UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
Programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo
Área de concentração: arquitetura, urbanismo e tecnologia

PHILLIPE FERNANDES DE ALMEIDA

**ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO SISTEMA DE POLIMENTO COM
ABRASIVOS À BASE DE RESINA DE MAMONA PARA
ACABAMENTO SUPERFICIAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

SÃO CARLOS

2019

PHILLIPE FERNANDES DE ALMEIDA

**ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO SISTEMA DE POLIMENTO COM
ABRASIVOS À BASE DE RESINA DE MAMONA PARA
ACABAMENTO SUPERFICIAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura
e Urbanismo de São Carlos, como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Doutor
em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

ORIENTADOR: EDUVALDO PAULO SICHIEIRI

SÃO CARLOS

2019

VERSÃO CORRIGIDA

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o programa

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU
ELETRONICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE
CITADA A FONTE

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

Fernandes de Almeida, Phillipe

FAL447 ANÁLISE TRIBOLÓGICA DO SISTEMA DE POLIMENTO COM

a ABRASIVOS À BASE DE RESINA DE MAMONA PARA
ACABAMENTO SUPERFICIAL DE ROCHAS ORNAMENTAIS /
Phillipe Fernandes de Almeida; orientador
Eduvaldo Paulo Sichieri; co-orientador
Leonardo Luiz Lyrio da Silveira. -- São
Carlos, 2019.

153 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-
Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Teoria
e História da Arquitetura e do Urbanismo --
Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Rochas Ornamentais. 2. Polimento. 3.
Resina Poliuretana à base de óleo de mamona.
4. Carbetto de Silício . I. Paulo Sichieri,
Eduvaldo , orient. II. Luiz Lyrio da
Silveira, Leonardo, 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

Candidato(a): **Phillipe Fernandes de Almeida**

Título da tese: "Análise tribológica do sistema de polimento com abrasivos à base de mamona para acabamento superficial de rochas ornamentais".

Data da defesa: **21/02/2019**

Orientador: Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri
(IAU/USP)

Não votante

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos
(IAU/USP)

APROVADO

Prof. Dr. Bruno Luís Damineli
(IAU/USP)

APROVADO

Dra. Abiliane Andrade Pazeto
(CETEM/MCTIC-NERS)

Aprovado

Prof. Dr. Antônio Carlos Artur
(UNESP/Rio Claro)

Aprovado

Prof. Dr. Sergio Trajano Franco Moreiras
(UEM)

APROVADO

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri, por todo apoio, incentivo e confiança depositada no desenvolvimento da pesquisa, sendo uma peça fundamental durante todas as etapas do doutorado.

Ao meu coorientador Dr Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, por todo o apoio e incentivo para o desenvolvimento da tese e durante a estadia no CETEM/NRES, pela amizade e companheirismo cultivados ao longo dos últimos anos.

À minha família, Vera, Prudente, Raphael, Anita e Renata, pelo amor incondicional compartilhado e incentivo em todos os momentos da vida.

Ao Centro de Tecnologia Mineral, na pessoa do Dr. Francisco Hollanda, por todo apoio dado para o desenvolvimento da tese no CETEM e pela amizade iniciada no período de estadia no Núcleo Regional do Espírito. À Núria Fernandez, pela amizade, companheirismo e incentivo dado para meu desenvolvimento profissional, desde a primeira estadia em Cachoeiro de Itapemirim.

À Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, nas pessoas do presidente Reinaldo Dantas Sampaio e do geólogo Cid Chiodi Filho, pelo apoio financeiro e incentivo para a realização tese.

Aos técnicos do CETEM/NRES, Jefferson, Millena, Elton, Carlos Eduardo, Leonardo Cattabriga, por todo auxílio disponibilizado durante a realização da etapa experimental do doutorado. Aos demais servidores do Núcleo, Eunice, Cintia, Eymard, Isabela, Vinícius, Tico e Rosi. Aos demais servidores do Núcleo, pelo carinho e amizade iniciada em Cachoeiro de Itapemirim

Aos técnicos do laboratório de construção civil do Instituto de Arquitetura de São Carlos, Sergio e Paulo pelo auxílio no desenvolvimento da parte experimental da tese no período de estadia no Instituto. As secretárias de pós graduação do IAU, Mara e Flávia, por todo o auxílio na parte burocrática da tese e o carinho no trabalho prestado.

Aos técnicos do laboratório de beneficiamento de rochas ornamentais do Instituto Federal do Espírito Santo, Murilo, Tcharlis e Taís, por todo auxílio prestado durante a etapa experimental de polimento, sendo de fundamental importância para a conclusão da tese.

Ao Donizete, por todo incentivo, consultoria e disponibilização das resinas para a realização da etapa experimental do trabalho. Ao Klebson, Felipe e demais servidores do Grupo Saint-Gobain, pela disponibilização materiais para a pesquisa.

Aos amigos de São Carlos, Rafael, Lívia, Loide, Fernando, Júlia, Danilo, Rogério, Felipe, Dayane e Leonardo, pela amizade desenvolvida ao longo das vivências em São Carlos.

Aos amigos Wana e Victor Ponciano e Victor Baldan, pelo apoio fundamental na realização das primeiras etapas de laboratório e nos incentivos durante o desenvolvimento da tese.

À Dra. Abiliane Andrade, pela amizade, incentivo e força durante a estadia em São Carlos e em Cachoeiro de Itapemirim.

Aos amigos da família flor de lótus, por todo companheirismo e ensinamentos valiosos para além das vivências em São Carlos.

RESUMO

Almeida, P. F. **Análise tribológica do sistema de polimento com abrasivos à base de resina de mamona para acabamento superficial de rochas ornamentais.** 2018. 152 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

O polimento das rochas ornamentais é um processo realizado com o uso de rebolos abrasivos que desgastam a superfície da chapa até atingir uma intensidade de brilho comercialmente desejável. Esse sistema pode ser abordado, de forma racional, pelo enfoque dado pela Tribologia, considerando o atrito e o desgaste como resultado direto da interação entre as rochas e ferramentas abrasivas, de acordo com cada situação operacional adotada. Essa abordagem foi utilizada na presente pesquisa, com o objetivo de tentar validar a metodologia de desenvolvimento de um novo abrasivo de polimento, composta pela resina poliuretana à base óleo de mamona (*Ricinus Comunnis L.*), cargas sólidas e com o carbeto de silício verde como elemento de corte. Foram avaliados o desempenho destes rebolos frente ao polimento com os rebolos industriais em uma politriz semiautomática, pela análise da taxa de desgaste das peças em função da qualidade do brilho final do polimento. Para isto, foram adotadas condições operacionais que não são praticadas pela indústria, como a variação da velocidade de rotação dos rebolos e variação da vazão de água no polimento. Os resultados mostraram que a proposta de incorporação do carbeto de silício verde como elemento de corte nas matrizes à base resina de mamona à não promoveu um bom desempenho do rebolo, porém com taxas de desgaste equivalentes às matrizes comerciais à base de resina epóxi, demonstrando o potencial de utilização desta resina na fabricação de rebolos abrasivos diamantados. A variação dos parâmetros operacionais de polimento permitiu saber que os melhores resultados se deram com a redução da vazão de água no polimento de 30 para 15 litros, apresentando maiores valores de brilho e com um menor desgaste dos rebolos. Esses dados indicam que esse parâmetro pode ser aplicado na indústria com consideráveis ganhos ambientais para a cadeia produtiva de rochas ornamentais. Neste âmbito, a utilização de uma ferramenta ecoeficiente, comprovadamente atóxica, no polimento de rochas ornamentais pode ser um grande passo para a obtenção de certificados internacionais de comércio de produtos com forte apelo ambiental.

Palavras chave: Rochas Ornamentais, Polimento, Resina Poliuretana à base de óleo de mamona, Carbeto de silício.

ABSTRACT

Almeida, P. F. **Tribological analysis of the polishing system with fickerts based on castor oil resin for dimension stones slabs finishing.** 2018. 152 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

The polishing of dimension stones is a process carried out using abrasive fickerts which wear the surface of the slab to achieve a commercially desirable brightness intensity. This system can be approached in a rational way by the concepts given by Tribology, considering the friction and wear as a direct result of the interaction between the stone and the abrasive tools, according to each operational situation adopted. This approach was used in the present research, aiming the validation of a methodology for development a new polishing tool, composed of polyurethane resin based on the castor oil (*Ricinus Comunnis L.*), solid fillers and the green silicon carbide as cutting element. The performance of these new abrasive fickerts compared with the industrial ones was evaluated in a semiautomatic polishing machine by the analysis of the wear rate of the pieces as a function of the final gloss quality of the polished surface. For this purpose, operating conditions not practiced in the industry was adopted, as the rotational speed of the abrasive tools and the water flow variation. The results showed that the incorporation of the green silicon carbide as a cutting element in the matrix based on the resin of castor oil did not promote a good performance of the tool, but with wear rates equivalent to the commercial epoxy-resin fickerts, which may indicate a potential of using the non-toxic matrix with diamond as cutting element instead. The variation of the operational parameters of polishing allowed to know that the best results were obtained with the reduction of the water flow in the polish from 30 to 15 liters/minute, which presented higher values of gloss and with a lower wear rate of the tools, indicating that this parameter can be applied in the industry with considerable environmental gains for the dimension stone production chain. In this context, the use of a non-toxic and eco-efficient tool in the polishing of dimension stones can be a great step towards obtaining international certificates of trade in products with strong environmental appeal.

Key-words: Dimension stones, Polishing, Castor oil resin, Silicon carbide

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– PIRÂMIDES DE GIZÉ PRÓXIMAS A CAIRO/EGITO CONSTRUÍDAS EM PEDRA CALCÁRIA, 2.550 A. C – FONTE: IEL, 2013.....	106
FIGURA 2– RUÍNAS DA ACRÓPOLE EM ATENAS, CONSTRUÍDA EM PEDRA CALCÁRIA, 447- 438 A.C, COM DESTAQUE PARA O PATHERNON. FONTE: IEL, 2013.....	107
FIGURA 3– RANKING MUNDIAL DOS PRODUTORES DE ROCHAS ORNAMENTAIS EM 2017. FONTE: MONTANI (2018).....	109
FIGURA 4 – EVOLUÇÃO PERCENTUAL DE FATURAMENTO DAS EXPORTAÇÕES BRASILEIRAS DE ROCHAS BRUTAS E PROCESSADAS DE 1998 A 2015. RP - ROCHAS PROCESSADAS; RB – ROCHAS BRUTAS. FONTE: ABIROCHAS, 2018A.....	112
FIGURA 5 – GRUPO DAS ROCHAS SILICÁTICAS: (A) CHARNOCKITO VERDE PAVÃO; (B) GABRO PRETO SÃO GABRIEL; (C) SIENITO (AZUL BAHIA); (D) MONZOGRANITO GIALLO FIORITO; (E) ALBITA GRANITO BRANCO CEARÁ; E (F) SIENOGANITO VERMELHO BRASÍLIA. FONTE: ABIROCHAS, 2018B.....	117
FIGURA 6 – GRUPO DAS ROCHAS XISTOSAS: (A) MATRIX E (B) METEORO. FONTE: ABIROCHAS, 2018B.	117
FIGURA 7 – GRUPO DAS ROCHAS GNAISSO-MIGMATÍTICAS: (A) COPACABANA E (B) GOLDEN THUNDER. FONTE: ABIROCHAS, 2018B	117
FIGURA 8 – PEGMATITOS: (A) DELICATUS GOLD E (B) BIANCO ANTICO. FONTE: ABIROCHAS, 2018B.	118
FIGURA 9 – GRUPO DAS ROCHAS CARBONÁTICAS: (A) MÁRMORE BRANCO CACHOEIRO; (B) MÁRMORE BRANCO PARANÁ; (C) TRAVERTINO BEGE BAHIA; (D) MÁRMORE ÔNIX; (E)ALABASTRO; E (F) PEDRA CARIRI. FONTE: ABIROCHAS, 2018B	119
FIGURA 10 – GRUPO DAS ROCHAS SILICOSAS: (A) QUARTZITO AZUL MACAÚBAS; (B) QUARTIZITO AZUL IMPERIAL; (C) QUARTIZITO PEDRA SÃO TOMÉ; (D) ALABASTRO; (E) VIA ÁPPIA (F) QUARTZO BIANCO. FONTE: ABIROCHAS, 2018B	120
FIGURA 11 – ROCHAS ARTIFICIAIS: (A) RED LIGHTS; (B) WHITE LIGHTS; (C) ABSOLUTE WHITE; (D) ABSOLUTE BLACK; (E) VANGUARD CARRARA (F) MODERN BEIGE. FONTE: TOPZONE, 2019 ...	121
FIGURA 12 – REALIZAÇÃO DO DESMONTE DO MACIÇO COM DETALHE PARA AS TÉCNICAS ADOTADAS: (A) CORTE DO MACIÇO POR MEIO DE FIO DIAMANTADO E (B) DETALHE DO FIO DIAMANTADO SEPARANDO AS FACES DO MACIÇO. FONTE: (A) MARINI QUARRIE GROUP, 2005 APUD REGADAS, 2006; (B) JDK, 2018	123
FIGURA 13 – REALIZAÇÃO DO DESMONTE DO MACIÇO COM DETALHE PARA AS TÉCNICAS ADOTADAS: (A) CORTE DO MACIÇO POR PERFURAÇÃO E (B) E DETALHE DOS BLOCOS SUBDIVIDIDOS. FONTE: MARCON ET AL., 2012.	124

FIGURA 14 – SERRAGEM DOS BLOCOS EM TEAR MULTILÂMINA: (A) VISTA FRONTAL DO EQUIPAMENTO E (B) DETALHE PARA A ADIÇÃO DA LAMA ABRASIVA PARA A SERRAGEM DOS BLOCOS. FONTE: O AUTOR	125
FIGURA 15 – SERRAGEM DOS BLOCOS EM TEARES MULTIFIO: (A)VISTA FRONTAL DO EQUIPAMENTO E (B) DETALHAMENTO DO CORTE REALIZADO PELOS FIOS DIAMANTADOS. FONTE: (A) BRETON E (B) VENTOVAG.	125
FIGURA 16 – PÉROLA DIAMANTADA FONTE: CARANASSIOS & PINHEIRO, 2004.	126
FIGURA 17 – POLITRIZ SEMIAUTOMÁTICA DE 1 SATÉLITE. FONTE: O AUTOR.....	128
FIGURA 18 – POLITRIZ SEMIAUTOMÁTICA DE 3 SATÉLITES. FONTE: CIMEF, 2018.....	128
FIGURA 19 – MOVIMENTOS REALIZADOS PELAS POLITRIZES SEMIAUTOMÁTICAS: CONTORNO; 2) ZIG ZAG; 3) TRANSVERSAL; 4) LONGITUDINAL. FONTE: METAFILL, 2012 APUD CAMARGO, 2013 ...	129
FIGURA 20– POLITRIZ AUTOMÁTICA MULTICABEÇAS COM ESTEIRA TRANSPORTADORA. FONTE: BRETON, 2018	129
FIGURA 21 – DINÂMICA DE MOVIMENTAÇÃO DO SATÉLITE PARA POLIMENTO DE ROCHAS GRANÍTICAS FONTE: SILVEIRA & BOLONINI (2016).	130
FIGURA 22 – EXEMPLO DE SATÉLITE PARA POLIMENTO DE ROCHAS CARBONÁTICAS: (A) DETALHE DA FIXAÇÃO DOS REBOLOS DO TIPO FRANKFURT, (B) VISTA LATERAL DO SATÉLITE E (C) INTERAÇÃO ENTRE REBOLO E ROCHA. FONTE: SILVEIRA ET AL., 2018.	131
FIGURA 23 – POLITRIZ AUTOMÁTICA DE BANCADA FIXA. BRETON, 2018.	132
FIGURA 24 – PROCESSO DE RESINAGEM DAS CHAPAS. FONTE: O AUTOR	134
FIGURA 25 – PROCESSO DE TELAGEM DAS CHAPAS FONTE: O AUTOR	135
FIGURA 26 – DETALHE DA CHAPA TELADA. FONTE: O AUTOR.....	135
FIGURA 27 – ABRASIVOS MAGNESIANOS PARA POLIMENTO DE GRANITOS (A) E ABRASIVOS <i>FRANKFURT</i> PARA POLIMENTO DE MÁRMORES(B). FONTE: COBRAL, 2013.	139
FIGURA 28 – ABRASIVOS RESINOIDES PARA POLIMENTO DE GRANITOS (A) E ABRASIVOS RESINOIDES <i>FRANKFURT</i> PARA POLIMENTO DE MÁRMORES(B). FONTE: COBRAL, 2013.....	139
FIGURA 29 – ABRASIVOS DIAMANTADOS METÁLICOS PARA POLIMENTO DE GRANITOS (A) E ABRASIVOS <i>FRANKFURT</i> METÁLICO PARA POLIMENTO DE MÁRMORES(B). FONTE: COBRAL, 2013.	140
FIGURA 30-. DESENHO ESQUEMÁTICO DOS QUATRO MODOS REPRESENTATIVOS DE DESGASTE (KATO, 2001APUD RADI ET AL., 2007).	141
FIGURA 31 - DIAGRAMA DOS PROCESSOS DE DESGASTE EM FUNÇÃO DO ELEMENTO INTERFACIAL E DO TIPO DE MOVIMENTO DAS INTERFACES (KATO, 2001APUD RADI ET AL., 2007).	143
FIGURA 32 - SPR – SIMULADOR DE POLIMENTO DE ROCHA: (À ESQUERDA) LAMINADORA PETROGRÁFICA UTILIZADA PARA CONFEÇÃO DE LÂMINAS DELGADAS E (À DIREITA) ADAPTAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO DO POLIMENTO DE ROCHAS: (A) TORRE ;(B) HASTE ; (C) PESO; (D) AMOSTRA DE ROCHA; (E) DISPOSITIVO PARA COLOCAÇÃO DE ABRASIVOS; (1) CHAVE GERAL;	

(2) DISPOSITIVO PARA SAÍDA DE ÁGUA; (3) REOSTATO; (4) MARCADOR DE TEMPO; (5) AMPERÍMETRO; (6) TACÔMETRO E; (7) MANGUEIRA D'ÁGUA. FONTE: SILVEIRA, 2007.....	144
FIGURA 33 - SPR –SIMULADOR DE POLIMENTO DE ROCHAS (SPR) COM DETALHE DA DISPOSIÇÃO DA ROCHA E DO PINO ABRASIVO. FONTE: SILVEIRA, 2017.	145
FIGURA 34 – RELAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE E VALORES DE BRILHO (HUANG ET AL., 2002).....	146
FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE E VALORES DE BRILHO (HUANG & XU, 2004).....	146
FIGURA 36 – RELAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE E VALORES DE BRILHO (YAVUZ ET. AL., 2011).....	147
FIGURA 37 – POLITRIZ SEMIAUTOMÁTICA COM AS ADAPTAÇÕES REALIZADAS: (1) - INVERSOR DE FREQUÊNCIA INSTALADO; 2 - PAINEL ELÉTRICO ORIGINAL DA POLITRIZ. FONTE: CAMARGO, 2013.	148
FIGURA 38 – SIMULADOR DE POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS - SPRO. FONTE: O AUTOR	149
FIGURA 39 – PERDA DE MASSA DOS JOGOS DE ABRASIVOS: MB – DIAMANTE PARA LIGAS METÁLICAS; RB – DIAMANTES PRÓPRIOS PARA LIGA RESINOIDE; D1 – LIGA VEGETAL MACIA; D2 LIGA VEGETAL DURA (LEITÃO E SILVEIRA, 2012).....	157
FIGURA 40 – ANÁLISE DE BRILHO DAS SUPERFÍCIES DE ROCHA SUBMETIDAS AO SPR COM ABRASIVOS VEGETAIS E EPÓXI DIAMANTADOS (LEITÃO E SILVEIRA, 2012).	157
FIGURA 41 – POLITRIZ SEMIAUTOMÁTICA REALIZANDO O POLIMENTO COM ABRASIVOS CONFECCIONADOS COM RESINA POLIURETANA DE MAMONA (LEITÃO E SILVEIRA, 2013)....	158
FIGURA 42– FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DAS PROPORÇÕES DAS CARGAS DE CARBETO DE SILÍCIO E CINZA DA CASCA DO ARROZ (ADAPTADO DE DORIGO E SILVEIRA, 2016).	159
FIGURA 43– ABRASÍMETRO <i>TABER</i> (A) MOLDES PARA CONFECCÃO DE CORPOS DE PROVA (B).....	160
FIGURA 44– CORPOS DE PROVA ENSAIADOS (DORIGO E SILVEIRA, 2017).	160
FIGURA 45 – RESULTADOS DE PERDAS DE MASSA DOS COMPOSTOS ELABORADOS COM RESINA DE MAMONA E CARGAS EM DIFERENTES PERCENTUAIS. NOTA-SE QUE A RESISTÊNCIA À ABRASÃO É MAIOR PARA OS ÚLTIMOS CORPOS DE PROVA, CONFECCIONADOS COM MAIOR QUANTIDADE DE CARGA, COMO DEMOSTRADO NA SELEÇÃO EM VERDE NO GRÁFICO. ADAPTADO DE DORIGO & SILVEIRA, 2017.	161
FIGURA 46 – RESULTADOS DE BRILHO OBTIDOS NO POLIMENTO COM OS DOIS TIPOS DE REBOLO ABRASIVO NA GRANULOMETRIA 600 <i>MESH</i> (DORIGO & SILVEIRA, 2017).....	162
FIGURA 47 – GRÁFICO DA PERDA DE MASSA ABRASIVA APÓS O ENSAIO DE POLIMENTO (DORIGO & SILVEIRA, OP CIT.).....	162
FIGURA 48 – RESINA POLIURETANA BI-COMPONENTE COMPOSTA PELO PRÉ-POLÍMERO (A) E PELO POLIOL (B).	165
FIGURA 49 – SÍLICA DA CINZA DA CASCA DO ARROZ UTILIZADA COMO CARGA.	166
FIGURA 50 – CARBETO DE SILÍCIO PRETO UTILIZADO COMO CARGA.	167
FIGURA 51 – CARBETO DE SILÍCIO VERDE UTILIZADOS COMO ELEMENTOS DE CORTE.	167

FIGURA 52 – MOLDE UTILIZADO PARA CONFEÇÃO DO REBOLO ABRASIVO (À ESQUERDA) E DISPOSITIVO DE ENCAIXE DO REBOLO NO SATÉLITE (À DIREITA).....	168
FIGURA 53 – MÉTODO UTILIZADO PARA A CONFEÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS: (A) EXTRAÇÃO DOS GASES LIBERADOS PELA REAÇÃO DA RESINA NO SISTEMA DE VÁCUO, (B) MISTURA DOS COMPONENTES (RESINA E CARGAS) E (C) PREENCHIMENTO DOS MOLDES DOS ABRASIVOS COM O COMPÓSITO.	170
FIGURA 54 – FINALIZAÇÃO DA MOLDAGEM DOS REBOLOS ABRASIVOS: (A) ENCAIXE DA TAMPA DO MOLDE, (B) MOLDE FECHADO E (C) ABRASIVOS DESENFORMADOS. NOTAR O INÍCIO DA EXPANSÃO NA IMAGEM B, INDICADO PELA SETA AMARELA.	170
FIGURA 55 – CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM CARGAS CONTENDO UMIDADE HIGROSCÓPICA (A) E CORPOS DE PROVA MOLDADOS COM CARGAS SUBMETIDOS À SECAGEM EM ESTUFA (B).	171
FIGURA 56 – IMAGEM DEMOSTRANDO A BOA DISPERSÃO DOS ELEMENTOS DE CORTE AO LONGO DA MATRIZ DO REBOLO, INDICADA PELAS SETAS EM VERMELHO.	171
FIGURA 57 – REBOLOS ABRASIVOS DE MAMONA EVIDENCIANDO O PROCESSO DE AFIAÇÃO DA PEÇA (À DIREITA).	172
FIGURA 58– (A) CONJUNTOS DE CORPOS DE PROVA CONFECCIONADOS E (B) REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EM UMA POLITRIZ SEMIAUTOMÁTICA INDUSTRIAL.....	174
FIGURA 59 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE POLIMENTO PARA OS CONJUNTOS DE CORPOS DE PROVA T1 E T2 NA ETAPA 60 <i>MESH</i>	175
FIGURA 60 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE POLIMENTO PARA OS CONJUNTOS DE CORPOS DE PROVA T1 E T2 NA ETAPA 120 <i>MESH</i>	175
FIGURA 61 – ETAPAS REALIZADAS PARA A CONFEÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS DE RESINA POLIURETANA DE MAMONA: (A) MISTURA DOS COMPONENTES DA RESINA; (B) EXTRAÇÃO DOS GASES GERADOS PELA REAÇÃO QUÍMICA ENTRE OS COMPONENTES NO SISTEMA À VÁCUO; (C) RESINA SEM A PRESENÇA DE BOLHAS E A CARGAS SÓLIDAS HOMOGENEIZADAS E (D) MISTURA MANUAL DO COMPÓSITO.	177
FIGURA 62 – ETAPAS REALIZADAS PARA A CONFEÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS DE RESINA POLIURETANA DE MAMONA: (A) PREENCHIMENTO DOS MOLDES DE CONFEÇÃO DO REBOLO E (B) FECHAMENTO DOS MOLDES COM DISPOSITIVO DE ENCAIXE DO REBOLO AO SATÉLITE.	178
FIGURA 63 – CORPOS DE PROVA ELABORADOS PARA A NOVA CAMPANHA DE ENSAIOS NO SIMULADOR DE POLIMENTO DE ROCHAS.....	178
FIGURA 64 – COMPORTAMENTO EXPANSIVO DO REBOLO ABRASIVO.	179
FIGURA 65 –PROJETO DO MOLDE PARA CONFEÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS: (A) PROJETO DA TAMPA DO MOLDE E (B) BASE DO MOLDE.	179
FIGURA 66 –NOVO MOLDE PARA CONFEÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS.....	180
FIGURA 67 –PROCEDIMENTO DE PESAGEM (A) E HOMOGENEIZAÇÃO DOS ADITIVOS E POLIOL (B) E ADIÇÃO DAS CARGAS SÓLIDAS À MISTURA.	181

FIGURA 68 – COMPONENTES DO COMPÓSITO PRONTO PARA A MISTURA: (A) POLIOL PREPARADO COM CARGAS E ADITIVOS (CTAB, DBTL E CARGAS SÓLIDAS) E PRÉ-POLÍMERO (B).	181
FIGURA 69 –NOVO MOLDE PARA CONFECCÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS: (A) PROJETO DA TAMPA DO MOLDE, (B) BASE DO MOLDE E (C) PEÇA EM PROCESSO FINAL DE USINAGEM.	182
FIGURA 70 – ABRASIVOS CONFECCIONADOS COM A NOVA ROTA DE MOLDAGENS: (A) ABRASIVOS MOLDADOS COM CARGAS SUBMETIDAS À SECAGEM EM ESTUFA E (B) ABRASIVOS MOLDADOS COM CARGAS CONTENDO UMIDADE HIGROSCÓPICA, COM EVIDENCIA DA DEFORMAÇÃO PRESENTE NA PEÇA.	182
FIGURA 71 – CHAPA DA ROCHA BRUTA UTILIZADA NOS ENSAIOS.....	183
FIGURA 72 – IMAGEM MACROSCÓPICA DA ROCHA <i>GIALLO FIORITO</i>	184
FIGURA 73 – FOTOGRAFIA MICROSCÓPICA DA LÂMINA DA ROCHA: (A) CRISTAL HIPIDIOMÓRFICO DE FELDSPATO POTÁSSICO COM GEMINAÇÃO MÚLTIPLA PARALELA E ALTERAÇÃO SERICÍTICA E (B) AGLOMERADO DE CRISTAIS DE PLAGIOCLÁSIO OLIGOCLÁSIO COM ÂNGULO DE EXTINÇÃO RETO. LEGENDA: FK: FELDSPATO POTÁSSICO – QZ: QUARTZO – OI: OLIGOCLÁSIO. FONTE: AUTOR .	185
FIGURA 74 – FOTOMICROGRAFIA EM OBJETIVA DE 5X E POLARIZADORES PARALELOS, MOSTRANDO INCLUSÃO DE MINERAIS OPACOS EM AGLOMERADO DE CRISTAIS DE BIBOTITA. LEGENDA: QZ: QUARTZO – BT: BIOTITA – OP: OPACOS.	186
FIGURA 75 – ABRASIVOS RESINOIDES EPÓXI DIAMANTADOS UTILIZADOS PARA A ETAPA DE POLIMENTO NAS GRANULOMETRIAS 120, 220, 400, 600, 800 E 1200 <i>MESH</i>	187
FIGURA 76 – ABRASIVOS MAGNESIANO UTILIZADO NA PREPARAÇÃO DA CHAPA NA ETAPA DE LEVIGAMENTO (24, 36 E 60 <i>MESH</i>) E OS UTILIZADOS PARA A ETAPA DE POLIMENTO (120, 220, 400, 600, 800 E 1200 <i>MESH</i>).....	188
FIGURA 77 – ABRASIVOS À BASE DE RESINA POLIURETANA DE MAMONA UTILIZADA NOS ENSAIOS DE POLIMENTO NAS GRANULOMETRIAS 120, 220, 400, 600, 800 E 1200 <i>MESH</i>	188
FIGURA 78 – POLITRIZ SEMIAUTOMÁTICA DE UMA CABEÇA UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DA ETAPA EXPERIMENTAL DE POLIMENTO.	189
FIGURA 79 – IMPERFEIÇÕES PRESENTES NAS CHAPAS BRUTAS PROVENIENTES DA SERRAGEM DOS BLOCOS EM CHAPAS, INDICADAS PELA SETA EM PRETO.	192
FIGURA 80 – REBOLOS ABRASIVOS MAGNESIANOS EVIDENCIANDO O PROCESSO DE AFLORAMENTO DOS ELEMENTOS DE CORTE APÓS O PROCESSO DE AFIAÇÃO.	192
FIGURA 81 – CHAPA DA ROCHA EVIDENCIANDO A FAIXA DE POLIMENTO ADOTADA PARA OS ENSAIOS PARA CADA OPERAÇÃO DE ACORDO COM OS ABRASIVOS UTILIZADOS.	193
FIGURA 82 – SEQUÊNCIA DE MOVIMENTAÇÃO DO SATÉLITE DA POLITRIZ DE ACORDO COM O PROGRAMA DE POLIMENTO ADOTADO.	193
FIGURA 83 – TROCA DOS REBOLOS ABRASIVOS APÓS A REALIZAÇÃO DE UMA DAS ETAPAS ABRASIVAS.	194

FIGURA 84 – PROCESSO DE SECAGEM DOS REBOLOS ABRASIVOS EM ESTUFA.	195
FIGURA 85 – PESAGEM DOS REBOLOS ABRASIVOS APÓS A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE POLIMENTO.	195
FIGURA 86– EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DO BRILHO (ESQUERDA) E DETALHE DA MEDIÇÃO NA CHAPA POLIDA (DIREITA).	196
FIGURA 87– CHAPA POLIDA PELA INDÚSTRIA (À ESQUERDA) E DETALHES DA MEDIÇÃO DE BRILHO NA CHAPA (À DIREITA).	197
FIGURA 88– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS RESINOIDES EPÓXI NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 350 RPM, PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	201
FIGURA 89– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS MAGNESIANOS NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 350 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	202
FIGURA 90– REBOLO ABRASIVO MAGNESIANO DE GRANULOMETRIA 1200 <i>MESH</i> EVIDENCIANDO A FRAGMENTAÇÃO DE SUA LATERAL DURANTE A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.	202
FIGURA 91– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS À BASE DE RESINA DE MAMONA NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 350 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	203
FIGURA 92– RESULTADOS DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS RESINOIDES EPÓXI E DE POLIURETANA DE MAMONA NAS FAIXAS DE POLIMENTO DE 400, 600, 800 E 1200 <i>MESH</i>	204
FIGURA 93– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS RESINOIDES EPÓXI NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 500 RPM, PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	206
FIGURA 94– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS MAGNESIANOS NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 500 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	207
FIGURA 95– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS DE MAMONA NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 500 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	208
FIGURA 96– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS EPÓXI NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 650 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	210
FIGURA 97– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS MAGNESIANOS NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 650 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO.	211

FIGURA 98– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS DE MAMONA NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 650 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO POR MINUTO.....	212
FIGURA 99– RELAÇÃO DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS DE MAMONA NA CONDIÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO SATÉLITE DE 650 RPM PARA AS VAZÕES DE ÁGUA DE 15 E 30 LITROS POR MINUTO POR MINUTO.....	214

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS EXPORTADORES MUNDIAIS DE ROCHAS ORNAMENTAIS – 2017 – PESO 1.000 T. (MONTANI, 2018).	110
TABELA 2 – PRINCIPAIS IMPORTADORES MUNDIAIS DE ROCHAS ORNAMENTAIS – 2017 – PESO 1.000 T. (MONTANI, 2018)	111
TABELA 3 – COMPARAÇÃO DAS PRINCIPAIS DEFINIÇÕES LIGADAS ÀS ROCHAS ORNAMENTAIS. (FRASCÁ, 2014).....	115
TABELA 4 - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO SiC.....	155
TABELA 7 – TRAÇOS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DOS REBOLOS.	169
TABELA 8 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DAS FERRAMENTAS ABRASIVAS.	173
TABELA 9 – COMPONENTES UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DAS FERRAMENTAS ABRASIVAS	176
TABELA 10 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS ADOTADAS PARA O LEVIGAMENTO INDUSTRIAL DO SIENOGRAITO <i>GIALLO FIORITTO</i> EM CADA SATÉLITE DA POLITRIZ.....	196
TABELA 11 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS ADOTADAS PARA O POLIMENTO INDUSTRIAL DO SIENOGRAITO <i>GIALLO FIORITTO</i> EM CADA SATÉLITE DA POLITRIZ.....	196
TABELA 12 – VALORES DE BRILHO MEDIDOS NO POLIMENTO INDUSTRIAL DA ROCHA SIENOGRAITO “ <i>GIALLO FIORITTO</i> ”.	197
TABELA 13 –PERDA DE MASSA DAS PEÇAS ABRASIVAS DOS ABRASIVOS EXPRESSAS EM VALORES MÉDIOS DOS ENSAIOS COM VAZÃO DE 15 LITROS POR MINUTO.	200
TABELA 14 –PERDA DE MASSA DAS PEÇAS ABRASIVAS DOS ABRASIVOS EXPRESSAS EM VALORES MÉDIOS DOS ENSAIOS COM VAZÃO DE 30 LITROS POR MINUTO.	200
TABELA 15 –PERDA DE MASSA DAS PEÇAS ABRASIVAS DOS ABRASIVOS EXPRESSAS EM VALORES MÉDIOS NOS ENSAIOS COM VAZÃO DE 15 LITROS POR MINUTO.	205
TABELA 14 –PERDA DE MASSA DAS PEÇAS ABRASIVAS DOS ABRASIVOS EXPRESSAS EM VALORES MÉDIOS NOS ENSAIOS COM VAZÃO DE 30 LITROS POR MINUTO.	205
TABELA 17 –PERDA DE MASSA DAS PEÇAS ABRASIVAS DOS ABRASIVOS EXPRESSAS EM VALORES MÉDIOS DOS ENSAIOS COM VAZÃO DE 15 LITROS POR MINUTO.	209
TABELA 18 –PERDA DE MASSA DAS PEÇAS ABRASIVAS DOS ABRASIVOS EXPRESSAS EM VALORES MÉDIOS DOS ENSAIOS COM VAZÃO DE 30 LITROS POR MINUTO.	209

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
2. JUSTIFICATIVA	23
2.1 - HIPÓTESES	25
3. OBJETIVO	27
4. ESTADO DA ARTE	105
4.1. O USO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS NA HISTÓRIA	105
4.2. A INDÚSTRIA DAS ROCHAS: ASPECTOS COMERCIAIS.	108
4.2.1. PERFIL ECONÔMICO MUNDIAL	108
4.2.2. PERFIL BRASILEIRO	112
4.2.3. TERMINOLOGIA	114
4.2.4. TIPOLOGIA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS	116
4.3. A CADEIA PRODUTIVA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS	122
4.3.1. EXTRAÇÃO	122
4.3.2. SERRAGEM DOS BLOCOS	124
4.3.3. POLIMENTO DAS CHAPAS	126
4.4. FATORES QUE INFLUENCIAM O POLIMENTO	135
4.4.1. REBOLOS ABRASIVOS	137
4.5. TRIBOLOGIA APLICADA AO POLIMENTO DE ROCHAS	140
4.5.1. ABORDAGEM SOBRE O MECANISMO DE DESGASTE DE SUPERFÍCIES	141
4.5.2. SIMULAÇÃO DO POLIMENTO DE ROCHAS	143
4.6. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	150
4.6.1. POLIURETANA	150
4.6.2. ADIÇÃO DE CARGAS EM POLÍMEROS	153
4.6.3. USO DA RESINA POLIURETANA DE MAMONA COMO MATRIZ DE ABRASIVOS DE POLIR ROCHAS	156
5. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	164

5.1. CONFECÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS A BASE DE POLIURETANA DE MAMONA	164
5.1.1. MATERIAIS PARA CONFECÇÃO DO REBOLO ABRASIVO	164
5.1.2. MÉTODOS PARA A CONFECÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS	168
5.2 ENSAIOS DE POLIMENTO	183
5.2.1 MATERIAIS	183
5.2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS DE POLIMENTO	191
<u>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>199</u>
6.1 RESULTADOS DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS	199
6.2.1 AVALIAÇÃO DA CONSTANTE DE 350 RPM	199
6.2.2. AVALIAÇÃO DA CONSTANTE DE 500 RPM	205
6.2.3 AVALIAÇÃO DA CONSTANTE DE 650 RPM	208
6.3. AVALIAÇÃO DO BRILHO FINAL DO POLIMENTO	213
<u>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	<u>136</u>
<u>8 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>137</u>
<u>9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS</u>	<u>139</u>

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As rochas ornamentais e de revestimento são elementos arquitetônicos utilizados em larga escala na construção civil e representam um importante segmento econômico brasileiro e mundial. São consideradas materiais nobres por prestar embelezamento exclusivo aos mais variados tipos de utilização. Sua estética pode ser aproveitada considerando suas propriedades de resistência às intempéries, além de apresentar uma boa resistência mecânica e flexibilidade em obtenção de produtos com dimensões e formatos diversos (ladrilhos, mesas, pias, bancadas, etc...). Quando utilizada como material de revestimento, tal como pilares e fachadas, promovem a proteção e controle térmico da estrutura revestida. Estas características fazem com que a rocha tenha elevada aceitação comercial, principalmente por se tratar de um material natural com variações cromáticas bem peculiares, além de texturas e estruturas únicas

Os produtos com as especificações de projeto são obtidos por processos de beneficiamento que visam a transformação da matéria prima em produtos a serem consumidos pelo setor de aplicação de rochas ornamentais, nas suas diversas modalidades. Esses processos são realizados por três etapas consecutivas: serragem (ou desdobramento) dos blocos, polimento e corte final. Após o dimensionamento das peças, segue-se a etapa de aplicação, com destaque para a fixação das placas em revestimentos horizontais (pisos, tampos e bancadas) e verticais (paredes e fachadas). Dentre estas etapas industriais citadas, a do polimento é considerada a mais importante, pois é nela que todos os aspectos estéticos das rochas são revelados.

O polimento das rochas ornamentais é realizado por meio de etapas sucessivas de desgaste, feitas com o uso de rebolos abrasivos em ordem decrescente, que são aplicados sobre as chapas em movimento circular e sob pressão, com o objetivo de diminuir gradativamente a rugosidade superficial até se atingir uma intensidade de brilho comercialmente desejável. Durante o polimento é utilizado um fluxo constante de água para a remoção dos resíduos gerados pelo desgaste e para o resfriamento dos rebolos abrasivos. Existem dois tipos de rebolos utilizados industrialmente: os magnesianos, nos quais a matriz é composta por cimento Sorel (um composto elaborado a base de óxido de magnésio e cloreto de magnésio), tendo como elemento abrasivo o carbetto de silício (SiC); e os diamantados, que são elaborados por resina epóxi ou matriz metálica sinterizada, tendo grãos de diamantes como elementos de corte.

Uma característica marcante desta atividade industrial é que ela foi consolidada ao longo do tempo com base em metodologias empíricas elaboradas por práticas cotidianas e, neste caso, a falta de conhecimento técnico sobre as respostas das propriedades físico-mecânicas das rochas frente às solicitações do processo, ainda hoje, se caracteriza como a principal lacuna no conhecimento científico do polimento. Cabe ressaltar que além da rocha, as variáveis referentes aos tipos e forma de abrasivos e as características das politrizes, são fatores colocados em segundo plano, mas influem diretamente no desempenho do processo.

Qualquer esforço investido na otimização desta atividade deve se pautar no entendimento do desgaste abrasivo como principal mecanismo de execução do acabamento superficial das placas. Uma abordagem que vem se mostrando bastante prática é a avaliação do polimento pelo enfoque dado pela Tribologia, que considera o atrito e o desgaste como resultado direto da interação entre rochas e ferramentas abrasivas, de acordo com cada situação operacional adotada. Este termo, derivado do radical grego “tribos” que significa “esfregar”, pode ser definido como a “Ciência e tecnologia de superfícies que se interagem em movimento relativo a das práticas a elas relacionadas” (ZUM GAHR, 1987). Esta ciência une diversos campos do conhecimento como mecânica, física, química, materiais e aspectos relacionados a lubrificação no atrito e desgaste, para prever o comportamento de interação entre sistemas. A Tribologia se ocupa essencialmente da redução do atrito entre duas superfícies em movimento relativo entre si. Porém, ela está também numa área totalmente oposta: a de garantir atrito elevado para permitir a aceleração, manutenção da velocidade e a desaceleração, além da previsão de um desgaste efetivo entre um corpo e um contra corpo, como é o caso do polimento das rochas ornamentais.

Alguns estudos têm sido conduzidos pelo escopo desta abordagem para entender a relação entre as variáveis envolvidas no processo de polimento, sempre com enfoque na eficiência do processo (HUAN et.al, 2002; HUANG & XU, 2004; SILVEIRA et al. 2004; SILVEIRA, 2008; GÖRGÜLÜ & CEYLANOGLU, 2008; PARAGUASSÚ et al. 2004; CARVALHO, 2010; NEVES, 2010; CAMARGO, 2013; ALMEIDA, 2014; YAVUZ et. al, 2011; GÜRCAN, et. al, 2013; BOLONINI & SILVEIRA, 2015; SILVEIRA & BOLONINI, 2016). Porém, há parâmetros dentro da ótica do tribossistema de polimento que ainda não foram estudados e que podem contribuir para explicar o mecanismo de abrasão do polimento, como a influência da vazão de água no processo, a análise da temperatura na interação entre as superfícies, além da avaliação do comportamento de cada tipo de abrasivo frente às variações operacionais praticadas na indústria.

A parametrização do polimento por meio da análise da influência de cada operação pode subsidiar, além da elaboração de modelos de desgaste mais eficientes, o desenvolvimento de novos processos ou produtos. Sobre este aspecto, algumas pesquisas foram desenvolvidas nos últimos anos para avaliar o processo de acabamento superficial, com a base tribológica do desgaste abrasivo, para verificação do potencial de utilização de rebolos abrasivos com matriz constituída de resina poliuretana à base de óleo de mamona (*Ricinus communis*), em substituição ao de matrizes comerciais a base de resina epóxi e de poliéster (LEITÃO & SILVEIRA, 2014; SERACO, 2015; DORIGO & SILVEIRA, 2017; ALMEIDA et, al. 2018; DORIGO, SILVEIRA & ALMEIDA, 2018). A possibilidade de utilização desta resina vegetal e atóxica pode representar um ganho ambiental para o polimento de rochas ornamentais, visto que a resina epóxi, principal matriz utilizada para fabricação de rebolos abrasivos diamantados, é constituída por Bisfenol A e Epicloridrina, substâncias que podem apresentar um potencial danoso à saúde humana e ao meio ambiente (BEZERRA et al., 2012), além de trazer consigo toda a carga ambiental proveniente da indústria do petróleo. Do ponto de vista técnico, os rebolos abrasivos diamantados à base de resina poliuretana de mamona também mostraram desempenho, em termos de desgaste e qualidade elevada de acabamento (LEITÃO & SILVEIRA, op. cit.).

Em função do avanço tecnológico em direção à sustentabilidade que a inserção da resina de origem vegetal no polimento de rochas ornamentais pode oferecer, este estudo apresenta a metodologia de desenvolvimento de rebolos abrasivos à base de resina poliuretana de mamona, e os testes em politriz industrial segundo o enfoque da Tribologia para validação desta ferramenta, com o intuito de se desenvolver um produto atóxico para utilização na indústria.

2. JUSTIFICATIVA

Apesar do movimento de abertura comercial incentivado pela segunda onda exportadora do setor, ocorrido a partir dos anos 90, ter proporcionado às indústrias de rochas ornamentais brasileiras uma maior absorção de máquinas, equipamentos e insumos, no sentido da redução de custos de produção e aumento da produtividade, ainda é evidente que o setor carece de um conhecimento mais abrangente sobre a relação entre os parâmetros operacionais da máquina, rebolo abrasivo e às propriedades intrínsecas das rochas (mineralogia, textura, estrutura, etc.) durante as etapas de processamento. Uma análise técnica que vise aumentar a eficiência do

processo, mas não leva em conta as interações entre estes três componentes, inevitavelmente, será superficial. Além disto, a questão ambiental do setor ainda é assunto tratado no âmbito das normativas regulamentadoras das práticas industriais e não como um fator de agregação de valor ao produto acabado. Ainda hoje, observa-se a existência de lacunas referentes à produção de artigos voltados ao setor de rochas, que envolvem mais investimentos em PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação).

Não obstante à esta realidade, a indústria das rochas ornamentais continua a apresentar, ano após ano, uma contribuição considerável para a economia brasileira voltada à extração e beneficiamento de minérios, visto que, o Brasil detém o maior parque industrial de beneficiamento de rochas ornamentais da América latina, se mantendo como um dos 5 principais países produtores e exportadores de rochas ornamentais do mundo. De acordo com Chiodi Filho (2018a), no ano de 2017, as exportações brasileiras de rochas ornamentais totalizaram US\$ 1.11 bilhão, correspondente a um volume físico de 2,36 milhões de toneladas. O volume físico de todos os materiais polidos foi de 21,9 milhões de metros quadrados, destinados ao mercado externo. Tais números retratam a importância econômica do setor de beneficiamento das rochas, com destaque ao polimento de placas de rochas ornamentais.

A tendência mundial pela procura de materiais biodegradáveis, não poluentes e derivados da biomassa faz com que as pesquisas com poliuretano derivados do óleo da mamona se tornem um tema atual, abrindo assim várias possibilidades de aplicações deste produto nas atividades humanas. Além disto, a utilização das resinas epóxi e poliéster na etapa de polimento faz com que este apresente o maior potencial poluidor da indústria das rochas ornamentais, em consequência da emissão de CO₂ durante as etapas da cadeia produtiva das resinas provenientes da indústria do petróleo (BIANCO, 2017). A possibilidade de se usar, como elemento ligante dos rebolos abrasivos de polimento, um produto ecologicamente correto, atóxico, em substituição as resinas epoxi seria um ganho considerável tanto no aspecto ambiental quanto mercadológico.

Ressalta-se que um dos setores mais afetados pela responsabilidade socioambiental nas últimas décadas é o da construção civil. De acordo com Arena (2005), dentre todos os empreendimentos da sociedade, o do ambiente construído é o que gera um impacto ambiental mais significativo e que está em constante aumento. Neste âmbito, a adoção de práticas como o da construção de edificações energeticamente eficientes está ligada diretamente a seleção de materiais construtivos em função do impacto ambiental derivado da sua produção e utilização,

sendo um importante passo para a obtenção de certificados internacionais de comércio de produtos com apelo ambiental, como a certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*). Essa certificação, desenvolvida pelo *Green Building Council* dos Estados Unidos, é reconhecida internacionalmente e conta com a participação de 21 países, incluindo o Brasil.

No âmbito do desenvolvimento de pesquisas sobre as rochas ornamentais o Centro de Tecnologia Mineral, em seu Núcleo Regional do Espírito Santo - CETEM/NRES, localizado em Cachoeiro de Itapemirim, vem desempenhando um papel importante em inovações para este setor. Cabe destacar que algumas delas já foram objetos de patentes, as quais o escopo do presente projeto de pesquisa se relaciona diretamente, como o desenvolvimento de um equipamento simulador de polimento de rochas ornamentais - SPRO (patente INPI N° 1020150316933, de 17/12/2015), que permite avaliar a eficiência e influência de cada parâmetro do tribossistema de polimento, e a utilização de compósitos a base de resina poliuretana de mamona como matriz de rebolos abrasivos (patente INPI N° 1020120321572, de 17/12/2012) que representa uma alternativa sustentável para o setor de rochas ornamentais.

Diante do exposto, a presente pesquisa dá prosseguimento à metodologia de confecção de abrasivos de polimento de rochas ornamentais, para o desenvolvimento de toda a linha necessária para a realização do processo, tendo em vista a utilização de alguns traços com percentuais distintos entre cargas e resina, com o intuito de se obter uma matriz ideal para incorporação do carbetto de silício verde (elemento de corte) para a elaboração de um novo produto com utilização viável na indústria de polimento de rochas.

2.1 - HIPÓTESES

De acordo com levantamento realizado por Leitão & Silveira (2014) sobre os custos de confecção do rebolo abrasivo de matriz epóxi, é perceptível que a liga corresponde a aproximadamente 20% do custo, o elemento abrasivo a 70% (no caso do diamante) e 10% estão relacionados a outros elementos (cargas e suporte plástico). Partindo desta premissa, a primeira hipótese assumir que a incorporação do carbetto de silício verde apresentará compatibilidade de dureza com a matriz abrasiva proposta (resina e cargas sólidas), com o intuito de propor uma ferramenta de origem de biomassa, atóxica, composta com um elemento de corte mais barato

que o diamante sintético e com uma matriz com rendimento que a presente nos rebolos magnesianos.

A falta de flexibilidade nas operações de desgaste gera, na maioria dos casos, problemas de má qualidade de processamento, por falta de estudos pormenorizados das variáveis envolvidas, como a pressão de trabalho no desgaste, velocidade tangencial ferramentas abrasivas e vazão do fluido lubrificante. O desconhecimento dos fatores envolvidos no processo faz com que o rebolo abrasivo seja, na maioria dos casos, o principal responsável pelo mal desempenho do polimento. Assim, uma saída praticada pela indústria é a substituição dos tipos de abrasivos ou troca de fornecedores. Portanto, a segunda hipótese é saber se a variação do parâmetro operacional de vazão de água, em função da velocidade de rotação do satélite, pode influir de forma positiva no desgaste dos abrasivos e no acabamento final do polimento.

3. OBJETIVO

O objetivo da presente pesquisa é desenvolver um rebolo abrasivo para polimento de rochas ornamentais silicáticas, composto pela resina poliuretana derivada do óleo de mamona, cargas sólidas de carbetos de silício preto e a sílica da cinza da casca do arroz, e como elemento de corte o carbetos de silício verde¹. Pretende-se ainda, identificar a eficiência da peça elaborada por meio de comparações com o desempenho de rebolos industriais utilizados no polimento de rochas em escala real. Visa também contribuir para o conhecimento da execução da metodologia de confecção de rebolos abrasivos à base de resina poliuretana de mamona. Para isto, serão realizados os seguintes objetivos específicos:

- Definir os procedimentos de confecção dos rebolos abrasivos de acordo com os parâmetros de resistência ao desgaste abrasivo da matriz do rebolo, tendo em vista os traços utilizados entre resina e cargas e avaliar o comportamento de trabalhabilidade da mistura, expansão e cura dos compósitos;
- Propor uma nova rota de confecção dos corpos de prova que seja viável para aplicação em nível industrial; e
- Avaliar o comportamento dos abrasivos comerciais e do abrasivo de mamona no acabamento superficial do polimento, sob a ótica da Tribologia, pela variação dos parâmetros operacionais de rotação do satélite de polimento e da pressão de desgaste, para análise da possibilidade de utilização da água no processo de desgaste de modo racional

¹ A designação verde deste tipo de carbetos de silício se deve a sua coloração, resultado da sua pureza química de 99 %. Esse tipo de carbetos é utilizado em ferramentas com liga de alta dureza e apresentam um melhor desempenho em operações onde são atingidas altas temperaturas durante o processo de abrasão (Dompieri et al., 2009).

4. ESTADO DA ARTE

4.1. O USO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS NA HISTÓRIA

O termo rochas ornamentais designa uma variedade de elementos rochosos que são utilizados com a função de revestimento, decorativa ou estrutural. Para tais finalidades as peças recebem algum tipo de acabamento, em menor ou maior grau, e são voltadas principalmente para a área da construção civil. Além das propriedades físicas e mecânicas, a sua resistência às intempéries as torna um material bastante atrativo, usado desde a pré-história nas edificações feitas pelo homem.

As primeiras construções que desempenhavam um papel ornamental ou estrutural foram feitas pelos hominídeos do Paleolítico, cerca de 300.000 anos atrás, quando o homem de Atapuerca (*Homo Heidelbergensis*) cobriam seus mortos com pedras ou há 40.000 anos atrás, quando o homem de Neanderthal (*Homo Neanderthalis*) construía cúpulas funerárias e as cobriam com uma lápide de calcário (VIDAL et al. 2014). Os primeiros registros de acabamento superficial das rochas são encontrados como vestígios de utensílios utilizados no período Neolítico, que também significa pedra “polida”, estimado entre 10.000 a.C e 4.500 a.C., quando o homem começou a polir as rochas para fabricar seus machados e outros instrumentos.

Como elemento estrutural as rochas assumem um papel importante em vários períodos da História, principalmente em edificações do império Egípcio, que se valia de materiais pétreos em suas construções, símbolos de sua imponência à época. Os principais materiais utilizados foram os calcários e arenitos, nas pirâmides, em templos, tumbas e santuários (HARRELL & STOREMYR, 2009, apud VIDAL et al. op cit.). Um dos exemplos deste tipo de utilização está na construção das pirâmides de Gizé, no Egito (Figura 1). Todos os conhecimentos de técnicas de trabalhabilidade com as rochas, desenvolvidas ao longo da expansão deste império, foram transmitidos mais tarde para os gregos e romanos.

Figura 1– Pirâmides de Gizé próximas a Cairo/Egito construídas em pedra calcária, 2.550 a. C

– Fonte: IEL, 2013.

Os gregos iniciam a utilização da rocha com finalidade arquitetônica mais refinada, lançando mão dos mármore e arenitos que apresentavam, entre as rochas disponíveis, uma melhor trabalhabilidade. Dentre suas principais construções destaca-se o Parthenon, que data do século V a. C (Figura 2). Já a contribuição dos romanos para a história da utilização dos materiais pétreos se deu pelo aperfeiçoamento das técnicas construtivas gregas, com destaque para o início da utilização das rochas em forma de revestimento com placas de travertino, em Tívoli, na Itália, com o uso de argamassa, cimento e concreto (PARAGUASSÚ & RIBEIRO, 2013). Outra grande contribuição dos romanos na arquitetura foi dada por Vitrúvio Polión, que deixou registros escritos sobre o uso das rochas em seu tratado “Os dez Livros da Arquitetura”.

Figura 2– Ruínas da Acrópole em Atenas, construída em pedra calcária, 447- 438 a.C, com destaque para o Pathernon. Fonte: IEL, 2013.

As técnicas e metodologias de extração e acabamento das peças, herdadas pelos romanos, foram difundidas por toda a Europa e evoluídas juntamente com a expansão do seu império. Em especial, cabe ressaltar a extração de rochas nas montanhas Apuanas, cujo centro é Carrara, na Itália, famosa cidade que dá nome ao mármore mais conhecido no mundo, produto com o qual o artista Michelangelo esculpia muitas das suas obras.

No Brasil, o uso das rochas ornamentais data do período colonial, especialmente com a importação de mármore europeus (italianos e portugueses) trazidos pelos colonizadores. A significativa variedade de rochas distribuídas em toda a extensão territorial brasileira foi bastante aproveitada pelos colonizadores, em conjunto com os materiais importados, para as fortificações defensivas da costa brasileira e edificações religiosas. A partir da segunda metade do século XX houve um incremento considerável da utilização deste material nas construções brasileiras (FRASCÁ, 2014).

O uso das rochas brasileiras se dava de acordo com a sua região de ocorrência. No livro “Rocha e Histórias do Patrimônio Cultural do Brasil e de Minas”, escrito por Costa (2009), o autor relata a utilização de vários tipos de rocha em monumentos e edificações brasileiras. Destaca-se o uso os arenitos e calcários para construção de igrejas, desde Pernambuco até o recôncavo baiano. No Sudeste, os gnaisses e outras rochas duras aflorantes foram bastante

utilizadas nas edificações das cidades. Em Minas Gerais, os quartzitos, pedra sabão, xistos e serpentinitos e no Sul os basaltos e arenitos, foram os mais utilizados.

Apesar dos registros de atividade de extração de rochas brasileiras datar do século 18, principalmente pela extração mecânica mais simples, o Brasil começa a assumir um protagonismo mundial no setor de rochas ornamentais a partir do surgimento de ferramentas diamantadas utilizadas nas pedreiras e com a expansão do seu parque industrial de beneficiamento, na década de 1980. Nesta época, a demanda mundial por granitos com variedades cromáticas e maior resistência que os mármore, fez com que a excepcional diversidade geológica brasileira servisse de base para o surgimento de pequenas e médias empresas, colocando o Brasil como o 4º maior produtor de rochas do mundo no ano de 2006 (ABIROCHAS, 2018a).

4.2. A INDÚSTRIA DAS ROCHAS: ASPECTOS COMERCIAIS.

4.2.1. PERFIL ECONÔMICO MUNDIAL

O crescimento do intercâmbio mundial das rochas ornamentais nas décadas de 1980 e 1990 ficou caracterizado como “a Nova Idade da Pedra” e o setor ganhou destaque como sendo uma das mais importantes áreas emergentes dos negócios minero-industriais. A produção mundial, que na década de 1920, era de 1,8 milhão de toneladas por ano, chegou a um patamar atual de 136,5 milhões de toneladas por ano. A estimativa é que o setor de rochas movimente, atualmente, cerca de US\$ 120 bilhões por ano. No ano de 2017 a comercialização de rochas processadas somou 58 milhões de toneladas, referente a 856 milhões de m², correspondendo um faturamento de US\$ 20,6 bilhões (ABIROCHAS, op. cit.).

Segundo dados de Montani (2018) a produção mundial de rochas em 2017 foi composta principalmente pelos mármore e demais rochas carbonáticas, com a participação de 57,8%, seguido dos granitos, quartzitos e similares, com 38,6 %, e por outras rochas, sobretudo as ardósias, com 3,6 %.

No cenário mundial, alguns países atuam como importadores ou exportadores de rochas brutas ou processadas, além de produzirem matérias primas para atendimento de seu mercado doméstico. Na Figura 3 são apresentados os principais produtores mundiais de rochas

ornamentais no período de 2014 a 2017 e nas Tabelas 1 e 2 os principais países exportadores e importadores, respectivamente, de acordo com o tipo de material no ano de 2017, conforme levantamento apresentado no Relatório Global de Montani (2018).

Figura 3– Ranking mundial dos produtores de rochas ornamentais em 2017. Fonte: Montani (2018)

A China, nos últimos anos, ocupa lugar de destaque no cenário mundial como o país que lidera a importação de materiais, quase que exclusivamente, de rochas brutas e a exportação de rochas processadas. Essa posição era ocupada pela Itália, principalmente pela tradição do país no domínio da indústria de bens de capital e, sobretudo, pelo controle dos canais de especificação e comercialização europeus e posteriormente globais. O País, que correspondia a um percentual de 64% de exportação de rochas processadas em 1989, chegou a um patamar de 6,4 % em 2014. A China, no entanto, fez o caminho inverso, saindo de um percentual de exportação de rochas processadas de 3,8%, em 1989, para 47,6% em 2012 (MONTANI, 2015). Atualmente o país conta com um mercado doméstico expressivo, além de uma expressiva incorporação de bens de capital à sua indústria e um domínio massivo de canais de mercado tradicionais e mercados emergentes.

Tabela 1 - Principais exportadores mundiais de rochas ornamentais – 2017 – Peso 1.000 t. (Montani, 2018).

Países x Rochas	2515	2516	6801	6802	6803	Total
China	83	387	1.344	9.124	387	11.325
Índia	256	8.948	322	1923	31	11.408
Turquia	5.667	87	19	2209	2	7.984
Itália	1.432	119	123	1241	10	2.925
Brasil	17	976	27	1185	96	2.301
Espanha	767	228	31	683	484	2.193
Portugal	461	324	404	425	21	1.635
Grécia	921	6	2	240	6	1.175
Irã	924	0	0	127	0	1.051
Subtotal	10.528	11.075	2.272	17.157	1.037	42.069
Outros	4.970	4.507	1.929	4.336	128	15.870
Total	15.498	15.582	4.201	21.493	1.165	57.939
Código NCM – 2515: Blocos de rochas carbonáticas; 2516: Bloco de rochas silicáticas; 6801: Rochas de processamento simples; 6802: Rochas de processamento especial; 6803: Ardósias						

Outros principais países que atuam no mercado internacional, como a Turquia, Índia e o Brasil são, tradicionalmente, exportadores de rochas brutas, com a participação de 76%, 75% e 52%, respectivamente, no volume físico total de suas exportações, sendo o restante composto por produtos acabados e semiacabados. Os EUA é um dos países que importam, essencialmente, materiais processados e tem o Brasil como o seu principal fornecedor, seguido da China, Itália, Turquia e Índia. O Brasil fornece para os EUA, principalmente, chapas de granitos e rochas similares, enquanto a China, Itália e Espanha, comercializa produtos acabados, tanto padronizados (lajotas), quanto seriados (*cut to size*) (ABIROCHAS, 2018a).

Tabela 2 – Principais importadores mundiais de rochas ornamentais – 2017 – Peso 1.000 t. (Montani, 2018)

Países x Rochas	2515	2516	6801	6802	6803	Total
China	8.539	5.964	3	143	5	14.704
EUA	32	93	433	3.949	128	4.645
Coreia do Sul	7	33	687	2.882	5	3.614
Alemanha	87	320	801	712	76	1.996
Canadá	122	516	19	252	10	919
Reino Unido	30	415	273	174	164	1.056
Itália	245	496	62	185	11	999
França	28	261	320	367	231	1.207
Taiwan	153	468	30	190	4	845
Índia	1.047	54	0	134	0	1.235
Subtotal	10.340	8.620	2.638	8.988	634	31.220
Outros	5.158	6.962	1.563	12.535	531	26.749
Total	15.498	15.582	4.201	21.523	1.165	57.969
Código NCM – 2515: Blocos de rochas carbonáticas; 2516: Bloco de rochas silicáticas; 6801: Rochas de processamento simples; 6802: Rochas de processamento especial; 6803: Ardósias						

Alguns países atuam como importadores de rochas brutas e processadas, basicamente para atendimento do mercado doméstico, como por exemplo o Reino Unido, Alemanha, Taiwan e Hong Kong. Países como Japão e EUA são, basicamente, importadores de materiais processados, com seus mercados domésticos de porte considerável, mas não atuam no processamento, exceto em etapas finais da cadeia. Uma das principais características destes países está na importância dos grandes escritórios de arquitetura e projetos com influência na etapa de especificação de mercado global (ABIROCHAS, 2018b).

Atualmente a projeção do mercado está condicionada, cada vez mais, pelo intenso controle ambiental das atividades produtivas, por meio da conservação e otimização das matérias-primas. Tal fato se traduz na crescente oferta de tecnologias mais limpas de produção de rochas, pela oferta de chapas mais delgadas e pelo surgimento de materiais artificiais aglomerados. Este último caso, que à primeira vista pode se configurar como um segmento de concorrência com os materiais naturais, já se mostra uma iniciativa importante para o aproveitamento de resíduos e para a melhoria dos índices de recuperação de lavra e beneficiamento. Estima-se que as projeções futuras de consumo, produção e intercâmbio mundial das matérias-primas da construção civil se manterão em tendência de crescimento, tanto pelos materiais naturais, quanto os artificiais para revestimento. A previsão é de que no ano de 2020 a produção mundial

de rochas ornamentais e de revestimento ultrapassará a casa dos 150 milhões de toneladas, correspondentes a quase 1,8 bilhão de toneladas de metros quadrados equivalentes por ano, com possibilidade de incremento de 25% no volume físico das atuais transações internacionais (ABIROCHAS, 2018a).

4.2.2. PERFIL BRASILEIRO

No Brasil, a década de 1990 ficou marcada pelo crescimento expressivo de todos os segmentos da cadeia produtiva, resultando na modificação do seu perfil de exportação, com incremento da venda de rochas processadas semiacabadas, principalmente chapas polidas de granito, superando o faturamento da exportação dos blocos, como visualizado na Figura 4. Atualmente as rochas processadas são responsáveis por 85% do total do faturamento anual. As rochas ornamentais brasileiras representam o quinto maior produto de base mineral exportado pelo Brasil, atrás do minério de ferro, minério de cobre, ouro e ferronióbio (CHIODI FILHO, 2018a).

Figura 4 – Evolução percentual de faturamento das exportações brasileiras de rochas brutas e processadas de 1998 a 2015. RP - Rochas processadas; RB – rochas brutas. Fonte: Abirochas, 2018a.

Essa mudança de perfil de mercado de exportação impulsionou a evolução tecnológica dos equipamentos e insumos utilizados pela cadeia produtiva na década de 2000, com destaque para as técnicas de extração e de beneficiamento. Esse fator foi essencial para que novos materiais fossem continuamente colocados em produção, com destaque para as denominadas rochas exóticas, de alto valor agregado, que necessitam de técnicas mais eficientes e menos agressivas de extração, viabilizadas pelo uso do fio diamantado na extração e beneficiamento, além da adoção de reforços auxiliares de acabamento, como a técnica de envelopamento dos blocos e reforços estruturais da chapa por meio de utilização de resina e telagem.

Os materiais exóticos constituem hoje o principal grupo de produtos brasileiros de exportação. Por conta da sua excepcional “geodiversidade”, estima-se que o Brasil tenha comercializado no mercado internacional, ao longo dos últimos 30 anos, uma variedade de materiais maior que toda a Europa nos últimos 500 anos. No ano de 2006, o Brasil chegou a se posicionar como o quarto maior produtor e exportador mundial de rochas ornamentais e de revestimento, superando vários *players* europeus tradicionais (ABIROCHAS, 2018a).

A produção anual de rochas brasileiras é de 9,24 milhões de toneladas. Deste total, são absorvidos pelo mercado interno 6,88 milhões de toneladas de produtos e cerca de 67 milhões de m² de chapas, que tem como principal destino o Estado de São Paulo, responsável 45% do consumo interno brasileiro (CHIODI FILHO, 2018a).

A maior parte das atividades de lavra e beneficiamento primário concentra-se em arranjos produtivos locais, como os de mármore e granitos do Espírito Santo, de ardósias e quartzitos foliados de Minas Gerais, de gnaisses foliados do Rio de Janeiro, de basaltos plaqueados do Rio Grande do Sul, de travertinos da Bahia, de calcários plaqueados do Ceará, etc.

O maior polo de beneficiamento de rochas é encontrado no Estado do Espírito Santo, responsável por beneficiar cerca de 80% dos materiais voltados à exportação. O aglomerado de empresas capixabas, caracterizado como o maior arranjo produtivo local de rochas do Brasil, é onde se concentra 86% das unidades de serragem de blocos, contando com 675 unidades de teares multilâminas e 290 unidades de teares multifios diamantados. (ABIROCHAS, 2018b),

Sobre o perfil das atividades setoriais no Brasil, estima-se que atualmente cerca de 10.000 empresas compõem a cadeia produtiva de rochas ornamentais, divididas em marmorarias (61%), beneficiamento (20%) e lavra (10%). Outros segmentos do setor

correspondem às empresas exportadoras, serviços em geral, depósitos de chapas e indústrias de máquinas, equipamentos e insumos. Estima-se que a cadeia produtiva de rochas no Brasil é responsável pela geração de cerca de 120.000 empregos diretos e indiretos (ABIROCHAS, 2018b).

O parque brasileiro de beneficiamento tem capacidade instalada de serragem e polimento de chapas para cerca de 87 milhões de metros quadrados por ano. Considerando a produção das rochas de processamento simples, ou seja, rochas que são extraídas por meio dos planos naturais de deslocamento (ardósias, quartzitos e gnaisses foliados, calcários e basaltos plaqueados etc.) e que não passam pelas etapas de serragem e polimento, a capacidade produtiva brasileira é acrescida de mais 50 milhões de metros quadrados. (ABIROCHAS, op.cit.)

4.2.3. TERMINOLOGIA

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define as rochas ornamentais como um “material pétreo natural, utilizados em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária”. Já a classificação de rochas de revestimento compreende as “rochas ornamentais que são submetidas a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizadas em revestimentos de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas” (ABNT, 2013).

De acordo com Frazão e Paraguassu (1998), a definição de rocha pode ser compreendida como sendo “um corpo sólido natural, resultante de um processo geológico determinado, formado por agregados de um ou mais minerais, arranjos segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante sua formação. Também podem ser corpos de material mineral não-cristalino, como o vidro vulcânico (obsidiana) e materiais sólidos orgânicos como o carvão”.

Segundo Frascá (2014) a uniformidade no consenso da definição da terminologia é uma questão ainda não equalizada nas normativas mundiais, que definem as rochas ornamentais e as rochas de revestimento. Portanto, cabe citar algumas definições feitas por normativas existentes com definição de rochas ornamentais, rochas de revestimento e rochas dimensionadas.

Os termos rochas ornamentais e para revestimento são definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, pela *American Society for Testing Materials ASTM* e pelo *European Committee for Standardization – CEN*, sumarizados por Frascá (2014) são apresentados pela tabela 03 (ABNT, 2013; BSI, 2002; ASTM, 2012).

Tabela 3 – Comparação das principais definições ligadas às rochas ornamentais. (FRASCÁ, 2014)

ABNT	ASTM	CEN
Rochas ornamentais		
material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária	termo correspondente a <i>monumental stone</i> : rocha de qualidade adequada para ser lavrada e cortada como rocha dimensionada, tal qual existe na natureza e ser usada pela indústria de monumentos e memorial	não define
Rochas para revestimento		
rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento e utilizada no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas	Termo correspondente à <i>build stone</i> : rocha natural, com qualidades necessárias para ser lavrada e cortada como rocha dimensionada, tal qual existe na natureza e ser usada na construção civil.	Termo também correspondente a <i>build stone</i> : rocha natural usada em construções e em monumentos.
Rocha dimensionada		
não define	termo correspondente a <i>dimension stone</i> : rocha natural que foi selecionada e beneficiada em tamanhos e formas específicos	termo usado como sinônimo de bloco bruto (<i>rough block</i>)

Para além da classificação técnica da terminologia em função da sua utilização, as variedades litológicas são agrupadas comercialmente nos grupos de mármore e granitos, apesar de possuírem definições geológicas mais estritas. Os “granitos” compreendem assim rochas silicáticas que não são apenas granitos *sensu stricto*, mas também charnockitos, sienitos, basaltos, metaconglomerados, gnaisses, entre outras, enquanto os “mármore” abrangem diversos tipos de rochas carbonáticas, metamórficas ou não, capazes de receber polimento e

lustro, como dolomitos e calcários. Outros tipos de rochas comercializadas são ardósias, quartzitos, pedra sabão e outras pedras naturais (não submetidas ao polimento).

4.2.4. TIPOLOGIA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

Chiodi Filho (2018b), apresenta uma classificação dos termos comerciais para as rochas ornamentais, sem conotação genética, dividida entre o grupo das rochas silicáticas, o das rochas carbonáticas e o das rochas silicosas. O grupo das rochas silicáticas é composto por rochas formadas essencialmente por minerais silicáticos (feldspatos, micas, anfibólios, etc.) e silicosos (quartzo), ou apenas silicáticos. São exemplos deste grupo os granitos e pegmatitos. Já as rochas carbonáticas apresentam em sua composição proporções variáveis de calcita, dolomita e outros carbonatos, podendo conter, em alguns casos, porções minerais silicáticos e/ou silicosos. São exemplos deste grupo os mármore, travertinos e calcários. O grupo das rochas silicosas são aquelas essencialmente formadas por quartzo e/ou sílica amorfa, podendo conter porções de minerais carbonáticos, abrangendo os materiais comercialmente classificados como quartzito, metaconglomerado e quartzo. A seguir são apresentadas algumas rochas pertencentes aos grupos descritos.

4.2.4.1. Rochas silicáticas

O grupo das rochas silicáticas é um dos principais representantes do mercado de rochas brasileiras. Pertencem a este grupo as rochas formadas por quartzo, feldspatos, anfibólios, micas, e outros minerais acessórios. São litotipos com aplicação voltada para revestimentos interiores de paredes, divisórias, pisos, escadas e em pavimentos de baixo, médio e elevado tráfego. Alguns exemplos deste grupo comercial podem apresentar estrutura granular ou compacta, como os granitos, sienitos, gabros, charnokitos, pegmatitos e outros (Figura 5), ser portadoras de foliação ou estrutura xistosa bem desenvolvida como os xistos (Figura 6), ou como orientação mineralógica proeminente, como as rochas gnáissico-migmatíticas (Figura 7). Os pegmatitos (Figura 8) são os principais representantes das rochas denominadas exóticas deste grupo e tem como principal característica serem compostos por cristais que variam de dimensões centimétricas até, excepcionalmente, métricas. Por este motivo, esta rocha necessita

de algumas técnicas de reforço auxiliares, como a aplicação de tela conjugada com resina, tanto para a fase de beneficiamento quanto para a aplicação final.

Figura 5 – Grupo das rochas silicáticas: (A) Charnockito Verde Pavão; (B) Gabro Preto São Gabriel; (C) Sienito (Azul Bahia); (D) Monzogranito Giallo Fiorito; (E) Albita Granito Branco Ceará; e (F) Sienogranito Vermelho Brasília. Fonte: Abirochas, 2018b.

Figura 6 – Grupo das rochas xistosas: (A) Matrix e (B) Meteoro. Fonte: Abirochas, 2018b.

Figura 7 – Grupo das rochas gnaisso-migmatíticas: (A) Copacabana e (B) Golden Thunder.
Fonte: Abirochas, 2018b

Figura 8 – Pegmatitos: (A) Delicatus Gold e (B) Bianco Antico. Fonte: Abirochas, 2018b.

4.2.4.2. Rochas carbonáticas

Este grupo comercial é composto por rochas formadas essencialmente por calcita e dolomita e tem seu padrão cromático geralmente definido por minerais acessórios. Também fazem parte deste grupo rochas formadas por precipitação química de carbonato de cálcio em ambientes de água doce ou ambientes marinhos. Podem apresentar uma granulometria fina ou grossa. A natureza carbonática deste grupo de rocha as tornam bastante susceptível à aplicação em ambientes externos ou em ambientes com presença de agentes químicos agressivos (ácidos, produtos de limpeza e outros). Podem ser aplicadas em pisos e escadas de muito baixo tráfego, paredes, divisórias, lavabos e mesas. Alguns exemplos das rochas deste grupo, demonstrados na Figura 9, são os mármore de Cachoeiro de Itapemirim, no estado do Espírito Santo, o mármore Branco Paraná, o travertino Bege Bahia, o mármore Ônix, o Alabastro e o calcário Pedra Cariri.

Figura 9 – Grupo das rochas carbonáticas: (A) Mármore Branco Cachoeiro; (B) Mármore Branco Paraná; (C) Travertino Bege Bahia; (D) Mármore Ônix; (E) Alabastro; e (F) Pedra Cariri. Fonte: Abirochas, 2018b

4.2.4.3. Rochas silicosas

Os quartzitos maciços e foliados são os principais exemplos de rochas deste grupo. São compostos essencialmente por grãos ou cristais de quartzo, e/ou sílica amorfa, com quantidades subordinadas de minerais silicáticos e/ou carbonáticos. A coloração destes materiais é resultado dos minerais acessórios pertencentes a estes litotipos e pelo grau de alteração da rocha. Essa classificação abrange os materiais comerciais conhecidos como quartzitos, quartzo e metaconglomerados. As rochas pertencentes a este último exemplo são constituídas por seixos de dimensões variáveis, mais e menos arredondados, e por vezes estirados, provenientes de mais de um tipo de rocha (granito, gnaisses, quartzitos, etc.), que são imersos em uma matriz geralmente quartzosa. Por ter uma composição análoga às rochas silicáticas, sua aplicação é voltada para revestimentos interiores de paredes, divisórias, pisos, escadas e em pavimentos de baixo, médio e elevado tráfego. São exemplos comerciais das rochas deste grupo os quartzitos maciços Azul Imperial e Azul Macaúbas, o calcário Pedra Cariri, os metaconglomerados Nero Marinace e Via Ápia e o quartzo Bianco (Figura 10).

Figura 10 – Grupo das rochas silicosas: (A) Quartzito Azul Macaúbas; (B) Quartzito Azul Imperial; (C) Quartzito Pedra São Tomé; (D) Alabastro; (E) Via Áppia (F) Quartzzo Bianco.

Fonte: Abirochas, 2018b

4.2.4.4. Rochas artificiais

A rocha artificial é um tipo de material composto por pós de agregados, naturais ou não, com granulometria variada e um material aglutinante, que pode ser a base de epóxi ou poliéster. Pode ser produzida com agregados provenientes de mármore, granito, areia de quartzo, cristais de vidro e demais compostos. Na etapa produtiva destas rochas, os materiais sólidos são escolhidos de acordo com sua composição química e coloração, que na maioria dos casos simulam o aspecto estético dos grupos de rochas naturais. Sua produção e comercialização encontra uma resistência pelos produtores de rochas ornamentais, pois é um concorrente direto dos materiais naturais, assim como os materiais cerâmicos (porcelanatos e afins). Porém, a utilização de agregados naturais na sua produção, faz com que a indústria das rochas artificiais seja uma destinação positiva para os rejeitos provenientes da cadeia produtiva das rochas ornamentais.

Algumas rochas artificiais são bastante conhecidas no mercado, como as denominadas *silestone*, *marmoglass* e *nanoglass*. A nomenclatura *silestone* surgiu para denominar uma marca empresarial de materiais artificiais, mas devido a sua utilização em larga escala, acabou sendo usada informalmente para descrever um material produzido por meio de alta tecnologia, formado por cerca de 95% quartzo natural e outros compostos, como vidro e elementos

metálicos. Os padrões estéticos destas rochas variam e podem ser homogêneo, apresentar veios e granulagem fina ou grossa. Quanto à variação cromática, esse tipo de rocha pode apresentar cores variadas, que vão desde o branco, creme, cinza escuro, rosa, vermelho, preto e castanho. O *marmoglass* é uma rocha artificial desenvolvida através de um processo de microcristalização de cristais de vidro e aditivos de pó de mármore. O resultado de processo de fabricação é um painel cristalizado que se assemelha muito à aparência de uma pedra natural. Já o *nanoglass*, que exibe uma aparência semelhante ao *marmoglass*, porém com uma porosidade menor e maior resistência impactos e riscos. A principal característica deste material é que ele só é encontrado na cor branca. Alguns exemplos destas rochas artificiais são demonstrados na Figura 11.

Figura 11 – Rochas artificiais: (A) Red lights; (B) White Lights; (C) Absolute White; (D) Absolute Black; (E) Vanguard Carrara (F) Modern Beige. Fonte: Topzone, 2019

Dentre os elementos arquitetônicos fabricados com esses tipos de materiais destacam-se os denominados comercialmente como *solid surfaces countertops* e *quartz surfaces countertops* (bancadas de superfícies sólidas e bancadas de superfícies de quartos, respectivamente). As bancadas de superfície sólida consistem em pó mineral (principalmente mármore) misturado com uma variedade de resinas e pigmentos plásticos. São fabricadas com um percentual menor de agregados em relação a quantidade de resina, quando comparado com as superfícies de quartzo. Esse percentual geralmente é de cerca de 66 % de agregados e 33% de resina. A grande vantagem deste tipo de rocha é o seu processo de fabricação relativamente simples, que pode criar bancadas completamente sem emenda, ao contrário de qualquer outra superfície de

bancada. Já as bancadas de superfície de quartzo têm como principal característica serem fabricadas com um percentual de até 95% de agregados, geralmente quartzosos, o que confere à esta rocha uma elevada dureza e boas propriedades mecânicas. O material ligante pode ser a base de polímeros ou cimento, porém já existe no mercado materiais fabricado a partir de óleos vegetais.

4.3. A CADEIA PRODUTIVA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

A cadeia produtiva das rochas ornamentais compreende um conjunto de atividades realizadas desde a fase de pesquisa mineral até a aplicação dos produtos nas obras. Ao longo da cadeia é realizado a fase de beneficiamento das rochas, que é responsável pela transformação dos blocos, extraídos na fase de lavra, em produtos finais ou semiacabados.

O processo de beneficiamento das rochas é dividido em duas etapas básicas: o beneficiamento primário (serragem ou desdobramento dos blocos) e o beneficiamento secundário (polimento das chapas). As chapas polidas são submetidas à processos de corte, mediante o uso de equipamentos específicos e são transformadas em produtos finais de acordo com seu uso e aplicação, como ladrilhos padronizados, mesas, bancadas ou outros produtos. A seguir são descritas as etapas da cadeia referentes à lavra e o beneficiamento das rochas ornamentais, com destaque para o polimento das chapas.

4.3.1. EXTRAÇÃO

O processo tecnológico desta fase, também conhecido como desmonte das rochas, inicia-se com a obtenção dos blocos de rocha dos maciços rochosos. O tipo de lavra adotada depende diretamente das condições topográficas destes maciços. Para a realização desta etapa são utilizadas as denominadas técnicas cíclicas de extração, que são aplicadas sob critérios econômicos e estruturais para o maior aproveitamento e recuperação dos volumes extraídos. A recuperação da lavra é um parâmetro relacionado diretamente ao padrão cromático, textural e estrutural da rocha, pela presença de discontinuidades e intrusões geológicas do maciço (defeitos comerciais). Na maioria dos casos aproveita-se somente a parte homogênea da rocha, ou seja, descarta-se os volumes que descaracterizam o padrão estético.

Os blocos são extraídos do maciço rochoso pelo método de bancadas altas ou baixas, dependendo da topografia do maciço. No primeiro caso, a altura da bancada é superior a 6 metros e o segundo caso a altura da bancada é equivalente à uma das dimensões do bloco. O desmonte do maciço consiste no isolamento de grandes volumes de rocha (quadrotes) que posteriormente são subdivididos em pranchas. Nesse processo a tecnologia de perfuração utilizada são os martelos pneumáticos conjugados com as técnicas de corte, realizadas na maioria dos casos com a utilização de fio diamantado (Figura 12).

Figura 12 – Realização do desmonte do maciço com detalhe para as técnicas adotadas: (A) corte do maciço por meio de fio diamantado e (B) detalhe do fio diamantado separando as faces do maciço. Fonte: (A) MARINI QUARRIE GROUP, 2005 apud REGADAS, 2006; (B) JDK, 2018

O corte das pranchas em blocos é feito com a utilização de martelos pneumáticos para perfuração da prancha em furos lineares, e o corte em si é realizado com a utilização de cunhas de ferro ou cordel detonante (Figura 13). Os blocos obtidos têm uma dimensão padrão de 2,90 x 1,90 x 1,80.

Figura 13 – Realização do desmonte do maciço com detalhe para as técnicas adotadas: (A) corte do maciço por perfuração e (B) e detalhe dos blocos subdivididos. Fonte: Marcon et al., 2012.

4.3.2. SERRAGEM DOS BLOCOS

A serragem dos blocos compreende a preparação e serragem dos blocos em chapas de espessura variável, usualmente dois ou três centímetros. Essa etapa, também conhecida como desdobramento dos blocos, é realizada essencialmente por teares multilâmina (também conhecido como convencionais) ou teares multifio. Outros equipamentos também são utilizados, como os talha blocos usados para produção de ladrilhos padronizados e teares multilâmina diamantadas, voltados para a serragem exclusivamente de mármore.

Na serragem de rochas silicáticas com os teares multilâmina (Figura 14) o corte se dá pela ação de um elemento abrasivo conduzido por um conjunto de lâminas movimentadas, dispostas e tensionadas longitudinalmente ao maior comprimento do bloco de rocha. O quadro porta-lâminas é pressionado contra o bloco em um movimento descendente e pendular que realiza o corte da rocha. Durante este processo é adicionado uma polpa abrasiva, composta por água, granalha de aço e bentonita ou cal. O corte é realizado pelo impacto e atrito das lâminas com a polpa abrasiva e a rocha.

Figura 14 – Serragem dos blocos em tear multilâmina: (A) Vista frontal do equipamento e (B) detalhe para a adição da lama abrasiva para a serragem dos blocos. Fonte: O Autor

O processo de corte realizado pelos teares multifio (Figura 15) se dá pela ação abrasiva dos fios diamantados. Esse fio é composto por um cabo de aço flexível e anéis diamantados (também conhecidos como pérolas). As pérolas (Figura 16) consistem em um anel metálico que servem de suporte para a pasta diamantada, composta pelos diamantes (elemento abrasivo que realiza o corte da rocha) e pela liga metálica que os mantêm fixos. Durante a etapa de corte é adicionado um fluxo constante de água para manter a refrigeração das pérolas. Este tear é constituído de uma estrutura (armação) metálica, com suportes cilíndricos que se movimentam em sentido vertical, sobre os quais se dispõem, de forma equidistante e tensionados, até 82 fios diamantados, que realizam um movimento rotatório em torno dos suportes e promovem o corte da rocha.

Figura 15 – Serragem dos blocos em teares multifio: (A) Vista frontal do equipamento e (B) detalhamento do corte realizado pelos fios diamantados. Fonte: (A) Breton e (B) Ventovag.

Figura 16 – Pérola diamantada Fonte: Caranassios & Pinheiro, 2004.

Segundo Souza et. al (2012), a tecnologia de fio diamantado aplicada ao beneficiamento primário de granitos comerciais melhora a produtividade, pois a velocidade de corte do tear multifio (até 80 cm/h) é maior que a do tear multilâmina (até 20 cm/h). Além disso, o tear multifio apresenta um melhor desempenho ambiental e qualidade do produto obtido. O resíduo gerado na serragem de blocos em tear multifio é uma lama composta basicamente por água, pó de rocha e microcristais de diamante, desprendidos da pérola diamantada. No tear multilâmina, a lama contém pó de rocha, cal ou bentonita, água e fragmentos de aço oriundos da gralha e da lâmina. Porém, o tear multilâmina apresenta melhor desempenho no custo de insumos, que equivale à metade desse custo no tear multifio.

De acordo com a ABIROCHAS (2018a) a projeção é que até 2020, para o atendimento dos mercados interno e externo, a capacidade brasileira de serragem de chapas poderá superar 120 milhões de metros quadrados por ano, com cerca de 80% dessa capacidade representada por teares multifio diamantados. A tendência é a substituição das 800 unidades de teares multilâmina por não mais de 200 teares multifio diamantados.

4.3.3. POLIMENTO DAS CHAPAS

O processo de polimento de rochas ornamentais configura-se na etapa mais importante dentre as executadas no beneficiamento secundário. Essa etapa da cadeia produtiva também engloba outros processos de acabamento, tais como o flameamento, o apicoamento e a escovação, que promovem um aspecto mais rústico à superfície.

Desde o início desta atividade as indústrias passaram por um processo de modernização de seus equipamentos, porém a técnica de polimento não acompanhou essa tendência, no que

concerne ao mecanismo de desgaste, sob enfoque de eficiência de processo, em consideração às características inerentes às rochas, aos abrasivos e às condições operacionais de desgaste. A principal evolução do polimento industrial se deu no nível de automação das máquinas, resultado da demanda por produção e pelo surgimento de rebolos abrasivos formulados à base diamante sintético, utilizadas tanto nas matrizes epóxi e poliéster, quanto nas matrizes metálicas.

Esta atividade é realizada por equipamentos denominados politrizes, que utilizam rebolos abrasivos fixados nos satélites rotativos que, por sua vez, são aplicados sob pressão e em movimentos circulares sobre a superfície das placas, imprimindo a elas uma intensidade de brilho. A diminuição gradual da rugosidade das chapas brutas é feita por três etapas consecutivas: levigamento, polimento e lustro. Para o levigamento das chapas brutas, etapa que elimina a rugosidade mais grossa e defeitos provenientes da serragem, geralmente utilizam-se abrasivos de granulometria mais grosseira: 24, 36 e 60 *mesh*, ou abrasivos diamantados metálicos (com granulometria específica). O polimento propriamente dito é feito com uso de uma sequência de abrasivos mais finos: 120 ao 1.200 *mesh*. Ao fim do polimento é feito o lustro da chapa, realizado por abrasivo específico.

Existem atualmente dois tipos de equipamentos para a realização do polimento industrial, que são as politrizes semiautomáticas com bancadas fixas e as automáticas com esteira transportadora. Em nenhuma destas máquinas é possível variar a velocidade de rotação dos satélites, sendo esta característica um dos fatores limitantes dos equipamentos atualmente conhecidos. Essa variável é de suma importância para melhor se processar o polimento, considerando os diferentes tipos de rocha que são utilizados para fins ornamentais, como demonstrado no estudo de Camargo (2013).

As politrizes semi-automáticas são equipamentos constituídos de um conjunto motorreductor que aciona o satélite, suportado por uma ponte que se desloca sobre trilhos, obtendo-se assim uma variedade de movimentos simultâneos sobre a superfície a ser polida. Os modelos dispõem de 1 (Figura 17) a 3 satélites (Figura 18) e executam quatro tipos de movimentos (Figura 19), realizados em cada etapa abrasiva. Cabe ressaltar que a programação dos movimentos, sequência de abrasivos e o tempo de trabalho são determinados pelo operador.

Figura 17 – Politriz semiautomática de 1 satélite. Fonte: O autor

Figura 18 – Politriz semiautomática de 3 satélites. Fonte: Cimef, 2018.

Figura 19 – Movimentos realizados pelas politrizes semiautomáticas: contorno; 2) zig zag; 3) transversal; 4) longitudinal. Fonte: Metafill, 2012 apud Camargo, 2013

As politrizes automáticas multicabeça são os equipamentos mais modernos usados na indústria. São compostos por um chassi de ferro fundido ou aço que sustenta uma bancada ou mesa, sobre a qual corre uma esteira de borracha que transportam as chapas a serem polidas (Figura 20). A variação de velocidade do avanço longitudinal da esteira transportadora é de 80 a 100 m/h, com uma produção média de 13/14 chapas/hora. Sobre essa esteira, e disposta longitudinalmente a ela, é montada uma trave (ponte) que sustenta os conjuntos moto redutor e cabeçote e realiza um movimento transversal à mesa. A velocidade de movimentação transversal da ponte, que sustenta os satélites varia de 16 a 60 translações por minuto. Os abrasivos são colocados em sequência nesse conjunto de cabeçotes, do grão mais grosso para o grão mais fino, no sentido de movimentação da chapa, de modo que, ao sair no final da esteira, o material esteja polido.

Figura 20– Politriz automática multicabeça com esteira transportadora. Fonte: Breton, 2018

A quantidade de cabeçotes que os modelos disponíveis de politrizes automáticas oferecem varia de 8 a 22, com produtividade de até 2 metros lineares por minuto no polimento e até 3 metros para o levigamento (etapa de desbaste inicial que remove a rugosidade proveniente à etapa de serragem).

Os modelos disponíveis de satélite têm configuração de 4, 6 ou 8 rebolos, sendo mais comum o de 6 rebolos. Os satélites para polimento de rochas silicáticas realizam o desgaste de forma oscilatória, em que o contato do abrasivo sobre a rocha se dá de forma linear (Figura 21), possibilitando aumentar a pressão sobre a chapa. Além do movimento dos satélites, o dispositivo de encaixe dos abrasivos também realiza um movimento oscilatório em torno de um eixo longitudinal. Já nos satélites para as rochas carbonáticas os abrasivos entram em contato de forma planar (Figura 22), devido à baixa dureza desse tipo de rocha, não permitindo uma pressão elevada.

Figura 21 – Dinâmica de movimentação do satélite para polimento de rochas graníticas Fonte: Silveira & Bolonini (2016).

Figura 22 – Exemplo de satélite para polimento de rochas carbonáticas: (A) Detalhe da fixação dos rebolos do tipo Frankfurt, (B) Vista lateral do satélite e (C) interação entre rebolo e rocha. Fonte: Silveira et al., 2018.

Atualmente a indústria de polimento conta com um novo tipo de politriz automática de bancada fixa (Figura 23), porém a troca da sequência de abrasivos, que no modelo anterior era realizada pelo operário do equipamento, é feita pela troca de satélites. Esse tipo de maquinário é utilizado basicamente por empresas que trabalham com uma escala de menor produtividade e que realizam o polimento de materiais de alto valor agregado, como as rochas exóticas. Ela é dotada de automação equivalente às politrizes automáticas multicabeças, principalmente com informações digitais em tempo real de consumo dos rebolos abrasivos.

Figura 23 – Politriz automática de bancada fixa. Breton, 2018.

A velocidade de rotação dos satélites é constante, sendo em média 500 rpm. Outra condição operacional utilizada no polimento das rochas é a carga aplicada pelo satélite sobre a chapa. Geralmente se usa 1 e 2 kgf/cm², dependendo da dureza que a rocha apresente, do tipo e sequência de abrasivos e as características da politriz. Cada satélite utiliza, em média, uma quantidade aproximada de água de 30 litros por minuto por minuto/minuto para refrigeração do processo e limpeza da chapa ao longo do polimento. Embora boa parte desta água seja reaproveitada por filtragem e recirculação, um volume considerável de água é inserido diariamente neste sistema. A princípio, as sequências de abrasivos necessitam de diferentes quantidades de água para realizar seu trabalho. Os primeiros rebolos, que tem a função de desgaste mais severo para a retirada das irregularidades oriundas da serragem do bloco, necessitam de quantidade maior de água quando comparados aos últimos, haja vista que a função destes é apenas de ressaltar o lustro da rocha. Ressalta-se que essa variação da vazão de água não é praticada pela indústria.

Em um estudo realizado para a elaboração de um inventário de ciclo de vida das rochas ornamentais, Valeriano & Gadioli (2018) monitoraram o consumo de água em duas empresas de beneficiamento de rochas (serragem e polimento). Os autores constataram que no período de monitoramento de entrada de água no sistema, cerca de 90% do volume utilizado foi reciclado, indicando a necessidade periódica de reabastecimento do sistema com água de fontes pluviais. Ressalta-se que as perdas de água durante o beneficiamento se dão por evaporação, infiltração e uma pequena quantidade perdida após o tratamento dos efluentes líquidos, em forma de umidade remanescente nos resíduos sólidos destinados aos aterros.

Dada a importância atual do controle de todos os aspectos operacionais dos equipamentos industriais, é de fundamental importância o acompanhamento dos processos de acabamento das rochas de uma forma mais otimizada e automatizada. Neste âmbito, o conceito de Indústria 4.0 surge como uma alternativa para o setor de rochas ornamentais, sendo uma ferramenta de desenvolvimento tecnológico das indústrias, baseada em eletrônicos, tecnologia da informação e comunicação, combinando máquinas com processos digitais. Esse conceito já está inserido no campo do desenvolvimento tecnológico da indústria das rochas ornamentais, como já apresentado nos principais congressos da área, com destaque para o *Global Stone Congress* 2018, com painéis voltados exclusivamente para esse tema.

Uma iniciativa de destaque neste tema está sendo realizada em Portugal em um projeto denominado INOVSTONE. Esse projeto, realizado por um consórcio constituído por 24 integrantes, incluindo empresas do setor de rochas ornamentais, empresas tecnológicas e entidades do sistema científico e tecnológico, surge da necessidade de evidenciar a capacidade dinâmica do Setor das Rochas Ornamentais (RO) e, simultaneamente, reforçar a sua competitividade face ao novo modelo digital de aquisição de dados, no contexto do Building Information Model (BIM).

4.3.3.1 Processos de Resinagem e Telagem das chapas

Os processos de resinagem e telagem (Figura 24) são realizados nas chapas por motivos estéticos e/ou tecnológicos. A resinagem promove o fechamento superficial dos poros das chapas e aumenta a sua resistência às intempéries. Além disto, o uso da resina melhora o aspecto visual da superfície polida.

A resinagem da chapa é realizada após a primeira etapa de polimento (levigamento), com o intuito de atingir a rugosidade ideal para a aplicação da resina. Este processo é feito pela aplicação de resina líquida, geralmente do tipo epóxidica ou fenólica, em chapas previamente aquecidas em fornos específicos. Para acelerar o processo de cura da resina, as chapas são submetidas novamente ao forno e retornam para o processamento do polimento a partir da etapa de polimento 120 *mesh*. A resinagem também é realizada para eliminar algumas imperfeições, rachaduras e trincas presentes nas rochas. Hoje, quase 100% das chapas de granitos exportadas são resinadas.

Figura 24 – Processo de resinagem das chapas. Fonte: O Autor

Previamente à etapa do polimento, é comum a realização da telagem (reforço) em rochas comercialmente denominadas “exóticas”, como, por exemplo, os pegmatitos, de forma viabilizar seu acabamento. As fissuras, trincas, e demais descontinuidades são recuperadas por meio de um tratamento específico, com o uso de resina epóxi e tela de fibra de vidro (Figura 25). Esse conjunto é aplicado no tardo (parte que não será polida) para aumentar a resistência à flexão e evitar quebras ou trincas durante os processos subsequentes (levigamento, polimento e corte) e durante o transporte. Na figura 26 é demonstrado em detalhe a tela aplicada na superfície da rocha.

Figura 25 – Processo de telagem das chapas Fonte: O Autor

Figura 26 – Detalhe da chapa telada. Fonte: O Autor

4.4. FATORES QUE INFLUENCIAM O POLIMENTO

Diferente de outros materiais processados industrialmente, tais como metais e polímeros, as rochas ornamentais não apresentam o comportamento de escoamento e se rompem quando a solicitação mecânica ultrapassa o limite máximo do regime elástico de deformação. Portanto, as rochas são classificadas como materiais rúpteis. Conforme afirmam Stachowaiak e Batchelor (1993), o comportamento tribológico dos materiais rúpteis depende,

principalmente, de suas características físicas e mecânicas, da rugosidade e anisotropia da superfície. No caso das rochas ornamentais essas particularidades podem ser encontradas em conjuntos de materiais com propriedades mecânicas similares ou em rochas específicas, que respondem de formas distintas às solicitações impostas pelos processos. Portanto, o entendimento do mecanismo de desgaste do beneficiamento das rochas se torna tarefa minuciosa.

Os principais fatores que influenciam o polimento das rochas são principalmente os relacionados com as características petrográficas. Dentre elas a dureza é uma das mais importantes a ser entendida (SHEN et. al, 2006; XIE & TAMAKI, 2007).

Um dos conceitos de dureza é definido como a resistência que uma superfície oferece ao risco. De modo geral, uma rocha que apresenta uma dureza elevada demanda um gasto maior de abrasivo para se atingir uma intensidade ideal de brilho. Quando se fala em dureza pode estar tratando tanto do material desgastado quanto do abrasivo (SILVEIRA, 2007). De uma forma empírica a indústria classifica as rochas processadas como duras, médias e macias. Esta classificação é válida tanto para o desdobramento dos blocos quanto para o polimento e é definida pelo tempo do processamento nessas etapas e pela quantidade de insumos gastos para finalizá-las.

A dureza varia consideravelmente entre as rochas de natureza carbonáticas e silicáticas. A maioria das rochas carbonáticas (mármore e travertinos) encontram-se na faixa de dureza baixa ou média (2-3), as silicáticas e quartzo-feldspáticas correspondem a materiais normalmente de durezas altas (5-6) e só em casos isolados atingem durezas extremas (>7), como é o caso de alguns quartzitos e metaconglomerados. Durante o polimento das chapas, o controle da pressão dos cabeçotes sobre a chapa deve levar em consideração a dureza da rocha, pois a perda de massa do abrasivo e da rocha são diretamente influenciadas (CAMARGO, 2013).

Uma classificação utilizada pela Indústria da Pedra é o “fechamento do polimento”, que é uma característica relacionada aos espaços e às depressões que algumas placas já polidas apresentam. Essa classificação é influenciada principalmente pela mineralogia, como a presença de quartzo, granada, mica, principalmente. Rochas sem quartzo (sienitos, por exemplo) tendem a apresentar bom fechamento. Porém, a situação operacional do processo de polimento que a rocha foi submetida é um fator que influencia diretamente esse parâmetro.

Um dos desafios referentes ao mecanismo de polimento de rochas ornamentais é saber se o processo em si ajuda a criar novas fissuras ou interfere nas preexistentes, abrindo ou fechando-as. Tal constatação poderá mudar a forma de ver o material pétreo como apenas um coadjuvante do processo de beneficiamento (SILVEIRA et al., 2013)

As discontinuidades influenciam diretamente no acabamento superficial das placas. Rochas que apresentam um alto grau de microfissuramento geralmente não apresentam boa qualidade final de polimento, como por exemplo, rochas que são compostas por fenocristais de feldspatos que comumente são microfissurados.

Rochas com texturas equigranulares finas geralmente apresentam melhor qualidade final da superfície polida em comparação a rochas com texturas equigranulares grossas e inequigranulares. Algumas estruturas podem influenciar no desgaste diferencial da rocha e de abrasivo, principalmente quando há estrutura de bandamento composicional, pois as bandas claras (mais ricas em quartzo e feldspato) são mais duras que as bandas mais escuras (maiores percentuais de minerais máficos).

Scognamiglio (1995) apud Silveira et al., (2013) ressalta um aspecto relacionado aos rebolos abrasivos utilizados no polimento de rochas, em relação entre a dureza das ferramentas e as rochas polidas. Segundo o autor, o princípio do trabalho do abrasivo não é o da pressão e sim o da diferença de dureza entre seus componentes básicos. Um exemplo encontrado no polimento é a relação entre os abrasivos utilizados no setor, que podem conter carbetos de silício (SiC) e de diamante (C), com durezas 9,5 e 10,0 respectivamente na escala de Mohs, e a rocha ornamental que, mesmo as mais duras, não ultrapassam o índice 7 na mesma escala. O autor sugere a adoção de pressões no trabalho de polimento entre 1 bar e, no máximo, 2 bars. O uso de pressões superiores a 2 bars pode acarretar alguns fatores negativos no processo, como o sobrecarregamento do motor do equipamento, a fragmentação dos rebolos, o aumento do consumo de energia elétrica, o aumento da possibilidade de ocorrer riscamento na chapa, dentre outros.

4.4.1. REBOLOS ABRASIVOS

Os rebolos abrasivos são ferramentas compostas por uma matriz ligante e um elemento abrasivo. Do ponto de vista de desempenho destas ferramentas, o ligante destes compósitos deve apresentar propriedades necessárias para sustentar, de forma eficiente, os elementos abrasivos para garantir duas exigências contraditórias: a capacidade do rebole de cortar a rocha

e o aumento da vida útil da ferramenta abrasiva. Além disto, a matriz deve ter uma resistência ao desgaste adequada para cada tipo abrasivo (TURCHETTA, 2003). Desta forma, o grão abrasivo se desgasta totalmente em conjunto com a matriz ligante, permitindo o afloramento de um novo grão e mantendo o poder de abrasão desse rebolo. Quando a matriz é muito mole, o abrasivo poderá se desprender antes de realizar sua função de desgaste, e quando muito dura, ocorre a planificação do abrasivo com a face da matriz, cegando o rebolo.

Os abrasivos podem ser divididos em duas classes: naturais e sintéticos. São produzidos a partir de uma grande variedade de materiais, para uso como grãos livres ou para serem incorporados em outros produtos. Os abrasivos naturais são encontrados em rochas ou minerais e são obtidos por processos de cominuição, moldagem e ligação. São exemplos destes tipos de grãos naturais o diamante, o coríndon e quartzo. Os abrasivos sintéticos são feitos por processos industriais pela ação do calor, pressão ou química de metais com outros metais. Alguns exemplos destes tipos de grãos abrasivos são o diamante sintético, o nitreto cúbico de boro, a alumina, o carbetto de tungstênio e o carbetto de silício. (DOMPIERI, et al., 2009).

No polimento de rochas ornamentais os rebolos abrasivos são divididos, basicamente, em dois grupos: Abrasivos magnesianos e abrasivos diamantados (resinoides e metálicos). Os abrasivos magnesianos (Figura 27), representantes do primeiro grupo, são compostos por ligante de óxido de Magnésio (MgO) e tem como elemento abrasivo o carbetto de Silício (SiC). São os mais tradicionais do polimento de rochas e apresentam um rendimento inferior quando comparados com os abrasivos mais modernos. Estes abrasivos são fabricados em todas as granulometrias necessárias ao beneficiamento de chapas, do #16 ao #1200 *mesh*. De tecnologia ultrapassada, estão sendo destinados àqueles que utilizam máquinas de polimento semi-automáticas. As empresas possuidoras de politrizes automáticas praticamente aboliram sua utilização nos primeiros satélites, que vão da grana (*mesh*) 16 a 120. Porém, algumas empresas ainda utilizam estes rebolos nas primeiras etapas do polimento logo após o processo de resinagem, visto seu bom desempenho para a retirada do excesso de resina provenientes da resinagem.

Figura 27 – Abrasivos magnesianos para polimento de granitos (A) e abrasivos *frankfurt* para polimento de mármore (B). Fonte: Cobral, 2013.

Os abrasivos resinoides são compostos por diamante, como elemento de corte, envolvido matriz polimérica (epóxi ou poliéster) ou por liga metálica (ferro, cobalto, cobre, dentre outros), demonstrados nas Figura 28 e Figura 29, respectivamente. Estes abrasivos são os que representam a maior evolução tecnológica dos últimos anos e trazem inúmeras vantagens na sua utilização em máquinas automáticas e, até mesmo, semi-automáticas. Os principais ganhos que este material pode dar são: aumento de produtividade e qualidade final, melhor qualidade da água reciclada, diminuição no consumo de energia elétrica, menor pressão de trabalho, redução do tempo morto para troca de abrasivos, entre outras (CAMARGO, 2013).

Figura 28 – Abrasivos resinoides para polimento de granitos (A) e abrasivos resinoides *frankfurt* para polimento de mármore (B). Fonte: Cobral, 2013.

Figura 29 – Abrasivos diamantados metálicos para polimento de granitos (A) e abrasivos *frankfurt* metálico para polimento de mármore (B). Fonte: Cobral, 2013.

4.5. TRIBOLOGIA APLICADA AO POLIMENTO DE ROCHAS

Os fundamentos da Tribologia se mostraram de extrema importância na compreensão dos fenômenos físicos existentes nas diferentes etapas de beneficiamento de rochas ornamentais (RIBEIRO et al., 2004; SILVEIRA, 2007; CARVALHO, 2010; NEVES, 2010; CAMARGO, 2013; ALMEIDA, 2014; BOLONINI & SILVEIRA, 2015). Portanto, faz-se necessário abordar alguns conceitos em geral e sua aplicabilidade no polimento de rochas ornamentais.

Esta ciência surgiu como resposta para o comportamento dos processos de atrito, desgaste e lubrificação que ocorrem na interface entre superfícies que se interagem. Para tal, a natureza e consequência dessas interações encontram respaldo em partes da física, química, mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, termodinâmica, reologia lubrificante, ciência dos materiais, dentre outras.

Tais conhecimentos se mostram bastante úteis quando aplicados em análises operacionais de grande importância econômica, para solucionar problemas de manutenção, confiança e desgaste de equipamentos. A essência da Tribologia está no fato que na interação das superfícies, forças são transmitidas, energia mecânica é convertida e a natureza física e química da topografia das superfícies é alterada (BHUSHAN, 2002).

4.5.1. ABORDAGEM SOBRE O MECANISMO DE DESGASTE DE SUPERFÍCIES

Rabinowicz (1966) define o termo desgaste como “a remoção do material de uma superfície pela ação mecânica de partículas duras em contato com esta superfície”. Portanto, o desgaste não é uma propriedade intrínseca do material, mas o resultado da interação entre o material, o abrasivo e o processo mecânico, aos quais ambos estão submetidos. O comportamento do material, durante o desgaste, dependerá de suas propriedades, das características do abrasivo e das condições de contorno que o material se encontra. O desgaste também pode ocorrer pelo contato e o movimento relativo entre este corpo e um contra corpo sólido, líquido ou gasoso” (ZUM GAHR, 1987).

Em muitos casos o desgaste é um fator indesejável, pois pode causar danos em alguns componentes diminuindo assim a vida útil do material, no caso do polimento, contudo, o desgaste é o responsável pela impressão do brilho desejado em uma superfície rochosa, dando durabilidade e valores estéticos maiores para o produto final (RIBEIRO, et al., 2004).

A Norma ASTM G40-01 (2001) define o desgaste abrasivo como “a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem”. Tradicionalmente são aceitos quatro modos de desgaste que estão representados na Figura 30.

Figura 30-. Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste (KATO, 2001 *apud* RADI et al., 2007).

O desgaste adesivo ocorre quando uma deformação plástica é causada pela ligação adesiva que resiste ao deslizamento no atrito. Neste caso, pode ocorrer formação de trincas que, quando propagam, podem gerar um terceiro corpo e a uma transferência de material. O desgaste abrasivo ocorre em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato. Neste tipo de desgaste ocorre a remoção de material do corpo mais mole pelo mais duro. Quando o desgaste é ocasionado pelo alto número de repetições do movimento ele é chamado de desgaste por fadiga. O desgaste por corrosão é ocasionado por meio de reações químicas e eletroquímicas em meios corrosivos, líquido ou gasoso. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.

Kruschov (1957 *apud* PINTAÚDE, 2002) salienta que um dos parâmetros frequentemente utilizados para prever o regime de desgaste abrasivo, moderado ou severo, é obtido pela razão HA/H (dureza do abrasivo e a dureza do material desgastado). Os mecanismos associados à fadiga a baixo ciclo, como microimpressões estão relacionados com baixas razões HA/H, caracterizando o regime de desgaste moderado, enquanto o microcorte pode ser associado com o regime severo e com altas razões de HA/H. Usualmente, a literatura utiliza a razão HA/H para a previsão de regimes de desgaste, apenas para situações nas quais são verificados mecanismos controlados por deformação plástica.

No caso do desgaste abrasivo, Trezona et al. (1999) distinguem em dois tipos, a saber: os que são controlados por deformação plástica e aqueles controlados por fratura frágil.

Para More & King (1980), a dureza é certamente o fator mais importante na determinação do regime de desgaste, pois exerce um efeito marcante na deterioração das partículas abrasivas, e, conseqüentemente, na geometria das partículas e no tipo de contato. Uma vez que a remoção de material é a combinação da deformação plástica e mecanismos de fratura, não existe uma relação simples entre o desgaste e as propriedades mecânicas dos sólidos quebradiços. Os mecanismos de deformação plástica e de fratura podem causar a remoção de material durante o desgaste abrasivo destes sólidos. Neste caso, o fator predominante é a velocidade, que difere em cada ambiente e em materiais distintos.

Os modos de desgaste são descritos pelas considerações de mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, podem ocorrer através de diversos mecanismos e através de mais de um modo, portanto, a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada modo se torna importante.

Os processos de desgaste são regidos principalmente pela presença ou não de um elemento interfacial. Quando há a presença deste elemento o desgaste pode ser a 2 corpos ou 3 corpos. O primeiro ocorre quando um abrasivo desliza ao longo de uma superfície, e o segundo, quando um abrasivo desliza entre duas superfícies (Figura 31).

Quando não existe elemento interfacial o tipo de cinemática do sistema influi diretamente do tipo de desgaste, que pode variar entre deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, dependendo do tipo de interação e do movimento das interfaces. A erosão pode ainda ser classificada pelo estado físico do contra corpo, sólido ou líquido, ou pelo ângulo de ação, alto ou baixo.

Figura 31 - Diagrama dos processos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces (KATO, 2001 *apud* RADI et al., 2007).

4.5.2. SIMULAÇÃO DO POLIMENTO DE ROCHAS

O estudo pioneiro no Brasil sobre esse assunto foi desenvolvido por Silveira (2007), que aplicou as bases conceituais da Tribologia no polimento de rochas ornamentais e de revestimento, a fim de verificar a relação entre as variáveis executadas no processo, sob a ótica de um tribossistema, composto pela rocha, abrasivos e condições operacionais. Para isto, o autor

desenvolveu um Simulador de Polimento de Rochas (Figura 32 e Figura 33), por meio de adaptações em uma politriz utilizada para confecção de lâminas delgadas de petrografia.

Esse equipamento (Figura 32 e 33) possibilitou a simulação do polimento em várias condições, considerando as variáveis: tempo, velocidade de rotação e intensidade de carga aplicada. A proposta do modelo utilizado serviu para previsão de taxas ideais de desgaste em função dos fatores mais influentes do processo, que permitiu abordar o polimento de rochas sob uma ótica otimizada. Este equipamento foi objeto de sucessivos estudos de polimento com enfoque na Tribologia (CARVALHO, 2010; NEVES, 2010; ALMEIDA, 2014). Porém, algumas considerações não foram pertinentes para sua validação na indústria, principalmente pela cinemática deste ensaio de polimento, que foi baseada no teste *pin-on-disc* (ASTM, G 99-04), e pelo efeito escala da área desgastada pela simulação (ALMEIDA, op cit.)

Figura 32 - SPR – Simulador de polimento de rocha: (à esquerda) laminadora petrográfica utilizada para confecção de lâminas delgadas e (à direita) adaptações para a simulação do polimento de rochas: (A) torre ;(B) haste ; (C) peso; (D) amostra de rocha; (E) dispositivo para colocação de abrasivos; (1) chave geral; (2) dispositivo para saída de água; (3) reostato; (4) marcador de tempo; (5) amperímetro; (6) tacômetro e; (7) mangueira d'água. Fonte:

Silveira, 2007.

Figura 33 - SPR –Simulador de polimento de rochas (SPR) com detalhe da disposição da rocha e do pino abrasivo. Fonte: Silveira, 2017.

Huang et al. (2002) realizaram experimentos de polimentos de granitos em um simulador de laboratório, com aplicação de velocidades extremas de desgaste abrasivo (4000 rpm). Foi investigada a microestrutura da superfície em cada etapa de desgaste, por meios de parâmetros de rugosidade e ganho de brilho (Figura 6), além de escaneamento da superfície por um microscópio eletrônico de varredura.

Os autores relatam uma notável relação, diretamente proporcional, entre o ganho de brilho e a diminuição da rugosidade ao longo das etapas abrasivas, porém com valores variantes para cada tipo de rocha testada. As análises microscópicas indicaram que o mecanismo de desgaste é realizado em 3 estágios, de acordo com as etapas abrasivas realizadas nos experimentos, que variam entre arranhões, microcortes e sulcamentos. Os autores concluíram que existem dois tipos de mecanismos que controlam as taxas de desgaste, regidas por modos rúpteis ou dúcteis, de acordo com a redução do tamanho das partículas abrasivas, como exemplificado na Figura 34.

Figura 34 – Relação entre rugosidade e valores de brilho (Huang et al., 2002).

Huang & Xu (2004) analisaram a temperatura interfacial entre ferramentas abrasivas e placas de granito durante o desgaste abrasivo, realizado por uma politriz laboratorial e modelos analíticos, para verificar a existência de um modelo dúctil de desgaste superficial. Mesmo com os ensaios conduzidos na condição seca de desgaste, o aumento da temperatura foi menor que 100° C na região de medição e nenhuma nova fase cristalina foi detectada na superfície polida. Porém, os autores afirmam que análises microscópicas realizadas indicaram a presença de um modo dúctil de desgaste (Figura 35). Admite-se que, para haver a ocorrência de um evento dúctil em materiais rochosos é necessário a presença de temperatura elevada, que possa ocasionar a fusão da região solicitada, o que ainda não foi possível aferir, principalmente pela dificuldade de se medir a temperatura no momento do atrito da interface rocha-abrasivo.

Figura 35 – Relação entre rugosidade e valores de brilho (Huang & Xu, 2004).

Görgülü & Ceylanoglu (2008) realizaram o polimento com dois modelos de politrizes para verificar a relação entre rugosidade e o brilho em amostras de mármore, com o uso de abrasivos de carvão de silício e diamantados. Os autores afirmam que várias rochas apresentam diferentes superfícies rugosas e valores de brilho sob mesmas condições de operações, dependendo da sequência de grãos utilizadas e da natureza do abrasivo. Ainda afirmam que a relação entre a rugosidade e brilho de rochas com estruturas homogêneas são independentes dos tipos de abrasivos usados no processo de desgaste.

Parâmetros de exposição ao processo de polimento, por meio do arraste de esteira transportadora, foram aplicados em uma politriz por Yavuz et al. (2011). Os autores realizaram acompanhamentos entre a relação de diminuição de rugosidade e de aumento de brilho, ao longo das etapas de polimento (Figura 36). Foi concluído nesta pesquisa, que a redução da velocidade da esteira resultou na diminuição significativa da rugosidade nas primeiras etapas de desgaste. No polimento com abrasivos mais finos, esta alteração se tornou menos perceptível. Sobre a exposição ao processo os autores relatam que, dentre os tempos de desgaste simulados, o maior deles não se traduziu em um melhor acabamento de superfície, indicando que há um tempo ótimo para submeter o desgaste das rochas.

Figura 36 – Relação entre rugosidade e valores de brilho (YAVUZ et. al., 2011).

Gürçan, et al. (2013) analisaram o efeito das propriedades mineralógicas e da microestrutura na rugosidade superficial e em parâmetros de brilho de amostras de mármore quando submetidos ao processo de polimento. As análises da morfologia e o resultado do

desgaste em cada mineral foram conduzidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os autores concluíram que os valores de brilhos são importantes para a previsão da qualidade do polimento, porém os parâmetros de rugosidade são mais representativos para qualificar o acabamento da superfície de polida.

Com o propósito de demonstrar a importância da velocidade de corte para o processo, Camargo (2013) realizou um estudo em uma politriz industrial semiautomática por meio da variação de alguns parâmetros operacionais, tais como: pressão de carregamento (1 e 2kgf/cm²), velocidade de rotação de satélite (300, 400, 500 e 600 rpm) e a de exposição do satélite sobre a rocha (1, 2 e 3). Para a variação das condições velocidade de rotação do satélite foi instalado um inversor de frequência na politriz, como demonstrado na Figura 37.

Figura 37 – Politriz semiautomática com as adaptações realizadas: (1) - Inversor de frequência instalado; 2 - painel elétrico original da politriz. Fonte: Camargo, 2013.

Os resultados encontrados pela variação das condições operacionais mostraram que a rocha atua como elemento ativo, desgastando mais ou menos abrasivo e apresentando brilho de acordo com as propriedades petrográficas e em função da solicitação imposta. O autor ainda descreve que os maiores valores de brilho foram encontrados com a utilização da maior pressão de

polimento (2kgf/cm²) na máxima exposição testada. Com relação à velocidade de rotação de satélite, a utilização de 400 rpm, na maior parte dos casos, foi responsável pelos melhores resultados de brilho. Além disto, os ensaios permitiram saber que o aumento da velocidade com que o abrasivo passa sobre a superfície da rocha pode não refletir em aumento do brilho superficial.

Bolonini e Silveira (2016) realizaram testes de polimento de rochas em um equipamento desenvolvido e patenteado pelo Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, denominado Simulador do Polimento de Rochas Ornamentais “S-PRO”(Figura 38), que permite a avaliação de cada parâmetro do tribossistema de polimento de rochas (rocha, abrasivo e condições operacionais). Os testes foram executados em 48 situações operacionais, para comparar a qualidade das superfícies polidas com vazão de água reduzida (15 l/min) e com as daquelas polidas pela indústria com a vazão usual (30 l/min) Foi utilizado no estudo um monzogranito isotrópico, conhecido comercialmente como “Cinza Castelo” e a eficiência do polimento foi obtida por medidas de brilho. Os resultados mostraram que o uso da água na indústria pode ser otimizado, pois no abrasivo 1200 mesh foi possível obter 91,4% do brilho obtido na indústria. Além disto, os resultados obtidos permitiram inferir que existe a viabilidade técnica da redução da vazão da água, mas que necessitam de estudos mais aprofundados sobre o tema.

Figura 38 – Simulador de polimento de rochas ornamentais - SPRO. Fonte: O Autor

4.6. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Segundo a definição da norma ASTM D3878-15, os compósitos são substâncias que consistem da junção de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil com certas propriedades que não se encontram nos materiais isoladamente.

Atualmente existe no mercado uma grande quantidade de tipos de polímeros, que são indicados para as mais variadas aplicações, de acordo com a composição química de cada, e são utilizados valendo-se de suas propriedades físicas, mecânicas, elétricas, óticas, etc. Devido a produção em larga escala de alguns destes polímeros, são classificados com polímeros *commodities*, em que se destacam os polietilenos, polipropilenos, poliestirenos, poliéster e poliuretana. Outros polímeros que são fabricados em menor escala que tem uma aplicação mais específica são denominados de plásticos de engenharia (FERNANDES, & LONA, 2004).

De uma forma geral os compósitos são compostos por uma matriz e um reforço, que apresentem propriedades mecânicas complementares. As matrizes podem ser metálicas, poliméricas e cerâmicas. Porém, devido a sua leveza e fácil moldagem, os polímeros são os materiais mais utilizados atualmente. Em relação ao peso, os compósitos poliméricos apresentam propriedades mecânicas específicas, que podem exceder consideravelmente as dos metais (SILVA, 2003). Os reforços das matrizes poliméricas podem variar de acordo com a sua aplicação. Os mais comuns são as fibras sintéticas e as orgânicas, materiais granulares, como algumas variedades de sílica, cargas minerais, entre outras.

4.6.1. POLIURETANA

A poliuretana (PU) é uma classe de polímeros que têm sido largamente aplicados em diversas áreas, como medicina, setores automobilismos e industriais. É um material extremamente versátil, que pode ser termorrígido ou termoplástico. Suas propriedades podem ser alteradas pela variação do tipo ou da quantidade das três substâncias básicas de sua produção: di-isiocianato, diol de cadeia curta e diol de cadeia longa. Devido à diversidade de combinações de segmentos flexíveis e rígidos, podem ser formulados como materiais distintos,

desde os elastoméricos macios e flexíveis (materiais elásticos que preenchem a lacuna entre plásticos e borrachas), aos plásticos duros.

Um dos benefícios obtidos ao se utilizar a poliuretana está na técnica utilizada em sua moldagem, que pode ser feita de maneira simples, pois requer apenas baixas pressões e os moldes podem ser feitos de materiais menos dispendiosos. Isso permite a produção simples de protótipos de baixo custo para o desenvolvimento de novos produtos ou refinamento dos já estabelecidos.

Essa classe designa diversos polímeros que são preparados a partir da reação em etapas ocorrida com isocianatos polifuncionais, ou derivados de poliisocianatos e polióis, contendo uretano intramoleculares (HOWARD, 2002 apud FIORIO, 2011). O elemento estrutural característicos para praticamente todos os PUs é o grupo uretano. A polimerização dos uretanos ocorre quando se reage uma substância com dois ou mais isocianatos ($-N=C=O$) com um álcool ($-OH$). Outras substâncias como: os agentes de cura, agentes de expansão, catalisadores, aditivos, cargas, podem ser utilizados para uma eventual modificação estrutural do polímero. (PEREIRA, 2010) Nas indústrias, é muito comum produzir PU utilizando, como matérias-primas, o diisocianato de parafenileno e o etilenoglicol (CANGEMI, et al., 2009).

Os poliois e isocianatos disponíveis industrialmente são, em sua maioria, derivados do petróleo. Uma alternativa viável para ser empregado na elaboração destes componentes são os óleos vegetais, como o óleo de mamona, com custos relativamente baixos de produção e com grande potencial de biodegradação.

Os isocianatos mais importantes e utilizados para a fabricação de poliuretanas são os aromáticos, destacando-se entre eles o diisocianato (TDI) e o 4,4- diisocianato difenilmetano (4,4 MDI). Atualmente o MDI é o mais utilizado na produção de isocianato, com aplicação voltada principalmente para produção de espumas rígidas (60%), mas também pode ser utilizado como espumas microcelulares e semimaleáveis, produtos adesivos, revestimento, elastômetro, dentre outros. Sua produção é feita a partir de anilina e formaldeído, que reagem em conjunto, utilizando ácido clorídrico como catalisador. Já o TDI possui uma química menos complexa do que a do MDI, no entanto, o TDI apresenta vários problemas na sua utilização, devido à toxicidade e consequentes problemas de higiene industrial. A maior aplicação do TDI é na indústria de espumas flexíveis (85%), seguido pela indústria de revestimentos (10%) e de outras pequenas aplicações (PERES, 2016 apud GANDOLFI, 2016).

Um aspecto relacionado com o TDI e o MDI é a sua reatividade com a água. Esta reação libera dióxido de carbono e forma poliuréia, que é um sólido insolúvel. Os vapores liberados pelo isocianato podem se apresentar como uma limitação em formatação de compósitos compactos em recipientes fechados, pelo aumento da pressão interna dos moldes das peças (POLIURETANO & TECNOLOGIA, 2018).

No processo de polimerização da poliuretana é comum o uso de aditivos e/ou catalizadores, que visam controlar ou modificar tanto a reação de formação dos PU's, quanto as suas propriedades finais. Destacam-se dentre os mais utilizados, os agentes de expansão, surfactantes, agentes antienvelhecimento, retardantes de chama, sequestrantes de umidade, etc. Podem ser classificados em duas grandes categorias: compostos de amina (básica) e compostos de complexos organometálicos. Os catalizadores à base de amina terciária comumente utilizados são: Diaminobiciclooctano (DABCO), trietileno diamina (TEDA), dimetilenoamina (DMEA), Dibutildilaurato de estanho (DBTL), entre outros (KARAK, 2012).

Além dos aditivos e catalizadores outro reagente comumente utilizado é o extensor de cadeia. Com baixo peso molecular, atua como elemento de ligação entre isocianatos vizinhos. Também conhecido como agentes de cura, são compostos bifuncionais terminados em hidroxila ou amina, ou no caso das espumas, terminados com uma molécula de água. Os compostos com funcionalidade mais elevada são considerados reticuladores que são utilizados para aumentar o nível de ligação covalente em poliuretanas rígidas (PERES, 2016 apud GANDOLFI, 2016).

4.6.1.1. Poliuretana derivada do óleo de mamona

O óleo de mamona é obtido da semente da planta *Ricinus communis* e possui em abundância a presença do triglicerídeo do ácido ricinoléico numa faixa de 84,0% a 91,0% da sua composição, o que é pouco frequente nos óleos vegetais. A estrutura molecular deste ácido possui a particularidade de ter três grupos funcionais altamente reativos. O grupo carbonila no primeiro carbono, a dupla ligação (ou insaturação) no 9º carbono e o grupo hidroxila no 12º carbono (CANGEMI, 2010) Esses grupos funcionais fazem com que o óleo de mamona possa ser submetido a diversos processos químicos, nos quais se obtém uma enorme gama de produtos, como a resina termorrígida, utilizada na presente pesquisa.

Uma das suas características da resina poliuretana é que ela pode ser mono ou bicomponente. A monocomponente, constituída por pré-polímeros a base de isociano, cura à

temperatura ambiente por reação com a umidade do ar. Já a bicomponente é formada por dois componentes: um pré-polímero e um poliol. O processo de poliação ocorre quando esses componentes reagem resultando na resina poliuretana (ASSAGRA, 2011).

Segundo Wood (1990) *apud* Silva (2003) as resinas poliuretana podem ser obtidas em diferentes densidades que variam de 6 a 1200 kg/m³, com um elastômero de alta flexibilidade ou de maior dureza. Tais características propiciam a aplicação deste material em diversos segmentos da indústria. Neste contexto a resina poliuretana à base de mamona destaca-se por ser isenta de materiais voláteis, solventes e pesados, por isto é completamente atóxica. A reação da polimerização é exotérmica e sua velocidade depende da estrutura do isocianato e do poliol. A reatividade do isocianato depende da influência dos grupos vizinhos e da configuração da molécula.

4.6.2. ADIÇÃO DE CARGAS EM POLÍMEROS

As cargas são usadas como constituinte dos compósitos poliméricos devido a duas razões principais: redução do custo do compósito, por ser um substituinte de volume, ou modificações nas propriedades físicas e químicas dos polímeros. No primeiro caso a substituição do volume é feita dentro de certos limites, dentre os quais as propriedades desejadas dos polímeros não sejam alteradas e que se apresente como uma vantagem econômica. Já o uso visando a melhoria do compósito os objetivos são inúmeros, tais como: melhorar o processamento, controle de densidade, efeitos ópticos, controle da expansão térmica, retardamento de chama, modificações no que se refere às propriedades de condutividade térmica, resistência elétrica e susceptibilidade magnética, além da melhora de propriedades mecânicas, tais como a dureza e a resistência ao rasgo.

4.6.2.1. Cinza da casca do arroz

A casca do arroz (CA) é um revestimento do grão formado durante seu crescimento e é composta, além da celulose e lignina, por 20 % por resíduos inorgânicos. Estes resíduos contêm, em média, 95 a 98% em massa de sílica na forma amorfa hidratada (LARBI, 2010). Desta forma esta casca é uma matéria prima de baixo custo, que tem como características a alta abrasividade

e resistência à degradação. Por apresentar um alto poder calorífico (aproximadamente 16,3MJ/Kg) e um alto conteúdo de materiais voláteis é utilizada como combustível no próprio processo de beneficiamento dos grãos (ARMESTO et al., 2002).

A combustão da CA pode ser utilizada diretamente na secagem do grão durante seu processo de industrialização. Esta queima resulta em cinzas com estruturas variáveis, dependendo diretamente da temperatura atingida e do equipamento utilizado. Temperaturas acima de 800 °C gera cinza residual em forma cristalina. Quando queimada em temperaturas que variam entre 450 a 700 °C, obtêm-se sílica no estado amorfo (FERRO; SILVA & WIEBECK, 2007). A sílica amorfa é um subproduto bastante interessante para vários segmentos industriais, por suas propriedades de baixa condutividade térmica e alta resistência ao choque térmico e elevada dureza. Essas propriedades fazem da cinza da casca de arroz (SCA) um componente voltado à produção de produtos cerâmicos, com funções refratárias e como isolante térmico. Além destas características ela tem sido bastante aproveitada como material pozzolânico na indústria cimenteira.

Em um estudo realizado por Ismail et al., (1999) foi constatado que um aumento do teor de cinzas de casca de arroz, utilizada como carga numa blenda polimérica formada por borracha natural e polietileno de baixa densidade, resultou na redução da resistência à tração, alongação e na densidade, porém com aumento da dureza e do módulo de elasticidade.

Segundo Folleto et al., (2005) a SCA pode ser empregada como carga na fabricação de compósitos de borrachas natural para promover melhores propriedades mecânicas como: tensão, dureza, alongação e acréscimo de massa fornecendo, assim, um composto de borracha com melhor desempenho.

Ozioko (2011) estudou o comportamento de resistência à abrasão de matrizes à base de epóxi com a incorporação de SCA por meio de ensaio *Pin on disc*. Os compósitos foram elaborados por diferentes proporções de cargas (10, 20, 30, 40 % de SCA). O autor relata que a incorporação das cargas aumentou significativamente a resistência à abrasão, com comportamento uniforme para menores taxas de desgastes diretamente proporcional ao aumento da proporção das cargas.

4.6.2.2. Carbetto de silício

O SiC foi descoberto em 1891, durante uma experiência com síntese de diamantes, por E.G. Acheson, que supôs que a substância obtida fosse um composto de carbono e de Al_2O_3 (corundum) contido na argila, que foi denominado caborundum (YAMADA & MOHRI, 1991). O processo para obtê-lo também foi desenvolvido por Acheson, que é baseado na redução carbotérmica, de acordo com a equação:

Segundo Godoy (2006) o processo é realizado pela mistura de sílica e carbono que são submetidos à temperaturas superiores a 2400°C , obtendo-se o SiC cristalino. O material passa por um processo de moagem, refino e classificação, de acordo com a aplicação dos pós processados. O carbetto de silício é um material extremamente eficiente quanto a sua aplicabilidade, apresentando uma elevada dureza e excelente estabilidade térmica, além de ser protegido por uma camada de SiO_2 , que o protege contra a oxidação. É aplicado em vários segmentos industriais, principalmente como material refratário, além de ser utilizado na indústria de porcelana e na sinterização de metais duros. Cabe destacar a sua utilização como pós abrasivos, que se relaciona diretamente com a sua finalidade para a presente pesquisa. Algumas de suas propriedades, sumarizadas por Yamada & Mohry (1991), são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas do SiC.

PROPRIEDADES	SiC
Densidade (g/cm^3)	3,21
Módulo de elasticidade (GPa)	455
Temperatura de decomposição ($^\circ\text{C}$)	2830 ± 49
Resistência à tração (Mpa)	171
Resistência à compressão (Mpa)	1050
Tensão de Escoamento (Mpa)	140
Tenacidade, K_{Ic} , ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	2,5 a 4,0

Industrialmente são comercializados o carbetto de silício (SiC) preto e o verde. Para a utilização como ferramentas abrasivas, o SiC deve ter no mínimo de 96,5% de pureza (cabetto de silício “Preto”), o que garante uma dureza suficiente para o processo de corte, desbaste,

retífica e polimento nas indústrias de transformação, operando em manutenção, ferramentaria, afiação de ferramentas e corte de não ferrosos e metais com baixa resistência a tração. O carbetto de silício “Verde”, com pureza química de 99,0% é indicado para aplicações como abrasivo em ligas de ferramentas de aço de alta dureza, que exigem à inércia química e refratariedade, principalmente em operações abrasivas onde são atingidas altas temperaturas durante o processo de abrasão (Dompieri et al., 2009).

Um dos primeiros testes aplicando o SiC em matrizes poliméricas para polimento de rochas foi feito por Aigueira & Filgueira (2006). Os autores elaboraram coroas de polimento rochas ornamentais com matrizes compostas por poliéster, com a incorporação de concentrações variáveis de SiC (5, 10, 20, 30, 40 e 50 %). Os compósitos foram submetidos a um ensaio de desgaste abrasivo no equipamento de ensaio *Amsler* (modificado para testes de dureza de compósitos) e comparados com o desempenho de rebolos comerciais a base de cimento SOREL. Os melhores resultados se deram para os compósitos elaborados com 50% de SiC e superarem em 5 vezes a coroa abrasiva comercial, no polimento da rocha, porém com perdas de massa da peça maior que as do rebole SOREL.

4.6.3. USO DA RESINA POLIURETANA DE MAMONA COMO MATRIZ DE ABRASIVOS DE POLIR ROCHAS

O primeiro estudo a testar o potencial desta resina, como matriz polimérica de abrasivos de polimento de granitos, foi realizado por Leitão e Silveira (2012). A pesquisa foi conduzida pela confecção de corpos de prova de abrasivos, compostos por pela resina de mamona como matriz e diamante como elemento abrasivo. Os testes foram realizados pelo simulador de polimento de rochas, desenvolvido por Silveira (2007). O objetivo da pesquisa, foi comparar o rendimento dos abrasivos de resina de mamona, em duas formulações de matrizes (uma liga macia - D1 e uma com maior dureza – D2), contendo diamantes próprios para abrasivos resinoides (RB) e diamantes usados em abrasivos metálicos (MB) e com os resultados obtidos com o uso de abrasivos epóxi comerciais. A eficiência do polimento no teste foi obtida pela relação perda de massa de abrasivos e de ganho de brilho dos corpos de prova. Nos resultados, os abrasivos de mamona se destacaram, pela maior resistência ao desgaste abrasivo e os valores de brilhos superiores na maioria das amostras testadas, como demonstrado nas Figura 39 e Figura 40, respectivamente.

Figura 39 – Perda de massa dos jogos de abrasivos: MB – diamante para ligas metálicas; RB – diamantes próprios para liga resinoide; D1 – liga vegetal macia; D2 liga vegetal dura (Leitão e Silveira, 2012).

Figura 40 – Análise de brilho das superfícies de rocha submetidas ao SPR com abrasivos vegetais e epóxi diamantados (Leitão e Silveira, 2012).

Após a constatação do potencial de utilização desta matriz, Leitão & Silveira (2013) analisaram o desempenho de rebolos abrasivos utilizados para polimento de rochas também confeccionado com esta matriz, comparando-a com abrasivos comerciais e em uma politriz semiautomática industrial (Figura 41). Na confecção dos rebolos abrasivos, foi utilizada uma resina poliuretana bi-componente de origem vegetal, combinadas em diferentes proporções.

Com intuito de avaliar a eficiência do rebolo abrasivo de resina vegetal, realizou-se ensaios também em rebolos comerciais à base de resina.

Figura 41 – Politriz semiautomática realizando o polimento com abrasivos confeccionados com resina poliuretana de mamona (LEITÃO E SILVEIRA, 2013).

Os resultados mostraram o melhor desempenho do rebolo de resina vegetal frente ao polimento realizado com o abrasivo comercial, com destaque para um menor desgaste no parâmetro de perda de massa do abrasivo e por apresentar um melhor acabamento superficial da chapa.

Seraco & Silveira (2015) relataram que os estudos anteriores conduzidos pela elaboração de abrasivos a base de resina poliuretana de mamona, que continham como elemento de corte o Carbeto de Silício (SiC) como elemento de corte, não alcançaram resultados tão positivos quanto ao parâmetro de brilho desejado. Os autores constataram que este fato pode estar relacionado com a relação entre a dureza da resina e o elemento de corte, o que ocasionou uma diminuição do poder de corte da ferramenta. A partir desta constatação foi desenvolvido uma nova liga composta pela resina vegetal supracitada, a qual foi incorporada a ela uma carga de carbeto de silício (1200 *mesh*) como e carga para endurecimento da matriz. A definição do melhor traço entre os componentes da resina (poliol e pré-polímero) e a proporção de carga, definida a partir do ensaio de resistência ao desgaste “*Taber Test*”, apresentaram um desempenho satisfatório para ser utilizada como matriz em rebolos de polimento.

Dorigo e Silveira (2016) realizaram uma pesquisa para avaliar a dureza de compósitos confeccionados com a resina poliuretana de mamona cargas de carbeto de silício e da sílica da cinza da casca do arroz, em distintas proporções, com o intuito de encontrar um traço com potencial de utilização como matriz de abrasivos para polimento de rochas. Neste estudo, foram

confeccionados 40 corpos de prova para determinação da resistência à abrasão ao ensaio de desgaste “*taber test*”, em 4 conjuntos com 10 corpos de prova cada, com variação de cargas de cinza da casca de arroz (A) e de carbetos de silício preto (B), com cargas fixas de 25 e 50%, em função do peso total da resina. Para cada conjunto de corpo de prova foi fixado a carga A e variado a proporção da carga B, da mesma forma que para cada conjunto de cargas B foram variados a carga A, como exemplificado na Figura 14.

Para a confecção dos abrasivos a base de poliuretana de mamona, foram adotados alguns traços, envolvendo proporções distintas da resina (poliol e pré-polímero) e de cargas, de acordo com os resultados de ensaios obtidos por Dorigo e Silveira (2016), demonstrados na Figura 42. Neste estudo, foram confeccionados 40 corpos de prova para determinação da resistência à abrasão ao ensaio de desgaste “*taber test*”, em 4 conjuntos com 10 corpos de prova cada, com variação de cargas de cinza da casca de arroz (A) e de carbetos de silício preto (B), com cargas fixas de 25 e 50%, em função do peso total da resina. Para cada conjunto de corpo de prova foi fixado a carga A e variado a proporção da carga B, da mesma forma que para cada conjunto de cargas B foram variados a carga A, como exemplificado na Figura 42.

Figura 42– Fluxograma esquemático das proporções das cargas de carbetos de silício e cinza da casca do arroz (adaptado de Dorigo e Silveira, 2016).

Os ensaios foram realizados em um abrasímetro *Taber*, modelo 5135 (Figura 43 A) por uma empresa que confecciona e comercializa abrasivos industriais. Este ensaio consiste em submeter uma amostra a um desgaste abrasivo, cujo elemento de corte são dois rebolos

padronizados. Os corpos de prova confeccionados para este ensaio foram feitos em moldes (Figura 43 B) com dimensões de 95mm de diâmetro externo, 26mm de diâmetro interno e 5 a 10 mm de espessura. Cada amostra foi submetida à 2000 ciclos à uma velocidade de 60 ciclos por minuto, com 2 Kg de peso adicional. São apresentados na Figura 44 os corpos de provas submetidos ao ensaio descrito. Os resultados mostraram que, ao final dos ciclos de desgaste, a perda de massa para alguns conjuntos de corpos de prova, foi menor ou próxima à 0,5%, que é taxa de desgaste máxima tolerável de compósitos para utilização como matriz de abrasivos industriais, como demonstrado na Figura 45. Nota-se que o aumento da resistência à abrasão, neste ensaio, apresentou-se de forma diretamente proporcional ao aumento da quantidade de cargas usadas nos compósitos.

Figura 43– Abrasímetro *Taber* (A) Moldes para confecção de corpos de prova (B).

Figura 44– Corpos de prova ensaiados (Dorigo e Silveira, 2017).

Figura 45 – Resultados de perdas de massa dos compósitos elaborados com resina de mamona e cargas em diferentes percentuais. Nota-se que a resistência à abrasão é maior para os últimos corpos de prova, confeccionados com maior quantidade de carga, como demonstrado na seleção em verde no gráfico. Adaptado de Dorigo & Silveira, 2017.

Após a constatação da eficiência da matriz poliuretana obtida no ensaio *Taber Test*, os autores elaboraram rebolos abrasivos com matriz contendo um percentual de 50% de SCA e 45% de SiC. A esta matriz foi utilizado 13g de diamante sintético como elemento de corte, na granulometria 600 *mesh*. Os testes de polimento foram realizados em uma politriz semiautomática industrial. Para a realização do teste em escala real a politriz foi programada com pressão de 2 bars e velocidade de rotação do satélite constante de 500 rpm, realizando movimentos alternados entre ziguezague, transversal, longitudinal e de contorno. Iniciou-se o polimento em toda a extensão da chapa com abrasivos magnesianos nas granulometrias #24, #36, #60, #120 (*mesh*) para a remoção da rugosidade mais grossa da superfície, dando continuidade com abrasivos epóxi nas granulometrias #120, #220 e #400 (*mesh*). Após a realização destas etapas a chapa foi dividida em duas faixas de área equivalente para a realização da comparação da eficiência dos abrasivos a base de resina poliuretana de mamona com os comerciais a base de epóxi, ambos na granulometria 600 *mesh*.

Os autores relataram que o resultado do polimento com os abrasivos à base de mamona foi muito satisfatório, em consideração aos valores de brilho e de perda de massa. O polimento realizado com os abrasivos de mamona apresentou uma média para os valores de brilho aproximadamente 10 GU (Gloss Unit) maior que a média do brilho obtido na chapa polida com

os abrasivos de liga epoxí (Figura 46) com um desgaste menor que os abrasivos industriais (Figura 47).

Figura 46 – Resultados de brilho obtidos no polimento com os dois tipos de rebolo abrasivo na granulometria 600 *mesh* (DORIGO & SILVEIRA, 2017).

Ao se analisar o gráfico de perda de massa abrasiva a seguir (Figura 47), nota-se que o abrasivo de mamona apresentou um desgaste menor, o que reflete na vida útil maior do rebolo abrasivo de mamona.

Figura 47 – Gráfico da perda de massa abrasiva após o ensaio de polimento (DORIGO & SILVEIRA, op cit.).

5. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos experimentais adotados na presente pesquisa foram baseados em estudos desenvolvidos com a metodologia de confecção de rebolos abrasivos à base de resina poliuretana de mamona, com adição de cargas sólidas e testes de polimento com ênfase nos conceitos da Tribologia. O potencial de utilização desta resina como matriz de rebolos abrasivo para polimento já se mostrou viável, como demonstrado na revisão bibliográfica compilada. Porém, ainda é escasso na literatura dados sobre as propriedades potenciais de uma matriz para ser utilizada como constituinte dos rebolos abrasivos de polimento de rochas. Desta forma, a etapa experimental dá prosseguimento à esta linha de pesquisa, por meio de confecção e testes de toda a linha de rebolos abrasivos necessários para o polimento industrial.

Como se trata de um estudo de caráter inovador, a etapa experimental do trabalho foi dividida em duas partes: a primeira parte foi realizada para obter parâmetros de comportamento da resina quando composta pelos materiais escolhidos pela pesquisa, sendo a definição do melhor traço para ser submetido ao polimento industrial e a efetividade destes no desgaste superficial das rochas; e a segunda foi a avaliação da eficiência do polimento, em termos de perda de massa de abrasivo e ganho de brilho superficial da rocha, para os ensaios com os rebolos desenvolvidos pela pesquisa e rebolos industriais.

São apresentados a seguir os materiais selecionados para a pesquisa, os procedimentos experimentais adotados na confecção dos rebolos abrasivos, com resultados preliminares de evolução da metodologia de confecção de abrasivos e os testes em escala industrial de polimento.

5.1. CONFEÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS A BASE DE POLIURETANA DE MAMONA

5.1.1. MATERIAIS PARA CONFEÇÃO DO REBOLO ABRASIVO

5.1.1.1 Resina poliuretana

A resina poliuretana utilizada foi fornecida por uma empresa que comercializa produtos formulados a base de poliuretana vegetal de mamona. É uma resina termorrígida, bi-

componente, composta por um pré-polímero (componente A) à base de MDI e um poliol (componente B), mostrada na Figura 48. A proporção utilizada foi a recomenda pelo fabricante, de 1:1,2 (uma parte do componente A + uma parte e 20% do componente B, em peso). As características técnicas fornecidas pela empresa são apresentadas a seguir:

- Consistência: fluída
- Cor após cura: âmbar;
- Resistência ao calor: apresenta perda de massa somente após 210 °C
- Liberação de elementos tóxicos: isento
- Secagem ao Toque: 60 a 90 minutos dependendo da temperatura ambiente
- Tempo mínimo de retirada do molde: 6 horas
- Tempo de cura e manuseio: 24 horas
- Após a mistura o tempo de trabalho (*pot life*) gira em torno de 15 minutos

Figura 48 – Resina poliuretana bi-componente composta pelo pré-polímero (A) e pelo poliol (B).

5.1.1.2. Cargas

Cinza da casca de arroz – CCA

A cinza da casca do arroz (Figura 49), utilizada para a confecção da matriz, foi fornecida por uma empresa do ramo de produção de arroz. Essa cinza é proveniente da queima controlada da casca de arroz em sistema de combustão via leito fluidizado. Segundo dados técnicos da empresa é um produto inerte, composta por sílica amorfa ($\geq 90\%$); carbono ($\leq 6\%$); sílica cristalina ($\leq 2\%$); óxido de sódio ($\leq 1,5\%$); e contém traços de óxido de ferro, cálcio, alumínio, magnésio e potássio. Trata-se de um material usado largamente em concreto, argamassa e pasta de cimento portland, borrachas e plásticos. As características físicas fornecidas pela empresa são:

- Diâmetro médio: $<8,0\ \mu\text{m}$.
- Resíduo na peneira $45\ \mu\text{m}$: $\leq 10,0\%$.
- pH: $\leq 10,0$.
- Ponto de fusão: $1550\text{-}1570\ ^\circ\text{C}$.
- Perda ao Fogo: $\leq 3,5\%$.
- Densidade aparente: $550 - 600\ \text{kg/m}^3$.
- Solubilidade: Insolúvel em água; solúvel em HF e KOH ou NaOH.
- Área específica B.E.T.: $20.000\ \text{m}^2/\text{kg}$.
- Densidade aparente > 550
- Massa específica (g/cm^3) $2,16$

Figura 49 – Sílica da cinza da casca do arroz utilizada como carga.

Carbeto de Silício – SiC

O carbeto de silício foi fornecido por uma empresa que desenvolve produtos abrasivos para confecção de rebolos abrasivos industriais para polimento de rochas. Foi utilizado para a confecção das matrizes o carbeto de silício preto, na granulometria 1200 *mesh* (Figura 50). O elemento de corte adicionado aos compósitos foram o carbeto verde nas granulações 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh* (Figura 51), de acordo com as etapas realizadas pela indústria de polimento.

Figura 50 – Carbeto de silício preto utilizado como carga.

Figura 51 – Carbeto de silício verde utilizados como elementos de corte.

5.1.1.3. Molde e dispositivo de encaixe nos satélites

Os moldes utilizados na etapa de confecção de rebolos abrasivos foram doados por uma empresa que confecciona abrasivos industriais, compostos por forma e um dispositivo de encaixe dos abrasivos no satélite (Figura 52).

Figura 52 – Molde utilizado para confecção do reboło abrasivo (à esquerda) e dispositivo de encaixe do reboło no satélite (à direita).

5.1.2 MÉTODOS PARA A CONFECÇÃO DOS REBOLOS ABRASIVOS

Os métodos apresentados a seguir foram executados para a obtenção de parâmetros de comportamento de dispersão dos elementos de corte na matriz, tempo de cura dos rebolos e testes prévios, para a definição dos traços a serem utilizados no desenvolvimento de toda a linha de rebolos abrasivos à base de resina de mamona. Como se trata de testes com um novo tipo de abrasivo, contendo distintos percentuais de cargas, será apresentado e discutido a seguir a evolução do processo metodológico para a obtenção da peça final, que foi submetida aos ensaios de polimento juntamente com os abrasivos comerciais.

5.1.2.2. Avaliação da cura e dispersão dos elementos de corte na matriz do rebolo

O primeiro passo da metodologia adotada foi a avaliação do comportamento do rebolo com base nos parâmetros de cura, expansão e disposição dos grãos na matriz da peça. Sabe-se que a umidade interfere diretamente no processo de cura desta resina. Assumiu-se assim que, em escala industrial, o teor de umidade das cargas pode variar e que pela escala de produção das indústrias é inviável que estas sejam constantemente secas em estufa. Portanto, os corpos de prova foram moldados com a incorporação das cargas com umidade higroscópica e também com cargas submetidas à secagem em estufa a 100° C, por 1 hora.

Neste trabalho, foi adotado um traço a partir dos dados de resistência à abrasão obtidos pelos estudos de Dorigo & Silveira (2016) de 50/50 (50% de SiC e 50% CCA), em relação ao peso total da resina) Esse traço apresentou uma perda de massa da ordem de 0,20 % no ensaio de desgaste *Taber Test*. O elemento de corte foi o carbeto de silício verde na granulometria 24 *mesh* e o traço utilizado é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Traços utilizados na confecção dos rebolos.

Componentes	Traço (g)
Pré polímero	48
Poliol	58
SCA 1200	53
SiC 1200	53
SiC 24	13

Para a realização da moldagem dos rebolos, os componentes da resina foram pesados, misturados por 2 minutos e submetidos ao sistema à vácuo por mais 10 minutos. Após esta etapa, foram adicionados as cargas e o elemento de corte à resina e o compósito foi misturado por mais 1 minuto. Os corpos de prova foram moldados usando formas industriais de produção de rebolos abrasivos. Após 2 dias da confecção, os abrasivos foram desenformados e atingiram o processo de cura final após 15 dias. As Figura 53 e Figura 54 resumizam as etapas executadas para a fabricação dos rebolos abrasivos.

Figura 53 – Método utilizado para a confecção dos rebolos abrasivos: (A) Extração dos gases liberados pela reação da resina no sistema de vácuo, (B) mistura dos componentes (resina e cargas) e (C) preenchimento dos moldes dos abrasivos com o compósito.

Figura 54 – Finalização da moldagem dos rebolos abrasivos: (A) encaixe da tampa do molde, (B) molde fechado e (C) abrasivos desenformados. Notar o início da expansão na imagem B, indicado pela seta amarela.

Os corpos de prova moldados contendo umidade higroscópica apresentaram uma expansão considerável, o que não ocorreu nos corpos de prova moldados com cargas submetidas à secagem prévia em estufa. Os resultados obtidos pelos dois métodos são demonstrados na Figura 55.

Figura 55 – Corpos de prova moldados com cargas contendo umidade higroscópica (A) e corpos de prova moldados com cargas submetidos à secagem em estufa (B).

A dispersão dos grãos abrasivos de carbeto silício verde em todos os conjuntos de rebolos ocorreu de forma satisfatória, não apresentando nenhuma decantação durante a moldagem do rebolo, como demonstrado na Figura 56. Esse fato se deve diretamente ao tempo de incorporação deste componente à matriz (12 minutos) e pela adição da carga na resina, que promoveu o aumento da densidade da mesma.

Figura 56 – Imagem demonstrando a boa dispersão dos elementos de corte ao longo da matriz do rebolo, indicada pelas setas em vermelho.

Essa etapa realizada foi apresentada em formato de artigo no *XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017*, realizado em Belém, PA, por Almeida et al., (2017), com o título “Proposta metodológica para desenvolvimento de abrasivos à base de resina de mamona com carbeto de silício verde”.

5.1.2.3. Ensaios prévios de eficiência dos rebolos abrasivos

Após a definição dos parâmetros iniciais de confecção, foi realizado uma campanha de confecção de rebolos abrasivos para testes em uma politriz industrial, como o objetivo de avaliar eficiência entre a matriz abrasiva, com base nos traços adotados e o elemento de corte. Desta forma, foram definidos 3 traços para confecção dos rebolos, também baseados nos resultados obtidos por Dorigo & Silveira (2016), para a avaliação de desempenho de cada um, sendo um menos resistente ao desgaste abrasivo (50% CCA e 20% SiC), um mediano (50% CCA e 30% SiC) e um mais resistente (50% CCA e 40% SiC). Os percentuais adotados foram calculados em relação ao peso total da resina. Cada um destes traços receberam os elementos de corte referentes às etapas iniciais do polimento industrial (24, 60 e 120 *mesh*). Para cada etapa de polimento foram moldadas 6 ferramentas abrasivas. No total, foram feitas 54 peças para os testes em uma politriz industrial. Após o processo de cura, todos rebolos abrasivos foram submetidos à um processo de “afiação” (Figura 57) em uma chapa de rocha.

Figura 57 – Rebolos abrasivos de mamona evidenciando o processo de afiação da peça (à direita).

Os rebolos foram submetidos à secagem em estufa para obtenção da massa inicial de cada um para a obtenção de sua massa inicial. Após a pesagem, algumas peças moldadas com o traço menos resistente apresentaram uma deformação considerável, inviabilizando o seu uso. Desta forma foram utilizados somente os conjuntos com dureza mediana (T1) e os com maior dureza à abrasão *taber* (T2). As proporções de cada componente presente nos rebolos são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 6 – Componentes utilizados na confecção das ferramentas abrasivas.

Conjunto	Poliol (g)	Pré – polímero (g)	CCA (g)	SiC 1200 mesh (g)	SiC 60 e 120 mesh (g)	Peso Total (g)	Cargas (%)	Resina (%)	Perda de massa (%)
T1	58	48	53	32	30	221	52	48	0,63
T2	58	48	53	43	30	232	54,3	45,7	0,67

Os testes de polimento foram realizados em um politriz semiautomática, de propriedade do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES em Cachoeiro de Itapemirim – ES. A rocha utilizada foi um sienogranito comercialmente conhecido como “*Giallo Fiorito*”. O primeiro passo para os testes dos abrasivos à base de mamona foi a divisão da chapa em duas faixas com áreas equivalentes para teste de cada conjunto. Os primeiros testes demonstraram que os rebolos abrasivos contento o elemento de corte na granulometria 24 *mesh* não desempenharam um desbaste eficiente, não diminuindo efetivamente a rugosidade e as irregularidades presentes na chapa nesta etapa. Desta forma, para o aplainamento da chapa foi utilizado um abrasivo magnesiano comercial na granulometria 24 *mesh*. Após a planificação e uniformização da superfície da chapa iniciou-se a utilização dos abrasivos de mamona. Portanto, foram conduzidos os ensaios pela utilização dos conjuntos de abrasivos referentes à etapa de 60 e 120 *mesh*. Os abrasivos utilizados e o procedimento de polimento são apresentados na Figura 58.

Figura 58– (A) Conjuntos de corpos de prova confeccionados e (B) realização dos ensaios em uma politriz semiautomática industrial.

Cada faixa foi polida pelo conjunto de 60 *mesh* por 36 minutos e pelo conjunto de 120 *mesh* por 54 minutos. A definição do tempo de polimento foi feita automaticamente pelo programa da politriz e o mesmo procedimento foi executado para os dois conjuntos de abrasivos de mamona. Após os testes, 1000 medidas de brilho foram feitas no interior de cada faixa e a perda de massa dos abrasivos foi medida após submissão das peças em estufa à 35° C.

Essa campanha de ensaios foi apresentada em formato de artigo no *Global Stone Congress* 2018, maior congresso internacional do setor de rochas ornamentais, que foi realizado em Ilhéus, BA por Almeida et al., (2018), com o título “*Insertion of Silicon Carbide as Cutting Element in Ecological Fickerts for Dimension Stone Polishing*”. A partir da análise dos gráficos (Figura 59Figura 60) foi possível perceber que os rebolos confeccionados com maior quantidade de cargas (T2) apresentaram menor perda de massa em cada peça, tanto para granulometria de 60 *mesh* como de 120 *mesh*, de aproximadamente 70 % e 14% de diferença, respectivamente. Tal resultado corrobora a eficiência da utilização dos resultados de resistência à abrasão no *Taber Test* obtidos por Dorigo e Silveira (2016).

Figura 59 – Resultados dos ensaios de polimento para os conjuntos de corpos de prova T1 e T2 na etapa 60 *Mesh*.

Figura 60 – Resultados dos ensaios de polimento para os conjuntos de corpos de prova T1 e T2 na etapa 120 *Mesh*.

Apesar do diferencial de perda de massa encontrada nos dois traços utilizados, os valores medidos de brilho foram de 38,12 GU (*Gloss Unit*) para as duas faixas polidas, o que indica

que a fórmula T2 apresentou um melhor desempenho, expressa pela relação entre a perda de massa das peças e o ganho de brilho na superfície da chapa. Porém, o mesmo resultado de brilho para os dois conjuntos pode indicar que a matriz provavelmente não se desgastou concomitantemente com os elementos de corte, indicando que a dureza dela não foi compatível com a dureza do elemento de corte. Algumas amostras do conjunto abrasivo T2 de granulometria 120 *mesh*, mostraram uma perda de massa baixa, que não foi possível medir na balança utilizada para pesar as amostras.

Em face aos resultados obtidos, foi realizado um contato com um fabricante de abrasivos comerciais e o mesmo informou que as peças comerciais moldadas à base de resina (epóxi ou poliéster), para o polimento inicial das chapas (24, 36 e 60 *mesh*), geralmente não apresentam um desempenho satisfatório. Este fato serviu de base para delimitação do novo traço a partir da etapa abrasiva de 120 *mesh* (220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*). Além disto, o fabricante sugeriu a utilização de um percentual maior de elementos de corte nos rebolos, em cerca de 40 % do peso total da matriz do abrasivo.

5.1.2.4. Confeção da linha de rebolos para os ensaios de polimento

Afim de se obter a constatação de uma possível incompatibilidade entre a dureza da matriz abrasiva e o elemento de corte e para analisar o comportamento de expansão das peças após secagem em estufa, foi escolhido um outro traço para moldagem das matrizes das novas peças, contendo uma menor concentração de cargas. Desta forma, foi confeccionado um novo conjunto de abrasivos, com o traço apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Componentes utilizados na confecção das ferramentas abrasivas

Componentes	Traço (g)
Poliol	61,20
Pré-polímero	51,0
SCA	28,05
SiC 1200#	5,61
SiC corte	58,34
Peso total	204,20
% Cargas	45,05
% Resina	54,94

A traço escolhido foi o que apresentou a maior perda de massa no ensaio de resistência à abrasão *Taber Test* (2%) por Dorigo e Silveira (2016), contendo 25% de sílica da casca do arroz e 5% de carbetto de silício. A confecção dos rebolos foi feita adicionando 40% de elementos de corte referentes a cada etapa abrasiva (nas granulometrias 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*), em relação ao peso total da resina de mamona (componente A e B). Para a confecção dos rebolos seguiu-se o mesmo método utilizado anteriormente, que consistiu na mistura dos componentes da resina por 2 minutos e extração dos gases gerados na reação química por bomba à vácuo por mais 15 minutos. Após esta etapa, foram adicionadas as cargas, previamente submetidas à secagem em estufa por 24 horas a uma temperatura de 100° C. A Figura 61 sumariza todas as etapas realizadas na confecção dos rebolos abrasivos à base de resina poliuretana de mamona. Os corpos de prova foram desenformados após o 7° dia da moldagem, totalizando 36 corpos de prova. Os procedimentos adotados nesta etapa são apresentados na Figura 61 e 62 e os corpos de prova moldados na Figura 63.

Figura 61 – Etapas realizadas para a confecção dos rebolos abrasivos de resina poliuretana de mamona: (A) mistura dos componentes da resina; (B) extração dos gases gerados pela reação química entre os componentes no sistema à vácuo; (C) resina sem a presença de bolhas e a cargas sólidas homogeneizadas e (D) mistura manual do composto.

Figura 62 – Etapas realizadas para a confecção dos rebolos abrasivos de resina poliuretana de mamona: (A) preenchimento dos moldes de confecção do rebolo e (B) fechamento dos moldes com dispositivo de encaixe do rebolo ao satélite.

Figura 63 – Corpos de prova elaborados para a nova campanha de ensaios no simulador de polimento de rochas.

Algumas peças apresentaram um comportamento expansivo no 4º dia de cura, como demonstrado na Figura 64, o que inviabilizou a utilização da ferramenta. Acredita-se que essa expansão possa estar relacionada com a menor concentração de cargas das peças em relação ao percentual de resina. Para contornar este fato, as peças foram refeitas e desenhadas a partir do 7º dia da confecção e o processo de cura seguiu por mais 30 dias.

Figura 64 – Comportamento expansivo do rebolo abrasivo.

5.1.2.5. Rota alternativa para confecção dos rebolos abrasivos

Diante do problema de expansão e deformação exposta, surgiu a necessidade de se testar uma metodologia auxiliar para novos testes de confecção dos rebolos abrasivos. Desta forma, foi projetado no programa *Solidwork*, um molde metálico para moldagem das peças sob confinamento, que pudesse ser submetido à alta temperatura, com o objetivo de acelerar o processo de cura da resina e sem a necessidade de se submeter a reação da mistura entre o poliol e o pré-polímero ao sistema à vácuo. Na figura 65 são apresentados o projeto do novo molde metálico e a peça final fabricada (Figura 66).

Figura 65 –Projeto do molde para confecção dos rebolos abrasivos: (A) projeto da tampa do molde e (B) base do molde.

Figura 66 –Novo molde para confecção dos rebolos abrasivos.

Para a realização da confecção desta nova rota foi testado o comportamento da cura da resina a partir da incorporação de cargas secas em estufa e cargas com umidade higroscópica. Esse novo método consistiu nos testes de fabricação das peças abrasivas de acordo com a técnica usada na fabricação de rebolos industriais, pela utilização de misturadores mecânicos e adição de catalizadores para acelerar a cura. Além disto foi utilizado um tensoativo próprio para poliuretana, como o intuito de otimizar a mistura dos componentes do compósito. O catalizador adotado nos testes desta nova rota de confecção foi Dibutildilaurato de estanho (DBTL), na proporção 0,1 % e o tensoativo Brometo de cetiltrimetil amônio (CTAB) na proporção 1%, ambos em relação ao peso do componente B (poliol).

Na etapa de moldagem das peças, foi adotado o último traço utilizado na etapa 3, para a verificação do comportamento expansivo e o tempo efetivo de cura. O procedimento foi iniciado com a pesagem da quantidade de poliol necessária para a confecção da peça e pesagem dos aditivos utilizados (CTAB e DBTL). Esses componentes foram submetidos à homogeneização mecânica em um misturador de laboratório por 10 min, à uma velocidade de 2500 rpm. Após esta, etapa foi incorporado as cargas sólidas à massa e submetida de volta ao misturador por mais 10 min. O último passo da moldagem foi a incorporação do pré-polímero no compósito e realizado a homogeneização manual por mais 1 min. Após a mistura de todos

os componentes o compósito foi depositado no molde metálico. Este molde foi submetido à estufa em uma temperatura de 50° C por 4 horas. Após esta etapa os rebolos foram desenhados e atingiram a cura final em 10 dias. Todas as etapas descritas são demonstradas nas Figuras 67, 68 e 69.

Figura 67 –Procedimento de pesagem (A) e homogeneização dos aditivos e poliol (B) e adição das cargas sólidas à mistura.

Figura 68 – Componentes do compósito pronto para a mistura: (A) Poliol preparado com cargas e aditivos (CTAB, DBTL e cargas sólidas) e pré-polímero (B).

Figura 69 –Novo molde para confecção dos rebolos abrasivos: (A) projeto da tampa do molde, (B) Base do molde e (C) peça em processo final de usinagem.

A realização dos testes de confecção desta nova rota se mostrou bastante viável, com potencial de utilização em escala industrial. Essa nova metodologia apresenta maiores vantagens quanto a otimização da confecção dos rebolos, visto que este processo não necessita da utilização do sistema a vácuo para a remoção dos gases gerados pela reação polimérica da resina poliuretana. Outro ponto positivo nesta nova rota de moldagem é a diminuição do tempo de molde da resina, 7 dias do método anterior para 4 horas. Com relação a utilização das cargas sólidas nesta nova rota de moldagem, os testes utilizando as cargas da matriz com umidade higroscópica também apresentaram uma deformação pós cura, o que não foi evidenciado na moldagem com a utilização das cargas submetidas previamente em secagem em estufa. Esses exemplos citados são demonstrados na Figura 70.

Figura 70 – Abrasivos confeccionados com a nova rota de moldagens: (A) abrasivos moldados com cargas submetidas à secagem em estufa e (B) abrasivos moldados com cargas contendo umidade higroscópica, com evidencia da deformação presente na peça.

5.2 ENSAIOS DE POLIMENTO

Neste capítulo são apresentados os materiais que foram utilizados na parte experimental do polimento em escala industrial. São apresentados a seguir todos os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia adotada para a realização dos ensaios.

5.2.1 MATERIAIS

5.2.1.1 Rocha

Para a realização dos ensaios de polimento foi escolhida uma rocha granítica com boa aceitação de mercado, comercializada pelo nome de *Giallo Fiorito* (Figura 71), proveniente do município de Medina, em Minas Gerais. Foram utilizadas 6 chapas comerciais para a realização dos experimentos, com área de 5,7 m² (1,9 x 3 m). A seguir é apresentado a descrição petrográfica e tecnológica da rocha estudada.

Figura 71 – Chapa da rocha bruta utilizada nos ensaios.

A análise petrográfica da rocha utilizada foi realizada com base na ABNT NBR 15845-1:2015. Para a realização desta análise foi utilizado um microscópio petrográfico de luz polarizada, do modelo Leica DM 750P.

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

Rocha: Sienogranito “Giallo Fiorito”

Figura 72 – Imagem macroscópica da rocha *Giallo Fiorito*.

Rocha ígnea plutônica holocristalina, megaporfirídica, com características texturais que remetem natureza isotrópica, de granulometria grossa. O tamanho dos minerais varia entre 5 a 30 mm na porção grossa, de 1 a 5mm na porção mediana e menor que 1mm nos minerais finos, compondo a matriz da rocha. Apresenta coloração laranja amarelada, sem qualquer estruturação ou foliação, com pequena variação composicional entres os minerais constituintes, seja pelo aumento do percentual de minerais máficos ou pelas mudanças texturais. Os minerais são em sua maioria hipidiomórficos inequigranulares. Na descrição macroscópica não é possível

observar qualquer nível de alteração ne nenhuma natureza. Os principais componentes mineralógicos da rocha são o quartzo (de 50 a 60%), microclínio (30%), oligoclásio (de 5 a 10%) e a biotita (de 10%). Os minerais subordinados encontrados são em forma de traços são os opacos, turmalina, zircão e monazita, variando de 1 a 2 %. O cristal hipidiomórfico de feldspato potássico apresenta geminação múltipla paralela e alteração sericítica (Figura 73). A presença da inclusão de minerais opacos em aglomerado de cristais de biotita é demonstrada na Figura 74.

Figura 73 – Fotografia microscópica da lâmina da rocha: (A) Cristal hipidiomórfico de feldspato potássico com geminação múltipla paralela e alteração sericítica e (B) aglomerado de cristais de plagioclásio oligoclásio com ângulo de extinção reto. Legenda: FK: Feldspato potássico – QZ: Quartzo – OI: Oligoclásio. Fonte: **autor**

Figura 74 – Fotomicrografia em objetiva de 5x e polarizadores paralelos, mostrando inclusão de minerais opacos em aglomerado de cristais de bibotita. Legenda: QZ: quartzo – Bt: biotita – Op: opacos.

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO GIALLO FIORITO

Densidade aparente	2630 kg/m ³
Porosidade aparente	1,02%
Absorção d'água	0,39 %
Compressão Uniaxial	147,90 MPa
Compressão após gelo/degelo	122,30 MPa
Flexão 3 pontos	9,46 MPa
Resistência ao impacto ao corpo duro	0,58 m (ruptura)
Coefficiente de dilatação térmica linear	5,8 10 ⁻³ mm/m°C
Desgaste amsler	0,8 mm

Fonte: IEL, 2013.

Trata-se de uma rocha comercialmente denominada dura no polimento industrial. Tal parâmetro pode ser corroborado pelos valores de desgaste amsler (0,8 mm), reflexo da grande concentração de minerais silicáticos (quartzo e feldspato) o que acarreta no significativo consumo de rebolos industriais.

5.2.1.2. Rebolos Abrasivos utilizados na fase experimental

Os rebolos abrasivos utilizados na fase experimental da pesquisa foram os epóxi diamantados (Figura 75), os abrasivos magnesianos (Figura 76) e os confeccionados com a resina poliuretana de mamona (Figura 77). Ressalta-se que para a preparação da chapa para o início do polimento, foram utilizados abrasivos magnesianos nas granulometrias 24, 36 e 60 *mesh*. De acordo com a metodologia proposta e para comparação entre o desempenho dos rebolos, os dados de eficiência (perda de massa e brilho) foram coletados somente nas etapas referentes as granulometrias 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*, que correspondem às etapas de polimento propriamente dita.

Figura 75 – Abrasivos resinoides epóxi diamantados utilizados para a etapa de polimento nas granulometrias 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*.

Figura 76 – Abrasivos magnesiano utilizado na preparação da chapa na etapa de levigamento (24, 36 e 60 *mesh*) e os utilizados para a etapa de polimento (120, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*).

Figura 77 – Abrasivos à base de resina poliuretana de mamona utilizada nos ensaios de polimento nas granulometrias 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*..

5.2.1.3. Politriz industrial semiautomática

Para realização dos testes de polimento foi utilizado uma politriz semi-automática de um cabeçote (Figura 78), pertencente ao Laboratório de Beneficiamento de Rochas Ornamentais do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), no *campus* de Cachoeiro de Itapemirim/ES. Esse equipamento foi utilizado na pesquisa realizada por Camargo (2013), em que o autor instalou um inversor de frequência no motor principal da politriz, permitindo assim, a variação da velocidade de rotação do satélite de polimento. Cabe ressaltar que este

equipamento industrial é o único disponível atualmente que permite tal variação no processo de polimento.

Figura 78 – Politriz semiautomática de uma cabeça utilizada para a realização da etapa experimental de polimento.

5.2.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS DE POLIMENTO

5.2.2.1 Condições operacionais

Os ensaios foram realizados com o objetivo de saber a eficiência de cada tipo rebolo abrasivo frente à variação das operações de polimento. Para isto, foram definidas previamente as condições operacionais utilizadas, considerando a vazão de água, pressão e velocidade de rotação do satélite. No total foram realizados 108 ensaios de polimento, de acordo com as variáveis a seguir:

- Velocidade de rotação do Satélite: 350, 500 e 650 RPM.
- Carga aplicada sobre a rocha: 2 Kgf/cm².
- Vazão de água: 15 e 30 L/min.
- Abrasivos: resinoides epóxi, magnesianos e abrasivos de mamona.
- Granulometria dos abrasivos: 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 *mesh*.

Previamente aos ensaios de polimento foi realizada a preparação da chapa de rocha com a execução do levigamento, pela utilização dos abrasivos mais grossos (24, 36, e 60 *mesh*). Esta etapa foi necessária para remover todas as imperfeições e defeitos provenientes da etapa de serragem, como demonstrado na Figura 79. Para o início da fase de polimento os rebolos abrasivos foram todos afiados, com intuito de aflorar as partículas abrasivas de cada peça (Figura 80).

Figura 79 – Imperfeições presentes nas chapas brutas provenientes da serragem dos blocos em chapas, indicadas pela seta em preto.

Figura 80 – Rebolos abrasivos magnesianos evidenciando o processo de afloramento dos elementos de corte após o processo de afiação.

Para a realização das etapas de polimento a chapa foi dividida em 6 faixas de 50 cm de largura por 190 cm de comprimento (Figura 81). Em cada faixa foi executada uma conjunção de operações pré-definidas para cada conjunto dos rebolos abrasivos. Outro parâmetro definido nos ensaios foi a movimentação do satélite sobre a chapa, exemplificado na Figura 82, sendo feita de forma automática pelo programa realizado pela politriz. Desta forma foi executado o mesmo programa em cada etapa abrasiva de cada conjunto de rebolos utilizados.

Figura 81 – Chapa da rocha evidenciando a faixa de polimento adotada para os ensaios para cada operação de acordo com os abrasivos utilizados.

Figura 82 – Sequência de movimentação do satélite da poltriz de acordo com o programa de polimento adotado.

Após a realização do polimento de cada faixa abrasiva, os rebolos foram substituídos pelo conjunto da etapa posterior (Figura 83) e realizado novamente o programa definido. Cabe ressaltar que um dos objetivos do presente estudo foi o de saber a eficiência de cada tipo de rebolos abrasivos utilizados, por meio de perda de massa das peças. Sabe-se que o percentual de perda de massa das peças à base de resina é muito baixo para baixas exposições ao desgaste e, sendo assim, o programa realizado pela poltriz foi executado 3 vezes em cada faixa, totalizando 21 minutos de ensaio para cada para cada etapa abrasiva.

Figura 83 – Troca dos rebolos abrasivos após a realização de uma das etapas abrasivas.

5.2.2.2 Avaliação de eficiência do polimento

Perda de massa dos abrasivos

Após o processo de afiação de todos os rebolos abrasivos, os conjuntos foram submetidos à secagem em estufa ventilada por 15 horas, à uma temperatura de 35° C. A definição desta temperatura foi feita a fim de evitar o efeito de ciclagem das peças e possível enfraquecimento mecânico das mesmas. Após a pesagem inicial, as peças foram utilizadas nos ensaios, submetidas novamente à secagem em estufa (Figura 84) e pesadas para a obtenção da perda de massa de todo o conjunto. Foi utilizada neste processo uma balança com resolução de 0,01g (Figura 85).

Figura 84 – Processo de secagem dos rebolos abrasivos em estufa.

Figura 85 – Pesagem dos rebolos abrasivos após a realização dos ensaios de polimento.

Medição do brilho superficial

Para a avaliação da qualidade do polimento foram realizadas medidas de brilho com o uso de um medidor de brilho (Glossmeter) *micro-TRI-gloss* da marca BYK-Gardner (Figura 86), que combina medições em três ângulos diferentes (20° , 60° e 85°) em um só aparelho. Foram realizadas 99 medidas de brilho para cada faixa de polimento, somente para a etapa de 1200 *Mesh*. A faixa polida foi demarcada descartando as suas extremidades, em 10 cm das bordas e as medidas de brilho foram realizadas somente no interior das faixas. Para este trabalho foram usados os resultados da média obtidas pela incidência pelo ângulo de 85° . Este parâmetro

foi definido em vista do mesmo ser utilizado em outras pesquisas anteriores, com o intuito de comparações futuras.

Figura 86– Equipamento para medição do brilho (esquerda) e detalhe da medição na chapa polida (direita).

Avaliação do brilho industrial da rocha utilizada

Com o objetivo de se avaliar a qualidade do processamento da rocha utilizada na presente pesquisa, foi realizado uma visita técnica em uma empresa de polimento industrial para levantamento de informações referentes ao processamento da rocha. Foi levantado quais os tipos e a sequência dos abrasivos utilizados, a pressão adotada para cada etapa do processo e a qualidade final da superfície polida por meio de medidas de brilho (Figura 87). As informações coletadas foram referentes ao levigamento e polimento e são apresentadas nas tabelas Tabela 8 e 11, respectivamente.

- Equipamento utilizado para o polimento: Politriz automática 19 Cabeças

Tabela 8 – Condições operacionais adotadas para o levigamento industrial do Sienogranito *Giallo Fioritto* em cada satélite da politriz.

<i>Satélite</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Pressão (bar)</i>	3,4	3,4	3,4	3,4	3,2	3,2	2,8	2,8	3,4	3,4
<i>Tipo de abrasivo</i>	Abrasivos Metálicos								Resinoides	
<i>Granulometria</i>	30	30/40	30/40	40/50	60/80	120/140	170	180	180/220	320

Tabela 9 – Condições operacionais adotadas para o polimento industrial do Sienogranito *Giallo Fioritto* em cada satélite da politriz.

<i>Satélite</i>	1/2	3	4	5	6	7	8/9	10/11	13/13	14-16	17	18/19
<i>Pressão (bar)</i>	2	2	2	3,2	3,2	3,2	3,2	2,8	2,8	2,8	2,8	2,2
<i>Tipo de abrasivo</i>	Magnesiano			Resinoides								Lustro
<i>Granulometria</i>	120	220	320	180	220	320	400	600	800	1200	1500	Lustro

Para a avaliação da qualidade final do polimento industrial da rocha utilizada na presente pesquisa, foi realizado medidas de brilho em 99 pontos distribuídos pela chapa (Figura 87). O equipamento utilizado foi medidor de brilho (Glossmeter) micro-TRI-gloss da marca BYK-Gardner, em três ângulos diferentes (20°, 60° e 85°). O resultado desta etapa de campo é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de brilho medidos no polimento industrial da rocha Sienogranito “Giallo Fioritto”.

BRILHO		
	Média	Max
20°	56,1	69,2
60°	66,3	75,9
85°	70,6	76,6

Figura 87– Chapa polida pela indústria (à esquerda) e detalhes da medição de brilho na chapa (à direita).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios de polimento da rocha selecionada, com a variação das condições de velocidade de rotação do satélite e da vazão de água em 15 e 30 litros por minuto. Ressalta-se que, as constantes de velocidade de rotação dos satélites e a variação da vazão de água no polimento não são praticadas nas indústrias, sendo uma limitação dos equipamentos existentes no polimento. Portanto, o presente estudo é uma continuação de pesquisas que avaliam a influência da variação das condições operacionais no polimento das rochas, sob a ótica da Tribologia. A seguir são discutidos os dados de perdas de massa de cada conjunto de abrasivos e os valores de brilho medidos ao final das etapas de polimento, para cada tipo de abrasivo utilizado no polimento do sienogranito *Giallo Fioritto*.

6.1 RESULTADOS DE PERDA DE MASSA DOS ABRASIVOS

6.2.1 Avaliação da constante de 350 rpm

As Tabela 11 e Tabela 12 referem-se as perdas de massa para cada conjunto de rebolos abrasivos, em função da variação da vazão de água em 15 e 30 litros por minuto, respectivamente. As Figura 88, Figura 89 e Figura 91 ilustram graficamente os resultados dos ensaios realizados com a constante de velocidade de rotação do satélite de 350 RPM, para os rebolos abrasivos resinoides, magnesianos e de resina poliuretana de mamona, respectivamente.

Tabela 11 –Perda de massa das peças abrasivas dos abrasivos expressas em valores médios dos ensaios com vazão de 15 litros por minuto.

Operação 350 RPM / 2 Bars	Granulometria mesh	Resinoide		Magnesiano		Mamona	
		Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)
15 litros por minuto	120	0,105	0,04	39,8	5,78	2,58	0,68
	220	0,137	0,04	22,2	2,34	0,84	0,27
	400	0,085	0,02	35,5	4,57	0,21	0,07
	600	0,102	0,03	38,9	5,50	0,19	0,06
	800	0,070	0,02	6,6	1,05	0,41	0,14
	1200	0,178	0,06	83,0	13,08	0,15	0,05
Brilho GU		84,4		59,6		43,7	

Tabela 12 –Perda de massa das peças abrasivas dos abrasivos expressas em valores médios dos ensaios com vazão de 30 litros por minuto.

Operação 350 RPM / 2 Bars	Granulometria mesh	Resinoide		Magnesiano		Mamona	
		Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)
30 litros por minuto por minuto	120	0,583	0,20	30,7	3,8	0,567	0,193
	220	0,427	0,13	19,0	3,4	0,093	0,030
	400	0,300	0,10	28,8	6,0	0,028	0,006
	600	0,308	0,06	23,7	2,9	0,077	0,025
	800	0,178	0,04	34,0	3,7	0,014	0,004
	1200	0,128	0,04	18,0	2,0	0,054	0,015
Brilho GU		78,8		75,1		36,6	

A partir da análise dos dados obtidos pelos ensaios com os abrasivos resinoides epóxi, foi possível perceber que os maiores valores de perdas de massa se deram com a máxima vazão adotada (30 litros por minuto), principalmente nos abrasivos das etapas de 120, 220 e 400 *mesh* (Figura 88), em uma tendência decrescente para os abrasivos mais finos. Já os resultados da perda de massa das peças nos ensaios com 15 litros por minuto, foram em média de 0,03 %, em todas as etapas abrasivas. De acordo com os dados obtidos pelas medidas de brilho final, o

maior valor se deu com o uso da vazão de água de 15 litros por minuto (84,4), indicando que esta variável promoveu uma melhor qualidade de acabamento final na chapa polida.

Figura 88– Relação de perda de massa dos abrasivos resinoíde epóxi na condição de velocidade de rotação do satélite de 350 RPM, para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

Os resultados obtidos pelos ensaios com os abrasivos magnesianos mostraram que, em média, a perda de massa das etapas abrasivas para as duas vazões adotadas, variaram entre 2 a 6 %, sendo esta taxa de desgaste, a menor dentre os ensaios realizados com as 3 constantes de velocidade de rotação (350, 500 e 650 RPM). Nota-se que a maior perda de massa nesta constante, se deu na etapa de 1200 *mesh*, com a vazão de água de 15 litros por minuto, conforme demonstrado na Figura 89. O valor discrepante de perda de massa neste ensaio (etapa 1200 *mesh* na vazão de 15 litros por minuto) foi causado pela fragmentação das extremidades das peças durante a realização do polimento, como demonstrado na Figura 90. O baixo desempenho das peças no ensaio com a vazão de 15 litros por minuto resultou no menor valor de brilho final (59,6 GU) dentre todas os ensaios realizados com o abrasivo magnesiano. Ainda que as taxas de desgaste abrasivo tenham sido baixas, o uso da vazão de 30 litros por minuto resultou no valor de brilho final de 75,1 GU.

Figura 89– Relação de perda de massa dos abrasivos magnesianos na condição de velocidade de rotação do satélite de 350 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

Figura 90– rebo abrasivo magnesiano de granulometria 1200 *mesh* evidenciando a fragmentação de sua lateral durante a realização dos ensaios.

A partir da análise dos dados obtidos pelos ensaios realizados com os abrasivos de mamona, foi possível perceber que os maiores percentuais de perda de massa se deram na vazão de 15 litros por minuto. Essa tendência foi inversa quando comparada com os ensaios realizados com os abrasivos epóxi, com a mesma constante de velocidade (350 RPM), como verificado na Figura 91. As maiores perdas de massa se deram nos abrasivos 120 e 220 *mesh*, nos ensaios utilizando a vazão 15 litros por minuto e nos abrasivos nos abrasivos 120 *mesh* com vazão de 30 litros por minuto. A partir destas etapas abrasivas é possível perceber que os valores de perda de massa dos abrasivos de mamona tiveram um percentual bem próximo aos abrasivos epóxi, como demonstrado na Figura 92.

Figura 91– Relação de perda de massa dos abrasivos à base de resina de mamona na condição de velocidade de rotação do satélite de 350 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

Figura 92– resultados de perda de massa dos abrasivos resinoides epóxi e de poliuretana de mamona nas faixas de polimento de 400, 600, 800 e 1200 *mesh*.

Cabe ressaltar que, as perdas de massa entre os abrasivos epóxi e de mamona foram de uma ordem equivalente para essa constante de velocidade, principalmente entre as vazões de 15 litros por minuto para os abrasivos de mamona e 30 litros por minuto para os abrasivos epóxi, porém a eficiência do polimento dos abrasivos de mamona foi baixa, visto a dureza do elemento de corte utilizado nos abrasivos de mamona (SiC), que necessitam de uma matriz ainda mais macia do que a utilizada nesta pesquisa, como é o caso da matriz magnesiana, onde o elemento de corte carbeto de silício encontra compatibilidade de aplicação. As taxas de desgaste apresentadas pela matriz de resina de mamona permitem inferir que ela apresenta um grande potencial de eficiência quando incorporada com o diamante sintético como elemento de corte.

A partir da análise dos dados de brilho final da etapa de polimento com esta constante de velocidade de rotação, pode-se afirmar que o abrasivo de mamona não promoveu um bom acabamento na superfície da chapa, o que pode ser corroborado pelos valores de brilho obtidos, sendo 43, 7 GU (15 litros por minuto) e 36,6 GU (30 litros por minuto por minuto). Ainda assim, o valor de brilho obtido pelo ensaio com 15 litros por minuto foi o segundo maior para os ensaios com o abrasivo de mamona, dentre as 3 constantes de velocidade utilizadas (350, 500 e 650 RPM).

6.2.2. Avaliação da constante de 500 rpm

São apresentados nas Tabela 13 e 16 os resultados dos ensaios referentes a adoção da constante de 500 RPM, para todos os conjuntos de rebolos abrasivos. Nas figuras 93, 94 e 95 são apresentados os gráficos ilustrando os resultados das perdas massa para os conjuntos de abrasivos de resina epóxi, magnesianos e dos abrasivos de mamona, respectivamente.

Tabela 13 –Perda de massa das peças abrasivas dos abrasivos expressas em valores médios nos ensaios com vazão de 15 litros por minuto.

Operação 500 RPM / 2 Bars	Granulometria mesh	Resinoide		Magnesiano		Mamona	
		Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)
15 litros por minuto	120	0,177	0,06	72,3	9,49	5,69	1,91
	220	0,210	0,06	43,5	5,24	0,15	0,05
	400	0,228	0,07	48,8	5,91	0,36	0,12
	600	0,507	0,13	77,7	9,91	0,02	0,01
	800	0,143	0,03	38,3	3,89	0,08	0,03
	1200	0,262	0,08	77,4	9,04	0,26	0,07
Brilho		85,7		64		49,4	

Tabela 14 –Perda de massa das peças abrasivas dos abrasivos expressas em valores médios nos ensaios com vazão de 30 litros por minuto.

Operação 500 RPM / 2 Bars	Granulometria mesh	Resinoide		Magnesiano		Mamona	
		Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)
30 litros por minuto	120	0,492	0,11	45,1	7,6	1,16	0,37
	220	0,403	0,12	86,8	10,4	0,15	0,04
	400	0,274	0,07	57,6	5,8	0,15	0,05
	600	0,162	0,04	35,3	4,9	0,06	0,02
	800	0,053	0,01	45,2	7,1	0,05	0,02
	1200	0,118	0,03	24,8	3,2	0,11	0,03
Brilho		81,6		71,5		36	

Os resultados obtidos pelos ensaios com os abrasivos epóxi, na constante de velocidade de rotação de 500 RPM, apresentaram uma tendência correlata de perda de massa nos ensaios com o uso da vazão de 30 litros por minuto, quando comparados com os resultados obtidos pela constante de 350 RPM para a mesma vazão. É possível perceber pelo gráfico da Figura 93, que as perdas de massa referentes à vazão de 30 litros por minuto, foram decrescendo ao longo das etapas abrasivas, o que não ocorreu com o uso da vazão de 15 litros por minuto. Neste segundo caso, as perdas de massa foram menores nas etapas abrasivas 120 e 220 *mesh*, e maiores nas etapas abrasivas 600, 800 e 1200 *mesh*, que nos ensaios com a vazão de 30 litros por minuto, indicando que o uso da vazão reduzida, neste ensaio, provocou um maior consumo de abrasivos para as últimas etapas do polimento. Os resultados de brilho obtidos nesta constante de velocidade foram de 85,7 GU, para a vazão de 15 litros por minuto e de 81,6 GU, para a vazão de 30 litros por minuto, corroborando o melhor desempenho de polimento nesta conjunção de operações com o uso da vazão reduzida.

Figura 93– Relação de perda de massa dos abrasivos resínoides epóxi na condição de velocidade de rotação do satélite de 500 RPM, para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

Os dados obtidos pela execução dos ensaios com os abrasivos magnesianos, para a constante de velocidade de rotação dos satélites de 500 RPM, evidenciam uma tendência de perda de massa de cerca de 7% para os dois conjuntos de abrasivos, com destaque para a maior perda de massa nos ensaios com 30 litros por minuto dos abrasivos de 220 *mesh*, e dos abrasivos 120, 400 e 600 *mesh*, nos ensaios de 15 litros por minuto (Figura 94). Assim como nos ensaios

realizados com a constante de 350 RPM, as altas taxas de desgastes evidenciadas nas últimas etapas abrasivas também foram provocadas pela fragmentação das peças durante o polimento, como já demonstrado no Figura 90. Ressalta-se que o valores de brilho obtidos foram de 64 GU para os ensaios com vazão de 15 litros por minuto e de 71,5 para a vazão de 30 litros por minuto. Esse resultado de brilho final do polimento indica que, neste caso, o uso da vazão reduzida não foi eficiente para o abrasivo magnesiano neste ensaio, sendo o brilho obtido menor que o medido pela indústria de polimento, que geralmente adota essas condições de operações (500 RPM, 2 Bar e vazão de 30 litros por minuto).

Figura 94– Relação de perda de massa dos abrasivos magnesianos na condição de velocidade de rotação do satélite de 500 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

Os ensaios realizados com o uso dos abrasivos de mamona para a constante de 500 RPM apresentaram resultados semelhantes aos obtidos com a de 350 RPM, com perdas de massas significantes para a primeira etapa de polimento e baixas perdas de massa a partir da etapa de 220 *mesh* (Figura 94). A partir desta etapa, a média de perda de massa foi de 0,08 para a vazão de 15 litros por minuto e de 0,01% a vazão de 30 litros por minuto. Cabe ressaltar ainda, que a perda de massa do abrasivo 120 *mesh* nos ensaios com vazão de 15 litros por minuto foi o maior dentre todos os ensaios realizados com o abrasivo de mamona. Ainda assim, a condução do polimento com a vazão de 15 litros por minuto resultou no maior valor de brilho para os ensaios com o abrasivo de mamona (49.4 GU), representando no melhor desempenho de polimento dentre as variáveis experimentais adotadas neste estudo. No âmbito geral, os desempenhos de polimento com os abrasivos de mamona para estas condições operacionais também não

resultaram em um bom acabamento de polimento, em função da dureza da liga destes rebolos para o tipo de elemento de corte utilizado.

Figura 95– Relação de perda de massa dos abrasivos de mamona na condição de velocidade de rotação do satélite de 500 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

6.2.3 Avaliação da constante de 650 rpm

São apresentados nas Tabelas 17 e 18 os resultados dos ensaios referentes a adoção da constante de 650 RPM, para todos os conjuntos de rebolos abrasivos. Nas figuras 96, 97, 98 são apresentados os gráficos ilustrando os resultados das perdas massa para os conjuntos de abrasivos de resina epóxi, magnesianos e dos abrasivos de mamona, respectivamente.

Tabela 15 –Perda de massa das peças abrasivas dos abrasivos expressas em valores médios dos ensaios com vazão de 15 litros por minuto.

Operação 650 RPM / 2 Bars	Granulometria mesh	Resinoide		Magnesiano		Mamona	
		Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)
15 litros por minuto	120	0,270	0,06	58,3	8,98	3,30	1,14
	220	0,282	0,07	35,0	4,57	0,19	0,05
	400	0,265	0,06	51,7	6,97	0,15	0,05
	600	0,163	0,04	71,3	10,67	0,16	0,03
	800	0,038	0,01	75,6	7,07	0,14	0,04
	1200	0,183	0,06	39,0	4,01	0,12	0,03
Brilho		86.2		85.3		43.1	

Tabela 16 –Perda de massa das peças abrasivas dos abrasivos expressas em valores médios dos ensaios com vazão de 30 litros por minuto.

Operação 650 RPM / 2 Bars	Granulometria mesh	Resinoide		Magnesiano		Mamona	
		Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)	Média (g)	Média (%)
30 litros por minuto	120	0,627	0,21	44,0	8,0	5,61	1,20
	220	0,657	0,20	65,1	8,7	0,35	0,11
	400	0,502	0,11	56,0	5,9	0,07	0,02
	600	0,213	0,05	83,1	12,2	0,11	0,04
	800	0,130	0,03	31,9	5,5	0,05	0,02
	1200	0,122	0,04	8,5	1,1	0,03	0,01
Brilho		78		63.9		35.9	

Os resultados obtidos pelos ensaios com os abrasivos resinoides epóxi na constante de velocidade de rotação de 650 RPM, mostraram uma correlação direta com os resultados obtidos com a constante de 350 RPM, em que as maiores perdas de massa foram obtidas pelos ensaios com vazão de 30 litros por minuto, também para as etapas abrasivas de 120, 220 e 400 *mesh* (Figura 96) Considerando as duas vazões utilizadas, nota-se claramente uma tendência de perda de massa decrescente e bem definida para os ensaios com a vazão de 30 litros por minuto. Já a

perda de massa para a vazão de 15 litros por minuto foi, média de 0,05% em todas as faixas abrasivas. De acordo com os dados obtidos pelas medidas de brilho final de polimento, o maior valor se deu com o uso da vazão de água de 15 litros por minuto (86.2). Ressalta-se que este valor foi o maior dentre todos os ensaios realizados com o abrasivo epóxi. Os valores de brilho obtidos com o uso da vazão de água de 30 litros por minuto foram 78 GU.

Figura 96– Relação de perda de massa dos abrasivos epóxi na condição de velocidade de rotação do satélite de 650 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

Os resultados obtidos com o uso dos abrasivos magnesianos para a constante de velocidade de 650 RPM, apresentaram uma boa correlação em ambas as vazões adotadas. Nos dois casos, as perdas de massa foram maiores na etapa abrasiva de 600 *mesh* e menores na última etapa (Figura 97). Os valores de brilho obtidos nesta constante de velocidade não apresentaram a mesma tendência que os ensaios com as constantes 350 e 500 RPM. Os resultados de brilho obtidos com a constante de 650 RPM foram maiores para a vazão de 15 litros por minuto (85.3 GU), sendo o maior valor dentre todos os ensaios com o uso do abrasivo magnesiano. O valor de brilho obtido pelo uso da vazão de 30 litros por minuto foi de 63.9 GU, resultado muito abaixo do obtido pela indústria de polimento da rocha aqui estudada. Ressalta-se que, as conjunções da constante de velocidade e pressão neste caso, tiveram a maior eficiência de polimento com o uso da vazão reduzida.

Figura 97– Relação de perda de massa dos abrasivos magnesianos na condição de velocidade de rotação do satélite de 650 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto.

Os ensaios realizados com o uso dos abrasivos de mamona para a constante de 650 RPM, também apresentaram a mesma tendência de desgaste verificada nas duas outras constantes adotadas nos ensaios (350 e 650 RPM), com perdas de massas significantes para a primeira etapa de polimento e baixas perdas de massa a partir da etapa de 220 *mesh* (Figura 97). A partir desta etapa, a média de perda de massa foi de 0,04 % para ambas as vazões. Cabe ressaltar ainda, que a perda de massa do abrasivo 120 *mesh* nos ensaios com vazão de 30 litros por minuto foi 40% maior que nos ensaios com 15 litros por minuto. Assim como nas outras constantes de velocidade, o maior valor médio de brilho foi obtido nos ensaios com o uso da vazão de 15 litros por minuto de 43.1 GU. O valor médio brilho obtido pelo uso da vazão de 30 litros por minuto por minuto foi de 35.9 GU. No âmbito geral, os desempenhos de polimento com os abrasivos de mamona para estas condições operacionais também não resultaram em um bom acabamento de polimento.

Figura 98– Relação de perda de massa dos abrasivos de mamona na condição de velocidade de rotação do satélite de 650 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto por minuto.

De acordo com os dados obtidos pelos ensaios, foi possível perceber uma diferença considerável entre a perdas de massa dos abrasivos a base de resina (epóxi e poliuretana de mamona) e os abrasivos magnesianos, da ordem de dezenas de gramas. Esta variação era esperada, visto o desempenho destes abrasivos comerciais na indústria de polimento. De acordo com informações de um fabricante, o desempenho dos abrasivos epóxi diamantado é de 5 a 15 vezes o desempenho dos rebolos magnesianos, dependendo da granulometria dos rebolos.

De uma forma geral, as maiores perdas ocorreram nas primeiras granulometrias dos abrasivos à base de resina, visto que diminuição das taxas de desgaste entre os abrasivos e a rocha é diretamente proporcional a evolução do polimento. Considerando a variação a vazão de água em função da velocidade de rotação dos satélites, foi possível perceber que este parâmetro influenciou diretamente o desgaste das peças, porém de maneira distinta para cada tipo de abrasivos.

Para os abrasivos magnesianos, a variação da vazão de água de 15 litros por minuto resultou nos maiores valores perdas de massa nas etapas de 120 e 1200 *mesh*, em todos os ensaios. Em linhas gerais, os resultados discrepantes encontrados nas demais granulometrias foram diretamente influenciados pelo aumento da fragilidade mecânica e fragmentações dos rebolos ao longo do desenvolvimento do estudo, em função da ciclagem das peças entre os

ensaios e a secagem em estufa. Ressalta-se que este tipo de rebolo tem uma vida útil bem curta, e que a condução dos ensaios ao longo dos meses foi diretamente influenciada por esse efeito.

Os resultados obtidos com a utilização dos abrasivos epóxi diamantados apresentaram uma boa correlação para as vazões de 30 litros por minuto, em todas as constantes de velocidade e com taxas equivalentes de perda de massa em todas as granulometrias. Nota-se a partir da análise dos resultados, que a perda de massa foi menor nos ensaios conduzidos com o uso da vazão de 15 litros, com exceção ao obtidos na constante de velocidade de 500 RPM. Esse resultado é bastante positivo, visto o potencial de economia das peças que a adoção deste na indústria parâmetro pode promover. Porém, para a validação dos resultados obtidos, faz-se necessário a abrangência do estudo para outros tipos litológicos.

A condução dos ensaios realizados com o abrasivo à base de resina poliuretana de mamona mostraram que a liga confeccionada na presente pesquisa não apresentou taxas de desgaste eficientes para o bom desempenho dos rebolos. Tal fato pode ser corroborado pela incorporação do carbetto de silício com granulometrias mais finas nos abrasivos das últimas etapas do polimento, o que provocou um aumento da dureza da peça. Para as constantes de velocidade de 350 e 500 RPM, as taxas de perda de massa foram maiores para as primeiras granulometrias com a utilização da vazão de 15 litros por minuto. Cabe ressaltar que o percentual dos rebolos abrasivos da granulometria 120 *mesh* foram bem significativos, variando em média de 20 a 30% a mais que os abrasivos nas etapas posteriores. Neste caso, essa granulometria apresenta um grande potencial de ser inserida na linha de abrasivos comerciais para o polimento de rochas ornamentais.

6.3. AVALIAÇÃO DO BRILHO FINAL DO POLIMENTO

A partir da análise dos dados de brilho obtidos para todos os conjuntos de abrasivos, de acordo com as variáveis de processo, foi possível afirmar que a utilização da vazão reduzida de 15 litros por minuto, foi responsável pelos melhores resultados de ensaios para os abrasivos à base de resina de mamona e resina epóxi, e em algumas condições operacionais adotadas para o abrasivo magnesiano, como demonstrado na Figura 99.

Figura 99– Relação de perda de massa dos abrasivos de mamona na condição de velocidade de rotação do satélite de 650 RPM para as vazões de água de 15 e 30 litros por minuto por minuto.

De acordo com a análise do gráfico é possível perceber que os maiores valores de brilho foram atingidos pelo uso do abrasivo epóxi. Dentre as operações de polimento realizadas na presente pesquisa com este abrasivo, destaca-se as com a adoção da vazão de 15 litros por minuto, para as três constantes de velocidade (350, 500, 650 RPM), em que os valores de brilho foram maiores que os obtidos pelo uso da vazão de 30 litros por minuto, bem como superiores ao valor medido pela indústria.

Os resultados de brilho obtidos pelo abrasivo magnesiano foram superiores em duas conjunções de operações, com destaque para o ensaio utilizando a constante de velocidade de 650 RPM, para a vazão de 15 litros por minuto, atingindo 85 GU. Tal resultado reforça a potencialidade de se utilizar uma vazão reduzida no polimento. Para os resultados com o uso da vazão de 30 litros por minuto, ressalta-se que a utilização a constante de velocidade de 350 RPM, também promoveu uma qualidade maior de polimento, sendo 5 GU superiores aos atingidos pela indústria. Considerando as outras conjunções operacionais de 15 litros por minutos, para as constantes de velocidade de 350 e 500 RPM e para a vazão de 30 litros por minuto com a constante de velocidade de 650 RPM, os resultados não foram satisfatórios, onde a qualidade final de polimento foi inferior a obtida pela indústria.

Os ensaios realizados pelos abrasivos de mamona mostraram, que em geral, os brilhos foram consideravelmente inferiores ao obtidos pela indústria. Ressalta-se, porém, que os maiores valores de brilho final foram também obtidos pelo uso da vazão de 15 litros por minuto. Esses resultados mostram que o desempenho das ferramentas à base de mamona foi similares aos realizados pelo uso dos abrasivos à base de resina epóxi. No âmbito geral, o baixo desempenho dos abrasivos à base de resina de mamona foi resultado da incompatibilidade de dureza entre a matriz abrasiva e o elemento de corte utilizado (SiC). Em alguns casos a taxa de desgaste das peças foram de uma ordem de grandeza similares às matrizes epóxi, confirmando a possibilidade de se utilizar a matriz resinoides como ligante abrasivo de rebolos à base de diamante sintético.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo desta pesquisa foi elaborar uma nova ferramenta abrasiva para polimento de rochas ornamentais, de acordo com a metodologia existente de confecção de rebolos abrasivos para polimento de rochas ornamentais a base de resina de óleo de mamona. A avaliação do desempenho dos traços elaborados nesta pesquisa se mostrou viável, visto que existem poucos testes laboratoriais que forneçam dados de análise de eficiência dos rebolos abrasivos em cada etapa do polimento. Nestes termos, os ensaios de polimento com base na avaliação tribológica do processo, foram uma contribuição considerável para as pesquisas sobre o polimento de rochas ornamentais, principalmente pela comparação de eficiência entre os rebolos industriais em situações operacionais não praticadas pela indústria.

A realização das etapas de confecção dos rebolos abrasivos a base de resina poliuretana de mamona foi fundamental para o entendimento do comportamento de cura das peças elaboradas, principalmente por trazer os desafios encontrados nesta fase, de acordo com os traços adotados entre resina e cargas. Esse fato se configura na principal limitação de transposição da metodologia desenvolvida em laboratório para escala industrial, visto que presença de umidade é um fator limitante na confecção de rebolos abrasivos. Desta forma, a elaboração de uma nova rota de moldagem de rebolos apresenta um grande potencial de utilização, sendo passível de aplicação em escala industrial.

A proposta de incorporação do carбето de silício verde na matriz poliuretana de mamona não apresentou efetividade no desgaste com as condições operacionais adotadas, pela incompatibilidade entre a dureza da matriz e deste elemento de corte. Esse fato se deu principalmente nos rebolos abrasivos referentes as últimas etapas de polimento, onde a incorporação dos elementos de carga mais finos, aumentou a dureza das peças e diminuiu a efetividade da ferramenta. Porém, as taxas de desgaste apresentadas pelo rebolo abrasivo de mamona foram similares aos epóxi diamantados, o que corrobora o potencial de utilização da resina poliuretana a base de óleo de mamona com ligante de rebolos diamantados.

Os melhores resultados de polimento foram obtidos com a adoção da vazão do fluxo de água reduzida, principalmente para os abrasivos epóxi diamantados e para os abrasivos à base de resina de mamona. Cabe ressaltar também que nestes casos a adoção da velocidade de rotação do satélite em 350 rpm, menor que a praticada na indústria, contribuiu efetivamente para o melhor desempenho do acabamento superficial da rocha testada, onde os valores de

brilho foram os maiores nos ensaios utilizando as ferramentas citadas. Da mesma forma, a vazão reduzida promoveu as menores taxas de desgaste dos rebolos abrasivos nas condições de velocidade de rotação do satélite em 350 rpm, exclusivamente nos ensaios de polimento com os abrasivos resinoides (epóxi e de resina de mamona), indicando a eficiência de acabamento superficial com a adoção desta variável de rotação, o que ainda não é realizado pela limitação das politrizes industriais.

Nestes termos, a condução de processos que levem em consideração os impactos gerados pela sua cadeia de produção tem conduzido, cada vez mais, a adoção de práticas em consonância à conservação meio ambiente, se tornando um diferencial no comércio internacional de produtos e serviços. Surge cada vez mais a necessidade utilização de insumos ecologicamente corretos sob os preceitos da economia circular e do ciclo de vida dos produtos. Neste âmbito, a utilização de uma ferramenta ecoeficiente, comprovadamente atóxica, no polimento de rochas ornamentais pode ser um grande passo para a obtenção de certificados internacionais de comércio de produtos com forte apelo ambiental.

Por fim a condução do estudo com base nos conceitos da Tribologia reforça a necessidade de se avaliar o polimento de rochas ornamentais sob um aspecto otimizado de processo, visto que o fator rocha é um dos grupos de variáveis que influenciam o polimento e a adoção de condições operacionais, que não são utilizadas na indústria, pode promover um aumento da eficiência nesta etapa de beneficiamento.

8 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com as limitações encontradas no desempenho do rebolo abrasivo à base de resina de mamona, com relação a sua alta dureza e baixa efetividade de desempenho de polimento, sugere-se a alteração do traço da liga da matriz, levando em consideração a utilização de diferentes percentuais dos componentes da resina (poliol e pré-polímero) que não foram analisados na presente pesquisa. Sugere-se também, a utilização de novos elementos de carga para a confecção desta matriz, como a nanosílica, a alumina, coprodutos da indústria de rochas ornamentais (resíduos de serragem e de polimento) e outras cargas minerais. Outra sugestão para os trabalhos futuros é a utilização de outros elementos de corte para a matriz abrasiva, como o diamante sintético, nitreto cúbico de boro (CBN), dentre outros.

Além da mudança dos componentes para a fabricação dos rebolos, sugere-se a utilização de outros tipos litológicos, para se avaliar o comportamento do rebolo abrasivo à base de resina de mamona em materiais com diferentes durezas, como sienitos, dioritos e mármore.

Para a avaliação mais acurada do desempenho de cada ferramenta frente aos ensaios de polimento, sugere-se o acompanhamento da qualidade de polimento em cada etapa do processo de desgaste do polimento, de acordo com a granulometria utilizada. Essa qualidade pode ser determinada a partir de aferição de brilho superficial e por medidas de rugosidades superficiais obtidos por rugosímetros e perfilômetros.

Sugere-se ainda, se for executada a metodologia de confecção dos abrasivos com os aditivos dibutil dilaurato de estanho (DBTL) e do brometo de cetiltrimetilamonio (ctab), que seja avaliada o potencial tóxico destas duas substâncias quando incorporado à resina poliuretana à base de óleo de mamona.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIROCHAS (2018a) Associação Brasileira da Indústria de Rochas ornamentais. **Estudo da competitividade brasileira no setor de rochas ornamentais e de revestimento: estratégia para uma política nacional de desenvolvimento setorial**. Brasília, DF, ISBN: 978-85-45530-00-8. 166p.
- ABIROCHAS (2018b). Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **O setor brasileiro de rochas ornamentais. Informe 05/2018**. Brasília, DF, 34p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2015) NBR 158451:2015. Rochas para revestimento; Parte 1: Análise petrográfica. 4p.
- AIGUEIRA, R. B; FILGUEIRA, M. (2006). **Mecanismo e resistência à abrasão de compósitos à base de poliéster-SiC para uso em coroas de polimento de rochas ornamentais**. Polímeros, v. 16, p. 187-192.
- ALMEIDA, P. F. (2014). **Estudo comparativo do polimento de granitos com diferentes tipos de abrasivos**. Dissertação de Mestrado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. 122p.
- ALMEIDA, P. F.; PONCIANO, V. M. ; SILVEIRA, L. L. L. ; SICHIERI, E. P. (2018) . **Insertion of silicon carbide as cutting element in ecological fickers for dimension stone polishing**. In: Global Stone Congress, 2018, Ilhéus, BA. Global Stone Congress. 4p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (2001). *G 40-01 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion*. 8p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (2015). *D3878-15 - Standard Terminology for Composite Materials*. 5p
- ARENA, A. P.(2015) *Análisis del ciclo de vida y la sustentabilidad ambiental del sector edilicio en Argentina*. In: Caldeira-Pires, A.; Souza-Paula, M. C.; Villas Bôas, R. C. (org.). A Avaliação do Ciclo de Vida. A ISO 14040 na América Latina. Brasília: ABIPTI, 2005. pp 220 - 247. ISBN: 8589263045
- ARMESTO, L.; BAHILL, A; VEIJONEN, K; CABANILLAS, A; OTERO, J. (2002). *Combustion Behavior of Rice Husk in Bubbling Fluidised Bed, Biomass and Bioenergy*. V. 23; p. 171 – 179.
- ASSAGRA Y.A.O. **Estudos mecânicos e elétricos em madeiras envoltas com manta geossintética e impregnadas com resina poliuretana**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2013). NBR 15012:2013. Rochas para revestimentos de edificações — Terminologia. 23p.
- BEZERRA, M.R.; SCHIAVINI, J.A.; RODRIGUES, W.C.; PEREIRA, C. S .S.P (2012). **Bisfeno A: Sua Utilização e a Atual Polêmica em Relação aos Possíveis Danos à Saúde Humana**. Revista Eletrônica TECCEN, Vassouras, v. 5, n. 1 p. 37-46
- BHUSHAN, B. (2002). *Introduction to Tribology. Technology & Engineering NY, Wiley & Sons. NY, 732p.*

- BIANCO, I. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) da rocha ornamental**. Apresentação oral. Centro de Tecnologia Mineral CETEM-NR/ES. 2017.
- BOLONINI, T. M.; SILVEIRA, L. L. L. (2015) **teste de polimento para rochas ornamentais silicáticas: métodos e resultados preliminares**. iv jornada de capacitação interna - cetem, 2015, rio de janeiro. iv jornada de capacitação interna - cetem.
- BRETON. Disponível em: https://www.breton.it/pt/pedra/maquina_multifio_corte_bloques. Acessado em 25 de novembro de 2018
- CANGEMI, J. M. ; SANTOS, A. M. ; CLARO NETO, S. . **A Revolução Verde da Mamona** . Química Nova na Escola (Impresso), v. 32, p. 3-8, 2010
- CARANASSIOS, A.; PINHEIRO, J.R. (2014). **O emprego do fio diamantado na extração de rochas ornamentais: Curso básico para operadores**. Cachoeiro de Itapemirim, ES. CETEMAG. 25p.
- CARVALHO, D.L.S (2010). **Determinação de parâmetros do polimento em três tipos de rochas graníticas**. Dissertação de Mestrado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. 130p.
- CAMARGO, J. L (2013). **Estudo da influência das propriedades petrográficas na qualidade do polimento de rochas ornamentais em politriz semi-automática**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 196p.
- CHIODI FILHO, C (2018a). **Balanco das exportações e importações de rochas ornamentais e de revestimento em 2017**. São Paulo: ABIROCHAS. Informe 01/2018. 25p.
- CHIODI FILHO, C (2018b). **Designação Comercial das Rochas Ornamentais e Classificação Fiscal de Seus Produtos**. São Paulo: ABIROCHAS. Informe 04/2018. 16p.
- CIMEF METALÚRGICA. Disponível em: http://www.cimef.com.br/pt/prod_polimentos_beka_2005. Acessado em 25 de novembro de 2018.
- COBRAL ABRASIVOS (2013). **Abrasivos para polimento de rochas ornamentais**. Disponível em: <http://www.cobralabrasivos.com.br/produtos/4/granito>. Acessado em 20/01/2013
- COSTA, A. G. (2009) **Rochas e Histórias do Patrimônio Cultural do Brasil e de Minas**. Rio de Janeiro: Bem-te-vi. 291 p. ISBN 978-85-88747-31-9.
- DOMPIERI, M.; SZNELWAR, J. J.; SCALABRIN, R. (2009) **Perfil de Abrasivos. Desenvolvimento de estudos para elaboração de plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. J. Mendo Consultoria. Encomendado pelo Ministério de Minas e Energia, Mineração e Transformação Mineral-SGM. 64p.
- DORIGO, W. F. G.; SILVEIRA, L. L. L. (2017). **Medição da perda de massa de rebolos abrasivos ecológicos utilizados no polimento de rochas ornamentais reforçados com sílica oriunda da queima da palha do arroz**. XXV Jornada de Iniciação Científica. Rio de janeiro. Anais
- DORIGO, W. F. G. ; SILVEIRA, L. L. L. ; ALMEIDA, P. F. (2018) . **Ecological fickerts used in the polishing of dimension stones**. In: **Global Stone Congress**, 2018, Ilhéus, BA. Global Stone Congress, 2018. CETEM.5p.
- FERNANDES, F. A. N.; LONA, L. M. F. (2002). **Introdução a Modelagem de Sistemas de Polimerização**. Apostila, 146p.

- FERRO, W. P.; SILVA, L.G.A.; WIEBECK, H. (2007). **Uso da cinza da casca de arroz como carga em matrizes de poliamida 6 e polimiamida 6.6.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. V17, nº3, p. 240-243.
- FIORIO, R. (2011) **Síntese e caracterização de poliuretana termoplástico contendo poss via extrusão reativa.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós graduação em ciência dos materiais. Rio Grande do Sul. 135p.
- FOLETTTO, E.L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S. ; PORTUGAL JR., U. L.; JAHN, S. L. (2005). **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz.** *Química Nova*, v. 28, n.6, p. 1055-1060.
- FRASCÁ, M. H. B. O. (2014). **Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas.** In: Francisco W. H. Vidal; Hélio C. A. Azevedo; Nuria F. Castro. (Org.). *Tecnologia de Rochas Ornamentais - Pesquisa, Lavra e Beneficiamento*. 1ed. Rio de Janeiro: Cetem, v. 1, p. 43-98.
- FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A. B. (1998) . **Materiais Rochosos para Construção.** In: Antonio Manoel dos Santos Oliveira; Sérgio Nertan Alves de Brito. (Org.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 1998, v. único, p. 331-342
- GADOLFI, M. (2016). **Desenvolvimento de um pré-polímero de uretana a base de óleo de mamona e tolueno diisociano (TDI)** Trabalho de conclusão de curso. UTFPR. Londrina, Paraná. 69p.
- GÖRGÜLÜ, K; CEYLANOGLU, A. (2008) *Evaluation of continuous grinding test on some marble and limestone units with silicon carbide and diamond type abrasives.* *Journal of materials processing technology* v. 204, 264-268. 4p.
- GODOY, A, L, E. (2006). **Estudo da influência da adição de polímeros precursores cerâmicos na sinterização de SiC e Al₂O₃**, Tese de doutorado, Universidade de São Paulo- USP – Tecnologia Nuclear de Materiais IPEN/USP. São Paulo, 149p.
- GÜRCAN, S.; GOKTAN, R. M.; YILDIZ, A. (2014) *Effect of mineralogical and microstructural properties on surface roughness and gloss of some ornamental marbles subjected to polishing process. X-Ray Spectrometry.* v. 43, p. 70-78.
- HUANG, H.; LI, Y; SHEN, J.Y.; XU, X.P (2002). *Micro-structure detection of a glossy granite surface machined by the griding process.* *Journal of materials Processing Technology*. V129, 403-407, 4p.
- HUANG, H.; XU, X.P. (2004) *Interfacial interactions between diamond disk and granite during vertical spindle grinding.* *Wear*. v. 256, p. 623-629, 2004.
- IEL, (2013). **Manual de Caracterização, Aplicação, Uso e Manutenção das Principais Rochas Comerciais no Espírito Santo.** Instituto Euvaldo Lodi. 1a Edição, Cachoeiro de Itapemirim, ES. 244p.
- ISMAIL, H.; NIZAM, J. M.; KHALIL, H. P. S. A. (1999); *Eur. Polymers. J.*, 35, 1429
- KARAK, N (2012). *Vegetable oil-based polymers: Properties, processing and applications.* New Delhi: Woodhead Publishing,. 322p.
- LARBI, K.K. (2010). *Synthesis of high purity silicone from rice husks. Thesis (Master of Applied Science of Materials Science and Engineering) –Universidade of Toront.* Toronto, Canada. 128p.

- LEITÃO, V.M.F. E SILVEIRA, L.L.L. (2012). **Desempenho da aplicação da resina vegetal na confecção de rebolo abrasivo utilizando diamante sintético como elemento abrasivo**. IV Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais. Campina Grande - PB. p 176 – 182.
- LEITÃO, V.M.F.; SILVEIRA, L.L.L. (2013) **Ecoabrasivo: uma nova perspectiva para o setor de rochas ornamentais**. In: XXI Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2013, Rio de Janeiro, Brasil.
- LEITÃO, V.M.F. E SILVEIRA, L.L.L. (2014). **Ecoabrasivo confeccionado com resina vegetal e carbeto de silício: uma inovação para o setor de rochas ornamentais**. XIX Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro. Anais CETEM.4p
- MARCON, D. B.; PEITER, C. C.; CASTRO, N. F. (2012). **Utilização de fio diamantado na lavra de granitos comerciais**. XX Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro. Anais CETEM.4p.
- MONTANI, C. (2015) **XXI a XXVI Rapporto: Marmo e Pietre nel Mondo**. Carrara: Aldus Casa di Edizioni in Carrara, 2010 a 2015.
- MONTANI, C (2018). **XXVIII Rapporto marmo e pietre nel mondo 2017. Congiuntura Internazionale, Produzione, Interscambio, Consumi, Tecnologie, Beni strumentali, Schede dei Paesi leader**. Carrara, Itália. 132p.
- MOORE, M. A.; KING, F. S. (1980) *Abrasive wear of brittle solids* . National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford. England. 18p.
- NEVES, M. C. **Estudo experimental do polimento de diferentes “granitos” e as relações com a mineralogia**. 2010. 115p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo (Brasil).
- OZIOKO, F. U. (2011) *Effect of carbonization temperature on wear rate behaviour of rice husk ash reinforced epoxy composites*. Leonardo Eletronic Journal of Practices & Technologies. V. 19, p. 172-182.
- PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E.; RIBEIRO, R. P.; SILVEIRA, L. L. L (2004). **Considerações sobre o desgaste abrasivo no beneficiamento de rochas ornamentais**. In: XLII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2004, Araxá, Minas Gerais (Brasil).
- PARAGUASSU, A, B.; RIBEIRO, R, P. (2013). **Ensaio tecnológicos em rochas e agregados para construção civil – SGS 5837**. Agosto a Novembro de 2013. Notas de Aula. Mimeografado.
- PINTAÚDE, G. (2002) **Análise dos regimes moderado e severo de desgaste abrasivo utilizando ensaios instrumentados de dureza**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 230p.
- POLIURETANO & TECNOLOGIA. **Manuseio de isocianatos aromáticos**. Disponível em: <http://blogdopoluiuretano.com.br/materias-primas/manuseio-de-isocianatos-aromaticos/>. Acessado em: 5 de dezembro de 2018.
- QUANZHOU JDK DIAMOND TOOLS, disponível em <http://cnjdktools.com.br/1-3-diamond-wire-saw/203679/>, acessado em 20 de novembro de 2018.
- RABINOWICZ, E. (1966) *Friction and Wear of Materials*. Cambrige, Massachusetts, John Wiley, 243p.

- RADI, P. A.; SANTOS, L. V. ; BONETTI, L. F. (2007) . **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. In: XIII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA - ENCITA, 2007, São José dos Campos. XIII ENCITA - Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA.
- RIBEIRO, R.P.; SILVEIRA, L.L.; PARAGUASSÚ, A.B.; RODRIGUES, J.E. (2004) **Aplicação de bases conceituais de tribologia no beneficiamento de granitos ornamentais**. Revista Minerva. São Carlos. V1. N1. p.45-50. 2004.
- SERACO, I.P.; SILVEIRA, L. L. L (2015) **Medição do desgaste abrasivo de resina vegetal por meio de ensaio taber**. XXIII – Jornada de Iniciação Científica-CETEM 2015, 5p.
- SHEN JY; LIN W, OMORI H; WU XP (2006) *Mechanism of Surface formation for Natural granite grinding*. *Key Engineering Materials*.: pp 161 - 165.
- SILVA, R.V. (2003) **Compósitos de resina derivada do óleo de mamona e fibras vegetais**. Tese de Doutorado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. 157p.
- SILVEIRA, L. L. L.; RODRIGUES, J. E.; ARTUR, A.C (2004). *Integrated analysis of the mineralogical, geotechnical and operational variables on the polishing of dimension stones*. In: XXXII INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 2004, Firenze (Italy).
- SILVEIRA, L.L.L. (2007) **Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo**. Tese de Doutorado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. 205p.
- SILVEIRA, L. L. L. (2008) **Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo**. Livro, 1 ed. Curitiba-Paraná, Editora Pós-Escrito, 203p
- SILVEIRA, L. L. L.; VIDAL, F. H. ; SOUZA, J. C. (2013) . **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento** - Capítulo 7 ISBN 9878582610053. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM. v. 1. 678p .
- SILVEIRA, L. L. L. ; BOLONINI, T. M. (2016) . **Polimento de rochas ornamentais - aspectos tribológicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016. v. 1. 54p .
- SILVEIRA, L. L. L. ; ALMEIDA, P. F. ; BOLONINI, T. M. ; SOUZA, M. L. ; MACHADO, L. L. ; PEIXOTO, S. C. (2018) . **Contribuições para o avanço tecnológico da fase de polimento de rochas ornamentais**. 22. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017. v. 1. ISBN 978-85-8261-080-0, 66p .
- STACHOWIAK, G.W. & BATCHELOR, A. W (1993). *Fundamental of contact between solids*, Amsterdam, Elsevier. 39 p
- TOPZONE. Disponível em: <http://www.topzstone.com/colecoes/>. Acessado em 15 de abril de 2019.
- TREZONA R.I., ALLSOPP D.N., HUTCHINGS I.M (1999). **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**. Wear. University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, Cambridge, UK, 10p.
- TURCHETTA, S. (2003) *Tecnologie di Lavorazione Delle Pietre Naturali*. Tese de Doutorado – Università Degli Studi di Cassino, Italy. 261p.
- VENTOVAG. Disponível em: <http://www.ventowag.com.br/tear-multifios-multiwire-cpx.php>. Acessado em 25 de novembro de 2018.

- VALERIANO, N. ; GADIOLI, M.C.B. (2018) . **Avaliação da circulação e consumo de água no processo de beneficiamento de rochas ornamentais**. In: XXVI Jornada de Iniciação Científica CETEM, 2018, Rio de Janeiro.
- VIDAL, F. W. H. (2014). **As rochas ornamentais na história.. Tecnologia de Rochas Ornamentais: pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. p. 17-42.
- XIE, J.; TAMAKI, J. (2007) *Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance*. Journal of Materials Processing Technology. 186: pp 253-258.
- YAMADA, K.; MOHRI, M. (1991) *Properties and applications of silicon carbide ceramics*. *Silicon Carbide Ceramics – 1: Fundamental and solid reaction*. Elsevier Science, London, p.13-44.
- YAVUZ, H.; OZKAHRAMAN, T.; DEMIRDAG, S. *Polishing experiments on surface quality of building stone tiles*. *Construction and Building Materials*. v. 25, p. 1707-1711, 2011.
- ZUM-GAHR, K.H. (1987) *Microstructure and wear of materials*. *Institute of Materials Technology*. *University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany*, v. 10.