

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

WANA FAVERO GABURO DORIGO

**Versão corrigida**

**Análise integrada de variáveis operacionais e técnicas de impermeabilização  
de rochas ornamentais do tipo quartzito**

São Carlos/SP

2023

WANA FAVERO GABURO DORIGO

**Análise integrada de variáveis operacionais e técnicas de impermeabilização  
de rochas ornamentais do tipo quartzito**

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Arquitetura,  
Urbanismo e Tecnologia

Orientador: Dr. Eduvaldo P. Sichieri

Coorientador: Dr. Leonardo L. Lyrio da  
Silveira

São Carlos/SP

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação  
Biblioteca  
Instituto de Arquitetura E Urbanismo

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D697a Dorigo, Wana Favero Gaburo  
Análise integrada de variáveis operacionais e técnicas de impermeabilização de rochas ornamentais do tipo quartzito / Wana Favero Gaburo Dorigo; orientador Eduvaldo Paulo Sichieri; co-orientador Leonardo Luiz Lyrio da Silveira. -- São Carlos, 2023.  
83 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2023.

1. Rochas Ornamentais. 2. Impermeabilização. 3. Água. 4. Quartzito. 5. Manchamento. I. Sichieri, Eduvaldo Paulo, orient. II. Lyrio da Silveira, Leonardo Luiz, co-orient. III. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:  
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: **Wana Favero Gaburo Dorigo**

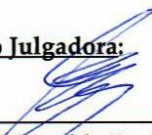
Título da tese: "Análise integrada de variáveis operacionais e técnicas de impermeabilização de rochas ornamentais do tipo quartzito".

Data da defesa: **28/06/2023**

Orientador: Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri

Comissão Julgadora:


Resultado:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri**  
(IAU/USP)

Não votante

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Márcio Minto Fabricio**  
(IAU/USP)


APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Bruno Luís Daminelli**  
(IAU/USP)


APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Phillippe Fernandes de Almeida**  
(CETEM)

APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
**Profª Drª Abiliane de Andrade Pazeto**  
(Decolores)

APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rondinelli Moulin Lima**  
(CETEM)

APROVADA

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. João Marcos de Almeida Lopes.**

DORIGO, W. F. G. **Análise integrada de variáveis operacionais e técnicas de impermeabilização de rochas ornamentais do tipo quartzito.** 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Ana Lucia Gaburo e Geraldo Dorigo (*in memoriam*), com todo meu amor e gratidão. Desejo poder ser merecedora do esforço dedicado por vocês em todos os aspectos da minha vida, especialmente durante a minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grata a Deus que me sustentou em cada etapa deste estudo e não me deixou desanimar principalmente nos momentos de maior dificuldade.

À minha família, agradeço por estarem sempre presentes.

Ao meu coorientador e amigo doutor Leonardo Lyrio (Léo), sou grata pela amizade e pelos anos de pesquisa juntos, que se estendeu da graduação ao doutorado. Você tem papel fundamental na minha formação.

Ao meu orientador e professor doutor Eduvaldo Sichieri (Du), obrigada por me receber como orientanda no mestrado. Grata por me acompanhar e orientar, sempre solícito em todas as demandas que tive no decorrer da pesquisa.

À empresa Innovare Chemicals, na pessoa de seu diretor Marciano Castro, que apoiou financeiramente este estudo. Agradeço também pela oportunidade profissional que me foi concedida concomitante à realização desta pesquisa.

Aos técnicos do CETEM (Cachoeiro de Itapemirim-ES): Jefferson, Milena e Elton por me auxiliarem na parte metodológica deste estudo. À geóloga Beatriz Cavalheira pela caracterização petrográfica das rochas. À bolsista de iniciação científica Layla Utsch e aos estagiários Paulo Silas e Gabriel Machado pelo apoio no acompanhamento dos testes de laboratório.

Agradeço a companhia dos amigos que fiz durante os anos que morei em São Carlos que guardarei com muito carinho: Marcos Vinícius (Lacraia), Samille, Ana Carolina, Lorrany e Larissa. Obrigada pelo tempo juntos.

À minha família e amigos que estiveram comigo neste período.

“O homem não pode fazer-se sem sofrer, pois, é, ao mesmo tempo, o mármore e o escultor”. (Alexis Carrel)



## RESUMO

DORIGO, W. F. G. **Análise integrada de variáveis operacionais e técnicas de impermeabilização de rochas ornamentais do tipo quartzito.** 2023. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

As rochas ornamentais são materiais naturais de alto valor agregado, amplamente utilizadas no setor da construção civil e arquitetura como elementos de composição arquitetônica, estrutural e de decoração, aplicadas no revestimento de pisos, paredes, bancadas e outros acabamentos. A impermeabilização é um processo novo para a cadeia produtiva do setor e contribui para reduzir a incidência de manchas e aumentar a vida útil e a durabilidade das rochas frente às solicitações de uso. O objetivo desta pesquisa é duplo. Primeiramente, visa-se realizar um estudo aprofundado sobre o consumo hídrico na etapa de polimento das rochas ornamentais. Em segundo lugar, almeja-se desenvolver e propor uma nova técnica de impermeabilização para as rochas ornamentais do tipo quartzito. Ambos os objetivos têm como finalidade principal promover a sustentabilidade na etapa de industrialização desses materiais, ao mesmo tempo em que contribuem para estender a vida útil dessas superfícies quando aplicadas em projetos de arquitetura e construção civil. Quanto aos materiais e métodos, foram utilizadas amostras de três tipos de rochas ornamentais brasileiras de ampla aplicação em obras da construção civil para os ensaios de polimento. Os testes de impermeabilização por imersão foram realizados com rochas do tipo quartzito em produtos com propriedades de repelência contra água e óleo (hidro-oleofugantes) e outro com propriedade apenas de repelência contra água (hidrofugante). Sendo assim, foram explorados dois temas referentes à cadeia produtiva das rochas ornamentais, sendo aqui subdivididos em duas fases. Conclui-se que o tema deste estudo é um assunto que está em sinergia com as demandas atuais do setor, visto que a inovação gerada nesta pesquisa vem servindo como base para um trabalho que está sendo realizado nas indústrias do setor de rochas ornamentais, no desenvolvimento de um equipamento em escala industrial para a impermeabilização das chapas, contribuindo para uma maior proteção da rocha, aumentando assim a vida útil destas superfícies.

Palavras-chave: Rochas ornamentais. Água. Quartzito. Impermeabilização. Manchamento.

## ABSTRACT

DORIGO, W. F. G. **Integrated analysis of operational variables and waterproofing techniques of quartzite dimension stones**. 2023. Thesis (Doctorate in Architecture, Urbanism and Technology) – Institute of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Paulo, 2023.

Dimension stones are natural materials of high added value, widely used in the civil construction and architecture sector as elements of architectural, structural and decorative composition, applied in the coating of floors, walls, countertops and other finishes. Waterproofing is a new process for the sector's production chain and contributes to reducing the incidence of stains and increasing the useful life and durability of rocks in the face of requests for use. The objective of this research is twofold. Firstly, the aim is to carry out an in-depth study on water consumption in the ornamental stone polishing stage, with a specific focus on the type of quartzite. Secondly, the aim is to develop and propose a new waterproofing technique for quartzite dimension stones. Both objectives have the main purpose of promoting sustainability in the industrialization stage of these materials, at the same time that they contribute to extending the useful life of these surfaces when applied in architecture and civil construction projects. As for materials and methods, samples of three types of Brazilian ornamental rocks of wide application were used for the polishing tests. Immersion waterproofing tests were carried out with quartzite-type rocks in products with repellent properties against water and oil (hydro-oleophobic) and another with only repellent properties against water (water repellent). Thus, two themes related to the production chain of dimension stones were explored, being subdivided into two phases. It is concluded that the theme of this study is a subject that is in synergy with the current demands of the sector, since the innovation generated in this research has been serving as a basis for a work that is being carried out in the industries of the dimension stone sector, in the development of equipment on an industrial scale for waterproofing the sheets, contributing to greater protection of the rock, thus increasing the useful life of these surfaces.

Keywords: Dimension stones. Water. Quartzite. Waterproofing. Staining.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação dos estados brasileiros na exportação de rochas ornamentais .....	18
Figura 2 - Chapa de quartzito “Mont Blanc” polido .....	19
Figura 3 - (A) granito Branco Dallas e (B) granito Verde Pérola.....	23
Figura 4 - (A) Mármore Pinta Verde e (B) mármore Branco Rajado.....	24
Figura 5 - (A) Quartzito Mont Blanc e (B) quartzito Meridian.....	24
Figura 6 - (A) Pegmatito Patagônia e (B) pegmatito Olympus White .....	25
Figura 7 - Cadeia produtiva e principais produtos .....	26
Figura 8 -Tear multifio serrando bloco de rocha e chapas serradas .....	27
Figura 9 - Polimento de chapa de rocha ornamental.....	27
Figura 10 - (A) Cabeçote de polimento e (B) cabeçotes de polimento mostrando suas saídas d’água acionadas.....	28
Figura 11 - Fluxograma das etapas de produção das rochas ornamentais.....	30
Figura 12 - Chapa de rocha ornamental com manchas de oxidações em destaque.	31
Figura 13 - Rocha com oxidação antes do tratamento com solução ácida e depois do tratamento .....	31
Figura 14 - Aplicação de ácido na superfície de chapas de quartzito na técnica convencional .....	32
Figura 15 - Tanque de ácido instalado em indústria de beneficiamento para remoção de oxidação de chapas de rochas ornamentais .....	32
Figura 16 - Chapa de quartzito branco apresentando mancha por absorção de água na parte central .....	34
Figura 17 - Fachada de prédio revestido em rocha ornamental evidenciando manchamento causado pela absorção de água.....	34
Figura 18 - Aplicação de impermeabilizantes em chapas de rochas ornamentais ....	36
Figura 19 - Rochas utilizadas na primeira etapa do estudo. A) Cinza Corumbá, B) Branco Dallas, C) Preto São Gabriel.....	38
Figura 20 - A) Amostra do Quartzito “QZ <sub>1</sub> ” e B) Imagem de microscopia em lâmina	40
Figura 21 - A) Amostra do quartzito “QZ <sub>2</sub> ” e B) imagem de microscopia em lâmina	40
Figura 22 - A) Amostra do quartzito “QZ <sub>3</sub> ” e B) imagem de microscopia em lâmina.	41
Figura 23 - (A) Equipamento S-PRO e (B) ladrilho sendo inserido no S-PRO .....	42

Figura 24 - A) Rebolos abrasivos do tipo magnesiano e B) rebolos abrasivos do tipo resinoides.....	43
Figura 25 - Medidor de brilho Gardner .....	43
Figura 26 - Medidor de vazão d'água.....	43
Figura 27 - A) Desenho digital da câmara fechada e B aberta, e C e D do equipamento real .....	44
Figura 28 - Câmara de impermeabilização evidenciando suas características técnicas .....	45
Figura 29 - Etapas metodológicas percorridas na Fase 1 .....	47
Figura 30 - A) Acompanhamento do processo de polimento do Cinza Corumbá e B) medição de brilho na chapa polida na indústria .....	48
Figura 31 - Polimento de chapas da rocha “Branco Dallas” em politriz automática na indústria.....	48
Figura 32 - A) Ladrilho mostrando as regiões melhor polidas no S-PRO (em vermelho), bem como o local escolhido para as medições de brilho (em verde) e B) Molde delimitando o espaço para as medições de brilho.....	50
Figura 33 - Medição do brilho no ladrilho da rocha “Branco Dallas” .....	50
Figura 34 - (A) Corte de chapa de quartzito e (B) corte de chapa para obtenção das amostras.....	52
Figura 35 - (A) Secagem das amostras em estufa (B) submersão para medir o peso saturado e (C) pesagem das amostras em balança de precisão .....	53
Figura 36 - (A) Adição do impermeabilizante na câmara, (B) amostras submersas antes da aplicação do vácuo e (C) quebra da amostra após a cura para verificar a penetrabilidade do impermeabilizante.....	54
Figura 37 - Impermeabilização por submersão sob pressão atmosférica dos quartzitos utilizados nesta pesquisa .....	55
Figura 38 - (A) mostra a adição do impermeabilizante na câmara (B) as amostras sendo colocadas no interior do equipamento e (C) as amostras submersas .....	56
Figura 39 - A) Amostras curando após imersão na câmara e B) quebra das amostras após a cura.....	56
Figura 40 - Impermeabilização das amostras utilizadas nos testes de índices físicos .....	57
Figura 41 - Resultados de brilho obtidos para a rocha Branco Dallas no tempo de polimento de 8 segundos .....	58

Figura 42 - Resultados de brilhos obtidos para a rocha Branco Dallas no tempo de polimento de 10 segundos, comparando com o polimento realizado na indústria ....	59
Figura 43 - Resultados de brilhos obtidos para a rocha Cinza Corumbá no tempo de polimento de 8 segundos .....	60
Figura 44 - Resultados de brilho obtidos para a rocha Cinza Corumbá no tempo de polimento de 10 segundos .....	61
Figura 45 - Resultados de brilho obtidos para a rocha Preto São Gabriel no tempo de polimento de 8 segundos .....	62
Figura 46 - Resultados de brilhos obtidos para a rocha Preto São Gabriel no tempo de polimento de 10 segundos .....	63
Figura 47 - Comparação dos índices físicos médios para a porosidade aparente antes e após o processo de impermeabilização por submersão para os três quartzitos ....	66
Figura 48 - Comparação dos índices físicos médios para absorção de água antes e após o processo de impermeabilização por submersão para os três quartzitos .....	67
Figura 49 - (A) Quartzito QZ <sub>2</sub> impermeabilizado sob pressão por 3 horas, (B) quartzito QZ <sub>1</sub> impermeabilizado sob pressão por 6 horas e quartzito QZ <sub>1</sub> impermeabilizado sob pressão durante 24 horas de ensaio .....	68
Figura 50 - Amostras dos quartzitos QZ <sub>1</sub> , QZ <sub>2</sub> e QZ <sub>3</sub> após 30 minutos submersos em hidrofugante .....	69
Figura 51 - Amostras quebradas após 30 dias de teste de submersão em hidrofugante durante 1 hora .....	69
Figura 52- Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 1 hora sob pressão .....	70
Figura 53 - Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 3 horas sob pressão .....	71
Figura 54 - Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 6 horas sob pressão .....	72
Figura 55 - Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 12 horas sob pressão .....	72
Figura 56 - A) Quartzito QZ <sub>1</sub> impermeabilizado sob a técnica convencional e B) amostra quebrada após 30 dias de cura .....	73
Figura 57 - A) Quartzito QZ <sub>2</sub> impermeabilizado sob a técnica convencional e B) amostra quebrada após 30 dias de cura .....	73

Figura 58 - A) Quartzito QZ<sub>3</sub> impermeabilizado sob a técnica convencional e B) amostra quebrada após 30 dias de cura .....74

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
2.1 HIPÓTESE.....	17
2.2 OBJETIVOS.....	17
2.2.1 Geral .....	17
2.2.2 Específicos .....	17
<b>2 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>18</b>
2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS .....	18
2.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS .....	20
2.2.1 Análise petrográfica (ABNT NBR 15845 – Parte 1).....	20
2.2.2 Índices Físicos: Determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água (ABNT NBR 15845 – Parte 2).....	20
2.3 PRINCIPAIS GRUPOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	21
2.3.1 Granitos.....	22
2.3.2 Mármorees .....	23
2.3.3 Quartzitos .....	24
2.3.4 Pegmatitos .....	25
2.4 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS .....	25
2.4.1 Beneficiamento primário: serragem dos blocos em chapas .....	26
2.4.2 Beneficiamento secundário: polimento das chapas .....	27
2.4.3 Tratamento das chapas de rochas ornamentais .....	30
2.4.3.1 Aplicação de ácido para remoção de oxidação .....	31
2.4.4 Impermeabilização das rochas ornamentais .....	33
<b>3 MATERIAS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
3.1 MATERIAIS .....	38
3.1.1 Rochas Ornamentais – Fase 1.....	38
3.1.2 Rochas Ornamentais – Fase 2.....	39
3.1.3 Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO).....	41
3.1.4 Abrasivos de polimento .....	42
3.1.5 Medidor de brilho.....	43

3.1.6 Medidor de vazão de água.....	43
3.1.7 Câmara de impermeabilização.....	44
3.1.8 Produtos químicos impermeabilizantes.....	45
3.2 MÉTODOS.....	46
3.2.1 Fase 1: Redução da vazão de água no polimento das rochas ornamentais .....	47
3.2.1.1 Testes no Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais .....	50
3.2.2 Fase 2: Otimização do processo de impermeabilização das rochas.....	51
3.2.2.1 Ensaios de caracterização das rochas ornamentais.....	52
3.2.2.2 Análise Petrográfica.....	53
3.2.2.3 Determinação dos Índices Físicos .....	53
3.2.2.4 Testes de impermeabilização por submersão na câmara .....	54
3.2.2.6 Impermeabilização convencional.....	57
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
4.1 FASE 1: ENSAIOS DE POLIMENTO NO S-PRO .....	58
4.1.1 Rocha “Branco Dallas” .....	58
4.1.2 Rocha “Cinza Corumbá”.....	60
4.1.3 Rocha Preto São Gabriel .....	62
4.2 FASE 2: IMPERMEABILIZAÇÃO POR SUBMERSÃO E PRESSÃO .....	65
4.2.1 Análise petrográfica dos quartzitos .....	65
4.2.2 Índices Físicos .....	65
4.2.3 Impermeabilização por submersão .....	67
4.2.4 Resultados para Sequência 1 .....	68
4.2.5 Resultados para Sequência 2 de impermeabilização.....	68
4.2.6 Resultados para a sequência 3 de impermeabilização .....	70
4.2.7 Resultados impermeabilização utilizando a técnica convencional .....	73
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais são materiais naturais de revestimento utilizados em obras da arquitetura e construção civil como revestimento e ornamentação nas edificações, sendo amplamente aplicadas em bancadas, pisos, paredes além de outros acabamentos. Estes materiais fazem parte do grupo das rochas e minerais industriais sendo o Brasil o quinto maior produtor e exportador de rochas ornamentais do mundo e o Espírito Santo o maior estado produtor e exportador destes materiais, que tem como destino principal o setor da construção civil. Dentre os tipos de rochas mais produzidos e comercializados, estão os materiais de tons claros como os quartzitos, sendo este tipo de rocha o de maior valor comercial dentre os materiais naturais atualmente exportadas (ABIROCHAS, 2022).

A cadeia produtiva das rochas ornamentais é ampla e ocorre em subseqüentes etapas que tem início com o processo de lavra para extração dos blocos de rochas nas jazidas que posteriormente são levados até as indústrias de beneficiamento para serem transformados em chapas acabadas, através de subseqüentes etapas de serragem, polimento e lustro. Este processo é complexo e envolve insumos específicos, como fio diamantado e abrasivos para serragem do bloco de rocha e polimento das chapas, bem como produtos químicos como resinas para estruturação da rocha e impermeabilizantes para a proteção das superfícies contra a absorção de líquidos. Além dos insumos, a água é um recurso indispensável no processo de beneficiamento das rochas ornamentais, sendo utilizada com função de limpeza e arrefecimento ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a fase de extração dos blocos nas pedreiras e ao longo das etapas de serragem e polimento das chapas. No que diz respeito a etapa de polimento das rochas, ressalta-se que a vazão de água é um parâmetro que não é comumente alterado de acordo com o tipo de rocha a ser polida e nem com a evolução das etapas de polimento, visto que a fase inicial do processo demanda um desbaste mais severo da superfície do que as etapas finais, e, por isso, demanda um volume maior de água do que a fase final do polimento. Tal fato pode implicar em gastos desnecessários deste recurso natural ao longo desta etapa do processo.

A utilização de produtos químicos hidrofugantes e hidro óleo repelentes para impermeabilizar as superfícies das rochas ornamentais é um processo atual que vem sendo adotado por indústrias do setor, sendo indispensável para minimizar a absorção

de líquidos e assim evitar a incidência de manchas nas superfícies destes materiais. Ao passo que novos tipos de rochas de tonalidades claras e de alto valor agregado adentram o mercado, questões relacionadas a alterações cromáticas e manchamentos destas superfícies são problemas recorrentes para o setor. Com isso, as indústrias de beneficiamento estão frente à necessidade de apresentar materiais mais bem protegidos a seus clientes, com maior resistência a absorção de líquidos e alteração da cor natural, além de maior durabilidade contra a degradação. A partir disso, este estudo propõe um novo procedimento metodológico para aplicação de produtos químicos impermeabilizantes nas chapas de rochas ornamentais visando maior otimização e qualidade para este processo, aumentando assim a segurança dos arquitetos ao especificarem as rochas naturais em seus projetos. De acordo com a análise sobre o ciclo de vida realizado por Bianco (2017), as rochas ornamentais quando são corretamente especificadas e estão devidamente impermeabilizadas, sua durabilidade é maior do que boa parte dos materiais de construção.

Dado tais fatores, percebe-se a necessidade de um melhor entendimento sobre a cadeia produtiva das rochas ornamentais, tanto do ponto de vista ambiental como industrial, visando maior sustentabilidade para o processo industrial, bem como buscando melhorias no que tange o processo de impermeabilização para proteção contra manchas. Além disso, no que tange a utilização da água no polimento das chapas, busca-se por um processo mais otimizado, visando práticas mais sustentáveis para o setor, mantendo a qualidade do polimento das superfícies. Indústrias de processamento de rochas ornamentais mais ecoeficientes são mais capazes de ocupar espaço no mercado da construção civil ao produzirem materiais que estejam em consonância com o desenvolvimento sustentável.

Este estudo é o produto de uma pesquisa que teve início no mestrado e que devido a evolução do tema foi proposta a mudança de nível para o doutorado. Sendo assim, diante dos aspectos acima abordados, a tese discutirá sobre dois assuntos relativos à cadeia produtiva das rochas ornamentais, sendo o primeiro deles sobre o consumo hídrico na etapa de polimento das placas de rochas, e, acompanhando a cadeia produtiva até o fim, abordará também sobre a eficiência das técnicas de impermeabilização convencionais utilizadas pelo setor, principalmente para o tratamento de rochas do tipo quartzitos.

## 2.1 HIPÓTESE

Esta pesquisa vai tratar de duas hipóteses relativas à cadeia produtiva das rochas ornamentais de revestimento, a saber:

Hipótese 1: A redução da vazão de água durante a fase de polimento das chapas de rochas ornamentais pode proporcionar melhor qualidade de brilho e maior sustentabilidade ao processo.

Hipótese 2: A técnica convencional para aplicação de produtos impermeabilizantes nas superfícies das chapas de rochas ornamentais não tem sido suficiente para a proteção destes materiais, visto que problemas relacionados a manchas são recorrentes no setor. Utilizar da imersão para total impregnação do substrato da rocha pode ser uma alternativa para otimizar este processo.

## 2.2 OBJETIVOS

### 2.2.1 Geral

O objetivo desta pesquisa é duplo. Primeiramente, visa-se realizar um estudo sobre o consumo hídrico na etapa de polimento de rochas ornamentais amplamente comercializadas pelo setor. Em segundo lugar, almeja-se desenvolver e propor uma nova técnica de impermeabilização para as rochas ornamentais do tipo quartzito. Ambos os objetivos têm como finalidade principal promover a sustentabilidade na etapa de industrialização desses materiais, ao mesmo tempo em que contribuem para estender a vida útil dessas superfícies quando aplicadas em projetos de arquitetura e construção civil.

### 2.2.2 Específicos

Realizar o polimento de três tipos de rochas ornamentais brasileiras de uso consagrado na construção civil, sob reduzidas vazões de água;

Comparar a qualidade do polimento para cada situação operacional através de medições de brilho;

Realizar a impermeabilização de três rochas ornamentais do tipo quartzito através de imersão sob diferentes intervalos de tempo;

Avaliar os índices físicos dos quartzitos antes e após impermeabilização sob a nova técnica proposta;

Comparar a penetrabilidade do impermeabilizante nos quartzitos ao utilizar a técnica convencional e a impermeabilização na câmara;

Propor uma definição das condições de pressão e tempo que resultem na melhor situação de impermeabilização.

## 2 DESENVOLVIMENTO

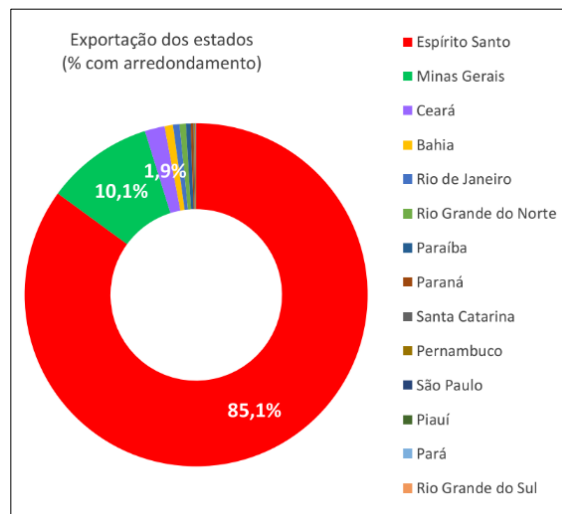
Para uma melhor compreensão, neste capítulo será apresentado o embasamento teórico referente aos principais conteúdos explorados nesse trabalho. Os temas abordados referem-se à conceituação, caracterização tecnológica e o processo de beneficiamento das rochas ornamentais.

### 2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais, também conhecidas como “mármore e granitos” no sentido amplo, são materiais naturais extraídos de jazidas e posteriormente beneficiados por meio de etapas sucessivas de serragem, polimento e tratamento. Depois de passar por todos os procedimentos elas são especificadas por arquitetos, como revestimento e ornamentação em obras da construção civil, sendo amplamente aplicadas em bancadas, pisos, paredes, fachadas e outras aplicações.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2015), define as rochas ornamentais como materiais rochosos naturais, que ao serem submetidos a diferentes processos de beneficiamento e acabamento, são utilizados com função estética nas edificações. As rochas ornamentais de revestimento são parte do setor mineral, estando classificadas no grupo das “rochas e minerais industriais”. O Brasil é o quinto maior produtor e exportador de rochas ornamentais do mundo e o estado do Espírito Santo o maior produtor do país, seguido dos estados de Minas Gerais e Ceará (CENTROROCHAS, 2022). O gráfico da Figura 1 mostra a participação dos estados brasileiros nas exportações das rochas ornamentais.

Figura 1 - Participação dos estados brasileiros na exportação de rochas ornamentais



Fonte: CENTROROCHAS (2022).

Os quartzitos brasileiros são rochas ornamentais mais valorizadas dentre os materiais produzidos no país, dada sua beleza e durabilidade, sendo comumente comercializadas como “*rochas com a beleza do mármore e dureza do granito*”, visto que este é um tipo de rocha de alta dureza e aparência que muitas vezes se assemelham aos mármore. A Figura 2 mostra uma chapa polida do quartzito comercialmente conhecido como “Mont Blanc”.

Figura 2 - Chapa de quartzito “Mont Blanc” polido



Fonte: Autora (2022).

Na especificação das rochas ornamentais como materiais de revestimento, a principal condicionante para a escolha do tipo de rocha a ser utilizado nos projetos é o padrão estético. Para além deste aspecto, as rochas ornamentais apresentam diferentes características físico-mecânicas, sendo imprescindível o real conhecimento destes parâmetros para a indicação correta do tipo de material para cada ambiente. A falta desta informação contribui para que cada vez mais os arquitetos optem por especificar superfícies industrializadas no lugar da rocha ornamental, dado o maior volume de informações existentes para o manuseio e para a especificação daqueles materiais.

Desta forma, sendo a rocha ornamental como um produto natural, é necessário o conhecimento das suas propriedades tecnológicas para a identificação dos índices físicos, mecânicos e químicos de cada material rochoso, visto que sua produção não parte de um sistema industrializado, onde se pode controlar e obter informações exatas sobre o material processado, mas sim proveniente de anos de evolução da

natureza. O desconhecimento das propriedades intrínsecas das rochas bem como seu uso inadequado podem comprometer sua durabilidade e estética, implicando em riscos econômicos e de segurança.

## **2.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS**

As rochas ornamentais possuem feições estruturais (movimentos), texturas (tamanho e arranjo dos cristais), bem como padrões cromáticos (mineralogia e composição química) distintos que variam de acordo com seu ambiente geológico de formação. A caracterização tecnológica de uma rocha ornamental constitui uma etapa fundamental para especificação e aplicação correta de determinada rocha ornamental em obras da construção civil, pois leva em consideração os parâmetros físicos, mecânicos e químico-mineralógicos para cada tipo de rocha. Esta etapa está atrelada a fase de pesquisa mineral e tem como objetivo orientar o tipo de aplicação que aquela rocha pode estar inserida, observando para além das suas características estéticas, mas analisando também as suas propriedades físico-mecânicas.

A norma brasileira ABNT NBR 15845 de 2015 determina sete ensaios principais e uma análise que devem ser realizados e analisados para indicação da rocha ornamental ideal para cada especificação de revestimento. Neste estudo serão apresentados a análise petrográfica e índices físicos:

### *2.2.1 Análise petrográfica (ABNT NBR 15845 – Parte 1)*

A análise petrográfica implica em observações macroscópicas e microscópicas de lâminas e amostras que são realizadas em laboratório especializado. Neste ensaio identifica-se a composição mineralógica da rocha em porcentagem de minerais, bem como sua coloração, textura, estrutura e granulação.

### *2.2.2 Índices Físicos: Determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água (ABNT NBR 15845 – Parte 2)*

A determinação dos índices físicos permite avaliar as propriedades de densidade aparente ( $\text{kg/m}^3$ ), porosidade aparente (%) e absorção d'água (%). A porosidade aparente indica a porcentagem de espaços vazios em determinado volume de rocha e a absorção de água indica a porcentagem de espaços vazios (poros ou cavidades) que estão interligados para um mesmo volume de material. A densidade aparente e a porosidade fornecem informações indiretas sobre a

resistência físico-mecânica da rocha, mediante a esforços de compressão e flexão, e a absorção d'água, por sua vez, indica a capacidade de infiltração de líquidos na rocha, e, por consequência, a probabilidade de ocorrer manchamentos.

Os índices físicos são calculados de acordo com as seguintes equações:

- A. Densidade aparente ( $\rho_a$ ): Expressa a relação entre a massa e o volume aparente da rocha, sendo medido em  $\text{Kg/m}^3$ .

$$\rho_a = \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{sat}} - M_{\text{sub}}} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$\rho_a$  = Densidade aparente ( $\text{kg/m}^3$ );

$M_{\text{sec}}$  = Massa seca (g);

$M_{\text{sat}}$  = Massa saturada (g),

$M_{\text{sub}}$  = Massa submersa (g).

- B. Porosidade Aparente ( $\eta_a$ ): Expressa a relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra, determinada pela razão entre a massa seca e a massa saturada em água, sendo medido em porcentagem.

$$\eta_a = \frac{(M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{sat}} - M_{\text{sub}})} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

- A) Absorção de Água ( $\alpha_a$ ): Este parâmetro é considerado como o valor numérico que reflete a capacidade de incorporação de água na amostra.

$$\alpha_a = \frac{(M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}})}{M_{\text{sec}}} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

### 2.3 PRINCIPAIS GRUPOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais são convencionalmente e comercialmente conhecidas como *mármore*s e *granitos*, apesar de possuírem definições geológicas que vão além da sua definição *stricto sensu*. Do ponto de vista geológico, as rochas ornamentais

são enquadradas em três grandes grupos, que são assim subdividas de acordo com o seu ambiente geológico de formação, sendo eles os grupos das rochas ígneas, rochas sedimentares e rochas metamórficas.

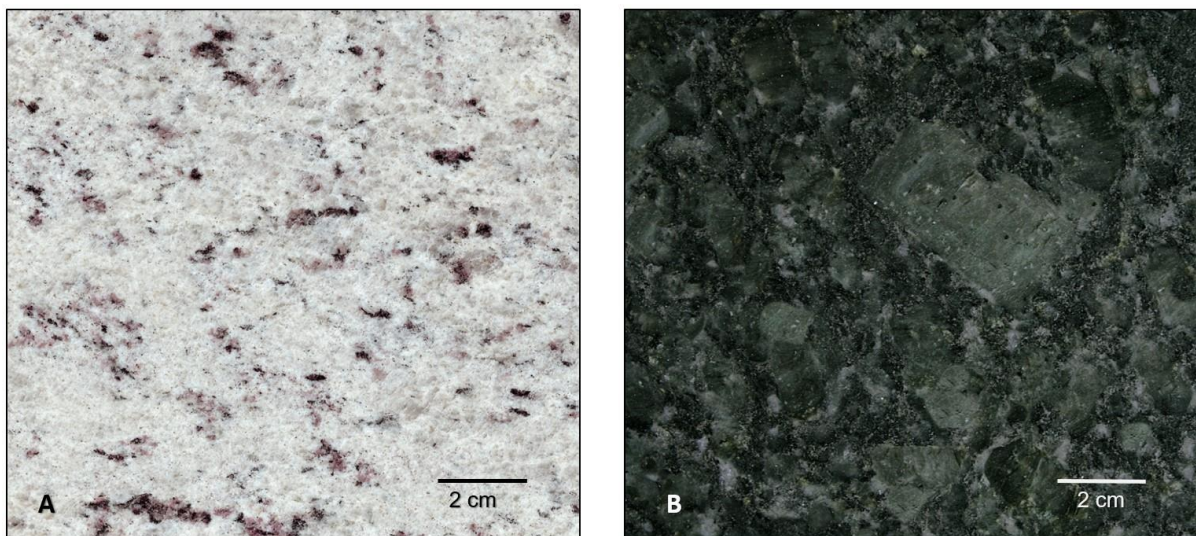
As rochas ígneas (ou magmáticas) são aquelas formadas a partir da solidificação do magma em diferentes profundidades da crosta terrestre, as rochas sedimentares formam-se a partir da desagregação e erosão de rochas preexistentes que são transportadas e acumuladas em bacias de deposição em ambientes subaquáticos (fluviais, lacustres e marinhos) e eólicos (subaéreos). Rochas metamórficas são formadas pela transformação (metamorfismo) de outras rochas preexistentes, resultado do aumento de pressão e temperatura na crosta terrestre (JERRAM; PETFORD, 2014). A seguir serão descritos os principais grupos de rochas ornamentais, subdividas a partir da sua classificação comercial. Estas informações foram compiladas da segunda edição do Guia de Aplicação de Rochas em Revestimento, lançado pela ABIROCHAS em 2020.

### 2.3.1 Granitos

O amplo conjunto das rochas silicáticas, com textura granular ou compacta e de estrutura orientada ou não, formadas por associações de quartzo, feldspato, micas, anfibólios e minerais acessórios são denominadas “granitos”. A classificação petrográfica de Streckeisen (1976) subdivide os granitos em monzogranitos ou sienogranitos, em função do teor de feldspatos na sua composição. São considerados granitos, além do *stricto sensu*, os sienitos, charnockitos, dioritos, gabros, basaltos e gnaisses (ABNT, 2015). São os tipos de rochas mais especificados para utilização no setor da construção civil visto que são materiais de alta resistência mecânica e boa resistência ao desgaste abrasivo. A Figura 3 (A) ilustra o granito comercialmente conhecido como Branco Dallas e a Figura 3 (B) o granito comercialmente conhecido como Verde Pérola.



Figura 3 - (A) granito Branco Dallas e (B) granito Verde Pérola.

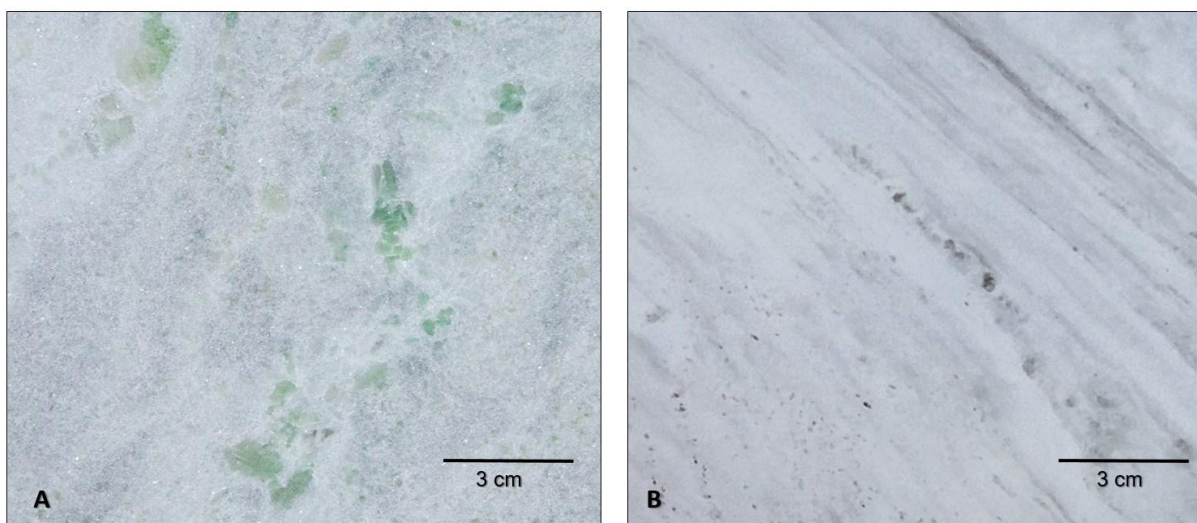


Fonte: Autora (2022).

### 2.3.2 Mármore

Comercialmente, o termo “mármore” abrange todas as rochas carbonáticas, que podem ter origem tanto metamórfica quanto sedimentar. São provenientes da modificação físico-química do calcário a altas temperaturas e pressão, e são constituídas essencialmente por minerais de calcita ou dolomita. São rochas essencialmente de coloração branca e podem ter variações cromáticas em função da presença de minerais acessórios. Devido a sua composição mineralógica ser principalmente carbonatos, minerais de baixa dureza (3 – 3,5, na escala de Mohs), são menos resistentes à abrasão do que os granitos, podendo ser riscados com maior facilidade (DE OLIVEIRA MENEZES, 2013). A Figura 4 (A) ilustra o mármore comercialmente conhecido como Pinta Verde e a Figura 4 (B) o mármore comercialmente conhecido como Branco Rajado.

Figura 4 - (A) Mármore Pinta Verde e (B) mármore Branco Rajado.

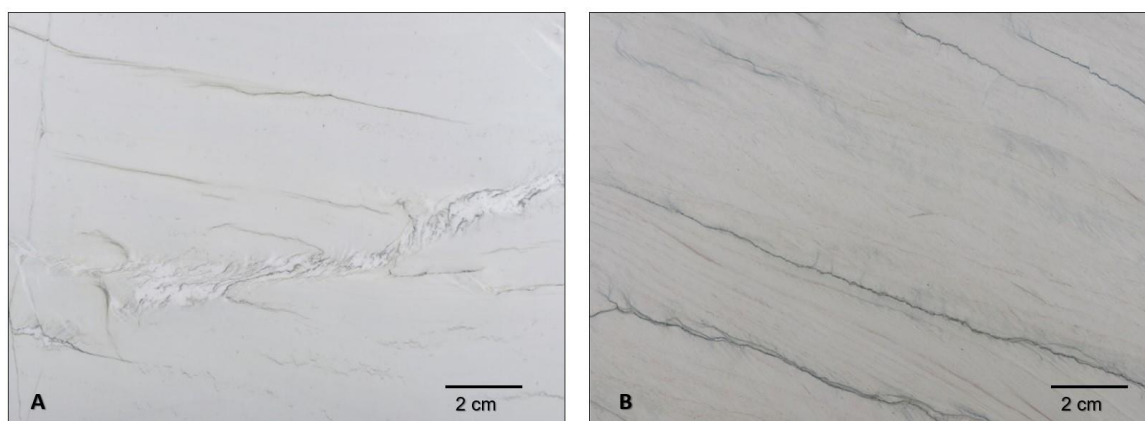


Fonte: Autora (2022).

### 2.3.3 Quartzitos

As rochas do tipo quartzito são compostas essencialmente por minerais de quartzo que passaram pelo processo de metamorfismo, sendo os padrões cromáticos deste tipo rocha definidos pela presença dos minerais acessórios na sua formação. Os quartzitos possuem aparência semelhante às rochas carbonáticas, porém suas características físico-mecânicas e composição mineralógica diferem totalmente destas, visto que os quartzitos são rochas mais resistentes à abrasão e ao ataque de produtos quimicamente reativos (DA SILVA, 2014). A feição geológica que marca a estrutura da maioria dos quartzitos são as estruturas geológicas conhecidas como “estratificação cruzada”. A Figura 5 (A) ilustra o quartzito comercialmente conhecido como Mont Blanc e a Figura 5 (B) o quartzito comercialmente conhecido como Meridian.

Figura 5 - (A) Quartzito Mont Blanc e (B) quartzito Meridian

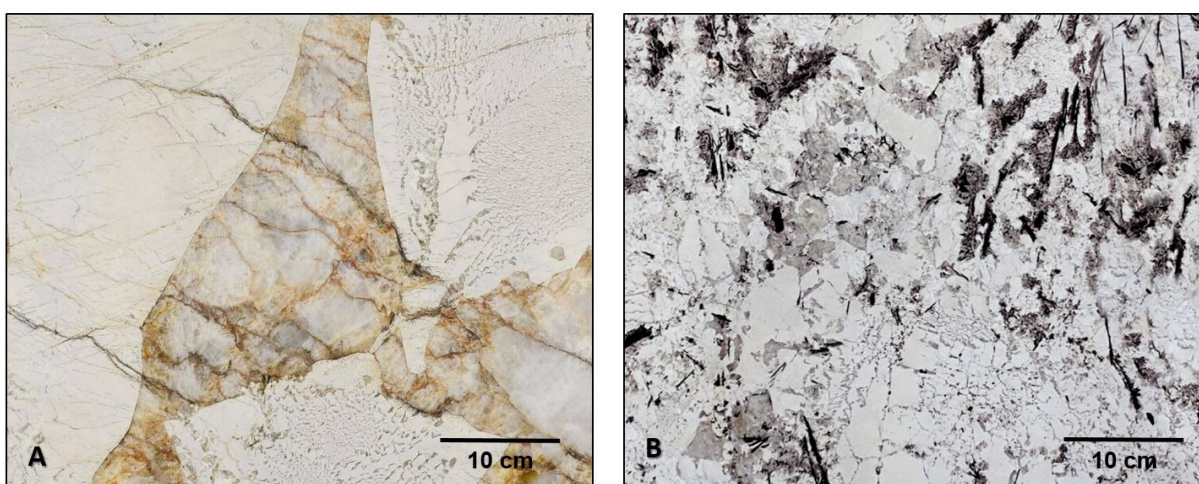


Fonte: Autora (2022).

### 2.3.4 Pegmatitos

Os pegmatitos, também conhecidos como “materiais exóticos” são rochas formadas a partir do estágio final da cristalização de magmas graníticos, e, portanto, possuem composição mineralógica semelhantes a estes, diferindo no tamanho dos seus cristais. As rochas do tipo pegmatito são formadas por cristais gigantes de quartzo, feldspato, micas e anfibólios, que variam desde centímetros até metros, sendo o tamanho destes minerais que determina as características estéticas e propriedades físico-mecânicas destes materiais (PAZETO, 2017). A Figura 6 (A) ilustra o pegmatito comercialmente conhecido como Patagônia e a Figura 6 (B) o pegmatito comercialmente conhecido como Olympus White.

Figura 6 - (A) Pegmatito Patagônia e (B) pegmatito Olympus White



Fonte: Autora (2022).

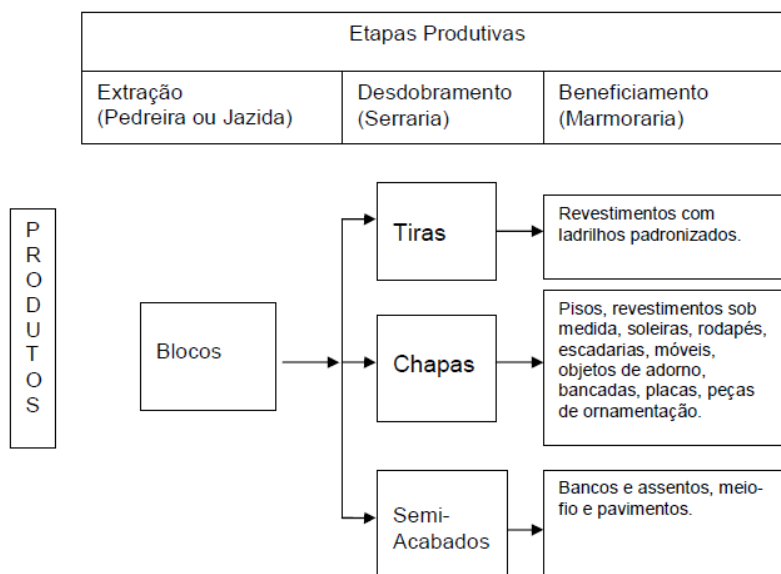
## 2.4 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

A cadeia produtiva das rochas ornamentais tem início com a fase de lavra dos blocos de rochas nas jazidas (ou pedreiras) que, posteriormente, seguem até as indústrias de beneficiamento para passar por sucessivas etapas de serragem e polimento (MORAES, 2022).

Na Figura 7 tem-se o fluxograma das etapas da cadeia produtiva e os principais produtos gerados.



Figura 7 - Cadeia produtiva e principais produtos



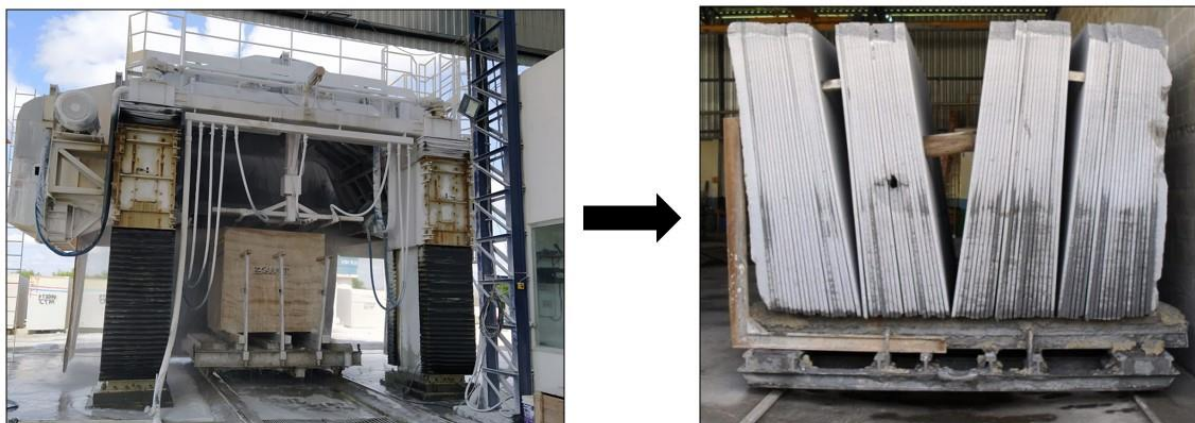
Fonte: Moraes (2022)

A exploração das rochas ornamentais consiste na extração dos blocos de rochas economicamente aproveitáveis dos maciços rochosos ou matacões, sendo o produto final da cadeia produtiva a chapa de rocha polida. Após a fase de lavra, os blocos de rocha são transportados até as indústrias de beneficiamento, onde são submetidos às etapas de beneficiamento primário (serragem) e beneficiamento secundário (polimento) das rochas ornamentais. Este processo tem como objetivo a transformação dos blocos extraídos nas jazidas em produtos finais acabados na forma de chapas (CHIODI FILHO; RODRIGUES, 2020).

#### 2.4.1 Beneficiamento primário: serragem dos blocos em chapas

O beneficiamento primário compreende as etapas iniciais de preparação e serragem (ou desdobramento) dos blocos de rocha vindos das pedreiras, transformando-os em chapas brutas por meio de equipamentos robustos denominados teares (CASTRO et al, 2016). A Figura 8 mostra um bloco de rocha sendo serrado em tear do tipo multifio e, na sequência, as chapas brutas após o processo. Nesta etapa do beneficiamento das rochas ornamentais os principais insumos utilizados são a energia elétrica, água e fio diamantado para o corte da rocha.

Figura 8 -Tear multifio serrando bloco de rocha e chapas serradas

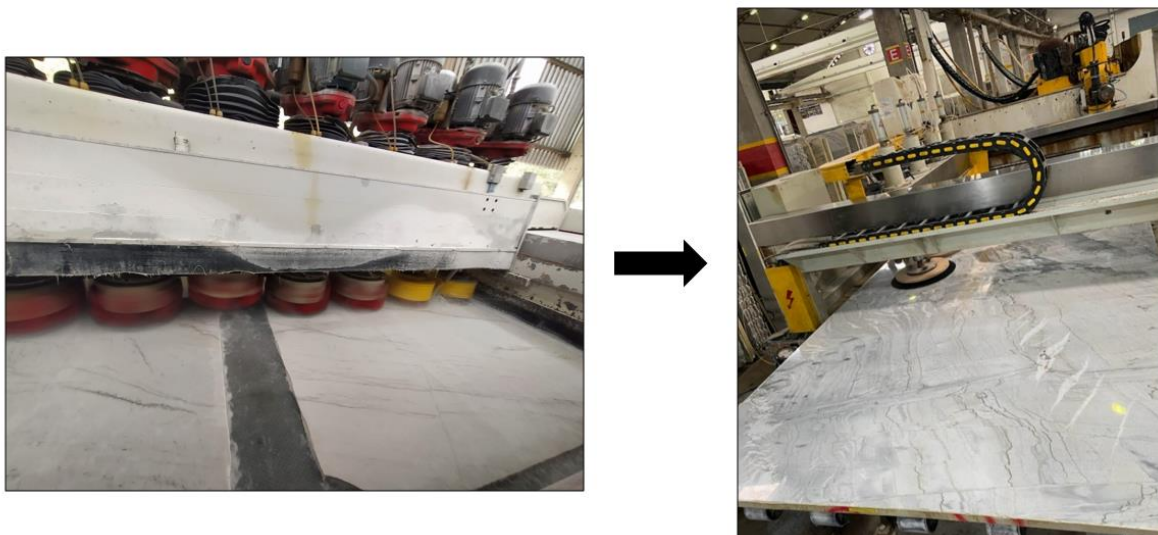


Fonte: Autora (2022).

#### 2.4.2 Beneficiamento secundário: polimento das chapas

A etapa de beneficiamento secundário compreende a fase de polimento das rochas ornamentais, na qual ocorre a transformação das chapas brutas vindas da serrada em superfícies polidas (SILVEIRA et al, 2014). A Figura 9 mostra o processo de polimento de um quartzito e, em sequência, a chapa polida saindo da politriz.

Figura 9 - Polimento de chapa de rocha ornamental



Fonte: Autora (2022).

Este processo ocorre por meio de equipamentos denominados politrizes, que são dotadas de cabeçotes rotativos, também conhecidos por “satélites” (Figura 10A), podendo ter de 8 a 22 cabeçotes de polir por equipamento, como mostrado na Figura 10B.

Figura 10 - (A) Cabeçote de polimento e (B) cabeçotes de polimento mostrando suas saídas d'água acionadas



Fonte: Autora (2022).

Nestes cabeçotes são acoplados rebolos abrasivos em sequência, variando da granulometria mais grossa para a granulometria mais fina, evoluindo de acordo com o polimento, de forma que, ao sair no final da esteira, a chapa de rocha esteja polida. Estima-se que, para cada satélite de polir, utiliza-se, em média, a vazão de água de 25 a 30 litros por minuto, para a refrigeração da superfície e limpeza da chapa ao longo do polimento. Logo, para uma empresa que trabalha em dois turnos de 8 horas, o consumo hídrico pode superar 12 mil m<sup>3</sup>/mês, considerando 22 dias úteis no mês. Destaca-se ainda que o consumo hídrico calculado é relacionado a apenas uma empresa das inúmeras que existem no Brasil, principalmente no estado do Espírito Santo, onde encontra-se o maior polo de beneficiamento de rochas ornamentais do país. Além disso, vale ressaltar que na maioria das vezes as politrizes não possuem seus parâmetros ajustados de acordo com a rocha que está sendo polida, sendo mantida constante a vazão de água durante todo o processo. Isso implica em gastos desnecessários deste recurso e uma provável diminuição da qualidade final do polimento, visto que as ferramentas abrasivas podem sofrer o fenômeno de aquaplanagem e perderem o poder de corte devido ao excesso de água. Assim, embora boa parte desta água seja reaproveitada por filtragem e recirculação, um certo volume é inserido diariamente neste sistema (SILVEIRA et al, 2017).

Para assegurar a qualidade do polimento, a água utilizada para arrefecimento e limpeza da superfície precisa estar completamente limpa. Do contrário, a presença de partículas pode causar imperfeições no polimento, gerando riscos na superfície do

material durante o contato entre o abrasivo e a rocha. Estas imperfeições fazem com que esta chapa retorne ao ciclo do polimento, o que resulta em atrasos na produção.

As sequências granulométricas de abrasivos demandam diferentes quantidades de água durante o processo de polimento. Os primeiros rebolos necessitam de uma quantidade maior de água para realizar seu trabalho, visto que tem a função de desgastar de forma mais severa a superfície para remover as irregularidades oriundas da etapa de serragem. Assim, as primeiras sequências de abrasivos precisam de quantidades maiores de água quando comparados com as últimas granulometrias, visto que estas têm a função apenas de ressaltar o lustro da superfície. No entanto, praticamente todas as empresas que realizam este tipo de processo costumam deixar todas as saídas de alimentação de água em sua vazão máxima (SILVEIRA, 2008).

A partir disso, faz-se necessário a definição de uma vazão ótima de água a ser utilizada tanto com relação ao resfriamento e limpeza da superfície da rocha durante o processo, como também com relação ao desempenho da própria ferramenta abrasiva durante o polimento, implicando assim em diferentes valores finais de brilho após o processo (SILVEIRA et al. 2014). Silveira e Bolonini (2016) submeteram uma rocha ornamental comercialmente conhecida como “Cinza Castelo” a testes de polimento em diferentes situações operacionais, onde foram alteradas as vazões de água em 15 L/min e 30 L/min. Os resultados obtidos mostraram valores de brilho superiores ao da indústria para a vazão de 15L/min no abrasivo de granulometria #1200, mostrando que é possível reduzir a quantidade de água no polimento sem prejuízos na qualidade final de brilho da superfície. Portanto, nota-se que para que este setor industrial possa se desenvolver, o uso do recurso hídrico de forma racional é imprescindível. A Figura 11 resume por meio de um fluxograma as etapas inerentes à cadeia produtiva das rochas ornamentais de revestimento.



Figura 11 - Fluxograma das etapas de produção das rochas ornamentais



Fonte: Autora (2022).

#### 2.4.3 Tratamento das chapas de rochas ornamentais

A etapa de tratamento das rochas ornamentais consiste na fase em que se aplicam produtos químicos como ácidos, resinas e impermeabilizantes com intuito de aumentar a proteção e a durabilidade das rochas ornamentais. Tais processos podem ocorrer com a chapa ainda no seu estado bruto, após a fase de beneficiamento primário, como também após o acabamento final das superfícies (SILVEIRA et al, 2017).



#### 2.4.3.1 Aplicação de ácido para remoção de oxidação

Segundo Mauro (2011), após a serragem dos blocos de rochas, com as chapas ainda no estado bruto, determinados tipos de rochas são submetidos ao tratamento para remoção de oxidação com a aplicação de uma solução ácida, com a finalidade de clarear rocha e remover oxidações naturais inerentes ao próprio substrato rochoso, que é composto por um agregado de minerais que podem conter minerais ferrosos que ao oxidarem provocam manchas amareladas nas rochas (Figura 12).

Figura 12 - Chapa de rocha ornamental com manchas de oxidações em destaque



Fonte: Autora (2022).

A Figura 13 mostra um exemplo de rocha ornamental antes e após o tratamento com a utilização de soluções ácidas.

Figura 13 - Rocha com oxidação antes do tratamento com solução ácida e depois do tratamento



Fonte: Autora (2022).

O método convencional utilizado para aplicar estes tipos de produtos nas superfícies das rochas ornamentais é utilizando um rolo de espuma, conforme mostrado na Figura 14. As chapas de rocha ficam impregnadas na solução ácida durante um período que varia de 12 horas a 24 horas, dependendo do nível da oxidação.

Figura 14 - Aplicação de ácido na superfície de chapas de quartzito na técnica convencional



Fonte: Autor (2022).

Um novo método para aplicação de soluções ácidas para remoção de oxidação em rochas ornamentais vem sendo cada vez mais adotado pela indústria, a fim de agilizar o tempo de tratamento. Esta técnica consiste na imersão de chapas em tanques com a solução (NOVAES; VALE, 2023), conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Tanque de ácido instalado em indústria de beneficiamento para remoção de oxidação de chapas de rochas ornamentais



Fonte: Autora (2021).

Após esta etapa de tratamento para remoção da oxidação, com as chapas de rocha ainda em estado bruto, determinados tipos de materiais com trincas e fissuras são submetidos ao processo de resinagem com utilização de resinas epóxi modificadas para cada tipo de rocha, com a finalidade de proporcionar maior estruturação e resistência a estes materiais. Após a cura da resina, as chapas de rochas são polidas e determinados materiais são submetidos ao processo de impermeabilização (NOVAES; VALE, 2023).

#### 2.4.4 Impermeabilização das rochas ornamentais

O contato das rochas ornamentais com agentes de intemperismo como a chuva e o vento pode contribuir para acelerar os efeitos da deterioração visto que força a passagem de água através dos poros, podendo causar alterações de cor pela água retida ou por processos de lixiviação de outros minerais presentes no substrato rochoso (OLIVEIRA et al, 1998).

A água em contato direto com objetos e superfícies em rochas ornamentais pode causar degradação com efeitos deletérios irreversíveis, como: dissolução química de minerais carbonáticos; cristalização e precipitação de sais nas superfícies; processos físicos relacionados a ciclos de congelamento e degelo; degradação biológica, bem como a ocorrência de manchamentos que alteram o padrão cromático natural das rochas ornamentais.

Problemas de manchamentos são relatados *a posteriori*, quando as chapas já se encontram no país de destino ou já aplicadas nas edificações, o que pode vir a causar prejuízos financeiros, além da perda de credibilidade por parte das empresas que vendem o produto final (ALMEIDA et al., 2021). A Figura 16 mostra uma chapa de quartzito em indústria de beneficiamento apresentando mancha por absorção de água.

Figura 16 - Chapa de quartzito branco apresentando mancha por absorção de água na parte central



Fonte: Autora (2022).

A Figura 17 mostra uma fachada de um prédio na cidade de São Paulo revestido em quartzito azul, apresentando manchamento e alteração da cor natural devido à infiltração de água.

Figura 17 - Fachada de prédio revestido em rocha ornamental evidenciando manchamento causado pela absorção de água



Fonte: Autora (2021).



Raneri et al. (2018) destacam que o maior desafio na proteção das superfícies de rochas ornamentais está em criar uma barreira impermeável contra a penetração de água e líquidos em geral, por ação de substâncias orgânicas e inorgânicas e poluentes que venham a se depositar nesta superfície e alterar o seu padrão cromático. A fim de evitar e minimizar que tais problemas ocorram, é necessário submeter as rochas ornamentais a um processo de impermeabilização com aplicação de produtos hidrofugantes e anti-incrustantes, além de camadas de proteção à base de nanopartículas (CAPPELLETTI et al., 2015; SIERRA-FERNANDEZ et al., 2017).

Ainda sobre os processos de impermeabilizar, hidrofugar ou de hidrorrepelência, os termos se diferem em alguns aspectos. De acordo com a norma NBR 9575/2010, o termo "impermeabilização" refere-se a um conjunto de procedimentos e técnicas realizados durante a construção civil. Isso envolve a aplicação de uma ou mais camadas de materiais com o propósito de salvaguardar os materiais contra os efeitos prejudiciais causados por líquidos, vapores e umidade. No contexto brasileiro, a terminologia específica para o processo de proteção de rochas naturais ainda não está estabelecida, principalmente devido à sua natureza recente no setor. No entanto, no campo da construção civil, o termo "impermeabilização" é empregado para descrever a proteção do substrato, como o contrapiso, contra o fenômeno de umidade ascendente e a presença de impurezas que se originam no solo (RODRIGUES et al., 2016). Essas questões são responsáveis por causar manchas de infiltração nos revestimentos superficiais. Segundo Galan et al. (2001) os produtos impermeabilizantes compõem-se basicamente de hidrocarbonetos alifáticos e metilsiliconatos de potássio.

Para além das características químicas dos impermeabilizantes, a forma como esses produtos são aplicados nas chapas também tem influência direta no seu desempenho quando se trata da qualidade da proteção. Convencionalmente, os impermeabilizantes são aplicados nas chapas de rochas manualmente por meio de rolos ou de desempenadeiras de espuma, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Aplicação de impermeabilizantes em chapas de rochas ornamentais



Fonte: Autora (2022).

A hidrorrepelência é a capacidade de uma superfície rejeitar ou minimizar a absorção de água e outros líquidos. Em rochas ornamentais, essa propriedade é particularmente importante para prevenir a penetração de umidade, minimizando assim o risco de deterioração. Estudos têm demonstrado que a penetração de água em rochas porosas pode resultar em danos físicos e químicos, como a desagregação da matriz mineral e a expansão por congelamento da água presente nos poros. Além disso, a umidade pode favorecer o crescimento de micro-organismos que causam manchas, degradação biológica e alterações estéticas (RICARDO, 2018).

A hidrorrepelência em rochas ornamentais é frequentemente alcançada por meio da aplicação de produtos químicos hidrofugantes. Esses produtos são formulados para interagir com a superfície da rocha, preenchendo os poros e reduzindo sua capacidade de absorção de água. Os agentes hidrofugantes mais comuns incluem siloxanos, silanos e fluoropolímeros. Estudos realizados por Chen et al. (2018) demonstraram que a aplicação de siloxanos em rochas calcárias resultou em uma significativa redução na absorção de água, além de melhorar a resistência à migração de sais solúveis.

Os agentes hidrofugantes são compostos poliméricos, frequentemente à base de silicone. Esses compostos possuem uma estrutura que combina uma matriz inorgânica com grupos apolares, os quais são responsáveis por gerar a capacidade

de repelir a água. De acordo com o estudo realizado por De Ferri et al. (2011), os produtos frequentemente utilizados para criar revestimentos hidrofóbicos incluem formulações à base de substâncias como silicone, acrílico, polímeros fluorados, siloxanos e fluoropoliéteres. Além disso, os pesquisadores também mencionam a utilização de compósitos que incorporam nanopartículas.

Segundo Lettieri et al. (2018), produtos à base de silicone, acrílico e polímeros fluorados com adição de nanopartículas são tipicamente os mais empregados e efetivos na proteção das estruturas revestidas com rochas contra a penetração de água. Para os autores, a boa processabilidade e a estabilidade das ligações de Si – C permitem uma melhor repelência da água na superfície impermeabilizada.

A capacidade da água de interagir com a superfície das rochas é influenciada pela tensão superficial, que varia de acordo com a substância com a qual a água entra em contato. Por conseguinte, a aplicação do hidrofugante resulta na diminuição dessa tensão superficial. O polímero hidrofugante demonstra essa característica devido à sua própria tensão superficial, a qual é cerca de 24 mN/m. Esse valor é menor que a tensão superficial da água, que é 73 mN/m. Portanto, quanto menor for a tensão superficial do hidrofugante, mais significativamente essa tensão será inferior à da água. Isso tem um efeito positivo na proteção da rocha, visto que reduz o ângulo de contato (MARANHÃO; LOH, 2010).

Devido a essa estrutura, os agentes hidrofugantes têm uma energia superficial menor do que a da água, o que resulta em propriedades hidrofóbicas, ou seja, eles tendem a evitar a interação com a água. Isso se traduz em uma característica que faz com que a água forme gotas na superfície em vez de ser absorvida, promovendo a proteção contra a penetração de umidade (RICARDO, 2010).

A eficácia dos produtos hidrofugantes varia de acordo com a composição mineralógica e porosidade da rocha. Rochas de grãos finos, como o mármore, tendem a responder melhor à hidrofugação, enquanto rochas mais porosas, como o granito, podem exigir aplicações repetidas ao longo do tempo devido à reabertura dos poros devido à abrasão natural (LUCHINI et al., 2020).

Novas fórmulas e produtos estão sendo constantemente desenvolvidos e testados nas indústrias com a finalidade de aumentar a proteção das superfícies em rochas. Tais produtos devem apresentar, simultaneamente, propriedades de hidrofobicidade e oleofobicidade para a prevenção de manchas e percolação de líquidos diversos pelas superfícies das rochas ornamentais (RANERI et al., 2018).

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

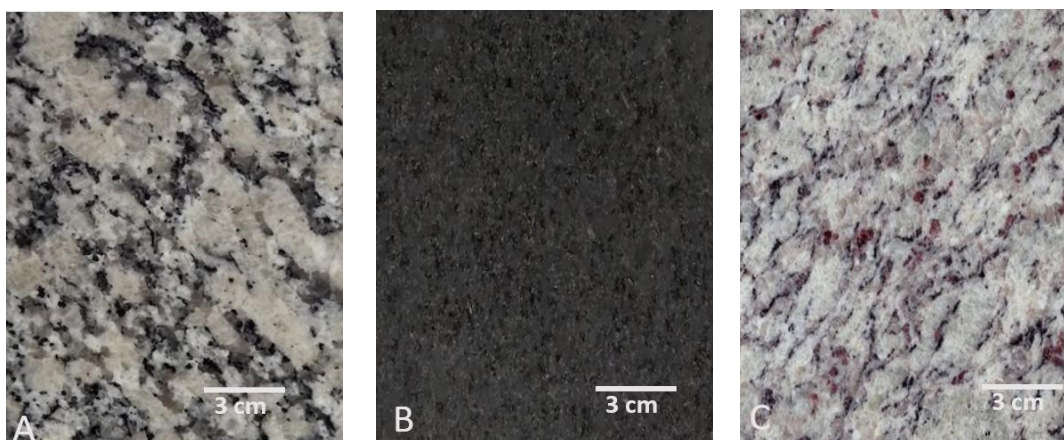
#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Rochas Ornamentais – Fase 1

As rochas ornamentais utilizadas foram doadas por indústrias de beneficiamento localizadas no estado do Espírito Santo.

Para a primeira parte deste estudo na qual foram realizados os ensaios de polimento, foram selecionados três tipos de rochas ornamentais brasileiras de ampla aplicação e consagrado uso em obras da construção civil. Estas rochas são conhecidas comercialmente como *granitos*, e são chamadas de Cinza Corumbá (Figura 19A), Branco Dallas (Figura 19B) e Preto São Gabriel (Figura 19C). Utilizou-se 6 ladrilhos no estado bruto de cada tipo de rocha, com as dimensões de 60 cm por 60 cm por 2 cm, totalizando 18 amostras.

Figura 19 - Rochas utilizadas na primeira etapa do estudo. A) Cinza Corumbá, B) Branco Dallas, C) Preto São Gabriel



Fonte: Autora (2022).

A rocha “Cinza Corumbá” é geologicamente classificada como um monzogranito e possui coloração cinza, com minerais de tamanhos irregulares possíveis de serem observados e textura de média a grossa (2 mm a 20 mm). É composta por 36% de K-feldspato, 20% de quartzo, 25% plagioclásio (oligoclásio), biotita (17%) e 2% minerais acessórios.

O granito “Preto São Gabriel” é classificado geologicamente como um gabronorito e possui cor preta, textura fina e estrutura e compacta, cuja composição



mineralógica é o feldspato do tipo plagioclásio (60%), hiperstênio (15%), biotita (15%), hornblenda (5%), quartzo (5%).

O granito “Branco Dallas” é uma rocha geologicamente classificada como um sienogranito e possui coloração esbranquiçada, granulação grossa e estrutura gnáissica. Possui bandas de minerais de quartzo e feldspato alternadas com bandas de biotita e granada, sobressaindo a presença de granada. A composição mineral desta rocha é o feldspato potássico (37%), o quartzo (26%) e plagioclásio (19%), e os minerais acessórios são granadas (8%), biotita (5%), silimanita (4%) e minerais opacos (1%).

### 3.1.2 Rochas Ornamentais – Fase 2

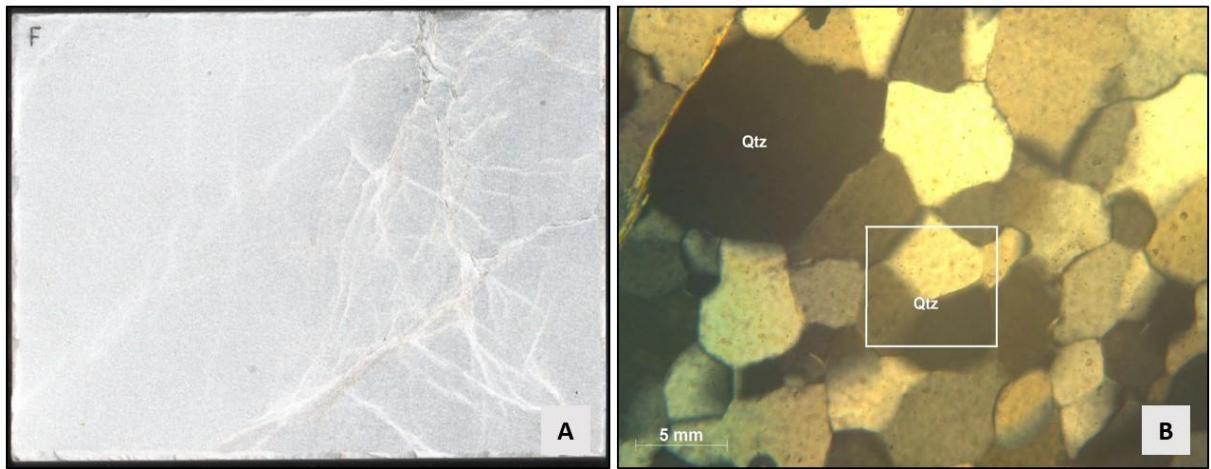
Para a realização dos ensaios de impermeabilização que compõe a segunda parte deste estudo, foram selecionadas três rochas ornamentais do tipo “quartzito”, ambas de coloração clara e consideradas pelo setor de rochas ornamentais como materiais altamente susceptíveis a manchamentos. A comercialização deste tipo de rocha vem crescendo no mercado interno e externo, sendo este um tipo de rocha de elevado valor agregado.

Os três quartzitos selecionados serão aqui nomeados como Quartzito 1 (QZ<sub>1</sub>), Quartzito 2 (QZ<sub>2</sub>) e Quartzito 3 (QZ<sub>3</sub>). As três sequências de ensaios de impermeabilização foram realizadas utilizando o total de 17 amostras dos quartzitos no estado bruto, com as dimensões aproximadas de 10 cm x 15 cm x 3 cm.

#### I. Quartzito “QZ<sub>1</sub>”:

O quartzito “QZ<sub>1</sub>” (Figura 19) é uma rocha metamórfica com arranjo mineral na forma de grãos (textura granoblástica) com cristais de granulação de fina em formas subdiomórficas (algumas faces bem definidas) a xenomórficas (sem faces definidas). É composta principalmente por quartzo que apresenta coloração cinza a esbranquiçada, de granulação variando de 0,5 mm a 1 mm. A rocha apresenta algumas porções alteradas e pequenos veios máficos (de coloração escura) indistinguíveis a olho nu. A Figura 20A mostra uma imagem do quartzito QZ<sub>1</sub> e a Figura 20B a imagem da lâmina em microscópio petrográfico.

Figura 20 - A) Amostra do Quartzito “QZ<sub>1</sub>” e B) Imagem de microscopia em lâmina

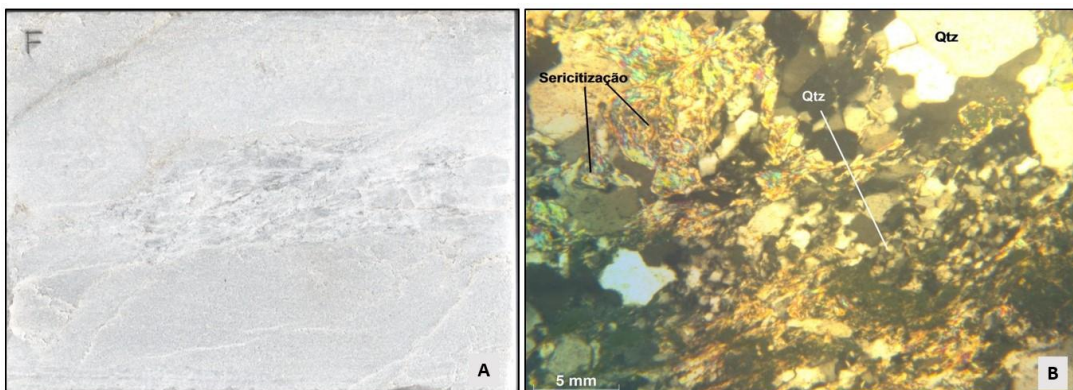


Fonte: Autora (2022).

## II. Quartzito “QZ<sub>2</sub>”:

Este quartzito apresenta textura inequigranular granoblástica com granulação fina a média e grãos hipidiomórficos (algumas faces bem definidas) a xenomórficos (sem faces definidas). Observa-se o processo de sericitização, microfissuramentos sendo alguns preenchidos por óxido e/ou hidróxido de ferro e nas porções mais alteradas subgrãos de quartzo juntamente com a sericitização formam uma lineação incipiente tendo em seu entorno cristais de granulação maior. Em alguns pontos da rocha há um mineral que aparece hexagonal e em processo de alteração entre os grãos de quartzo que apresenta leve pleocroísmo amarelo intenso e birrefringência alta nas cores amarelo/alaranjado e esverdeado. A Figura 21A mostra uma imagem do quartzito QZ<sub>2</sub> e a Figura 21B a análise da lâmina em microscópio petrográfico.

Figura 21 - A) Amostra do quartzito “QZ<sub>2</sub>” e B) imagem de microscopia em lâmina



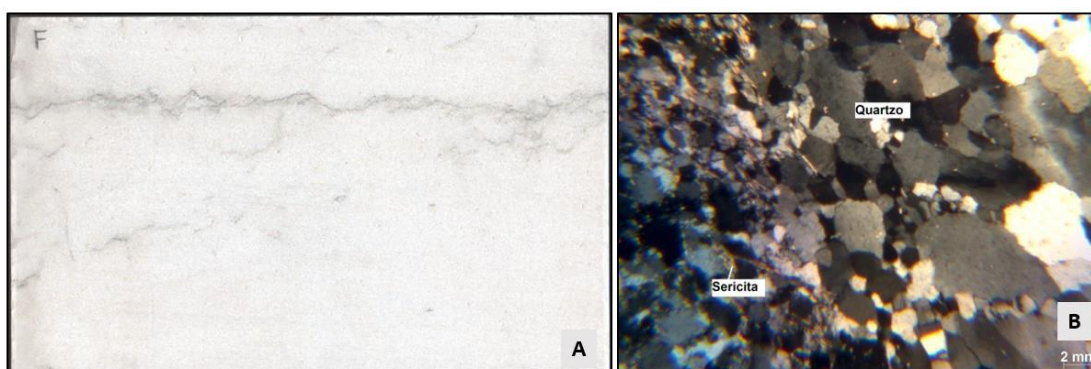
Fonte: Autora (2021).

### III. Quartzito “QZ<sub>3</sub>”:

O quartzito “QZ<sub>3</sub>” é uma rocha metamórfica de cor cinza clara com veios esverdeados, texturalmente é caracterizada como granolepidoblástica, equigranular, com granulação fina (< 1 mm), possui estrutura maciça e os grãos são indistinguíveis a olho nu. Em meio aos veios esverdeados há uma concentração maior de minerais pretos, de granulação fina (< 1 mm) e hábito granular, não sendo possível a identificação a olho nu.

A partir da observação da lâmina, identifica-se que a rocha é composta predominantemente por quartzo e muscovita/sericita, além de turmalina, rutilo, pirita, actinolita, como material de alteração, argilominerais e como mineral acessório, zircão. A Figura 22A mostra uma imagem do quartzito QZ<sub>3</sub> e a Figura 22B a análise da lâmina em microscópio petrográfico.

Figura 22 - A) Amostra do quartzito “QZ<sub>3</sub>” e B) imagem de microscopia em lâmina

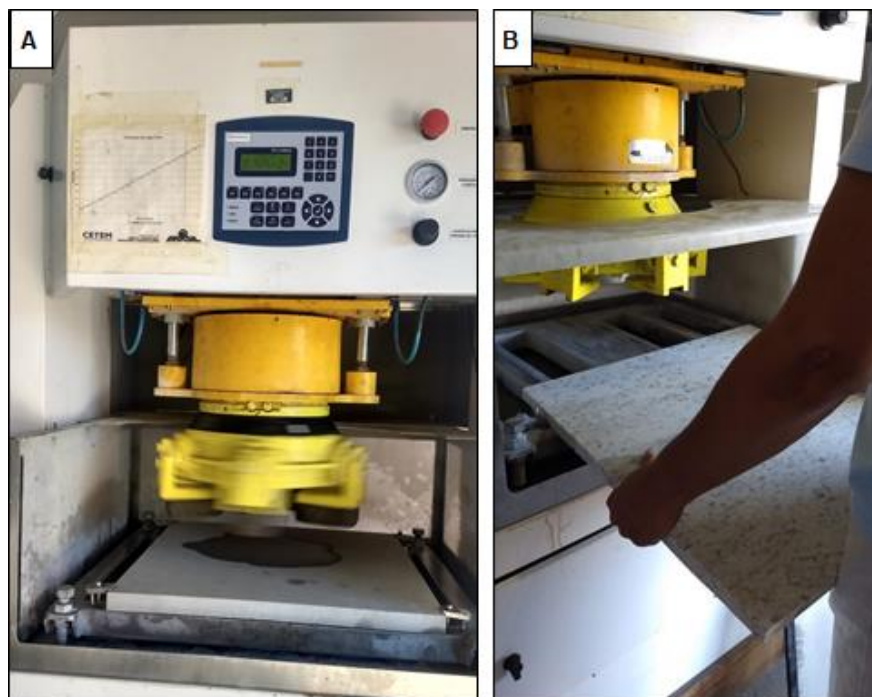


Fonte: Autora (2021).

#### 3.1.3 Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO)

Para a realização dos ensaios de polimento, utilizou-se o equipamento Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO) desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Figura 23 (A e B).

Figura 23 - (A) Equipamento S-PRO e (B) ladrilho sendo inserido no S-PRO



Fonte: Autora (2021).

Este equipamento permite um melhor entendimento sobre a interação das variáveis operacionais inerentes ao processo de polimento de rochas ornamentais. Neste simulador é possível variar parâmetros, como: a velocidade de rotação do satélite (cabecote), tempo de exposição ao processo, vazão e temperatura de água, e a pressão sobre a superfície da chapa.

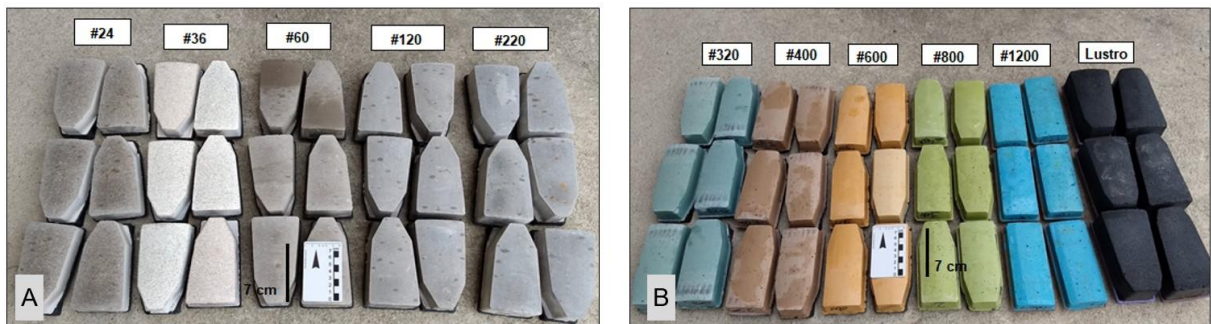
Para esta pesquisa, variou-se as vazões de água e o tempo de exposição ao processo, sendo mantidas constantes a velocidade de rotação do satélite (500 rpm) e a pressão (1 bar).

#### *3.1.4 Abrasivos de polimento*

Para a realização dos ensaios de polimento, foram utilizados seis jogos de abrasivos do tipo magnesianos para o desbaste inicial dos ladrilhos de rocha (Figura 24A) nas granulometrias #24, #36, #60, #120, #220 e cinco jogos de abrasivos do tipo resinoides e um jogo de abrasivo do tipo lustro nas granulometrias #320, #400, #600, #800, #1200 (Figura 24B).



Figura 24 - A) Rebolos abrasivos do tipo magnesiano e B) rebolos abrasivos do tipo resinoides



Fonte: Autora (2021).

### 3.1.5 Medidor de brilho

Para aferir a qualidade do polimento, utilizou-se do medidor de brilho (*glossmeter*) da marca BYK-Gardner, modelo micro-tri-gloss (Figura 25).

Figura 25 - Medidor de brilho Gardner



Fonte: Autora (2021).

### 3.1.6 Medidor de vazão de água

Para medir o fluxo de água nos cabeçotes da politriz, foi utilizado um medidor de vazão de água, observado na Figura 26.

Figura 26 - Medidor de vazão d'água



Fonte: Autora (2021).

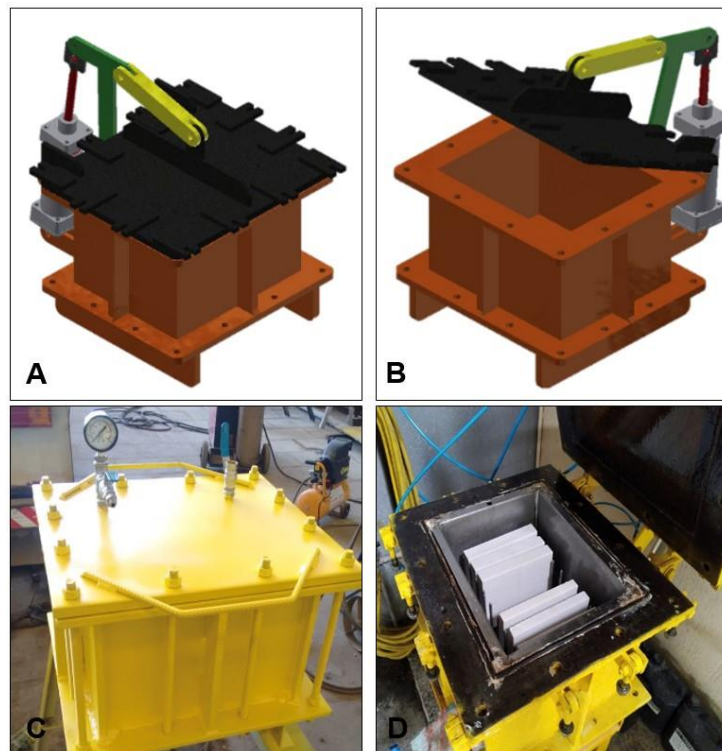
### 3.1.7 Câmara de impermeabilização

Visando contribuir para a melhoria na qualidade do processo de impermeabilização das rochas ornamentais, utiliza-se um equipamento na forma de uma câmara para realizar a impermeabilização de amostras de rocha por submersão. O equipamento foi desenvolvido levando-se em consideração os tanques de ácido que já são utilizados nas indústrias do setor para remoção de oxidação das chapas de rocha. Estes tanques mostram-se como uma boa alternativa, pois agilizam o tempo do processo de beneficiamento, bem como melhora a penetrabilidade do ácido no substrato da rocha, trazendo melhores resultados para o tratamento.

A partir disto, a impermeabilização por imersão visa uma maior qualidade no processo de impermeabilização das placas de rochas ao proporcionar maior penetrabilidade do líquido impermeabilizante no interior dos poros das rochas.

As Figura 27 A e B ilustram o projeto do equipamento e B e C mostram a visão externa e interna do equipamento concebido, mostrando o interior da câmara para disposição das amostras de rocha.

Figura 27 - A) Desenho digital da câmara fechada e B aberta, e C e D do equipamento real



Fonte: Autora (2021).

O princípio de funcionamento do equipamento é como o de uma autoclave, sendo possível alterar a temperatura e a pressão no seu interior, podendo variar entre 0°C e 100°C e pressão de até 7 bar. Possui capacidade para 36 litros e é ligado a uma fonte de energia e a uma bomba de pressão. A Figura 28 mostra o equipamento e suas características técnicas.

Figura 28 - Câmara de impermeabilização evidenciando suas características técnicas



Fonte: Autora (2021).

### 3.1.8 Produtos químicos impermeabilizantes

Foram utilizados dois tipos de impermeabilizantes para os testes de impermeabilização por imersão, sendo um com propriedades de repelência contra água e óleo (hidro-oleofugantes) e outro com propriedade de apenas de repelência contra água (hidrofugante), respectivamente comercializados como “Max Protection Plus” e “Stone Guard Acqua”. Estes produtos foram desenvolvidos especialmente para a impermeabilização de rochas ornamentais e foram disponibilizados pela indústria química Innovare Chemicals.

O impermeabilizante Max Protection Plus possui composição química à base de polímeros de silicone (silanos e siloxanos) e solventes, além de polímeros fluorados, conforme mostra a Tabela 1 extraída da Ficha de Informações de Segurança de Produto Químicos (FISPQ) do produto.

Tabela 1 - Composição do impermeabilizante hidro-oleofugante Max Protection Plus

<b>Componentes</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Nº CAS</b>
Isoparafina (alcanos C10 – C14)	35 – 70%	68551-18-8
Acetato de metila	10 – 30%	79-20-9
Segredo industrial	10 – 25%	Segredo industrial

Fonte: Arquivo da autora (2021).

O impermeabilizante hidrofugante Stone Guard Acqua também é um polímero de silicone cuja composição é apresentada na Tabela 2, conforme tabela FISPQ do produto.

Tabela 2 - Composição do impermeabilizante hidro-oleofugante Max Protection Plus

<b>Componentes</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Nº CAS</b>
Solvente nafta (petróleo)	76 – 87%	64742-88-7
Acetato de butila	4 – 10%	123-86-4
Segredo industrial	10 – 25%	Segredo industrial

Fonte: Arquivo da autora (2021).

### 3.2 MÉTODOS

Nesta pesquisa foram explorados dois temas referentes à cadeia produtiva das rochas ornamentais que serão nesta seção subdivididos em Fase 1 e Fase 2 para melhor compreensão das etapas percorridas.

A Fase 1 trata da otimização do uso da água no processo de polimento das rochas ornamentais visando a redução do consumo hídrico e maior sustentabilidade para esta etapa do beneficiamento. Realizou-se o polimento de diferentes tipos de rochas ornamentais sob reduzidas vazões de água e utilizando a vazão convencional praticada na indústria. Foram realizadas medições de brilho ao final do processo a fim de comparar a qualidade final do polimento nas condições supracitadas.

A Fase 2 deste estudo propõe uma nova técnica de impermeabilização para rochas ornamentais do tipo quartzito, visando um processo mais eficiente com maior penetrabilidade do impermeabilizante, reduzindo assim a absorção de líquidos e a



probabilidade de manchas, aumentando a durabilidade e a vida útil das rochas ornamentais quando aplicadas como revestimento nas edificações. Nas próximas sessões serão detalhadas as etapas percorridas em cada fase desta pesquisa.

### 3.2.1 Fase 1: Redução da vazão de água no polimento das rochas ornamentais

A primeira fase deste estudo contemplou testes que foram realizados em laboratório no Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO) e também em politriz em escala industrial.

A Figura 29 detalha as etapas percorridas nesta fase da pesquisa e seus respectivos objetivos.

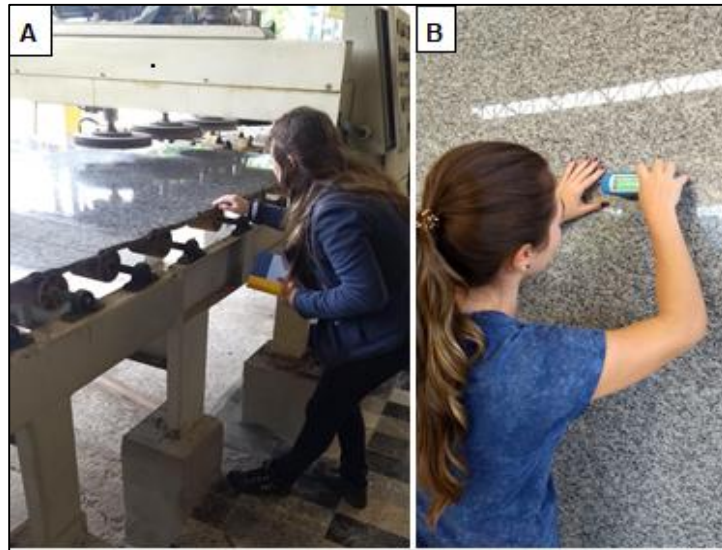
Figura 29 - Etapas metodológicas percorridas na Fase 1



Fonte: Autora (2019).

As visitas a campo em empresas de beneficiamento de rochas ornamentais tiveram como objetivo analisar o processo de polimento em escala industrial, obter informações específicas sobre os parâmetros utilizados para o polimento das rochas ornamentais Cinza Corumbá, Branco Dallas e Preto São Gabriel, bem como aferir o brilho destes materiais quando polidos na indústria, conforme mostrado nas Figuras 30 (A e B).

Figura 30 - A) Acompanhamento do processo de polimento do Cinza Corumbá e B) medição de brilho na chapa polida na indústria



Fonte: Autora (2019).

Além disso, nesta etapa foi possível realizar testes de polimento em 3 chapas de cada material rochoso em escala industrial sob reduzidas vazões de água, sendo estas: 17L/min, 10 L/min bem como com a vazão de água convencional média utilizada no polimento destes materiais, que é de 24 L/min, sendo aqui denominadas como  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  respectivamente. A Figura 31 mostra o polimento da chapa do material Branco Dallas na indústria. Foram realizadas medições de brilho em 8 faixas granulométricas de abrasivos, do grão #120 ao abrasivo de Lustro, totalizando 100 medidas por amostra de rocha, sendo 4.800 medições realizadas em cada um dos três tipos de rochas selecionados nesta fase do estudo.

Figura 31 - Polimento de chapas da rocha “Branco Dallas” em politriz automática na indústria



Fonte: Autora (2019).

Esta etapa foi fundamental pois possibilitou comparar a qualidade do polimento com a vazão de água convencional e o polimento sob reduzidas vazões de água em escala industrial. Posteriormente, as mesmas condições do teste industrial foram replicadas em escala piloto no Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO).

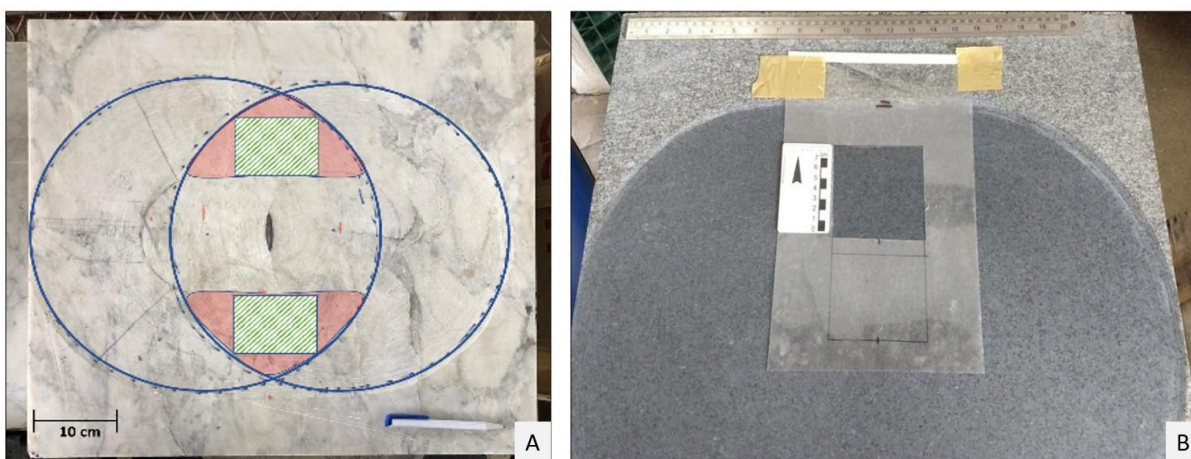
As informações coletadas nesta fase de campo permitiram definir os parâmetros a serem utilizados nos testes de polimento em escala piloto no S-PRO, de forma que fossem os mais representativos possíveis com a realidade do polimento na indústria. Assim, levando-se em consideração as diferenças existentes entre a cinemática da politriz industrial e a do S-PRO, foi realizada uma análise das variáveis inerentes ao polimento industrial a fim de reproduzi-las de forma mais fiel possível com as condições de polimento em escala piloto. Sendo assim, para uma velocidade de esteira de 120 cm/min (velocidade utilizada na indústria para o polimento dos mesmos tipos rochosos selecionados para esta fase da pesquisa), e para frequência de oscilação da trave da politriz de 8 ciclos por minuto (1 ciclo é equivalente a uma ida e volta do satélite sobre a chapa), tem-se que um elemento infinitesimal de área fica exposto a 5 segundos de polimento para cada cabeçote. Logo, os tempos de exposição ao polimento para os ladrilhos foram de  $T_1=8$  segundos e  $T_2=10$  segundos (tempo da indústria) e as vazões de água testadas foram de 24 L/min (vazão da indústria), 17L/min e 10L/min.

### 3.2.1.1 Testes no Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais

A segunda etapa desta fase da pesquisa consistiu em realizar testes de polimento em escala piloto utilizando 6 ladrilhos de cada rocha selecionada para a pesquisa, sob os tempos de exposição ao processo T1 e T2. Utilizou-se a sequência granulométrica de abrasivos em ordem decrescente de granulometria, sendo esta: #24, #36, #60, #120, #220, #320, #400, #600, #800, #1200 e abrasivo de lustro. A pressão utilizada no satélite de polimento foi de 1 bar e a velocidade de rotação do satélite foi mantida em 500 rpm, a mesma da indústria.

Após o polimento, os ladrilhos foram demarcados em quadrados com área de 4 cm<sup>2</sup> e então realizou-se as medições de brilho sobre as superfícies. A parte em vermelho na Figura 32A mostra a região melhor polida e o retângulo hachurado em verde ilustra a região onde foram realizadas as medições de brilho em cada ladrilho polido. A Figura 32B mostra o molde utilizado para delimitar e padronizar o espaço para a realização das medições de brilho nos ladrilhos. Foram realizadas medições de brilho em 8 faixas granulométricas de abrasivos, do grão #120 ao abrasivo de Lustro, totalizando 100 medidas por amostra de rocha, sendo 4.800 medições realizadas em cada um dos três tipos de rochas selecionados nesta fase do estudo.

Figura 32 - A) Ladrilho mostrando as regiões melhor polidas no S-PRO (em vermelho), bem como o local escolhido para as medições de brilho (em verde) e B) Molde delimitando o espaço para as medições de brilho.



Fonte: Autora (2022).

Para cada faixa granulométrica em que foi realizado o polimento, os ladrilhos eram retirados do S-PRO para aferição do brilho, conforme Figura 33.

Figura 33 - Medição do brilho no ladrilho da rocha “Branco Dallas”





Fonte: Autora (2022).

### *3.2.2 Fase 2: Otimização do processo de impermeabilização das rochas*

Assim como na primeira fase desta pesquisa, a Fase 2 também contou com visitas em indústrias do setor a fim de obter um melhor entendimento no que diz respeito a impermeabilização das chapas de rochas ornamentais. Tais visitas buscaram compreender quais tipos de rochas ornamentais devem ser submetidas a impermeabilização e como se dá o processo de aplicação dos produtos químicos impermeabilizantes nas chapas.

Tais informações foram obtidas junto a equipe comercial das empresas de beneficiamento, visto que são estes os profissionais que comercializam as rochas ornamentais para marmorarias e depósitos e que geralmente recebem as reclamações dos clientes em caso de insatisfação com a rocha. Dentre as questões relatadas por estes profissionais, problemas relacionados ao manchamentos nas superfícies das rochas do tipo quartzito durante o transporte destes materiais ou durante o processamento na indústria, e, principalmente após a instalação das peças acabadas foram as questões mais mencionadas.

As informações relativas ao processo de impermeabilização das rochas foram obtidas com os profissionais denominados por encarregados de produção das empresas. Os dados levantados em campo permitiram compreender que os quartzitos são as rochas que apresentam os maiores problemas relacionados a manchamentos, que ocorrem após o assentamento do material ou ainda durante o processo industrial. Estes tipos de rocha geralmente são de coloração clara e possuem elevado valor agregado, sendo o processo de impermeabilização imprescindível para proteção destas superfícies.

Para a coleta das amostras dos quartzitos utilizados nesta fase da pesquisa, foram realizadas visitas em quatro indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais localizadas na cidade de Cachoeiro de Itapemirim – ES, na cidade de Serra – ES, e no município de Santa Quitéria – CE. Cada uma destas indústrias disponibilizou uma chapa de quartzito que foram recortadas em amostras com as dimensões aproximadas de 10 cm x 15 cm x 3 cm, conforme mostrado nas Figuras 34A e B.

Figura 34 - (A) Corte de chapa de quartzito e (B) corte de chapa para obtenção das amostras



Fonte: Autora (2021).

### 3.2.2.1 Ensaios de caracterização das rochas ornamentais

Antes de dar início aos testes de impermeabilização na câmara, foram selecionadas 10 amostras de cada quartzito que foram fotografadas e posteriormente lavadas e secas em estufa por 24 horas na temperatura de 60°C para realização dos ensaios de caracterização tecnológica. Os ensaios tiveram como objetivo determinar

a composição mineralógica destes quartzitos bem como suas propriedades físicas, conforme descrito nas seções seguintes.

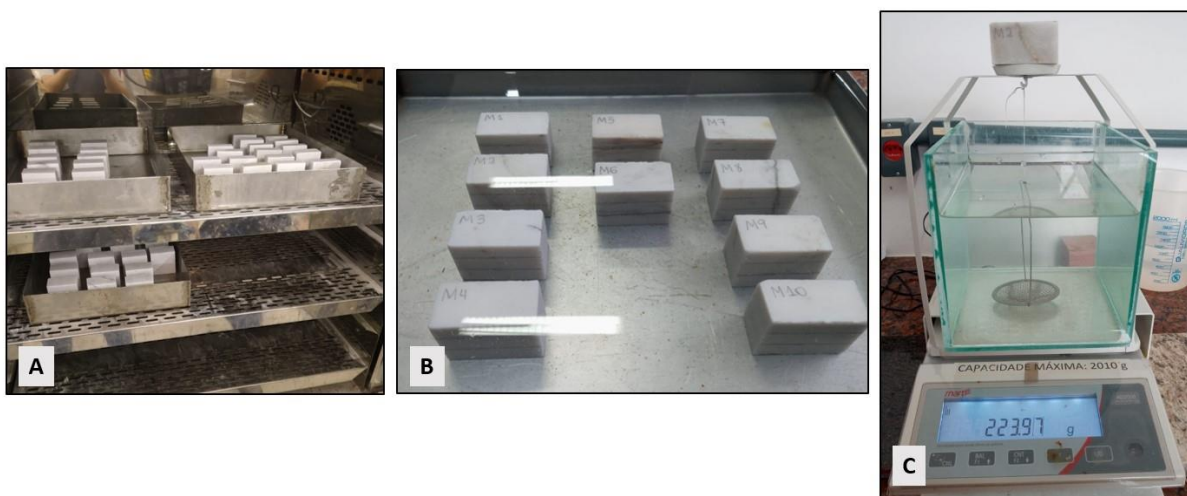
### 3.2.2.2 Análise Petrográfica

As análises petrográficas foram realizadas no CETEM (NR-ES) para observação de seções delgadas de lâminas dos quartzitos com auxílio do microscópio ótico de luz transmitida da marca Zeiss. Esta análise contribuiu para uma identificação dos minerais que compõem os quartzitos selecionados para a pesquisa, permitindo caracterizar os minerais susceptíveis a alterações, bem como aspectos texturais e estruturais destas rochas.

### 3.2.2.3 Determinação dos Índices Físicos

Os parâmetros de densidade aparente, porosidade aparente e a absorção d'água foram determinados para os três quartzitos antes e após cada impermeabilização por submersão na câmara. Os quartzitos foram cortados em corpos de prova no tamanho 5 cm e 7 cm, conforme solicitado pela norma e seguindo a espessura de cada amostra. A Figura 35A, B e C mostram as etapas do ensaio antes da impermeabilização, com a secagem das amostras dos quartzitos em estufa, a imersão dos corpos de prova em água e a pesagem.

Figura 35 - (A) Secagem das amostras em estufa (B) submersão para medir o peso saturado e (C) pesagem das amostras em balança de precisão



Fonte: Autora (2022).

### 3.2.2.4 Testes de impermeabilização por submersão na câmara

As sequências de testes de impermeabilização a seguir foram realizadas a fim de se obter um melhor entendimento sobre o funcionamento da câmara, bem como delimitar os parâmetros a serem utilizados nos ensaios. Nesta etapa, foram realizados testes variando pressão e tempo de imersão.

#### A. Sequência 1:

A primeira sequência de testes foi realizada utilizando a pressão máxima positiva da câmara de 7 bar, nos tempos de 3 horas, 6 horas e 24 horas com 3 amostras do quartzito QZ<sub>1</sub> e 3 amostras do quartzito QZ<sub>2</sub>, conforme mostrado na Figura 36. O produto impermeabilizante utilizado foi o hidro óleo repelente “Max Protection Plus”

Ao final de cada intervalo de tempo, a câmara foi aberta para retirada das amostras e novamente fechada e pressurizada para continuação do teste. Após isto, as amostras ficaram curando por 30 dias (conforme recomendado pelo fabricante) antes de serem quebradas para verificação da penetração do impermeabilizante, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 - (A) Adição do impermeabilizante na câmara, (B) amostras submersas antes da aplicação do vácuo e (C) quebra da amostra após a cura para verificar a penetrabilidade do impermeabilizante



Fonte: Autora (2021).

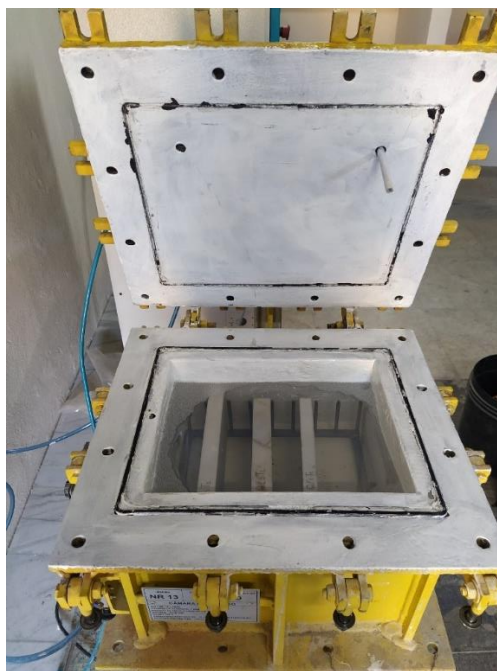
#### B. Sequência 2:

Para a segunda sequência de testes, realizou-se dois ciclos de impermeabilização por imersão sem utilizar pressão, utilizando uma amostra de cada



quartzito durante os tempos de 30 minutos e 1 hora, apenas sob pressão atmosférica, conforme mostra a Figura 37. O impermeabilizante utilizado neste teste foi o hidrofugante “Stone Guard Acqua”.

Figura 37 - Impermeabilização por submersão sob pressão atmosférica dos quartzitos utilizados nesta pesquisa

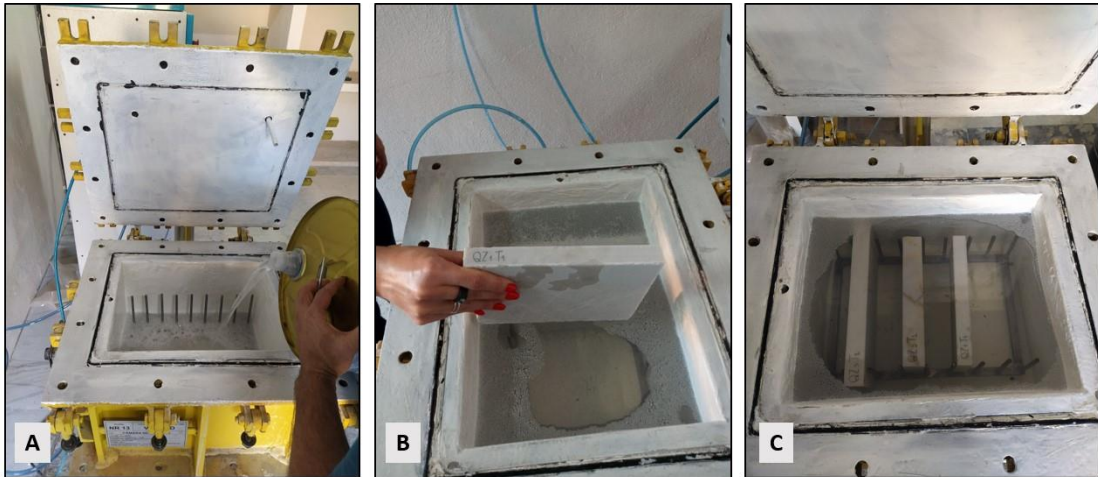


Fonte: Autora (2022).

### C. Sequência 3:

Por fim, para a última sequência de testes de impermeabilização, optou-se por repetir a submersão com o produto “Stone Guard Acqua” reduzindo os tempos os tempos de submersão das amostras utilizando pressão positiva, visando otimizar o processo. Foram selecionadas quatro amostras de cada quartzito que foram submetidas à impermeabilização por submersão e pressão de 7 bar durante os tempos de 1 hora, 3 horas, 6 horas e 12 horas. Ao final de cada ciclo de tempo, a câmara foi aberta para retirada da amostra e novamente pressurizada até o fim das 12 horas de teste, conforme mostra a sequência ABC da Figura 38.

Figura 38 - (A) mostra a adição do impermeabilizante na câmara (B) as amostras sendo colocadas no interior do equipamento e (C) as amostras submersas



Fonte: Autora (2022).

Ao final do processo de impermeabilização, as amostras passaram pelo processo de cura de 30 dias (Figura 39A) e posteriormente foram quebradas para verificação da penetrabilidade do impermeabilizante (Figura 39B).

Figura 39 - A) Amostras curando após imersão na câmara e B) quebra das amostras após a cura



Fonte: Autora (2022).

As amostras submetidas aos testes de índices físicos antes da impermeabilização foram dispostas por submersão nas mesmas condições do ensaio anterior, sob pressão de 7 bar durante 6 horas, conforme Figura 40. Após este procedimento, as amostras passaram pelo processo de cura e repetiu-se os ensaios para determinação dos índices físicos.

Figura 40 - Impermeabilização das amostras utilizadas nos testes de índices físicos



Fonte: Autora (2022).

### 3.2.2.6 Impermeabilização convencional

Além dos testes dos testes de impermeabilização por submersão, realizou-se também a impermeabilização de uma amostra de cada quartzito, em estado bruto, na forma convencional da indústria, utilizando um rolo de espuma e aplicando o produto hidrofugante. A quantidade de produto utilizado para cada amostra foi definida de acordo com o que se indica para utilização em chapas na indústria, que é de  $60 \text{ g/m}^2$ . Sendo assim, cada amostra recebeu aproximadamente 2 ml de produto em uma de suas faces. O objetivo deste teste foi comparar a penetrabilidade do impermeabilizante nas amostras submetidas aos ensaios por submersão com a técnica convencional.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

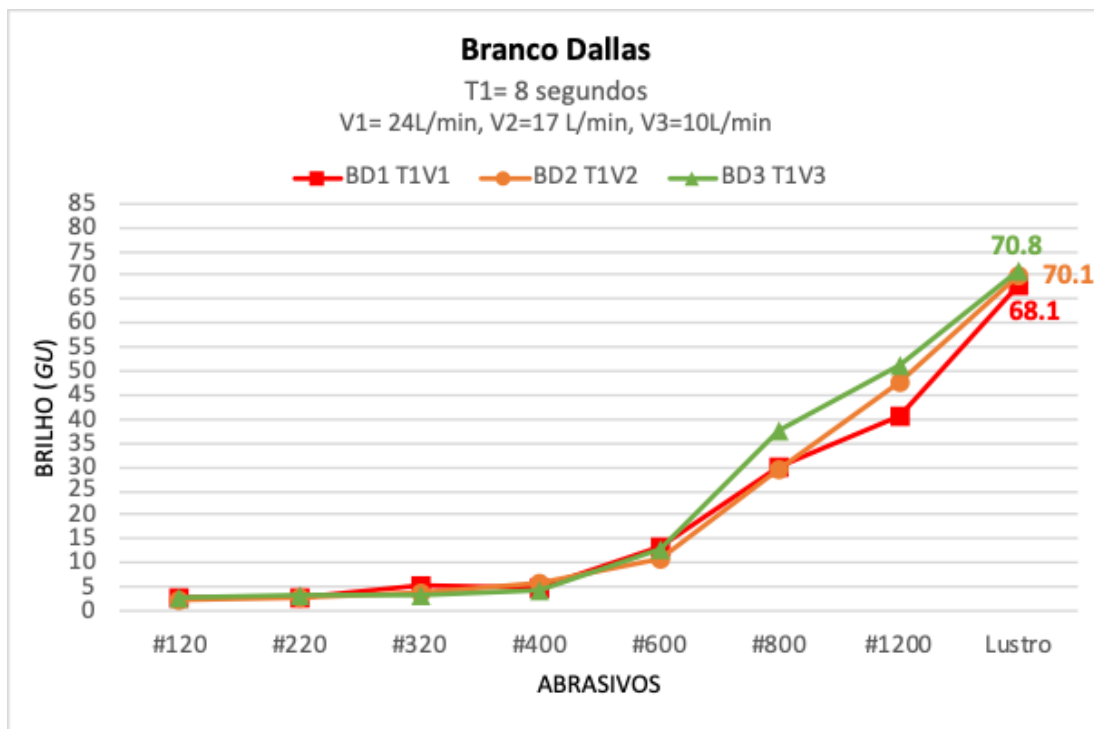
### 4.1 FASE 1: ENSAIOS DE POLIMENTO NO S-PRO

Nesta primeira etapa da pesquisa foram polidas 18 amostras com nas dimensões 60cmx60cmx2cm, sendo 6 ladrilhos da rocha Branco Dallas (BD), 6 da rocha Cinza Castelo (CC) e 6 da rocha Preto São Gabriel (SG). Os tempos de polimento foram de 8 segundos e 10 segundos ( $T_1$  e  $T_2$  respectivamente) e as vazões de água foram variadas em 24 L/min ( $V_1$ ) (vazão média utilizada na indústria), 17 L/min ( $V_2$ ) e 10 L/min ( $V_3$ ), totalizando 6 situações operacionais de polimento.

#### 4.1.1 Rocha “Branco Dallas”

Analisando o gráfico de brilho *versus* granulometrias dos rebolos abrasivos para a rocha Branco Dallas (Figura 41) no tempo de 8 segundos, é possível observar por meio da linha de cor verde que o polimento realizado sob reduzidas vazões de água resultou em maiores valores finais de brilho na maioria das situações de polimento. Os maiores valores de brilho foram obtidos nas situações em que o polimento ocorreu sob as vazões de água de 10L/min (linha verde) e 17L/min (linha laranja), ou seja, nas menores vazões testadas. Nota-se também que, a partir do abrasivo de grão #800, os maiores valores de brilho obtidos foram com a vazão de água de 10 L/min.

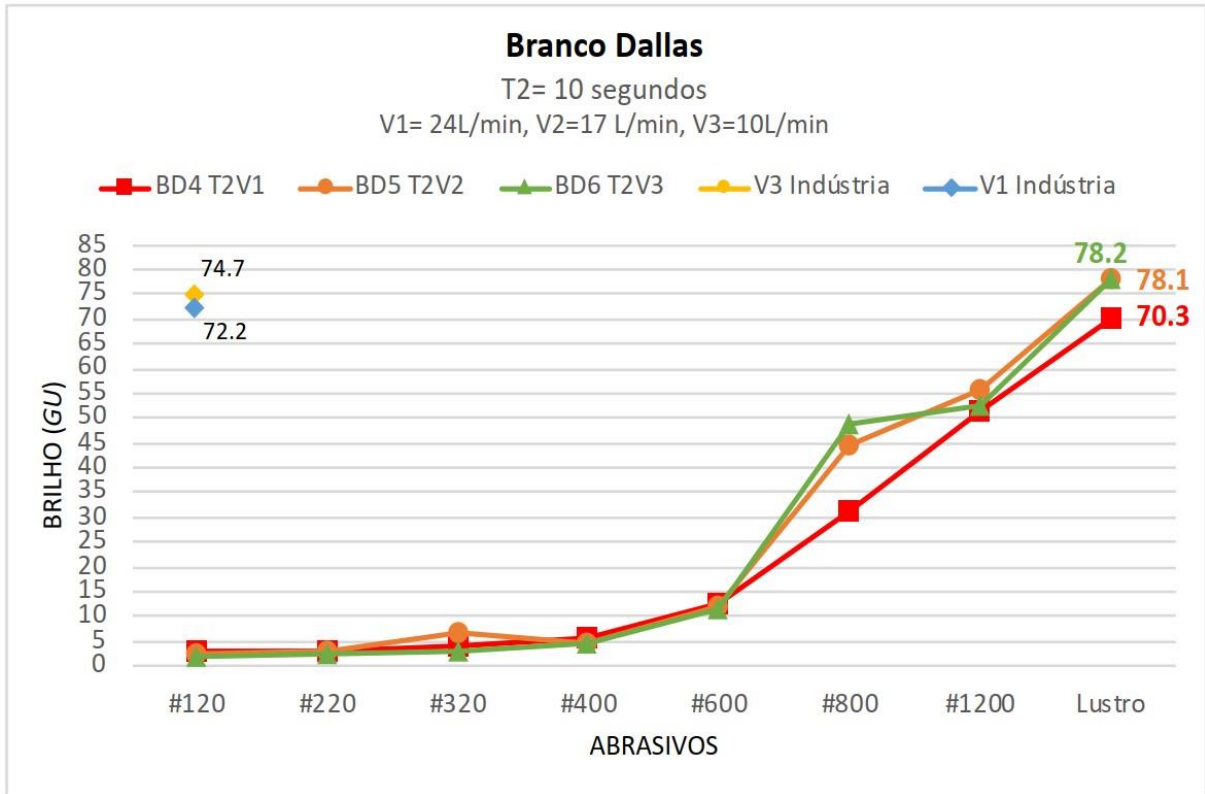
Figura 41 - Resultados de brilho obtidos para a rocha Branco Dallas no tempo de polimento de 8 segundos



Fonte: Autora (2022).

O gráfico da Figura 42 mostra os resultados de polimento para a rocha Branco Dallas sob o tempo  $T_2$  de 10 segundos, comparando este tempo de polimento com o praticado na indústria. Para esta situação de ensaio comparou-se os brilhos obtidos no polimento industrial com as vazões  $V_3$  (10L/min) e  $V_1$  (24L/min) com os resultados de brilho obtidos nos testes no S-PRO para estas mesmas vazões de água. Os valores de brilho medido nos ladrilhos apresentaram resultados melhores nas menores vazões de água, sendo que na situação industrial, o polimento da chapa de Branco Dallas na vazão convencional de 24 L/min ( $V_1$ ) resultou em um valor de brilho menor quando comparado ao polimento com a menor vazão de água testada 10 L/min ( $V_3$ ), corroborando o fato de que com reduzidas vazões de água o resultado de brilho polimento se mostrou superior.

Figura 42 - Resultados de brilhos obtidos para a rocha Branco Dallas no tempo de polimento de 10 segundos, comparando com o polimento realizado na indústria

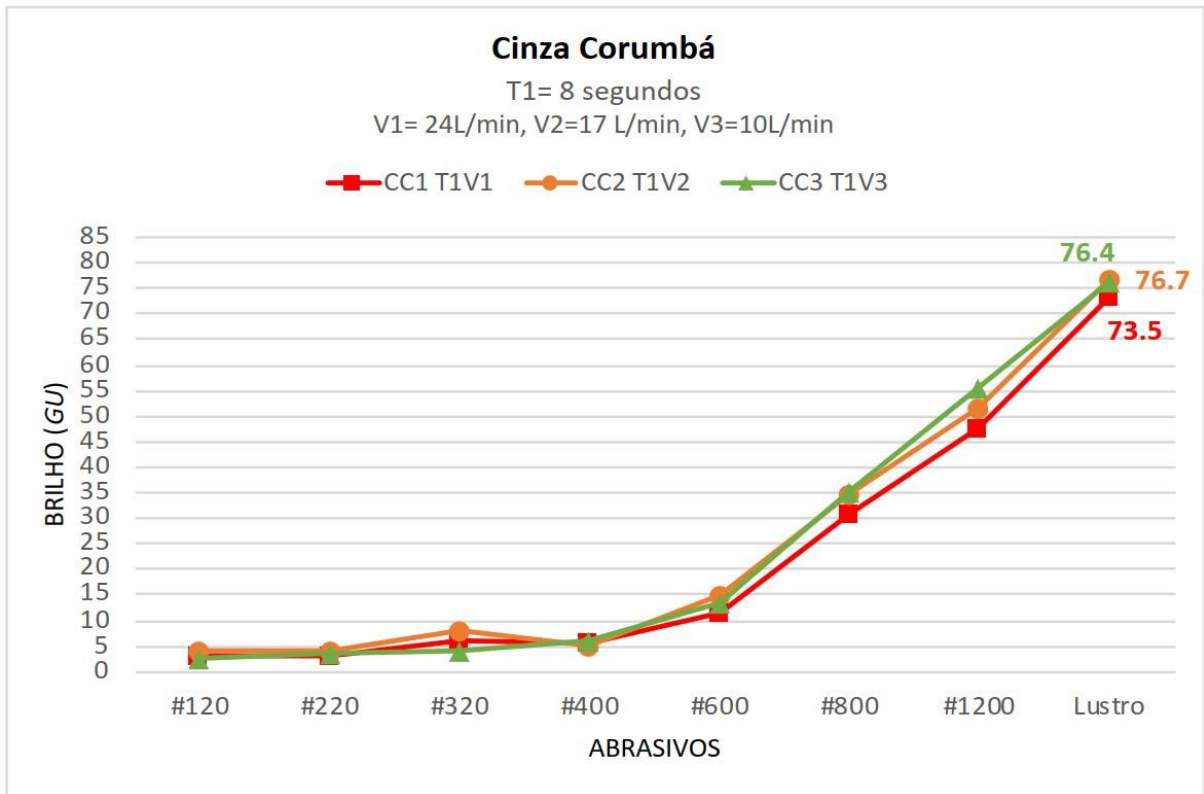


Fonte: Autora (2022).

#### 4.1.2 Rocha “Cinza Corumbá”

Analisando o gráfico de brilho *versus* granulometrias para a rocha Cinza Corumbá no tempo de 8 segundos (Figura 43), o melhor resultado de brilho obtido foi no polimento utilizando a vazão de água de V2 (17L/min) que foi de 76,7 *Gloss Units*, ficando bem próximo ao valor obtido na menor vazão de água V3, que resultou em 76,4 *Gloss Units*. Nota-se também um resultado superior de brilho no polimento utilizando a menor vazão de água a partir da granulometria de abrasivo #800, sugerindo que uma redução da vazão de água nesta fase do processo pode resultar em uma melhor qualidade final de polimento.

Figura 43 - Resultados de brilhos obtidos para a rocha Cinza Corumbá no tempo de polimento de 8 segundos

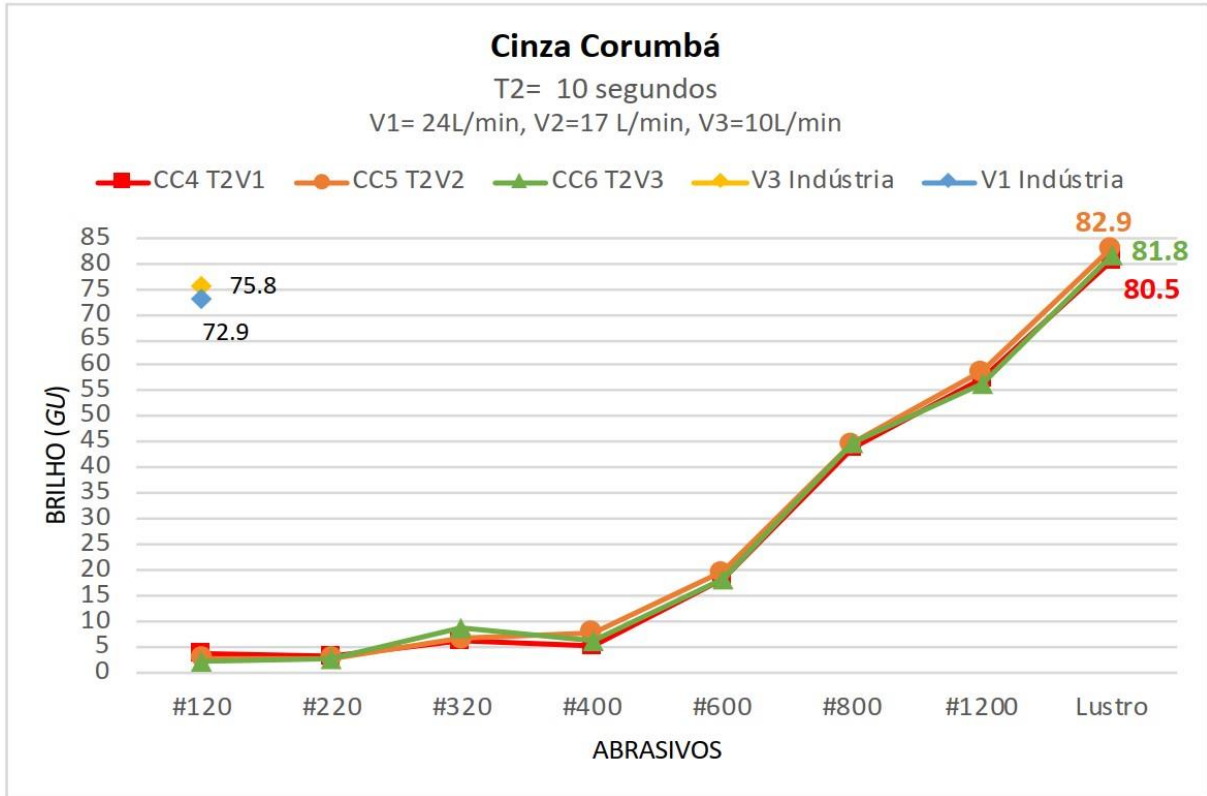


Fonte: Autora (2022).

Comparando os resultados de brilho obtidos nos ensaios de polimento na indústria e em escala piloto para o tempo T2 de 10 segundos (Figura 44), nota-se que a chapa da rocha Cinza Corumbá polida na indústria sob vazão de 10 L/min apresentou a melhor qualidade final de brilho, atingindo 75,8 *Gloss Units*. O polimento dos ladrilhos no S-PRO apresentaram resultados de brilho superiores ao da indústria também na situação de ensaio com as menores vazões de água.

Figura 44 - Resultados de brilho obtidos para a rocha Cinza Corumbá no tempo de polimento de 10 segundos





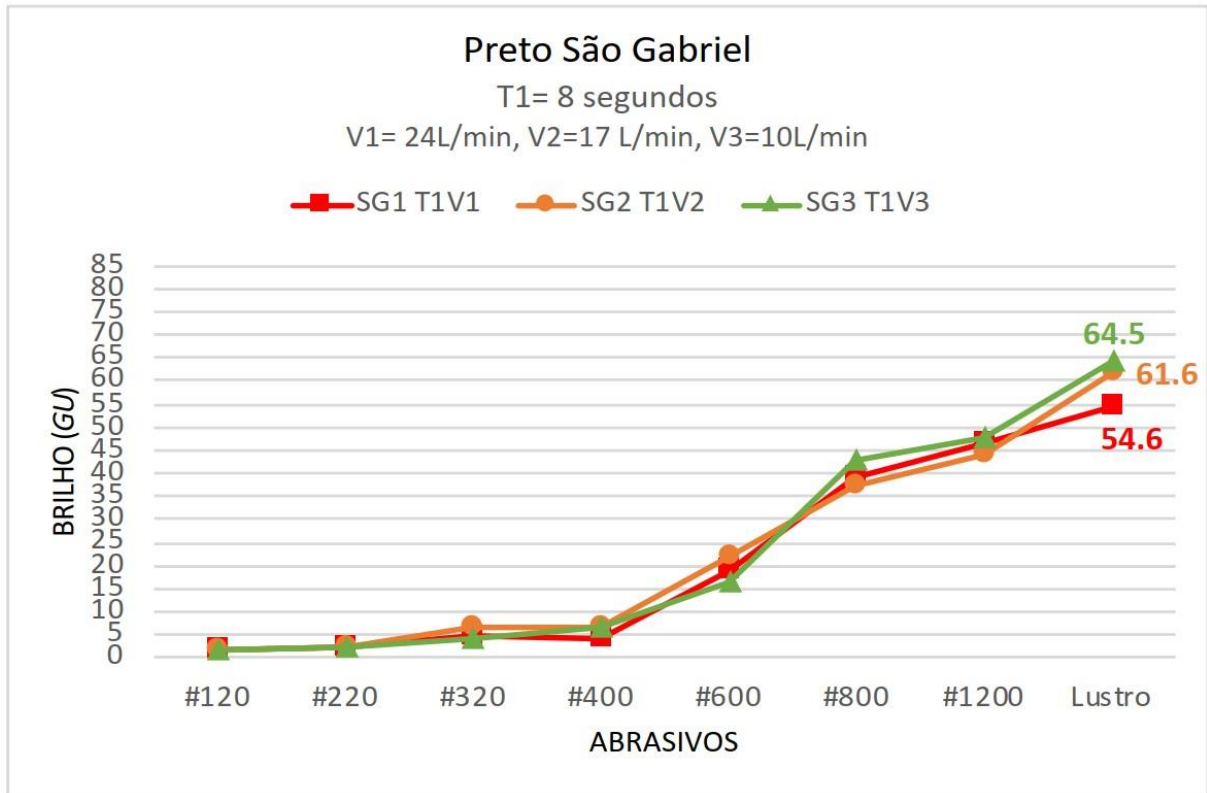
Fonte: Autora (2022).

#### 4.1.3 Rocha Preto São Gabriel

Analisando o gráfico de brilho *versus* granulometrias de abrasivos para a rocha Preto São Gabriel (Figura 45), nota-se que os valores médios obtidos para o brilho foram menores quando comparados com as rochas Branco Dallas e Cinza Corumbá, e isso se deve a menor proporção de minerais translúcidos como o quartzo e com propriedades diáfanos (que permite a passagem de luz) presentes nesta rocha. Assim como para as rochas BD e CC, a qualidade final de brilho para o Preto São Gabriel se mostrou superior ao utilizar menores vazões de água no processo de polimento.

Figura 45 - Resultados de brilho obtidos para a rocha Preto São Gabriel no tempo de polimento de 8 segundos

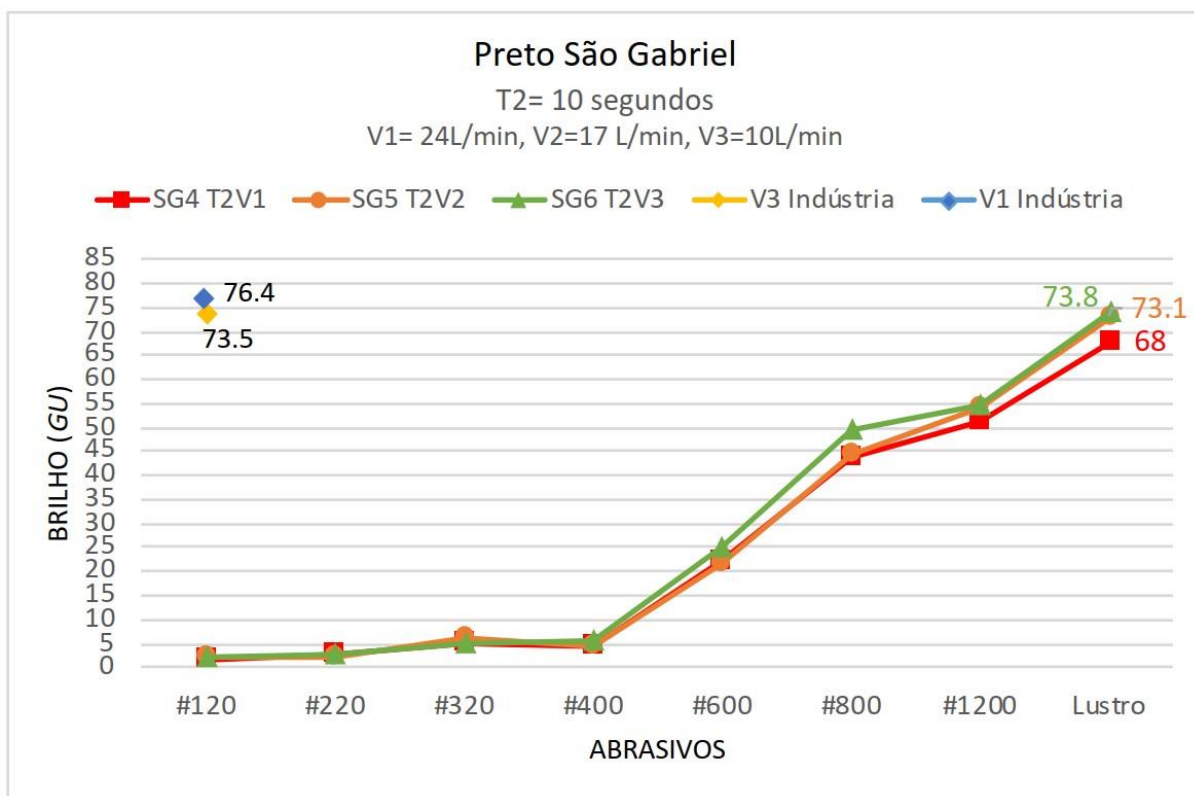




Fonte: Autor (2022).

Analisando o gráfico da Figura 46 e comparando os resultados de brilho aferidos no polimento industrial com o polimento dos ladrilhos no S-PRO, a rocha Preto São Gabriel foi a única das testadas que apresentou melhor qualidade de brilho utilizando a vazão de água convencional da indústria de 24L/min, atingindo o valor máximo de brilho de 76,4 *Gloss Unit*. Para este material rochosos, observou-se também que os valores de brilho obtidos a partir da granulometria #400 no polimento no S-PRO apresentaram os maiores resultados de brilho quando utilizado a menor vazão de água.

Figura 46 - Resultados de brilhos obtidos para a rocha Preto São Gabriel no tempo de polimento de 10 segundos



Fonte: Autor (2022).

A partir da análise dos gráficos acima expostos é possível notar que, ainda que os valores de brilhos obtidos nas diferentes vazões de água foram próximos tanto em condição industrial como no polimento realizado em escala piloto, a qualidade final de brilho utilizando as menores vazões de água (17L/min e 10L/min) apresentaram valores maiores se comparados com a vazão máxima (24 L/min), ou seja, os brilhos são praticamente os mesmos quando se altera a vazão. A grande vantagem é que é possível reduzir água, mantendo o brilho.

Ressalta-se que a água tem a função de arrefecimento e limpeza durante os processos de serragem e polimento das rochas ornamentais, e por mais que esta seja tratada e inserida novamente no sistema, estima-se que boa parte deste recurso seja perdida por meio da evaporação, infiltração, e após o tratamento dos efluentes líquidos, em forma de umidade renascente nos resíduos destinados aos aterros. Dessa forma, faz-se necessário a inserção de novas quantidades de água limpa periodicamente no sistema.

## 4.2 FASE 2: IMPERMEABILIZAÇÃO POR SUBMERSÃO E PRESSÃO

### 4.2.1 Análise petrográfica dos quartzitos

A análise petrográfica macroscópica mostrou que as três rochas apresentam coloração branca acinzentada, algumas porções alteradas de coloração amarela e veios minerais de coloração preta a amarronzada (exceto QZ<sub>1</sub>). A análise microscópica apresentou que a rocha QZ<sub>1</sub> possui granulação fina (<1 mm) e constitui-se essencialmente pelo mineral quartzo (100%) com algumas porções em processo de sericitização, sendo classificada como Quartzito. A rocha QZ<sub>2</sub> possui 95% de granulação fina (<1 mm) e 5% de granulação média (1 a 5mm), constituindo-se por quartzo (91%), moscovita (5%), e minerais acessórios como apatita (1%), titanita (1%), zircão (1%) e minerais opacos (1%), ocorre sericitização e microfissuras preenchidas por óxido e/ou hidróxido de ferro, sendo classificada como Quartzito. A rocha QZ<sub>3</sub> possui granulação fina (<1 mm), constitui-se de quartzo (90%), moscovita/sericita (6%), turmalina (1%), pirita (1%), rutilo (1%), actinolita (1%) e zircão (traço), ocorrem microfissuras sem preenchimento e material ferruginoso em locais pontuais, sendo assim classificada como Sericita Quartzito.

### 4.2.2 Índices Físicos

A Tabela 3 mostra a comparação dos resultados dos testes de índices físicos para os três quartzitos selecionados para esta pesquisa antes e após o processo de impermeabilização por submersão.

Tabela 3 - Índices físicos médios antes e após impermeabilização.

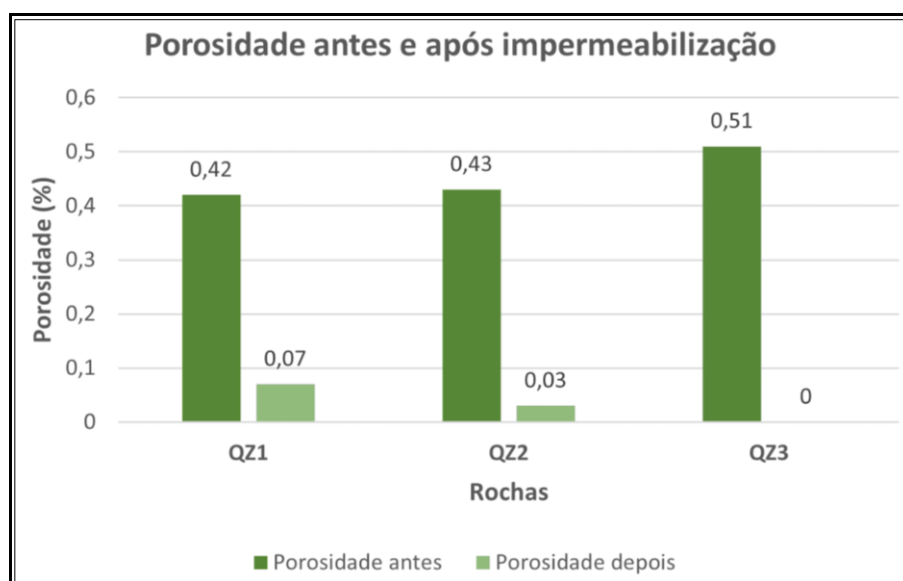
Índices Físicos	QZ <sub>1</sub>		QZ <sub>2</sub>		QZ <sub>3</sub>	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
<b>Densidade aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.646	2.649	2.647	2.632	2.648	2.649
<b>Porosidade Aparente (%)</b>	0,42	0,07	0,43	0,03	0,51	0,00
<b>Absorção d'água (%)</b>	0,16	0,03	0,16	0,01	0,19	0,00

Fonte: Autora (2022).

Os dados médios dos índices físicos realizados antes da impermeabilização evidenciam valores bastante semelhantes para os quartzitos QZ<sub>1</sub> e QZ<sub>2</sub>, e mais discrepantes para o quartzito QZ<sub>3</sub>. Após o processo de impermeabilização os valores

de densidade aparente não tiveram variações consideráveis e, para as três rochas, houve redução dos índices de porosidade aparente e absorção d'água. O gráfico da Figura 47 traz a comparação da porosidade para os três quartzitos antes e após a impermeabilização, com redução de 83% da porosidade para o quartzito QZ<sub>1</sub>, 93% para o quartzito QZ<sub>2</sub> e 100% da porosidade aparente foi reduzida para o quartzito QZ<sub>3</sub> após o processo de impermeabilização.

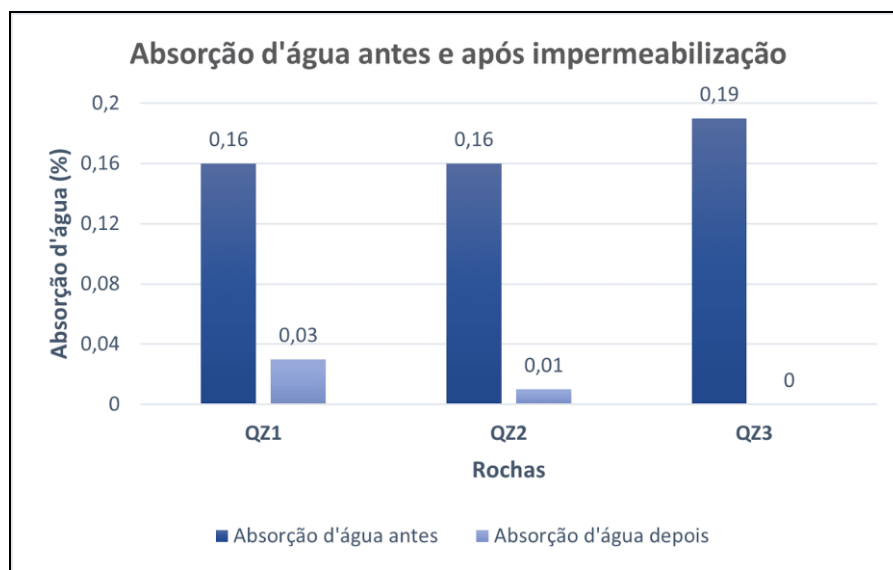
Figura 47 - Comparação dos índices físicos médios para a porosidade aparente antes e após o processo de impermeabilização por submersão para os três quartzitos



Fonte: Autora (2022).

Assim como para a porosidade aparente, a absorção d'água para os três quartzitos também tiveram reduções bastante significativas. Analisando o gráfico da Figura 48, o quartzito QZ<sub>1</sub> apresentou redução de absorção de água de 81% após a impermeabilização, o quartzito QZ<sub>2</sub> apresentou redução de absorção de água de 93,75% após o processo de impermeabilização e o quartzito QZ<sub>3</sub> apresentou redução de 100% para o índice de absorção de água após a impermeabilização na câmara.

Figura 48 - Comparação dos índices físicos médios para absorção de água antes e após o processo de impermeabilização por submersão para os três quartzitos



Fonte: Autora (2022).

A análise petrográfica permitiu correlacionar as diferenças dos índices físicos entre os quartzitos. A rocha QZ<sub>3</sub> que possuía microfissuras sem preenchimento e maior variabilidade mineralógica, inicialmente apresentou maiores índices físicos e, após a impermeabilização, obteve os menores índices, indicando que dentre as três rochas foi a que mais absorveu o impermeabilizante. A rocha QZ<sub>1</sub>, mineralogicamente mais homogênea e sem microfissuramentos, apresentou os maiores índices de porosidade aparente e absorção d'água após o processo de impermeabilização. A rocha QZ<sub>2</sub> apresentou índices físicos intermediários antes e após o processo de impermeabilização.

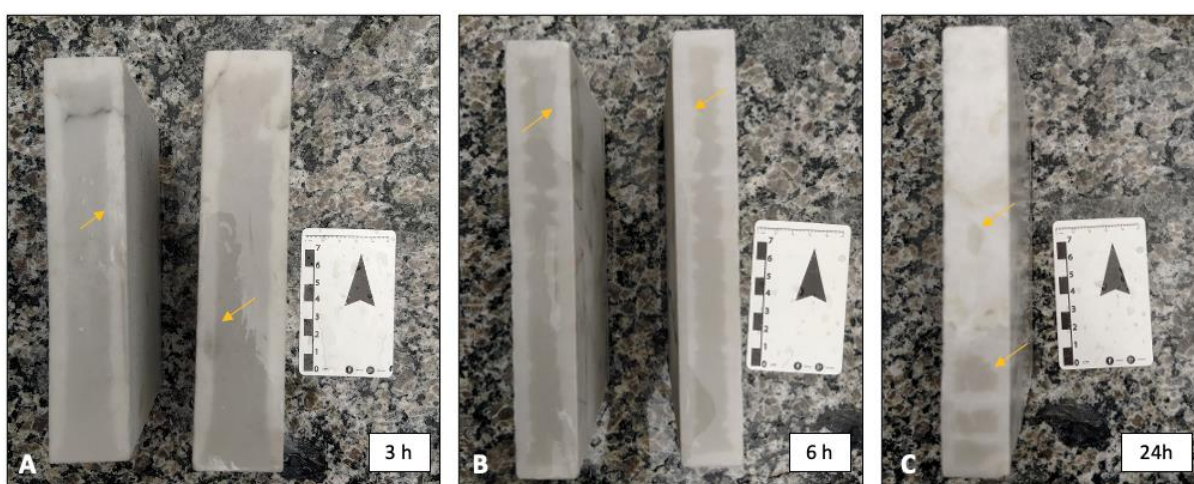
#### 4.2.3 Impermeabilização por submersão

Para a análise do resultado dos ensaios de impermeabilização por submersão dos três quartzitos utilizados nesta fase da pesquisa, as amostras foram quebradas e molhadas em água para uma análise visual da profundidade que o produto impermeabilizante atingiu no substrato da rocha. A coloração acinzentada e o aspecto molhado do núcleo das amostras correspondem a parte em que a pedra se encontrava sem proteção, sendo as bordas a região impermeabilizada, que não absorveu água e preservou a coloração mais clara.

#### 4.2.4 Resultados para Sequência 1

Os resultados para a impermeabilização dos quartzitos QZ<sub>1</sub> e QZ<sub>2</sub> com o produto hidro-oleofugante “Max Protection Plus” são mostrados na Figura 49 A, B e C, que foram submersas nos tempos de imersão de 3 horas. O quartzito QZ<sub>3</sub> não participou desta bateria de testes visto que ainda não havia sido disponibilizado pela empresa parceira.

Figura 49 - (A) Quartzito QZ<sub>2</sub> impermeabilizado sob pressão por 3 horas, (B) quartzito QZ<sub>1</sub> impermeabilizado sob pressão por 6 horas e quartzito QZ<sub>1</sub> impermeabilizado sob pressão durante 24 horas de ensaio



Fonte: Autora (2021).

As regiões em destaque pelas setas amarelas mostram a profundidade da penetração do impermeabilizante nos quartzitos, estando mais claras nas bordas das amostras correspondendo à região que não absorveu água. Esta região possui de 3 a 5 milímetros de espessura. Nota-se um aumento da profundidade de penetração do impermeabilizante no substrato dos quartzitos com a evolução do tempo de ensaio, estando a amostra submetida a 24 horas de testes a que demonstrou estar protegida quase que totalmente.

#### 4.2.5 Resultados para Sequência 2 de impermeabilização

Nesta sequência de testes, foi realizada a submersão de uma amostra de cada quartzito no impermeabilizante hidrofugante “Stone Guard Acqua”, sem utilizar pressão, durante os tempos de 30 minutos e 1 hora. A Figura 50 mostra os quartzitos QZ<sub>1</sub>, QZ<sub>2</sub>, QZ<sub>3</sub> submersos durante o tempo de 30 minutos, sob pressão atmosférica.



Figura 50 - Amostras dos quartzitos QZ<sub>1</sub>, QZ<sub>2</sub> e QZ<sub>3</sub> após 30 minutos submersos em hidrofugante



Fonte: Autora (2022).

A Figura 51 mostra as amostras dos quartzitos QZ<sub>1</sub>, QZ<sub>2</sub> e QZ<sub>3</sub> quebrados após 30 dias de cura da impermeabilização por 60 minutos de imersão.

Figura 51 - Amostras quebradas após 30 dias de teste de submersão em hidrofugante durante 1 hora



Fonte: Autora (2022).

Para os três quartzitos testados, foi possível notar um aumento na profundidade de penetração do impermeabilizante no substrato da rocha quando comparado aos primeiros 30 minutos de teste. O quartzito QZ<sub>1</sub> foi o que apresentou maior

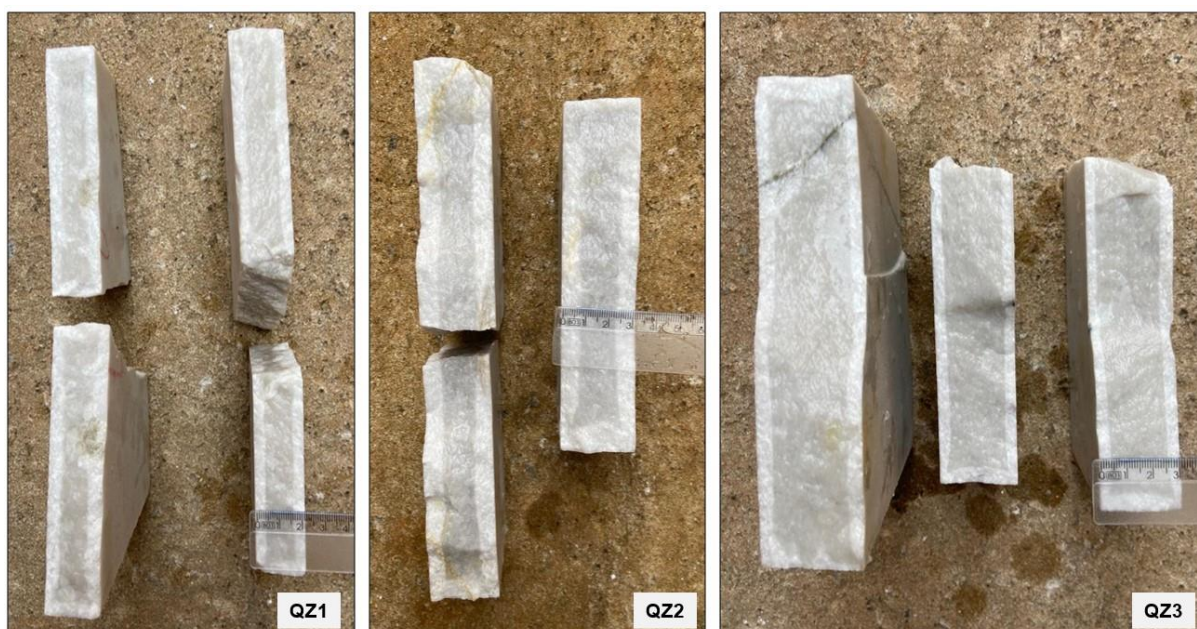


profundidade de penetração do impermeabilizante no substrato da rocha, passando de 2 milímetros de profundidade para aproximadamente 5 milímetros para algumas regiões das amostras.

#### 4.2.6 Resultados para a sequência 3 de impermeabilização

Nesta última sequência de testes, uma amostra de cada quartzito foi submersa no hidrofugante durante os tempos de 1 hora (Figura 52), 3 horas (Figura 53), 6 horas (Figura 54) e 12 horas (Figura 55) sob pressão de 7 bar. Após 30 dias de cura, as amostras foram quebradas para análise da profundidade de penetração do impermeabilizante.

Figura 52- Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 1 hora sob pressão



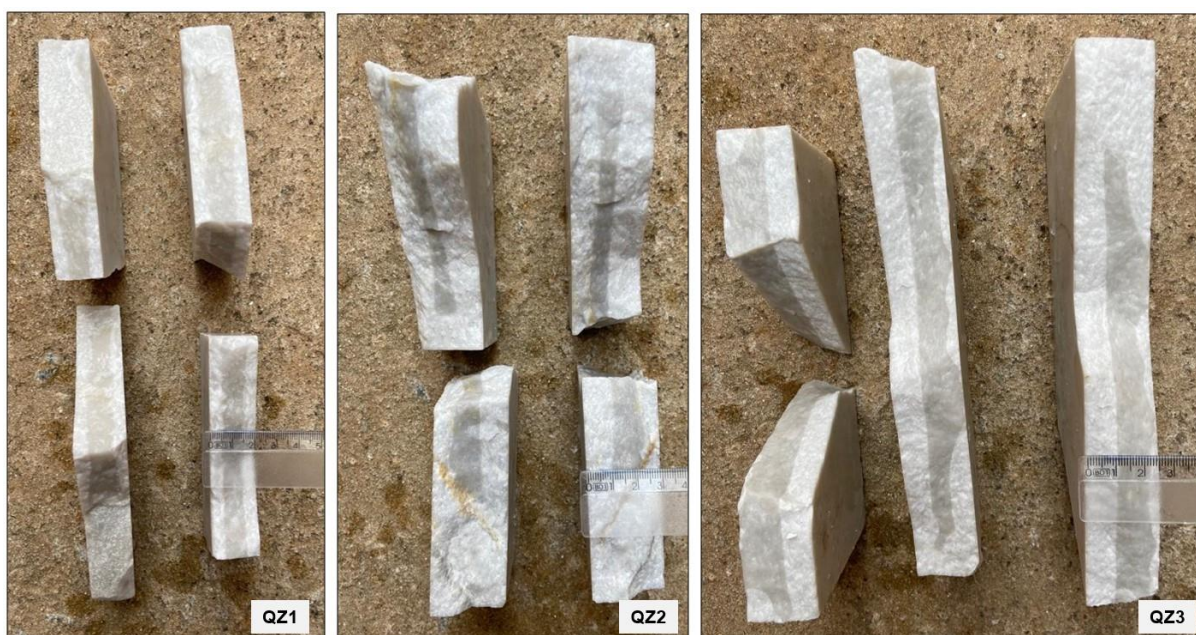
Fonte: Autora (2022).

Nota-se que o quartzito QZ<sub>2</sub> foi o que apresentou maior profundidade de penetração do impermeabilizante no substrato, protegendo de forma homogênea as bordas até o núcleo da amostra, por aproximadamente meio centímetro. As amostras dos quartzitos QZ<sub>1</sub> e QZ<sub>3</sub> também absorveram de forma homogênea o impermeabilizante, atingindo aproximadamente meio centímetro de profundidade.

Aumentando o tempo de teste, a Figura 53 apresenta o resultado da impermeabilização pelo tempo de 3 horas de imersão. Comparando com as amostras imersas no tempo de 1 hora, percebe-se um aumento da profundidade de penetração

do impermeabilizante, principalmente para os quartzitos QZ<sub>2</sub> e QZ<sub>3</sub>, ambos atingindo aproximadamente um centímetro de profundidade. Em algumas partes das bordas da amostra do quartzito QZ<sub>1</sub>, QZ<sub>2</sub> e QZ<sub>3</sub> percebe-se que o impermeabilizante protegeu contra absorção de água em toda a espessura da amostra.

Figura 53 - Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 3 horas sob pressão



Fonte: Autora (2022).

A Figura 54 apresenta os resultados obtidos para a impermeabilização durante o tempo de 6 horas de imersão. Novamente notou-se que ao aumentar o tempo de submersão sob pressão das amostras, o impermeabilizante atingiu maiores profundidades no substrato dos quartzitos. Para este teste, é possível observar que o quartzito QZ<sub>1</sub> apresentou o melhor resultado no que diz respeito a absorção do impermeabilizante.



Figura 54 - Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 6 horas sob pressão



Fonte: Autora (2022).

As amostras que foram submersas pelo tempo de 12 horas sob 7 bar de pressão estão sendo mostradas na Figura 55. Para os quartzitos QZ<sub>1</sub> e QZ<sub>3</sub>, nota-se pouca diferença na profundidade de penetração do impermeabilizante quando comparado com as amostras submetidas à impermeabilização com 6 horas de imersão. Porém, analisando a amostra do quartzito QZ<sub>2</sub>, observa-se que o aspecto molhado no substrato da rocha já não é evidente como nas situações anteriores com menos tempo de imersão.

Figura 55 - Amostras quebradas após imersão em hidrofugante por 12 horas sob pressão



Fonte: Autora (2022).

Para os três quartzitos testados foi possível notar que quanto mais tempo as amostras ficaram submersas no produto impermeabilizante, maior foi a profundidade que o produto atingiu no substrato das amostras. Contudo, é importante observar que os resultados também são controlados pela variabilidade das amostras e sua rede de fraturas. Dependendo do quartzito, 3h e 6h apresentaram o mesmo resultado e, para outros, a proteção não foi uniforme nas espessuras.

#### 4.2.7 Resultados impermeabilização utilizando a técnica convencional

As amostras impermeabilizadas em uma das faces a partir da técnica convencional utilizando um rolo de espuma foram quebradas após 30 dias de cura para análise da profundidade atingida pelo impermeabilizante. É possível observar a partir das Figuras 56 (A e B), 57 (A e B) e 58 que o hidrofugante protegeu aproximadamente meio centímetro de espessura das amostras para os três quartzitos estudados. Observa-se que o quartzito QZ<sub>3</sub> foi o que menos absorveu o produto em sua superfície.

Figura 56 - A) Quartzito QZ<sub>1</sub> impermeabilizado sob a técnica convencional e B) amostra quebrada após 30 dias de cura



Fonte: Autora (2022).

Figura 57 - A) Quartzito QZ<sub>2</sub> impermeabilizado sob a técnica convencional e B) amostra quebrada após 30 dias de cura





Fonte: Autora (2022).

Figura 58 - A) Quartzito QZ<sub>3</sub> impermeabilizado sob a técnica convencional e B) amostra quebrada após 30 dias de cura



Fonte: Autora (2022).

Ao comparar estes testes de impermeabilização utilizando a técnica convencional com os testes realizados na câmara por submersão e pressão, nota-se uma diferença significativa no que diz respeito à profundidade de penetração do produto impermeabilizante no substrato dos quartzitos. O processo realizado na câmara se mostrou mais eficiente do que o convencional para aumentar a profundidade de penetração do impermeabilizante na rocha. De acordo com os resultados obtidos por Almeida (2021), a avaliação da repelência de líquidos sobre a superfície de rochas através dos ensaios de índices físicos bem como a medição do

ângulo de contato de uma gota de água sobre a superfície hidro fugada são testes balizadores para a definição do desempenho da impermeabilização.

## 5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa visou contribuir para ampliar o conhecimento técnico dos produtores de rochas, bem como dos profissionais de arquitetura, com relação a essa matéria prima natural amplamente utilizada na construção civil que é a rocha ornamental.

Os resultados da primeira fase mostraram que, na maior parte dos testes, o polimento sob reduzidas vazões de água resultou em maiores valores de brilho, porém estes valores se mostraram bem próximos entre si. Sugere-se novos ensaios utilizando o equipamento S-PRO com menores vazões de água para analisar a influência desta variável na qualidade final do polimento. Além disso, alguns trabalhos científicos indicam que a velocidade de rotação do cabeçote não é alterada nas politrizes, sendo esta também uma variável importante do processo, podendo influenciar no gasto de energia e na qualidade final de brilho das chapas de rocha. O S-PRO se mostrou eficiente para análise do sistema tribológico que envolve a rocha, o processo de polimento e suas variáveis operacionais, como a vazão de água, a temperatura, a velocidade de rotação do cabeçote de polimento e o tipo de rocha que está sendo beneficiado, podendo contribuir para o processo industrial de beneficiamento destes materiais. Por fim, conclui-se que é possível reduzir a quantidade de água utilizada no estágio de polimento das chapas de rochas ornamentais sem influenciar na qualidade final de brilho destas superfícies. Tal fato corrobora para um aumento da competitividade da indústria brasileira de rochas ornamentais no cenário mundial.

No que tange os resultados da fase de impermeabilização dos quartzitos utilizando a nova técnica de imersão e pressão, ao analisar os resultados dos ensaios observa-se que o processo se mostrou eficiente para aumentar a profundidade de penetração e conseqüentemente aumentar a proteção de placas de quartzito contra absorção de água. Observou-se que entre os tempos de 6 horas e 12 horas de imersão das amostras houve leve aumento da absorção do hidrofugante pelo substrato dos quartzitos, permitindo inferir que com 6 horas de imersão já se pode obter bons resultados no processo de impermeabilização dos três quartzitos. A

câmara desenvolvida para este doutoramento se mostrou eficiente para aumentar a proteção das rochas estudadas em comparação com o que é usualmente utilizado pelo setor de rochas ornamentais. Tal constatação permite inferir que o próximo passo tecnológico em relação ao dispositivo criado nesta pesquisa é dar subsídios técnicos para o desenvolvimento de um equipamento em escala industrial para a impermeabilização das chapas, contribuindo para uma maior proteção da rocha, aumentando assim a vida útil destas superfícies.

Este é um estudo multidisciplinar que teve como maior desafio a compilação de várias áreas de conhecimento, fazendo interface com a Arquitetura, a Engenharia de Minas, a Geologia, a Química e a Engenharia de Produção. Foi necessário mesclar os conhecimentos destas disciplinas a fim de sistematizar um método de abordagem que abrangesse tais áreas, mostrando a importância da multidisciplinaridade para se ter uma visão mais holística dos fenômenos que ocorrem na interação de vários produtos e processos com a matéria prima natural que é a rocha ornamental.

O enfoque da pesquisa foi voltado para a agregação de valor a partir de aspectos de sustentabilidade para o setor de rochas ornamentais, visto que quanto mais sustentável for uma cadeia produtiva, maior a sua participação no mercado e sua importância para gerações futuras. A preservação dos recursos naturais está em sinergia com os ditames da sustentabilidade e da Economia Circular. Para isto, fazem-se necessárias informações com embasamento científico para argumentar, a partir de análises de Ciclo de Vida, a efetiva participação de determinado setor industrial na sustentabilidade do planeta.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS<sup>1</sup>

ALMEIDA, Phillipe Fernandes de; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio da. Avaliação da eficiência do tratamento de impermeabilização de rochas quartzíticas: um estudo de caso. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais Informe 05/2018**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://abirochas.com.br/informes-2018/>>. Acesso em: 19 set. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas ornamentais em 2018**. Brasília, 2019. Disponível em: [https://abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2018/06/Informes/Informe\\_01\\_2019\\_Balanco\\_2018.pdf](https://abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2018/06/Informes/Informe_01_2019_Balanco_2018.pdf). Acesso em: 19 set. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período Janeiro-Março de 2020**. Brasília, 2020. Disponível em: <[https://abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2019/04/Informe\\_02\\_2019\\_1Trimestre.pdf](https://abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2019/04/Informe_02_2019_1Trimestre.pdf)>. Acesso em 16 set. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras e Rochas ornamentais no primeiro trimestre de 2021**. Brasília, 2021. Disponível em: <[https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/07/Informe-03\\_2021-Exportac%CC%A7o%CC%83es-1\\_trimestre-1.pdf](https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/07/Informe-03_2021-Exportac%CC%A7o%CC%83es-1_trimestre-1.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de ornamentação e revestimento em 2021**. Informe 01/2022. Disponível em: [https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Informe-01\\_2022-Exportacoes-2021.pdf](https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Informe-01_2022-Exportacoes-2021.pdf). Acesso em: 21 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Balanco das exportações e importações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de revestimento no 1º trimestre de 2022**. Informe 02/2022. Disponível em: [https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/05/Informe\\_02\\_2022\\_Exportacoes\\_1\\_Trimestre.pdf](https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/05/Informe_02_2022_Exportacoes_1_Trimestre.pdf). Acesso em: 07 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15012 (2013): **Rochas para revestimentos de edificações**: Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.3p.

---

<sup>1</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15844: **Rochas para revestimento**: Requisitos para granitos. Rio de Janeiro. 2015.3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15845-1: **Rochas para revestimentos**: Métodos de ensaio. Parte 1: Análise petrográfica. Rio de Janeiro, 2015.4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15845-2: **Rochas para revestimentos**: Métodos de ensaio. Parte 2: Determinação de densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água. Rio de Janeiro, 2015.4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2845: **Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

BIANCO, I. **Life Cycle Inventory of cutting technologies in the ornamental stone supply chain**. 2017. 221p. Tese de doutorado. Instituto Politécnico de Torino. Itália. 2017.

CAPPELLETTI, G.; FERMO, P.; CAMILONI, M. **Smart hybrid coatings for natural stones conservation**. Progress in Organic Coatings, v. 78, p.511–516, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-283-9.00015-4>.

CASTRO, Nuria Fernández et al. Inventário do ciclo de vida das rochas ornamentais. **IX Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste' CETEM**, p. 284-297, 2016.

CENTRO BRASILEIRO DOS EXPORTADORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Relatório de exportações de rochas ornamentais**. Disponível em: <<https://centrorochas.org.br/website/wp-content/uploads/2023/01/Relatorio-de-Exportacoes-Dezembro-2022.pdf>>2022. Acesso em: 30 jan. 2023.

CHEN, Xiaolin et al. The influence of material characteristics and environmental circumstances on the efficiency of water repellent treatments of historic facades. **Construction and Building Materials**, v. 386, p. 131610, 2023.

CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E. D. P. Guia de Aplicação de Rochas em Revestimentos. Brasília, 2 ed. [ABIROCHAS], 2020.

DA SILVA, Claudia Cristina. Rochas na construção civil: tipos, aplicações e critérios de seleção. 2014.

DE FERRI, Lavinia et al. Study of silica nanoparticles–polysiloxane hydrophobic treatments for stone-based monument protection. **Journal of Cultural Heritage**, v. 12, n. 4, p. 356-363, 2011.

DE OLIVEIRA MENEZES, Sebastião. Rochas: manual fácil de estudo e classificação. **Oficina de Textos**, 2013.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais e de Revestimento: Estudo por meio de Ensaio e Análises e das Patologias associadas ao uso**. São Paulo: IPT. 2000.

GALAN, C. G.; RODRIGUES, E. P.; SILVEIRA, G. Proposta de metodologia para avaliação de desempenho de produtos químicos hidro óleo repelentes utilizados em rochas ornamentais, 2001.

JERRAM, Dougal; PETFORD, Nick. Descrição de Rochas Ígneas-: Guia Geológico de Campo. Bookman Editora, 2014.

LETTIERI, M.; MASIERI, M.; MORELLI, A.; PIPOLI, M.; FRIGIONE, M. **Oleo/Hydrophobic coatings containing nano-particles for the protection of stones materials having different porosity**. Coatings, v.8, p. 429, 2018.

LUCHINI, L., FRANZONI, E., SASSONI, E. Assessment of consolidants and water repellents effectiveness on historical porous sandstones: A laboratory study. Construction and Building Materials, 2020

MARANHÃO, F.; LOH, K. U. O uso de hidrofugantes em materiais de construção porosos. Techne: **Revista de Tecnologia da Construção**, v. 155, p. 4-7, 2010.

MAURO, Giovanna Callegari. Estudo do processo produtivo dos granitos no Estado do Espírito Santo objetivando a aplicação destes na construção civil. 2011.

MORAES, I. D. Mármore e granito: lavra, beneficiamento e tratamento de resíduo. Rio de Janeiro: SBRT, 2022.

NOVAES, Rodrigo Carneiro; VALE, Daniel. AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE MANCHA DE OXIDAÇÃO POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE SOLUÇÃO REMOVEDORA DE MANCHAS EM QUARTZITO VANCOUVER. **Revista Ifes Ciência**, v. 9, n. 2, p. 01-13, 2023.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos et al. Geologia de engenharia. 1998.

PAZETO, Abiliane de Andrade. Caracterização experimental de soluções de reforço para placas de rochas ornamentais. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RANERI, S.; BARONE, G.; MAZZOLENI, P.; ALFIERI, I.; BERGAMONTI, L.; DE KOCK, T.; CNUDE, V.; LOTTICI, P.P.; LORENZI, A.; PREDIERI, G.; RABOT, E.; TEIXEIRA, J. **Efficiency assessment of hybrid coatings for natural building stones**: Advanced anti multi-scale laboratory investigation. Construction and Building Materials, v.180, p. 412–424, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.289>.

RICARDO, A. M. Estudo de alterabilidade de rochas como ferramenta para a restauração de monumentos pétreos. 2018.

RICARDO, A. M. Caracterização tecnológica das rochas que recobrem o monumento do Cristo Redentor como ferramenta de auxílio ao restauro. 2010.

RODRIGUES, R. M.; JÚNIOR, A. S. S.; LIMA, E. E. P. Erros, diagnósticos e soluções de impermeabilização na construção civil. **Revista InterScientia**, v. 4, n. 2, p. 19-33, 2016.

SIERRA-FERNANDEZ, L. S.; GOMEZ-VILLALBA, M.E.; RABANAL, R. **New nanomaterials for applications in conservation and restoration of stone materials: a review**. Construction and Building Materials, v.67, 107p, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2017.07616>

SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio da et al. Contribuições para o avanço tecnológico da fase de polimento de rochas ornamentais. 2017.

SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio da; VIDAL, Francisco Wilson Hollanda; SOUZA, Júlio César. Beneficiamento de rochas ornamentais, 2014.

SILVEIRA, Leonardo Luiz Lyrio da. Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVEIRA, L. L.; BOLONINI, T. M. **Polimento de rochas ornamentais, aspectos tribológicos**. 2016.

STRECKEISEN, A. **To Each plutonic rock its proper name**. **Earth Science Reviews**, v.12, n.1, p.1-33, 1976.