução do dano se torna ainda mais difícil.

Durante o programa experimental desta pesquisa foi observado um grande incremento na carga suportada pelas amostras reforçadas, principalmente com a fibra de vidro 600g/m². no entanto, as imagens fornecidas pelo Vic-2D permitiram notar que danos irreversíveis tinham ocorrido muito antes da carga de ruptura registrada pelo software da máquina de ensaio.

Buscando-se alcançar dados confiáveis, e por extensão determinar uma tensão de serviço útil (TSU) para o pegmatito estudado, foi proposto um critério de análise denominado Declive Global, que leva em conta a evolução da rigidez ao longo do tempo. Para cada ponto da curva tensão-deslocamento foi calculado um declive global (S), obtido pela equação descrita abaixo (13):

$$S = \frac{(\sigma_n - \sigma_o)}{\Delta y} \quad (13)$$

Em que σ_o é a tensão residual derivada do processo de sincronização, σ_n representa os valores individuais de tensão extraídos da curva e Δy é o deslocamento produzido por cada σ_n , calculado diretamente pelo Vic-2D.

4.5.3.4. Determinação do módulo de elasticidade na flexão

Além do ensaio de flexão 4 pontos, o módulo de elasticidade na flexão foi calculado para determinar precisamente a melhoria no desempenho mecânico das amostras onde o reforço foi aplicado. Para efeito comparativo, foram obtidos os módulos de elasticidade pelo método estático (ensaio de flexão+Vic-2D) e dinâmico (frequência de ressonância).

No modo estático, o módulo de elasticidade (E) foi determinado pela curvatura da linha neutra das amostras. Para isso, do pacote de imagens processadas pelo Vic-2D foi selecionada a imagem que corresponde à carga máxima suportada pela amostra (maior curvatura) no ensaio de flexão. A curvatura é definida pelo inverso do raio da curvatura e pode ser obtido resolvendo (14):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\sigma_m}{Eb} = \frac{1}{Ec} = \frac{Mb}{I} \quad (14)$$

Em que M é o momento entre roletes, I é o segundo momento da área da seção, ρ é o raio da curvatura e b é a distância da linha neutra, obtendo (15):

$$E = \frac{M\rho}{I} \quad (15)$$

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado por meio da frequência fundamental de ressonância no modo de flexão, de acordo com a norma C 1259 (ASTM, 2015). Foram testados 7 corpos de prova de 380 x 70 x 30mm. Para manter a comparação, inicialmente as medidas foram feitas no pegmatito ao natural, e as mesmas amostras foram então reforçadas e feitas novas medidas.

As amostras foram apoiadas entre dois roletes com vão de 85mm. O golpe foi aplicado com martelo no centro da amostra e a onda foi captada por microfone (Figura 4.24). Para cada amostra foi aplicado um número mínimo de 5 golpes. A aquisição dos dados de frequência fundamental, de *loss rate* e de *damping* foi obtida pelo programa RFDA, versão 6.02 IMCE licenciado para o Laboratório Nacional de Energia e Geologia – LNEG de Lisboa, onde foi feito o ensaio.

Figura 4.24. Execução do ensaio para determinação da frequência de ressonância na flexão: **A-** amostra, **B-** microfone e **C-** software de aquisição de dados.

Fonte: O Autor.

O módulo de Young dinâmico (E) é determinado pela equação abaixo (16):

$$E = 0,9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_f^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{L^3}{t^3} \right) \cdot T_1 \quad (16)$$

Em que m é a massa da amostra, f_f é a frequência fundamental de ressonância na flexão, L é o comprimento da amostra, b é a largura da amostra, t é a espessura da amostra e T_1 é o fator de correção para ondas na flexão.

Capítulo 5

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Aderência dos Minerais (pull-out)

O valor médio da resistência à tração por arrancamento da resina aderida sobre a superfície dos cristais de quartzo foi de 17,5 MPa, para uma rugosidade média superficial de 20 μm , e 8 MPa para o feldspato, com rugosidade média de 12 μm .

De acordo com as condições do teste, pode-se fazer comparações limitadas entre as aderências desses minerais, considerando o fato de que resistência de aderência da resina epóxi supera a resistência dos próprios cristais. Sendo assim, os valores obtidos não devem ser tomados como absolutos, mas relativos ao experimento.

A resistência de aderência dos macrocristais de quartzo é influenciada pela fratura, que é irregularmente distribuída. Isso foi observado nas amostras após o arrancamento, que não ocorreu na interface resina-mineral, mas no interior dos macrocristais ensaiados (Figura 5.1 A).

Para o feldspato, a menor resistência de aderência é determinada pela clivagem proeminente em mais de uma direção (Figura 5.1 B), e seria muito variável se considerarmos os macrocristais dispostos ao acaso na superfície serrada de uma rocha pegmatoide.

Figura 5.1. Macrocristal de (A) quartzo e (B) de feldspato após o arrancamento (pull-out).

Fonte: O Autor.

Deve-se também considerar que quanto maior os cristais, mais pronunciados serão seus planos de fraqueza, (ONODERA; KUMARA, 1980; TUĞRUL; ZARIF; 1999), passíveis de serem fraturados por esforços de tração, o que permite uma analogia com os macrocristais das rochas exóticas pegmatoides estudadas nesta pesquisa (Tropical Treasure, Iberê Plantus e Carnaval).

Com relação ao feldspato, o estudo de Fener e Ince (2012) reforça essa discussão ao considerar a influência dos planos de clivagem de fenocristais de ortoclásio na resistência mecânica verificada em ensaios de carga pontual. Foi observado que a ruptura dos cristais ocorreu na maioria das vezes ao longo desses planos de fraqueza, e que os valores de resistência encontrados diminuía conforme aumentava o tamanho do fenocristal.

5.2. Resistência à Flexão 4 Pontos

5.2.1. Primeira etapa

A Tabela 5.1 descreve os tipos de reforço estudados e suas respectivas siglas, enquanto na Tabela 5.2 são apresentados os valores da resistência à flexão em 4 pontos obtidos para a rocha piloto ao natural e reforçada de cinco formas distintas. Os resultados estão ilustrados graficamente na Figura 5.2.

Tabela 5.1. Tipos de reforço estudados.

<i>Sigla</i>	<i>Tipo de Reforço</i>
RTV	rocha reforçada com tela de fibra de vidro
RFS	rocha com canaletas, reforçada com feixes longos de sisal
RCS	rocha com canaletas, reforçada com compósito de sisal (10mm)
RSSm	rocha sem canaletas reforçadas com fibras curtas descontínuas de sisal (10mm)
RSS	rocha sem canaletas reforçadas com fibras curtas descontínuas de sisal (20mm).

Fonte: O Autor.

Tabela 5.2. Resistência à flexão em 4 pontos para a rocha piloto Ocre Itabira (R) no estado natural e com os cinco tipos de reforço estudados; δ : desvio padrão e C_v : coeficiente de variação.

	σ_m (MPa)	δ	C_v
R	12,3	1,09	0,088
RTV	13,6	1,49	0,109
RFS	14,6	0,77	0,052
RCS	18,0	1,64	0,091
RSSm	17,1	1,13	0,066
RSS	16,3	1,01	0,061

Fonte: O Autor.

Figura 5.2. Resistência à flexão em 4 pontos para a rocha piloto Ocre Itabira no estado natural (R) e com os cinco tipos de reforço estudados.

Fonte: O Autor.

Observa-se que todas as técnicas propostas apresentaram valores de resistência à flexão superiores à rocha sem reforço (R) e com o reforço industrial (RTV), sendo que o reforço com compósito de sisal (RCS) apresentou o melhor desempenho dentre todos os reforços testados (18,0 MPa).

Em relação à rocha sem reforço (R), os corpos de prova reforçados com a tela de fibra de vidro (RTV) apresentaram um aumento de resistência de apenas 10,5%, enquanto os reforçados com o sistema de canaletas preenchidas com compósito de sisal (RCS) apresentaram um ganho de 46%. Diante desses resultados pode-se afirmar que é tecnicamente

viável a execução do sistema de canaletas e a substituição da fibra de vidro pela fibra natural em escala laboratorial.

Destaca-se que embora o reforço com fios de sisal (RFS) tenha obtido ganho de resistência equivalente à prática industrial de telagem com fibra de vidro (RTV), a confecção experimental desses reforços foi pouco uniforme (Figura 5.3) e de difícil execução. O reforço com compósito de sisal de 20mm (RSS), além de apresentar menor resistência que o de 10mm (RSSm), também apresentou empecilhos para o processamento. As fibras emaranhavam-se em grumos e a resina se acumulava nesses pontos. Essas observações fizeram com que as duas técnicas de reforço não fossem aplicadas às rochas exóticas.

Figura 5.3. Visão parcial de um corpo de prova reforçado com fios de sisal (RFS). Notar falta de paralelismo na disposição dos fios; S- extensômetro.

Fonte: O Autor.

A seguir são apresentados os resultados dos testes de resistência mecânica para as rochas exóticas estudadas: Tropical Treasure (TT), Iberê Plantus (IP) e Iberê Crema Bordeaux (CB). A Tabela 5.3 sumariza as siglas empregadas na descrição dos resultados:

Tabela 5.3. Siglas e tipos de reforço estudados para as rochas exóticas Tropical Treasure (TT), Iberê Plantus (IP) e Iberê Crema Bordeaux (CB).

<i>Sigla</i>	<i>Tipo de Reforço</i>
TT, IP, CB	rocha ao natural, sem reforço
TTFV, IPFV, CBFV	rocha reforçada com tela de fibra de vidro 150 g/m ²
TTCS, IPCS, CBCS	rocha com canaletas, reforçada com compósito de sisal 10mm
TTSSm, IPSSm, CBSSm	rocha sem canaletas reforçadas com compósito de sisal 10mm

Fonte: O Autor.

A Tabela 5.4 resume os dados obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos, enquanto a Figura 5.4 ilustra comparativamente os resultados para as três rochas exóticas estudadas, ao natural e reforçadas.

Tabela 5.4. Resistência à flexão em 4 pontos calculada para as rochas exóticas Tropical Treasure (TT), Iberê Plantus (IB) e Crema Bordeaux (CB) ao natural, e reforçadas de três maneiras distintas; δ : desvio padrão e C_v : coeficiente de variação.

	σ_m (MPa)	δ	C_v
TT	2,9	2,10	0,724
TTTV	6,9	1,36	0,197
TTCS	11,5	2,41	0,209
TTSSm	12,4	2,29	0,184
IB	7,8	2,75	0,352
IBTV	8,8	2,38	0,270
IBCS	13,3	2,44	0,183
IBSSm	13,8	1,76	0,127
CB	8,6	1,71	0,198
CBTV	10,9	1,34	0,122
CBCS	15,4	1,62	0,105
CBSSm	16,6	2,01	0,121

Fonte: O Autor.

Figura 5.4. Resistência à flexão em 4 pontos calculada para as rochas exóticas ao natural e reforçadas de três maneiras distintas.

Fonte: O Autor.

A observação da tabela 5.4 e da Figura 5.4 permite concluir que todas as rochas reforçadas apresentaram acréscimo em sua resistência à flexão quando comparadas com seu estado natural, tanto para o reforço industrial com tela de fibra de vidro, quanto para as técnicas de reforço propostas que empregam o sisal. No entanto, estas técnicas apresentaram resultados sempre superiores aos da telagem industrial.

A utilização de uma rocha comum (Ocre Itabira) com propriedades mais homogêneas para os testes experimentais mostrou-se válida, e permitiu antever que o sistema de canaletas preenchidas com compósito de sisal, bem como as outras técnicas que utilizam a fibra natural seriam auspiciosas.

Numa análise mais aprofundada das rochas ao natural, pode-se estabelecer a seguinte ordem quanto aos resultados de resistências mecânicas obtidos (MPa):

Tropical Treasure < Iberê Plantus < Iberê Crema Bordeaux

É possível estabelecer relações desses resultados com as propriedades petrográficas de cada material exótico:

O pegmatito de nome comercial Tropical Treasure é uma rocha muito branda, tendo obtido média de resistência à tração na flexão de ~ 3 MPa. Além da granulação grossa, a baixa resistência justifica-se por se tratar de um material bastante intemperizado, em que os cristais de albita encontram-se em estado semifrável. A Figura 5.5 ilustra um corpo de prova após a ruptura, em que é possível notar a coloração amarelada característica de alteração (oxidação), além de megacristais de schorlita (turmalina preta) que favoreceram o rompimento da rocha.

Figura 5.5. Corpo de prova do pegmatito de nome comercial Tropical Treasure após ensaio de flexão em 4 pontos. Notar alteração intempérica e megacristal de schorlita.

Fonte: O Autor.

É importante ressaltar que, no estado natural, na espessura usual comercializada (3 cm), e seguindo-se o sugerido pela NBR 15844 (ABNT, 2015), o pegmatito em questão não é indicado para uso ornamental por apresentar resistência à flexão abaixo de 8 MPa. Além disso, mesmo reforçado com tela de fibra de vidro, de acordo com a prática industrial, a resistência adquirida (6,8 MPa) ainda mostra-se insuficiente para atender a diretriz normativa.

Para a escala laboratorial, essa peculiaridade somente é atenuada ao se efetuar um dos reforços propostos, o que indica o êxito do sistema de canaletas e dos compósitos à base de epóxi e sisal. A propósito, os aumentos de resistência à flexão adquiridos quando se compara a rocha ao natural (TT) com as modalidades de reforço estudadas foram de grande magnitude: 296% para o tipo TTCS (rocha com canaletas reforçada com compósito de fibra natural) e 327% para o tipo TTSSm (rocha sem canaletas reforçada com fibras curtas descontínuas).

Para o pegmatito Iberê Plantus, tem-se que, em relação à rocha ao natural (média de ~8 MPa) o reforço industrial com tela de fibra de vidro acrescentou uma resistência à flexão de apenas 12% (8,8 MPa), enquanto os reforços com fibra natural conferiram um aumento de 70% (modalidade IPCS) e 77% (modalidade IPSSm).

Durante o ensaio de tração na flexão foi observado que o fator determinante da ruptura dos corpos de prova, foi a presença de leitos micáceos (biotita) no interior do material, em sua maioria dispostos paralelamente ao sentido da carga. Daí depreende-se que o sistema de canaletas, por ser construído de forma perpendicular à esses planos de fraqueza constituiu zonas de reforço dirigido, favorecendo o aumento da resistência mecânica dessa rocha. A Figura 5.6 apresenta um dos corpos de prova após a ruptura:

Figura 5.6. Corpo de prova do pegmatito de nome comercial Iberê Plantus após ensaio de flexão em 4 pontos. Notar plano de ruptura segundo leito de biotita.

Fonte: O Autor.

O gnaissé de nome comercial Iberê Crema Bordeaux é o material que apresentou melhor resistência no estado natural dentre as rochas exóticas estudadas (8,6 MPa). Embora possua alguma estrutura bandada, seu imbricamento mineral é do tipo côncavo-convexo para a matriz da maioria das amostras ensaiadas, o que implica numa maior resistência mecânica. O padrão de fraturamento observado se dava nas regiões onde havia megacristais de microclínio, componente majoritário do material que apresenta clivagem proeminente em duas direções (Figura 5.7).

Figura 5.7. Corpo de prova do gnaissé de nome comercial Iberê Crema Bordeaux após ensaio de flexão em 4 pontos. Notar plano de ruptura segundo megacristal de microclínio.

Fonte: O Autor.

Quanto às amostras reforçadas com a telagem industrial, houve um aumento considerável de resistência (quase 27%). No entanto, os corpos de prova reforçados com compósito de sisal (modalidades CBCS e CBSSm) alcançaram o triplo da resistência conferida pela prática industrial.

5.2.2. Segunda etapa

A seguir são apresentados os resultados dos testes de resistência mecânica para o pegmatito Karneval. A Tabela 5.5 sumariza as siglas empregadas na descrição dos resultados:

Tabela 5.5. Siglas e tipos de reforço estudados para o pegmatito de nome comercial Karnaval (K).

Sigla	Descrição
K	rocha sem reforço
KE1	rocha reforçada com epóxi Tenax
KE2	rocha reforçada com epóxi Resoltech
KPo	rocha reforçada com poliéster
KUr	rocha reforçada com uretano-acrilato
KE1Tv	rocha reforçada com epóxi Tenax e fibra de vidro 150g/m ²
KE1Fv	rocha reforçada com epóxi Tenax e fibra de vidro 600g/m ²
KE2Fv	rocha reforçada com epóxi Resoltech e fibra de vidro 600g/m ²
KPoFv	rocha reforçada com poliéster e fibra de vidro 600g/m ²
KE1S	rocha reforçada com compósito de sisal 3%
KE1C	rocha com canaletas reforçadas com epóxi Tenax

Fonte: O Autor.

A Tabela 5.6 sumariza os dados obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos, enquanto a Figura 5.8 ilustra comparativamente os resultados para o pegmatito ao natural e reforçado das dez formas distintas:

Tabela 5.6. Incremento na resistência à flexão 4 pontos ($\Delta\sigma$) para os tipos de reforço efetuados, em relação ao pegmatito sem reforço (K).

	σ (MPa)	δ	C_v	$\Delta\sigma$ (%)
K	4,5	0,87	0,193	-
KE1	6,1	1,14	0,186	35,5
KE2	5,1	0,34	0,066	13,3
KPo	4,1	1,22	0,297	8,9
KUr	5,0	0,81	0,162	11,1
KE1Tv	6,3	0,92	0,146	40,0
KE1Fv	11,6	0,81	0,069	157,7
KE2Fv	8,7	1,0	0,114	97,7
KPoFv	8,9	1,1	0,123	93,3
KE1S	6,9	0,8	0,115	53,3
KE1C	5,7	0,9	0,157	26,6

δ : desvio padrão; C_v : coeficiente de variação.

Fonte: O Autor.

Figura 5.8. Resistência à flexão 4 pontos calculada para o pegmatito Carnaval ao natural (K) e reforçado de dez formas distintas. A linha preta corresponde à resistência à flexão mínima preconizada pela NBR 15844 (ABNT, 2015) para o uso de granitos ornamentais.

Fonte: O Autor.

De uma forma geral, todos os reforços estudados apresentaram melhores resultados de resistência à flexão quando comparados com o pegmatito sem reforço, com exceção da rocha reforçada com poliéster (KPo). Esta modalidade de reforço obteve desempenho mecânico abaixo da rocha ao natural (K), o que pode estar relacionado com a heterogeneidade do pegmatito. Apesar da boa plasticidade desse polímero, a rocha é muito frágil e não suporta a mesma elongação, o que já havia sido notado durante o ensaio de tração dos compósitos com sisal apresentado no subitem 4.4.2.2. (Capítulo 4).

O fato do poliéster empregado nessa modalidade de reforço ser do tipo ortoftálico também explica sua baixa eficácia. Segundo Banas (1989), as propriedades químicas e mecânicas do poliéster ortoftálico são inferiores às do tipo isoftálico devido à dificuldade de se obter alto peso molecular no primeiro caso.

Dentre os tipos de reforço efetuados somente com polímeros, o pegmatito reforçado com uretano-acrilato (KUr) e com o epóxi Resoltech (KE2) apresentaram resultados semelhantes, porém com um menor espalhamento estatístico do último. Esse epóxi é mais fluído que o epóxi tradicional (3 e 8 poise, respectivamente), o que contribui para uma melhor penetração e fechamento de poros e microfissuras. Não obstante as boas propriedades do epóxi Resoltech, o melhor desempenho mecânico foi verificado para a o pegmatito reforçado com o epóxi Tenax (KE1), cujo aumento proporcionado na resistência foi de 35%.

Quando se compara a resistência à flexão do pegmatito reforçado com o epóxi Tenax (KE1) com o reforçado com o mesmo epóxi e tela de vidro de 150 g/m² (KE1Tv), observa-se que os resultados são virtualmente os mesmos, ao redor de 6 MPa. Isto significa que, para o pegmatito estudado, o agente de reforço tradicionalmente aplicado na indústria brasileira é ineficaz, ou ainda, o fato reforça a importância de se fazer a pós cura do epóxi, como forma de melhorar as propriedades mecânicas do reforço.

A metodologia de reforço que emprega compósito de epóxi e sisal à 3% (KE1S) apresentou incrementos na resistência à flexão bem mais modestos (53%) do que os verificados na primeira etapa da pesquisa (mais de 300% para o Tropical Treasure, pegmatito de resistência comparável ao Karnaval). O desempenho mecânico observado (6,9 MPa) também é semelhante ao do reforço efetuado somente com epóxi Tenax (6,1 MPa), o que, dentro das condições testadas, permite afimar que a matriz polimérica influencia mais os resultados do que a própria fibra, sendo que esses têm relação direta com a quantidade utilizada: quanto mais resina, maior a resistência.

As amostras reforçadas com o sistema de canaletas preenchidas por epóxi (KE1C) apresentaram desempenho mecânico inferior às reforçadas somente com epóxi (6,5 % menor), demonstrando ser essa uma metodologia inviável para o pegmatito estudado. A construção das canaletas parece ter sido um processo muito agressivo para uma rocha tão frágil quanto o Karnaval. A vibração da serra provavelmente induziu a propagação das microfissuras preexistentes no material, acentuando ainda mais sua fragilidade.

Ao se empregar o tecido de vidro de 600g/m², quaisquer das 3 resinas estudadas pode ser utilizada para reforçar a rocha (reforços KE1Fv, KE2Fv ou KPoFv), com ganhos de mais de 90% em resistência. Os custos, no entanto, são mais baixos se empregado o poliéster Recapoli (R\$13,75/kg, comparado ao epóxi Tenax a R\$18,90/kg, e ao epóxi Resoltech a R\$69,18/kg¹). Para rochas muito frágeis, no entanto, como é o caso do pegmatito Karnaval estudado, a melhor opção em desempenho mecânico é o reforço KE1Fv.

Ainda é importante destacar que o pegmatito Karnaval somente torna-se adequado para uso ornamental, atendendo a condição de 8 MPa de resistência à flexão preconizada pela NBR 15844 (ABNT, 2012), quando o tecido de vidro 600g/m² é aplicado como agente de reforço. A condição normativa não é atendida por nenhuma outra das dez metodologias de reforço estudada.

¹ Conversão do Euro (€) para o Real efetuada em 16 de maio de 2016: Euro (€) a R\$3,98.

5.2.2.1. Tensão de serviço vs. tensão máxima

Além da rocha sem reforço (K), cinco das dez metodologias de reforço estudadas foram selecionadas para aplicar-se o critério do Declive Global (S). A seleção baseou-se nos melhores resultados de resistência à flexão 4 pontos (KE1, KE1Fv) e na necessidade de avaliar-se detalhadamente o comportamento mecânico do reforço industrial (KE1Tv) e das técnicas alternativas propostas nesta pesquisa (KE1S e KE1C).

Das curvas de tensão-deslocamento ilustradas nas Figuras 5.9 e 5.11, cinco momentos foram selecionados, definidos como pontos experimentais A a E. Imagens correspondentes aos mesmos momentos foram extraídos do Vic-2D e são descritas em detalhe no subitem 5.2.2.2. Esse procedimento amparou o critério de análise proposto (S) e permitiu uma avaliação qualitativa dos danos resultantes devido ao gradiente de deformação.

A Figura 5.12 ilustra o comportamento tensão-deslocamento do pegmatito sem reforço. Uma amostra representativa foi selecionada dentre o conjunto de 21 amostras ensaiadas.

Figura 5.9. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Karnaval sem reforço (K); **Max. S:** máximo declive, **Max. S-7%:** máximo declive decrescido em 7% e **S:** declive global.

Fonte: O Autor.

O ponto A, definido como Máximo Declive (Max. S) representa o pico de rigidez do sistema (S), o qual define um critério para estabelecer o início da transição entre o regime elástico e o início do dano. O ponto B (Max. S decrescido 7% - Max. S-7%) define um critério que determina o fim desta zona de transição, a partir da qual o dano se torna crítico. Ou seja, apesar da rocha não perder a capacidade de transferência de carga, o dano é considerado qualitativamente como irreversível. A região entre 0 e 2 MPa (Max. S-7%)

corresponde à tensão de serviço (TS) para o pegmatito sem reforço. Essa faixa de resistência é baixa, mas está diretamente relacionada com as características petrofísicas do material (textura grossa, pobre entrelaçamento mineral, planos de clivagem do microclínio que determinam planos de fraqueza) e enfatiza a necessidade de reforço para que a industrialização se torne viável.

A tensão máxima alcançada foi aproximadamente 3 MPa, o que é 33% maior do que a TS proposta. O valor final da deformação foi aproximadamente 0,6. A amostra rompeu em um típico modo semi-frágil.

A figura 5.10 ilustra a curva tensão-deslocamento para o pegmatito reforçado apenas com o epóxi Tenax (modalidade KE1). De imediato pode-se observar que a amostra sofre pequenos incrementos na deformação à medida que ganha resistência, o que equivale dizer que o reforço tornou a amostra mais rígida em relação ao pegmatito ao natural (K). O trecho A-B, apesar de indicar o fim do regime elástico, ainda é bastante linear, com a curva de rigidez (S) também constante no mesmo trecho. A TS também é ampliada, alcançando o triplo da rocha sem reforço (~6MPa).

Figura 5.10. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Karnaval reforçado com epóxi Tenax (KE1). **Max. S:** máximo declive, **Max. S-7%:** máximo declive decrescido em 7% e **S:** declive global.

Fonte: O Autor.

A Figura 5.11 apresenta a curva tensão deslocamento para o pegmatito reforçado com epóxi e fibra de vidro 600g/m² (KE1Fv).

Figura 5.11. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com epóxi Tenax e tecido de vidro 600g/m² (KE1Fv). **Max. S:** máximo declive, **Max. S-7%:** máximo declive decrescido em 7% e **S:** declive global.

Fonte: O Autor.

A aplicação do reforço com fibra de vidro altera radicalmente o comportamento mecânico à flexão do pegmatito. Embora a localização do ponto A (Max. S) represente o ponto de deflexão para a curva da rigidez, a transferência de esforços da rocha para o reforço faz com que o sistema apresente um comportamento que transita entre um regime linear de maior rigidez (até o ponto A) para outro de menor rigidez, a partir do ponto B (Max. S-7%). A Tensão de Serviço (TS) localiza-se nessa zona, que corresponde aos valores de 0 a 11 MPa. As amostras reforçadas com o tecido de vidro evidenciam uma ruptura que ocorre em regime de cisalhamento. No entanto, a tensão máxima que leva à falha é pelo menos seis vezes maior do que a rocha sem reforço, ao redor de 25 MPa.

A Figura 5.12 ilustra a curva tensão-deslocamento para o pegmatito reforçado com epóxi e fibra de vidro 150g/m² (KE1Tv). A curva de declive global confirma a semelhança no comportamento mecânico desse reforço em relação ao reforço feito somente com epóxi (KE1), verificado no ensaio de flexão. O pico de rigidez (ponto A - Max. S) é praticamente o mesmo para ambos, no entanto para KE1Tv o ponto B (Max. S-7%) é bem inferior à rocha reforçada somente com epóxi (KE1). Isto pode estar relacionado com a delaminação da fibra de vidro, que caracteriza um dano irreversível e faz com que a TS desta amostra seja bem inferior à amostra reforçada somente com epóxi: 0 a 3,3 MPa. A deformação na tensão máxima é a mesma para ambos os reforços, ao redor de 0,4.

Figura 5.12. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com epóxi Tenax e tecido de vidro 150g/m² (KE1Tv). **Max. S:** máximo declive, **Max. S-7%:** máximo declive decrescido em 7% e **S:** declive global.

Fonte: O Autor.

Na Figura 5.13 é apresentada a curva tensão-deslocamento para o pegmatito reforçado com o sistema de canaletas preenchido por epóxi (KE1C). O início do dano (ponto A) se dá em cargas bem baixas, ao redor de 1,5 MPa, com amortecimento do sistema de rigidez ocorrendo em 3,3 MPa (ponto B), semelhante ao reforço anterior com fibra de vidro (KE1TV) e menor que o reforço feito somente com epóxi (KE1). Embora a tensão máxima seja virtualmente a mesma que a verificada para o reforço KE1 (~6 MPa), a TS fica reduzida no reforço com canaletas (0-3,3 MPa). A vibração provocada pela serra durante a confecção das canaletas pode induzir à formação de novas fissuras, que são propagadas quando ocorre incremento na carga atuante sobre os provetes.

Figura 5.13. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Carnaval reforçado com o sistema de canaletas e o epóxi Tenax (KE1C). **Max. S:** máximo declive, **Max. S-7%:** máximo declive decrescido em 7% e **S:** declive global.

Fonte: O Autor.

Por fim, a curva tensão-deformação para o pegmatito reforçado com epóxi e sisal (KE1S) está ilustrada na Figura 5.14. Em relação aos outros reforços, principalmente ao reforço com epóxi (KE1), observa-se que a curva do sistema é semelhante, porém este é menos rígido, ou seja, para a mesma tensão, os níveis de deformação são maiores, ao redor de 25%. A TS de serviço, no entanto é ampliada, compreendendo a faixa de 0 a 7,5 MPa (ponto B), podendo estar relacionada à maior quantidade de matriz epóxi utilizada para impregnar as fibras de sisal. A tensão de ruptura praticamente coincide com o ponto B (Max. S-7%), ocorrendo fratura quasi-frágil.

Figura 5.14. Curva tensão-deslocamento para o pegmatito Karnaval reforçado com epóxi Tenax e sisal (KE1S). **Max. S:** máximo declive, **Max. S-7%:** máximo declive decrescido em 7% e **S:** declive global.

Fonte: O Autor.

5.2.2.2. Análise do comportamento elástico

5.2.2.2.1. Vic-2D

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam a análise da deformação efetuada pelo Vic-2D para os cinco pontos seleccionados (A-E) nas curvas tensão-deslocamento do pegmatito sem reforço (K) e reforçado com a fibra de vidro 600 g/m² (KE1Fv). Para corroborar a análise de imagens feita pelo Vic-2D, a microestrutura formada nessas amostras foi observada com um microscópio eletrónico de varredura (MEV) e é apresentada na Figura 5.17.

A Figura 5.15 ilustra a deformação e a evolução do dano para o pegmatito sem reforço (K). Na imagem **A**, inicia-se o gradiente de deformação (0,25 a 0,27%), em que a tensão de tração supera a resistência à tração local e as microfissuras preexistentes podem começar a nuclear nessas zonas (ATKINSON, 1982). Em **B**, duas regiões principais susceptíveis ao desenvolvimento de fissuras dão lugar a apenas uma delas, em **C**. Este fenómeno está diretamente relacionado à heterogeneidade da rocha. O exame com MEV ajuda a explicar um possível alívio de tensão da nucleação das microfissuras num megacristal de microclínio (Figura 5.17 A), que diminui conforme a deformação se intensifica na fissura maior. A deformação máxima de 0,3% ocorre em **D**, onde é possível observar a fissura que levou a amostra à ruptura em **E** (Figura 5.17 B).

A evolução do dano observada nas imagens **A** e **B** comprovam os pontos Declive Máximo (Max. S) e Declive Máximo -7% (Max. S-7%) definidos na curva tensão-

deslocamento da Figura 5.9, e certificam a confiabilidade do critério de Declive Global, visto que em C já existe uma fissura detectável (dano irreversível).

Figura. 5.15. Evolução da deformação horizontal (ϵ_x) para o pegmatito sem reforço (K) em diferentes fases de carregamento.

Fonte: O Autor.

O processo de deformação para o pegmatito reforçado com epóxi e a fibra de vidro 600 g/m² (KE1Fv) é apresentado na Figura 5.16. As imagens **A** e **B** denotam o fenômeno de delaminação à baixa deformação (Figura 5.17 C), porém o formato das fissuras já está delineado, o que indica um dano inicial previamente detectado pelo critério Declive Global para essa região (Pontos Max. S e Max. S-7% na Figura 5.10). Na imagem **C** pode-se observar que a propagação das fissuras ocorre muito antes do material alcançar a tensão máxima. O mecanismo de formação de fissuras é restringido pelo reforço, prevenindo a propagação das fissuras iniciais, mas originando novas microfissuras. Esse fenômeno se intensifica em **D**, onde aparecem fissuras devido ao cisalhamento (abaixo dos roletes internos). A fissura que leva a amostra ao colapso acontece com uma deformação máxima de 2% em **E**. De acordo com as observações feitas no MEV, essa fissura ocorre devido a falha crítica associada com os planos de clivagem no microclínio (Figura 5.17 D).

Figura 5.16. Evolução da deformação horizontal (ϵ_x) para o pegmatito reforçado com epóxi e fibra de vidro 600 g/m² (KE1Fv) em diferentes fases de carregamento.

Fonte: O Autor.

Figura 5.17. Análise microestrutural da superfície das amostras: **A-** típica fissura de alívio de tensão devido à nucleação de microfissuras em um megacrystal de microclínio; **B-** falha da amostra de pegmatito sem reforço (K) originada no contato entre um cristal de quartzo e feldspato; **C-** uma fissura surge na amostra reforçada com epóxi e fibra de vidro 600 g/m² (KE1Fv) devido à delaminação; **D-** Ruptura da amostra reforçada (KE1Fv) relacionada ao plano de fraqueza no megacrystal de microclínio (notar clivagem em duas direções).

Fonte: O Autor.

5.2.2.2.2. Análise do módulo de elasticidade

A Tabela 5.7 apresenta o cálculo do módulo de elasticidade obtido pelo método estático (E_{es}) para o pegmatito sem reforço (K) e reforçado somente com epóxi Tenax (KE1), com a fibra de vidro 600g/m² (KE1Fv), com a tela de vidro 150g/m² (KE1Tv), com o sistema de canaletas preenchidas com epóxi (KE1C) e com as fibras de sisal (KE1S). O módulo de Young dinâmico (E_{din}) foi obtido apenas para o pegmatito sem reforço (K) e reforçado com a fibra de vidro 600g/m² (KE1Fv).

De uma forma geral, o módulo de elasticidade estático (E_{es}) está de acordo com a resistência à flexão obtida para as diferentes amostras. No entanto, duas considerações devem ser apontadas: a primeira delas diz respeito aos valores obtidos para o pegmatito reforçado somente com epóxi (KE1). Observa-se que as variações no módulo de elasticidade em relação ao pegmatito sem reforço (K) são maiores para o modo dinâmico. Este fato pode estar relacionado com a sensibilidade e a precisão do equipamento utilizado na obtenção do módulo, o qual é apto para medir as discontinuidades em escala de detalhe e, por consequência, o efeito do preenchimento das mesmas proporcionado pela aplicação do epóxi.

Tabela 5.7. Módulo de elasticidade pelo modo estático (E_{es}) e dinâmico (E_{din}) para o pegmatito sem reforço (K) e reforçado de cinco formas distintas.

	E_{es} (GPa)	E_{din} (GPa)	δE_{din}
K	22,48	27,16	0,170
KE1	24,57	30,75	0,079
KE1Fv	18,53	33,02	0,070
KE1Tv	22,65	-	-
KE1C	18,30	-	-
KE1S	20,40	-	-

Legenda: δE_{din} - desvio padrão módulo dinâmico.

Fonte: O Autor.

Numa segunda análise, o reforço KE1 foi o que conferiu maior rigidez às amostras analisadas. Por apresentar o melhor resultado de desempenho mecânico (11,6 MPa), esperava-se que a maior rigidez fosse encontrada para o reforço com a fibra de vidro 600g/m² (KE1Fv). No entanto, como o módulo calculado é uma média da região elástica e plástica, e o reforço KE1Fv apresenta esta segunda região mais prolongada, a rigidez final ficou abaixo da obtida para os outros reforços.

O módulo de Young dinâmico (E_{din}) está de acordo com o observado nas curvas tensão-deslocamento, sendo que o módulo da amostra reforçada com a fibra de vidro 600g/m² (KE1Fv) apresenta rigidez 20% maior que a amostra sem reforço (K).

Capítulo 6

CONCLUSÕES

O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficácia do reforço de placas de rochas praticado na indústria brasileira por meio de caracterização mecânica experimental e propor outras soluções de reforço alternativas e eficientes que permitam o uso de materiais frágeis.

O desenvolvimento da pesquisa em etapas, utilizando inicialmente um material e técnicas piloto permitiu o entendimento e a eliminação de lacunas críticas, de forma a moldar procedimentos mais adequados e alcançar resultados finais confiáveis.

Dentre todas as soluções alternativas estudadas, o reforço estudado na segunda etapa da pesquisa, efetuado com a resina epóxi Tenax e fibra de vidro 600 g/m² (KE1Fv) apresentou o melhor desempenho mecânico, o que encoraja a praticá-lo na indústria brasileira para materiais frágeis similares ao pegmatito Karnaval, em substituição ao reforço tradicionalmente aplicado.

A aplicação desse reforço muda drasticamente o comportamento à rigidez das amostras testadas e aumenta 6 vezes capacidade de transporte de carga do material. Consequentemente, a tensão de serviço (TS) é estendida e o material torna-se apto a suportar maiores deformações.

A caracterização petrofísica efetuada ao longo do trabalho permite determinar dois principais fatores que influenciam a fragilidade das rochas estudadas: a granulação grosseira, que implica num alto grau de microdescontinuidades e pobre imbricamento mineral, e os planos de fraqueza relacionados à clivagem nos megacristais de feldspatos

e micas. Estas propriedades diminuem a resistência à flexão, de forma que um reforço eficiente é necessário.

Quanto à definição de uma metodologia, pôde-se comprovar que a obtenção de um reforço eficaz exige cumprir uma série de procedimentos, conforme experimentados:

- a) A secagem adequada das placas de rocha é fundamental para a completa desobstrução das microdescontinuidades, de modo a permitir a penetração da resina por toda estrutura do material;
- b) A correta quantificação de resina, efetuada com base nas propriedades petrofísicas do material e fibra aplicados otimiza o resultado final do reforço e evita desperdícios. As fórmulas utilizadas para tal cálculo são facilmente aplicáveis à indústria;
- c) O processo de cura total em rampa possibilita condições ideais de tempo e temperatura para que a resina reticule-se por completo e desempenhe todas as propriedades mecânicas desejadas, inclusive mostrando que o uso da tela de fibra de vidro 150g/m² é dispensável para as condições estudadas;
- d) O uso de uma fibra de vidro de qualidade superior, como a fibra de 600g/m² estudada permite o uso de resinas de preço inferiores aos da epóxi tradicionalmente aplicada (Tenax), o que reduz o custo final do reforço sem prejudicar sua qualidade.

Quanto à caracterização mecânica aprofundada, faz-se três principais conclusões:

- a) A definição de uma tensão de serviço (TS) para rochas de granulação grossa, como o pegmatito Karneval estudado foi satisfatoriamente atendida empregando um procedimento experimental (critério do Declive Global) que permitiu estimar intervalos seguros de valores de tensão, úteis para a aplicação desses tipos de materiais como produtos de construção.

b) O critério Declive Global foi validado por meio do uso de análise de imagem (Vic-2D) que suporta os requerimentos de segurança, ou seja, assegura que nenhuma falha crítica foi gerada abaixo da tensão de serviço (TS). O uso do Vic-2D permite visualizar a formação de fissuras que não são facilmente detectáveis pelas máquinas de teste tradicionais. Essa validação também foi provada pela inspeção feita nas imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

c) Por extensão, aplicações industriais usando materiais similares ao Karnaval podem ser empregadas levando em conta a determinação da tensão de serviço, nomeadamente:

- Programar uma carga adequada a ser aplicada pelas politrizes automáticas em materiais frágeis sem reforço, de forma que a quebra inesperada não ocorra;
- Controle de qualidade dos procedimentos de reforço por meio do novo critério de Declive Global sugerido nesta pesquisa;
- Implementação de um fator de segurança prático para produtos de rocha acabados direcionados para a construção civil.

6.1. Sugestão de trabalhos futuros

- Estudar o reforço de placas de rochas ornamentais exóticas empregando uma matriz de poliéster isoftálico, dado as melhores propriedades mecânicas deste termorrígido;
- Estudar o reforço de placas de rochas ornamentais exóticas empregando uma matriz poliuretana à base de mamona, aliada à fibras de vidro superiores, como as utilizadas nesta pesquisa;

- Estudar soluções de reforço em placas de rochas ornamentais exóticas com 2cm de espessura;
- Estudar diferentes soluções de reforço efetuando cálculo devido de tensões por meio do método de transformação de áreas ou outro equivalente, estabelecendo assim valores adequados para aplicações estruturais.

REFERÊNCIAS

ÅKESSON, U. et al. The Influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. **Engineering Geology**, v. 68, p. 23–28, 2003.

ALENCAR, C. R. A. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo**: rochas ornamentais. Cachoeiro de Itapemirim: Instituto Euvaldo Lodi - Regional do Espírito Santo, 2013.

ALI, M. et al. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 814–825, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C880**: Flexural strength of natural building stone. Philadelphia, 2009.

_____. **C99**: Standard test method for modulus of rupture of dimension stone. Philadelphia, 2009a.

_____. **C1352**: Standard test method for flexural modulus of elasticity of dimension stone. West Conshohocken, 2009b.

_____. **D3039**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, 2014.

_____. **C97M**: Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone. West Conshohocken, 2015.

_____. **C1259**: Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. West Conshohocken, 2015a.

ARIZO, A. et al. Resin applications in stone industry. In: MIDHA, S.; PASPALIARIS, I. (Ed.). **Complementary technologies for stone processing**. [S.l.]: OSNET, 2004. p.81–99.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14081-4**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas parte 4: determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR15012**: Rochas para revestimentos de edificações - terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15845-1**: Rochas para revestimento parte 1: análise petrográfica. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15845-7**: Rochas para revestimento parte 6: determinação do módulo de ruptura (flexão por carregamento em três pontos). Rio de Janeiro, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15845-6**: Rochas para revestimento parte 7: determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos. Rio de Janeiro, 2015b.

_____. **NBR 15844** - Rochas para revestimento – requisitos para granitos. Rio de Janeiro, 2015c.

ATKINSON, B. K. Subcritical crack propagation in rocks: theory, experimental results and applications. **Journal of Structural Geology**, v. 4, p. 41-56, 1982.

AZIZ, S. H. et al. Modified polyester resins for natural fiber composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, p. 525–535, 2005.

BANHA, J. L. C., Comparative analysis of instrumentation methods for characterization and monitoring of composite materials, Thesis (Mastering). 41p. University of Lisbon, Instituto Superior Tecnico, 2015.

BAUMGART, F. Stiffness--an unknown world of mechanical science?. **Injury**, v. 31, p. 14-23, 2000.

BAZANT, Z.; XI, Y.; REID, S. Statistical size effect in quasi-brittle structures: is weibull theory applicable?. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 117, p. 2609-2622, 1991.

BECKWITH, S.W. Natural fiber reinforcement materials: lower cost technology for composites applications. **Composites Fabrication**, v. 19.11, p.12-16, 2003.

BEDI, R.; CHANDRA, R.; SINGH, S. P. Mechanical properties of polymer concrete. **Journal of Composites**, v. 2013, p. 1-13, 2013.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R. **Resistência dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Makron Books, 2006.

BENDAHOU, A. et al. Short palm tree fibers polyolefin composites: effect of filler content and coupling agent on physical properties. **Macromolecular Materials Engineering**, v. 293, p. 140–148, 2008.

BIENIAWSKI, Z. T. Time-dependent behaviour of fractured rock. **Rock Mechanics**, v. 2, p. 123–137, 1970.

BILAL, E. Neoproterozoic granitoid suits in southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geologia**, v. 30, 2000, 1 CD-ROM.

BITZER, T. **Honeycomb technology**: materials, design, manufacturing, applications and testing. New York: Chapman & Hall, 1997.

BOGUSZ, A.; BUKOWSKA, M. Stress-strain characteristics as a source of information on the destruction of rocks under the influence of load. **Journal of Sustainable Mining**, v. 14, p. 46–54, 2015.

BORST, R. Fracture in quasi-brittle materials: a review of continuum damage-based approaches. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 69, p. 95-112, 2002.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining**. 2nd ed. New York: Chapman & Hall, 1994.

BRITO NEVES, B. B. Tectonichistory of the Borborema Province, northeastern Brazil. In: CORDANI, U. G. Et al. (Ed.). **Tectonic Evolution of South America**. [S.l.:s.n.]: 2000. p. 51-182. Apresentado em International Geological Congress, 31.

CAMARGO, J. L. **Influência das propriedades petrográficas na qualidade do polimento de rochas ornamentais**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

CAMERON, E.N. et al. **Internal structure of granitic pegmatites**. Littleton: Society of Economic Geologists, 1949. (Economic Geology Monograph, 2).

ČERNÝ, P. Anatomy and classification of granitic pegmatite. In: ČERNÝ, P. (ed.). **Granitic pegmatites in science and industry**. Winnipeg: Mineralogical Association of Canada, 1982. v.8, p.1-39.

_____. Rare-element granite pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. **Geoscience Canada**, v.18, p. 9–67, 1993.

CERRILLO, C. et al. New contributions to granite characterization by ultrasonic testing. **Ultrasonics**, v. 54, p. 156–167, 2014.

CENTRO TECNOLÓGICO DO MÁRMORE E GRANITO - CETEMAG. **Resinagem**. Cachoeiro de Itapemirim, 2004. Apostila.

CHAUDHURY, M. K. Fundamentals of adhesion. In: **ENCYCLOPEDIA of materials: science and technology**. 2nded. Oxford: Elsevier, 2001.p. 43-48.

CHAVES, M. L. S. C.; SCHOLZ, R. Pegmatito Gentil (Mendes Pimentel, MG) e suas paragêneses mineralógicas de fosfatos raros. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 61, n.2, p.141-149, 2008.

CHIODI FILHO, C. **Situação atual e perspectivas brasileiras no setor de rochas ornamentais**. São Paulo: ABIROCHAS, 2008. Informe 02/2008.

_____. **Balanço das exportações e importações de rochas ornamentais e de revestimento em 2013**. São Paulo: ABIROCHAS, 2014. Informe 01/2014.

_____. **Balanço das exportações, importações, produção e consumo interno brasileiro de rochas ornamentais em 2014**. São Paulo: ABIROCHAS, 2015. Informe 01/2015.

_____. Desempenho brasileiro no setor de rochas ornamentais. **Revista Rochas de Qualidade**, n. 252, p. 194-212, 2017.

CICCOTTI, M.; MULARGIA, F. Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock. **Geophysical Journal International**, v. 157, p. 474-477, 2004.

CLIFTON, J.A. **Stone consolidating materials**: a status report. Washington: US Department of Commerce/National Bureau of Standards, 1980. (Technical Note nº. 1118V46).

COIMBRA FILHO, C. G. **Relação entre processo de corte e qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais**. 2006. 168p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006.

COMPANHIA DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS - CEI. Disponível em: <http://www.ceigroup.net/stonecut-line/>. Acesso: 28 Mar.2016.

CORREIA-NEVES, J. M. Província pegmatítica oriental do Brasil. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T. ; COELHO, C.E.S. (Ed.). **Principais depósitos minerais do Brasil**: rochas e minerais industriais - parte B. Brasília: DNPM/CPRM, 1997. v. 4, p. 343-362.

COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.; PADINI, L. C. Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. **Polímeros**: ciência e tecnologia, v. 9, n. 2, p. 37-44, abr./jun. 1999.

COUTO, I. A. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero**. 2007. 153p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

DA SILVA, M. R. R. et al. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristic. **Journal of South American Earth Science**, v. 8, p. 355-364, 1995.

DECOLORES MÁRMORES E GRANITOS. Disponível em: <http://www.decolores.com.br/projetos.html>. Acesso: 10 mar.2014.

DEL RÍO, L.M. et al. Ultrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of extremadura (Spain). **Ultrasonics**, v.44, Supplement, p. e1057–e1061, Dec. 2006.

DELGADO RODRIGUES, J.; COSTA, D. Evaluation of consolidation treatments applied to granitic materials. Experience and critical overview of laboratory testing. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM “STONE CONSOLIDATION IN CULTURAL HERITAGE: research and practice”, 2008, Lisbon. **Proceedings...** Lisboa: LNEC, 2008. p. 389-398.

_____. Assessment of the harmfulness of consolidants in granite. In: VICENTE, M. A.; DELGADO RODRIGUES, J.; ACEVEDO, J. (Ed.). **Degradation and conservation of granitic rocks in monuments**: proceedings of the EC workshop held in Santiago de Compostela. Brussels: ECSC, 1996a. p. 349-354. (Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report no. 5).

DELGADO RODRIGUES, J. et al. Behavior of consolidated granites under ageing tests. In: VICENTE, M. A.; DELGADO RODRIGUES, J.; ACEVEDO, J. (Ed.). **Degradation and conservation of granitic rocks in monuments**: proceedings of the EC workshop held in

Santiago de Compostela. Brussels: ECSC, 1996b. p. 355-360. (Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report no. 5).

DUTHINH, D.; STARNES, M. Strength and ductility of concrete beams reinforced with carbon fibre-reinforced polymer plates and steel. **Journal Composite Construction**, v. 8, p. 59-69, 2004.

EXCEL SENSORES. **Extensômetros coláveis de resistência elétrica modelos unidirecionais simples**. Disponível em: <<http://www.excelsensor.com.br/>>. Acesso: 10 fev.2016.

FARMER, I. W. **Engineering properties of rocks**. London: Spon, 1968.

FELTRAN, M. B. **Compósitos de PVC reforçados com fibra de vidro: uso de técnicas de processamento convencionais da indústria brasileira**. 153p. 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FENER, M.; INCE, I. Influence of orthoclase phenocrysts on point load strength of granitic rocks. **Engineering Geology**, v. 141–142, p. 24-32, July 2012.

FERREIRA, S. R. et al. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730-740, 2015.

FERSMAN, A.E. **Les Pegmatites: leur importance scientifique et pratique**. Traduzido para o francês por R. du Trien de Terdonck e J. Thoureau. Bélgica: Universidade de Louvain, 1931. v.3.

FIORELLI, J. et al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: an eco-efficient product. **Industrial Crops and Products**, v. 40, p. 69–75, 2012.

FRONTWAVE. **Stork**. Disponível em: <http://frontwave.pt/engineering/project/stork_fw/>. Acesso em: 15 Feb. 2016.

GAURI, K. L. Improved impregnation technique for the preservation of stone statuary. **Nature**, v. 228, p. 882, 1974.

GEORGE, J.; SREEKALA, M. S.; THOMAS, S. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. **Polymer Engineering & Science**, v. 41, 2001, p. 1471–1485.

GOODMAN, R.E. **Introduction to rock mechanics**. 2nded. New York: John Wiley, 1989.

GOULDING, T. M. Epoxy Resin Adhesives. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Org.). **Handbook of adhesive technology**. 2nd ed. New York: CRC Pres, 2003. p. 1-16.

GRANITO ZUCCHI. Disponível em: <<http://www.granitozucchi.com.br/product/fusion.html>>. Acesso: 5 mar.2014.

GRANSENA. Disponível em: <http://www.gransen.com.br/site/index.php?link=produto>. Acesso: 12 mar. 2014.

GUILLEM, C.; MARTIN, J. M. Influencia del contenido de endurecedor de una resina de poliéster insaturado en sus propiedades de refuerzo de piezas de mármol Crema Marfil. **Roc Máquina**, n. 72, p. 38–47, 2002.

GUILLEM, C. et al. Refuerzo de piedra natural: Resinas de poliéster insaturado y resinas epoxi en emulsión acuosa. **Roc Máquina**, p. 46–51, 2007.

GUILLEM, C. et al. New water-borne epoxy resins for natural stone reinforcement in slab processing. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF DIMENSION STONE, 2, 2008, Carrara. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2008. p. 155–160.

HERTER, F. F. **Desenvolvimento de compósitos tri-componente epóxi/ fibra de vidro/ hidróxidos duplos lamelares**. 2010. 58f. Monografia (Trabalho de Diplomação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSON, P.E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and Concrete Research**, v. 6, p. 773-782, 1976.

HOFMANN, H. et al. A Grain based modeling study of mineralogical factors affecting strength, elastic behavior and micro fracture development during compression tests in granites. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 147, p. 261-275, 2015.

HOFFMANN, K. **An Introduction to measurements using strain gages**. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

HORI, H.; NEMAT-NASSER, S. Overall moduli of solids with microcracks, load-induced anisotropy. **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, v. 31, p. 155–171, 1983.

_____. Compression induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure. **Journal of Geophysics Research**, v. 90, p. 3105–3125, 1985.

ITAARTE. Disponível em: <<http://www.itaarte.com.br/2009/galeria.php#>>. Acesso: 2 nov.2015.

JAHNS, R. H. The Study of pegmatites. **Economic Geology**, v.2, p.1025-1130, 1955.

JARDIM DE SÁ, E. F. Geologia da região do Seridó: reavaliação de dados. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 11., 1984, Natal. **Anais...** Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984. p.278-296.

JOHANSSON, M. et al. Radiation curing of hyperbranched polyester resins. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 75, p. 612–618, 2000.

JOHN, M. J. et al. Effect of chemical modification on properties of hybrid fiber biocomposites. **Composites: part A – applied science and manufacturing**, v. 39, p. 352-363, 2008.

JOHNSTON JR., W. D. Beryl-tantalite pegmatites of Northeastern Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, p. 1015-1070, 1945.

JONES, F.R. **Handbook of polymer fiber composites**. Londres: Longman Group, 1994.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. 2nd ed. New York: CRC Press, 1998..

KANEKO, T. Relation between flexional resonant frequency equations for the flexional vibration of cylindrical rods. **Journal of Research of the National Bureau Standards**, v. 64B, p. 237, 1960.

KIM, J. T.; NETRAVALI, A. N. Mercerization of sisal fibers: effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber reinforced composites. **Composites: part A**, v. 41, p. 1245-1252, 2010.

KOTLÍK, P.; JUSTA, P.; ZELINGER, J. The Application of epoxy resins for the consolidation of porous stone. **Studies in Conservation**, v. 28, p. 75-79, 1983.

LANDES, K. K. Origin and classification of pegmatites. **American Mineralogist**, v.18, n.2, p.33-56, 1933.

LEE, H.; NEVILLE, K. **Handbook of epoxy resin**. New York: McGraw-Hill; Plenum, 1967.

LEITÃO, V. M. F.; SILVEIRA, L. L. L. Ecoabrasivo confeccionado com resina vegetal e carbetto de silício: uma inovação para o setor de rochas ornamentais. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 22., 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM-MCTI, 2014.

_____. Desempenho de rebolo abrasivo confeccionado com resina vegetal submetido ao simulador de polimento de rocha. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM-MCTI, 2012.

LEWIS, M. D. **Modern stone cladding**: design and installation of exterior dimension stones systems. Philadelphia, ASTM, 1995. (ASTM Manual Series: MNL 21).

LIAO, J.; HU, T.B.; CHANG, C.W. Determination of dynamic elastic constants of transversely isotropic rocks using a single cylindrical specimen. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 34, p. 1045–1054, 1997.

LICCARTO, A. **Geologia de pegmatitos**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. 66 slides. Notas da aula. Disponível em: <<http://www.geoturismobrasil.com/Material%20didatico/08%20-%20geologia%20pegmatitos.pdf>>. Acesso: 12 maio 2015.

LIMA, M. P. **Aspectos da lavra de feldspato em pegmatitos da Província da Borborema**. 2002. 91p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

- LIU, D. et al. Structure and properties of blend films prepared from castor oil polyurethane/soy protein derivative. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 47, p. 9330–9336, 2008.
- LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A.C. Síntese dos recursos minerais do Cráton do São Francisco e faixas marginais em Minas Gerais. **Geonomos**, v.1, p. 51–64, 1993.
- LONDON, D. The Application of experimental petrology to the genesis and crystallization of granitic pegmatites. **Canadian Mineralogist**, v. 30, pt. 3, p. 499–540, Sept. 1992.
- _____. Granitic pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future. **Lithos**, v. 80, p. 281–303, 2005.
- LÓPEZ-BUENDÍA, A. M. Natural stone reinforcement of discontinuities with resin for industrial processing. **Engineering Geology**, v. 166, p. 39–51, 2013.
- LÓPEZ-MONTEAGUDO, R. et al. Marble processing and block reinforcement treatment in Spain. In: MIDHA, S.; PASPALIARIS, I. (Ed.). **A Review of stone processing industry in five EU regions**. [S.l.]: OSNET, 2004. p. 23–42, 2004.
- LUZ, A. B. et al. **Pegmatitos do Nordeste**: diagnóstico sobre o aproveitamento racional e integrado. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003. (Série Rochas e Minerais Industriais).
- MA, S. et al. Damage observation and analysis of a rock Brazilian disc using high-speed DIC method. **Applied Mechanics and Materials**, v. 70, p. 87–92, 2011.
- MANALO, A.; ARAVINTHAN, T. Behaviour of glued fibre composite sandwich structure in flexure: experiment and fibre model analysis. **Materials & Design**, v. 39, p. 458–468, 2012.
- MARBLE INSTITUTE OF AMERICA. **Reinforcement techniques**. In: A HOMEOWNER'S guide to natural stone countertop installation. Cleaveland, 2008. p. 8.
- MARBRASA MÁRMORES E GRANITOS DO BRASIL. Disponível em: <<http://www.marbrasa.com.br/produtos/?t=gaya>>. Acesso: 3 mar. 2014.
- MARCON, D. B.; CASTRO, N.F.; VIDAL, F. W. H. D. Estudo da aplicação da tecnologia de corte de fio diamantado na extração de granitos comerciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 4., 2012, Campina Grande. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. p. 138–147.
- MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 18, p. 92–99, 2008.
- MARSH, G. Next step for automotive materials. **Materials Today**, v. 6, n.4, p. 36–43, 2003.
- MERLINI, C.; SOLDI, V.; BARRA, G. M. O. Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites. **Polymer Testing**, v. 30, p. 833–840, 2011.

MILÉO, P.C. et al. Mechanical behaviour of polyurethane from castor oil reinforced sugarcane straw cellulose composites. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 2068–2073, 2011.

MISKOVSKY, K. et al. Influence of the mineralogical composition and textural properties on the quality of coarse aggregates. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.13, p. 144-150, 2004.

MOHAMAD, G.; ACCORDI, J.; ROCA, L.E. Avaliação da associação de compósito de fibra de vidro e carbono no reforço de madeira de eucalyptus in natura e autoclavada. **Revista Matéria**, v. 16, p. 613-620, 2011.

MONTANI, C. **XXVI Relatório mármore e rochas no mundo: dossiê Brasil 2015**. Traduzido por E. Mori e A. F. Furia. Carrara: Aldus, 2015.

_____. XXVII Rapporto marmo e pietre nel mondo 2016: **congiuntura internazionale, produzione, scambi, consumi, tecnologie, beni strumentali, schede dei paesi leader**. Carrara: Aldus, 2016. Disponível em: <https://issuu.com/marmonews/docs/2016_report>. Acesso em: 23 apr. 2017.

MONTEIRO, S. N. et al. Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. **Journal of the Minerals, Metals and Materials Society**, v. 61, p. 17-22, 2009.

_____. **Selection of high strength natural fibers**. Revista Matéria, v. 15, p.488 – 505, 2011.

_____. Processing and properties of continuous and aligned curaua fibers incorporated polyester composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 2, p. 2-9, 2013.

MOREIRAS, S. T. F. **Estudo sobre o revestimento de fachadas de edifícios altos com placas de granitos ornamentais**. 2005. 92p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MOREIRAS, S. T. F.; PARAGUASSÚ, A. B.; RIBEIRO, R. P. Dimensionamento de placas de rocha fixadas com *inserts* metálicos em fachadas de edifícios. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 2005, Guarapari. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM, 2005.

MOREIRAS, S. T. F.; PARAGUASSÚ, A. B. Viabilidade do uso de placas de granito como lajes em edificações. **Ambiente Construído**, v. 12, p. 25-36, 2012.

_____. Granite plates as slabs in social housing in Brazil. **Construction Materials**, v. 1, p. 1-7, 2013.

MOREIRAS, S. T. F. **Metodologias para o dimensionamento de placas de "granitos" em sistemas não-aderentes de fixação**. 2014. 145 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MOREIRAS, S. T. F.; PARAGUASSÚ, A. B.; NAPA, G. F. Granite plates as structural slabs in Brazilian buildings: application of reliability concepts. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, p. 1325-1330, 2014.

MOROTE-MARTÍNEZ, V.; TORREGROSA-COQUE, R.; MARTÍN-MARTÍNEZ, J. M. Addition of unmodified nanoclay to improve the performance of unsaturated polyester resin coating on natural stone. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, p. 154–163, 2011.

MOSQUERA, M.J. Microstructural change in granitic rocks due to consolidant treatments: their effects on moisture transport. **International Congress on Deterioration and Conservation of Stone**, v. 1, p.601-607, 2000.

MURPHY, J. **The Reinforced plastics handbook**. New York: Elsevier Advanced Technology, 1994.

MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 84, p. 2222-2234, 2001.

NEVES, M.C. **Estudo experimental do polimento de diferentes “granitos” e as relações com a mineralogia**. 2010. 115p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

NOGAMI, L. et al. Influence of the mineralogical and mortar components on the adherence of some “granites”. In: GLOBAL STONE CONGRESS, 2012, Borba. **Proceedings...CD-ROM**.

OKUBO, S.; NISHIMATSU, Y.A. Study on the class behavior of rock. **Rock Mechanics**, v. 4, p. 261–273, 1990.

ONODERA, H. M.; KUMARA, A. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 22, p. 173–177, 1980.

ORDOÑEZ, S. et al. El Crema marfil (pinote) II: criterios petrográficos de durabilidad. **Geogaceta**, v. 20, p. 731–735, 1996.

PATEL, R. B. et al. Thermal and mechanical properties of modified polyester resin and jute composite. **Der Chemica Sinica**, v. 5, p. 47-54, 2014.

PAZETO, A. A. **Correlação entre propriedades petrográficas e comportamento tecnológico e de alterabilidade das rochas ornamentais silicáticas Diamante Negro (BA), Ocre Itabira e Banco Galaxy (ES)**. 2011. 172 f. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011.

PAZETO, A. A. ; PARAGUASSÚ, A. B. ; RIBEIRO, R. P. Telagem de rochas graníticas: influência da composição mineralógica na aderência com a resina epóxi. In: **Anais do IV Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais**, 2012, Campina Grande PB. IV CBRO. Campina Grande: Realize Editora, 2012. p. 213-220.

PAZETO, A. A.; PARAGUASSÚ, A. B. Estudo experimental da telagem de chapas de rochas graníticas com fibra de sisal. **Revista Brasileira Geologia de Engenharia e Ambiental**, v.3, p. 93-101, 2013.

PEDRA RIO MÁRMORES E GRANITOS. **Lightstone**. Disponível em: <<http://www.lightstone.com.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2015.

PEDROSA-SOARES, A. C. et al. Geotectonic significance of the Neoproterozoic granitic magmatism in the Araçuaí belt: a model and pertinent questions. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 59-66, 1999.

PELLS, P. J. N. Uniaxial strength testing. In: HUDSON, J.A. (Ed.). **Comprehensive rock engineering**. Oxford: Pergamons, 1993. v.3, p. 67–85.

PINHEIRO, J. R. **Determinação experimental da rigidez complexa de um aglomerado de cortiça**. 2014. 95p. Tese (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

PINTO, C. P.; PEDROSA-SOARES, A. C. Brazilian gem provinces. **Aus Gemacht**, v. 21, p. 2–16, 2001.

PRIKRYL, R. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: limitations and possible source of misinterpretations. **Engineering Geology**, v. 87, p. 149–162, 2006.

PUSCH, R. **Rock mechanics on a geological base**. Amsterdam: Elsevier, 1995. (Developments in Engineering Geology, 77).

RAMESH, M.; PALANIKUMARB, K.; HEMACHANDRA REDDY, K. Mechanical property evaluation of sisal–jute–glass fiber reinforced polyester composites. **Composites - part B: engineering**, v. 48, p. 1-9, 2013.

RAZERA, I. A. T. **Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica**. 2006. 189p. Tese (Doutorado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

REGADAS, I. C. M. C. **Aspectos relacionados às lavras de granitos ornamentais com fio diamantado no norte do estado do Espírito Santo, Brasil**. 2006. 128p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RIBEIRO, R. P. **Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos**. 2005. 132p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

RIUL, C. **Desenvolvimento de compósitos estruturais de politetrafluoretileno (PTFE) com fibras contínuas**. 2009. 121p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ROLFF, P. A. M. A. **Contribuição ao estudo de cassiterita no Nordeste**. Rio de Janeiro: DNPM, 1945.

RUFO, M.; SHAH, D.; RAYMOND, W. **2K Waterborne epoxy systems: technology overview and new developments**. San Francisco: Air Products, 2007. (Technical Notes).

SANTOS, E. J. et al. Terranes and their boundaries in the proterozoic borborema province, NE Brazil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 7, 1999, Lençóis. **Anais...**Lençóis: SBG, 1999. p.121-124.

SANTOS, F. L. G. & SOUSA, J. L. A. O. Determinação de parâmetros de um modelo visco-coesivo de fratura por análise inversa. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 738-746, 2015.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 585–592, 2003.

SCHOCK, R. N.; LOUIS, H. Strain behavior of a granite and a Graywacke sandstone in tension. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, p. 7817–7823, 1982.

SCORZA, E. P. **Província pegmatítica da Borborema**. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 1944. (Boletim 112).

SEKULIC, A.; CURNIER, A. Experimentation on adhesion of epoxy. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 30, p. 89-104, 2010.

SELWITZ, C. **Epoxy resins in stone consolidation**. Los Angeles: J. Paul Getty Trust, 1992. (Research in Conservation, 7).

SERACO, I. P.; SILVEIRA, L. L.L. Medição do desgaste abrasivo de resina vegetal por meio do ensaio Taber. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 23., 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM-MCTI, 2015.

SHARMA, V.; KUNDU, P.P. Addition polymers from natural oils—a review. **Progress in Polymer Science**, v. 11, p. 983–1008, 2006.

SILAEX. **Resinas poliéster**. Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>>. Acesso em: 14out.2015.

SILVA, M. C. et al. Composites of rigid polyurethane foam and cellulose fiber residue. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 117, p. 3665–3672, 2010.

SILVA, R. V. et al. Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. **Composites Science and Technology**, v. 66, p. 1328–1335, 2006.

SILVEIRA, L.L.; PORTO, W.; BOLONINI, T. Substituição da resina epoxídica utilizada na telagem de rochas ornamentais por poliuretana à base de óleo de mamona. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 26., 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Alfenas: UNIFAL, 2015.

SILVEIRA, L. L. L.; MORO, V. Analysis of the Behavior of Abrasive Tool Performed With Alternative Resin Tested in the Polishing Rock Simulator (PRS). **In: GLOBAL STONE CONGRESS**, 2012, Borba. CD-ROM.

SILVEIRA, L.L.L. **Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo**. 2007. 205p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SINGH, D. P. Determination of some engineering properties of weak rocks. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WEAK ROCK**, 1981, Tokyo. **Proceedings...** Lisboa: International Society for Rock Mechanics, 1981. p.315-320.

SLIMSTONE. **Slimstone design collection**. Disponível em:<http://www.slimstone.com.br/pdf/apresentacao_slimstone_collection.pdf>. Acesso em: 19 Sept. 2014.

SMORODINOV, M. I.; MOTOVILOV, E. A.; VOLKOV, V. A. Determinations of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks, **Proceedings** of the 2nd Congress of the International Society of Rock Mechanics, vol. II, Theme 3, 1970, 3 pp.

SONG, I. et al. Determination of the elastic modulus set of foliated rocks from ultrasonic velocity measurements. **Engenharia Geológica**, v. 72, p. 293–308, 2004.

SORIANO, J.; PELLISA, B. P.; MASCIA, N. T. Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars. **Composite Structures**, v.150, p. 200-207, 2016.

SOUSA, L.M.O. et al. Influence of microfractures and porosity on the physic-mechanical properties and weathering of ornamental granites. **Engineering Geology**, v. 77, p. 153–168, 2005.

SOUZA, D.V.; VIDAL, F.W.H.; CASTRO, N.F. Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de granitos comerciais. **Ambiente Mineral**, v. 1, p. 17-24, 2014.

SPINACÉ, M. A. S. et al. Characterization of lignocellulosic curaua fibers. **Carbohydrate Polymers**, v. 77, p. 47-53, 2009.

STONE PERFORMANCE. **SPP (Stone Performance Process)**. Disponível em:<<http://www.stone-performance.com/3.aspx>>. Acesso em: 12 Mar. 2015.

STONE WORLD CONTEMPORARY STONE & TILE DESIGN. **The Marble and granite resin process: how and why**. 2003. Disponível em:<<http://www.stoneworld.com/articles/82382-the-marble-and-granite-resin-process-how-and-why>>. Acesso em: 13 Mar. 2015.

STRECKEISEN, A. To Each plutonic rock its proper name. **Earth Science Reviews**, v.12, n.1, p.1-33, 1976.

TENAX. **Epoxy System Part A + Hardener Part B 25%**. Charlotte, 2011. (Technical Data Sheet).

THOMAS, R.; DAVIDSON, P.; BEURLIN, H. The Competing models for the origin and internal evolution of granitic pegmatites in the light of melt and fluid inclusion research. **Mineralogy and Petrology**, v. 106, p. 55-73, 2012.

TIBILETTI, L. et al. Thermal degradation and fire behaviour of unsaturated polyesters filled with metallic oxides. **Polymer Degradation and Stability**, v. 96, p. 67-75, 2011.

TORIZ, G. et al. Cellulose fiber-reinforced cellulose esters: biocomposites for the future. In: MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. (Ed.). **Natural fibers, biopolymers and biocomposites**. Florida: CCR Press, 2005.

TUĞRUL, A.; ZARIF, I.H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. **Engineering Geology**, v. 51, p. 303–317, 1999.

VALLEJO, L. I. G. et al. **Ingeniería geológica**. Madrid: Prentice Hall, 2002.

VAN VLIET, M.R.A.; VAN MIER, J.G.M. Experimental investigation of size effects in concrete and sandstone under uniaxial tension. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 65, p. 165–188, 2000.

VASCONCELOS, G. et al. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. **Ultrasonics**, v. 48, p. 453–466, 2008.

VERMA, C. S.; CHARIAR, V. M. Stiffness and strength analysis of four layered laminate bamboo composite at macroscopic scale. **Composites: part B**, v. 45, p. 369-376, 2013.

WAHL, L.; MAAS, S.; WALDMANN, D. Shear stresses in honeycomb sandwich plates: Analytical solution, finite element method and experimental verification. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 14, p. 449-468, 2012.

WAWERSIK, W. R.; FAIRHURST, C. A Study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 7, p. 561–575, 1970.

WIEJERMARS, R. **Brittle fracture**. In: PRINCIPLES of Rock Mechanics. Amsterdam: Aboran Science, 1997.

WILLARD, R. J.; MCWILLIAM, J. R. Microstructural techniques in the study of physical properties of rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 6, p. 1-12, 1969.

WINKLER, E. M. **Stone: properties, durability in man's environment**. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1975.

WONG, T. F. Micromechanics of faulting in westerly granite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 19, p. 49–64, 1982.

_____. Geometric probability approach to characterization and analysis of microcracking in rocks. **Mechanics of Materials**, v. 4, p. 261–276, 1985.

XIA, K. et al. Effects of microstructures on dynamic compression of barre granite. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, v. 45, p. 879-887, 2008.

YILMAZ, N.G.; GOKTAN, R.M.; KIBICI, Y. Relation between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength of granitic building stone. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, 38, p. 671-82, 2010.

YANG, G. et al. An Experimental investigation on the damage of granite under uniaxial tension by using a digital image correlation method. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 73, p.46–52, 2015.

YAN,L.; CHOUW,N. Experimental study of flax FRP tube encased coir fibre reinforced concrete composite column. **Construction and Building Materials**, v.40, p. 1118–1127, 2013.

YOUSIF, B. et al. The Effect of treatment on tribo-performance of CFRP composites. **Recent Patents on Materials Science**, v. 2, p. 67–74, 2009.

ZAH, R.et al. Curaua fibers in automobile industry – a sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 1032-1040, 2007.

ZAMPIROLI, L. Personalização e design são a nova ordem para o setor de rochas ornamentais. **Abirochas em Notícia**, n. 3, p. 21-23, 2015. Disponível em:<http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3619/Abinews_3.pdf>. Acesso em: 6 jun.2015.

ZHANG, H. et al. Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 96, p. 667–675, 2012.

ZHOU, X.P.; LI, X.H. Constitutive relationship of brittle rock subjected to dynamic uniaxial tensile loads with microcrack interaction effects. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 52, p. 140-145, 2009.

ZOU, H. et al. Effect of fiber surface treatments on the properties of short sisal fiber/poly(lactic acid) biocomposites. **Polymer Composites**, v. 33, p. 1659–1666, 2012.