

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MÁRMORE ARTIFICIAL COM
RESÍDUO FINO DE MÁRMORE DOLOMÍTICO BENEFICIADO EM
TEARES DE LÂMINAS DIAMANTADAS

TCHARLLIS JOÃO DA CUNHA DEMARTINI

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

ABRIL DE 2017

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MÁRMORE ARTIFICIAL
COM RESÍDUO FINO DE MÁRMORE DOLOMÍTICO BENEFICIADO
EM TEARES DE LÂMINAS DIAMANTADAS

TCHARLLIS JOÃO DA CUNHA DEMARTINI

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção de
título de Mestre em Engenharia e Ciência
dos Materiais.

Orientador: Prof. D.Sc. Rubén J. Sánchez Rodríguez

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL DE 2017

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MÁRMORE ARTIFICIAL
COM RESÍDUO FINO DE MÁRMORE DOLOMÍTICO BENEFICIADO
EM TEARES DE LÂMINAS DIAMANTADAS

TCHARLLIS JOÃO DA CUNHA DEMARTINI

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção de
título de Mestre em Engenharia e Ciência
dos Materiais.

Aprovado em 19 de abril de 2017

Comissão Examinadora:

Prof. Carlos Eduardo Ribeiro Gomes (D.Sc., Eng. Materiais) – IFES

Elaine Aparecida Santos Carvalho (D.Sc., Eng. Materiais) – UENF

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Ph.D., Eng. Mecânica) - UENF

Prof. Rubén J. Sánchez Rodríguez (D.Sc., Polímeros) – UENF (Orientador)

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

(Walter S. Landor)

Dedico a Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela determinação e capacidade e a minha família pelo incentivo e apoio.

Agradeço a todos os meus amigos.

Agradeço a todos os amigos do Lamav e do IFES.

Agradeço aos técnicos do Lamav e do IFES por toda ajuda.

Agradeço ao professor Carlos Eduardo por toda ajuda e pelos testes realizados.

Agradeço ao professor Rubén pela confiança, oportunidade e incentivo no trabalho.

Agradeço aos demais membros da banca, os professores Eduardo e Elaine.

Agradeço à Universidade Estadual Norte Fluminense, ao Instituto Federal do Espírito Santo e ao Centro de Tecnologia Mineral do Espírito Santo.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa decisiva em minha vida.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
Resumo.....	x
Abstract.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificativa.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Rochas Artificiais.....	5
2.2 Mármore Artificiais Moldados com Uso de Vácuo	9
2.3 Produção de Mármore Artificiais com Utilização de Resíduo de Mármore Dolomítico e de Resina Epoxídica	13
2.3.1 Mármore Dolomítico	13
2.3.2 Resina Epóxi.....	15
2.4 Processo Produtivo e Geração de Resíduos na Indústria de Rochas Ornamentais	21
2.5 Classificação Ambiental do Resíduo de Mármore Dolomítico	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais.....	33

3.2	Caracterização do Resíduo e do Sistema DGEBA/TEPAc	35
3.3	Determinação do Maior Fator de Empacotamento.....	35
3.4	Determinação do Teor Mínimo de Resina.....	36
3.5	Produção das Placas de Mármore Artificial.....	37
3.6	Caracterização do Mármore Artificial Produzido	39
3.6.1	Determinação da Absorção de Água, Densidade e Porosidade Aparentes	39
3.6.2	Desgaste Abrasivo Amsler	41
3.6.3	Resistência à Flexão em Três Pontos	43
3.6.4	Resistência à Compressão Uniaxial Simples	44
3.6.5	Resistência ao Impacto de Corpo Duro	45
3.6.6	Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)	47
3.6.7	Microestrutura.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Caracterização do Mármore Dolomítico Natural	49
4.2	Caracterização do Sistema Epoxídico DGEBA/TEPAc.....	52
4.3	Definição da mistura de maior empacotamento e do teor mínimo de resina	54
4.4	Caracterização do Mármore Artificial Produzido	55
4.4.1	Índices Físicos	55
4.4.2	Desgaste Abrasivo Amsler	57
4.4.3	Resistência à Flexão em 3 Pontos	59
4.4.4	Resistência à Compressão Uniaxial	63
4.4.5	Resistência ao Impacto de Corpo Duro	66

4.4.6	Análise Dinâmico-Mecânica	67
4.4.7	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	70
5	CONCLUSÃO	73
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produto Compacto Aplicado.....	6
Figura 2 – Importações Brasileiras Acumuladas de Rochas Artificiais (2013-2015) ...	7
Figura 3 – Comparação entre Esquemas de Processamento por RTM (a) e VARTM (b).....	11
Figura 4 – Etapas do Processo de Vibro-Compressão á Vácuo	12
Figura 5 – Representação Esquemática do Anel ou Grupo Epoxídico.....	15
Figura 6 – Estrutura Química da DGEBA	17
Figura 7 – Estrutura Química das Poliaminas Alifáticas DETA, TETA e TEPA.....	19
Figura 8 – Lavra de Marmo-Ônix Blue em Girona, Corte por Fio Diamantadado....	21
Figura 9 – Tear Convencional de Lâminas de Aço (a); Detalhe do Sistema de Aspersão de Água (b).	23
Figura 10 – Tear de Lâminas Diamantadas.	24
Figura 11 – Monofio para Esquadreamento de Blocos.....	25
Figura 12 – Tanques de Decantação (a); Tanque Decantador Cilindro-cônico de Chapas Metálicas (b).	28
Figura 13 – Filtro Prensa (a); Leito de Secagem (b).	29
Figura 14 – Fluxograma Estrutural de Pesquisa	32
Figura 15 – Chapa de Marmo-Ônix Blue (a); Resíduo Semissólido – Lama Abrasiva (b) e Resíduos Classificados nas Faixas Granulométricas Fina, Média e Grossa (c).	34
Figura 16 – Diagrama ternário com as 10 misturas baseado no modelo cúbico completo do Simplex	35
Figura 17 – Equipamento Utilizado na Produção do Mármore Artificial	37

Figura 18 – Placa de Mármore Artificial Produzido com 85% de resíduo de mármore dolomítico e 15% de Resina Epóxi.....	38
Figura 19 – Mármore Artificial Comercial Bianco Prime da Emporio Stone	39
Figura 20 – Balança de Precisão (a); Estufa Ventilada (b).....	40
Figura 21 – Máquina Amsler (a) e Relógio Medidor (b).....	42
Figura 22 – Prensa Hidráulica	44
Figura 23 – Corpo de Prova Rompido pela Queda da Esfera de Aço.	46
Figura 24 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).	48
Figura 25 – Comportamento Mecânico do Sistema Epoxídico DGEBA /TEPAc no Ensaio de Resistência à Flexão em 3 Pontos	53
Figura 26 – Comportamento Mecânico no Ensaio de Resistência à Flexão em 3 Pontos do Mármore Artificial Produzido	60
Figura 27 – Comparação do Comportamento Mecânico no Ensaio de Resistência à Flexão em 3 Pontos entre o Mármore Artificial Produzido e o Mármore Artificial Comercial	62
Figura 28 – Comparação entre o Comportamento Mecânico na Flexão do Mármore Artificial Produzido, Mármore Artificial Comercial, Mármore Dolomítico Natural e Resina Epóxi	62
Figura 29 – Comportamento Mecânico no Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial do Mármore Artificial Produzido.....	64
Figura 30 – Comparação entre o Comportamento Mecânico na Compressão do Mármore Artificial Produzido X Mármore Artificial Comercial	65
Figura 31 – Comparação entre os Intervalos de Confiança nas Mèdias dos Ensaios de Flexão.....	66
Figura 32 – Comportamento Dinâmico-mecânico do Mármore Dolomítico Natural, Mármore Artificial Produzido e Resina Epóxi no Ensaio de DMA.....	68

Figura 33 – Microscopia Eletrônica de Varredura da Seção de Fratura do Mármore Artificial Produzido.....	70
Figura 34 – Microscopia Eletrônica de Varredura da Seção Polida do Mármore Artificial Produzido.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das Propriedades Físicas e Mecânicas Obtidos nos Meios Acadêmico e Industrial.....	8
Tabela 2 – Índices Físicos e Propriedades Mecânicas Resultantes da Variação das Taxas de Vácuo	13
Tabela 3 – Valores Estabelecidos para Propriedades Físicas e Mecânicas dos Mármore Dolomíticos Naturais	14
Tabela 4 – Propriedades Típicas da Resina DGEBA	18
Tabela 5 – Faixas Granulométricas Utilizadas	33
Tabela 6 – Resultados dos Índices Físicos para o Mármore Dolomítico Natural	49
Tabela 7 – Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos para o Mármore Dolomítico Natural	50
Tabela 8 – Resultados da Resistência à Compressão Uniaxial para o Mármore Dolomítico Natural	51
Tabela 9 – Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos para o Sistema Epoxídico DGEBA/TEPAc.....	52
Tabela 10 – Densidade Aparente Seca das Misturas Testadas.....	54
Tabela 11 – Resultados dos Índices Físicos para o Mármore Artificial Produzido	55
Tabela 12 – Parâmetros de Comparação para Desgaste Abrasivo Amsler	58
Tabela 13 – Resultados do Desgaste Abrasivo Amsler	58
Tabela 14 – Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos do Mármore Artificial Produzido	59
Tabela 15 – Resistência à Compressão Uniaxial do Mármore Artificial Produzido.....	63
Tabela 16 – Resultados do Ensaio de Resistência ao Impacto de Corpo Duro	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
DGEBA – Diglicidil éter de bisfenol A
DMA – Análise Dinâmico Mecânica
DRX – Difração de raios X
EN – Norma Européia
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo
LAMAV – Laboratório de Materiais Avançados
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR – Norma Brasileira
mm Hg – Milímetros de mercúrio
MPa – Mega Pascal
 M_{sec} – Massa seca
 M_{sat} – Massa saturada
 M_{sub} – Massa submersa
NBR – Norma Brasileira
RTM – Moldagem por Transferência de Tesina
SEPOL – Setor de Polímeros
TEPA – Tetraetilenopentamina
TEPAc – Tetraetilenopentamina comercial
TGA – Análise Termogravimétrica
TMR – Teor Mínimo de Resina
UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
UNE-E – Norma Técnica Espanhola
VARTM – Vacuum Assisted RTM
VV – Volume vazio

Resumo de dissertação apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MÁRMORE ARTIFICIAL
COM RESÍDUO FINO DE MÁRMORE DOLOMÍTICO BENEFICIADO EM TEARES
DE LÂMINAS DIAMANTADAS**

Tcharllis João da Cunha Demartini

19 de abril de 2017

Orientador: Prof. Rubén J. Sánchez Rodríguez

A produção de uma rocha artificial a partir da aglutinação de resíduos finos de mármore dolomítico pela resina epóxi pode ser uma alternativa viável do ponto de vista técnico, econômico e ecológico. O resíduo utilizado é proveniente do desdobramento de mármore dolomítico em teares de lâminas diamantadas e geralmente é depositado em aterros industriais. Considerando esta nova aplicação, agrega-se valor ao resíduo, diminuindo a quantidade a ser descartada e o consequente impacto ambiental gerado. O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de um mármore artificial produzido pela metodologia de vibro-compressão à vácuo. Para isso, foram confeccionadas placas rochosas, em equipamento apropriado, com 85% em peso de partículas de resíduo e 15 % de sistema epoxídico DGEBA/TEPAc. As placas foram produzidas com uma pressão de compactação de 0,5 MPa, à temperatura de 90 °C por um período de 20 minutos em equipamento apropriado. A partir das placas foram cortados os corpos de prova nas dimensões utilizadas em cada um dos seguintes ensaios: densidade, absorção de água, porosidade, resistência à flexão, resistência à compressão, resistência ao impacto de corpo duro, desgaste abrasivo, análise dinâmico-mecânica e microscopia eletrônica de varredura. Obteve-se um mármore artificial produzido pela técnica de vibro compressão a vácuo com absorção de água inferior a 0,06%, uma resistência à flexão de 33,93MPa e uma compressão uniaxial de 96,49MPa, confirmando uma boa adesão entre as partículas de resíduo e a resina epóxi.

Abstract of Dissertation presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Master's Degree in Materials Engineering and Science.

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF ARTIFICIAL MARBLE
WITH DOLOMITIC MARBLE WASTE BENEFITED BY LOOMS OF DIAMOND
BLADES**

Tcharllis João da Cunha Demartini

april 19, 2017

Advisor: Prof. Rubén J. Sánchez Rodríguez

The production of artificial stone from the agglutination of the epoxy resin fine waste can be a viable alternative from technical, economic and ecological point of views. The residue derives from the dolomitic marble unfolding into looms of diamond blades and it is usually deposited in industrial landfills. With this new application, there is value added to the residue, reducing the amount to be rejected and the consequent environmental impact. The main objective of this research is to evaluate the physical, mechanical and thermal properties of an artificial marble produced through vacuum vibro-compression. With this purpose, stone plates were produced, using appropriate tools, characterized by a distribution of 85% of residual particles weight and 15% of epoxy system DGEBA/TEPAc. The products were manufactured with the following conditions during 20 (twenty) minutes using appropriate equipment: compacting pressure of 0.5 MPa and temperature of 90 °C. From the resulted plates, the samples were extracted and analyzed in each of the following tests: density, water absorption, porosity, flexural strength, compressive strength, resistance to hard body impact, abrasive wear, stain resistance, dynamic-mechanical analysis and scanning electron microscopy. The result was an artificial marble produced employing vacuum vibro-compression with water absorption levels below 0.06%, flexural strength of 33.93 MPa and uniaxial compression 96.49 MPa, thus indicating residual particles and epoxy resin grip satisfactory levels.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de rochas ornamentais com uma produção total em 2016 de 9,3 milhões de toneladas (Abirochas, 2017).

Por ser um grande produtor mundial de rochas ornamentais, o Brasil é, também, um grande emissor de resíduos, vários deles poluentes, provenientes dos processos produtivos envolvidos nesta atividade. Esses resíduos são gerados, em sua maior parte, durante os processos de extração e desdobramento de blocos de rochas para a confecção de chapas e necessitam de maiores áreas para disposição diariamente (Souza *et al.*, 2009).

Como causam danos ao meio ambiente, os resíduos de rochas representam uma obrigação e responsabilidade social para as empresas brasileiras do setor, devendo estas apresentar um projeto para sua recuperação, contribuindo para quitar os passivos ambientais a elas atribuídos. Estes projetos podem ser baseados em pesquisas acadêmicas que reciclem os resíduos, dando-lhes um novo uso, agregando valor e reduzindo os impactos ambientais negativos atuais e aumentando as perspectivas do futuro.

Uma alternativa para a reciclagem dos resíduos provenientes do desdobramento de rochas ornamentais em equipamentos diamantados proposta nesta pesquisa é a sua aglutinação através de resina epóxi, desenvolvendo-se rochas artificiais.

As rochas artificiais ou produtos compactos são produzidas através da aglomeração de uma elevada porcentagem de agregados naturais com o auxílio de uma pequena porcentagem de material polimérico. Mármore, granito, cristais de vidro e areia quartzosa são exemplos de materiais que quando particulados são considerados agregados naturais. Tais rochas possuem melhores propriedades mecânicas, devido às menores taxas de absorção de água e porosidade quando comparadas às rochas naturais, consideradas opções mais adequadas quando aplicadas em condições de uso mais exigentes, como em pisos e paredes (Cruz, 2003; Lee *et al.*, 2008).

O mármore artificial é bem aceito pelo mercado consumidor, sendo várias as vantagens citadas pelas empresas que o produzem e comercializam. A principal

delas é a impermeabilidade, impedindo a ocorrência de manchamento, atribuída à aplicação de resina em sua constituição, que une as partículas de rocha e preenche a porosidade típica de rochas naturais. Assim, não há penetração e percolação de líquidos em seu interior (Breton Company, 2015; Caesarstone, 2015).

No Brasil e no mundo, ao longo dos últimos anos, a demanda é crescente por rochas artificiais (Woodworking, 2012; Abirochas, 2016). Somente entre os anos de 2011 e 2016, estima-se que haverá um aumento de 36% no seu consumo (Woodworking, 2012).

Apesar de o Brasil ser um dos maiores produtores e detentores de reservas de rochas ornamentais, que representam uma grande fonte de riquezas ao país, ainda são poucas as medidas adotadas para diminuir as perdas de materiais rochosos. A incorporação dos resíduos na produção de rochas artificiais é de grande valia para esta redução, entretanto, as tecnologias para isso ainda são inferiores e escassas quando comparadas as de outros países. (Machado *et al.*, 2002).

Diante deste contexto, fica evidente que a reciclagem de resíduos na produção de rochas ornamentais é uma alternativa viável tanto do ponto de vista técnico quanto ecológico, além de agregar valor a algo que, com menor ou maior grau de adequação as leis ambientais, seria descartado no meio ambiente. Essa iniciativa ainda pode contribuir para o desenvolvimento das atuais tecnologias de produção de rochas artificiais e aumento dos postos de trabalho no setor.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar um mármore artificial produzido a partir do resíduo de mármore dolomítico, proveniente do desdobramento dos blocos em teares de lâminas diamantadas, usando como ligante uma resina epoxídica. O intuito é obter um material que seja tecnicamente e ecologicamente viável, dando uma melhor destinação e agregando valor a este resíduo oriundo da indústria de rochas ornamentais.

1.2 Objetivos Específicos

- Produzir placas de mármore artificial pela aglutinação do resíduo semissólido fino e sólido médio e grosso do mármore dolomítico desdobrado em teares de lâminas diamantadas através de resina epóxi do tipo DGEBA;
- Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do mármore artificial produzido, entre elas: densidade, absorção de água, porosidade aparente, resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão, resistência ao desgaste abrasivo, resistência ao impacto de corpo duro, análise dinâmico-mecânica e microestrutura da região de fratura;
- Comparar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do mármore artificial produzido com resíduos do desdobramento em teares de lâminas diamantadas com: as dos materiais obtidos por outros pesquisadores, os fabricados pela indústria e o mármore natural do qual se originou o resíduo.

1.3 Justificativa

O Brasil, apesar de ser um dos maiores produtores mundiais de rochas ornamentais naturais, ainda não se destaca quando se trata de rochas artificiais. Um reflexo disso é o grande volume de rochas artificiais importadas no ano de 2015, que representam um total de 53,2 mil toneladas. Não obstante, as importações de materiais artificiais totalizaram USD 43,1 milhões, valor que supera o montante de USD 42,3 milhões dispendido a demanda de materiais naturais. Isso é reflexo do preço médio elevado deste tipo de material (Abirochas, 2016).

Os dados acima demonstram que existe uma demanda grande por esse tipo de produto em nosso mercado interno e o grande desafio é ofertá-lo a preços mais convidativos. Existe ainda a possibilidade de exportá-lo, considerando o fato de que já há um grande mercado consumidor no exterior. Para atingir essa fatia do mercado com quantidade e qualidade, a indústria brasileira precisa expandir e – em alguns casos e regiões – implementar e melhorar os poucos processos nacionais existentes. Uma forma de alcançar este objetivo é a implementação de novos

projetos em estudos como este, que desenvolvem materiais alternativos como os mármore artificiais, com resíduos que seriam descartados ou mandados para aterros e que gerariam passivos ambientais, mas que agora se tornam matérias-primas novamente.

Segundo Çelik e Sabah (2008), de 30 a 35% do volume do bloco vira resíduo durante as etapas de beneficiamento. Já a ABIROCHAS (2016) estima que este número possa chegar a 41%, ou seja, dos 8,5 milhões de toneladas de rochas brutas destinadas ao beneficiamento ou processamento em 2015, 3,5 milhões se transformaram em resíduos. Em se tratando de resíduos e seu impacto negativo no meio ambiente, a maior estimativa deve ser levada em consideração e já que as rochas artificiais são fabricadas com adições de carga mineral maiores que 80% m/m (Cruz, 2003), se forem adotadas metodologias semelhantes às deste estudo, uma parte considerável desse resíduo pode ser aproveitada na produção deste material sintético, todos os anos, reduzindo o volume de resíduo descartado, agregando valor e diminuindo os custos de produção atrelados às rochas artificiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rochas Artificiais

As rochas ornamentais naturais são muito empregadas na construção civil por possuírem elevada durabilidade, alta resistência e, mesmo assim, permitirem alcançar altos níveis de brilho quando submetidas ao processo de polimento superficial. No entanto, como podem ser aplicadas em ambientes sob condições muito distintas se comparadas às de sua formação, esse material, que era considerado rígido, poderá se tornar frágil ao longo do tempo de exposição. A consequência é uma mudança de comportamento, principalmente na presença de intempéries, resultando em imperfeições e/ou patologias. Além disso, as rochas são naturalmente heterogêneas, variando de textura e coloração – até no mesmo maciço rochoso – e são recursos não renováveis muito explorados nos dias de hoje (Lee, 2008; Lam dos Santos, 2011).

Visando atender a demanda de mercado pelas rochas, a necessidade de obter produtos menos onerosos, maior controle da homogeneidade dos materiais rochosos e melhor ajuste às exigências dos órgãos ambientais, há cerca de vinte anos, iniciou-se a produção de novos materiais, mais conhecidos atualmente como granitos ou mármore artificiais. Como vantagens em relação às rochas naturais, destacam-se ínfima porosidade, com consequente baixa absorção de água, além da ausência de manchamento, por se tratarem de materiais impermeáveis. Estas últimas características são proporcionadas pela utilização da resina polimérica como aglutinante, devido a sua percolação entre os poros dos grãos, retirando a porosidade (Lee *et al.*, 2002; Molinari, 2007; Caesarstone, 2015; Fibercenter, 2015).

As rochas artificiais podem ser classificadas em quatro categorias (Martins e Pereira, 2010):

- Produtos vítreos, que em altas temperaturas se tornam mais plásticos e quando resfriados enrijecem;
- Produtos cerâmicos, cuja base de sua constituição é a argila, tendo formato definido por moldagem a frio e enrijecimento a altas temperaturas.

- Produtos compactos, formados por fragmentos de rochas naturais e aglutinados por resinas sintéticas, sofrendo ou não compactação;
- Produtos hidráulicos, similares aos produtos compactos, mas o aglutinante utilizado é hidráulico ao invés de resinoide;

Partindo dessa classificação, as rochas artificiais ditas “produtos compactos” e “produtos hidráulicos” podem se enquadrar no termo “rochas aglomeradas”, que são definidas pela norma europeia EN 14.618 (2011) como produtos industriais desenvolvidos da junção de agregados, predominantemente de rochas naturais, com variados tamanhos e naturezas, sendo, às vezes, unidos por aglutinantes e aditivos.

Ainda de acordo com a mesma norma, as “rochas aglomeradas” podem ser classificadas considerando os tipos de aglomerantes e agregados utilizados. No caso dos aglomerantes, são possíveis de serem utilizados resinas poliméricas, cimentos hidráulicos ou uma mistura dos dois, respeitando um processo de endurecimento irreversível, típico de aglomerantes termofixos. Os agregados podem ser compostos por um ou mais dos seguintes fragmentos ou partículas: mármore, granito, areia de quartzo, cristais de vidro e espelhos, entre outros. Com base nas definições apresentadas, pode-se inferir que o material desenvolvido neste estudo é compacto (Figura 1a,b,c), uma vez que será utilizada uma resina polimérica em sua constituição. Ele pode, também, ser classificado como um mármore compacto (Figura 1b), devido à presença de partículas de mármore como agregados.

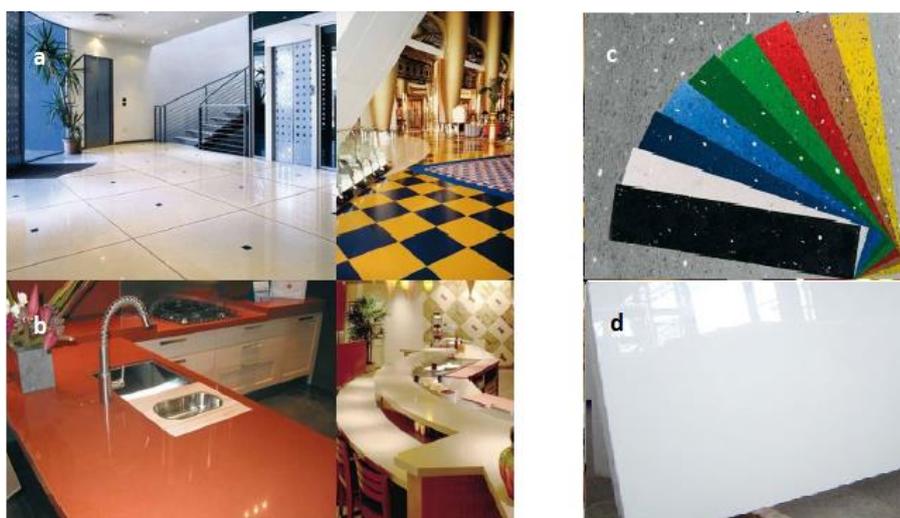


Figura 1 – Produto Compacto Aplicado
 Revestimento (a). Bancadas (b). Variações na Coloração (c). Chapa Mármore Compacto (d)
 (Breton Company, 2015)

Analisando o mercado financeiro das rochas artificiais em nível nacional, a ABIROCHAS (2016), através de um informativo, relatou que as importações tanto de rochas naturais quanto de artificiais tiveram uma queda do volume físico em 2015 devido à crise mundial. No entanto, este declive foi mais acentuado para os naturais que para os artificiais (-25,87% e -15,18%, respectivamente). Em números, 53,2 mil toneladas de materiais rochosos artificiais foram importados. Em termos de valores, os materiais artificiais foram responsáveis pela movimentação de USD 43,1 milhões, enquanto os naturais, USD 42,3 milhões. O maior lucro obtido com as transações comerciais de rochas artificiais se justifica por seu preço médio mais elevado.

Na figura 2 é possível visualizar um gráfico das importações brasileiras acumuladas destes materiais no período de 2013-2015 e perceber o aumento da demanda com o passar dos anos.

Em nível internacional, as rochas artificiais compactas estão sendo mais requisitadas com o passar dos anos. A previsão fornecida por Woodworking (2012) sugere um acréscimo de 36% na demanda de mercado para estes produtos no período compreendido entre os anos de 2011 e 2016.

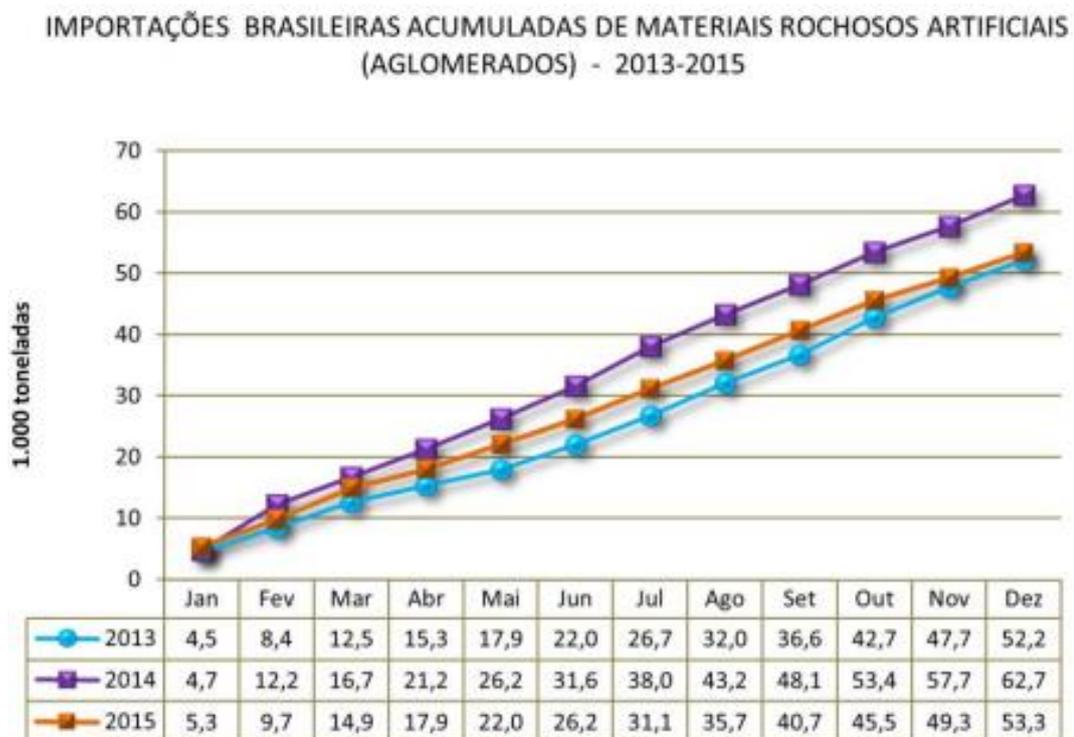


Figura 2 – Importações Brasileiras Acumuladas de Rochas Artificiais (2013-2015) (Abirochas, 2016).

Alguns pesquisadores que vêm desenvolvendo rochas artificiais com composições e processos variados quantificaram algumas propriedades físico-mecânicas resultantes destes estudos. A Tabela 1 dispõe valores divulgados por pesquisadores e empresas relevantes do setor.

Tabela 1 – Valores das Propriedades Físicas e Mecânicas Obtidos nos Meios Acadêmico e Industrial

Autor	Densidade Aparente (g/cm³)	Absorção de Água (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)
Lee et al. (2008)	2,05 – 2,44	0,01 – 0,2	27,9 – 52,7	78,70 – 151,30
Borsellino et al. (2009)	N.D	0,25	10,6 – 22,2	N.D.
Caesarstone (2015)	N.D.	0,02	50,5	215,74
Alicante (2015)	2,40 – 2,50	0,09 - 0,40	N.D.	220
Ribeiro et al. (2014)	2,27 ± 0,02	0,19 ± 0,02	4,21 ± 0,52	14,17 ± 1,03
Ribeiro et al. (2015)	2,27	0,19 ± 0,02	21,5 ± 1,9	77,9 ± 6,1
Carvalho et al. (2015)	2,68 ± 0,03	0,17 ± 0,04	57,57 ± 3,21	N.D.
Silva (2016)	2,23 ± 0,02	0,05 ± 0,01	31,8 ± 2,5	85,2 ± 7,8
RMC Tradicional (2015)	2,52 – 2,57	0,09 – 0,32	13,6 – 17,2	97 - 131
RMC Polaris (2015)	2,51 – 2,56	0,06	31	130 - 150
COMPAC MARBLE (2015)	2,45 – 2,49	0,04 – 0,11	24 - 30	130 - 137

Ainda de acordo com a tabela 1:

- Lee et al. (2008) desenvolveu um mármore artificial compacto, com variação dos valores de compactação e vácuo, utilizando partículas de quartzo aglutinadas por resina poliéster;
- Borsellino et al. (2009), por sua vez, não aplicou vácuo, e utilizou partículas de mármore e resina epoxídica;

- Caesarstone (2015) produz rochas artificiais tendo como elemento principal o mineral quartzo;
- Alicante (2015) fabrica esses produtos com carga de mármore que é descartado em lavras de rochas ornamentais;
- Ribeiro (2014) confeccionou mármore artificial compacto com resíduos de mármore, resina poliéster e um solvente, no entanto este último diminuiu a força das ligações químicas no produto final;
- Ribeiro *et al.* (2015) aglutinou os resíduos de mármore calcítico com resina polimérica do tipo poliéster utilizando Vibro-compressão a vácuo;
- Carvalho *et al.* (2015) confeccionou uma rocha artificial a partir de 80% de partículas geradas no precipitador eletrostático de uma usina siderúrgica e 20% do sistema epoxídico DGEBA/TETA.
- Silva (2016) utilizou resíduos de mármore calcítico e resina epóxi;
- RMC Tradicional, RMC Polaris e Compac Marble (2015) fabricam mármore artificiais comerciais com proporções de carbonato de cálcio a 95% m/m e resina poliéster a 5% m/m.

Os dados coletados serão utilizados na comparação com o mármore artificial compacto desenvolvido na dissertação, a fim de constatar se as propriedades físicas e mecânicas são condizentes com as encontradas até o momento.

2.2 Mármore Artificiais Moldados com Uso de Vácuo

Uma das primeiras técnicas de produção de materiais compósitos ou compostos e, conseqüentemente, de rochas artificiais a surgir, a Moldagem por Transferência de Resina (RTM) foi melhor desenvolvida nos anos 80. O processo era aplicado em diversos setores industriais, incluindo a indústria aeronáutica em menor escala. (Potter, 1999).

A RTM atualmente se destaca por ser capaz de proporcionar nas peças produzidas uma estrutura resistente, com geometria complexa e elevado acabamento superficial. Desta forma, as peças produzidas podem ser empregadas

na fuselagem em interiores de aviões, diminuindo o arrasto aerodinâmico, além de carenagens e automóveis, já que essas aplicações exigem geometria e acabamento de superfície de alta qualidade (Rocha *et al.*, 2008).

A moldagem de materiais através de RTM é uma opção tecnológica de baixo custo e permite produzi-los em larga escala. Com o uso deste processo é possível obter compósitos ou materiais compostos mais complexos que em métodos tradicionais e com elevada qualidade, controlando com excelência as propriedades mecânicas desejadas e reduzindo o tempo de fabricação em relação aos processos semelhantes. (Hillermeier e Seferis, 2001; Luo *et al.*, 2001).

Explicando melhor o método da RTM, figura 3(a), primeiramente é adicionada uma carga previamente seca, seja ela fibrosa ou particulada, no interior do molde. A carga seca é impregnada através de orifícios pré-determinados no molde, em um sentido que varia de acordo com a conformação final do produto desejado. Após o seu fechamento, injeta-se uma resina líquida anteriormente catalisada, que aglutinará a carga. O compósito só é retirado do molde quando ocorrem corretamente as seguintes etapas, em ordem: preenchimento completo do molde, superfície da carga totalmente molhada e processo de cura finalizado. (Lawrence *et al.*, 2002; Hamidi *et al.*, 2005; Hsiao *et al.*, 2006).

Semelhante a RTM, tem-se a moldagem a vácuo, que é derivada do primeiro processo, conforme Fig. 3(b). Também denominada de VARTM (“vacuum assisted” RTM), a sua principal diferença em relação ao processo original consiste de como a resina é adicionada ao processo. Enquanto na RTM é por pressão, na moldagem a vácuo ela é sugada de fora pra dentro do molde cuja vedação é feita por borracha e aplicação de vácuo periférico. O vácuo é gerado por uma bomba acoplada na saída do molde, retirando o ar interno e permitindo a entrada da resina. Ambos os processos são proporcionados pelo aumento do gradiente de pressão (Amorim Jr. 2007; Fibercenter, 2015).

Durante a produção de compósitos ou rochas artificiais, o vácuo desempenha um dos principais papéis quanto à qualidade do produto final, pois ele auxilia na remoção do ar contido na mistura pré-moldada durante a moldagem, o que acarreta na redução da porosidade. Diminui, também, a incidência de defeitos resultantes de

um preenchimento inadequado do molde, pois melhora o fluxo de entrada da resina (Ribeiro, 2011).

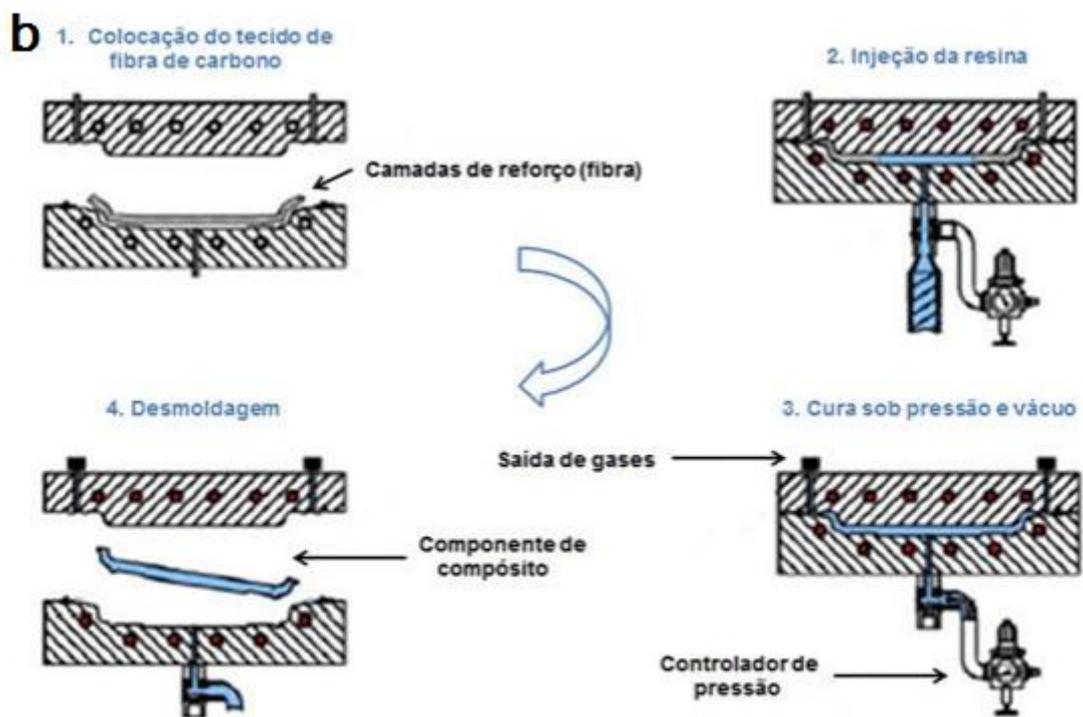
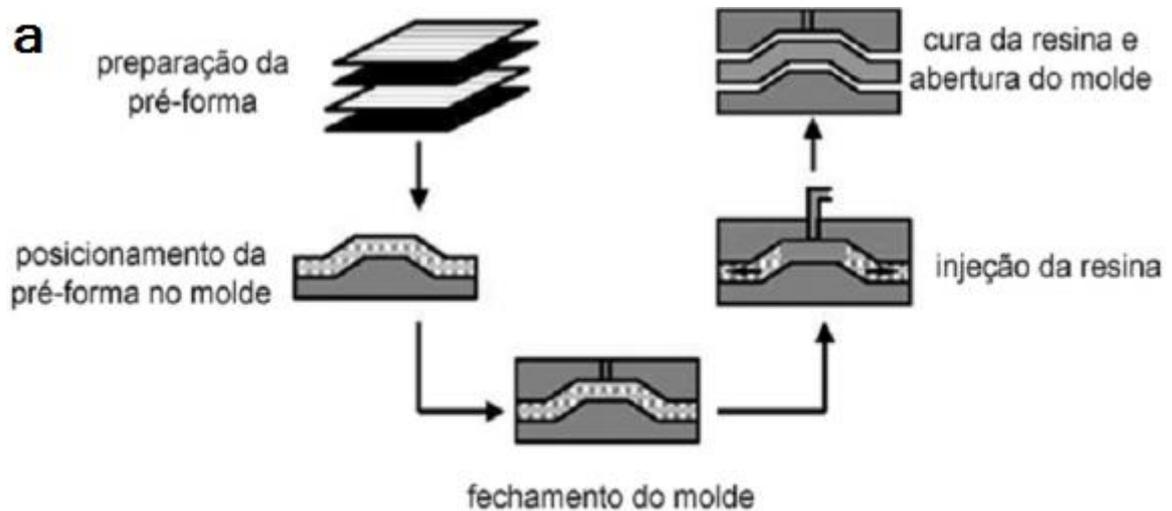


Figura 3 – Comparação entre Esquemas de Processamento por RTM (a) e VARTM (b) (3a: Alves, 2006; 3b: adaptado de Deléglise *et al.*, 2011).

Ambos os processos descritos anteriormente, RTM e seu derivado VARTM, foram e são utilizados para fabricação de rochas artificiais compactas, mas atualmente o que é tido pela indústria como melhor método para este fim é o

chamado Vibro compressão a vácuo, detalhado na Figura 4. Ele consiste, basicamente, em dispersar cargas minerais em resina polimérica, seguido pela compactação da mistura ao mesmo tempo em que são aplicados o vácuo e a vibração. A seguir, objetivando o entrecruzamento total das cadeias do polímero, processo denominado de cura, os materiais resultantes são tratados a temperaturas que variam entre 70 e 110°C. (Ribeiro, 2015).

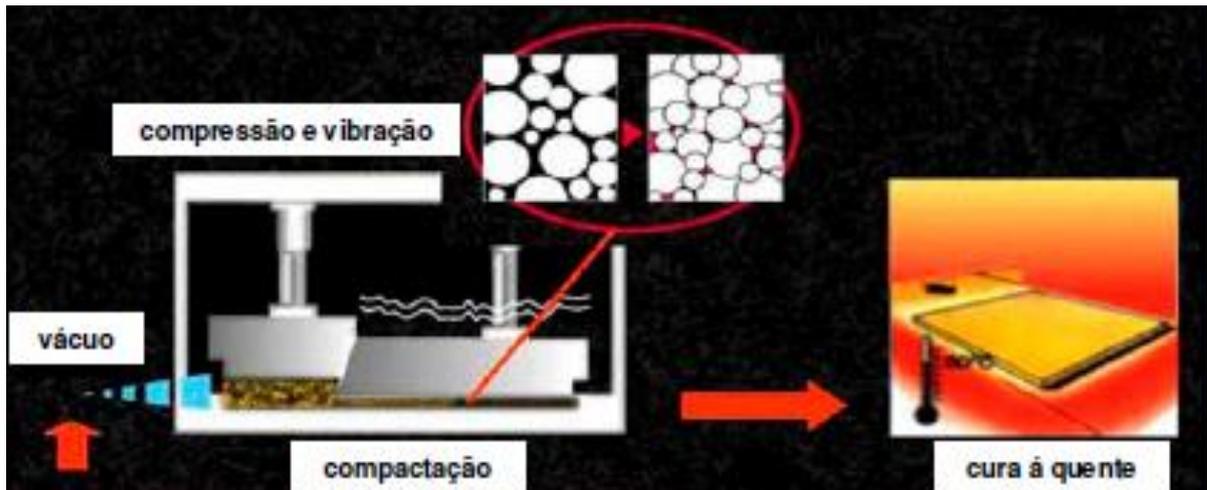


Figura 4 – Etapas do Processo de Vibro-Compressão à Vácuo (Caesarstone *apud* Ribeiro, 2011).

Mesmo sem muito referencial teórico, alguns pesquisadores divulgaram trabalhos envolvendo vibro-compressão a vácuo no desenvolvimento de rochas artificiais.

O trabalho de maior destaque na área é de Lee *et al.* (2008), que desenvolveu placas de rocha artificial através de vibro-compressão a Vácuo com os mesmos procedimentos adotados pela indústria. Uma de suas conclusões é a de que à medida que se estabilizam as taxas de compactação e vibração, a aplicação de menores pressões de vácuo elevava a densidade do material. Isso propiciava a redução da absorção de água e melhora na resistência à flexão e compressão. Os resultados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices Físicos e Propriedades Mecânicas Resultantes da Variação das Taxas de Vácuo

Vácuo (mmHg)	50	100	150	200
Densidade	2,444	2,303	2,248	2,048
Absorção de água (%)	0,011	0,125	0,202	0,211
Resistência à flexão (MPa)	52,1	47,9	40,7	32,0
Resistência à compressão (MPa)	151,3	106,0	94,6	78,7

Fonte: Lee *et al.*, 2008.

2.3 Produção de Mármore Artificiais com Utilização de Resíduo de Mármore Dolomítico e de Resina Epoxídica

2.3.1 Mármore Dolomítico

O calcário é uma rocha de natureza sedimentar e tem em sua constituição uma proporção mais elevada do mineral calcita (CaCO_3). O dolomito, apesar de também ser uma rocha sedimentar, é constituído predominantemente pela dolomita ($\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$). O calcário e o dolomito estão entre as rochas com maiores possibilidades de utilização na indústria, dentre os principais usos destacam-se: cimento, material para agregados e rochas ornamentais. Seus derivados industriais agregam características que permitem o uso como fundente, fluxantes, carga, refratários, abrasivos, corretivo de solos e várias outras aplicações (Luz e Lins, 2005).

O calcário calcítico assume o primeiro lugar em ocorrência mineral, em segundo lugar estão o dolomito e o mármore. Essas rochas são as mais comercializadas em nível mundial (Luz e Lins, 2005).

De acordo com a NBR 6502 (1995), mármore é uma rocha metamórfica, ou seja, sua natureza é concebida pelo metamorfismo de outras rochas sedimentares compostas em sua maior parte por carbonato de cálcio (calcário) ou de magnésio (dolomito). Neste processo geológico, a rocha matriz carbonática presente em áreas de formação vulcânica é submetida a altas taxas de temperatura e pressão. (Machado *et al.*, 2015).

O mármore é composto predominantemente por calcita e dolomita em variadas proporções, ou seja, a maior proporção de um deles determina a sua designação, mármore dolomítico ou mármore calcítico. Esses minerais determinam propriedades físicas como a cor e a dureza da rocha. A calcita (CaCO_3 : CaO 56% e 44% CO_2), dureza 3, pode assumir diversas colorações de aspecto opaco, como a branca, em tons azuis, verdes, vermelhos e amarelados. Já a dolomita ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$: CaO 30,4%, MgO 21,7% e CO_2 47,7%) , dureza 3,5 – 4, colabora com o aspecto cristalino e se apresenta em cor rósea ou incolor, branco, tons verdes, pretos e cinzas. Minerais acessórios também fazem parte da constituição dos mármore e alteram propriedades como a porosidade, cor, dureza e brilho, mas com menor influência. Os mais comuns de serem encontrados são os quartzos, anfibólios, diopsídeos, pirritas, dentre outros (Machado *et al.*, 2015).

Comercialmente, todas as rochas carbonáticas, sejam elas de origem sedimentar ou metamórfica, que sofrem processos de polimento, são englobadas no termo “Mármore” pela maioria das empresas do setor de rochas ornamentais (Frasca, 2014).

O Dolomita mármore tem algumas propriedades físicas quantificadas na ASTM C 503 “*Standard specification for marble dimension Stone*” (1999), conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores Estabelecidos para Propriedades Físicas e Mecânicas dos Mármore Dolomíticos Naturais

Valores Estabelecidos pela ASTM C 503			
Densidade (Kg/m ³)	Absorção de Água (%)	Compressão Uniaxial (Mpa)	Flexão 3 e 4 Pontos (Mpa)
>2.800	≤ 0,2	≥ 52	≥ 7

Fonte:ASTM, 1999

Neste trabalho, será utilizado resíduo de rocha classificada como Calcita-dolomita Mármore para a produção de mármore artificial. Esta classificação foi determinada através de análise petrográfica e química realizada pela empresa fornecedora. Esse material rochoso possui aproximadamente 70% de dolomita, 25%

de calcita e menos de 5% de minerais acessórios como a flogopita, apatita, tremolita e filossilicatos secundários. Como visto, ele é composto em sua maior parte por dolomita, ou seja, um mármore dolomítico.

2.3.2 Resina Epóxi

A definição de resina epóxi é utilizada tanto para os oligômeros de baixo peso molecular que têm em sua constituição um ou mais grupos epóxi em cada molécula, quanto para o composto de resina curada/endurecedor. São classificadas como polímeros termorrígidos ou termofixos depois de curadas, com elevado desempenho mecânico. Seus grupos epóxi terminais possuem formato de anel triangular com ligações bastante tensionadas entre os dois átomos de carbono e um de oxigênio, também nomeados como grupos etoxilina ou oxirano, conforme a Figura 5 (Mallick, 2007; Levy Neto e Pardini, 2006).

Como os ângulos de ligação no anel triangular são bem menores que os ângulos das ligações entre C-C e C-O, gera-se uma tensão maior de ligamento e conseqüentemente as moléculas se tornam muito reativas, especialmente quando existem disponíveis os doadores de prótons. Desta forma, estes polímeros são mais fácil e rapidamente curados (Harper, 2006).

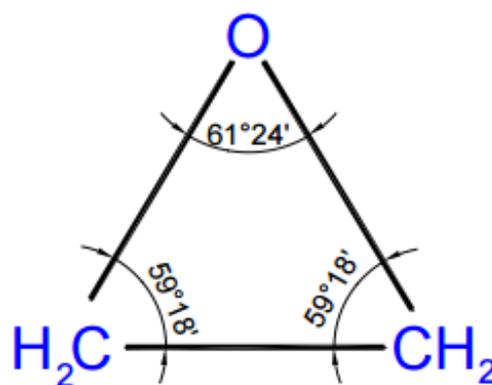


Figura 5 – Representação Esquemática do Anel ou Grupo Epoxídico (Gonçalves, 2015)

A classificação de uma resina epóxi pode ser feita através do seu peso equivalente em epóxi (EEW = equivalent epoxy weight). O EEW é utilizado para

cálculo estequiométrico de proporção entre resina e endurecedor e se obtém através da divisão do peso molecular da resina pelo número de anéis epoxídicos. O valor obtido define se são líquidas (≤ 229), semi-sólidas (230 s 459) ou sólidas (≥ 460). O valor máximo pode chegar em 5000 (Silva, 2009).

Dentre as possíveis aplicações da resina epóxi destacam-se a sua utilização como adesivos, aglutinantes, recobrimentos de proteção, em equipamentos para indústria química, compósitos estruturais, encapsulados eletrônicos, laminados elétricos, dentre outros (Levy Neto e Pardini, 2006).

Quando atua como aglutinante ou matriz em compósitos com cargas, a resina epóxi apresenta muitas vantagens:

- Alta adesão a diferentes tipos de cargas, por se constituída predominantemente de moléculas polares;
- Diminui a formação de bolhas, pois não gera produtos voláteis durante a reação de cura;
- Baixa contração quando comparada a outros tipos de resina, o que previne as tensões residuais, logo aumenta a precisão nas dimensões finais das peças fabricadas;
- Possui excelente resistência às intempéries, mesmo quando aplicada em ambientes que estão expostos a produtos quimicamente agressivos, característica conferida pela sua estrutura reticulada;
- A moldagem de peças é facilitada devido à baixa viscosidade, boa compressão e elevado módulo de elasticidade (Jesus, 2005).

Como principal desvantagem, dependendo da aplicação, a resina epóxi pode apresentar baixa resistência à fratura (Tanaka, 2002).

As vantagens citadas acima situam a resina epóxi como um excelente polímero termorrígido para ser utilizado como aglutinante na produção de mármore artificial. As propriedades mecânicas podem ser acentuadas, propiciando uma boa adesão às partículas obtidas do resíduo fino de mármore proveniente do beneficiamento em equipamentos diamantados. O resultado final esperado é a obtenção de peças bem moldadas, com baixa contração e alta resistência em variadas aplicações, mesmo em ambientes agressivos e expostos às intempéries.

São comercializados atualmente quatro tipos principais de resinas epóxi: Resinas à base de Bifenol A, à base de Bisfenol F, Bromadas e Flexíveis. Sendo a primeira a mais utilizada e por isso a adotada nesta pesquisa no sistema DGEBA/TEPA, cuja resina e a amina serão melhor explanadas a seguir.

A resina epoxídica diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) é obtida através da reação de epicloridrina com bisfenol-A e a adição de um catalisador básico. A figura 6 mostra a estrutura química da DGEBA, onde n refere-se ao número de unidades de repetição do oligômero. As propriedades da resina DGEBA dependem do valor de n, em que moléculas de baixo peso molecular, ou seja, menores valores de n conferem o estado líquido às resinas, enquanto as moléculas de peso molecular mais alto, com maiores valores de n tendem a ser de resinas líquidas mais viscosas ou sólidas (Silva, 2009).

Cerca de 90% de toda resina epóxi comercializada é obtida da reação do bisfenol A (2,2-bis-4-hidroxifenil propano) com epicloridrina (1-cloro-2,3-epóxi propano), no entanto é possível formular várias outras (Petrie, 2006).

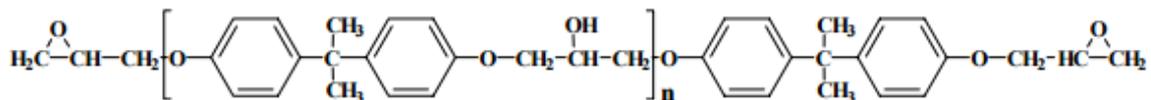


Figura 6 – Estrutura Química da DGEBA
(Almeida, 2005)

As principais características dessas resinas são a resistência e rigidez – reflexos do bisfenol A –, a resistência química derivada de suas ligações e a propriedade adesiva e de reatividade com vários agentes de cura atreladas aos grupos hidroxil e epoxídico. (Ozturk *et al.*, 2001).

Estas características tornam a DGEBA líquida muito utilizada para diversos fins, pois exprimem sua versatilidade. Além disso, possuem baixo custo quando comparadas aos outros tipos. Na tabela 4 estão contidas as propriedades típicas da resina.

Tabela 4 – Propriedades Típicas da Resina DGEBA

Propriedades Típicas da Resina DGEBA	
Peso Equivalente em Epóxi (EEW)	182-192g.eq
Viscosidade à 25°C (cPs)	11000-14000
Conteúdo de Água (ppm) Máx.	700
Densidade g/ml	1,05-1,15

Fonte: Silva, 2009

A cura da resina epóxi, incluindo a do tipo DGEBA, a transforma em um material termorrígido. Este processo ocorre quando se formam ligações cruzadas em seus anéis epóxi, pois eles podem se unir a uma grande variedade de substratos chamados agentes de cura, transformando-se em uma rede tridimensional. (González, 2006).

A formação do entrecruzamento das ligações ocorre na resina DEGEBA, devido à alta reatividade de suas extremidades que contém os grupos epoxídicos. Estes grupos podem ser abertos na presença de aminas, fenóis, álcool e ácidos que contenham hidrogênios ativos. Este processo dá origem a grupos do tipo hidroxila que catalisam a reação sem consumir os grupos epoxídicos (Costa *et al.*, 1999; Rezende *et al.*, 2011).

O processo de cura consiste em dois fenômenos macroscópicos principais. O primeiro é a geleificação que está ligada a repentina variação da viscosidade, em que há uma transição de líquido para gel durante um tempo específico determinado de ponto de gel. Posteriormente, existe a possibilidade de ocorrer a densificação macromolecular, devido ao maior aumento do entrecruzamento que altera o estado de gel para vítreo, formando um material que é ao mesmo tempo infusível e insolúvel. Esta etapa é denominada vitrificação (González, 2006; Westrupp, 2008).

Dependendo da aplicação e das solicitações que irão advir dela, principalmente para que tenha alta durabilidade, torna-se essencial controlar os seguintes parâmetros no preparo da mistura bicomponente resina/endurecedor: a utilização da relação estequiométrica exata, de um programa de cura adequado que assegure sua conversão máxima e de um tempo de manipulação específico. (González *et al.*, 2003).

A reação de cura acontece em duas condições de temperatura: à

temperatura ambiente e também em altas temperaturas. Isso dependerá do tipo de resina e agentes de cura utilizados ou das propriedades que se busca obter no produto final (Almeida, 2005).

A formação de um sistema curado necessita de um baixo grau de rearranjo molecular, proporcionando ao fim do processo pequenas taxas de contração, estimada em cerca de 2 % em média (Tanaka, 2002).

Os agentes de cura mais utilizados são as poliaminas alifáticas, tais como a Dietilenotriamina (DETA), Trietilenotetramina (TETA) e Tetraetilenopentamina (TEPA), cujas estruturas químicas podem ser observadas na figura 07. Suas principais vantagens são o menor custo, o alto grau de reatividade que diminui o tempo de cura à temperatura ambiente, baixa viscosidade e miscibilidade acelerada. Essas características refletem em boas propriedades à resina já curada, como a excelente resistência química e física, principalmente a viscoelasticidade, devido ao maior grau de entrecruzamento. A rede tridimensional, formada ao se completar a reação de cura, confere excelentes características termomecânicas e elevada adesividade. No entanto, suas desvantagens incluem o pequeno tempo de manuseio antes da ocorrência da cura, reação exotérmica elevada e grau de toxicidade considerável (Gersifi *et al.*, 2003; Dow Chemical, 2006; González, 2006).

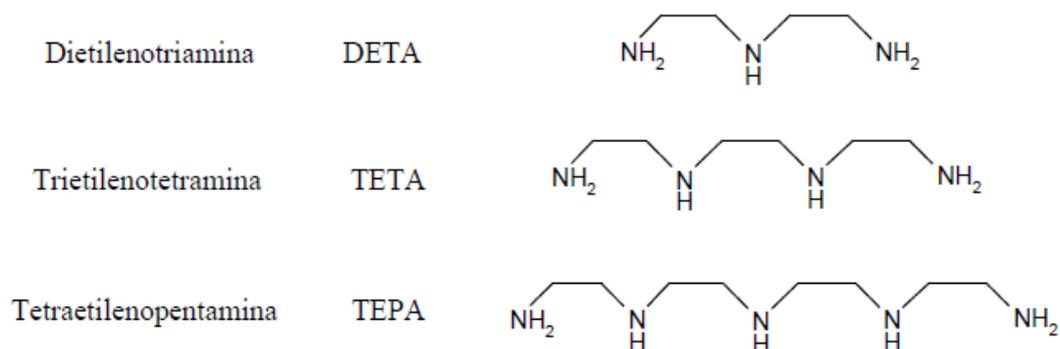


Figura 7 – Estrutura Química das Poliaminas Alifáticas DETA, TETA e TEPA (González *et al.*, 2010).

O sistema DGEBA/amina alifática é adotado para usos diversos devido ao melhor controle de tempo adequado ao processamento, permitindo a sua correta aplicação (Brahmadeo e Eisenbraun, 1994).

A Tetraetilenopentamina (TEPA) apresenta três aminas primárias e duas aminas secundárias em sua estrutura química (Pittman et al., 1997). Quando usada como agente de cura, sua reatividade é elevada, devido seu grau de funcionalidade 7.

Utilizada como agente de cura, a TEPA possui a capacidade de melhorar a performance do material, pois forma uma estrutura tridimensional na resina epóxi, que lhe confere propriedades termomecânicas de alto desempenho (Pittman et al., 1997).

Amaral (2014), através de ensaios mecânicos, determinou os valores para tensão máxima de ruptura e módulo de elasticidade para os sistemas epoxídicos DGEBA/TEPA e DGEBA/TETA. No primeiro obteve valores de $100,79 \pm 0,10$ MPa para a tensão máxima de ruptura e $2,26 \pm 0,13$ GPa para o módulo de elasticidade. Já o segundo apresentou de $101,61 \pm 0,14$ de tensão e $2,23 \pm 0,08$ GPa no módulo de elasticidade. Tais resultados permitiram a conclusão de que as propriedades dos sistemas avaliados foram superiores à resina poliéster, devido a maior massa molar entre pontos de entrecruzamento e a menor densidade de ligações cruzadas.

O sistema epoxídico DGEBA/TEPAc será adotado para a confecção dos mármores artificiais deste estudo. A TEPAc é um endurecedor comercial composto predominantemente de TEPA (60%) e em menor porcentagem de TETA (40%), com algumas das impurezas. Como se trata de uma mistura das duas aminas se prevê um desempenho intermediário entre os valores encontrados por Amaral (2014), que foram averiguados pela caracterização do sistema, talvez um pouco inferior devido às impurezas, mas que pode ser compensado pelo maior custo-benefício.

O uso do sistema acima pode proporcionar excelentes propriedades como resistência química, dureza, pequena porcentagem de contração, boa adesão carga/aglutinante e reduzidos custos de produção da rocha artificial.

2.4 Processo Produtivo e Geração de Resíduos na Indústria de Rochas Ornamentais

O processo produtivo das rochas ornamentais, em síntese, compreende as etapas que se iniciam com a exploração das jazidas, seguido pelo beneficiamento – serragem, polimento, corte e acabamento em peças finais – até o armazenamento e transporte. Em cada uma dessas etapas há causas e impactos a água, ar e/ou solo, ou seja, ao meio ambiente (Calmon e Silva, 2006).

Para entender melhor esse processo e os prejuízos ambientais que podem advir dele serão descritos os subsistemas que compõem essa cadeia produtiva. Sendo ela basicamente a mesma para todos os tipos de rochas ornamentais, o enfoque algumas vezes será dado ao mármore e ao seu beneficiamento primário em teares de lâminas diamantadas, pois os resíduos utilizados nesta dissertação são provenientes desta etapa de seu processo produtivo.

A primeira etapa é a extração da rocha em blocos na jazida, em matacões ou maciços rochosos, que ocorre por diferentes técnicas: corte com fio helicoidal, corte a fio diamantado (Figura 8), corte contínuo com perfuratrizes, jet flame, water jet, argamassa expansiva, dentre outros. Durante a extração os principais resíduos são os pedaços de rocha que não foram aproveitados ou de rochas fissuradas durante a aplicação das técnicas de extração nas jazidas (Gonçalves, 2000).



Figura 8 – Lavra de Marmo-Ônix Blue em Gironda, Corte por Fio Diamantado.

Após a extração, os blocos são transportados até as beneficiadoras que tem,

basicamente, duas linhas de produção, a linha de beneficiamento primária que consiste na serragem/desdobramento dos blocos de distintos tamanhos em chapas com variadas espessuras (1-5 cm) e a linha secundária de polimento da superfície, corte e acabamento (Villaschi Filho, 2000).

Na linha primária o desdobramento pode ser realizado em sua grande maioria por máquinas denominadas teares. Existem teares convencionais de lâminas metálicas de tecnologia mais antiga, no entanto, ainda muito utilizados e teares de fios diamantados, também denominados multifios, ou de lâminas diamantadas que são mais avançados. Existe ainda uma versão mais simples do tear multifios, que possui somente um fio, denominado monofio cujo objetivo é retirar as bordas dos blocos, melhorando o esquadrejamento antes de adentrarem nos teares convencionais e também na produção de espessores.

Os teares convencionais de lâminas metálicas (Figura 9a) são mais robustos e possuem um quadro porta-lâminas de movimento pendular. Como o nome já indica, as lâminas de aço são dispostas sobre esse quadro no sentido longitudinal do equipamento com paralelismo e afastamento adequado entre elas. As lâminas são fabricadas em aço carbono com elevada dureza e resistência mecânica, afinal precisam suportar os esforços de abrasão e tração do processo (Calmon e Silva, 2006).

Um sistema de alimentação dosa os componentes que formarão uma mistura abrasiva no circuito hidráulico fechado, adicionando água, granalha (elemento cortante – mini esferas de aço ou ferro fundido) e cal. Essa mistura em conjunto com os fragmentos das rochas serradas forma uma polpa abrasiva de rocha que é bombeada de um poço abaixo do tear e lançada por aspersão constante de chuveiros sobre o bloco, figura 9(b). Os objetivos são lubrificar, esfriar e evitar a oxidação das lâminas, além de promover a limpeza dos sulcos de corte entre as chapas e promover o desgaste e conseqüente desdobramento da rocha. O circuito também é responsável por adicionar uma quantidade de água, cal e granalha em um determinado tempo para manter as propriedades como a viscosidade e densidade da lama e também retira do processo a parcela de polpa com granalha mais fina e alta densidade pelo acúmulo de muito pó de rocha, mantendo somente a granalha útil, com granulometria ideal. O movimento pendular do tear é acionado por motor

elétrico e transmitido para as lâminas que conduzem a lama abrasiva, promovendo o corte através do atrito e pelo impacto das lâminas contra o bloco, obtendo-se as chapas padronizadas (Calmon *et al.*, 1997; Gonçalves, 2000; Calmon e Silva, 2006).



Figura 9 – Tear Convencional de Lâminas de Aço (a); Detalhe do Sistema de Aspersão de Água (b).
(Souza, 2014)

O tear de lâminas diamantadas (Figura 10) é quase que exclusivamente utilizado no corte de rochas carbonáticas (mármore *lato sensu*), utilizando para isso o poder abrasivo de segmentos ou pastilhas com diamantes incrustados na parte inferior de lâminas de aço. O quadro porta-lâminas, neste caso, possui movimento de vaivém e de descida sobre o bloco, podendo ser de subida do carro porta-bloco nos teares mais modernos. Durante o processo, o bloco e o conjunto de lâminas são constantemente banhados por água industrial que atua com refrigerante das lâminas e promove a limpeza e eliminação do material desagregado durante o corte. Os teares de lâminas diamantadas possuem alta velocidade de cala, 15 a 25 cm/hora para mármore e por isso aumentam a produtividade, além de melhorar a qualidade da superfície das chapas desdobradas quando comparadas às serradas em teares convencionais. O processo produtivo dos teares de lâminas diamantadas é bem semelhante ao dos teares convencionais, mudando somente o tensionamento das lâminas que é na sua totalidade realizado por dispositivos hidráulicos, assegurando que o corte seja retilíneo e o controle de insumos que é mais simples, afinal não existe a lama abrasiva, nem o controle de seus parâmetros, sendo a própria lâmina que efetua o corte pela maior dureza dos diamantes sintéticos em relação ao

mármore. Os únicos parâmetros a serem controlados são o nível da água, a amperagem dos motores, a velocidade de descida da cala e o paralelismo entre as chapas. (Silveira *et al.*, 2014).



Figura 10 – Tear de Lâminas Diamantadas.
(Silveira *et al.*, 2014)

Os teares multifios, também chamados de teares de fios diamantados, são semelhantes aos teares de lâminas diamantadas, diferindo-se por serem utilizados não somente para mármore, mas para todos os tipos de rochas e por utilizarem fios com pérolas diamantadas, que têm sua ação de corte dada pela abrasividade dos diamantes sintéticos incrustados nas pérolas. Além disso, o sistema de tensionamento e movimentação horizontal e vertical dos fios é feito por um sistema de polias pneumático. (Silveira *et al.*, 2014).

Uma das principais características dos teares multifios é a sua alta produtividade, afinal a do tear multilâmina equivale a somente 16% da produtividade do tear multifios. A fundação é composta por uma estrutura de base para a disposição do bloco a ser serrado, colunas laterais que apoiam o sistema de tensionamento e movimentação já citado e chuveiros que aspergem água, resfriando o processo e diminuindo a suspensão de pó (Prezotti *apud* Calmon e Silva, 2006). Geralmente, as chapas que são obtidas saem praticamente levigadas e

proporcionaram na etapa de polimento uma economia de até 30% (Inforochas, 2012).

Há uma versão do tear de fios denominada monofio (Figura 11), com somente um fio diamantado. É um equipamento utilizado para esquadrear blocos, retificando suas laterais e para fabricação de peças especiais como os espessores (Silveira *et al.*, 2014).



Figura 11 – Monofio para Esquadreamento de Blocos.
(Silveira *et al.*, 2014).

Atualmente em funcionamento no Brasil há um total 320 teares multifios diamantados dos quais 100 são de fabricação nacional (Abirochas, 2016).

O resíduo, comumente chamado de lama, gerado durante a serragem, é resultado da polpa abrasiva mais densa e viscosa com granalha mais fina e inútil, que é retirada do processo pelo sistema de expurgo, no caso do desdobramento em teares convencionais e da polpa composta basicamente de água e pó de rocha, quando o bloco é serrado em teares multifios ou de lâminas diamantadas.

A etapa de beneficiamento final, ou linha de beneficiamento secundário, reúne todas as tecnologias que dão forma, dimensões e especificações finais ao produto, através de processos de acabamento superficial, de corte, acabamento de bordas e colagem para transformação em outros produtos derivados.

No acabamento superficial o objetivo é proporcionar, modificar ou ressaltar características como a coloração, brilho e textura. Apesar de o polimento ser o

processo mais usual, existem vários outros acabamentos superficiais, de acordo com a aplicação, sendo os principais citados a seguir: flameamento, jateamento, apicoamento, escovação e levigamento (Coimbra Filho, 2006).

Ambos os processos, polimento e levigamento, consistem na diminuição da rugosidade. Esta redução ocorre através de rebolos abrasivos que desbastam a superfície rochosa em passagens sucessivas, com granulometria do elemento cortante decrescente até atingir o grau de polimento desejado. A água industrial é utilizada durante o processo para resfriá-lo, diminuindo o desgaste das ferramentas e a dispersão de pó. O levigamento remove a rugosidade mais elevada que é proveniente do beneficiamento primário e deixa a superfície lisa, porém sem brilho, enquanto o polimento remove as menores rugosidades, fechando em grande parte os poros da superfície, obtendo-se uma superfície com alto brilho (Cetemag, 2010).

Entre o processo de levigamento e polimento pode ser realizada a resinagem, aplicando-se uma camada da mistura entre resina e catalisador na chapa previamente aquecida por fornos. A resina utilizada pode ser a epóxi que é a mesma que aglutina o resíduo de mármore na fabricação do mármore artificial deste estudo. A resinagem melhora a resistência química da rocha quando exposta às intempéries e ressalta o brilho e a cor, pois preenche a porosidade ainda remanescente. Também existe a telagem que é aplicada em rochas muito fraturadas e com baixa resistência mecânica, através da fixação com resina de uma tela de fibra de vidro no tardós da chapa. Atualmente são três os tipos de equipamentos, denominados politrizes, disponíveis para o polimento de rochas: manuais de bancada fixa, de ponte móvel com bancada fixa e multicabeças de esteira transportadora (Coimbra Filho, 2006; Silveira *et al.*, 2014).

O corte das chapas polidas pode ser realizado através de cortadeiras que vão de modelos manuais até os totalmente automatizados, mas o que eles têm em comum é utilizar como ferramenta de corte discos de aço com segmentos sinterizados com diamantes sintéticos em sua borda, os chamados discos diamantados. Durante o processo de corte dois tipos de movimentos são combinados, o de rotação dos discos e o de translação do dispositivo de fixação dos mesmos, o mandril. Várias passadas de disco se sucedem à medida que o mandril desce, consecutivamente ocorre o corte das chapas (Ribeiro, 2005). O corte é feito

em diferentes formas, tamanhos e desenhos de acordo com as peças que serão produzidas, podendo resultar em ladrilhos, pias, mesas, lavabos, dentre outros. Como os demais processos produtivos de rochas ornamentais utiliza água como refrigerante, o que produz lama como resíduo.

Após o corte das peças nos formatos e dimensões desejadas, as bordas que estarão aparentes são polidas através do processo denominado acabamento de bordas. Eles são realizados em maquinário e/ou manualmente usando-se lixadeiras manuais, com diferentes graus de brilho e formas, a depender da aplicação. As lixadeiras utilizam como insumo lixas em formato de disco, que são fabricadas em ligas resinoides e diamantes sintéticos. Existem, também, linhas inteiras e totalmente automatizadas que realizam o acabamento de bordas de vários tipos: reto, chanfrado, meio boleado, boleado, dentre outros, apenas alterando a forma dos rebolos abrasivos utilizados. (Silveira *et al.*, 2014).

Os produtos acabados são transportados e revendidos no comércio, encerrando a cadeia produtiva das rochas ornamentais, no entanto os resíduos ainda viram ativos no meio ambiente e trazem malefícios ao mesmo.

O resíduo proveniente da indústria de mármore e granitos pode ser subdividido em material grosso e material fino. O resíduo fino é composto da lama formada durante o corte dos blocos, polimento das placas e acabamento das peças. Já o resíduo grosso é formado por fragmentos maiores que a areia fina, contendo placas defeituosas ou quebradas, partes de rochas e/ou minerais (Souza *et al.*, 2009).

Assim como nas demais etapas, também são gerados resíduos durante o acabamento, seja ele superficial, corte ou de bordas, no entanto a quantidade de resíduos é bem inferior (Gonçalves, 2000).

O ideal é que seja realizada uma gestão destes resíduos gerados nas etapas de produção das rochas ornamentais de forma que se minimize os impactos ambientais gerados, procurando aproveitar o máximo possível resíduos finos e grossos, estudando a possibilidade de aplicá-los em outros ramos da indústria. Os resíduos grossos podem ser britados e/ ou moídos e destinados a fabricação de brita, areia artificial, argamassas, tintas e outros. Já os finos, que são os efluentes do beneficiamento, como a lama abrasiva, devem ser tratados para que haja uma

separação sólido-líquido, que pode ser realizada por meio de tanques de decantação (Figura 12a), tanque decantador vertical, cilindro-cônico de chapas metálicas (Figura 12b), seguido de filtro prensa (Figura 13a), filtro de discos, tanques de decantação com meios filtrantes, dentre outros. Estes meios já são utilizados e difundidos nas maiores empresas de rochas ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim (Campos, 2009).

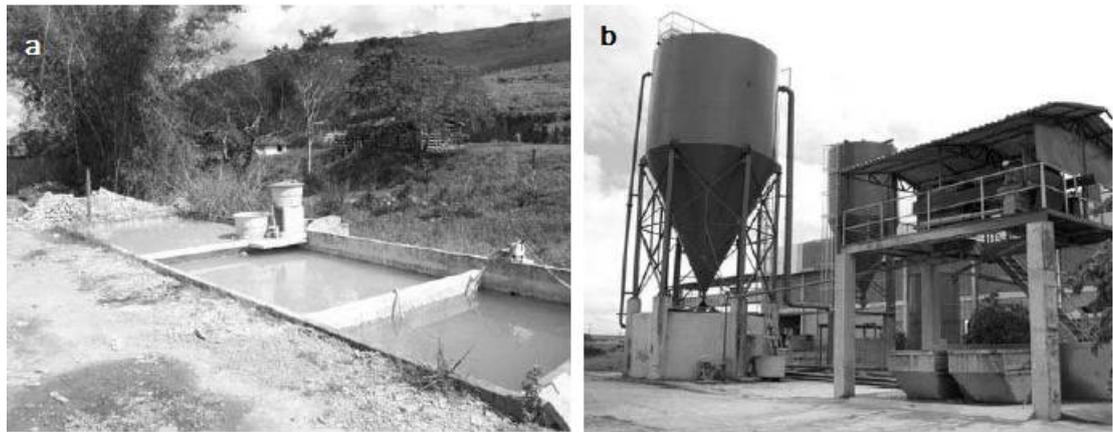


Figura 12 – Tanques de Decantação (a); Tanque Decantador Cilindro-cônico de Chapas Metálicas (b).
(Campos, 2009)

A água recuperada é recirculada e os finos são depositados em leitos de secagem (Figura 13b) construídos dentro de critérios pelas empresas ou encaminhados para os aterros industriais em conformidade com a legislação ambiental. Com o passar dos anos, maiores regiões para a deposição são necessárias, por isso o ideal é que o mínimo de volume desses resíduos seja enviada aos aterros e que a reciclagem e reaproveitamento sejam aplicados (Campos, 2009; Ribeiro, 2013).

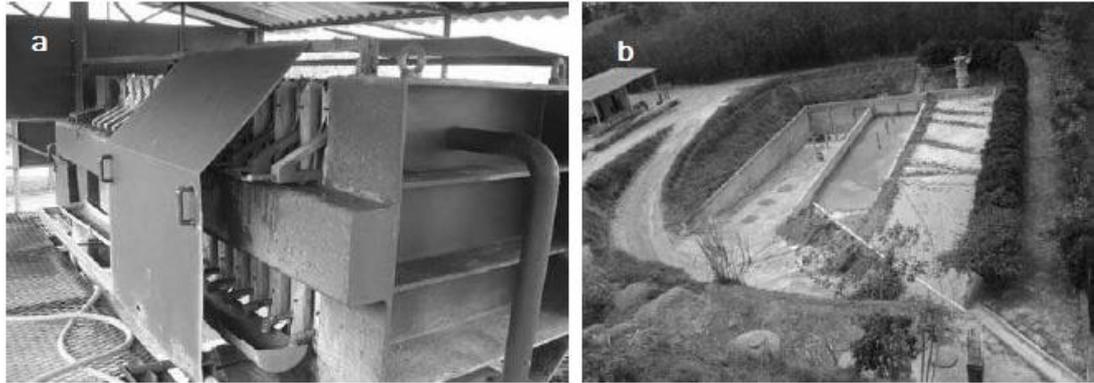


Figura 13 – Filtro Prensa (a); Leito de Secagem (b).
(Campos, 2009)

Em pequenas e médias empresas ainda ocorrem situações em que as leis não são cumpridas e os resíduos são estocados nos pátios das empresas, descartados em leitos de rios ou depositados inadequadamente no solo sem métodos de impermeabilização.

Existem pesquisas sendo desenvolvidos para aplicação dos finos na indústria da cerâmica, fabricação de tijolos, rochagem etc, mas a implementação ainda ocorre em pequena escala se comparada a grande quantidade de resíduos produzidos (Campos, 2009).

Enquanto Çelik e Sabah (2008) estimam que de 30 a 35% do volume do bloco vira resíduo durante as etapas de beneficiamento, a ABIROCHAS (2016) acredita que este número possa chegar a 41%. Uma vez que as rochas artificiais são fabricadas com adições de carga mineral maiores que 80% m/m (Cruz, 2003), se a lama formada durante o desdobramento de blocos em teares de lâminas diamantadas for utilizada na produção deste material sintético, uma boa parte de volume de resíduo que seria descartado será reciclado, agregando valor e minimizando os impactos ambientais.

2.5 Classificação Ambiental do Resíduo de Mármore Dolomítico

São considerados resíduos sólidos aqueles que se encontram nos estados semissólido e sólido, tendo sua origem em variadas atividades como as industriais, hospitalares, domésticas, agrícolas, comerciais, de varrição e de serviços em geral

(NBR 10004/2004).

Os resíduos sólidos são classificados de acordo com a norma NBR 10.004 e são divididos nas seguintes classes:

Resíduos Classe I – perigosos; são considerados perigosos se apresentarem uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade;

Resíduos Classe II A – não-inertes; quando não se enquadram como resíduo classe I – Perigosos ou resíduo de classe II B. Podem possuir propriedades como a combustibilidade, a biodegradabilidade ou a solubilidade em água;

Resíduo Classe II B – inertes; são classificados dessa forma quando após a realização de um teste de solubilização de acordo com a norma NBR 10.006, nenhum de seus constituintes são solubilizados em água e geram concentrações que são mais elevadas que as estabelecidas para a água potável.

Braga *et al.* (2010) caracterizaram três tipos de resíduos de rocha, dependendo da etapa de beneficiamento em que eles foram gerados: casqueiros moídos, lamas de desdobramento de rochas e de polimentos. Após serem analisados, verificou-se que todos eles se enquadravam na Classe II da NBR 10004/2004, e por isso foram considerados como não perigosos. Na segunda etapa da classificação, somente os casqueiros de mármore e o de granito cinza foram determinados como inertes (II-B), enquanto as demais colorações de granitos por possuírem teores de alumínio ou ferro maiores que os limítrofes estabelecidos e por isso foram classificados como não inertes (II-A). Este estudo considerou que o pó de rocha dos casqueiros moídos representava a rocha natural. O pó resultante deste processo foi umedecido, tornando-se uma lama que representa também a lama gerada em teares de lâminas diamantadas ou teares multifios, pois durante o processo de desdobramento do bloco é utilizado como insumo somente água.

Quando o desdobramento do mármore é realizado por teares de lâminas diamantadas ou teares multifios, o resíduo gerado possui praticamente a mesma composição do bloco lavrado, diferentemente de quando é desdobrado em teares convencionais, em que também apresenta óxidos de ferro devido à presença de granalha de ferro que é o elemento cortante da mistura abrasiva (Junca, 2007).

Baseando-se nas constatações descritas o resíduo sólido oriundo dos

casqueiros moídos de mármore quando misturado em maiores proporções ao semissólido proveniente do desdobramento em tear de lâminas diamantadas enquadra-se dentro da Classe II B – inertes e por isso é uma ótima opção para ser aglutinado pelo sistema de resina epóxi DGEBA/TEPAc na produção de mármore artificiais.

Como a resina epóxi tem como característica uma boa resistência química e o resíduo, em sua quase totalidade é classificado como inerte, esta associação gerará um mármore artificial que não prejudicará o meio ambiente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos e as diversas etapas relacionadas à produção de um mármore artificial a partir do resíduo de mármore dolomítico natural (matéria-prima). Também são apresentados os métodos de caracterização das amostras. A Figura 14 apresenta o fluxograma experimental desenvolvido na presente dissertação:

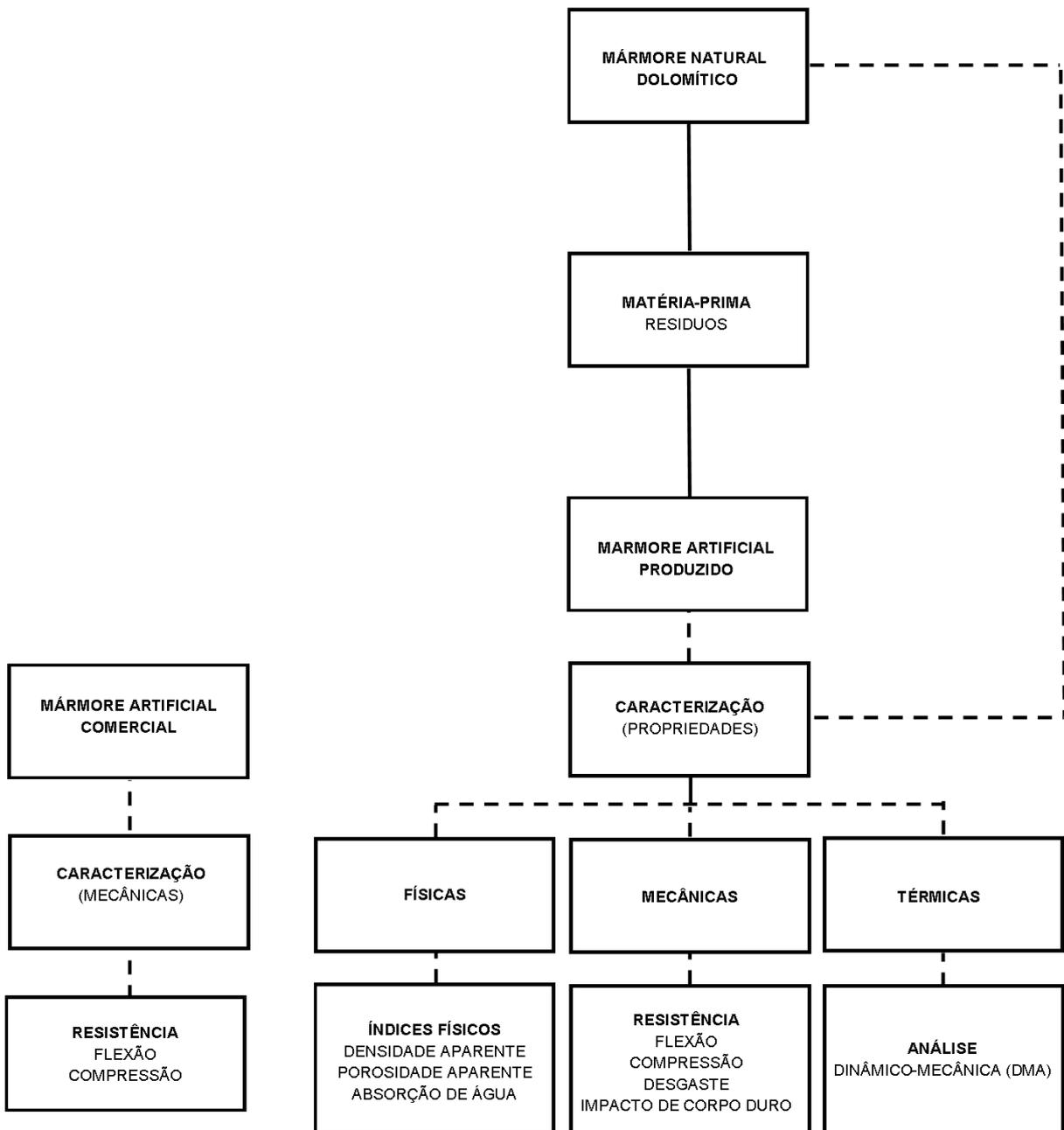


Figura 14 – Fluxograma Estrutural de Pesquisa

3.1 Materiais

a) Resíduo de Mármore Dolomítico

Foram utilizados nesta pesquisa dois tipos de resíduos originados no desdobramento de mármore dolomítico natural, comercialmente denominado de “Marmo-Onyx Blue”, originário da empresa Santa Clara, localizada no distrito de Girona em Cachoeiro de Itapemirim, ES, Brasil. O primeiro resíduo é o semissólido e corresponde ao material coletado diretamente na empresa, no sistema de aspersão de lama abrasiva, denominado chuveiro, do tear de lâminas diamantadas do setor de beneficiamento. Após a coleta, este resíduo foi submetido à estufa, para retirada da umidade. O segundo resíduo é o sólido e corresponde aos casqueiros eliminados durante o desdobramento do mármore no mesmo tear, eles foram britados em um britador de mandíbulas, moídos em um moinho de discos de porcelana e peneirados a seco em um peneirador vibratório de bancadas em duas faixas granulométricas, grossa e média. A lama já seca também foi peneirada e separada na faixa granulométrica fina.

Esta distribuição do tamanho de partículas foi realizada pelo método de peneiramento fino, de acordo com a norma técnica ABNT NBR 7181 (ABNT, 1984a), utilizando peneiras entre 10 e 200 mesh, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Faixas Granulométricas Utilizadas

Tipo	Faixa Granulométrica (mm)
Grosso (Casqueiros britados e moídos)	2,000 – 0,425
Médio (Casqueiros britados e moídos)	0,425 – 0,075
Fino (Lama do tear lâminas diamantadas)	< 0,075

A figura 15 ilustra a chapa do material comercial do qual o resíduo é gerado (a) o resíduo semissólido, denominado lama abrasiva, no estado natural (b) e todos os resíduos, semissólido já seco e peneirado na faixa granulométrica fina, além dos moídos a partir dos casqueiros e peneirados nas faixas granulométricas média e grossa (c).

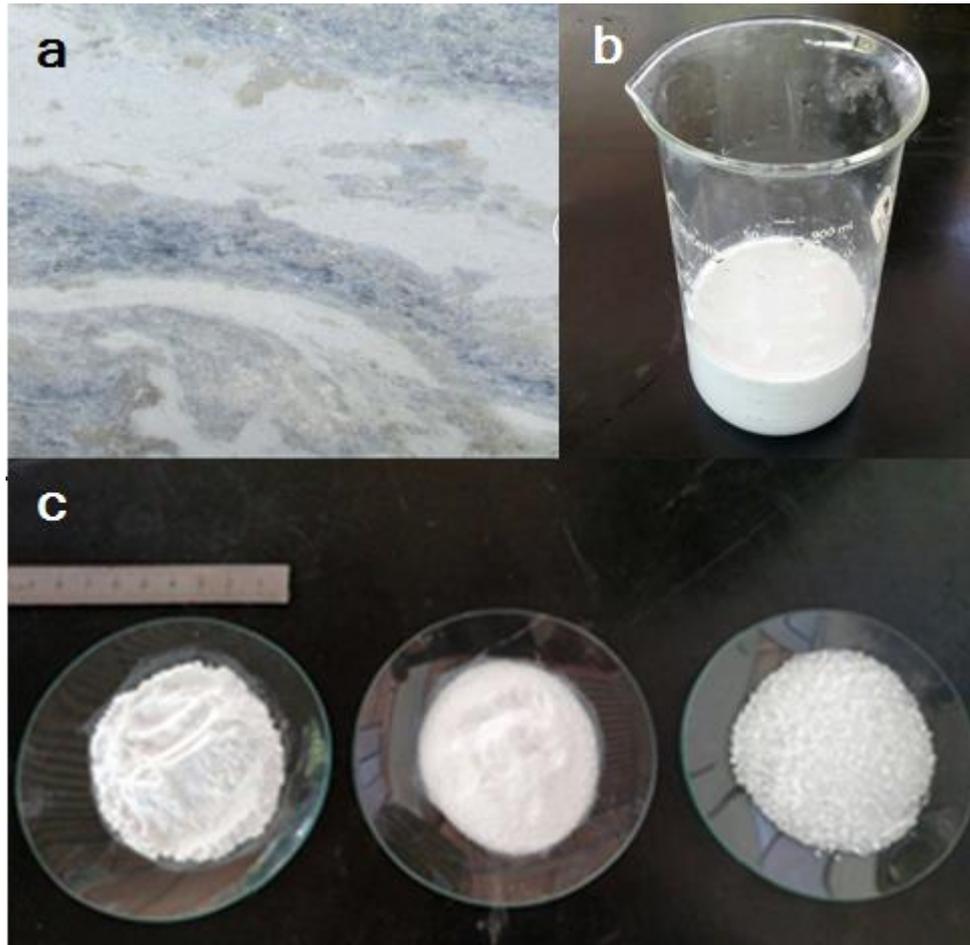


Figura 15 – Chapa de Marmo-Ônix Blue (a); Resíduo Semissólido – Lama Abrasiva (b) e Resíduos Classificados nas Faixas Granulométricas Fina, Média e Grossa (c).

b) Resina Epóxi

A resina utilizada como aglutinante foi a epóxi do tipo diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), fornecida pela Dow Química S/A; nome comercial: DER 331; densidade: 1,16g/ml e massa molar: 340,41g/mol.

c) Amina (Endurecedor)

Como endurecedor foi utilizado um composto comercial com aproximadamente 60% de Tetraetilenopentamina (TEPA) e 40% de Trietilenotetramina (TETA) com algumas impurezas. Ele foi fornecido pela Nebrax do Brasil, densidade: 0,98 g/ml.

3.2 Caracterização do Resíduo e do Sistema DGEBA/TEPAc

O mármore dolomítico natural Marmo-ônix Blue também foi caracterizado através de ensaios que determinaram suas propriedades físicas e mecânicas de acordo com as normas da ABNT.

O sistema DGEBA/TEPAc foi caracterizado através dos ensaio de resistência à flexão em três pontos.

3.3 Determinação do Maior Fator de Empacotamento

A partir das três faixas granulométricas foram determinadas 10 misturas com porcentagens distintas de partículas grossas, médias e finas. Para isso utilizou-se um diagrama ternário de modelo cúbico completo, que foi desenvolvido na metodologia de modelagem numérico experimental rede Simplex (Simplex-Lattice Design) (Cornell, 2002). O objetivo principal foi determinar qual destas misturas apresentou a densidade aparente seca máxima. A figura 16 ilustra geometricamente cada ponto que representa uma mistura de determinada composição.

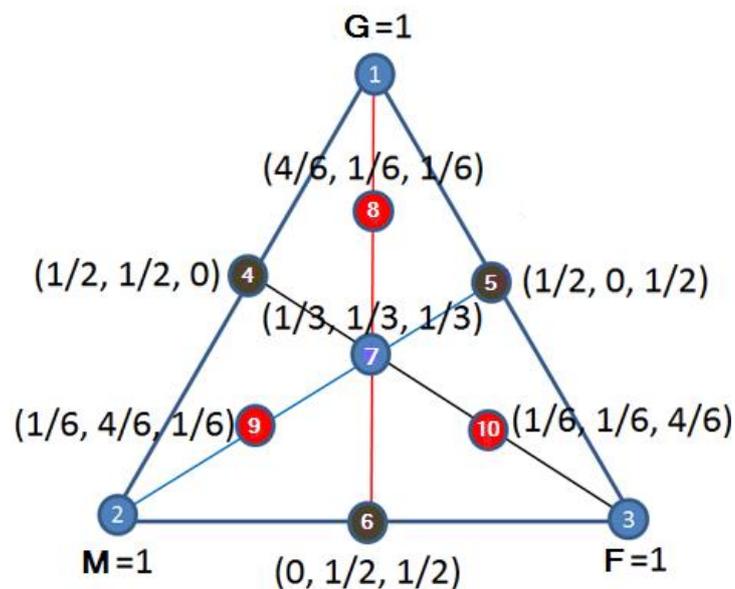


Figura 16 – Diagrama ternário com as 10 misturas baseado no modelo cúbico completo do Simplex (Adaptado de Weibull, 2017)

As misturas foram inseridas num recipiente de volume conhecido e sobre ele foi acoplado um peso de 10 Kgf ao mesmo tempo em que se aplicou uma vibração com frequência de 60 Hz no equipamento peneirador vibratório de bancada durante 10 minutos. Ao fim do processo cada mistura foi pesada em três repetições e a densidade aparente seca calculada pela média aritmética delas.

O ensaio foi baseado na norma brasileira ABNT MB-3388 (1991) e a mistura com maior densidade aparente seca obtida representa o maior empacotamento das partículas, a qual foi escolhida para a produção das placas de rocha artificial.

3.4 Determinação do Teor Mínimo de Resina

Para determinar o teor mínimo de resina (TMR) que será utilizado na produção das placas de mármore artificial é necessário, primeiramente, calcular o volume vazio entre as partículas que é obtido pela seguinte equação:

$$VV\% = 1 - \left(\frac{\textit{densidade aparente seca das particulas}}{\textit{densidade da dolomita}} \right) . 100$$

Substituindo o valor de VV% na equação para o cálculo do teor mínimo de resina (TMR):

$$TMR \%p = \frac{VV\% . \rho_{Resina} . 100}{VV\% . \rho_{Resina} + (100 - VV\%) . \rho_{Dolomita}}$$

O resultado encontrado indica a menor porcentagem em peso de resina a ser utilizada para o melhor preenchimento do volume vazio calculado anteriormente.

3.5 Produção das Placas de Mármore Artificial

Para a produção das placas de mármore artificial utilizou-se um equipamento, figura 17, desenvolvido para esta linha de pesquisa. As dimensões das placas produzidas são de 200x200x10mm.

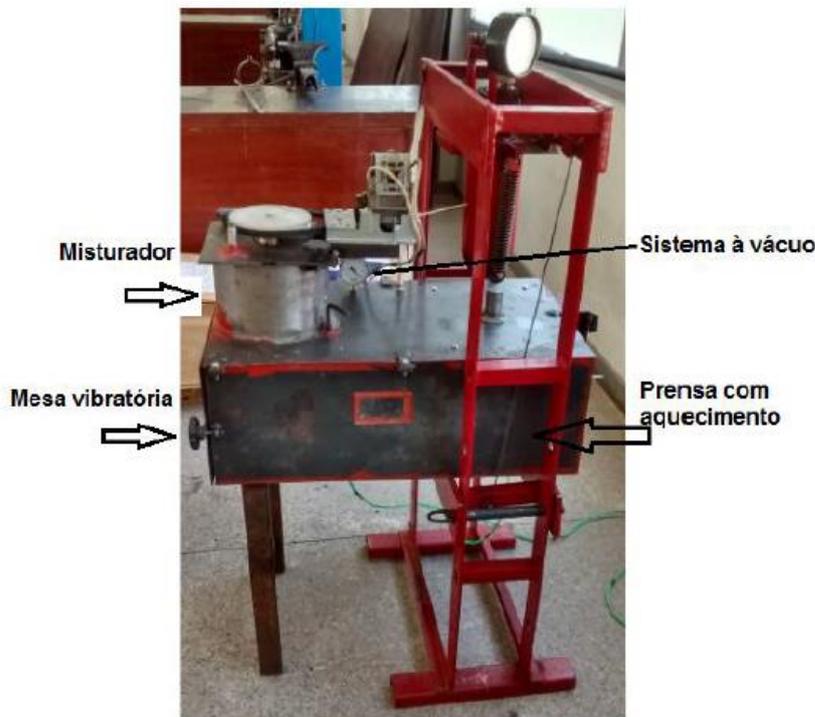


Figura 17 – Equipamento Utilizado na Produção do Mármore Artificial (Silva, 2016)

Primeiramente o resíduo foi seco em estufa ventilada por 24 horas a 100°C.

Encerrado o processo de secagem, o resíduo foi acondicionado em um dessecador a vácuo, para estabilizar a temperatura na faixa ambiente. A resina epóxi DGEBA foi aquecida a 60°C sob vácuo dentro de um kitassato pelo período 2 horas com o objetivo de retirar a umidade a que estava exposta e com isso reduzir o efeito plastificante que diminui as forças de ligações intermoleculares. Ao fim do processo ela continuou sob vácuo até retornar à temperatura ambiente.

Em seguida, foram pesadas as proporções de resíduo e do sistema epoxídico DGEBA/TEPAc. Este sistema é obtido através da mistura dos dois componentes na razão estequiométrica de 55phr.

Para a confecção de uma placa foram utilizados 0,935Kg do resíduo de mármore dolomítico (85% em peso) e 0,164Kg do sistema epoxídico DGEBA/TEPAc

(15% em peso) das quais 0,106Kg são de DGEBA e 0,058Kg de TEPAc (0,055Kg a cada 0,100Kg de resina).

O equipamento que produz as placas de rocha artificial é dotado de um misturador a vácuo, mas por limitações do equipamento, a mistura entre os componentes teve que ser feita manualmente e posteriormente inserida no misturador para aplicação do vácuo em um nível de 460mmHg.

A mistura foi transferida para um molde da mesa vibratória, que atuou para a acomodação e dispersão total do material em seu interior. Este processo durou cerca de 5 minutos. Passado esse tempo, foi aplicada uma pressão de 0,5Mpa e temperatura de 90°C por 20 minutos que concretizou o processo de cura do mármore artificial.

Tanto o aquecimento quanto o vácuo proporcionam a retirada de umidade e ar dos interstícios dos grãos que tem efeito plastificante e diminui as forças intermoleculares. Com estes processos o molhamento e a adsorção interfacial são facilitados, o vácuo é particularmente responsável por prevenir a formação de bolhas e melhorar o preenchimento do molde pela contrapressão que gera.

A pressão de compactação não foi alterada, pois o equipamento não permite esta regulagem.

Após os procedimentos citados, o molde foi aberto e a placa desmoldada para continuar com o seu processo de cura. A figura 18 mostra uma placa já curada.

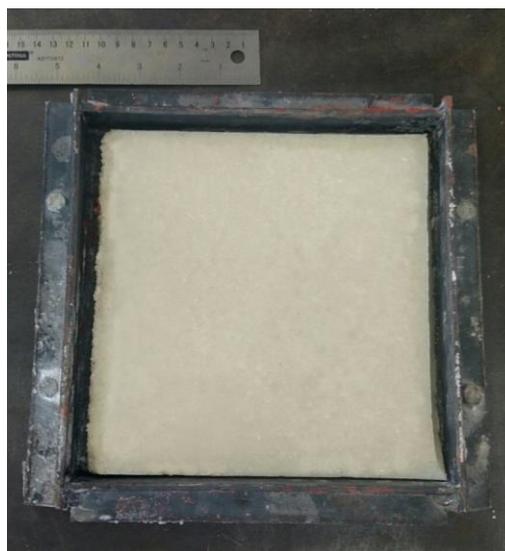


Figura 18 – Placa de Mármore Artificial Produzido com 85% de resíduo de mármore dolomítico e 15% de Resina Epóxi

Retiraram-se as rebarbas que restaram por desbastamento com lixadeira e as placas foram cortadas com uma cortadeira manual de disco diamantado para a confecção dos corpos de provas nas dimensões determinadas pelas normas técnicas correspondentes a cada ensaio a ser realizado.

3.6 Caracterização do Mármore Artificial Produzido

Foram caracterizados tanto o mármore artificial produzido quanto o mármore artificial comercial Bianco Prime fornecido pela Emporio Stone (flexão e compressão), figura 19, para posterior comparação. Quando ensaiados vários corpos de prova, os resultados foram definidos pela média aritmética e o desvio padrão.



Figura 19 – Mármore Artificial Comercial Bianco Prime da Emporio Stone

3.6.1 Determinação da Absorção de Água, Densidade e Porosidade Aparentes

A metodologia utilizada para o ensaio que determina os índices físicos como a densidade aparente, a porosidade aparente e a absorção de água, os quais são interdependentes, esta descrita na norma NBR 15845- anexo B (ABNT, 2010) e é válida para todos os materiais rochosos destinados a revestir edificações da construção civil. Os corpos de prova serão ensaiados nos equipamentos do Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Cachoeiro de Itapemirim (ES).

Para se entender o que são essas propriedades que foram determinadas é

importante saber que uma rocha natural, é composta por variados minerais interconectados e espaços vazios nas regiões interfaciais. A porosidade é diretamente proporcional à quantidade de vazios, sendo rochas mais compactas aquelas que apresentam menos espaços e conseqüentemente menor porosidade. Quando se trata de absorção de água ela está intimamente ligada à percolação de líquidos por esta porosidade aparente e, portanto, o valor encontrado nunca será superior a ela, já que nem todos os poros fazem contato com os demais. Essa comunicação entre poros é dada por microfissuras. (Frazão, 2002; Baêta *apud* Bolonini, 2011).

As definições citadas acima podem ser atribuídas, também, para as rochas artificiais, pois todo material as possui, mesmo que sejam valores ínfimos. Por capilaridade qualquer líquido pode preencher os poros e aumentar a massa, gerando um incremento percentual que será referente à quantidade limite de água que será absorvida.

Foram ensaiados 10 corpos de prova cúbicos com 30 mm de aresta.

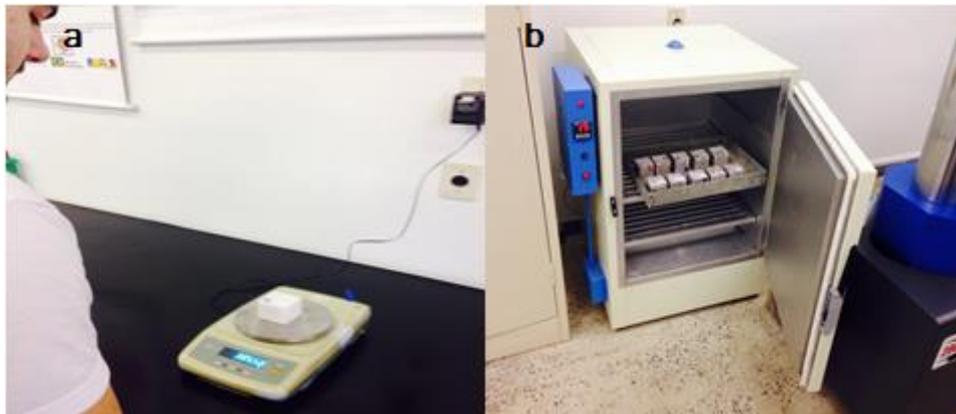


Figura 20 – Balança de Precisão (a); Estufa Ventilada (b).

A primeira das etapas do ensaio consistiu em lavar e escovar os corpos de prova e acondicioná-los em estufa ventilada com temperatura de $70 \pm 5^\circ\text{C}$ (figura 20b), até atingir a massa constante. Isto ocorre quando ao realizar duas pesagens consecutivas em balança com precisão de 0,01g (figura 20a) e intervaladas por um período de 24 horas, a diferença de peso entre as duas seja inferior a 0,1%. Ou seja, para atingi-la foram necessárias mais que duas pesagens. Terminada a secagem eles foram resfriados em dessecadores com sílica em gel para que a umidade não

retorne ao corpo de prova. Logo após foram pesados individualmente, esse peso seco obtido é denominado M_{sec} .

Para a determinação da massa saturada, os corpos de prova foram colocados em uma bandeja de aço inoxidável e imersos em água destilada ou deionizada, inicialmente a 1/3 da altura dos corpos de prova, e após 4 h até 2/3 da altura. Após esse período completou-se a submersão da altura total por mais 40h. Por último, os corpos de prova foram retirados da saturação, suas superfícies enxugadas com pano úmido e pesados individualmente ao ar. Os valores anotados em planilha e se referem ao peso saturado, também chamada de M_{sat} .

A última etapa consistiu na pesagem dos corpos quando são imersos em recipiente com água potável através de um fio de nylon preso sob a balança ou utilizando um dispositivo de pesagem hidrostática. O peso de cada corpo de prova nestas condições é chamado de peso submerso ou M_{sub} .

Com os dados anteriores foram calculados os índices físicos conforme as fórmulas abaixo para cada corpo de prova e ao fim as médias aritméticas de todos eles.

$$\text{Densidade Aparente: } [M_{sec} / (M_{sat} - M_{sub})] \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{Porosidade Aparente: } [(M_{sat} - M_{sec}) / (M_{sat} - M_{sub})] \times 100 \text{ (\%)}$$

$$\text{Absorção de Água: } [(M_{sat} - M_{sec}) / M_{sec}] \times 100 \text{ (\%)}$$

3.6.2 Desgaste Abrasivo Amsler

O ensaio visa determinar, através de simulação ou forma indireta, o desgaste abrasivo superficial de materiais rochosos quando aplicados em locais de alto tráfego, por exemplo, em pisos de centros urbanos. Esse desgaste ocorre, pois o material sofre processos abrasivos, como o atrito gerado por partículas de elevada dureza, friccionadas contra ele pela grande circulação de pessoas, além de outros fatores em menor escala, resultando em perda de brilho e espessura.

A resistência à abrasão mede, portanto, a capacidade que o material rochoso tem de não se desgastar quando atritado e está intimamente relacionada à dureza e

trama dos minerais constituintes (Araújo, 2015).

O ensaio seguiu as orientações descritas na norma NBR 12.042:2012 que exige como resultado o desgaste da espessura em milímetros após um percurso abrasivo de 1000 metros e foi realizado no equipamento de ensaio abrasivo tipo AMSLER, figura 21(a), alocado no Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Cachoeiro de Itapemirim (ES).

Foram ensaiados dois corpos de prova com dimensões 70mm x 70mm x 30mm.

A primeira etapa do ensaio consistiu em se numerar as quatro faces laterais e demarcar a base de todos os corpos de prova. Utilizando um relógio medidor ou comparador (Figura 21b) mediram-se as espessuras de todas as laterais previamente numeradas.

Em seguida, os corpos de prova foram acoplados nas sapatas da Máquina Amsler que possuem movimento de rotação e translação sobre uma pista de ferro fundido com tamanho de circunferência de 200 ± 2 centímetros.

A areia quartzosa número 50 foi liberada a uma vazão de 76 ± 2 cm³/min e o equipamento ligado, proporcionando o desgaste por um total de 250 voltas equivalente a 500 metros. Os corpos de prova foram retirados e limpos para serem medidos no relógio medidor. Por fim, retornaram à máquina e foram submetidos a mais 500 metros de desgaste, totalizando 1000 metros. Novamente os corpos de prova foram limpos e medidos.

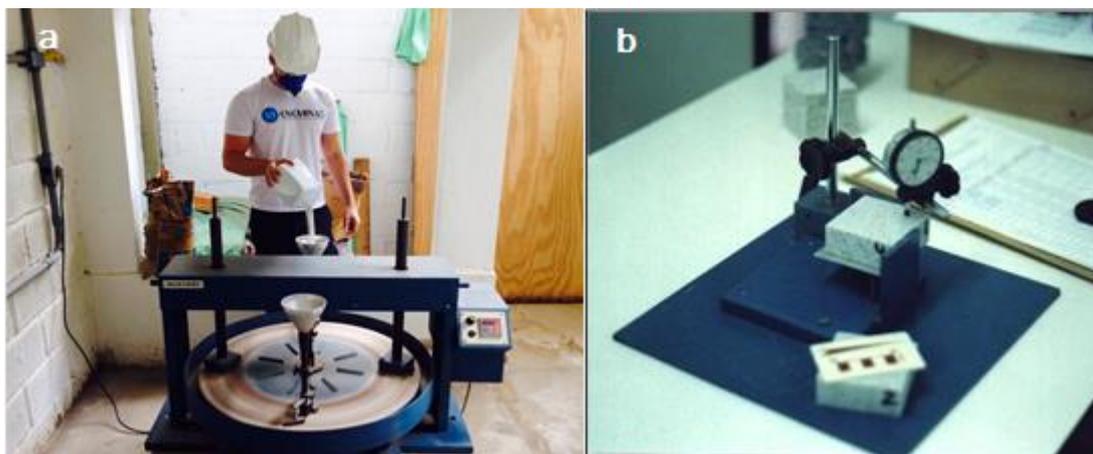


Figura 21 – Máquina Amsler (a) e Relógio Medidor (b).

Os cálculos foram efetuados individualmente para cada corpo de prova de

acordo com as formulas a seguir:

$$d = a - b$$

$$e = a - c$$

Onde:

a = Altura inicial média das 4 faces (mm);

b = Altura média das 4 faces (mm) após 500 metros;

c = Altura média das 4 faces (mm) após 1000 metros;

d = Desgaste médio após 500 metros (mm);

e = Desgaste médio após 1000 metros ou Desgaste Amsler (mm).

3.6.3 Resistência à Flexão em Três Pontos

Para a realização do ensaio de resistência à flexão em três pontos foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000, figura 22, localizada no Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Cachoeiro de Itapemirim, normatizado pela NBR 15845/2010-Anexo F e UNE-EN 14617-2: 2008. Ao todo foram utilizados 6 corpos com dimensões de 10 x 25 x 100mm.

A resistência à flexão é reflexo da textura e estrutura da rocha, e deve ser quantificada para o dimensionamento de placas utilizadas em revestimento de fachadas com o auxílio de insertes metálicos de fixação (Iamaguti, 2001).

O ensaio foi realizado na condição seca e por isso o primeiro passo consistiu na secagem dos corpos de prova em estufa por 48 horas a 70°C e resfriados por 1 hora à temperatura ambiente.

Prosseguiu-se com o rompimento dos corpos de prova que foram assentados sob o cutelo superior (de ação) e sobre os inferiores (de reação). E a carga aplicada lentamente e constantemente até o rompimento, figura 19.



Figura 22 – Prensa Hidráulica

Os valores de resistência a flexão são calculados pela seguinte fórmula:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Onde:

R = tensão de ruptura (MPa);

P = força de ruptura (KN);

L = distância entre os cutelos de ação (m);

b = largura do corpo de prova (m);

d = espessura do corpo de prova (m).

3.6.4 Resistência à Compressão Uniaxial Simples

O ensaio de resistência à compressão se baseou nas diretrizes estabelecidas pelas normas NBR 15845/2010- Anexo E, brasileira, e espanhola UNE-EN 14617-15

e foi realizado na máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000, alocada no Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Cachoeiro de Itapemirim.

A partir do ensaio de resistência à compressão se obtém a tensão (MPa) de rompimento da rocha após a aplicação de esforços compressivos e o máximo suportado varia em função dos minerais constituintes e seu grau de alteração, da textura e da porosidade. Os resultados servem como indicativo de resistência da rocha, ou seja, sua capacidade para ser aplicada em obras estruturais (Frasca, 2001; Kalix, 2011).

Foram utilizados 10 corpos de prova secos em estufa conforme a norma e com dimensões de 30x30x30mm e a tensão máxima de ruptura calculada pela seguinte equação:

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

Onde:

σ = Tensão de ruptura em compressão;

P = Força máxima de ruptura;

A = Área da face do corpo de prova submetida a carregamento.

3.6.5 Resistência ao Impacto de Corpo Duro

A tenacidade é expressa pela resistência ao impacto de uma rocha por um corpo e está intimamente relacionada ao grau de embricamento dos minerais e estrutura que a compõe. Trata-se de uma propriedade que permite inferir a coesão do material rochoso, ou seja, se ele é capaz de suportar um golpe ou impacto mecânico instantâneo e em qual intensidade. Encontrada a força necessária para romper uma rocha, calcula-se a partir deste valor a energia liberada neste processo, o que possibilita dimensionar, a partir deste indicativo, pisos e revestimentos (Araújo, 2015).

O ensaio resistência ao impacto de corpo duro seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 15845/2010-Anexo H e foi realizado no Centro de Tecnologia Mineral- CETEM em Cachoeiro de Itapemirim - ES.

Para este ensaio foram utilizados três corpos de prova com dimensões de 200x200x10 mm, que nivelados sobre um colchão de areia de 10 cm de altura sofreram impacto de uma esfera de aço de 1 Kg de massa. Se iniciou a queda da esfera a uma altura de 20 cm, sendo incrementada de 5 em 5 cm até o rompimento das placas, figura 23.



Figura 23 – Corpo de Prova Rompido pela Queda da Esfera de Aço.
(Frasca, 2001)

O objetivo foi encontrar a energia de ruptura, calculada a partir da média aritmética dos cinco corpos de prova, utilizando a fórmula:

$$W = m.g.h$$

Onde:

W = Energia de ruptura;

M = Massa da esfera;

g = Aceleração da gravidade;

h = Altura da ruptura.

3.6.6 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)

A análise dinâmico-mecânica (DMA) tem como metodologia a aplicação de uma tensão ou deformação oscilatória de reduzida amplitude em materiais sólidos ou líquidos viscosos. Durante este processo, variando-se temperatura ou frequência, é aferida a deformação ou a tensão resultante (Menard, 2008).

Em uma comparação entre as rochas artificiais e as naturais, observam-se comportamentos semelhantes a um "material elástico-plástico" e "frágil-elástico", respectivamente. (Santos *et al.*,2011).

O ensaio de DMA foi realizado na unidade de caracterização térmica do SEPOL/LAMAV e teve por intuito comparar os comportamentos termomecânicos entre o Mármore dolomítico natural e o mármore sintético produzido.

Os corpos de prova de formato retangular medindo aproximadamente 35x12x4 mm foram testados no equipamento DMA Q800 da marca TA Instruments acoplado-se o acessório do tipo garra "dual cantilever" para flexão.

O equipamento foi regulado na amplitude de 20 μ m, frequência de 1 Hz, força estática de 0,1 N e taxa de aquecimento de 3°C/min.

3.6.7 Microestrutura

Avaliou-se a microestrutura da região de fratura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), figura 24, e de sua seção polida, possibilitando analisar a adesão das partículas ao sistema DEGBA-TEPAc.

O equipamento utilizado para realizar estas análises foi o TMT3030PLUS fabricado pela HITACHI e alocado no Laboratório de Análises Mineraias do CETEM=RJ.

As amostras foram preparadas previamente através do uso de fita adesiva de carbono envolvida com uma superfície de ouro.



Figura 24 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do Mármore Dolomítico Natural

A Tabela 6 mostra o valor médio \pm desvio padrão para a densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água do mármore dolomítico natural.

Tabela 6 – Resultados dos Índices Físicos para o Mármore Dolomítico Natural

Corpo de Prova	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)	Absorção de Água (%)
1	2,76	0,28	0,10
2	2,78	0,23	0,08
3	2,82	0,27	0,10
4	2,67	0,21	0,08
5	2,86	0,26	0,09
6	2,72	0,24	0,09
7	2,79	0,26	0,09
8	2,95	0,28	0,10
9	2,85	0,20	0,07
10	2,82	0,18	0,06
Média	2,80 \pm 0,08	0,24 \pm 0,03	0,08 \pm 0,01

A densidade aparente média encontrada foi de $2,80 \pm 0,08$ g/cm³, enquadrando o mármore dolomítico dentro do parâmetro estabelecido pela norma ASTM C503 (1999) que determina uma densidade maior ou igual a 2,80g/cm³.

Karaca et. al (2015) determinaram o valor de 0,40% de porosidade aparente de um mármore com teor de 19,78% de MgO, ou seja, dolomítico. Reportaram, também, que quanto maior o teor de magnésio, maior a porosidade, devido ao processo de dolomitização. A porosidade encontrada no mármore dolomítico deste estudo foi $0,24 \pm 0,03$ %, quase metade da encontrada no estudo de Karaca e colaboradores.

Quanto à absorção de água, a ASTM C503 (1999) recomenda que seja igual ou inferior a 0,20%. O valor encontrado foi de $0,08 \pm 0,01\%$, que é bastante inferior ao recomendado, o que demonstra uma baixa interconexão entre os poros e percolação de água.

Tabela 7 – Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos para o Mármore Dolomítico Natural

Corpo de Prova	Resistência à Flexão em 3 Pontos (MPa)
1	4,19
2	8,29
3	7,85
4	4,05
5	7,63
Média	6,40 ± 2,09

Em se tratando das propriedades mecânicas, conforme a Tabela 7, a tensão máxima de ruptura média suportada pelo mármore dolomítico no ensaio de resistência à flexão em 3 pontos foi de $6,40 \pm 2,09$ MPa.

O valor mínimo estabelecido pela ASTM C503 é de 7MPa, a média é um pouco inferior a este valor. Como se trata de um material residual, um casqueiro que é descartado sem nenhum cuidado ele pode sofrer fraturas durante o desprendimento do bloco, além das falhas naturais que afetam negativamente a sua resistência mecânica. Isto pode ser observado pelo desvio padrão mais elevado em que alguns corpos de prova apresentaram valores superiores ao da norma e outros mais abaixo, demonstrando a heterogeneidade do material.

Karaca *et al.* (2015) também analisou a resistência à flexão em 3 pontos para os mármore dolomíticos. Encontraram valores entre 8,47 e 11,7MPa, que são superiores ao mínimo recomendado pela norma ASTM C503. Pela análise dos autores os mármore analisados não apresentavam as falhas naturais e por isso conseguiram resistir melhor aos esforços flexivos.

Tabela 8 – Resultados da Resistência à Compressão Uniaxial para o Mármore Dolomítico Natural

Corpo de Prova	Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)
1	49,82
2	49,71
3	76,27
4	77,65
Média	63,36 ± 15,71

Para o teste de resistência à compressão uniaxial encontrou-se o valor médio de $63,36 \pm 15,71$ MPa, conforme a tabela 8.

Foram utilizados quatro corpos de prova, já que um deles se rompeu com valor muito discrepante em relação aos demais, devido à uma falha natural de grande proporção.

Por regulamentação a ASTM C503 determina que um mármore dolomítico deve possuir resistência à compressão igual ou superior a 52MPa. Neste ensaio o material apresentou uma média mais elevada que o recomendado, apesar de haver uma grande variação nos resultados entre os corpos de prova. Esta variação, como já explanado, ocorre em função de porosidades, falhas e trincas naturais que são diferentes dentre eles por se tratar de um material heterogêneo e de refugo

Karaca *et al.* (2015) também caracterizaram mármore dolomíticos quanto a resistência à compressão uniaxial e encontraram valores superiores ao estabelecido pela norma ASTM C503. O mármore dolomítico mais semelhante ao utilizado nesta pesquisa possui teor de MgO de 4,13% e tensão máxima de ruptura à compressão de 68,94MPa.

É importante salientar que mármore naturais possuem porosidade e falhas naturais, características negativas que podem ser melhoradas quando utilizados para a confecção de um mármore artificial.

4.2 Caracterização do Sistema Epoxídico DGEBA/TEPAc

Constam na Tabela 9, os resultados para os seis corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à flexão em 3 pontos, a média e o desvio padrão.

Tabela 9 – Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos para o Sistema Epoxídico DGEBA/TEPAc

Corpo de Prova	Resistência à Flexão em 3 Pontos (MPa)
1	99,11
2	98,64
3	99,66
4	88,58
5	96,08
6	100,15
Média	97,04 ± 4,38

Conforme previsto, o valor de tensão de flexão médio de $97,04 \pm 4,38$ MPa é um pouco inferior ao encontrado por Amaral (2014) para os sistemas epoxídicos DGEBA/TEPA, $100,79 \pm 0,10$ MPa e DGEBA/TETA, $101,61 \pm 0,14$ MPa. Por ser um endurecedor comercial e de custo inferior, a TEPAc contém mais impurezas, o que pode diminuir a intensidade na formação de ligações cruzadas. No entanto, levando-se em consideração o melhor custo-benefício da TEPAc, houve uma redução de apenas 3 a 4MPa na sua tensão máxima de ruptura, mantendo o valor bem próximo ao encontrado pelo pesquisador, dentro da faixa do desvio padrão. Isso se deve ao fato do endurecedor ser composto em grande parte por TEPA, que apresentou os melhores resultados quando utilizada em conjunto com a DGEBA no estudo de Amaral. A figura 25 mostra o comportamento mecânico durante o ensaio de resistência à flexão em 3 pontos do sistema epoxídico DGEBA/TEPAc.

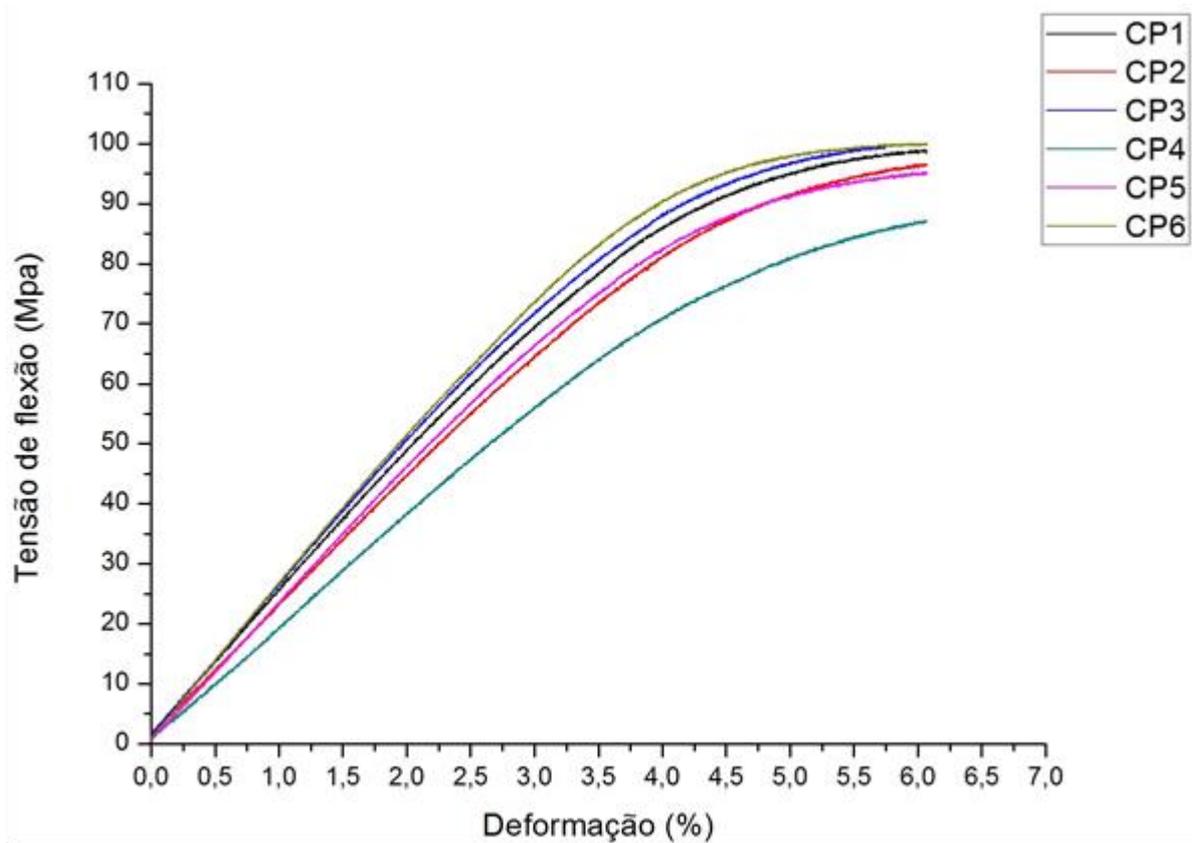


Figura 25 – Comportamento Mecânico do Sistema Epoxídico DGEBA /TEPAc no Ensaio de Resistência à Flexão em 3 Pontos

González *et al.* (2007), em seus testes de resistência à flexão para o sistema epoxídico DGEBA/TEPA, encontrou os valores de $100 \pm 2,7$ MPa para a tensão máxima de ruptura e $2,9 \pm 0,1$ GPa para o módulo de elasticidade.

Silva (2016) encontrou para a máxima tensão de ruptura na flexão os valores de $101,1 \pm 14,8$ MPa e $1,8 \pm 0,3$ GPa para o módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade encontrado para o sistema DGEBA/TEPAc foi $2,60 \pm 0,25$ GPa, valor intermediário aos encontrados pelos pesquisadores acima e mais próximo ao encontrado por González *et al.* (2007), demonstrando uma boa rigidez da resina epóxi DGEBA curada com TEPAc.

Os valores encontrados demonstram que o sistema DGEBA/TEPAc também possui uma elevada estabilidade mecânica, pois são bem próximos aos apresentados por outros pesquisadores, permitindo a produção de rochas artificiais com propriedades mecânicas satisfatórias.

4.3 Definição da mistura de maior empacotamento e do teor mínimo de resina

Os resultados obtidos no ensaio para determinar a densidade aparente seca máxima das 10 misturas entre partículas grossas (G), médias (M) e finas (F) propostas estão listados na Tabela 10. Nesta mesma tabela é possível visualizar as médias das três repetições realizadas para cada mistura.

Tabela 10 – Densidade Aparente Seca das Misturas Testadas

	Proporções por Faixa Granulometrica			Densidade Aparente Seca (g/cm ³)
	G	M	F	Média
1	1	0	0	1,62
2	0	1	0	1,75
3	0	0	1	1,35
4	1/2	1/2	0	1,84
5	1/2	0	1/2	1,83
6	0	1/2	1/2	1,81
7	1/3	1/3	1/3	1,83
8	4/6	1/6	1/6	1,99
9	1/6	4/6	1/6	1,79
10	1/6	1/6	4/6	1,39

Como visto na tabela 10 a mistura que obteve a maior densidade aparente seca foi a de número 8 com 1,99 g/cm³ e conseqüentemente um maior empacotamento, por isso foram adotadas para a fabricação da rocha artificial as proporções de 4/6 para partículas grossas, 1/6 de médias e 1/6 de finas.

Em se tratando do teor mínimo de resina o resultado obtido foi de 12,5% para, mas foi adotada uma margem de segurança de 2,5% a mais, totalizando 15% do sistema epoxídico.

4.4 Caracterização do Mármore Artificial Produzido

4.4.1 Índices Físicos

São apresentados na Tabela 11, os resultados dos índices físicos encontrados para o mármore artificial produzido através do método de vibro-compressão à vácuo, suas respectivas médias e desvios padrões.

Tabela 11 – Resultados dos Índices Físicos para o Mármore Artificial Produzido

Corpo de Prova	Densidade (g/cm ³)	Porosidade (%)	Absorção de Água (%)
1	2,21	0,15	0,07
2	2,07	0,12	0,06
3	2,19	0,12	0,05
4	2,03	0,15	0,07
5	2,11	0,12	0,06
6	2,11	0,12	0,08
7	2,05	0,16	0,06
8	2,11	0,12	0,07
9	2,08	0,15	0,06
10	2,08	0,12	0,06
Média	2,10 ± 0,06	0,13 ± 0,02	0,06 ± 0,01

Para a densidade aparente foi encontrado o valor médio de $2,10 \pm 0,06$ g/cm³, que é aproximadamente 15% inferior aos valores informados pelas empresas que produzem rochas artificiais. Esses valores geralmente variam entre 2,4 a 2,5 g/cm³ (Alicante, 2015). A densidade inferior reflete diretamente no peso por metro

quadrado dos ladrilhos a serem fabricados a partir da rocha artificial produzida, então um material com mesmas dimensões será mais leve, o que diminui os custos de transporte.

Lee *et. al.* (2008) encontrou valores que variam entre 2,03 a 2,45 g/cm³, para rochas artificiais produzidas sob a variação da pressão de compressão, frequência de vibração e nível de vácuo, ou seja, o mármore artificial produzido neste estudo possui densidade que está dentro dos valores encontrados pelo autor.

Quanto a porosidade aparente, o valor encontrado foi de 0,13 ± 0,02%, o que pode evidenciar uma adesão satisfatória entre as partículas e a resina.

Chiodi e Rodriguez (2009) classificaram materiais destinados ao revestimento da construção civil e determinaram que eles possuem alta qualidade quando possuem valores de porosidade inferiores a 0,5%. A porosidade aparente encontrada para o mármore artificial produzido é aproximadamente quatro vezes menor que o determinado pelos autores.

Carvalho *et. al.* (2015) para uma rocha artificial desenvolvida com 80% de partículas finas coletadas em um precipitador eletrostático de uma siderurgia e 20% de sistema epoxídico DGEBA /TETA encontrou o valor de 0,45% de absorção de água. Ribeiro (2011) desenvolveu um mármore artificial compacto pelo método RTM e constatou que não houve uma boa aglutinação das partículas de mármore pela resina poliéster, encontrando uma porosidade aparente média de 8,28 ± 0,75%. Ambos os valores são superiores ao determinado para o mármore artificial produzido.

Em se tratando da absorção de água do mármore artificial produzido foi determinado o valor de 0,06 ± 0,01%. O valor encontrado é inferior ao recomendado para mármore dolomítico natural que tem como indicação possuir um valor menor ou igual 0,20% (ASTM C503, 1999).

Chiodi e Rodriguez (2009) estabeleceram que um valor inferior a 0,1% atesta que a rocha possui uma qualidade muito alta, sendo o valor encontrado 40% inferior a esta classificação.

Na confecção de um mármore artificial compacto, Borsellino *et al.* (2009) agregou partículas do resíduo de mármore pela resina epóxi, obtendo como absorção de água o valor de 0,25%. Lee *et al.* (2008), por sua vez, alterou as

variáveis no desenvolvimento por vibro compressão à vácuo, encontrando resultados que variaram dentro da faixa de 0,01 a 0,20%.

Mármore artificiais produzidos pela indústria possuem entre 0,09 a 0,40% de absorção de água (Alicante, 2015). Carvalho *et. al.* (2015) encontrou o valor de 0,17% de absorção de água. O mármore artificial produzido nesta pesquisa possui absorção de água inferior em aproximadamente 33% em relação ao mínimo da faixa de valores informados pela indústria e quase três vezes inferior ao encontrado por Carvalho *et. al.* (2015). Com estas comparações comprova-se a baixa absorção de água do material para a sua utilização em ambientes úmidos.

Silva (2016) encontrou a média de $0,05 \pm 0,01\%$, que pelo erro padrão é o mesmo resultado encontrado nesta pesquisa. Levando em consideração que Silva (2016) utilizou como resíduo o mármore calcítico e como aglutinante o sistema epoxídico DGEBA/TEPA, é possível inferir que o mármore artificial produzido com partículas de mármore dolomítico e DGEBA/TEPAc possui um bom nível de compactação e aglutinação do resíduo à resina, semelhante ao do autor. Estas características melhoram a resistência mecânica do mármore artificial, pois indicam que mesmo com uma baixa porosidade, estes poros possuem poucas interconexões, diminuindo a percolação de líquidos, além de diminuir os possíveis pontos de concentração de tensão.

4.4.2 Desgaste Abrasivo Amsler

Como o ensaio de Desgaste Abrasivo Amsler é baseado em uma norma para cerâmicas, não há valores limítrofes estabelecidos para comparação com os valores encontrados para o material artificial desenvolvido. Existe um estudo publicado por Chiodi Filho e Rodriguez (2009) que define parâmetros que servem de comparação quando se utiliza rochas ornamentais em pisos, esses valores de referência estão dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros de Comparação para Desgaste Abrasivo Amsler

Intensidade de Tráfego	Desgaste Abrasivo Amsler (mm)
Baixo	< 6
Médio	< 3
Alto	< 1,5

Baseando-se nos parâmetros listados, a resposta do mármore artificial produzido ao ensaio de Desgaste Abrasivo Amsler é bastante satisfatória, tendo como indicação a utilização em pisos de alto tráfego, afinal seu desgaste é inferior a 1,5mm após 1000m de desgaste, como pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do Desgaste Abrasivo Amsler

Material	Corpo de Prova	Desgaste Abrasivo Amsler (mm)		Médias	
		500m	1000m	500m	1000m
Mármore Dolomítico Natural	1	1,99	4,61	2,09	4,43
	2	2,19	4,26		
Mármore Artificial Produzido	1	0,77	1,38	0,71	1,34
	2	0,65	1,29		

O mármore dolomítico natural, do qual se originou o resíduo, apresentou desgaste de 4,43mm na pista de 1000m, destinando seu uso em ambientes de baixo tráfego e sendo superior em mais de três vezes ao valor encontrado para o mármore artificial desenvolvido com ele. Constata-se com isso o grande incremento na resistência ao desgaste abrasivo sofrido com o novo rearranjo da trama de minerais aglutinados pela resina, devido a ligações mais fortes e ao melhor empacotamento obtido pela utilização da mistura de maior densidade aparente calculada no tópico 4.3 deste estudo.

Quando comparado a mármore artificiais desenvolvidos por outros autores, Ribeiro (2011) produziu um mármore artificial compacto através de vibrocompressão a vácuo utilizando resina poliéster insaturada e partículas calcárias e encontrou o valor de 5,7mm como desgaste após 1000m, aproximadamente quatro vezes superior ao material desenvolvido neste estudo. O uso de solvente adicionado à

resina poliéster, que pode ter reduzido o potencial de entrecruzamento das ligações químicas e a elevada porosidade encontrada no mármore artificial do autor justificam o grande desgaste sofrido.

Silva (2016) desenvolveu um mármore artificial também por vibro compressão a vácuo e utilizou na formulação partículas de mármore calcítico e resina epóxi endurecida com Tetraetilenopentamina pura. Encontrou o valor de 1,4mm de desgaste após 1000m, que é pouco superior e levando em consideração o desvio padrão, praticamente o mesmo do mármore artificial desenvolvido neste estudo. Isto pode ser justificado pela maior resistência ao risco na escala Mohs da dolomita, presente em maior proporção no resíduo do mármore natural utilizado, em relação ao mármore calcítico utilizado por Silva. O resultado desta comparação é ainda melhor quando observado que o endurecedor aqui utilizado não foi Tetraetilenopentamina pura, e sim TEPAc em menor proporção, que contém mais impurezas e possui custo bem inferior.

4.4.3 Resistência à Flexão em 3 Pontos

Na tabela 14 estão descritos os valores encontrados para a resistência à flexão em 3 pontos dos 6 corpos de prova confeccionados a partir do mármore artificial produzido.

Tabela 14 – Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos do Mármore Artificial Produzido

Corpo de Prova	Resistência à Flexão em 3 Pontos (MPa)
1	34,05
2	33,64
3	33,95
4	33,42
5	34,83
6	33,72
Média	33,93 ± 0,49

O desvio padrão de 0,49MPa encontrado demonstra uma faixa bastante reduzida da variação no comportamento mecânico do material neste teste, permitindo inferir que as placas da rocha artificial produzida utilizadas neste teste eram bem homogêneas na sua constituição, o que pode ser reflexo de um entrecruzamento eficiente das cadeias poliméricas durante a cura da resina e sua boa adesão às partículas do resíduo por toda a superfície rochosa.

Na figura 26 é traçado o gráfico tensão-deformação do ensaio de flexão.

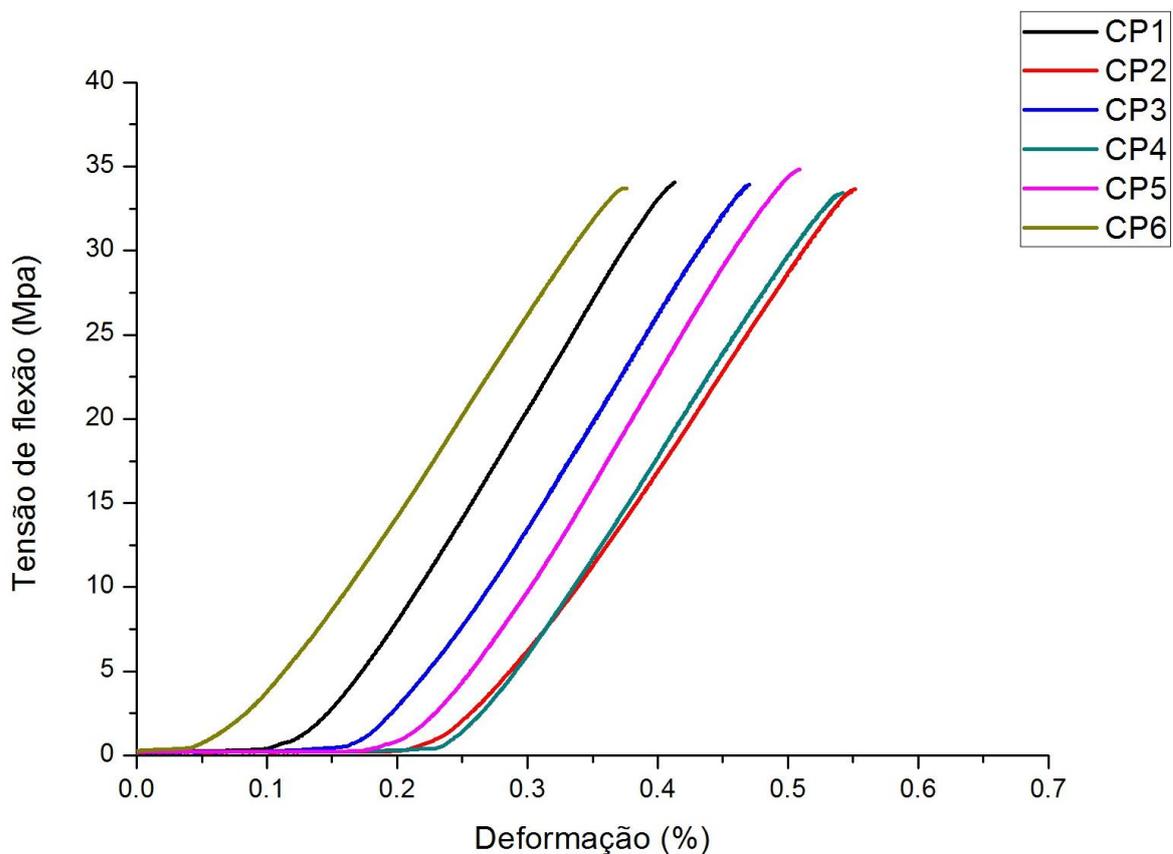


Figura 26 – Comportamento Mecânico no Ensaio de Resistência à Flexão em 3 Pontos do Mármore Artificial Produzido

Os fabricantes de rocha artificial produzidas com partículas de mármore fornecem valores de resistência à flexão em torno de 13,6 a 17,2MPa (Revestimento de mármore composto, 2016). O valor encontrado nesta pesquisa é quase o dobro do máximo informado para um mármore artificial comercial desenvolvido por estas empresas.

Borsellino *et al.* (2009) utilizou partículas de mármore e as aglutinou com resina epóxi, sem utilização da metodologia de vibro compressão a vácuo, obtendo

valores de resistência à flexão entre 10,6 e 22,2MPa. O valor de resistência encontrado para o mármore artificial produzido é 53% superior ao máximo encontrado pelo autor. Infere-se que à utilização da técnica de vibro compressão a vácuo durante a confecção do mármore artificial desta pesquisa diminuiu os níveis de porosidade, impedindo a formação de concentradores de tensão.

Silva (2016) utilizando resíduo calcítico aglutinado por resina epóxi DGEBA curada com o endurecedor TEPA pura em maior percentual, 20%, para a fabricação e um mármore artificial, encontrou $31,8 \pm 2,5$ MPa para a tensão máxima de ruptura na flexão em 3 pontos. O material produzido nesta pesquisa é aproximadamente 7%, na média, mais resistente que o desenvolvido pelo autor.

O módulo de elasticidade encontrado foi de $7,10 \pm 0,6$ GPa, que representa mecanicamente que o material sofreu uma deformação dentro da região elástica, ou seja, representa que o mármore artificial produzido tem elevada rigidez durante a flexão. A boa adesão interfacial entre as partículas de mármore dolomítico e sua dispersão homogênea na resina epóxi, com bom molhamento, beneficiou o incremento do módulo de elasticidade, sendo ele superior aos obtidos para o sistema epoxídico e o que geralmente é definido para mármore naturais.

Na figura 27 é possível estabelecer uma comparação entre os comportamentos mecânicos do mármore artificial produzido e do mármore artificial comercial. Para o mármore artificial comercial foi obtida a tensão máxima de ruptura de $30,42 \pm 2,37$ MPa, demonstrando que o mármore artificial produzido possui uma resistência à flexão em três pontos superior em quase 12%. Isso demonstra que o material produzido está em conformidade com o que se espera em termos de resistência por um semelhante produzido pela indústria. Já na figura 28 são comparados os intervalos de confiança de todos os materiais desta pesquisa.

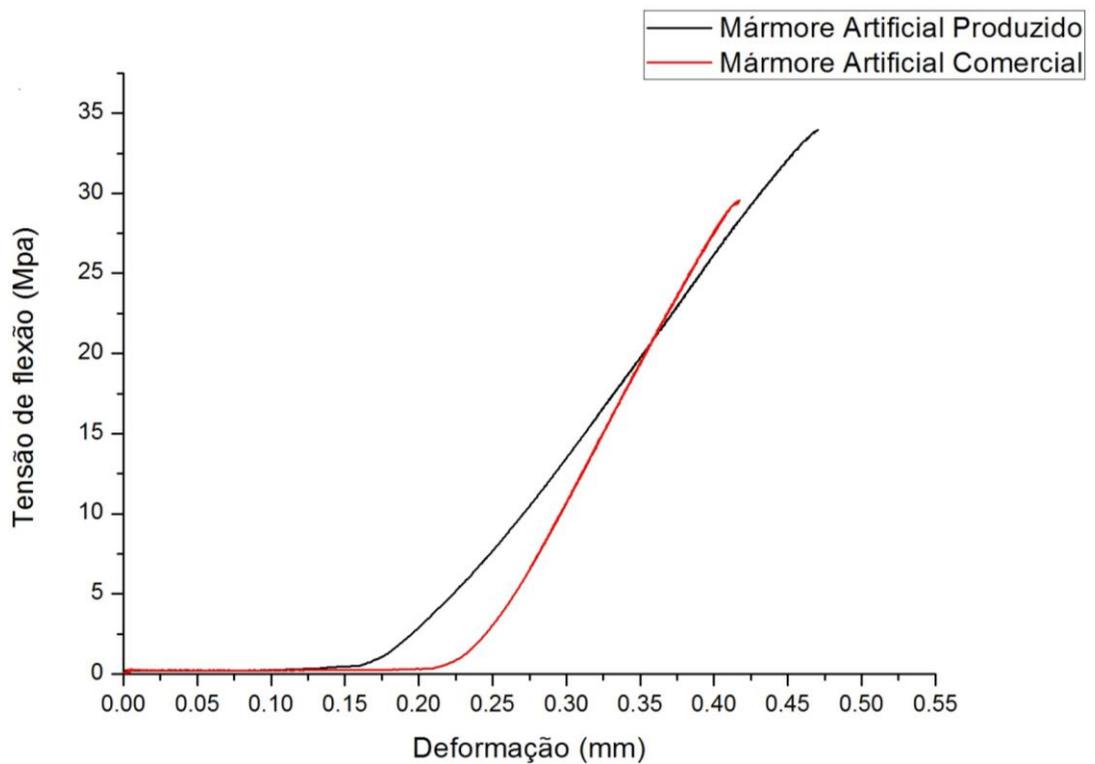


Figura 27 – Comparação do Comportamento Mecânico no Ensaio de Resistência à Flexão em 3 Pontos entre o Mármore Artificial Produzido e o Mármore Artificial Comercial

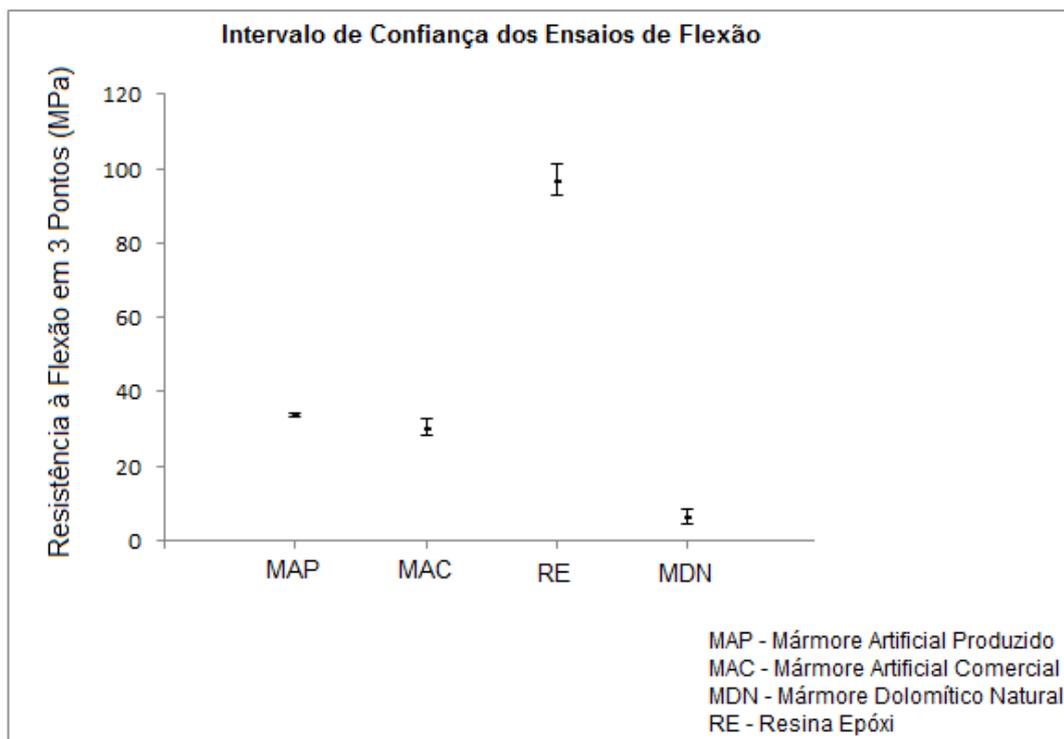


Figura 28 – Comparação entre o Comportamento Mecânico na Flexão do Mármore Artificial Produzido, Mármore Artificial Comercial, Mármore Dolomítico Natural e Resina Epóxi

4.4.4 Resistência à Compressão Uniaxial

Na Tabela 15 estão descritos os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Tabela 15 – Resistência à Compressão Uniaxial do Mármore Artificial Produzido

Corpo de Prova	Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)
1	93,13
2	96,39
3	95,81
4	100,95
5	96,19
Média	96,49 ± 2,82

Foi obtido o valor de $96,49 \pm 2,82$ MPa no teste de resistência à compressão. Este resultado evidencia que houve uma boa interligação das cadeias poliméricas da resina, reduzindo a os escorregamentos nos planos de fraqueza que comumente ocorrem nos mármore artificiais quando submetidos a esforços compressivos.

Quando este valor é comparado à regulamentação definida pela norma ASTM C503 para a matéria prima que são os mármore dolomíticos naturais, ele se prova superior, sendo quase o dobro do valor mínimo estabelecido pela norma que é de 52MPa (ASTM C503, 1999).

São fornecidos pelos produtores industriais de mármore artificiais compostos a faixa de valores entre 97 e 131MPa para a resistência à compressão (Revestimento de mármore composto, 2015), em que o valor mínimo, levando-se em consideração o desvio padrão, é praticamente o mesmo que o encontrado para o mármore artificial produzido. O valor encontrado é ainda mais interessante quando comparado ao definido na pesquisa de Silva (2016) que foi de $85,2 \pm 7,2$ MPa, cerca de 13% superior, mesmo este autor tendo utilizado maiores proporções de resina, que possui comportamento mecânico superior ao do mármore dolomítico. Houve ainda uma dispersão bem menor dos valores encontrados entre os corpos de prova,

evidenciando a regularidade no comportamento mecânico por toda a extensão das placas produzidas.

Lee *et al.* (2008), utilizando partículas graníticas e vítreas que possuem resistência mecânica mais elevada que as dolomíticas deste estudo, variou os parâmetros de fabricação do mármore artificial e obteve valores na faixa de 78,7 até 151,3MPa.

A figura 29 mostra o comportamento mecânico do mármore artificial produzido com 85% de partículas dolomíticas e 15% de resina epóxi durante o ensaio de resistência à compressão uniaxial.

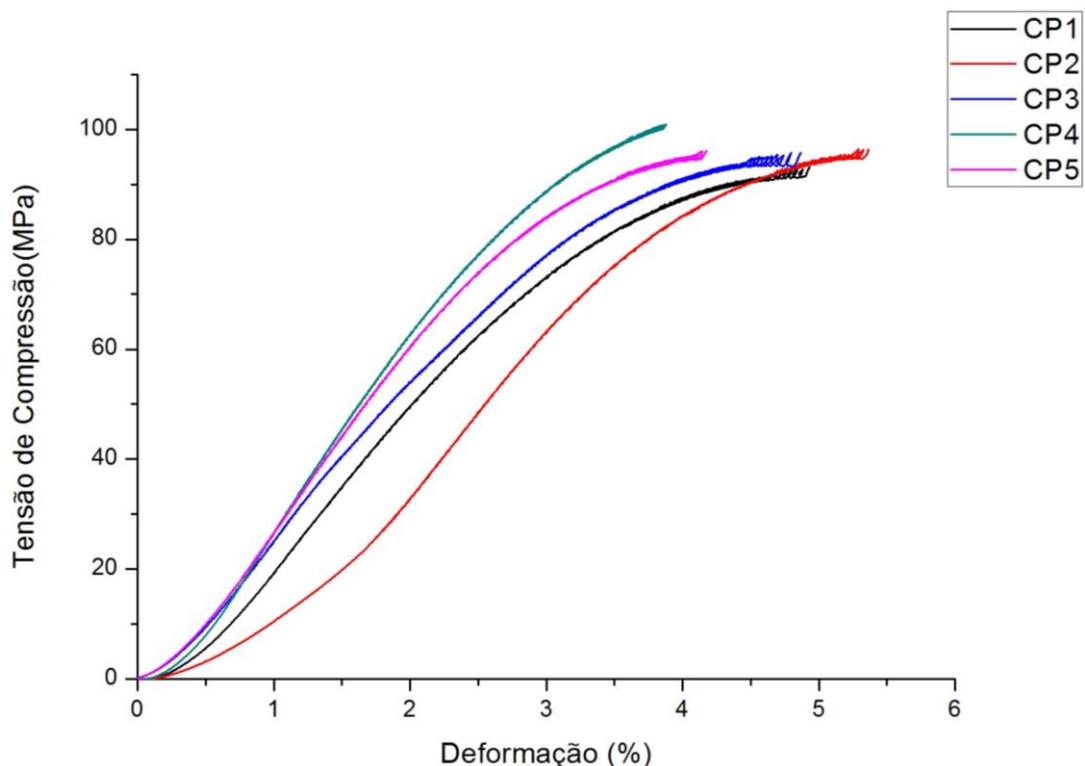


Figura 29 – Comportamento Mecânico no Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial do Mármore Artificial Produzido

Para efeitos de classificação, uma vez que não existem normas próprias para isto no campo das rochas artificiais, utilizaram-se os valores definidos por Chiodi e Rodriguez (2009). Os autores definem que quando utilizadas para fins estruturais, as rochas artificiais devem apresentar valores de resistência à compressão situados entre 70 e 130MPa para uma resistência média, classificação que engloba o mármore artificial produzido nesta categoria.

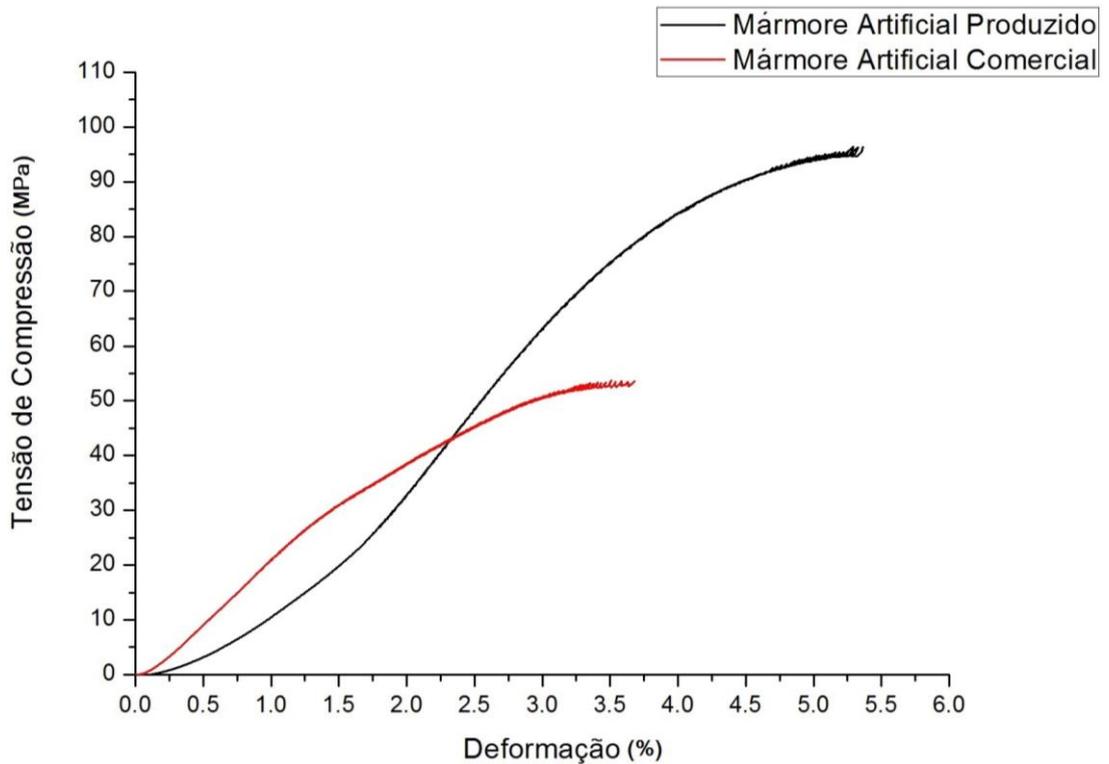


Figura 30 – Comparação entre o Comportamento Mecânico na Compressão do Mármore Artificial Produzido X Mármore Artificial Comercial

Na comparação entre o mármore comercial Bianco Prime e o mármore artificial produzido, o último obteve como resultado quase o dobro de resistência do primeiro, $96,49 \pm 2,82$ MPa contra $56,46 \pm 14,46$ MPa, conforme visto na figura 30.

Quando se compara os intervalos de confiança das médias do mármore artificial produzido, do mármore artificial comercial e do mármore dolomítico natural, dispostos na figura 31, se nota uma elevada vantagem em termos de maior resistência à compressão do mármore produzido, mesmo levando-se em consideração os limites inferiores e superiores.

De todos os materiais, o mármore artificial produzido se destacou como o que obteve a menor dispersão de resultados entre os corpos de prova, o que denota a qualidade dos processos de confecção das placas, com resultados equivalentes, independente da placa a ser utilizada nos testes.

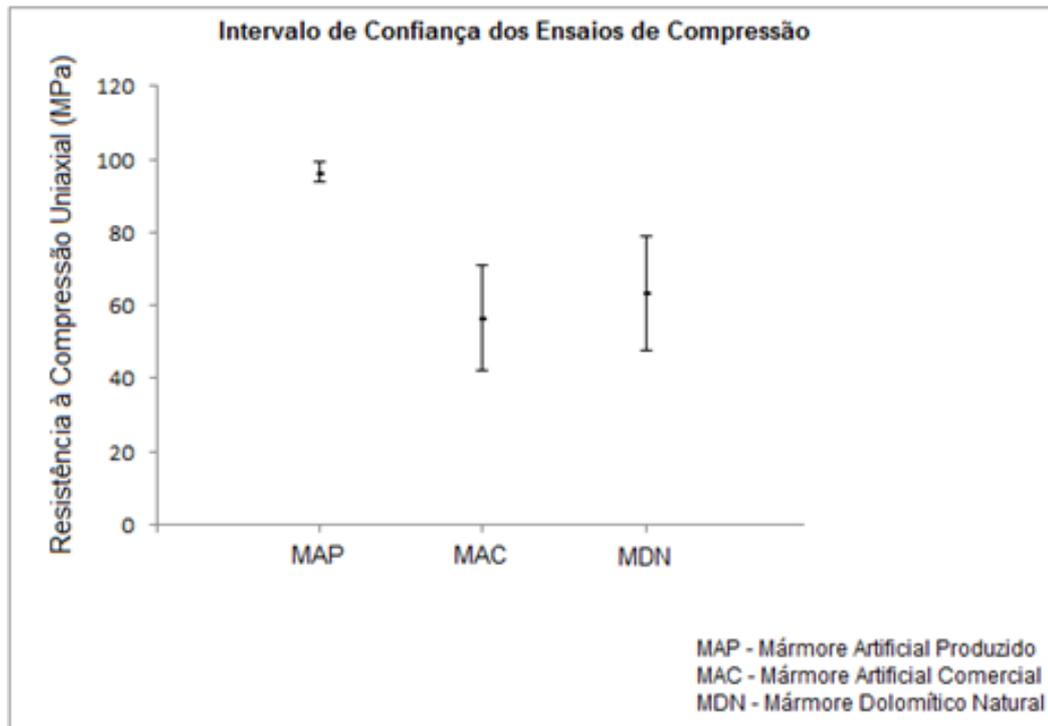


Figura 31 – Comparação entre os Intervalos de Confiança nas Médias dos Ensaios de Flexão

4.4.5 Resistência ao Impacto de Corpo Duro

O ensaio de resistência ao impacto de corpo duro foi utilizado para avaliar o nível de coesão do mármore artificial desenvolvido e o quanto de energia ele é capaz de dissipar a depender da altura máxima que ele suporta em situações de quedas de objetos sobre a sua superfície. Com esse resultado é possível dimensionar as placas no tamanho adequado de acordo com o tipo de solicitação de alguns ambientes, dando uma indicação das possibilidades de uso.

Em se tratando dos resultados, a Tabela 16 mostra que a altura média de ruptura entre os três corpos de prova utilizados foi de 0,45m e a energia de ruptura de 4,4J para o mármore artificial produzido. Esse resultado é bastante satisfatório, uma vez que Frazão e Farjallat (1995) estabeleceram como parâmetros para granitos, que possuem resistência mecânica superior aos mármore, valores maiores ou iguais a 0,4m. Quando comparado aos resultados obtidos por Silva (2016) se mostrou um pouco superior, pois resistiu a cerca de 2cm a mais na altura média de ruptura, que em seu estudo encontrou 0,43m, mesmo tendo sendo

desenvolvido como já dito com uma resina considerada inferior e em menor proporção.

O mármore dolomítico natural do qual foi obtido o resíduo resistiu a uma altura de ruptura de 0,22m, resultando em 2,1J de energia, ou seja, o mármore artificial desenvolvido possui aproximadamente o dobro da resistência do natural.

Tabela 16 – Resultados do Ensaio de Resistência ao Impacto de Corpo Duro

Material	Corpo de Prova	Altura de Ruptura (m)	Energia de ruptura (J)
Mármore Artificial Produzido	1	0,50	4,9
	2	0,45	4,4
	3	0,40	3,9
	Média	0,45	4,4
	Desvio Padrão	0,05	0,5
	Mármore Dolomítico Natural	1	0,20
2		0,25	2,4
3		0,20	1,9
Média		0,22	2,1
Desvio Padrão		0,03	0,28

4.4.6 Análise Dinâmico-Mecânica

Com a Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) foi possível comparar o comportamento do mármore dolomítico natural, do mármore artificial produzido e da resina epóxi conforme a figura 32. É possível observar pelo gráfico que o mármore artificial apresentou um comportamento elástico quando a temperatura era inferior a 70°, sendo o seu módulo de armazenamento de aproximadamente 6500MPa, com poucas variações até esta temperatura.

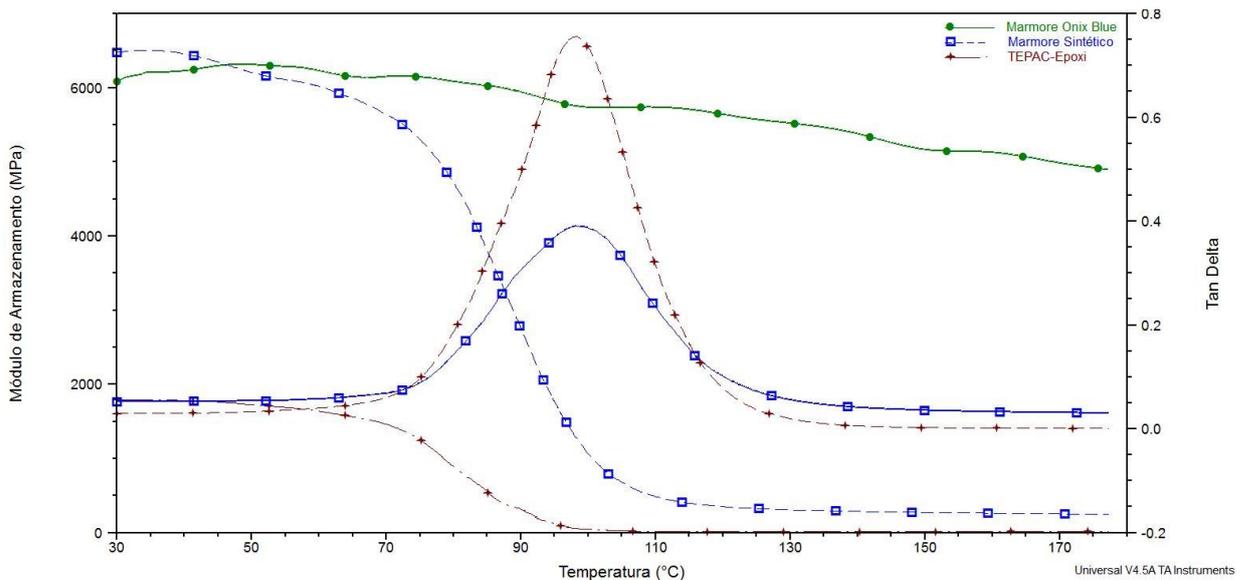


Figura 32 – Comportamento Dinâmico-mecânico do Mármore Dolomítico Natural, Mármore Artificial Produzido e Resina Epóxi no Ensaio de DMA

O mármore dolomítico natural (Mármore Ônix Blue) possui módulo inferior, aproximadamente 6100MPa, e com leve queda à medida que houve o incremento de temperatura, provavelmente associado a estrutura pouco porosa do material, mantendo suas propriedades elásticas durante toda variação de temperatura utilizada. Os módulos de 6500 e 6100MPa são muito próximos como era esperado para a região vítrea, já que há elevada porcentagem de particulado, sendo o comportamento definido pela carga de mármore. Em maiores temperaturas é possível observar que a fase da resina tem uma maior contribuição.

A 30°C há diferenças nos módulos de armazenamento encontrados para os sistemas, havendo um maior valor deste módulo para o mármore artificial produzido quando comparado com a resina epóxi sem adição de partículas de mármore. Essa diferença se deve ao aumento da rigidez devido à adição de carga, conforme comprovado pelo módulo de elasticidade de $7,10 \pm 0,6\text{GPa}$ do mármore artificial que é bastante superior ao da resina de $2,60 \pm 0,25\text{GPa}$. Esta relação entre o módulo de armazenamento e elasticidade pode ser explicada uma vez que o módulo de armazenamento está relacionado com a contribuição elástica de qualquer material.

Quanto ao módulo de amortecimento (tan delta), consegue-se analisar somente os comportamentos do sistema epoxídico DGEBA /TEPAC e do mármore sintético produzido, visto que somente eles possuem contribuição viscosa que

advém da resina polimérica, ao contrário do mármore natural que tem caráter elástico frágil devido à ausência desta contribuição.

Este comportamento de alta complexidade para ser analisado, demonstra que o mármore sintético produzido quando comparado com a resina pura, apresenta praticamente a mesma temperatura de transição vítrea. Com isso é possível inferir que se conseguiu o mesmo grau de entrecruzamento, devido ao estabelecimento de condições de cura controladas durante a produção das placas do mármore artificial.

Segundo Kubát *et al.* (1990) o grau de adesão interfacial entre uma carga e uma matriz pode ser definida através de ensaios de DMA pela avaliação da curva *tan del* que é uma medida da energia perdida pelo material, energia esta que está relacionada ao atrito interno entre matriz e carga neste tipo de sistema. Ou seja, a altura do pico da *tan del* pode estar relacionada a adesão, porque quanto maior a altura do pico, menos aderida está a mistura.

Dessa forma, o atrito que as partículas causam ao ancorar os movimentos conformacionais dos segmentos da rede tridimensional formada na cura da resina, não alterou a temperatura de transição vítrea, somente a altura do pico da *tan del* que na resina é mais elevada que a do mármore artificial produzido devido a maior dissipação de energia ocorrida em função do atrito interfacial entre a resina e as partículas dolomíticas.

Silva (2016) também realizou ensaios dinâmicos mecânicos na resina epóxi do tipo DGEBA curada com o endurecedor TEPA, utilizando a porcentagem mais elevada de 20% de resina. Para a resina foi identificado um módulo de armazenamento de aproximadamente 2300MPa, um módulo superior ao de quase 2000MPa encontrado para a resina desta pesquisa, mas ao mesmo tempo bastante semelhante, demonstrando que possuem graus de rigidez equivalentes. Quanto a altura do pico da *tan del* do mármore artificial produzido, ele foi de aproximadamente 0,38° semelhante ao encontrado pelo autor, evidenciando adesão semelhante à encontrada.

Com os resultados obtidos nota-se que houve uma boa adesão e dispersão das partículas na resina, uma vez que uma dispersão inadequada fragilizaria o material, devido ao efeito de concentradores de tensão pela presença de aglomerados.

4.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na figura 33 (a, b, c, d) estão representadas as análises microscópicas obtidas por MEV realizado sobre a superfície de fratura obtida no ensaio de resistência à flexão em 3 pontos do mármore artificial produzido.

São poucos os poros evidentes, pois como comprovado pelos índices físicos a porosidade é bastante reduzida. No entanto, eles podem ter contribuído para a ocorrência da fratura, uma vez que se observa uma boa adesão interfacial entre partículas e resina, ou seja, ocorreu um molhamento adequado das partículas pela resina.

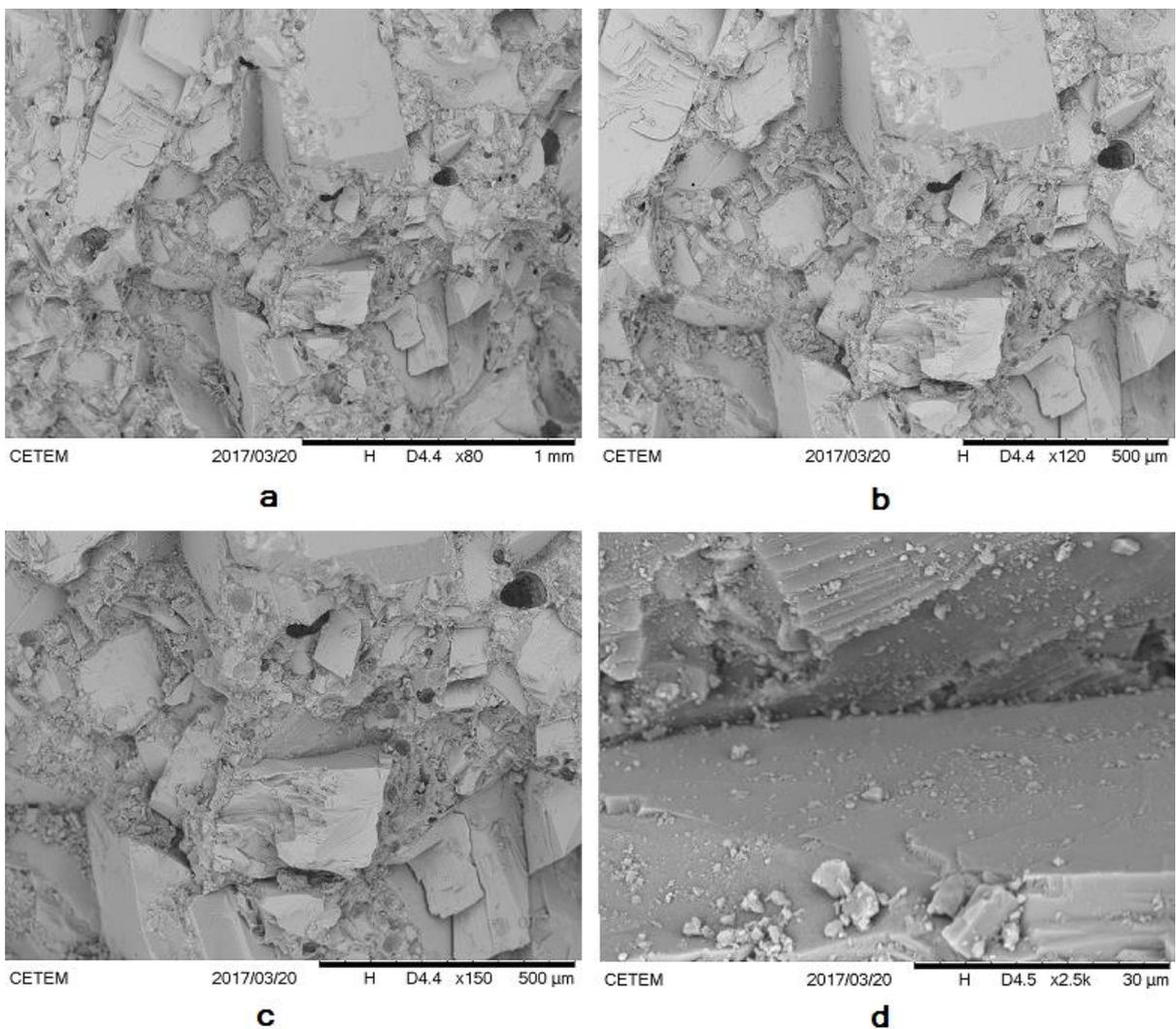


Figura 33 – Microscopia Eletrônica de Varredura da Seção de Fratura do Mármore Artificial Produzido

Miller *et al.* (1988) e Debnath *et al.*, (2004) relataram que boas interações na interface do compósito podem melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos, estando esta interação diretamente ligada à força de ligação adesiva proporcionada pelo molhamento eficaz nas regiões interfaciais.

Luz e Lins (2005) descrevem a dolomita como um mineral com sistema cristalino hexagonal, comumente apresentando cristais romboédricos com faces curvadas.

A fratura intragranular ocorreu principalmente nos planos de clivagem da dolomita, pois apresentam superfícies com formatos romboédricos. Este faturamento ocorreu devido ao esforço mecânico empregado nestes planos preferenciais de fraqueza. Na região interfacial, a boa adesão permitiu como visto nos testes de flexão e compressão, resultados satisfatórios para estas propriedades.

A Figura 34 (a, b, c, d), por sua vez, retrata as imagens captadas por MEV de uma seção transversal do mármore artificial que passou por um processo de polimento superficial. Nela se vê homogeneidade na distribuição das partículas e uma trama bem posicionada, com as finas e médias se empacotando satisfatoriamente entre as grossas e preenchendo os menores espaços vazios resultantes que foram devidamente molhados pela resina.

Infere-se que a compactação prevista no diagrama ternário resultou em uma boa aderência nas regiões interfaciais e poucas falhas na superfície, resultando na baixa porosidade encontrada, o que aumenta a taxa de brilho quando o material passar por processos de beneficiamento como polimento de superfície e bordas. Tais fatores criam uma superfície menos penetrável por líquidos, dificultando a formação de manchas e melhoram as propriedades mecânicas, que como já visto, foram superiores ao do mármore artificial analisado.

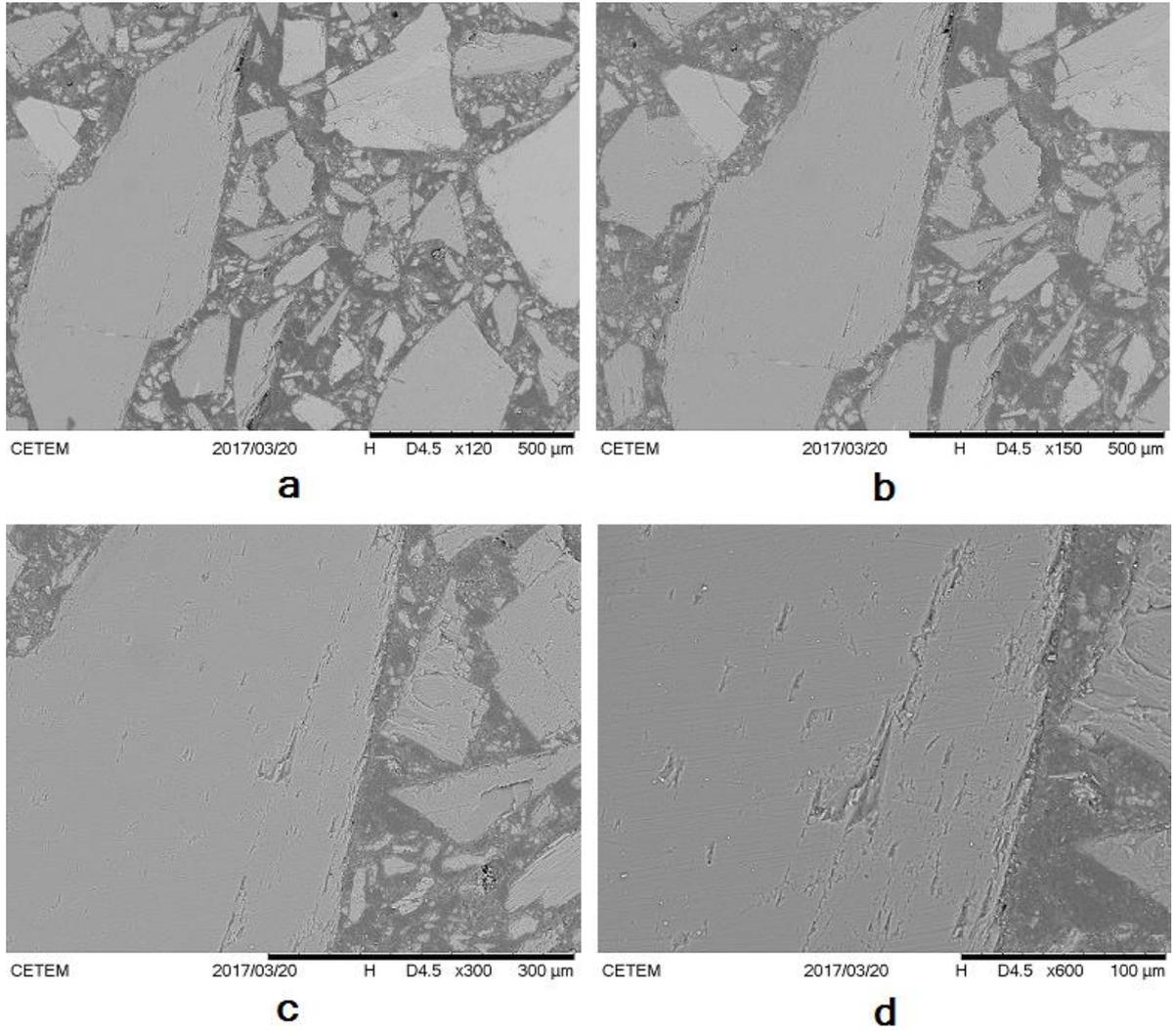


Figura 34 – Microscopia Eletrônica de Varredura da Seção Polida do Mármore Artificial Produzido

5 CONCLUSÃO

Foi constatado através da caracterização do mármore artificial produzido pela metodologia de vibro-compressão a vácuo, com uma pressão de compactação de 0,5 MPa, a uma temperatura de 90 °C, por um período de 20 minutos e constituído por 85% em peso de resíduo de mármore dolomítico desdobrado em teares de lâminas diamantadas e 15% do sistema epoxídico DGEBA/TEPAc, que:

- Foi produzido um mármore artificial compacto com excelentes propriedades físicas e mecânicas. Ele possui apenas 0,13% e 0,06% de porosidade e absorção de água, respectivamente, evidenciando sua alta impermeabilidade. Possui tensão máxima de ruptura na flexão de 33,93MPa e 96,49MPa na compressão, superiores ao de um mármore artificial comercial semelhante, demonstrando sua alta resistência mecânica
- No desgaste abrasivo Amsler também foram encontrados resultados satisfatórios, em que o mármore artificial produzido tem como recomendação a utilização em ambientes de alto tráfego, pois apresenta desgaste inferior a 1,5mm.
- No teste de resistência ao impacto de corpo duro, o mármore artificial produzido se fraturou na altura máxima de 0,45m, um valor considerado adequado. De acordo com Frazão e Farjallat (1995), os valores limítrofes estabelecidos para rochas graníticas, que são mais resistentes mecanicamente que os mármore, que apresentam resistência mecânica superior aos mármore, devem ser maiores ou iguais a 0,4m.
- No MEV, as regiões de fratura demonstraram que as partículas dolomíticas aderiram bem ao sistema epoxídico DGEBA/TEPAc, com poucos poros visíveis, o que foi comprovado nos testes mecânicos.
- A resina possui propriedades mecânicas superiores ao do resíduo utilizado, entretanto foi possível diminuir o percentual dela em relação ao estudo de Silva (2016) e aumentar o valor das propriedades do mármore artificial produzido, criando um mármore mais resistente e com menor custo de produção. Isto pode ser atribuído ao melhor empacotamento das partículas e ao uso do resíduo dolomítico que é mais resistente que o calcítico.

Desta maneira, a aglutinação das partículas de resíduo de mármore dolomítico desdobrado em teares de lâminas diamantadas pelo sistema epoxídico DGEBA/TEPAc permite a confecção de um mármore artificial compacto sustentável com excelentes propriedades físicas e mecânicas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar economicamente a viabilidade da produção do mármore artificial produzido em escala industrial;
- Avaliar como a variação dos parâmetros da metodologia de vibro compressão a vácuo pode influenciar nos resultados físicos e mecânicos;
- Avaliar as propriedades químicas do mármore artificial em ensaios como a resistência ao ataque químico e ao manchamento;
- Avaliar o efeito da mínima quantidade de material metálico que se desprende da lâmina diamantada no processo de desdobramento dos blocos, através de análises laboratorias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abirochas (2016) Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2015. Disponível em: http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3397/Informe_01_2015.pdf. Acesso em: 22 mai. 2016.

Abirochas (2017) Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2016. Disponível em: http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/4062/Informe_01_2017.pdf. Acesso em: 17 mai. 2017.

Alicante (2015) Aglostone: mármore composto. 2015. Disponível em: <http://www.alicante.com.br/aglostone-2/>. Acesso em: 20 dez. 2015.

Almeida, C.N. (2005) *Propriedades mecânicas e térmicas do sistema epóxi DGEBA/etilenodiamida modificados com nanoplateformas de silsesquioxano substituídas com grupos ésteres*. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Ilha Solteira – SP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 81p.

American Society for Testing and Materials (1999) Standard specification for marble dimension stone: ASTM C 503. USA.

Amaral, C.R., Rodriguez, R.J.S., Bessa, M.L.T., Cândido, V.S., Monteiro, S.N. (2014) Mechanical Properties of DGEBA/TEPA Modified Epoxy Resin. *Materials Science Forum*, 775-776:588-592.

Amorim Jr., W.F. (2007) *Processamento de placa espessa de compósito através da moldagem por transferência de resina*. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) -Rio de Janeiro, RJ- COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 232p.

Araújo, A.M.M. (2015) *Caracterização tecnológica do granito Dália para fins ornamentais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) -Recife- PE, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 113p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Solos – Análise granulométrica NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991) Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos: MB 3388 . Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) Rochas e solos: NBR 6.502. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) Placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaio – NBR 13.818. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10004. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010) Rochas para revestimento - métodos de ensaio: NBR 15.584. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Materiais inorgânicos - Determinação do desgaste por abrasão: NBR 12.042. Rio de Janeiro.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2006) Piedra aglomerada: Determinación de la resistencia a compresión: UNE-EN 14617-15. Madrid, 13 p.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2008) Piedra aglomerada: Determinación de la resistencia a flexión: UNE-EN 14617-2. Madrid, 11 p.

Asociación Española de Normalización y Certificación (2011) Piedra aglomerada: Terminología y clasificación: UNE-EN 14618. Madrid.

Bolonini, T.M. (2011) *Geologia e potencialidade do granito “Vermelho Capão Bonito” (sudoeste do Estado de São Paulo) como rocha ornamental*. Dissertação (Mestrado)

-Rio Claro- SP, Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 170p.

Borsellino, C., Calabrese, L., Di Bella, G (2009) Effects of powder concentration and type of resin on the performance of marble composite structures. *Construction & Building Materials*, 23:1915-1921.

Braga, F. dos S., Buzzi, D.C., Couto, M.C.L., LANGE, L.C. (2010) Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, 15(3):237-244.

Brahmadeo, D., Eisenbraun, E.J. (1994) Fundamentals of epoxy formulation. *Journal of Chemical Education*, 71(4):290-294.

Breton Company (2015) Plants for manufacturing natural stone surfaces by Breton Technology. Disponível em: <<http://www.breton.it/dynamic/en/azienda/filosofia.php?PHPSESSID=7589075f46902f6787a285ee1fd4a116>>. Acesso em jul. 2015.

Caesarstone (2015) CaesarStone quartz surfaces. Disponível em <<http://www.caesarstoneus.com/catalog/technical-specs.cfm>>. Acesso em set. 2015.

Campos, A.R., Castro, N.F., Vidal, F.W.H., Borlini, M.C. (2009) Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental. *Anais do 23º Simpósio de Geologia do Nordeste*. Fortaleza: CETEM – MCT, p. 10-18.

Calmon, J.L., Tristão, F.A., Lordêllo, F.S.S., Silva, S.A.C da, Mattos, F.V. (1997) Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. *Anais do Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas* Salvador: Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ANTAC, p. 64-75.

Calmon, J.L., Silva, S.A.C. (2006) Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. *In: Domingues, A.F., Boson, P.H.G., Alípaz, S. (org.) A*

gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração, p. 199-231.

Carvalho, E. A. S., Marques, V. R., Rodriguez, R. J. S., Ribeiro, C. E. G., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2015) Development of Epoxy Matrix Artificial Stone Incorporated with Sintering Residue from Steelmaking Industry. *Materials Research*, 18(2):235-239.

Cetemag – Centro Tecnológico do Mármore e Granito (2010) Apostila do curso de polidor, 22p.

Chiodi Filho, C., Rodriguez, E. de P. (2009) *Guia de aplicação de rochas em revestimentos*. São Paulo: Abirochas, 118 p.

Coimbra Filho, C. G. (2006) *Relação entre o processo de corte e a qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais*. Dissertação (Mestrado) -São Carlos-SP, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 168p.

Compac (2015) The surfaces company. Disponível em: <<http://www.compac.es>> Acesso em: 08 nov. 2015.

Costa, M.L., Rezende, M.C., Pardini, L.C. (1999) Métodos de estudo da cinética de cura de resinas epóxi. *Polímeros*. 9:37-44.

Cornell, J. A. (2002) *Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 680p.

Cruz, J. (2003) Patente ES 2187313: Procedimiento para fabricar tablonos de piedra artificial especialmente aplicables a decoracion. Disponível em: <http://www.espatentes.com/pdf/2187313_a1.pdf> Acesso em: 07 jun. 2016.

Çelik, M.Y., Sabah, E. (2008) Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of Environmental Management* 87. 106–116.

Debnath, S., Ranade, R., Wunder, S.L., Mccool, J., Boberick, K., Baran, G. (2004) Interface effects on mechanical properties of particle-reinforced composites. *Dent Mater.* 20(7): 677-86.

Deléglise, M., Le Gronec, P., Binetruy, C., Krawczak, P., Claude, B. (2011) Modeling of high speed RTM injection with highly reactive resin with on-line mixing. *Composites: Part A.* 42(10):1390-1397.

Dow Chemical (2006) Tetraethylenepentamine (TEPA) technical data sheet. *The Dow Chemical Company.* 108-01354-1104 AMS.

F.L. Jin, C.J. Ma, S.J. Park (2011) Thermal and mechanical interfacial properties of epoxy composites based on functionalized carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A.* 528:8517.

Fibercenter (2015) Mármore sintético. Disponível em: <<http://www.fibercenter.com.br/processos/marmoresintetico.html>> Acesso em ago. 2015.

Frascá, M.H.B.O. (2001) CURSO: Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: Caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. *Anais do I Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais e II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste.* Salvador: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, p.128-135.

Frascá, M.H.B.O. (2014) Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas. In: Vidal, F.W.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N.F. (org.) *Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento.* 1. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p 43 – 97.

Frazão, E.B. (2002) *Tecnologia de rochas na construção civil.* Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 132p.

Gersifi, K.E.I., Orvoen, N.D., Durand, G., Tersac, G. (2003) Glycolysis of epoxide-amine hardened networks: Diglycidylether/aliphatic amines model networks. *Polymer*. 44:3795-3801.

Gonçalez, V (2006) *Modificação de resina epoxídica com poliéter e poliéster e sua utilização em compósitos com fibra de carbono*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia dos Polímeros) -Rio de Janeiro- RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, 101p.

Gonçalves, J.A.V. (2015) *Propriedades mecânicas de compósitos particulados à base de resina epóxi reforçados com pó de rochas graníticas, pertencentes à faixa de dobramento sergipana*. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) –São Cristóvão- SE, Universidade Federal de Sergipe – UFS, 120p.

Gonçalves, J.P. (2000) *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Porto Alegre- RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 135p.

González, F.G, Soares B.G. (2003) Determination of the epoxide equivalent weight of epoxy resins based on diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) by proton nuclear magnetic resonance. *Polymer Testing*. 22:51-56.

González, F.G., Soares, B.G., Pita, V.J.R.R., Sánchez, R., Rieumont, J. (2007) Mechanical Properties of Epoxy Networks Based on DGEBA and Aliphatic Amines. *Applied Polymer Science*. 106:2047-2055.

González, F.G, Matusalém, F., Leyva, M.E., Queiroz, A.A.A. (2010) Determinação da massa equivalente de hidrogênio amina em endurecedores do tipo amina alifática por titulação potenciométrica. *Revista Matéria*. 15(1):70-75.

Hamidi, Y.K., Aktas, L., Altan, M.C. (2005) Three-dimensional features of void morphology in resin transfer molded composites. *Composites Science and Technology*. 65(7-8):1306-1320.

Harper, C.A. (2006) *Handbook of plastics technologies: The complete guide to properties and performance*. McGraw-Hill Chemical Engineering Inc., 900p.

Hillermeier, R.W., Seferis, J.C. (2001) Interlayer toughening of resin transfer molding composites. *Composites: part A*. 32:721- 729.

Hsiao, K.T., Little, R., Restrepo, O., Minaie, B. (2006) A study of direct cure kinetics characterization during liquid composite molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 37(6):925-033.

Iamaguti A.P.S. (2001) *Manual de rochas ornamentais para arquitetos*. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) –Rio Claro- SP. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 318p.

Ionashiro, M.G. (2004) *Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial, calorimetria exploratória diferencial*. Araraquara: Giz editorial, 96p.

Inforochas (2012). Resíduo de rocha ornamental. Informativo do Cetemag, Sicoob Credirochas e Sindirochas. Disponível em: <<http://www.inforochas.com.br/>>.

Jesus, M.S. (2005) *Desenvolvimento de um compósito polímero-metal à base de resina epóxi para aplicações em moldes rápidos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) -Florianópolis- SC, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 102p.

Junca, E. (2007) *Estudo da utilização de resíduo de mármore como desfosforante e dessulfurante de gusa através de termodinâmica computacional*. Trabalho de Conclusão de Curso -Vitória- ES, Centro Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – CEFETES, 74p.

Kalix, T.M.F. (2011) *Estudos de caracterização tecnológica com ênfase em alterabilidade dos tipos comerciais do granito Marrom Imperial*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) -Recife- PE, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 94p.

Karaca, Z., Hacimustafaoglu, R., Gokçe, M.V. (2015) Grain properties, grainboundary interactions and their effects on the characteristics of marbles used as building Stones. *Construction and Building Materials*. 93:166-171.

Kubát, J., Riodhal, M., Welander, M. (1990) Characterization of interfacial interactions in high density polyethylene filled with glass spheres using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*. 39(7): 1527-1539.

Lam dos Santos, J.P., Rosa, L.G., Amaral, P.M. (2011) Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones. *Construction and Building Materials*. 25(1):171-174.

Lawrence, J.M., Hsiao, K.T., Don, R.C., Simacek, P., Estrada, G., Sozer, E.M., Stadfeld, H.C., Advani, S.G. (2002) Ana approach to couple mold design and on line control to manufacture complex composites parts by resin trnsfer molding. *Composites: part A*. 33:981-990.

Lee, G.W., Lee, N.J., Jang, J., Lee, K.J., Nam, J.D. (2002) Effects of surface modification on the resin-transfer moulding (RTM) of glass-fibre/unsaturatedpolyester composites. *Composites Science and Technology* . 62(1):9-16.

Lee, M.Y., Ko, C.H., Chang, F.C., Lo, S.L., Lin, J.D., Shan, M.Y., Lee J.C. (2008) Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cement & Concrete Composites*. 30(7):583-587.

Levy Neto, F., Pardini, L.C. (2006) *Compósitos estruturais - Ciência e tecnologia*. Ed. Edgard Blücher, 336p.

Luo, J., Liang, Z., Wang, B. (2001) Optimum tooling design for resin transfer molding with virtual manufacturing and artificial intelligence. *Composites: part A*. 32:877-888.

Luz A.B. da, Lins, F.F. (eds.) (2005) *Rochas e minerais industriais – Usos e especificações*. Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 867p.

Machado, F.B., Moreira, C.A., Zanardo, A, Andre, A.C., Godoy, A.M., Ferreira, J. A., Galembeck, T., Nardy, A.J.R., Artur, A.C., Oliveira, M.A.F. (2015) Enciclopédia multimídia de minerais.[on-line]. ISBN: 85-89082-11-3. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm:>> Acesso em: nov. 2015.

- Machado, R.A.F., Knies, C.T., Lopes, C.N., Checchinatto, F., Guarido, C.E., Milanez, K.W., Kuhnen, N.C., Riella, H.G. (2002) Reaproveitamento de resíduos industriais. *Acta Ambiental Catarinense*. 1(1):29-41.
- Martins, J.G., Pereira, M.E. (2010) *Materiais de construção: rochas artificiais (aglomerados de pedra natural)*. Universidade Fernando Pessoa, Porto.
- Mallick, P.K. (2007) *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design*. CRC Press. 3rd edition, 616p.
- Menard, K.P. (2008) *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction*. Boca Raton: CRC Press. 2nd edition, 240p.
- Miller, J.D., Ishida, H., Maurer, F.H.J (1988) Dynamic-mechanical properties of interfacially modified glass sphere polyethylene. *Rheologica Acta*. 27: 397.
- Molinari, E.J. (2007) *Reutilização dos resíduos de rochas naturais para o desenvolvimento de compósitos poliméricos com matriz termofixa na manufatura de pedras industriais*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Florianópolis– SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 132p.
- Ozturk, A., Kaynak, C., Tincer, T. (2001) Effect of liquid rubber modification on the behaviour of epoxy resin. *Europe Polymer Journal*. 37:2353-2363.
- Petrie, E.M. (2006) *Epoxy adhesive formulations*. McGraw-Hill Chemical Engineering Inc., 535p.
- Pittman, C.U., He, G.R., Wu, B., Gardner, S.D. (1997) Titration of Tetraethylenepentamine (TEPA) and its phenyl isocyanate reaction products: A model correction factor for determination of Tepa grafted to carbon surfaces. *Carbon*. 35(3):333-340.
- Potter, K.D. (1999) The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications. *Composites: part A*. 30:619-621.

Revestimentos de Mármore Composto (2016) Ficha técnica de produto. Disponível em: <http://eurosurfaces.eu/wp-content/uploads/2015/04/Creme-Lagoa_v01.pdf>. Acesso em: 04 de dezembro de 2016.

Rezende, M.C., Costa, M.L., Botelho, E.C. (2011) *Compósitos estruturais: Tecnologia e prática*. Ed. Artliber, 396p.

RMC (2015) Revestimentos de Mármore Composto. Ficha técnica de produto. 2015. Disponível em: <http://eurosurfaces.eu/wpcontent/uploads/2015/04/Creme-Lagoa_v01.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2015.

Ribeiro, C.E.G. (2011). *Produção de rocha artificial utilizando resíduo da indústria de mármore em matriz poliéster*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência Dos Materiais) -Campos Dos Goytacazes- RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 91 p.

Ribeiro, R.P. (2005). *Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramentos de blocos*. Tese (doutorado) -São Carlos-SP, Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 120p.

Ribeiro, C.E.G., Rodríguez, R.J.S., Vieira, C.M.F, Carvalho, E.A.V., Cândido, S., Monteiro, S.N. (2014) Fabrication of artificial stone from marble residue by Resin Transfer Molding. *Materials Science Forum*. 775-776:336-340.

Ribeiro, C.E.G. (2015) *Desenvolvimento de um mármore artificial alternativo com resíduo da indústria de mármore e poliéster insaturado*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) –Campos dos Goytacazes– RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 109 p.

Rocha, M.C.G., Moreira, G.F., Silva, A.H.M.F.T., Pinto, D.C. (2008). Análise do comportamento mecânico de nanocompósitos de polipropileno e carbonato de cálcio. *Anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Porto de Galinhas: Hotel Summerville Resort.

Santos, J.P.L. dos, Rosa, L.G., Amaral, P.M. (2011) Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones. *Construction And Building Materials*. 25(1):171-174.

Silva, S.F. (2016) *Desenvolvimento e caracterização de um mármore artificial produzido a partir do aproveitamento do resíduo de mármore calcítico e resina epoxídica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) –Campos dos Goytacazes- RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 105p.

Silva, V.S.V. (2009) *Estudo das propriedades biocompatíveis de redes epoxídicas do éter diglicídílico do bisfenol-A*. Dissertação (Mestrado em Materiais Para Engenharia) -Itajubá- MG, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.

Souza, L.R., Ribeiro, R.C.C., Carrisso, R.C.C., Silva, L.P., Pacheco, E.B.A.V., Visconte, L.L.Y. (2009) Aplicação de resíduos de mármore na indústria polimérica. Série tecnologia ambiental. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 36p.

Souza, D.V., Vidal, F.W.H, Castro, N.F. (2014) Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de granitos comerciais. *Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente*. 4(1):17-24.

Tanaka, K., Minoshima, K., Grela, W., Komai, K. (2002) Characterization of the aramid/epoxy interfacial properties by means of pullout test and influence of water absorption. *Composites Science Technology*. 62:2169-2177.

Silveira, L.L.L. *et al.* (2014) Beneficiamento de rochas ornamentais, *In: Vidal, F.W.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N.F. (org.) Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento*. 1. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p 327 – 398.

Villaschi Filho, A., Pinto, M.M. (2000) Arranjos produtivos e inovação localizada: o caso do segmento de rochas ornamentais no noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Estudos Empíricos, Nota técnica 16, realizados pelo Instituto de Economia, UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, jul. 2000.

Weibull (2017) Using mixture designs in DOE++. Disponível em: <<http://www.weibull.com/hotwire/issue180/ht180-3.png>>. Acesso em 15 de fev. 2017.

Westrupp, F.L. (2008) *Análise da viabilidade da usinagem de compósito de matriz de epóxi com cargas de ferro visando a sua utilização em moldes de injeção*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Florianópolis- SC, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 81p.

Woodworking Network (2012) US demand for cast polymers to reach 251 Million Sq. Ft. in 2016. Disponível em: <<http://www.woodworkingnetwork.com/wood-markettrends/woodworkingindustry-trends-press-releases/US-Demand-for-Cast-Polymers-to-Reach-251-Million-Sq-Ft-in-2016-149739755.html>> Acesso em junho de 2012.