

PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO DE
ETAPA DE LAMINAÇÃO DE VIDRO PLANO EM MATRIZ DE RESINA
POLIMÉRICA

LUCAS BARBOSA DE SOUZA MARTINS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO – 2016

PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO DE
ETAPA DE LAMINAÇÃO DE VIDRO PLANO EM MATRIZ DE RESINA
POLIMÉRICA

LUCAS BARBOSA DE SOUZA MARTINS

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

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2016

PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO DE
ETAPA DE LAMINAÇÃO DE VIDRO PLANO EM MATRIZ DE RESINA
POLIMÉRICA

LUCAS BARBOSA DE SOUZA MARTINS

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

Aprovada em 26 de Fevereiro de 2016

Comissão Examinadora:

Prof. Angelus Giuseppe P. da Silva (Ph.D., Engenharia e Ciência dos Materiais) – UENF

Prof. Roberto da Trindade Faria Júnior (D.Sc., Física) – UENF

Prof. Mateus Carvalho Amaral (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – UFF

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – UENF

Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todo seu amor, demonstrado pelo dom da vida e por toda Sua obra.

À minha mãe, que sacrificou a própria saúde para me oferecer o maior conforto possível mediante tantas adversidades, sempre me incentivando carinhosamente a perseverar e triunfar nas dificuldades e valorizar o estudo como única certeza de sucesso.

Ao meu padrasto Amilto Toledo Rodrigues, que com muita dedicação sempre auxiliou em meus estudos e me ensinou sobre o lado prático da vida.

Ao meu irmão Bruno Barbosa de Souza Martins pelo companheirismo, cumplicidade e dedicação com que sempre esteve ao meu lado.

Ao meu prezado avô Aluizio Henrique de Souza, chefe de família dedicado e amigo carinhoso, que nunca duvidou de meu potencial, sempre se alegrou com todas as minhas conquistas e sempre foi um modelo de disciplina para toda a família. Sua memória, assim como seu sorriso, estará para sempre vívida na mente e coração de seus familiares. A ele minha eterna saudade.

À minha esposa Juliana Rocha Tavares, fiel companheira de todas as horas, que com muito carinho me ensinou a investir em minha capacitação profissional, me fez descobrir a beleza da carreira acadêmica, e sempre se dedicou integralmente a mim.

Aos demais familiares, que sempre acreditaram na minha capacidade, incentivaram meu estudo e me auxiliaram nos momentos difíceis.

Ao professor Carlos Maurício Fontes Vieira, pela ajuda, incentivo e compreensão com que dirigiu meu trabalho; por todas as oportunidades oferecidas e por todos os ensinamentos e experiências compartilhados.

A todos os demais professores, que, ao longo de minha vida, se dedicaram a me instruir e me ensinaram que o estudo certamente é o melhor investimento.

Aos companheiros de mestrado e pesquisa, que desempenharam papel fundamental em meus estudos e cujos quais sem o auxílio eu jamais teria finalizado esta pós-graduação.

A todos os meus amigos, por toda a alegria nos bons momentos e companheirismo nos momentos difíceis.

A todos os meus alunos, por me mostrarem que mais do que simplesmente ensinar um conteúdo, ser professor significa instruir para a vida e formar cidadãos.

A toda a população do Estado do Rio de Janeiro, que me possibilitou cursar um excelente programa de mestrado em uma universidade de qualidade e tradição.

Ao povo brasileiro, que me possibilitou ter um emprego público como professor em uma instituição de ensino tecnológico de excelência.

Ao Instituto Federal Fluminense, Diretoria de Ensino, Coordenação de Mecânica, e todos os companheiros de trabalho, pela confiança em minha capacidade e auxílio em meu aprendizado.

SUMÁRIO

I. LISTA DE TABELAS.....	iv
II. LISTA DE FIGURAS.....	vi
III. RESUMO.....	ix
IV. ABSTRACT.....	x

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objetivos Gerais.....	5
1.3. Objetivos Específicos.....	6
1.4. Justificativas.....	6

CAPÍTULO 2. REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1 – Definição de Compósitos.....	8
2.2 – Classificações dos Compósitos.....	9
2.3 – Características e Propriedades dos Compósitos.....	10
2.4 – Materiais Poliméricos para Matriz de Compósitos	14
2.5 – O Concreto Polimérico.....	17
2.6 – A Rocha Artificial.....	20
2.6.1 – Mármore Composto.....	25
2.6.2 – Superfície Cristalizada de Vidro.....	28
2.6.3 – Superfície de Quartzo.....	29
2.7 – O Vidro.....	30
2.8 – Tipos de Vidros.....	41
2.8.1 – Vidros Sodo-Cálcicos.....	42
2.9 – Propriedades dos Vidros.....	42
2.9.1 – Viscosidade.....	43
2.9.2 – Resistência ao choque térmico.....	44
2.9.3 – Resistência ao Ataque Químico.....	45

2.9.4 – Propriedades Ópticas.....	46
2.9.5 – Resistência Mecânica.....	46
2.10 – Vidro Temperado.....	47
2.11 – Vidro Residual da Viminias.....	51
2.12 – Propriedades do Vidro Residual da Viminias.....	53
2.12.1 – Composição Química.....	53
2.12.2 – Composição Mineralógica.....	56
2.12.3 – Distribuição do Tamanho de Partículas.....	57
2.12.4 – Morfologia.....	59

CAPÍTULO 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais Utilizados.....	61
3.1.1. Resíduo de vidro.....	61
3.1.2 Resina Epóxi.....	62
3.2 Caracterização das Matérias Primas.....	62
3.2.1 Avaliação do empacotamento ideal para trabalho.....	63
3.3 Produção das Placas de Rocha Artificial.....	65
3.4 Caracterização das Placas de Rocha Artificial.....	66
3.4.1. Propriedades Físico-Mecânicas das Placas de Rocha Artificial.....	66
3.4.1.1. Densidade, Absorção de Água e Porosidade Aparente.....	67
3.4.1.2. Resistência à Flexão.....	68
3.4.1.3. Resistência à Compressão.....	69
3.4.1.4. Impacto de corpo duro.....	70

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Avaliação do empacotamento ideal para trabalho.....	71
4.2. Densidade, Absorção de Água e Porosidade Aparente.....	72
4.3. Resistência à Flexão.....	78
4.4. Resistência à Compressão.....	82
4.5. Impacto de corpo duro.....	88

5. CONCLUSÕES.....92

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Características e Limitações das Resinas Termorrígidas (Aquino, 2003)	16
Tabela 2 – Condições de Moldagem de Algumas Resinas Termorrígidas (Aquino, 2003)	17
Tabela 3: Propriedades típicas do concreto polimérico (ACI 548.6R, 1996).....	20
Tabela 4: Comparação de Testes de Laboratório de mármore composto (Mármore composto, 2014).	26
Tabela 5: Comparação de resistência à manchas de mármore composto (Fibercenter, 2014)	27
Tabela 6: Comparação de resistência ao impacto Charpy de mármore composto (Fibercenter, 2014)	27
Tabela 7: Comparação de resistência à abrasão de mármore composto (Fibercenter, 2014).	28
Tabela 8: Propriedades Físicas da Pedra Artificial à Base de Cristais de Vidro (Pedra Artificial, 2014)	29
Tabela 9: Propriedades Físicas de rocha artificial da classe Superfície de Quartzo (Pedra Artificial, 2014)	30
Tabela 10: Definições de vidros encontrados em livros-texto publicados na década de 90. (Alves et al., 2001)	31
Tabela 11: Composição das principais famílias de vidros a base de sílica. (Alves et al., 2001)	33
Tabela 12: Espécies químicas formadoras de vidro pelo processo de fusão-resfriamento. (Alves et al., 2001)	34
Tabela 13 : Espécies químicas (agentes de coloração) utilizados para dar cor aos vidros. (Alves et al., 2001)	35
Tabela 14 : Composição química de vidros comerciais selecionados. (McLellan et al., 1984; Shi et al., 2007)	36
Tabela 15 : Diversos óxidos usados nos vidros para propósitos diversos. (Maia, 2003)	40
Tabela 16: Composições típicas de diversos vidros comerciais (Akerman, 2000).....	41

Tabela 17: Valor do coeficiente de viscosidade de algumas substâncias em comparação ao vidro. (Akerman, 2000)	44
Tabela 18: Valor da perda por reflexão de acordo com a índice de refração. (Akerman, 2000).....	46
Tabela 19: Resistência Mecânica real do vidro em diversas situações. (Akerman, 2000).....	47
Tabela 20 : Características dos dois tipos comerciais de fornos para têmpera de vidros (Abravidro, 2008).....	50
Tabela 21: Composição química de amostra de Resíduo Viminás (Licurgo, 2015).....	54
Tabela 22: Classificação granulométrica do resíduo Viminás (Licurgo, 2015).....	58
Tabela 23: Propriedades químicas e físicas da resina de epóxi empregada (Zacharuk et al., 2009).....	62
Tabela 24: Misturas idealizadas de faixas de granulometrias usadas no teste de compactação.....	65
Tabela 25: Empacotamento das misturas de diferentes faixas granulométricas.....	71
Tabela 26: Densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente para Rocha Artificial de Vidro, Mármore Artificial e Mármore Comercial.....	77
Tabela 27 – Resultados de flexão de rocha artificial com 75% em fração de volume de resíduo de vidro e 25% Epóxi.....	79
Tabela 28 – Propriedades de compressão para rocha artificial de resíduo de vidro.....	84
Tabela 29. Propriedades relatadas para os mármore compactos (Ribeiro, 2015).....	87
Tabela 30. Energia de impacto de corpo duro necessária para quebra de placas de rocha artificial de resíduo Viminás.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação ilustrativa entre um tipo de Aço, uma liga de alumínio e materiais compósitos (Chawla, 1987; Chawla, 1983).....	2
Figura 2 – comparação de propriedades de compósitos e outros materiais (CTB)	3
Figura 3 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos (adaptado de Callister, 2007)	10
Figura 4 – Diferentes morfologias associadas a partículas de silicatos. Argila:(a) e (b); Silte:(c) (Monteiro et al., 2004)	13
Figura 5 – Esquema da microestrutura de um compósito com matriz cerâmica vermelha (Souza et al., 2003)	13
Figura 6 – Diferentes micromorfologias reconhecidas em partículas de diamante obtidas sinteticamente a altas pressões e altas temperaturas (Monteiro et al., 2006)	14
Figura 7. Representação das cadeias de epóxi formadas pelo processo de polimerização (Daghsh, 2013)	19
Figura 8. Diagrama da geração de resíduos e desperdícios durante o processo, para o setor de rochas ornamentais (Pereira, 2006)	22
Figura 9: Etapas de fabricação da pedra artificial (COMPAC MARMOL DE QUARTZ, 2010)	24
Figura 10: Representação bidimensional (a) do arranjo cristalino simétrico e periódico de um cristal de composição A_2O_3 ; (b) representação da rede do vidro do mesmo composto, na qual fica caracterizada a ausência de simetria e periodicidade. (Alves et al., 2001)	37
Figura 11: Estrutura do Quartzo (1º), vidro de Sílica (2º) e vidro de Sílica com adições de Sódios (Na) e Cálcio (Ca) (3º), respectivamente. (Shi et al., 2007).....	38
Figura 12: Funções relativas dos óxidos no vidro. (Akerman, 2000).....	43
Figura 13: Quantidade de sílica removida de um vidro em função do pH da solução (Akerman, 2000).....	45
Figura 14: Estados de tração e compressão no vidro em função da têmpera (Manual Técnico SunGuard, 2010).....	48

Figura 15: Tensões induzidas no vidro temperado (Martins et al., 2004; Bauer, 1991).....	49
Figura 16 – Fluxograma do processo de obtenção do resíduo de vidro (Antônio, 2012).....	52
Figura 17: Imagens de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) para amostra de resíduo de vidro da Viminás, para dois pontos (Licurgo, 2015).....	55
Figura 18 – Difractometria de Raio-X de amostra de resíduo Viminás (Licurgo, 2015).....	57
Figura 19 – Gráfico de granulometria, mostrando tamanho de partícula por massa acumulada de resíduo de vidro da Viminás (Licurgo, 2015).....	58
Figura 20 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra de resíduo de corte e lapidação de vidro da Viminás, contendo aumentos de 30, 200, 100 e 1500, respectivamente (Licurgo, 2015).....	60
Figura 21 – Fluxograma dos Procedimentos Experimentais.....	63
Figura 22 – Densidade aparente da rocha artificial de vidro em comparação com o mármore calcítico e o mármore artificial.....	74
Figura 23 – Comparação entre a absorção de água da rocha artificial de vidro e dos mármore artificiais e comercial.....	75
Figura 24 – Comparação entre a porosidade aparente da rocha artificial de vidro em comparação com o mármore calcítico e o mármore artificial.....	77
Figura 25 – Curvas de força VS. deflexão para teste de flexão de rocha artificial com 75% em fração de volume de resíduo de vidro e 25% Epóxi.....	78
Figura 26 – Tensão de ruptura em flexão para Mármore Calcítico (MC), Mármore Artificial (MA) e Rocha Artificial de Vidro (RAV), respectivamente.....	80
Figura 27 – Aspecto macroscópico da ruptura de amostras de compósitos de poliéster com diferentes frações de volume de resíduo de vidro.....	82
Figura 28 – Curvas típicas de Compressão vs. Deformação para rocha artificial de resíduo de vidro.....	83
Figura 29 – Resistência à Compressão para Mármore Calcítico (MC), Mármore Artificial (MA) e Rocha Artificial de Vidro (RAV), respectivamente.....	85

Figura 30 – Módulo de Elasticidade em compressão para Mármore Calcítico (MC), Mármore Artificial (MA) e Rocha Artificial de Vidro (RAV), respectivamente.....	85
Figura 31 – Aspecto macroscópico da ruptura de amostras de compósitos de poliéster com diferentes frações de volume de resíduo de vidro.....	88
Figura 32 – Aspecto típico dos corpos de prova após o ensaio de impacto de corpo duro.....	90
Figura 33 – Aspecto típico de superfície de fratura de corpo de prova de rocha artificial de vidro, por ensaio de impacto de corpo duro.....	91

Resumo do projeto apresentado ao LAMAV / CCT / UENF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO DE ETAPA DE LAMINAÇÃO DE VIDRO PLANO EM MATRIZ DE RESINA POLIMÉRICA

RESUMO

Este trabalho consiste no estudo de um tipo específico de rocha artificial, para aplicação em revestimentos de interiores, utilizando como carga mineral rejeitos da indústria de beneficiamento e tratamento de vidro plano de vitória - ES. Por meio de uma metodologia experimental, foram estudadas as propriedades físicas e mecânicas de rejeitos de vidro e de placas de compósito de matriz de 25% de epóxi com adição de 75% destes rejeitos de vidro, em uma faixa específica de granulometrias. As placas foram produzidas em uma forma em aço, com o auxílio de compressão. Para as peças produzidas foram determinadas a densidade aparente, absorção de água, a porosidade aparente, resistência à flexão, compressão e impacto de corpo duro. O tipo de fratura foi avaliado, buscando justificativas para as propriedades mecânicas encontradas. Os resultados mostraram que o compósito deste trabalho é mais resistente do que o mármore natural calcítico, podendo ser um possível substituto para o mesmo. Porém, também se verificou que a rocha artificial de vidro é menos resistente do que o mármore artificial, o que indica que esta proposta de rocha artificial ainda deve ser melhorada para se tornar competitiva em seu mercado.

Palavras chave: compósitos, propriedades físicas e mecânicas, rocha artificial, resíduo de vidro.

Abstract of project presented to LAMAV / CCT / UENF as part of the requirements for obtaining the title of Master in Engineering and Science of Materials.

ARTIFICIAL STONE PRODUCTION USING WASTE FROM GLASS SHEETING
PROCESSES IN POLYMERIC MATRIX.

This work is a study of a specific artificial stone, for interiors coverings, using as load waste of glass from the industries of a glass manufacture, in Vitória, Espírito Santo, Brazil. Through an experimental methodology, were studied the physical and mechanical properties of glass waste and composites tiles with matrix of 25% epoxy with addition of 75% this glass waste as load in a specific range of particle sizes. The tiles were produced in a steel mold, under compression. Produced tiles density, water absorption, porosity, compressive strength, bending strength, and resistance to hard body impact were determined. The crack type was analyzed in order to justify the mechanical properties that were found. The results showed the glass composite stronger than natural calcium marble, and as a possible replacement to it. However, the glass artificial stone also revealed to be less resistant than commercial artificial marble, which indicates that it need to be improved to become a competitive material in market.

Keywords: composite materials, physical and mechanical properties, artificial stone, glass waste

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Iniciais

Com o avanço da tecnologia, a humanidade busca cada vez mais atender a diferentes necessidades da sociedade que surgem e aumentam a cada dia. Para tal, materiais são desenvolvidos freqüentemente, buscando-se atender situações das mais adversas. Historicamente se definiu três classes de materiais: metais, polímeros e cerâmicas. Contudo, dada à sofisticação das abordagens tecnológicas para problemas que surgiram nas últimas décadas, criou-se a necessidade de se desenvolver materiais que fugissem ao comportamento padrão destas três classes citadas. Neste contexto, uma nova classe de materiais se consolidou como promissora solução às mais diversas aplicações: os materiais compósitos.

Os materiais compósitos são feitos pela combinação de um ou mais materiais simples de naturezas diferentes. Esta combinação de materiais e, conseqüentemente, de características, permitiu aos materiais compósitos alcançar propriedades que seus componentes jamais alcançariam separadamente, através da combinação de mecanismos físicos, químicos e mecânicos (estruturais). Isto possibilitou um maior avanço na tecnologia, por permitir agora ao ser humano atuar em novas áreas antes impossibilitadas. A grande ênfase dos materiais compósitos vem de suas diferentes aplicações científicas e industriais, principalmente quando associados aos reforços e matrizes de todos os tipos como metálicos, cerâmicos e poliméricos (Mazumdar, 2002).

Uma comparação entre os compósitos e duas das principais ligas metálicas de engenharia está presente na Figura 1, onde são avaliadas cinco propriedades destes materiais. Como se pode observar, os compósitos se mostram melhores do que estas duas ligas metálicas em todas as características listadas, denunciando o grande potencial deste tipo de material na engenharia.

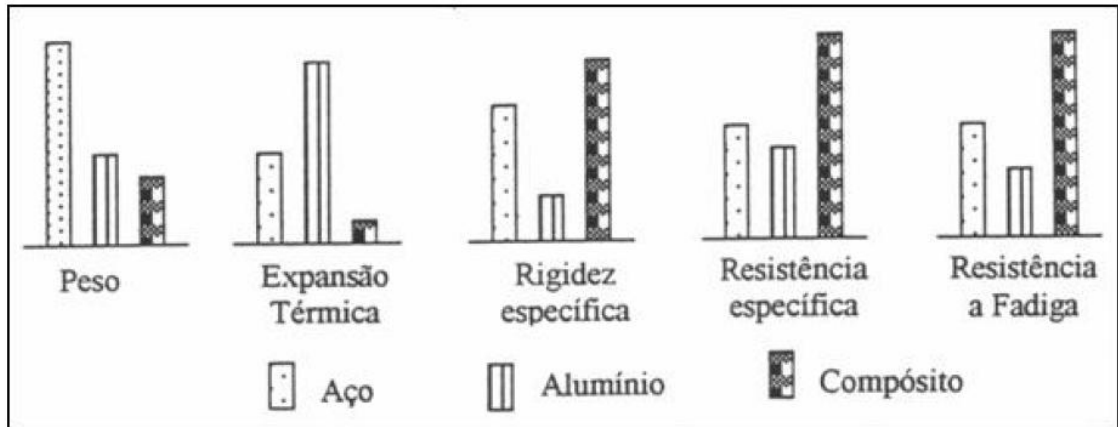


Figura 1 – Comparação ilustrativa entre um tipo de Aço, uma liga de alumínio e materiais compósitos (Chawla, 1987; Chawla, 1983)

Como dado adicional, têm-se a Figura 2, que compara os compósitos a diversos tipos diferentes de materiais, sob alguns parâmetros. Nestas figuras é possível observar uma característica a mais, que é a variação das propriedades dos compósitos e de outros materiais, em virtude dos diferentes tipos destes materiais que se pode criar, com diferentes composições e naturezas. Em todo caso, pode-se verificar que os compósitos apresentam diversas características interessantes que justificam sua aplicação em engenharia em comparação com outros materiais, especialmente pelo fato de se conseguir variar muito algumas destas características, de maneira a adaptar o compósito a aplicações específicas.

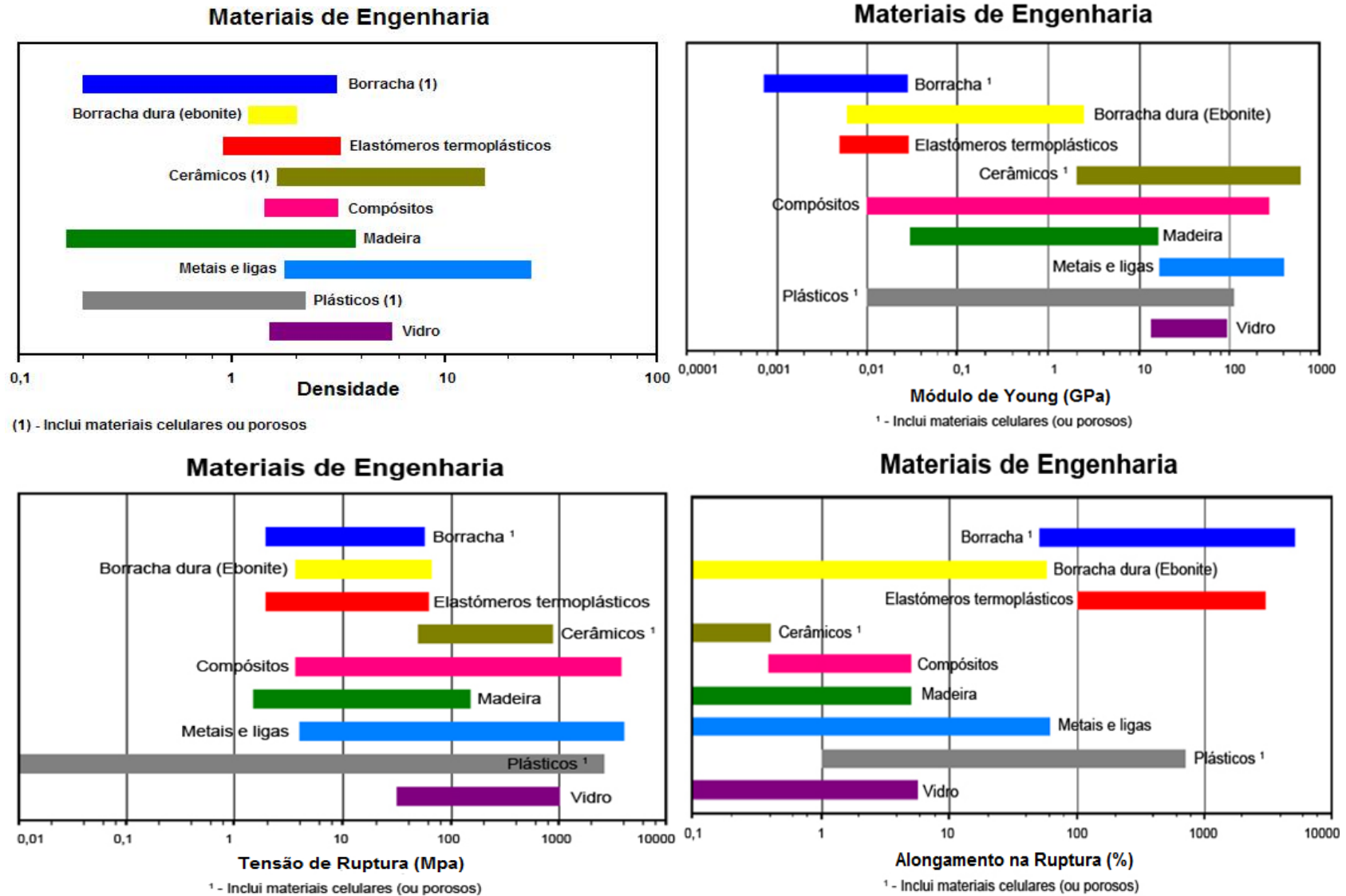


Figura 2 – comparação de propriedades de compósitos e outros materiais (CTB)

Diante de toda essa diversidade de aplicações, os materiais compósitos não têm sua importância ligada somente à possibilidade de inovar com a obtenção de novos materiais, mas pela possibilidade de se ter uma maior flexibilização de novos projetos, a partir não só do material, mas também da orientação, da distribuição e da seleção apropriada do reforço (Callister, 2007).

Com o advento e desenvolvimento da indústria e processo voltados para bens de consumo, rapidamente surgiram diversos produtos que se tornaram primordiais para o consumidor. Desta forma, criou-se, ao longo das décadas, uma crescente demanda por estes produtos, de forma que atualmente as indústrias que exercem estas atividades são essenciais para a sociedade e estão em constante expansão para atender às demandas. Contudo, esta expansão, por mais importante que seja na atualidade, é acompanhada pelo aumento dos diversos resíduos gerados por estas indústrias, de natureza líquida, sólida ou gasosa e com formas e características bem variadas. (Porras et al., 2008; Rodrigues, 2012; Dondi et al., 1997; Candido, 2012). Desta forma, torna-se crucial a busca por alternativas tecnológicas para o reaproveitamento destes resíduos, dado as vantagens inerentes à reutilização de resíduos (Porras et al., 2008; Rodrigues, 2012; Dondi et al., 1997; Candido, 2012, Shi et al., 2007; Ribeiro, 2011).

Uma alternativa interessante de reaproveitamento de materiais é a chamada reciclagem secundária de um resíduo em outro processo produtivo (Carvalho, 2005). Segundo Rodrigues, 2012: “As vantagens do reaproveitamento de resíduos poluentes provenientes do setor produtivo podem ser analisadas pela redução do consumo de matéria-prima natural e de poluição ambiental. Portanto, a reciclagem destes materiais denominados resíduos sólidos, vincula o crescimento industrial à problemática ambiental, tendo como consequência o desenvolvimento sustentável”, pois a atividade industrial que gera resíduos, além de trazer impactos ambientais e sociais, também constitui uma forma de desenvolvimento não sustentável. (Rodrigues, 2012; Gonçalves, 2000; Ribeiro, 2011)

Um resíduo que vêm ganhando grande projeção é o resíduo proveniente do processamento industrial do vidro, especialmente de etapas de corte e lapidação. Apesar do vidro e seu resíduo serem totalmente recicláveis, este processo demanda boa logística de distribuição e manejo, além de cuidados especiais, devido à possibilidade de se obter partículas de pequena granulometria. Adicionalmente, o descarte do vidro em lugar impróprio pode causar grandes problemas ambientais,

dada à sua dificuldade de degradação por ação da natureza e a facilidade de locomoção deste material por ação da água, quando possui tamanho de partícula reduzido. Por estas razões, o reaproveitamento deste resíduo traria as vantagens de se reduzir o impacto ambiental, conservando o meio ambiente através da economia de recursos naturais; aumentar a percepção do público acerca da problemática dos resíduos e importância de reciclagem; e abrir margem para a reutilização de diversos tipos de vidros, sem que um tipo comprometa o aproveitamento de outro, podendo ainda se combinar resíduos vítreos diferentes em uma mesma massa em comum. No mais, a sua utilização na condição em que é obtido, por incorporação direta a um determinado produto, trará as vantagens de economia de energia, redução de emissão de poluentes ligados a atividades industriais e economia dos custos relativos à produção e reciclagem deste material. (Cavalcanti et al., 2007; Ribeiro, 2015; Anghinolfi, 2013; Shi et al., 2007)

Neste contexto, O Brasil importa uma quantidade considerável de materiais conhecidos como rochas artificiais, que consistem em materiais compósitos que apresentam propriedades mecânicas similares às das rochas naturais, possuindo ainda uma menor absorção de água. Apesar destes materiais apresentarem preço ainda elevado para o Brasil, as vantagens apresentadas pelos mesmos, especialmente através de suas propriedades mecânicas e estéticas (como resistência à flexão e brilho superficial), geralmente superiores às das cerâmicas ditas de “primeira linha”, fazem deste material uma excelente alternativa à rocha natural. Tais materiais apresentam ainda uma grande vantagem que consiste na possibilidade de serem facilmente fabricados utilizando resíduos particulados, como os resíduos de vidro citados anteriormente. (Alicante et al., 2014, Lee et al., 2008, Ribeiro, 2011).

1.2 – Objetivo Geral

Estudar a viabilidade técnica da produção de rochas artificiais utilizando resíduos de etapa de corte e lapidação da indústria do vidro plano e resina de epóxi, na forma de ladrilhos, para a produção de revestimentos de interiores e exteriores.

1.3 – Objetivos específicos

- Determinar características mineralógicas, químicas, físicas e morfológicas do resíduo;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos. Estas propriedades são: densidade, absorção de água, porosidade aparente, tensão de ruptura à compressão, tensão de ruptura à flexão e resistência ao impacto de corpo duro;
- Correlacionar as propriedades físicas e mecânicas das placas curadas com a estrutura;

1.4 – Justificativas

Os compósitos correspondem à classe mais versátil de materiais na moderna tecnologia. Por serem fabricados através da associação “engenharia” de outras classes de materiais como polímeros, metais e cerâmicos, os compósitos podem apresentar uma combinação única de propriedades tais como: resistência mecânica, leveza e tenacidade. Outra característica fundamental dos compósitos, que justifica o presente trabalho, é a possibilidade dos mesmos serem fabricados a partir de rejeitos de atividade industrial, sobretudo na forma de particulado fino. Eventualmente estes compósitos seriam sucedâneos dos granitos e mármore naturais, evitando o acúmulo de resíduos da indústria do vidro, gerando economia referente à estocagem ou reaproveitamento destes resíduos e exploração de rochas naturais e, ainda, possibilitando a obtenção de propriedades mecânicas, térmicas, químicas e estéticas não alcançáveis pelas rochas ornamentais naturais.

O trabalho proposto deverá trazer vantagens ambientais, científicas, tecnológicas, econômicas e energéticas, permitindo o aproveitamento de resíduo industrial. Justifica-se o presente projeto de pesquisa pela necessidade de um estudo de novos materiais que não estejam sendo explorados em suas potencialidades ou devidamente reciclados, como é o caso do resíduo de vidro, tendo em vista futuras aplicações deste material como reforço ou matriz de compósitos poliméricos a um baixo custo. Considerando ainda que a produção deste tipo de rejeito é elevada, uma linha de produção capaz de incorporá-lo à altura da oferta existente poderia baratear ainda mais este tipo de compósito criado.

Do ponto de vista ambiental justifica-se o trabalho pelo aproveitamento integral dos resíduos provenientes de etapa de laminação de vidro em planta industrial e pela possível substituição de produtos convencionais a base de mármore e granito, poupando parcialmente, desta forma, o impacto ambiental provocado pela extração deste tipo de rocha ornamental.

No âmbito científico, justifica-se pelo entendimento dos mecanismos de reforço e interação entre as partículas de material vítreo e as matrizes de epóxi.

O compósito deste trabalho é economicamente e Socialmente justificado pelo custo inicialmente baixo, quando comparado com rochas naturais, como o mármore ou granito. Desta forma, poderia ser um incentivo para o Brasil no aspecto social, em particular o Norte Fluminense, onde, a partir deste estudo, seria possível implementar uma metodologia de produção, que geraria renda para os trabalhadores da região, constituindo-se um grande atrativo para implantação de indústrias visando o mercado dos grandes centros (Rio de Janeiro, Vitória, São Paulo, etc.) e até mesmo para exportações.

É por tantas justificativas que o trabalho proposto apresenta um grande impacto ambiental, científico, tecnológico, econômico e energético para a região de Campos dos Goytacazes. Além de ser utilizada na arquitetura e urbanismo, espera-se que a partir desse estudo possa ser enfatizada a aplicação de novos materiais feitos a partir do reaproveitamento de resíduos em outros setores, tendo em vista que este material é relativamente acessível, seu reaproveitamento é ambientalmente correto, seu custo é relativamente baixo e consiste em um bom exemplo para o desenvolvimento sustentável.

É importante também enfatizar que a utilização mais nobre de resíduos da indústria do vidro na forma de produtos com maior valor agregado, como os compósitos, permite solucionar um problema crônico de reciclagem brasileira, mais especificamente no estado do Espírito Santo. Sem que seja encontrada uma utilização economicamente viável para os rejeitos de material vítreo, esses são estocados em local apropriado, constituindo montantes cada vez maiores de rejeitos não degradáveis, ou são reaproveitados na linha de produção de origem, com um custo maior. Ou seja, a poluição resultante desta prática acaba comprometendo a qualidade ambiental. E para que isso futuramente possa acabar, necessita-se de pesquisas de novos meios de reutilização destes materiais, em especial o rejeito de etapa de laminação de vidros.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1 – Definição de Compósitos

Uma boa definição para compósito diz que o mesmo é fruto da combinação de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, de diferentes geometrias, estados físicos ou composição química, em escala macroscópica ou microscópica, em que uma parte dos componentes oferece a maior propriedade (mecânica) desejada (componentes de reforço), e os demais componentes (matriciais) constituem uma matriz que transfere os esforços para os elementos de reforço através da interface entre os constituintes (Junior, 1984; Junior, 1989; Lubin, 1982; Nunes, 1989).

Os compósitos são constituídos, em sua essência, por uma matriz que envolve a fase de reforço, proporcionando a possibilidade de transmissão de esforços entre os dois, através de uma interface de contato (Hull, 1986). A eficiência da transmissão de esforços da matriz para a fase de reforço, bem como a distribuição destas cargas está diretamente ligada às propriedades físicas e químicas desta interface. Ainda há métodos químicos e físicos para mudar a estrutura e composição da fase de reforço, no intuito de se proporcionar uma melhor interface de contato (Bledzki et al., 1999; Tjong et al., 1999). Adicionalmente, a matriz confere à fase de reforço uma resistência a abrasão e degradação pelo meio ambiente (Junior, 1984; Junior, 1989), bem como pode servir de elemento de menor custo que agrega volume ao material, o que pode ser importante para aplicações de cunho industrial. A fase de reforço possui as principais características e composições químicas necessárias para se conferir ao material as devidas propriedades mecânicas e térmicas requeridas para diversas aplicações (Aquino, 2003).

Considerando que os compósitos são produzidos para aplicações bem específicas, é normal que estas aplicações envolvam esforços preferenciais dos materiais em direções específicas. Considerando isso, é normal se alinhar a fase de reforço dos compósitos em direções que favoreçam sua melhor utilização de acordo com a geometria desta fase, o que diminui também a quantidade de material requerido para a tarefa (Silva, 1991), contribuindo novamente para um baixo custo agregado ao material. E em função do tipo de alinhamento da fase de reforço, os compósitos podem ser classificados em fibrosos, laminados ou particulados. Contudo, as propriedades dos compósitos não dependem apenas de seus

componentes, mas também outros fatores, como principalmente a proporção relativa entre eles, a qualidade da interface reforço-matriz e a morfologia do sistema (Castelanos, 1987; Feldmanm, 1990; Lubin, 1982; Freire, 1992; English, 1987; Hayson et al., 1986).

2.2 – Classificações dos Compósitos

Os compósitos são materiais de engenharia desenvolvidos com o intuito de reunir características particulares de componentes individuais, de maneira a se ter um material que apresente desempenho melhor do que seus componentes apresentariam individualmente. Os compósitos são visados especialmente para aplicações onde se necessita propriedades específicas, muitas vezes incomuns, não encontradas comumente em outros materiais, e estes compósitos, dessa forma, podem ser constituídos de materiais de diferentes naturezas e propriedades. Desta forma, normalmente os compósitos apresentam duas fases constituintes apenas: a matriz e a fase de reforço; e em virtude da natureza dessas fases constituintes, das quantidades relativas das fases e da geometria da fase de reforço (tamanho, forma das partículas, orientação e distribuição na matriz), pode-se classificar os compósitos em diversos tipos. (Callister, 2007). As propriedades dos compósitos também são determinadas por estes parâmetros, acrescidos de alguns parâmetros estruturais, como a capacidade de adesão da fase de reforço na matriz (caráter físico-químico) e teor de vazios estruturais e outras imperfeições estruturais.

Segundo Aquino, 2003, a fase de reforço, ou elemento estrutural, “pode ser um material orgânico ou inorgânico (metálico ou cerâmico), de forma regular ou irregular, fibroso (tecido ou não-tecido) ou pulverulento (esférico ou cristalino), com os fragmentos achatados (como flocos) ou como fibras muito curtas, de dimensões quase moleculares, de material monocristalino (“whiskers”)”.

Apesar das diversas classificações possíveis, pode-se adotar um sistema simples de classificação, Figura 3, onde pode-se dividir os compósitos em três grandes grupos: compósitos reforçados com partículas; os compósitos reforçados com fibras; e compósitos estruturais. Nesta classificação, os primeiros dois grandes grupos são diferenciados pela geometria da fase de reforço, onde para o primeiro tipo as partículas têm dimensões aparentemente iguais e para o segundo tipo as partículas têm uma dimensão muito superior às demais, e o terceiro tipo de

compósito consiste em uma mistura de outros compósitos com materiais homogêneos. Esta classificação leva em conta que as propriedades destes três tipos de compósitos são bem diferenciadas e se comportam de maneira diferente para os demais parâmetros, como teor das fases constituintes.

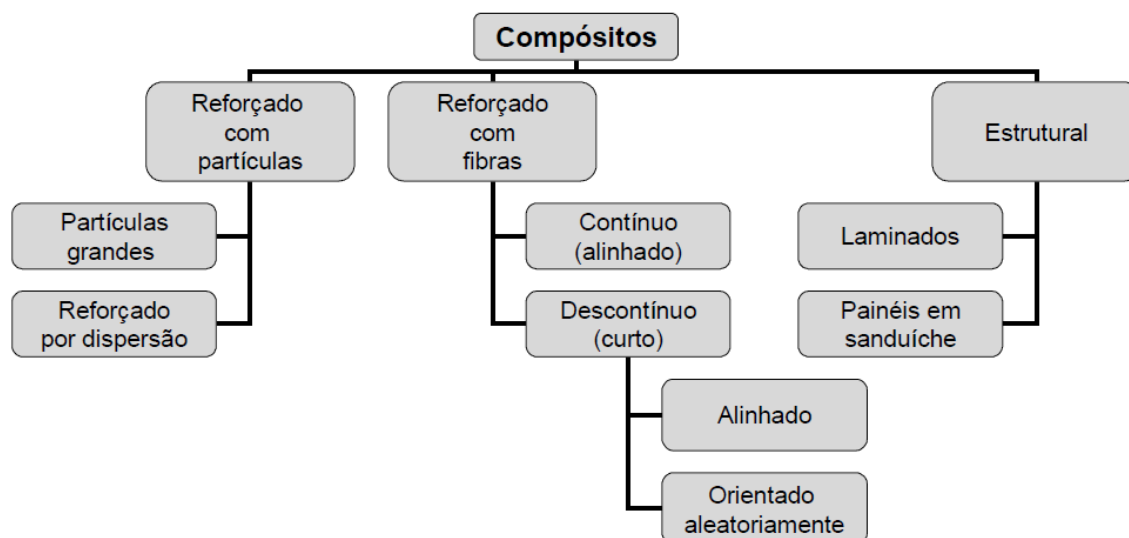


Figura 3 – Esquema de classificação para os vários tipos de compósitos (adaptado de Callister, 2007).

2.3 – Características e propriedades dos Compósitos

A reconhecida vantagem que os compósitos apresentam em relação aos materiais monofásicos convencionais, ou mesmo aqueles naturalmente conjugados, deve-se à possibilidade de se alterar propositalmente suas propriedades (Broutman et al., 1967; Richardson, 1977; Hull, 1986; Lubin, 1982; Sheldon, 1982; Gerstle, 1985; Chou et al., 1986; Chawla, 1987; Gibson, 1994; Mathews et al., 1999). Tal vantagem está associada às modificações intencionadas nos parâmetros físicos, químicos e estruturais das fases constituintes do compósito. Nos casos mais evidentes de compósitos constituídos de uma só matriz envolvendo outras fases, as alterações podem ser feitas tanto na matriz contínua quanto nas demais fases de reforço. No caso dos compósitos estruturais sem definição de matriz (Callister, 2007), qualquer das fases poderia também sofrer, de forma independente, modificações nos seus parâmetros físicos, químicos e estruturais.

Os principais parâmetros que definem as propriedades dos materiais compósitos são (Chawla, 1983; Hull et al., 1986):

- Composição das fases;
- Quantidade relativa das fases;
- Tamanho comparativo das fases;
- Distribuição das fases;
- Orientação espacial das fases;
- Textura, se existente, em cada fase;
- Morfologia das fases.

Este último parâmetro, que está ligado à forma geométrica assumida pelas fases, sobretudo àquelas dispersas na matriz contínua, nem sempre recebe a devida atenção quando se procura projetar um material compósito. Por exemplo, um cermeto, também chamado de cermet, composto de partículas cerâmicas duras em matriz metálica dúctil é especificado em termos do tamanho e da quantidade das partículas cerâmicas (Callister, 2007).

Em alguns casos práticos, manifesta-se a preocupação de como estejam distribuídas estas partículas na matriz, mas quase nunca de como deva ser sua morfologia (Youngquist, 1983; English, 1987). Entretanto, é reconhecido que a morfologia tem um papel relevante na formação de concentradores de tensões que interferem diretamente na fratura do material (Wulpi, 1985). Mais ainda, em compósitos sinterizados, que é o caso típico dos cermets, a morfologia da partícula cerâmica poderá interferir diretamente na porosidade final. Assim, dependendo também da morfologia das partículas, sensíveis alterações podem ser causadas nas propriedades do compósito.

A morfologia, tanto das fases quanto do compósito ao todo, desempenha um papel crucial na resistência do próprio compósito, pois ela está diretamente associada à formação de concentradores de tensões na superfície do material, o que influencia diretamente a fratura do material (Wulpi, 1985). Contudo, apesar deste fato, nem sempre se toma precauções devidas com relação a esta, sendo muitas vezes, mais corriqueiro se preocupar com a distribuição de fases no compósito (Youngquist, 1983; English, 1987).

A complexidade morfológica das fases em um compósito, tanto de fibras quanto de outras fases dispersas, como os carbetos em um cermeto ou as partículas de Dióxido de Tório (ThO_2) no níquel TD, manifesta-se particularmente a nível microestrutural. Desta forma, em muitos casos, torna-se importante o papel da micromorfologia no comportamento dos compósitos.

A micromorfologia das fases constituintes ganha um papel preponderante no caso dos nanocompósitos. Nesta classe de materiais, o tamanho relativamente pequeno das fases gera uma grande relação de área superficial para o volume das fases. Conseqüentemente, o formato das fases pode alterar substancialmente a área de contato entre o reforço e a matriz, ainda que mantidos constantes os outros parâmetros estruturais. Por exemplo, nanocompósitos em que as partículas sejam esféricas terão comportamento bem diferente daqueles em que as partículas sejam discos com pequena espessura (Iyer et al., 1999). Este fato tem importante interesse no processamento de cerâmicas vermelhas argilosas (Monteiro et al., 2004), nas quais a taxa de sinterização pode ser definida através da velocidade de difusão pela equação:

$$dx / dt = [8D_0 \exp(- E_v / kT) \gamma] / kTe\delta \quad (1)$$

Onde D_0 é a difusividade, E_v , a energia de ativação, k a constante de Boltzman, T a temperatura absoluta, γ , a tensão superficial, e , a espessura das plaquetas de argila e, δ , a densidade. A Figura 4 ilustra exemplos de diferentes micromorfologias associadas a partículas de argila que servem de matriz para compósitos de cerâmica vermelha incorporada com aditivos ou resíduos industriais.

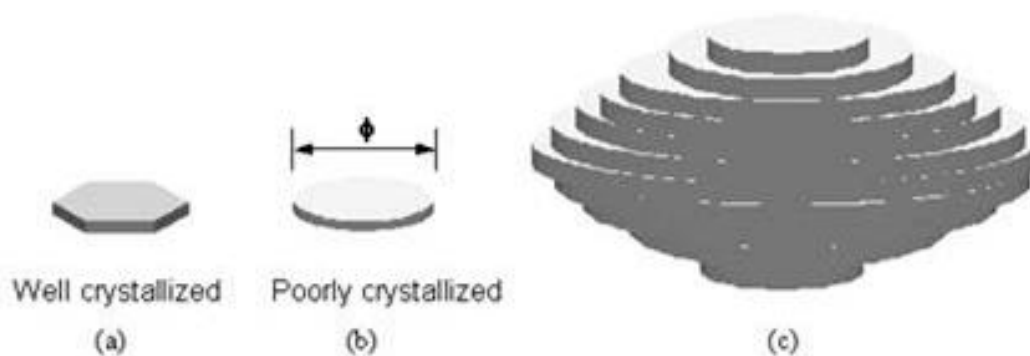


Figura 4 – Diferentes morfologias associadas a partículas de silicatos. Argila:(a) e (b); Silte:(c) (Monteiro et al., 2004)

Um esquema da possível microestrutura deste tipo de compósito, evidenciando a micromorfologia das fases, está apresentado na Figura 5.

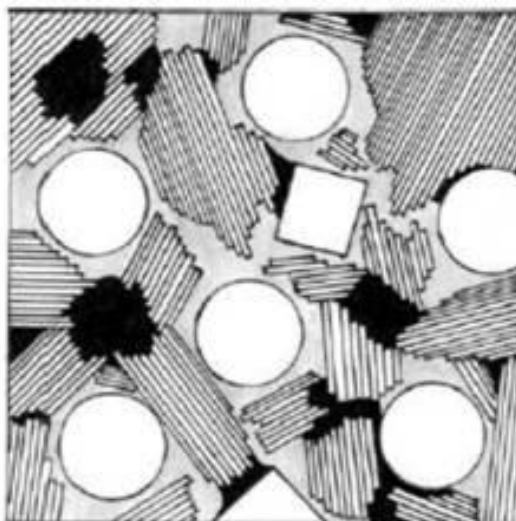


Figura 5 – Esquema da microestrutura de um compósito com matriz cerâmica vermelha (Souza et al., 2003).

Pesquisas recentes (Monteiro et al., 2004; Souza et al., 2003; Monteiro et al., 11/2004; Monteiro et al., 2005) demonstram que as características micromorfológicas podem contribuir para substanciais modificações nas propriedades mecânicas de alguns tipos de compósitos. Para ilustrar esta questão, a Figura 6 mostra as diferentes micromorfologias de partículas de diamante.

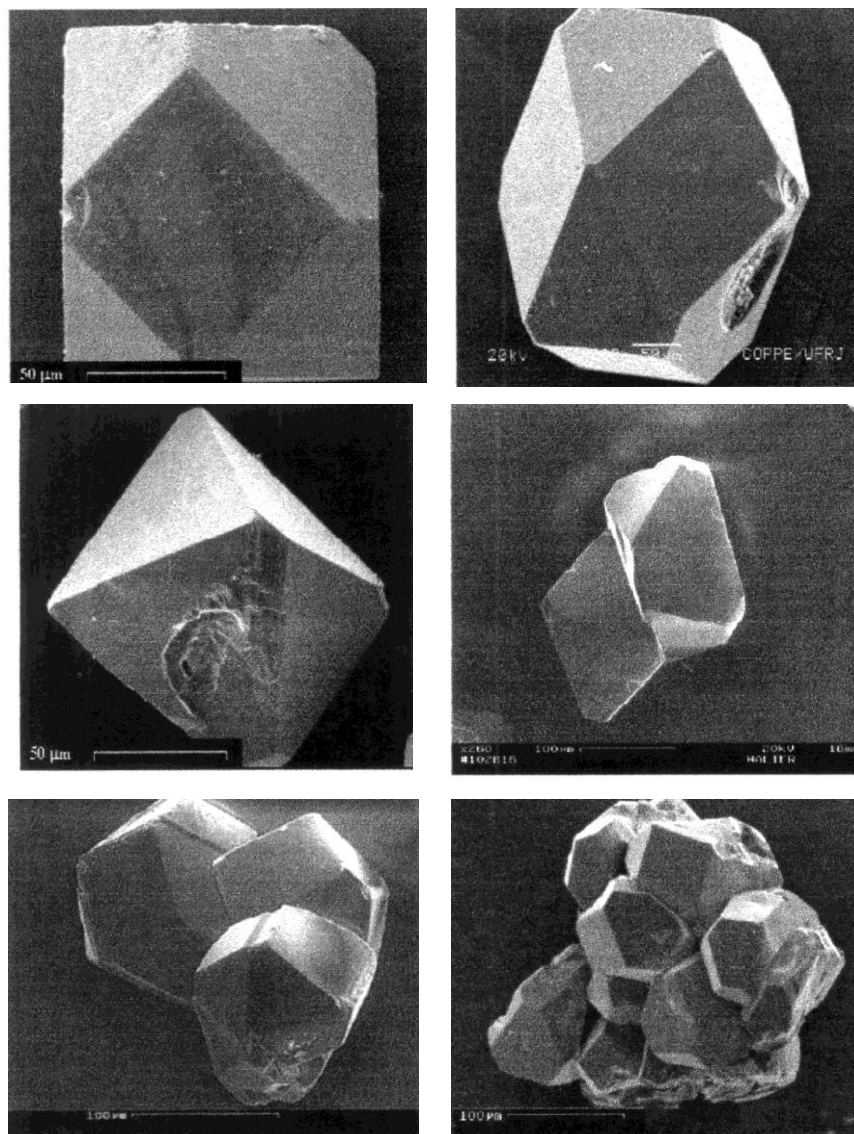


Figura 6 – Diferentes micromorfologias reconhecidas em partículas de diamante obtidas sinteticamente a altas pressões e altas temperaturas (Monteiro et al., 2006).

2.4 – Materiais Poliméricos para Matriz de Compósitos

Segundo Aquino (2003): “Os polímeros destacam-se pela sua facilidade de conformação, baixa massa específica e, na maioria dos casos, alta resistividade elétrica. Suas estruturas possuem ligações químicas covalentes, originando macromoléculas que podem ser coesas entre si através de ligações de Van de Waals. Quando submetidos a temperaturas superiores à temperatura particular de fusão, o polímero sofre mudanças em seu estado físico, ou ainda suas

macromoléculas podem estar coesas por ligações através de ponte de hidrogênio ou ligações cruzadas”.

É comum se chamar um polímero, quando puro, de resina ou resina polimérica. Dentre estas resinas, as principais utilizadas comercialmente para diversas aplicações - painéis de madeira, utensílios domésticos, componentes de ferramentas e máquinas de pequeno porte, etc - devido à sua versatilidade, baixo custo, boa estabilidade dimensional e química e razoável desempenho mecânico, são os fenóis-formaldeídos aminas: poliéster e epóxi (Suslick, 1998; Mallick, 1993).

Outros tipos de resinas poliméricas são também utilizados em menor escala devido a fatores diversos como custo operacional. Algumas destas resinas estão listadas junto ao poliéster e epóxi na Tabela 1, juntamente com suas vantagens e limitações.

Tabela 1 – Principais Características e Limitações das Resinas Termorrígidas
(Aquino, 2003).

Resina	Vantagens	Limitações
Epóxi	<ul style="list-style-type: none"> • Excelentes propriedades em compósitos; • Muito boa resistência química e propriedades elétricas; • Boas propriedades térmicas; • Baixa contração na cura; 	<ul style="list-style-type: none"> • Longos ciclos de cura; • Melhores propriedades obtidas em altas temperaturas de cura;
Fenólica	<ul style="list-style-type: none"> • Ótimas propriedades térmicas; • Boa resistência ao fogo; • Boas propriedades elétricas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Cor;
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> • Amplamente utilizada; • Fácil uso; • Cura a temperatura ambiente; • Ótimas propriedades em compósitos; • Boa resistência química; • Boas propriedades elétricas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissão de estireno; • Contração durante a cura • Inflamável;
Poliuretano	<ul style="list-style-type: none"> • Boas propriedades em compósitos; • Muito boa resistência química; • Alta dureza e resistência ao impacto; • Boa resistência à abrasão; 	<ul style="list-style-type: none"> • Cor; • Isocianetos como agentes de cura;
Silicone	<ul style="list-style-type: none"> • Ótimas propriedades térmicas; • Excelente resistência química; • Ótimas propriedades elétricas; • Resistente a hidrólise e oxidação; • Boa resistência ao fogo; • Não tóxico; 	<ul style="list-style-type: none"> • Adesão; • Longos ciclos de cura; • Cura somente a altas temperaturas;

Para o caso particular de fabricação de compósitos poliméricos via moldagem, que é o método mais empregado comercialmente, têm-se o cuidado de se controlar três principais parâmetros deste processo: temperatura, pressão e tempo de cura do compósito; Tais parâmetros estão demonstrados para alguns polímeros na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições de Moldagem de Algumas Resinas Termorrígidas (NBR 9572/1986; Aquino, 2003),

Materiais para Moldagem	Temperatura para Moldagem (°C)	Pressão para Moldagem (MPa)	Tempo de Cura/mm de Espessura (S)
Fenoplásticos	160	10 – 40	30 – 60
Uréia com cargas de celulose ou serragem	140 – 150	15 – 30	30 – 60
Melamina com cargas de celulose ou serragem	150 – 160	15 – 35	30 – 60
Melamina com carga fibrosa grosseira	140	30 – 50	30 – 60
Resina Poliéster com carga fibrosa	150 – 160	5 – 30	30 – 45
Resina Epóxi com carga fibrosa	150 – 170	5 – 30	30 – 60

2.5 – O Concreto Polimérico

O concreto polimérico é considerado um compósito de matriz polimérica, que une as partículas de material agregado entre si. Os monômeros poliméricos mais comuns a serem utilizados para se fabricar estes compósitos são: metacrilatos, epóxi, furfurool, estireno, trimetilpropano de trimetacrilato, poliéster insaturado e éster de vinila; e os agregados mais comumente empregados são: areia silicosa, granito, cascalho de rio, basalto, cinzas volantes, carbonato de cálcio e pó de sílica. A fabricação deste material segue a lógica de se misturar os monômeros, acrescidos

de catalisadores e aceleradores e ainda fluidos, ao sistema de agregados, e estes, por sua vez, devem estar adequadamente secos e isentos de sujeiras e materiais orgânicos. Outro fator importante a ser considerado é a textura superficial dos agregados, onde agregados mais lisos superficialmente solicitam menos resinas para serem unidos, aumentando a carga do próprio agregado admissível na mistura (Ribeiro, 2011; Lintz, 2003).

Dentre os tipos de concretos poliméricos existentes, destaca-se o concreto polimérico à base de Epóxi, que além dos agregados particulados característicos, utiliza a resina epóxi endurecida para conectar e preencher as distâncias entre as partículas, onde a razão em massa de epóxi e endurecedor é geralmente de 1:1 ou 2:1. As vantagens deste tipo em especial de concreto polimérico, que justifica seu uso acentuado em relação aos demais, residem na alta viscosidade, baixa retração na cura, excelente resistência à abrasão e à tração e forte aderência a outros materiais, como o cimento portland, aço e outros materiais, o que, inclusive, torna este compósito altamente atrativo para reparos e enchimentos de estruturas como pontes, pisos, barragens, construções e pavimentos (Lintz, 2003; Fattah et al., 1999).

A estrutura resultante do endurecimento dos concretos poliméricos consiste basicamente de uma matriz sólida e contínua feita pelo entrelaçamento de cadeias longas e complexas do epóxi polimerizado. Como consequência, muitas das características do compósito resultante dependem das condições do processo de polimerização realizado, como volume, distribuição e propriedades específicas do polímero e endurecedor, e composição, dimensão e distribuição dos agregados no momento da polimerização.

A seguir se encontra um diagrama que representa as cadeias de epóxi formadas pelo processo de polimerização (Daghsh, 2013):

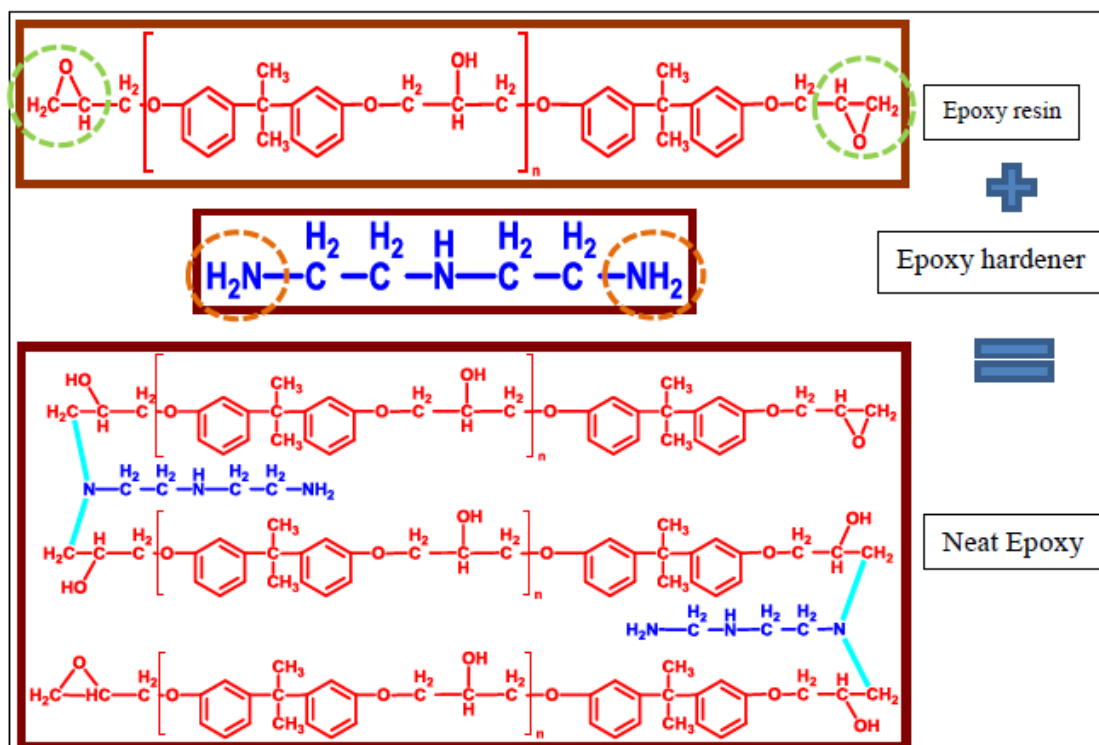


Figura 7. Representação das cadeias de epóxi formadas pelo processo de polimerização (Daghsh, 2013).

Como todo compósito, as propriedades mecânicas destes concretos poliméricos se encontram em uma longa faixa, de acordo com sua composição química, em especial do aglomerante utilizado, e a granulometria dos agregados empregados. Contudo, as propriedades mecânicas sempre estarão em um valor intermediário aos valores de seus componentes individuais. Dentre estas propriedades mecânicas, cabe ressaltar que a resistência à tração e flexão são bastante influenciadas pela natureza do polímero empregado, em relação ao comportamento flexível ou rígido das cadeias poliméricas (Lintz, 2003).

Abaixo estão listadas algumas características de alguns tipos de concretos poliméricos:

Tabela 3: Propriedades típicas do concreto polimérico (Lintz, 2003; ACI 548.6R, 1996):

Aglomerantes	Metacrilato	Epóxi	Furano	Poliéster-Estireno	Éster de Vinila
Consumo em peso (%)	6 a 12	20	-	8 a 18	7
Resistência à tração na Flexão (MPa)	8 a 62	17 a 34	21 a 24	28 a 59	17 a 149
Resistência à Compressão (MPa)	70 a 140	59 a 120	62 a 102	70 a 140	62 a 110
Resistência à Tração (MPa)	8 a 14	9 a 24	9,6 a 14	11 a 70	10 a 90
Resistência ao Cisalhamento (MPa)	26	-	-	2	-
Densidade (Kg/m ³)	2388	2180 a 2596	-	-	2404
Coeficiente de Poisson	0,23 a 0,35	-	-	-	0,22
Retração (%)	1,5 a 5,0	0,02 a 0,20	0,1 a 0,2	0,3 a 3	-

2.6 – A Rocha Artificial

O termo rocha artificial surgiu a mais de duas décadas para designar um material compósito produzido a partir de resina polimérica com agregados minerais. Naquela época, a rocha artificial mais popular era fabricada usando resina poliéster insaturada misturada com agregado de mármore moído, o que acabou por dar o nome a este compósito em especial de “Mármore Sintético” (Fibercenter, 2014)

A rocha artificial produzida comercialmente na atualidade consiste em uma mistura de cerca de 95% de agregados minerais acrescida do restante de aglutinante de resina polimérica, o que pode acabar por englobar o produto na classificação de material natural, sendo processado na atualidade por técnica especial de Vibro-Compressão à Vácuo. Por definição, as rochas artificiais se englobam no conceito de concreto polimérico, sendo um tipo deste compósito, com suas características próprias. Apesar do termo “Rocha Artificial” se referir à maior parte do compósito ser de origem mineral direta, ao longo dos anos outros agregados foram incorporados também às matrizes de rochas artificiais, no intuito de aproveitar resíduos industriais, fornecer outras propriedades físicas, químicas e até

estéticas, porém não perdendo as principais características de rocha artificial propriamente dito. Dentre os possíveis agregados para a rocha artificial encontram-se partículas de mármore, granito, areia de quartzo, cristais de vidro como sílica ou óxido de silício, entre outros, onde cada agregado ou mistura de agregados usados irão fornecer propriedades mecânicas, físicas, químicas e visuais únicas, caracterizando grande variedade de produtos desta natureza com diversos custos de produção. (Ribeiro, 2011; Pedra Artificial, 2014). Adicionalmente, um atrativo deste tipo de material é o peso reduzido, se comparado ao mineral de origem, devido à incorporação de polímeros na composição, que são menos densos do que um mineral cerâmico (Molinari, 2007).

Uma outra grande vantagem deste tipo de material reside no fato da carga de particulados da matriz poder ser resíduo de outra atividade industrial, contanto que devidamente tratado. No caso especial do setor de rochas ornamentais, o desperdício de material proveniente principalmente das etapas de serragem, corte, polimento e acabamento pode chegar até 50% em massa do total produzido, onde este resíduo gerado consiste justamente em material particulado destes minerais. Desta forma, a incorporação deste material na produção de rochas sintéticas constitui não só uma vantagem do ponto de vista competitivo, mas também uma alternativa de reciclagem e reaproveitamento do mesmo. Segundo Molinari (2007), a partir dos estudos de Menezes (2002): “são três os principais motivos que levam os países a reciclar seus rejeitos industriais: a) o esgotamento das reservas de matéria prima confiável, b) o crescente volume de resíduos sólidos, que põem em risco a saúde pública, ocupam o espaço e degradam os recursos naturais e, c) a necessidade de compensar o desequilíbrio provocado pela alta do petróleo”.

A seguir se encontra um diagrama que representa, para o setor de rochas ornamentais, a geração de resíduos e desperdícios durante o processo (Pereira, 2006).

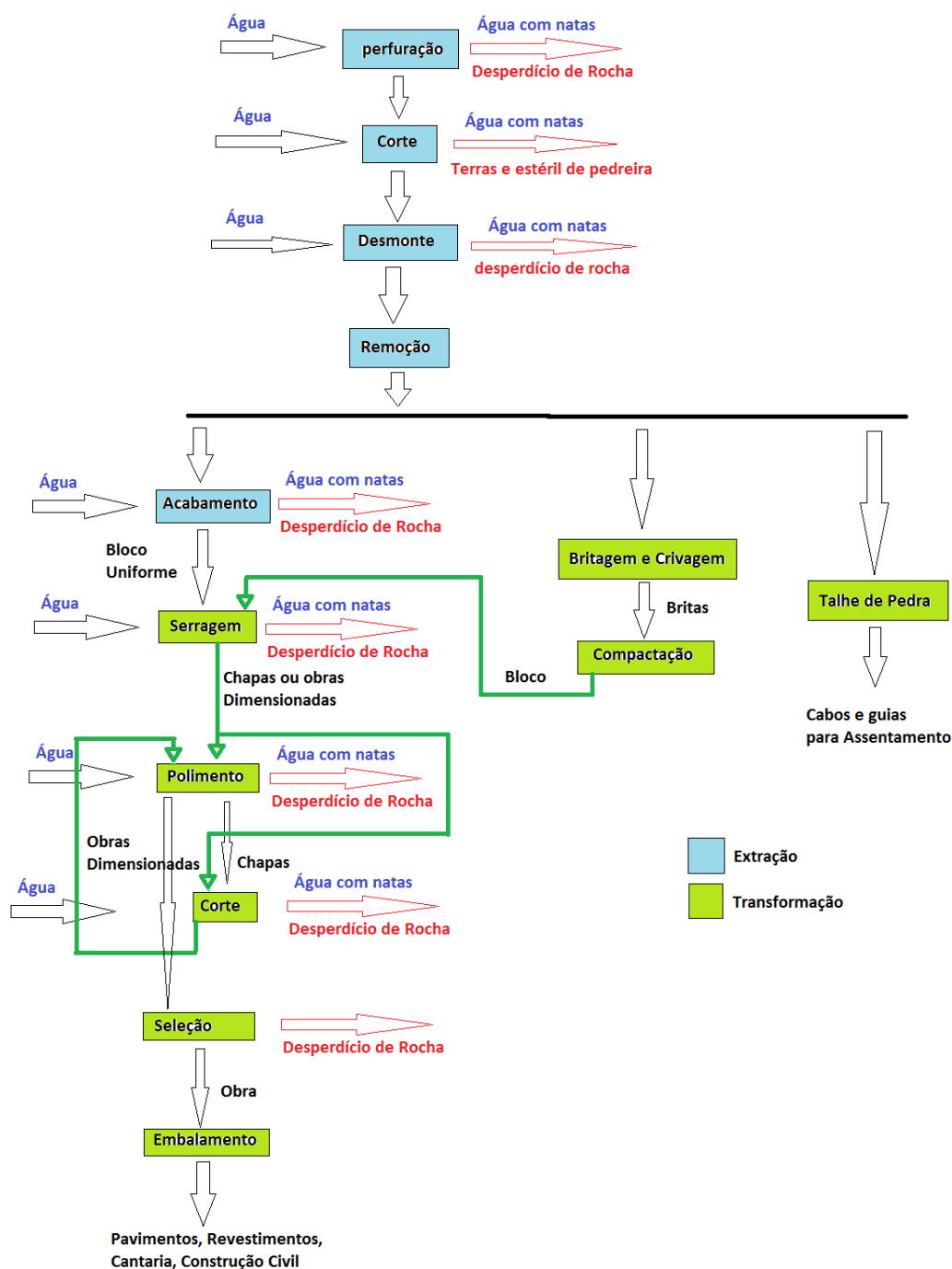


Figura 8. Diagrama da geração de resíduos e desperdícios durante o processo, para o setor de rochas ornamentais (Pereira, 2006).

Como exemplo de resíduos gerados pelas atividades desta indústria de rochas ornamentais, que podem ser facilmente empregados na confecção de rochas artificiais, cita-se:

a) Lamas de granito: Constituídas de partículas finas, de tamanho médio de grão geralmente inferior a 10 μm , que se reúnem em agregados que podem chegar até

200 μm de tamanho. Apresentam majoritariamente em sua constituição mineralógica feldspato e quartzo, acrescidos de pequeno teor de mica. O teor ponderal de sílica supera freqüentemente 60%, seguidos de pouco mais de 10% de alumina e teores reduzidos de outros óxidos alcalinos, onde estão presentes significativamente óxidos de cálcio, geralmente abaixo de 10%, e óxidos ferríticos (Ferreira et al., 2002, Manjate, 2004, lantz, 2003).

b) Lamas de Mármore : Muito utilizadas para se fabricar mármore composto, são compostas basicamente por calcite em teores de óxido de cálcio (CaO) acima de 50%. Possuem uma humidade residual proveniente do processo de cerca de 20% e apresentam tamanho de partículas normalmente inferior a 10 μm , e semelhante às lamas de granito, seus agregados também podem chegar até 200 μm (Ferreira et al., 2002, Manjate, 2004, lantz, 2003).

Para ilustrar como se dá a produção industrial da rocha artificial, temos a Figura 9, a seguir.

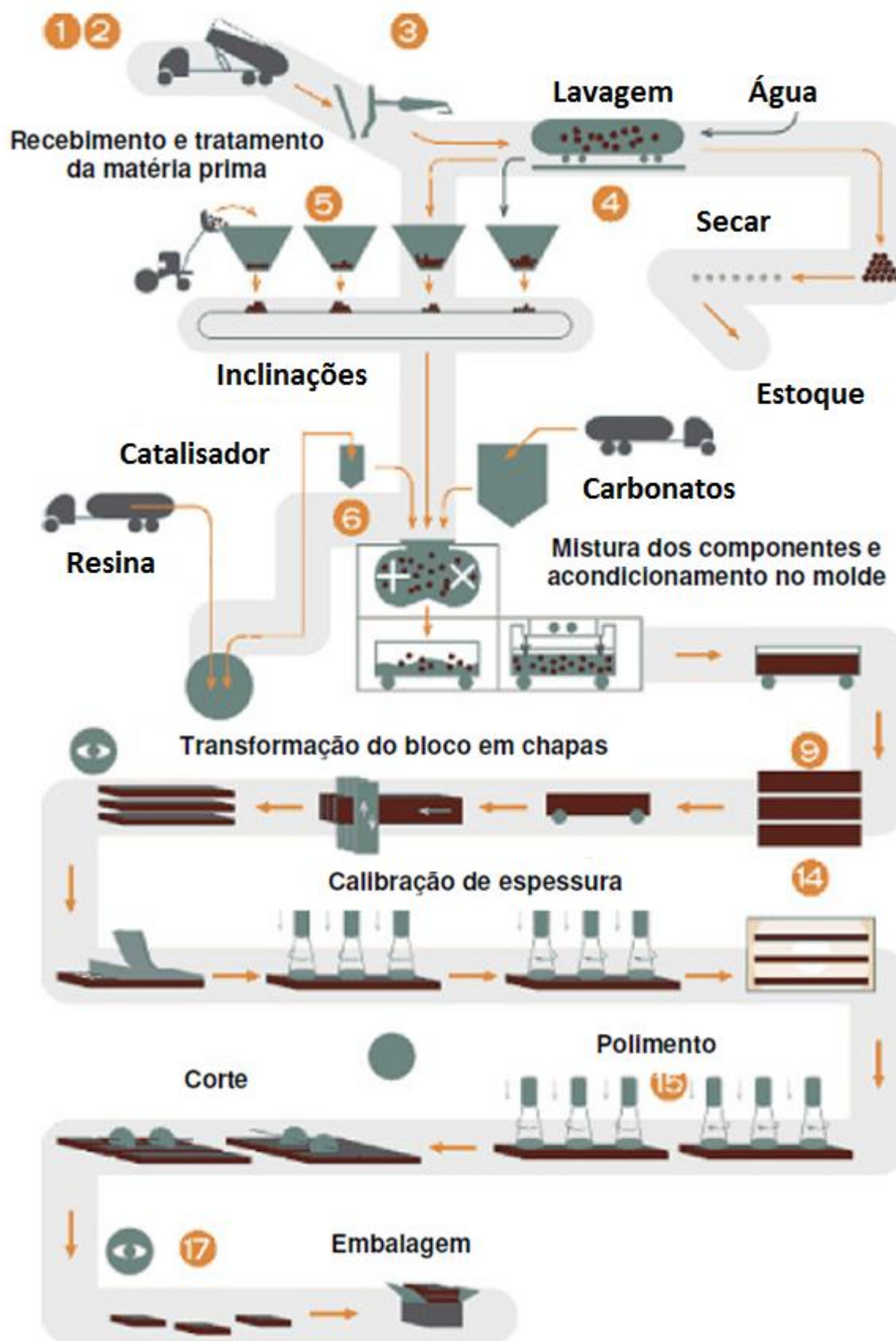


Figura 9: Etapas de fabricação da pedra artificial (COMPAC MARMOL DE QUARTZ, 2010).

Apesar da grande variedade de rochas artificiais existente, como resultado da grande variedade de agregados disponíveis para incorporação nesses compósitos, há primordialmente três grandes linhas de produção deste material na indústria:

2.6.1 – Mármore Composto:

O mármore composto, ou Mármore Sintético, é uma rocha artificial criada a partir de uma matriz de partículas de mármore natural, que engloba cerca de 95% em volume do compósito, acrescido do volume restante de agentes aglutinantes, em sua maioria resina polimérica. A carga de particulados de mármore utilizada nesse material em sua grande maioria provém de etapa de corte e lapidação de placas de mármore na indústria, logo é considerado um resíduo de atividades industriais. Apesar de utilizar subproduto de mármore com agentes aglutinantes, este compósito criado apresenta aparência muito similar ao mármore natural, além de ter baixa absorção de água. Uma grande característica deste tipo de material é a versatilidade de sua composição, devido à possibilidade de se utilizar, individualmente ou em mistura, diversos tipos de resíduos como matriz particulada. Ainda, é possível acrescentar a estes resíduos outros materiais para dar aspecto e aparência diferente, como corantes, conchas, vidros e espelhos, o que acaba por eleger este material como grande concorrente para mármore e granitos na área de decoração de ambientes, devido à grande gama de cores e texturas possíveis, sempre dotadas de uniformidade em toda a estrutura do material (Mármore composto, 2014).

Apesar das vantagens comerciais deste produto, ele é contra-indicado para ambientes expostos à luz solar, devido aos raios UV, e locais que estejam sujeitos à ação de ácidos ou meios ácidos, como bancadas de cozinha e laboratório. Em contrapartida, sua manutenção é extremamente simples e fácil de ser feita, apenas necessitando de água para limpar sua superfície e retirar sujeiras ou agentes nocivos.

Este mármore é encontrado comercialmente em duas vertentes:

- **Mícron:** Esta linha utiliza apenas partículas finas de um mesmo tipo de mármore unidas por um agente aglutinante, de forma a produzir uma estrutura de aparência totalmente uniforme, sem regiões com uma cor predominante sobre a outra. O resultado é um material monocromático.

- Tradicional: Esta linha utiliza como matriz um agregado de materiais particulados provenientes de diferentes tipos de mármore, com diferentes aparências, texturas e propriedades físicas e químicas, o que gera um produto muito semelhante ao mármore natural, com pequenas regiões de aparência diferenciada.

As Tabelas 4, 5, 6 e 7, a seguir, resumem algumas das propriedades de um exemplar de mármore composto:

Tabela 4: Comparação de Testes de Laboratório de mármore composto (Mármore composto, 2014).

		Marmoglass	Mármore	Granito	Mármore Composto
Peso específico	g/ cm ³	2,7	2,5	2,7	2,4~2,5
Carga de Compressão	Mpa	400	220	295	220
Resistência à Carga	Kg/ cm ²	475	170	150	100~150
Dureza de Vickers	kg/ mm ²	530	150	70~120	ND
Escala de Mohs		6,0~6,5	3~5	5,5	3~4
Absorção de Água	%	0,02	0,30	0,17	0,09~0,40
Percentual de Reflexo	%	80	42	66	ND
Resistência a Ácidos	1%H ₂ SO ₄	0,08	10,2	1	10
Resistência a Alcalinos	15N ₂ OH	0,05	0,30	0,10	0,30
Coeficiente de Expansão Térmica	x10 ⁻⁷ /°C	25-100 °c: 52	80-260 °c 30	50-150 °c 30	ND
		25-400 °c: 60	ND	ND	ND
Resistência à Água do Mar	mg/ cm ²	0,08	0,19	0,17	0,19
Resistência ao Gelo	%	0,028	0,23	0,25	0,23

Tabela 5: Comparação de resistência à manchas de mármore composto
(Fibercenter, 2014)

Agente	Mármore Sintético	Mármore Natural
Baton	Nenhum efeito	Pouco manchado
Vinho tinto	Nenhum efeito	Pouco manchado
Vinagre	Nenhum efeito	Muito marcado
Chá	Nenhum efeito	Pouco manchado
Sumo de Limão	Muito Pouco manchado	Muito marcado
Café	Nenhum efeito	Nenhum efeito
Mercúrio cromo	Nenhum efeito	Manchado
Acetona	Muito Pouco manchado	Nenhum efeito
Alcool Etílico (95%)	Nenhum efeito	Nenhum efeito
Amônia caseira	Nenhum efeito	Nenhum efeito

Tabela 6: Comparação de resistência ao impacto Charpy de mármore composto
(Fibercenter, 2014)

Altura do Impacto	Mármore Sintético	Mármore Natural
1"	Marca branca muito pequena	Cavidade de 1/4" de diâmetro
2"	Marca branca pequena	Cavidade de 3/16" de diâmetro
4"	Marca branca	Cavidade de 3/16" de diâmetro
8"	Cavidade branca	Quebrou
12"	Cavidade branca	-
36"	Falhou	-
OBS: Peso de 4 libras, com um raio de 3/4 de polegada na extremidade, caindo de diversas alturas		

Tabela 7: Comparação de resistência à abrasão de mármore composto (Fibercenter, 2014).

	Mármore Sintético	Mármore Natural
Perda de Peso	0,09	0,25
Outros Efeitos	Torna-se brilhante	Torna-se opaco
OBS: 3000 ciclos sob pressão de 5,5 psi		

2.6.2 – Superfície Cristalizada de Vidro:

Mais conhecido como Marmoglass, este tipo de rocha artificial vêm encontrando grande participação no mercado de rochas artificiais. Ele é produzido a partir de uma mistura de agregados de cristais de vidro microcristalizados e pó de mármore. Apresenta excelentes propriedades mecânicas, com elevada dureza e resistência à deformação plástica na superfície, alta resistência à compressão e moderada resistência à tração, o que garante ao produto grande durabilidade (Marmoglas, 2014).

O Marmoglass também apresenta alta estabilidade química, sendo bem resistente a ácidos, meios corrosivos, bases, meios alcalinos e desgastes por efeitos atmosféricos, além de possuir alta estabilidade térmica e pouquíssima absorção de água e líquidos. Além dos atrativos físicos e químicos, este tipo de rocha artificial apresenta grandes atrativos estéticos, como reflexão difundida, uniformidade de cor e textura e brilho intenso, além de ser resistente a manchas e fácil de ser limpo, o que consolida este produto como um forte concorrente ao mármore e granito para decoração de interiores e exteriores de residências e prédios (Marmoglass, 2014).

Na Tabela 8 estão listadas algumas características do marmoglass em comparação ao mármore e granito.

Tabela 8: Propriedades Físicas da Pedra Artificial à Base de Partículas de Vidro
(Pedra Artificial, 2014)

TIPO PROVA / MATERIAL		Cristais de Vidro	Mármore	Granito
Peso específico	g/cm ³	2,7	2,5	2,7
Carga de compressão	Mpa	400	220	295
Resistência à carga	kg/cm ²	475	170	150
Dureza de Vickers	kg/mm ²	530	150	70-120
Peso específico - 50Kg/M ²	g/cm ³	2,7	2,5	2,7
Carga de compressão	Mpa	400	220	295
Resistência à carga	kg/cm ²	475	170	150
Escala de Mohs		6,0~6,5	3~5	5,5
Absorção à água	%	0,02	0,30	0,17
Percentual de reflexo	%	80	42	66
Resistência aos ácidos	1%H ₂ SO ₄	0,08	10,2	1,0
Resistência aos alcalinos	1%NaOH	0,05	0,30	0,10
Coeficiente de expansão		25-100 °C 52	80-260 °C 30	50-150 °C 30
Térmica	x10 ⁻⁷ /°C	25-400 °C 60		
Radioatividade		não	Tem	Tem
Resistência à água do mar	mg/cm ²	0,08	0,19	0,17
Resistência ao gelo	%	0,028	0,23	0,25

2.6.3 – Superfície de Quartzo:

Este tipo de rocha artificial compartilha também da característica de alta carga mineral, apresentando um teor de cerca de 93% de quartzo como componente base, acrescido de carga aglutinante de resina poliéster de alta performance. Adicionalmente, outros agregados como fragmentos de espelho e de vidro podem ser adicionados ao compósito com o objetivo de fornecer outras propriedades estéticas, como brilho acentuado e maior reflexão. Este material possui elevada resistência mecânica, resistência ao impacto e resistência à deformação plástica localizada, além de ter absorção de água e líquidos praticamente nula, o que faz deste material uma boa opção para substituição de mármore em bancadas de cozinhas, pois não permite a proliferação de bactérias e fungos em seu interior e é fácil de limpar. Como a maioria das rochas artificiais, este material também apresenta alta resistência a ácidos. Todas estas vantagens fazem da Superfície de

Quartzo uma ótima alternativa para decoração de interiores exteriores de ambientes, com grande flexibilidade de aplicações estéticas (Superfície de Quartzo, 2014).

A tabela a seguir resume algumas das propriedades de um exemplar deste tipo de rocha sintética:

Tabela 9: Propriedades Físicas de rocha artificial da classe Superfície de Quartzo (Alicante et al., 2014)

Linha	Densidade	Índice de absorção	Flexibilidade	Coefficiente Expansão +20 até +70°C	Coefficiente Contração -20até +20°C
	(g / 3 cm ³)	Após 24h hrs	(Mpa)	-6 (10 / °C)	-6 (10 / °C)
Cristal	2,05	0,07	35	43	33
Especificação Técnica	CSN 72 1154	CSN 72 1155	CSN EN14617-2	CSN EN ISO 10545-8	AZL 03

2.7 – O Vidro

Há diversas definições para o vidro, de acordo com vários autores especialistas sobre o assunto, de acordo com os anos. Duas das definições mais aceitas internacionalmente dizem que o vidro é “um material formado pelo resfriamento do estado líquido normal (ou fundido), o qual exhibe mudanças contínuas em qualquer temperatura, tornando-se mais ou menos rígido através de um progressivo aumento da viscosidade, acompanhado da redução da temperatura do fundido”, ou ainda, “é um sólido não-cristalino, portanto, com ausência de simetria e periodicidade translacional, que exhibe o fenômeno de transição vítrea, podendo ser obtido a partir de qualquer material inorgânico, orgânico ou metálico e formado através de qualquer técnica de preparação (Alves et al., 2001). A Tabela 10 reúne algumas definições para vidro.

Tabela 10: Definições de vidros encontrados em livros-texto publicados na década de 90. (Alves et al., 2001)

Autor (Ano)	Definição
Elliott (1990)	<p>“Vidros são materiais amorfos que não possuem ordem translacional a longo alcance (periodicidade), característica de um cristal. Os termos amorfo e sólido não-cristalino são sinônimos nesta definição. Um vidro é um sólido amorfo que exhibe uma transição vítrea.”</p>
Zarzycki (1991)	<p>“Um vidro é um sólido não-cristalino exibindo o fenômeno de transição vítrea.”</p>
Doremus (1994)	<p>“Vidro é um sólido amorfo. Um material é amorfo quando não tem ordem a longa distância, isto é, quando não há uma regularidade no arranjo dos constituintes moleculares, em uma escala maior do que algumas vezes o tamanho desses grupos. Não é feita distinção entre as palavras vítreo e amorfo.”</p>
Varshneya (1994)	<p>“Vidro é um sólido que tem a estrutura do tipo de um líquido, um sólido “não-cristalino” ou simplesmente um sólido amorfo, considerando a característica de amorfo como uma descrição da desordem atômica, evidenciada pela técnica de difração de raios-X.”</p>
Shelby (1997)	<p>“Vidro é um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material, inorgânico, orgânico ou metal, formando por qualquer técnica, que exhibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro.”</p>

Segundo Maia (2003): “o vidro pertence a um estado particular da matéria conhecido como Estado Vítreo, que tem as seguintes propriedades:”

- Ausência de estruturas cristalinas, as substâncias pertencentes ao estado vítreo são amorfas
- Não tem Ponto de Fusão definido. O vidro quando é aquecido vai amolecendo gradualmente até ter a sua viscosidade tão reduzida, que se comporta como um líquido
- O vidro não desvia o plano da luz polarizada quando é por esta atravessado
- O vidro não é estável a altas temperaturas. Mantido por longo tempo a uma temperatura acima do seu ponto de amolecimento, pode cristalizar, e a esse fenômeno se dá o nome de Desvitrificação
- Geralmente transparente
- Mau condutor de calor e eletricidade

Tradicionalmente os vidros são compostos por substâncias inorgânicas, em especial silicatos de sódio e óxidos de cálcio, chumbo, potássio, entre outros. O elemento predominante é a sílica, sendo os óxidos demais resultantes de outras matérias primas adicionadas com o objetivo de auxiliar a produção do vidro. Vale ressaltar que, contudo, podemos formar um número quase ilimitado de vidros inorgânicos, os quais não contêm sílica (Alves et al., 2001). Na Tabela 11, encontram-se listadas as composição químicas das principais famílias de vidros a base de sílica.

Tabela 11: Composição das principais famílias de vidros a base de sílica. (Alves et al., 2001)

Tipo do vidro	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PbO
I. "Soda"-silicato ^a (<i>water glass</i>)	Composição variável razão SiO ₂ – Na ₂ O de 1,6 a 3,7							
II. "Soda-lime" ^b silicato (<i>lime glass</i>)	72,1	21,1	–	2,8	–	–	2,0	–
	72,1	14,0	–	9,9	3,2	–	0,3	–
III. Borosilicato	81,0	4,5	–	–	–	12,5	2,0	–
IV. Aluminosilicato	54,5	–	–	17,5	4,5	10,0	14,0	–
	59,0	11,0	0,5	16,0	5,5	3,5	4,5	–
	65,8	3,8	–	10,4	–	–	6,6	–
V. Silicato de chumbo	56,0	2,0	13,0	–	–	–	–	29,0
	3,0	–	–	–	–	11,0	11,0	75,0
	5,0	–	–	–	–	10,0	3,0	62,0
VI. Alta sílica	96,7	–	–	–	–	2,9	0,4	–
	99,9	–	–	–	–	–	–	–

O óxido de cálcio presente nos vidros é fornecido pelo carbonato de cálcio e o óxido de sódio é fornecido pelo sulfato ou carbonato de sódio. Adicionalmente, outros compostos podem estar presentes no vidro, como óxidos de ferro, que dão ao mesmo uma coloração esverdeada, sendo normalmente eliminados pela adição de dióxido de manganês. Contudo, apesar do vidro tradicionalmente ser de origem inorgânica, devido ao avanço da ciência, atualmente existem vidros bastante conhecidos, compostos por elementos metálicos e até orgânicos. É importante salientar que a natureza química do material não pode ser usada como critério para definir vidro. Na Tabela 12 é apresentada, a título de exemplo, uma relação de compostos que podem ser obtidos no estado vítreo, pelo processo de fusão/resfriamento. (Alves et al., 2001)

Tabela 12: Espécies químicas formadoras de vidro pelo processo de fusão-resfriamento. (Alves et al., 2001)

Elementos	S, Se, P, Te (?)
Óxidos	B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , As_2O_3 , Sb_2O_3 , In_2O_3 , Tl_2O_3 , SnO_2 , PbO_2 , SeO_2
Sulfetos	As_2S_3 , Sb_2S_3 , CS_2 Vários compostos de B, Ga, In, Te, Ge, Sn, N, P, Bi
Selenetos	Vários compostos de Tl, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Si, P
Teluretos	Vários compostos de Tl, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Ge
Haletos $ThCl_4$	Vidros cloretos multicomponentes baseados em $ZnCl_2$, $CdCl_2$, $BiCl_3$, Vidros fluoretos à base de BeF_2 , AlF_3 , ZrF_4 , HfF_4
Nitratos	KNO_3 - $Ca(NO_3)_2$ e muitas outras misturas binárias contendo nitratos alcalinos e alcalino-terrosos
Sulfatos	$KHSO_4$ e outras misturas binárias e ternárias
Carbonatos	K_2CO_3 - $MgCO_3$
Acetatos	$Na(CH_3COO)$, $Li(CH_3COO)$
Compostos orgânicos simples	o-terfenil, tolueno, 3-metil-hexano, 2,3-dimetil cetona, etilenoglicol, álcool metílico, álcool etílico, glicerol, éter etílico, glicose
Compostos orgânicos poliméricos	Poliestireno $(-CH_2-)_n$
Ligas metálicas	Au_4Si , Pd_4Si

Baseado na composição química, o vidro pode ser classificado nas seguintes categorias, segundo Shi e Zheng (2007):

- Sílica vitrificada;
- Silicatos alcalinos;
- Vidros de sódio e cálcio;
- Vidros de Borosilicatos;
- Vidros de chumbo;
- Vidros de Bário; e
- Vidros de aluminosilicatos;

Na etapa de fabricação dos vidros, é comum adicionar vários outros elementos, visando obter propriedades específicas ou alterar a coloração (propriedades estética). Em relação a estas cores, os vidros produzidos podem ser translúcidos

(cerca de 63%), âmbar (cerca de 25%), verdes (cerca de 10%, em especial os vidros temperados, comumente conhecidos como “blindex”), e azul ou outras cores (cerca de 2%) (Shi et al., 2007; Diamond, 1983). A Tabela 13 Relaciona o efeito estético da adição de alguns metais no vidro, e a Tabela 14 Resume a composição química das principais famílias de vidros comerciais.

Tabela 13 : Espécies químicas (agentes de coloração) utilizados para dar cor aos vidros. (Alves et al., 2001):

Agente de coloração	Estado de oxidação	Coloração
Cobre	Cu^{2+}	Azul claro
Crômio	Cr^{3+}	Verde
	Cr^{6+}	Amarelo
Manganês	Mn^{3+}	Violeta
	Mn^{4+}	Preto
Ferro	Fe^{3+}	Marrom-amarelado
	Fe^{2+}	Verde-azulado
Cobalto	Co^{2+}	Azul intenso ou rosa
	Co^{3+}	Verde
Níquel	Ni^{2+}	Marrom, amarelo, verde, azul a violeta, dependendo da matriz vítrea
Vanádio boratos	V^{3+}	Verde, em vidros silicatos e Marrom, em vidros
Titânio	Ti^{3+}	Violeta
Neodímio	Nd^{3+}	Violeta-avermelhado
Praseodímio	Pr^{3+}	Verde claro
Ouro	Au^0	Rubi (partículas coloidais dispersas na matriz vítrea)
Cádmio	CdS , CdSe	Laranja

Tabela 14 : Composição química de vidros comerciais selecionados. (McLellan et al.,1984; Shi et al., 2007):

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO	Outros
Vidros Sodo-Cálcicos										
Containers	66 – 75	0,7 – 7		12 – 16	0,1 – 3	0,1 – 5	6 – 12			
Bóia	73 – 74			13,5 – 15	0,2	3,6 – 3,8	8,7 – 8,9			
Folha	71 – 73	0,5 – 1,5		12 – 15		1,5 – 3,5	8 – 10			
Bulbos de luz	73	1		17		4	5			
Tigela de vidro temperado	75	1,5		14			9,5			
Borosilicatos										
Instrumentos químicos	81	2	13	4						
Farmacêuticos	72	6	11	7	1					
Vedação de tungstênio	74	1	15	4						
Vidros de chumbo										
Tubo de TV a cores	54	2		4	9				23	
Tubos de neon	63	1		8	6				22	
Partes eletrônicas	56	2		4	9				29	
Sílex óptico denso	32			1	2				65	
Vidros de Bário										
Painel de TV a cores	65	2		7	9	2	2	2	2	10% SrO
Coroas ópticas densas de bário	36	4	10						41	9% ZnO
Vidros de Aluminossilicatos										
Tubos de combustão	62	17	5	1		7	8			
Fibra de vidro	64,5	24,5		0,5		10,5				
Substratos de resistores	57	16	4			7	10	6		

Os vidros podem ser formados por um grande número de processos diferentes, como pirólise, deposição química de vapor, processo sol-gel, irradiação de nêutrons, entre outros. Em todo caso, pode-se afirmar que o vidro é um produto inorgânico fundido, o qual foi resfriado para uma condição rígida sem cristalização, formando uma rede tridimensional estendida aleatória, isto é, com ausência de simetria e periodicidade.(Alves et al., 2001).

As Figuras 10 e 11 ilustram como se situa a estrutura do vidro sob um perspectiva bidimensional:

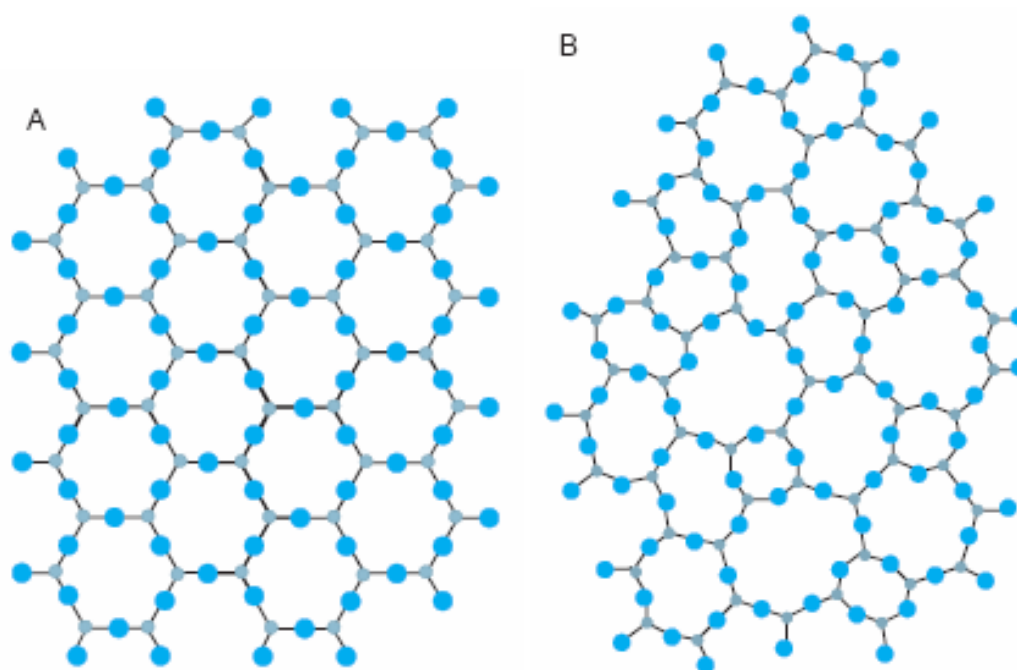


Figura 10: Representação bidimensional (a) do arranjo cristalino simétrico e periódico de um cristal de composição A_2O_3 ; (b) representação da rede do vidro do mesmo composto, na qual fica caracterizada a ausência de simetria e periodicidade.

(Alves et al., 2001)

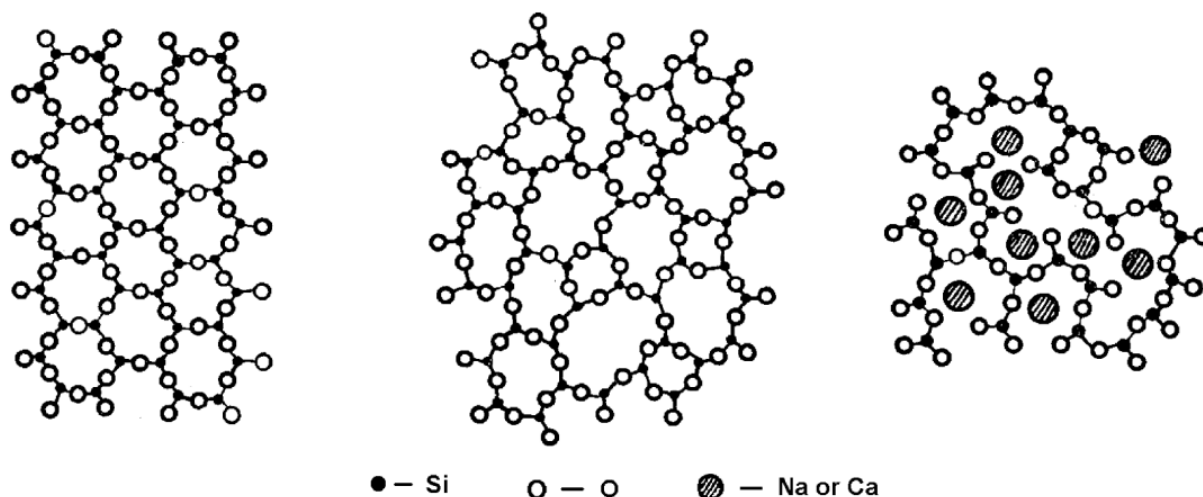


Figura 11: Estrutura do Quartzo (1^o), vidro de Sílica (2^o) e vidro de Sílica com adições de Sódios (Na) e Cálcio (Ca) (3^o), respectivamente. (Shi et al., 2007)

Apesar de alguns autores considerarem o vidro um material amorfo, essa visão não é tão bem sustentada por outros autores, como Gupta (1996), que em seu artigo “Non-Crystalline Solids: Glasses and Amorphous Solids” classificou separadamente os sólidos considerados amorfos e vítreos, e adicionalmente os não-cristalinos. Segundo a visão desse autor, interpretada por (Gimenez, 2008), um sólido não-cristalino poderia ser classificado como um material que apresenta uma rede tridimensional estendida e aleatória, ou seja, com ausência de simetria e periodicidade translacional. A partir desta definição, pode-se dividir estes sólidos não-cristalinos em amorfos e vítreos, onde a diferença entre estes dois grupos reside no caráter termodinâmico de cada um, de forma que os materiais vítreos apresentam o fenômeno de transição vítrea e os amorfos não.

Baseado nesta classificação, ao se considerar o vidro um material não cristalino, não se exclui a possibilidade de estruturação tridimensional do arranjo atômico em cadeias coesas, contudo, tais cadeias não apresentam uniformidade em sua estrutura, sendo toda a sua extensão composta por arranjos tridimensionais não-repetitivos (Gimenez, 2008). Este arranjo característico do vidro que é responsável por várias de suas características, como a rigidez do material, seu caráter de fratura frágil e grande capacidade de fragmentação e propagação de trincas.

Uma das formas de se descrever a estrutura do vidro provém da abordagem bi-dimensional proposta por Zachariasen (1932), onde este autor classifica os componentes dos vidros em três categorias (Zachariasen, 1932; Shi et al., 2007):

- **Formadores de rede:** Estes são caracterizados por seu pequeno raio atômico e maiores valências atômicas possíveis, sendo sempre cercados por quatro átomos de oxigênio, com os quais formam uma rede tridimensional relativamente desordenada através de tetraedros. E energia de ligação entre estes elementos e seus oxigênios é normalmente de 355 KJ/mol. Adicionalmente, quanto maior o teor destes elementos, maior o grau de condensação do vidro.
- **Modificadores de rede:** Possuem um grande raio atômico e apresentam número de coordenação variando de 6 a 8, estando também ligados a oxigênio. A presença destes elementos, em função das duas propriedades descritas previamente, tende a desordenar e romper o encadeamento de polimerização da estrutura do vidro. A energia de ligação destes compostos com o oxigênio é tipicamente menos de 210 KJ/mol.
- **Elementos Intermediários:** este grupo contém elementos que podem se comportar em particular como ambos formadores e modificadores de rede. Seu comportamento vai depender de seu número de coordenação: Quando seu número de coordenação é 4 quando, eles agem como formadores de rede, e quando seu número de coordenação é 6, estes agem como modificadores de rede. A energia de ligação destes elementos com o oxigênio varia entre 210 e 335 KJ/mol.

A Tabela 15, a seguir, demonstra os óxidos usados para fornecer os elementos que irão desempenhar as funções descritas anteriormente.

Tabela 15 : Diversos óxidos usados nos vidros para propósitos diversos. (Maia, 2003):

Vidro-Formadores	Intermediários	Modificadores
Óxido de Boro	Óxido de Alumínio	Óxido de Magnésio
Óxido de Silício	Óxido de Antimônio	Óxido de Lítio
Óxido de Germânio	Óxido de Zircônio	Óxido de Bário
Óxido de Fósforo	Óxido de Titânio	Óxido de Cálcio
Óxido de Vanádio	Óxido de Chumbo	Óxido de Estrôncio
Óxido de Arsênio	Óxido de Berílio	Óxido de Sódio
	Óxido de Zinco	Óxido de Potássio

Dentre as vantagens dos vidros, que fazem desta classe de materiais uma escolha tecnologicamente interessante, pode-se citar (Gimenez, 2008):

- Possibilidade de variação de composição química em uma grande faixa, tanto em termos de concentração de elementos, quando em compostos químicos empregados, seja para alterar as propriedades do vidro ou pouco afetá-las. Isto ocorre devido à opção de troca e utilização de diversas matérias primas, e grandes tolerâncias de concentrações de diversos grupos de elementos. Muitas propriedades do vidro são dependentes de sua composição química, fato este que aliado à gama de possíveis matérias primas, possibilita a criação de diversos materiais vítreos, para diferentes aplicações específicas. No mais, algumas propriedades do vidro são pouco dependentes da natureza específica de um elemento químico, dependendo mais do teor deste elemento ou de elementos semelhantes.
- Possibilidade de utilização de diversas faixas de condições de tratamentos térmicos e parâmetros operacionais durante o processo de fabricação. Baseado na manipulação da composição química é possível alterar muitos dos parâmetros operacionais, bem como as exigências energéticas para o processamento do vidro. Adicionalmente através da manipulação dos tratamentos térmicos empregados é possível obter propriedades diferentes nos vidros, como é o caso do vidro temperado.
- Possibilidade de obtenção de composição química uniforme em toda a estrutura do vidro, resultado do próprio processo de fabricação, onde há uma eficiente mistura das matérias primas no estado líquido na linha de produção, e esta mistura logo em seguida é resfriada e consolidada, mantendo a distribuição uniforme do líquido de origem.

- Possibilidade de moldagem na forma desejada, pois o vidro líquido gerado no processo de fabricação é suficientemente fluido para se adequar facilmente à qualquer forma de molde que se use, e, mesmo depois de parcialmente resfriado, onde já adquire maior rigidez, pode ser moldado a baixa temperatura.

2.8 – Tipos de Vidros:

Dentre as principais famílias de vidro existentes comercialmente, podem-se descrever as seguintes:

- Sílica Vítreo
- Silicatos Alcalinos
- Vidros ao Chumbo
- Vidros Borossilicatos
- Vidros Alumino-Borossilicatos
- Vidros Sodo-Cálcicos

Visto que o presente trabalho usará o vidro Sodo-Cálcico, apenas este tipo de vidro será abordado nesta revisão. A Tabela 16 relaciona a aplicação com a composição química dos vidros.

Tabela 16: Composições típicas de diversos vidros comerciais (Akerman, 2000)

	Composição Percentual (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	PbO
Sodo-Cálcicos								
Embalagem	72	2		12,5	1	11	1,5	
Plano	71	1		13,5	0,5	10	4	
Lâmpada	73	1		16,5	0,5	5	4	
Borossilicatos								
Pyrex	79	2	13	5,5				
Fibra Isolação	66	1,5	3,5	15,5	1	8	4	
Chumbo								
Cristal	56			4	12	2	2	24
Neon	63	1		8	6			22
Lente	32			1	2			65
Aluminoborossilicatos								
Farmacêutico	72	6		7	1	1		
Fibra Reforço	55	15	11			19	4	
Tubo combustão	62	17	7,0	1		8	7	

2.8.1 – Vidros Sodo-Cálcicos

Esse tipo em especial de vidro é obtido através da inserção de óxidos estabilizantes na estrutura da sílica, no lugar de fluxos alcalinos. Dentre os óxidos estabilizantes mais comuns se encontram os de cálcio, usados geralmente com conjunto com óxidos de magnésio, motivo destes vidros serem referidos geralmente como sodo-cálcicos.

Normalmente se encontram em uma faixa estreita de composição, contendo entre 8 e 12% de óxido de cálcio e 12 a 17% de óxido alcalino (principalmente óxido de sódio), em peso. Deve-se ter um equilíbrio entre o teor de cálcio e elementos alcalinos, pois um excesso de cálcio tende a cristalizar a estrutura durante o processo de produção, e pouco cálcio ou elevado teor de alcalinos produzem um vidro de baixa durabilidade química. Devido a este último, inclusive, tende-se a adicionar uma pequena quantidade de alumina (0,6 a 2,5%) na mistura, para aumentar a resistência química (Akerman, 2000; Navarro, 2003; Vogel, 1980; Scholze, 1980; Akerman, 1990; Zanotto, 1989).

2.9 – Propriedades dos Vidros:

As propriedades dos vidros dependem de sua composição e estrutura química, pois são os elementos químicos, os tipos de ligações e os arranjos decorrentes de sua associação que determinarão o comportamento físico-químico e mecânico macroscópico do mesmo, como ocorre em outros materiais.

Normalmente, se consideram, de forma aproximada, as propriedades do vidro sendo proporcionalmente decorrentes de sua composição química e concentração de elementos presentes, devido à dependência entre estes fatores. Contudo esta relação se mostra restrita a situações onde não há mudanças estruturais ou interação de elementos químicos em função da concentração de componentes.

Na Figura 12, a seguir, temos ilustradas (ressaltadas as restrições citadas anteriormente) as relações de dependência entre as principais propriedades dos vidros e a composição e teor de óxidos formadores (Akerman, 2000; Navarro, 2003; Vogel, 1980; Scholza, 1980; Akerman, 1990; Zanotto, 1989; Maia, 2003; Morais, 2013):

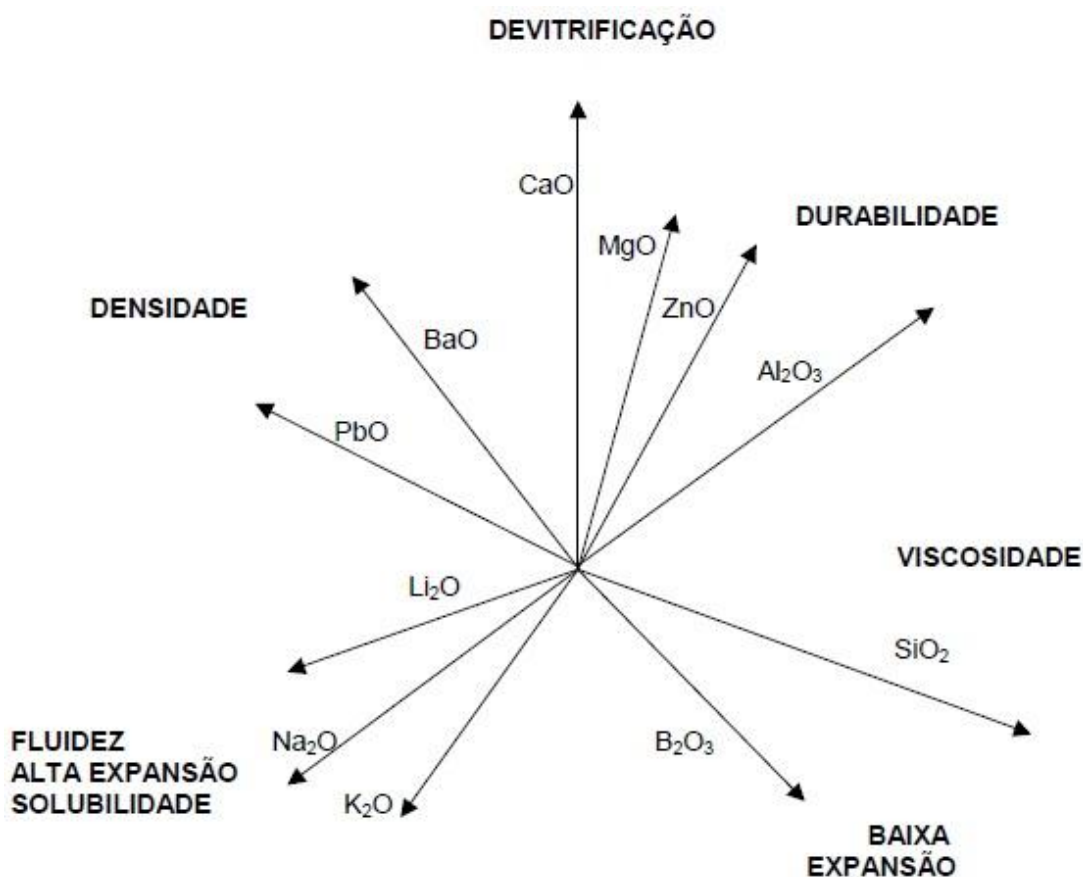


Figura 12: Funções relativas dos óxidos no vidro. (Akerman, 2000)

2.9.1 – Viscosidade

Considerada uma das mais importantes propriedades do vidro, por refletir diretamente na tecnologia de conformação do mesmo. Esta varia muito com a temperatura e composição do material, e determina as condições de fusão, temperatura máxima de utilização, temperaturas de trabalho e recozimento, comportamento na afinagem (remoção de bolhas do banho), e taxa de devitrificação. A tabela 17 mostra a viscosidade de alguns vidros em comparação com outras substâncias (Akerman, 2000; Navarro, 2003; Vogel, 1980; Scholza, 1980; Akerman, 1990; Zanotto, 1989; Maia, 2003; Morais, 2013).

Tabela 17: Valor do coeficiente de viscosidade de algumas substâncias em comparação ao vidro. (Akerman, 2000):

Material	η (Poise)	Log η
Água	0,005	-2,3
Álcool etílico	0,01	-2
Óleo leve	0,5	-0,3
Óleo pesado	10	1
Glicerol	100	2
Vidro em fusão	100	2
Vidro na gota	1000 – 10000	3 – 4
Vidro no molde		4 – 4,5
Vidro no ponto de amolecimento		7,6
Vidro a 600 °C		8
Vidro no recozimento		13,4
Vidro a temperatura ambiente		30

2.9.2 – Resistência ao choque térmico

O vidro é considerado um mal condutor de calor, pois oferece grande resistência ao fluxo térmico. Desta forma, ao se submeter o mesmo a uma fonte de calor, se formará um grande gradiente térmico de acordo com sua espessura, de maneira a se criarem regiões de dilatação diferenciada, de acordo com a temperatura. Tais regiões irão criar tensões residuais, que podem levar o material à falha. Sendo assim, a resistência de um tipo de vidro será inversamente proporcional à capacidade de dilatação térmica deste, pois, quanto mais o vidro se dilatar com a temperatura, maiores serão as tensões residuais, e menor sua resistência.

A dilatação térmica de um vidro, e conseqüentemente sua resistência ao choque térmico, dependem de sua composição química e estrutura (fatores microscópicos), sendo também influenciados pela espessura do vidro (fator macroscópico), pois um vidro mais fino terá um gradiente térmico menor, apresentando menores tensões residuais e maior resistência ao choque térmico (Akerman, 2000; Navarro, 2003; Vogel, 1980; Scholza, 1980; Akerman, 1990; Zannotto, 1989; Maia, 2003; Morais, 2013).

2.9.3 – Resistência ao Ataque Químico

Os vidros apresentam elevada durabilidade química, mas não podem ser considerados rigorosamente inertes, pois todos os vidros sofrem alterações, por mais insignificantes que sejam, quando em contato com soluções aquosas.

No geral, os vidros são muito resistentes a soluções ácidas (exceto o ácido fluorídrico - HF) e levemente básicas ($\text{pH} < 9$), mas são pouco resistentes a soluções básicas. A Figura 13 mostra a quantidade de sílica removida de um vidro em função do pH da solução

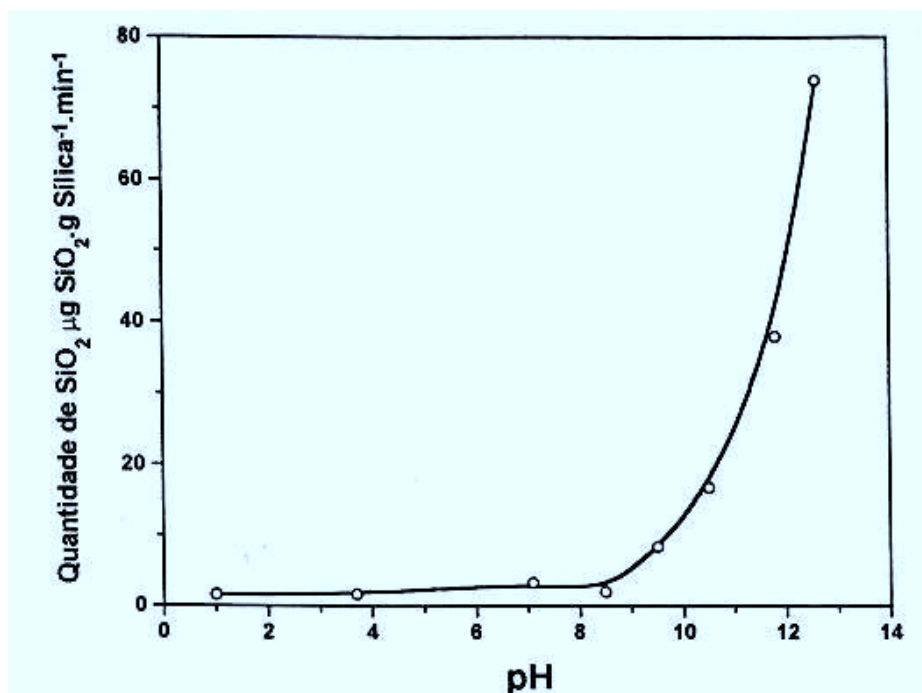


Figura 13: Quantidade de sílica removida de um vidro em função do pH da solução (Akerman, 2000)

A resistência ao ataque da água varia com a composição do vidro, e, haja visto a eficiência de degradação deste por bases, quanto maior a basicidade dos óxidos usados no vidro, maior a solubilidade deste na água. Devido a isto, alguns tratamentos para aumentar a durabilidade do vidro consistem em retirar parte dos alcalinos da superfície, para criar uma película desalcalinizada e mais resistente nessa superfície.

Dada a forma como ocorre a corrosão do vidro, esta se processa majoritariamente durante sua estocagem, razão pela qual se deve ter cuidado extra com esta etapa, depositando sempre o vidro em local arejado com pouca variação

de temperatura (Akerman, 2000; Navarro, 2003; Vogel, 1980; Scholza, 1980; Akerman, 1990; Zanotto, 1989; Maia, 2003; Morais, 2013).

2.9.4 – Propriedades Ópticas

O vidro é um material amorfo, ou seja, não dispõe de arranjos ordenados de cadeias moleculares, sendo as disposições destas cadeias aleatórias. Desta forma, pode-se considerar que o vidro em seu estado natural apresenta propriedades iguais em todas as direções, ou seja, é um material isotrópico. Assim, suas propriedades óticas também são isotrópicas, desde que não se submeta o vidro a tensões (o que acabaria com a isotropia).

Ao incidir um feixe de luz sob a superfície de um vidro, uma parte deste é refletida e outra refratada para dentro do vidro, onde perde-se um pouco desta energia. Este processo pode-se repetir dentro do vidro ou na superfície posterior do vidro. Os vidros costumam ter uma reflexão bem pequena, razão pela qual são dados como translúcidos, mas os vidros de maior densidade, como os compostos por óxidos de chumbo, apresentam índice de refração maior, o que promove maior reflexão nos mesmos. A Tabela 18 relaciona a perda por reflexão em acordo com o índice de refração; Akerman, 2000; Navarro, 2003; Vogel, 1980; Scholza, 1980; Akerman, 1990; Zanotto, 1989; Maia, 2003; Morais, 2013).

Tabela 18: Valor da perda por reflexão de acordo com a índice de refração.
(Akerman, 2000):

Índice de Refração – n	Perda por Reflexão – R (%)
1,45	3,36
1,5	4,00
1,55	4,65
2,00	11,11

2.9.5 – Resistência Mecânica

Por natureza, o vidro é um material frágil, pois não tolera cargas dinâmicas (impacto) e nem deformação plástica fora do fluxo viscoso. Contudo, também é um material resistente, pois apresenta elevadas resistências à tração e compressão, é muito rígido e duro a baixas temperaturas.

A resistência do vidro é extremamente dependente do estado de defeitos internos e superficiais do mesmo e uniformidade geométrica de sua superfície, já que tais defeitos promovem grande concentração de cargas e ruptura precoce no mesmo. Desta forma, para se preservar a resistência do mesmo, recomenda-se a uniformidade de composição química; melhor qualidade de processamento; maior cuidado com manuseio; melhor acabamento superficial; ou mesmo cobertura da superfície com outros materiais (películas, rótulos, etc...).

Uma forma de se aumentar a resistência do vidro consiste em efetuar sobre o mesmo um processo térmico de têmpera, dando origem ao entitulado vidro temperado (Akerman, 2000; Navarro, 2003; Vogel, 1980; Scholza, 1980; Akerman, 1990; Zanotto, 1989; Maia, 2003; Morais, 2013). A Tabela 19 relaciona a resistência mecânica do vidro.

Tabela 19: Resistência Mecânica real do vidro em diversas situações. (Akerman, 2000):

Resistência Kg/mm²	Situações
2100	Resistência teórica
100 – 1500	Resistência de fibras de vidro
100 – 500	Resistência de vidros polidos a ácido
20 – 100	Resistência de objetos de vidro com leve danificação da superfície
4 – 20	Resistência de objetos de vidro manuseados normalmente
0 – 4	Resistência de objetos de vidro com forte danificação da superfície

2.10 – Vidro Temperado:

O vidro temperado recebe este nome devido ao tratamento térmico de têmpera em sua fabricação. Este tratamento consiste em se aquecer o vidro em forno adequado, com atmosfera controlada, até mais de 538°C, seguido de resfriamento abrupto no interior do próprio forno, de forma controlada e a taxa relativamente constante (SunGuard, 2010). A temperatura de operação alcançada pelo forno se situa a cerca de 150°C acima da temperatura de transformação vítrea, onde o material apresentará moderada viscosidade, podendo ser considerado plástico e, com o resfriamento abrupto se iniciando na superfície do material e prosseguindo

para seu interior, temos um gradiente de temperatura de forma que a superfície se vitrifica antes do interior. O interior do vidro, com maior plasticidade, posteriormente se vitrifica e contrai, e devido à interface deste com a superfície vitrificada anteriormente, agora dotada de pouca plasticidade, o interior acaba por não poder se contrair por completo e se situa em um estado de tração. Reciprocamente, a superfície acaba por ser tensionada em compressão (Giacomini et al., 2010; Wigginton, 1996; Gimenez et al., 2008; Gupta, 1996). Desta forma, a estrutura resultante do vidro se encontra com um sistema de grandes tensões residuais, apresentando tipicamente 60% da estrutura, referente ao interior, em um estado de tensão e cerca de 40%, referente à superfície, em um estado de compressão, como demonstrado na Figura 14 (Giacomini et al., 2010, Wigginton, 1996).

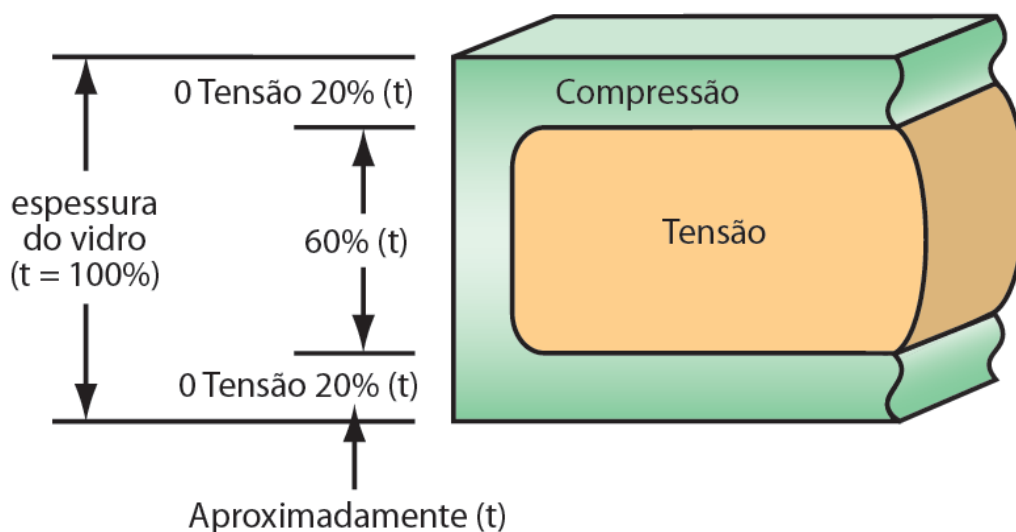


Figura 14: Estados de tração e compressão no vidro em função da têmpera (Manual Técnico SunGuard, 2010)

O vidro, por ser um material frágil, tem elevada resistência à compressão, porém apresenta o inconveniente de não tolerar grandes cargas momentâneas (impacto), que podem criar trincas na superfície que se propagam rapidamente pela estrutura interna. Parte desta baixa resistência se dá pelas concentrações de tensões em alguns pontos da estrutura superficial do material, o que acaba por superar seu limite de resistência à tração, que pode ser até mesmo baixo em alguns vidros. Neste contexto, o processo de têmpera do vidro introduz tensões superficiais de compressão no material, de forma que a resistência à tração desta superfície aumenta, pois qualquer esforço de tração que nela seja feito terá de superar

primeiro a compressão residual para então iniciar a deformação por tração. A resistência à tração da superfície submetida a este tratamento de têmpera pode chegar até cerca de 5 vezes a resistência do vidro original recozido. Por fim, é justamente o estado de compressão superficial introduzido pela têmpera que caracteriza o aumento de resistência do vidro temperado (Barros, 2010; Giacomini et al., 2010; Wigginton, 1996; Callister, 2007). A Figura 15 ilustra a situação de tensões descrita anteriormente.

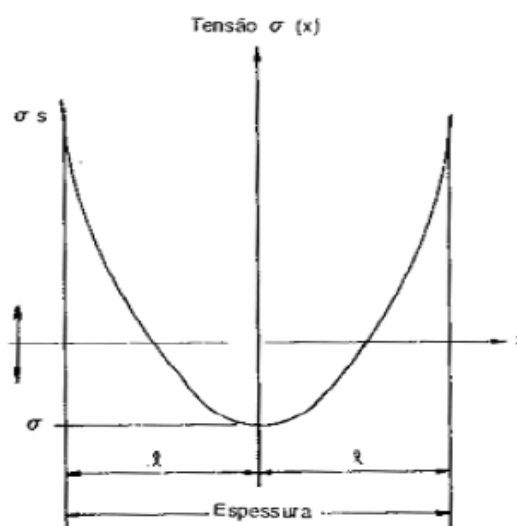


Figura 15: Tensões induzidas no vidro temperado (Martins et al., 2004; Bauer, 1991)

Inicialmente, os primeiros fornos, projetados a partir da década de 20, para se realizar a têmpera de vidros eram chamados verticais, pois neles o vidro era disposto na vertical para receber o tratamento de têmpera. A partir da década de 90 surgiram novos fornos com um projeto diferentes, onde os vidros eram temperados na horizontal, enquanto eram transportados por rolos de cerâmica. A Tabela 20 resume as particularidades dos dois tipos de fornos para têmpera de vidros.

Tabela 20 : Características dos dois tipos comerciais de fornos para têmpera de vidros (Abravidro, 2008):

Vertical	Horizontal
<ul style="list-style-type: none"> • O vidro é preso verticalmente a um carrinho que desliza sobre trilhos; • Durante o percurso, impactos e vibrações fazem com que as pinças, usadas para prender as chapas, “mordam” o vidro, o que pode provocar marcas na borda da peça; • Tempera cerca de 5 mil metros por mês, num turno de oito horas trabalhadas diariamente. Esse número varia de acordo com o tamanho do equipamento e espessura trabalhada; • Utiliza, em média, até 60% de sua área útil de trabalho. 	<ul style="list-style-type: none"> • O vidro é colocado deitado sobre a mesa de entrada e seu deslocamento é feito por meio de rolos; • O deslocamento é permanente, evitando o aparecimento de marcas; • Tempera, em média, 15 mil metros de vidro num turno de oito horas trabalhadas diariamente. Esse número varia de acordo com o tamanho do equipamento e espessura trabalhada; • Utiliza, em média, 85% de sua área útil de trabalho.

Uma característica marcante do vidro temperado é seu comportamento quando quebrado. Ao experimentar uma carga suficiente para provocar uma fissura em qualquer ponto da superfície deste vidro, esta trinca rapidamente se propaga e se multiplica pela estrutura interna do material, favorecida pelo estado de tensões internas que este se encontra, que também acaba por fazer com que o vidro se fragmente em diversos pedaços. Alguns destes pedaços podem até ser expelidos a grandes distâncias pela liberação da energia elástica acumulada pelas tensões residuais na forma de energia cinética. Estes fragmentos numerosos também são de pequeno tamanho, com arestas arredondadas não-cortantes e sem lascas pontiagudas, o que os torna menos suscetíveis ao corte de algum indivíduo que se encontre perto do vidro durante a destruição deste. Devido a esta característica, o vidro temperado é comumente referido também como vidro de segurança (Barros, 2010; SunGuard, 2010; Giacomini et al., 2010; Wigginton, 1996).

O processo de têmpera pode ser aplicado a todos os vidros planos, sempre aumentando a resistência do vidro original e agregando valor e segurança ao mesmo. Contudo, este processo também traz o transtorno referente à impossibilidade de se trabalhar o vidro posteriormente ao tratamento térmico, não se podendo realizar nenhuma operação de usinagem no mesmo, como corte, perfuração ou polimento de bordas após a têmpera, devido ao estado de tensões

internas gerado. Desta forma, qualquer etapa de trabalho mecânico deve ser realizada cuidadosamente antes da têmpera (Giacomini et al., 2010; Wigginton, 1996).

2.11 – Vidro Residual da Viminias

O presente trabalho tem como proposta a reutilização do resíduo proveniente de etapa de laminação e polimento de vidro plano sodo-cálcico (vidro plano) da empresa Viminias (ES). Tal resíduo já possui certo campo de aplicação na construção civil, contudo, seus potenciais físicos, químicos e estéticos, aliados à sua disponibilidade, sugerem ainda diversas novas possibilidades de reciclagem, aliadas a vantagens não só econômicas, mas operacionais também (Antônio, 2012). Vale ressaltar que o vidro que gerou o resíduo em questão, fazia parte da linha de produção de vidro temperado para diversas aplicações na construção civil, onde, posteriormente ao corte e lapidação, se processaria a têmpera deste vidro. A etapa de corte se dá antes da têmpera, pois se sabe que o vidro não pode ser cortado depois da têmpera, em função de suas tensões internas.

Conforme mencionado anteriormente, o resíduo em questão é proveniente da etapa de laminação e polimento do vidro plano. Tal etapa consiste em se submeter uma folha de vidro plano, previamente cortada em tamanho e formato específico, a um processo de desbaste das suas arestas, mediante a passagem por dois rebolos diamantados: um mais espesso, inicialmente, e outro menos espesso, posteriormente. Feito isso, as laterais afiadas, provenientes desta etapa, são aparadas e passam à etapa de polimento, onde se busca efetuar um arredondamento destas laterais mediante um processo abrasivo em menor escala, de forma a se extinguir o risco de corte pelas mesmas. Em todas estas etapas, se emprega a água como líquido de arrefecimento, para refrigerar os equipamentos e não permitir um grande aumento de temperatura das partes envolvidas, preservando, assim, as características operacionais e vida útil do equipamento, além de evitar a vibração excessiva proveniente do atrito, que poderia quebrar as placas de vidro (Antônio, 2012).

Esta água utilizada como líquido de arrefecimento carrega consigo as partículas de material vítreo desbastado em cada etapa, conforme é utilizada nestas etapas. Após utilizada, esta água, agora dotada de resíduos, é circulada através de

canais pelo parque industrial até tanques dotados de bombas que transportam esta mistura a um reservatório apropriado de armazenamento, chamado de silo. Neste silo, são adicionados produtos químicos à mistura, com o objetivo de auxiliar a decantação do resíduo de vidro da mistura, liberando a água para reutilização. Conforme o resíduo inicia a sua decantação e se separa da água no silo, mais mistura é adicionada ao processo, criando uma situação contínua de separação, onde a água livre de resíduo transborda pela superfície do silo e o resíduo de vidro decantado se acumula no fundo do silo. Este resíduo depositado no fundo do silo é aspirado até um agitador mecânico juntamente com um pouco de água, onde esse equipamento mantém a mistura em movimento constante, com o objetivo de evitar a decantação (Antônio, 2012).

Após a agitação do resíduo molhado, este é direcionado a um filtro-prensa, que submete a mistura à passagem por um filtro mediante a prensagem, onde se retira a maioria da água restante no material, obtendo-se uma massa maleável, acinzentada e com umidade residual de 3 a 5%. Por fim, se armazena tal massa em um recipiente para secagem natural, onde a mesma adquire aspecto rígido e coloração clara. Ao fim do processo, cerca de 95% da água é reutilizada (Antônio, 2012). A Figura 16 ilustra o processo de obtenção do resíduo de vidro.



Figura 16 – Fluxograma do processo de obtenção do resíduo de vidro (Antônio, 2012).

Segundo Antônio, 2012, são produzidos 290 Kg deste resíduo apenas em uma prensagem, de forma a totalizar 84 toneladas deste material por ano. Parte deste resíduo é reutilizada por indústrias cerâmicas ou reutilizada na produção de vidro,

contudo, grande parte deste montante ainda é descartado em aterros sanitários, contribuindo para o acúmulo de dejetos e os problemas decorrentes deste fato.

2.12 – Propriedades do Vidro Residual da Viminás

Ambas estas análises foram executadas pelo fornecedor do resíduo – Viminás – como parte de sua avaliação de destinação e periculosidade de resíduo, sendo parte destes resultados analisada por Licurgo (2015).

2.12.1 – Composição Química

A composição química do material foi obtida a partir de análise por fluorescência de raios-X. O equipamento utilizado foi um Espectrômetro por Fluorescência de Raios-X PW2400 da Philips munido de tubo de Rh de 3 KW de potência, seis cristais analisadores e dois detectores (selado e fluxo). O software utilizado para as análises foi o SemiQ, desenvolvido pela Philips e que acompanha o equipamento. A perda ao fogo foi determinada através da obtenção do peso da amostra antes e depois da mesma ser levada a 950°C por meia hora. Os elementos foram detectados a partir da fusão de 1,0 g de pó do material misturados com 7g de tetraborato de lítio. As condições analíticas para a dosagem dos elementos presentes nas amostras foram: detectores selado e de fluxo, cristais analisadores PET, Ge, PX1, PX3 e LIF200 e potência do tubo 24 KV e 90 mA ou 50 KV e 50 mA, dependendo do elemento químico a ser detectado. Com base em análises de padrões, o erro analítico relativo estimado é: Si, Al (<1%), Fe, Mg, Ca (1-2%), Ti, Na, K (3-5%), P e outros elementos traços (< 10%). As curvas de calibração foram obtidas a partir da análise de padrões de óxidos puros dos elementos (Licurgo, 2015).

Também avaliou-se a composição química qualitativa da amostra de resíduo da Viminás por Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), onde buscou-se verificar a concordância deste resultados com a análise de Fluorescência de Raios-X (Licurgo, 2015).

A composição mineralógica qualitativa do resíduo de vidro foi avaliada por meio de difração de raios-x (DRX) em amostras na forma de pó, utilizando difratômetro SHIMADZU, modelo XRD-7000, operando com radiação Cobre Ka, variando de 3 a

90°. Devido ao fato do vidro ser um material amorfo, já é de esperar como resultado desta análise um gráfico típico de material amorfo, de forma que não seja possível identificar fases. Contudo, o fornecedor (Viminas) optou por esta análise para assegurar a natureza do resíduo, pois em caso de contaminação com outro material, o teste poderia indicar a presença de material estranho, além do fato de ser política de manejo e análise de resíduos.

A Tabela 21 relaciona a composição química do resíduo em questão. Como se pode verificar, trata-se de um típico vidro sodo-cáustico, possuindo majoritariamente óxido de silício, óxido de sódio e óxido de cálcio, respectivamente. Além destes, há outros elementos, em quantidade muito inferior, como óxidos de ferro, alumínio e magnésio, provavelmente para fornecer coloração e desempenhar outros papéis, além de traços de óxido de titânio, potássio e fósforo, provavelmente residuais da matéria prima utilizada.

Tabela 21: Composição química de amostra de Resíduo Viminas (Licurgo, 2015)

Composição	Conc. (% em peso)
SiO ₂	67,88
TiO ₂	0,17
Al ₂ O ₃	2,31
Fe ₂ O ₃	1,25
MgO	2,44
CaO	8,44
Na ₂ O	13,57
K ₂ O	0,30
P ₂ O ₅	0,05
SO ₃	0,25
Cr ₂ O ₃	0,09
NiO	0,11
CuO	0,03
ZrO ₂	0,10
PF	2,80
Total	99,79

É possível ver na Figura 17, a análise por Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) de dois pontos diferentes na amostra fornecida pela Viminias. Como pode ser observado, o resultado da análise indica uma composição típica de um vidro Sodo-Cáustico, contendo em sua maioria silício, sódio, cálcio e oxigênio (na forma de seus respectivos óxidos), o que confirma a natureza do vidro usado pela Viminias e a composição do resíduo em concordância com a matéria prima de origem.

Este resultado está em plena concordância também com a avaliação de composição química por Fluorescência de Raio-X, discutida anteriormente.

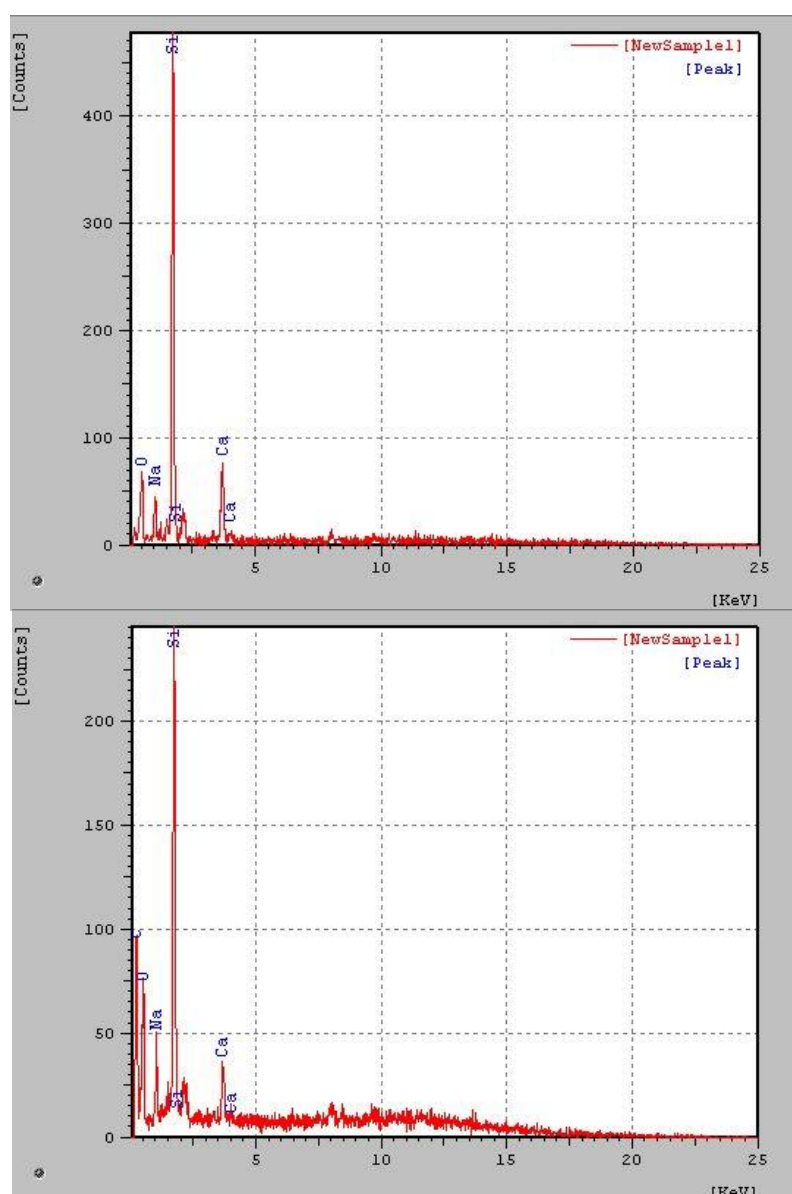


Figura 17 – Imagens de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) para amostra de resíduo de vidro da Viminias, para dois pontos (Licurgo, 2015).

2.12.2 – Composição Mineralógica

A composição mineralógica qualitativa do resíduo de vidro foi avaliada por meio de difração de raios-x (DRX) em amostras na forma de pó, utilizando difratômetro SHIMADZU, modelo XRD-7000, operando com radiação Cobre Ka, variando de 3 a 90°. Devido ao fato do vidro ser um material amorfo, já é de esperar como resultado desta análise um gráfico típico de material amorfo, de forma que não seja possível identificar fases. Contudo, o fornecedor (Viminas) optou por esta análise para assegurar a natureza do resíduo, pois em caso de contaminação com outro material, o teste poderia indicar a presença de material estranho, além do fato de ser política de manejo e análise de resíduos (Licurgo, 2015).

A Figura 18 mostra o resultado da análise de difratometria de raios-x. Nesta figura é possível ver um gráfico típico de material amorfo, no qual a linha de fundo está alta, mal definida e muito variante. Este comportamento indica que não há orientação preferencial para porções significativas do material, o que significa que não apresenta fases bem definidas, logo, se trata de um material amorfo, conforme já esperado para o vidro (Licurgo, 2015).

Este resultado é considerado óbvio, conforme citado anteriormente, contudo, o fornecedor – Viminas – fez questão de executar este ensaio, para averiguar a qualidade de seus resíduos, verificando a presença de impurezas, que indicariam outras fases estranhas presentes. Entretanto, como pôde ser visto, não há indícios suficientes de outras fases se sobrepondo o difratograma, e junto à análise de composição química, percebe-se que, de fato, o resíduo contém apenas os fragmentos de vidro sodo-cáustico usado pela Viminas (para produção de vidro temperado), não possuindo impurezas residuais do processo de acúmulo, manejo e logística dos resíduos (Licurgo, 2015).

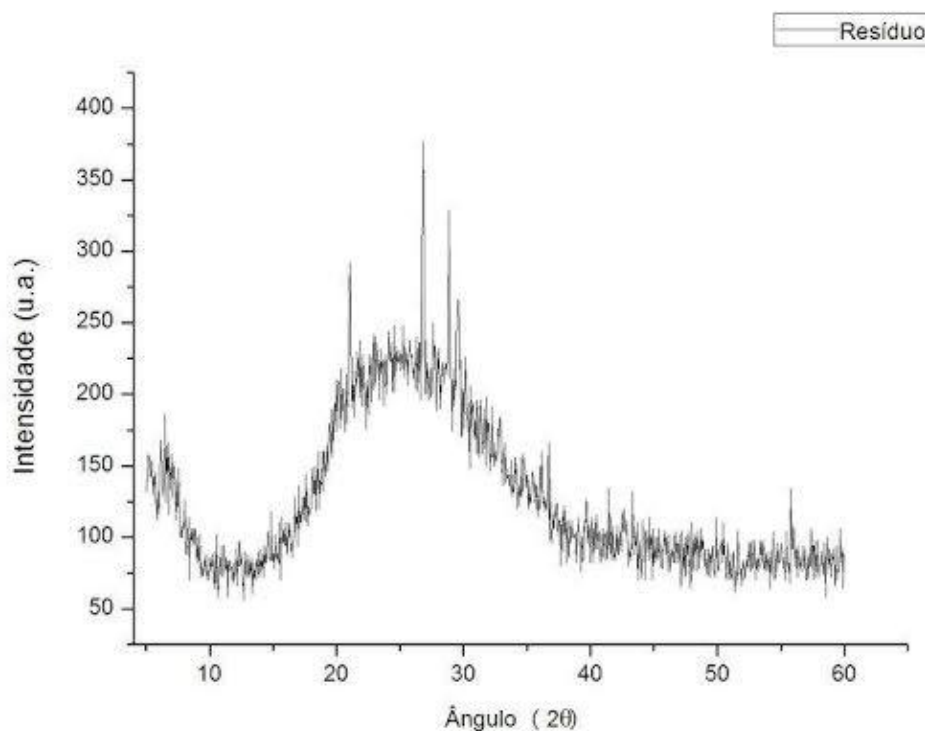


Figura 18 – Difratoimetria de Raio-X de amostra de resíduo Viminis (Licurgo, 2015).

2.12.3 – Distribuição do Tamanho de Partículas

A distribuição do tamanho de partículas foi obtida pelo método de peneiramento, de acordo com a norma técnica ABNT NBR 7181 (ABNT, 1984a). O procedimento padrão consistiu em peneiramento de uma amostra de 60g do resíduo, já processado em moinho de mandíbulas e seco, mediante peneiras de malha 10, 24, 35, 45, 80, 100, 150 e 200#, montadas consecutivamente, partindo da mais espessa (10#), até a mais fina (200 #). A bateria de peneiras, fundo de coleta e tampa foi montada e fixada sobre uma mesa de vibração adequada, que realizou o trabalho de forma contínua por 10 minutos (Licurgo, 2015).

Através da massa de resíduo obtida em cada sucessão de peneiras, se montou o perfil de distribuição natural de tamanho de partículas, em porcentagem. Este perfil serve de base de análise da viabilidade de trabalho de algumas granulometrias na confecção de compósitos, dado a praticidade e rapidez para produzir tais granulometrias (Licurgo, 2015).

A Figura 19 mostra o resultado da análise granulométrica feita com um lote de resíduo, que se encontra resumida na Tabela 22, para os tamanhos padronizados para particulado.

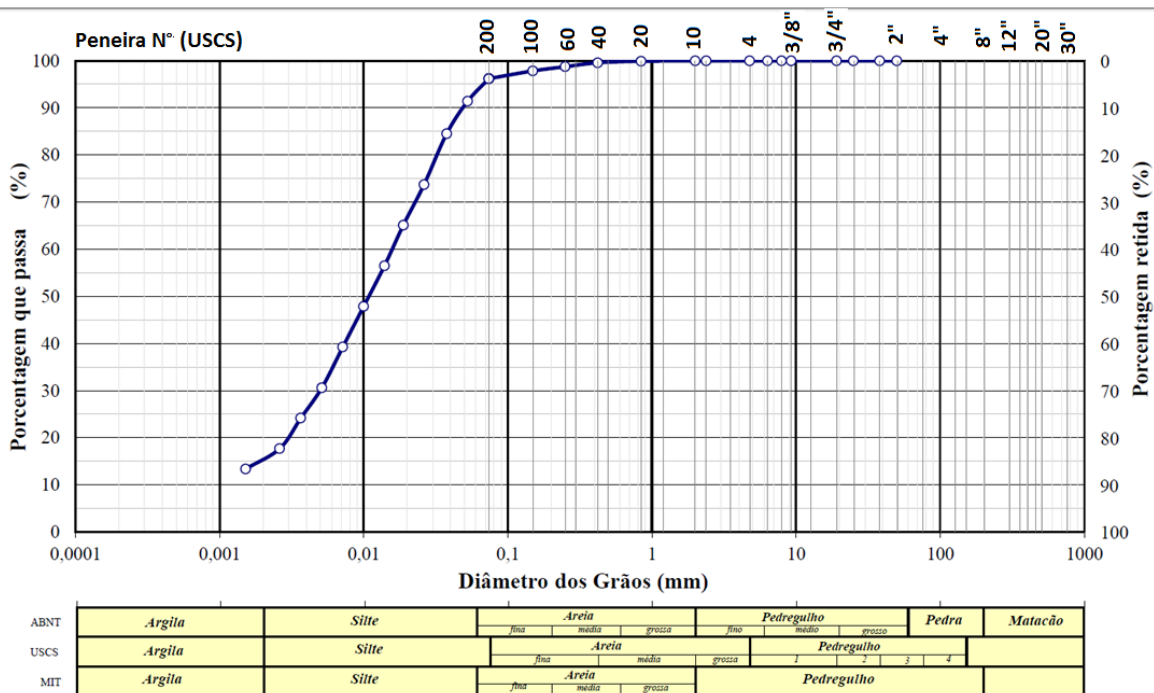


Figura 19 – Gráfico de granulometria, mostrando tamanho de partícula por massa acumulada de resíduo de vidro da Viminis (Licurgo, 2015).

Tabela 22: Classificação granulométrica do resíduo Viminis (Licurgo, 2015)

Tamanho	Quantidade (%)
Pedregulho Grosso	0
Pedregulho Médio	0
Pedregulho Fino	0
Areia Grossa	0,3
Areia Média	1,4
Areia Fina	5,2
Silte	77,8
Fração Argila	15,3

Pode-se perceber, que o material pode ser processado com grande eficiência até baixos tamanhos de grão, visto a predominância de partículas abaixo de 200 Mesh (0,074mm). Tal fato pode ser interessante para a confecção de rochas artificiais de melhor aspecto visual, como o marmoglass. Contudo, de um ponto de vista prático, há vários problemas que dificultam a obtenção de grande quantidade de partículas com tamanho de grão tão pequeno, o que acaba por tornar o uso destas granulometrias impraticável fora de uma escala industrial. Dentre estas dificuldades se encontram a necessidade de se secar exageradamente a amostra, dada à grande capacidade do vidro de absorver umidade, o que tende a aglomerar as partículas menores para formar outras maiores; além da própria resistência elevada do material à compactação. (Licurgo, 2015)

2.12.4 – Morfologia

A análise da morfologia e perfil das partículas foi analisada através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no intuito de se avaliar a capacidade de adesão das partículas, onde, posteriormente, se buscou correlacionar esta característica às demais propriedades avaliadas (Licurgo, 2015).

A Figura 20 mostra a imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura do resíduo de vidro Viminás já processado. Pode-se verificar uma grande variedade de tamanhos e formatos presentes, contudo, todas as partículas apresentam superfícies heterogêneas, com presença de muitos planos com ângulos diferentes, reentrâncias e serrilhações. Este tipo de superfície é vantajosa para a confecção de compósitos, pois apresentam um aspecto favorável à adesão mecânica da resina às partículas. Esta adesão se dá pelo preenchimento do polímero nestas imperfeições superficiais das partículas, onde, quanto maior a área superficial acidentada, maior as interações da resina com o particulado, o que tende a ancorar mecanicamente a ligação entre dois. Sob este aspecto, a resistência desta ligação tende a ser alta (Rabello, 2007)

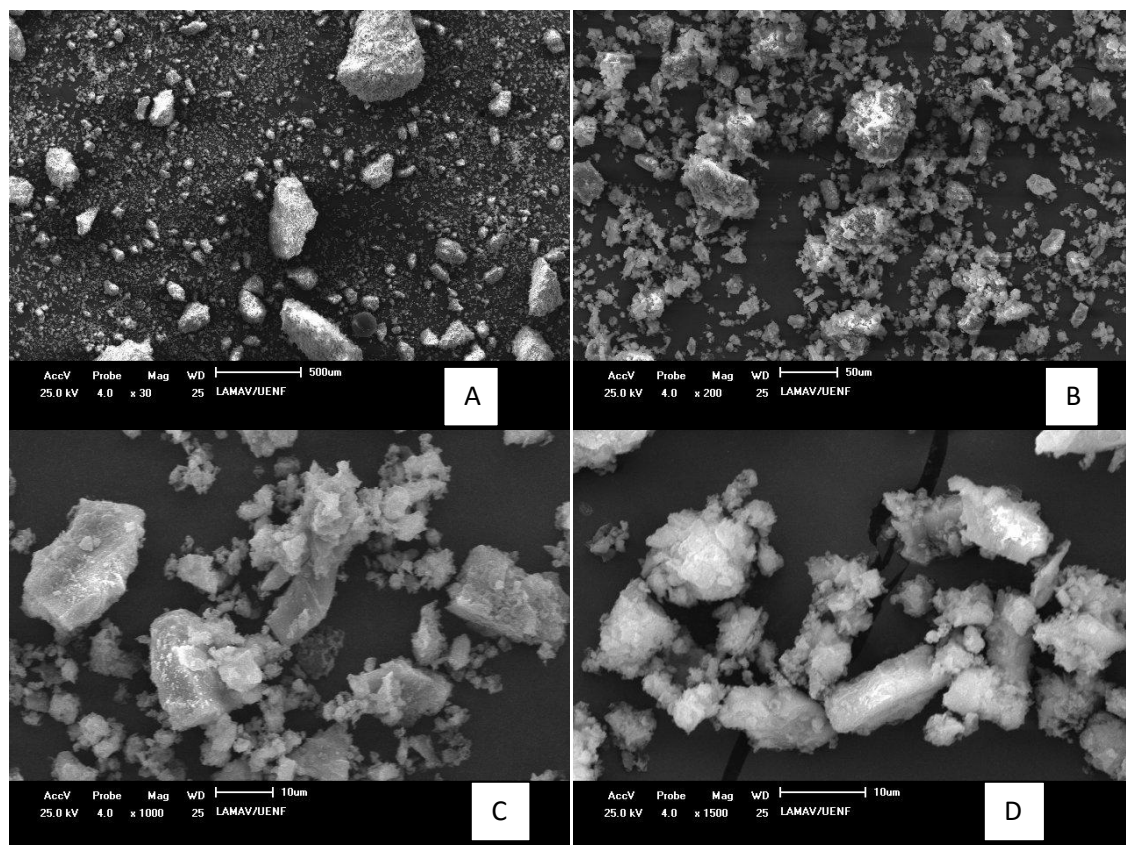


Figura 20 – Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra de resíduo de corte e lapidação de vidro da Viminás, com aumentos de: (A)30; (B): 200; (C): 1000; e (D): 1500 (Licurgo, 2015).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais Utilizados

Os materiais utilizados no estudo foram:

- Resíduo proveniente de etapa de laminação e polimento de vidro plano sodo-cálcico da empresa Viminias (ES);
- Resina de epóxi do tipo éter diglicidítico do bisfenol A (DGEBA), acompanhado de seu endurecedor trietileno tetramina (TETA);

3.1.1. Resíduo de vidro

Conforme citado anteriormente, o resíduo de vidro a ser utilizado é proveniente de etapa de laminação e polimento de vidro plano sodo-cálcico, coletado na estação e tratamento de efluentes instalada na empresa Viminias, indústria de beneficiamento e manufatura de vidros, especialmente vidros temperados. A Viminias se localiza no CIVIT II, município da Serra, região metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo, Brasil.

Considerando que o resíduo não se apresentava, no estado obtido da fábrica, aplicável ao trabalho desta pesquisa, devido a seu estado de aglomeração, foi necessário se aplicar um tratamento prévio do mesmo.

Inicialmente, se efetuou a secagem do mesmo a 110°C em estufa laboratorial, da marca QUIMIS e modelo Q314M, visando a retirada da água residual. Feito isso, obteve-se um material na forma de aglomerados de partículas de grande tamanho, impossíveis de serem manuseados, analisados ou aplicados na confecção de compósitos. Sendo assim, efetuou-se a quebra seqüencial destes aglomerados, inicialmente em moinho de mandíbulas, e posteriormente de forma manual, utilizando-se almofariz e pistilo. Posteriormente seguiu-se o peneiramento, de forma a se obter um produto com tamanho de partícula abaixo de 2mm (9 mesh).

3.1.2 Resina Epóxi

Utilizou-se uma resina de epóxi do tipo éter diglicídico do bisfenol A (DGEBA), acompanhado de seu endurecedor trietileno tetramina (TETA). A proporção de mistura usada foi de 13 partes de endurecedor para 100 partes de resina. Segue na Tabela 23 algumas de suas propriedades

Tabela 23: Propriedades químicas e físicas da resina de epóxi empregada (Zacharuk et al., 2009).

Sistema	Tensão Máxima Suportada (MPa)	Deformação Máxima Suportada (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
DGEBA	41,6 ± 1,2	3,2 ± 0,1	2,17 ± 0,08

3.2 Caracterização das Matérias Primas

Dado que o resíduo já foi estudado por seu fabricante e outros autores (Licurgo, 2015; Antônio, 2012), algumas propriedades deste foram retiradas da literatura.

Contudo, procedeu-se a análise de algumas características adicionais de maior interesse para a pesquisa. Dentre elas, fez-se uma análise granulométrica da amostra, onde buscou-se obter o perfil clássico de granulometria da mesma, na tentativa de avaliar possíveis alternativas que otimizassem o empacotamento das partículas. Por último, através da análise granulométrica, se determinou as principais faixas de tamanho médio de grão que seriam interessantes experimentalmente para se trabalhar, onde, para a confecção de rocha artificial usando o resíduo em questão, preferiu-se trabalhar com granulometrias maiores, de 9 a 35#, visto a praticidade de processamento e classificação, devido ao menor tempo envolvido, disponibilidade de equipamento e facilidade de operação.

Por fim, através destas faixas citadas anteriormente, efetuou-se o estudo da melhor combinação de diferentes granulometrias que permitissem um maior empacotamento das partículas sob vibração.

A Figura 21 mostra um fluxograma dos procedimentos experimentais usados neste trabalho, já levando em conta os resultados extraídos da bibliografia que interessasse ao trabalho.

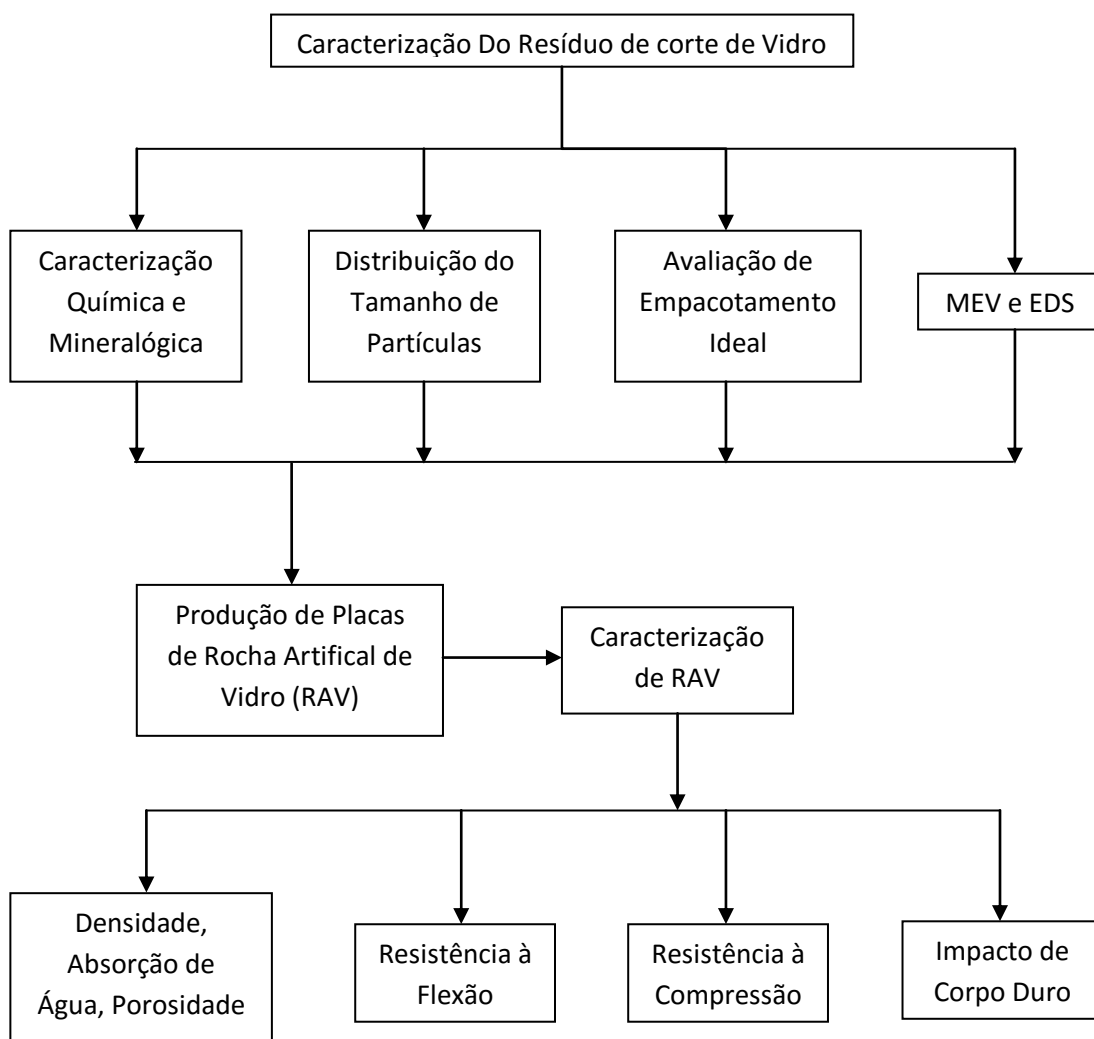


Figura 21: Fluxograma dos Procedimentos Experimentais

3.2.1 Avaliação do empacotamento ideal para trabalho

Através da análise da distribuição granulométrica, se estabeleceu que, a nível prático, as melhores faixas de granulometrias a serem usadas seriam obtidas usando-se as peneiras de 9 a 35 mesh, conforme discutido nos resultados adiante.

Desta forma, para esta análise, efetuou-se novamente a preparação de material, que se encaixasse nas faixas consideradas ideais de granulometria, baseado na análise prévia de distribuição de tamanho de partícula. As faixas

utilizadas, para isto, foram de 9 a 10# (patamar superior), 9 a 24#, 24 a 35#, e abaixo de 35# (patamar inferior).

A distribuição do tamanho de partículas foi obtida pelo método de peneiramento fino, de acordo com a norma técnica ABNT NBR 7181 (ABNT, 1984a). O procedimento padrão consistiu em peneiramento mediante peneiras de malha 9, 10, 24 e 35 mesh, montadas consecutivamente, partindo da mais espessa (9 mesh), passando pela mediana (24 mesh), até a mais fina (35 mesh). A bateria de peneiras, fundo de coleta e tampa foi montada e fixada sobre uma mesa de vibração adequada, que realizou o trabalho de forma contínua por 10 minutos.

Seguindo esta metodologia, preparou-se cerca de 500g de resíduo particulado para cada faixa de granulometria, para se efetuarem os testes de empacotamento. O procedimento padrão para estes testes foi pesar 60g de resíduo de vidro de diferentes faixas granulométricas ou mistura de resíduos de diferentes faixas, em mesma proporção, que somasse 60g, para, em seguida, depositá-los em uma proveta de 100ml. Posteriormente, efetuou-se a vibração manual dos beakers, contendo as misturas de diferentes granulometrias, até que estas ocupassem o menor volume possível no Becker, que seria a maior compactação alcançada pelos grãos, mediante vibração mecânica. O objetivo de se promover a vibração para alcançar a melhor compactação é simular na prática a compactação que este material sofrerá durante a etapa de vibro-compressão à vácuo durante a confecção dos compósitos. Segue abaixo a Tabela 24, contendo as composições teóricas das misturas de granulometrias usadas nesta análise:

Tabela 24: Misturas idealizadas de faixas de granulometrias usadas no teste de compactação

Mistura	Massa de acordo com faixa granulométrica utilizada (g)			
	9# a 10#	10# a 24#	24# a 35#	Abaixo de 35#
1	60	--	--	--
2	--	60	--	--
3	--	--	60	--
4	--	--	--	60
5	30	--	--	30
6	30	30	--	--
7	30	--	30	--
8	--	30	30	--
9	--	30	--	30
10	--	--	30	30
11	20	20	20	--
12	20	20	--	20
13	20	--	20	20
14	--	20	20	20
15	15	15	15	15

Como o material a ser utilizado foi classificado previamente entre as peneiras de malha 10 e 35 mesh, o procedimento de sedimentação não foi adotado.

3.3 Produção das Placas de Rocha Artificial

Os fragmentos de vidro já quebrados e classificados entre as peneiras de malha 9 e 35 mesh foram pesados e aquecidos a 80°C por 30 minutos, para retirada da umidade.

Os fragmentos, após resfriados em dessecador, foram misturados manualmente em proporção correta em recipiente apropriado, para se criar um compósito com 75% de resíduo de vidro e 25% de resina Epóxi, em massa. Após se misturar devidamente, evitando a formação de bolhas, a mistura foi vertida na caixa do molde, medindo 100mm x 100mm, e nivelados com uma espátula, atingindo uma altura de 16mm.

Antes de receber a mistura, os moldes foram devidamente preparados para evitar a fuga de material na prensagem e adesão exagerada nas paredes internas da matriz. O molde, então, foi posicionado com sua tampa em uma prensa de capacidade de 15 toneladas, onde se prensou o mesmo com 10 toneladas de peso.

Feito isso, se aguardou por cerca de 16h a amostra prensada. O molde era então aberto e a placa retirada e disposta sobre uma superfície plana para prosseguimento da cura.

As placas foram submetidas a um tratamento térmico a 90°C, por um período de 4 horas, em estufa, com o objetivo de promover a saída de solventes e favorecer a conversão do epóxi residual.

3.4 Caracterização das Placas de Rocha Artificial

Foram analisadas para as placas de rocha artificial propriedades físicas e mecânicas. Foram avaliadas as propriedades: densidade, absorção de água, porosidade aparente, resistência à compressão, resistência à flexão, desgaste abrasivo e, ainda, rugosidade superficial.

Buscou-se ainda verificar a adesão das partículas à matriz através da observação da região de fratura em MEV.

Observações da superfície lixada do material produzido foram realizadas, por microscopia ótica, para comparação do aspecto apresentado pelo material estudado.

Para os resultados obtidos nos testes de densidade, absorção de água, porosidade aparente, resistência à compressão e resistência à flexão, foi calculado intervalo de confiança a 95%.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão e para a resistência à flexão do material produzido foram ainda submetidos a teste de normalidade de Anderson -Darling, para avaliar se os resultados obtidos ajustavam-se à uma distribuição normal. Toda análise estatística foi feita utilizando o software Minitab.

3.4.1. Propriedades Físico-Mecânicas das Placas de Rocha Artificial

Para determinação das propriedades das placas de rocha artificial foram utilizados corpos de prova cortados das placas produzidas.

3.4.1.1. Densidade Aparente, Absorção de Água e Porosidade Aparente

A determinação da densidade, da absorção de água e da porosidade aparente foram feitas a partir da norma técnica ASTM C373/72.

Foram preparados cinco corpos de prova com massa entre 50 e 100g. , Conforme descrito na norma, estes corpos de prova foram secados em estufa de resfriamento e posteriormente determinou-se a massa dos mesmos. Feito isso, os corpos de prova foram imersos em água fervente por 5 horas e deixados na água por mais 24 horas. Os corpos de prova saturados de umidade são pesados suspensos dentro da água e posteriormente fora da água.

A razão entre o peso seco e o volume exterior corresponde ao valor da densidade. O volume exterior é determinado pela diferença entre a massa saturada e a massa suspensa.

A partir da referida norma, usou-se a seguinte equação para determinação da densidade:

$$B = \frac{D}{V} \quad (2)$$

Onde:

B = densidade

D = massa seca

V = volume exterior (massa saturada - massa saturada suspensa)

A absorção de água consiste na razão entre a massa de água absorvida e a massa seca dos corpos de prova, sendo expressa em percentagem. A equação, citada na norma, para cálculo da absorção é a seguinte:

$$A = \left(\frac{M-D}{D} \right) \times 100V \quad (3)$$

Onde:

A = absorção de água percentual

M = massa saturada

D = massa seca

A porosidade aparente é expressa em percentagem e é calculada a partir da razão entre o volume de poros abertos, determinado pela diferença entre a massa saturada (M) e a massa seca (D), e o volume exterior. A equação utilizada para cálculo da porosidade aparente é a seguinte:

$$P = \left(\frac{M-D}{V} \right) \times 100V \quad (4)$$

Onde:

P = porosidade aparente

M = massa saturada

D = massa seca

V = volume exterior (massa saturada - massa saturada suspensa)

Os valores obtidos correspondem à média aritmética dos resultados obtidos para os cinco corpos de prova ensaiados, expressos com uma casa decimal.

3.4.1.2. Resistência à Flexão

O ensaio de resistência à flexão em três pontos foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000, segundo a norma ABNT NBR 15845:2010.

Os corpos de prova de rocha artificial foram cortados nas dimensões de 70x20x10mm. Da mesma forma que citado anteriormente, para o ensaio de compressão, o valor do lado da base, de 10mm, foi escolhido por ser a espessura das placas produzidas, de forma que esta dimensão era aproveitada no corte dos corpos de prova, facilitando se obter as mesmas dimensões para todos os materiais avaliados. Estes corpos de prova também foram medidos com precisão de 0,1mm, utilizando um paquímetro com precisão de 0,05mm.

Após medição os corpos de prova foram colocados sobre os cilindros de apoio e o cilindro superior posicionado no meio do comprimento do corpo de prova. A velocidade adotada no ensaio foi de 1mm/min, sendo mantida constante até a ruptura do corpo de prova.

Foram ensaiados 10 corpos de prova. A tensão de ruptura em flexão foi calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$\sigma_F = \frac{3F \times L}{2b \times h^2} \quad (5)$$

Onde:

σ_F = tensão de ruptura em flexão (MPa)

F = força (N)

L = distância entre as barras de apoio (mm)

b = largura do corpo de prova ao longo da ruptura após ensaiado (mm)

h = espessura mínima do corpo de prova (mm)

3.4.1.3. Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000, segundo a norma ABNT NBR 15845:2010.

Para a realização deste ensaio foram preparados corpos de prova com base quadrada com lado medindo 10mm e altura de 30mm. O valor do lado da base, de 10mm, foi escolhido por ser a espessura das placas produzidas, de forma que esta dimensão era aproveitada no corte dos corpos de prova, facilitando se obter as mesmas dimensões para todos os materiais avaliados.

Os corpos de prova foram medidos com precisão de 0,1mm, utilizando um paquímetro com precisão de 0,05mm, e após a medição, os corpos de prova foram colocados, individualmente, sobre a base inferior da máquina de ensaio, sendo ajustado então a base superior.

Foram ensaiados 10 corpos de prova para a rocha artificial testada. A velocidade adotada nos ensaios foi de 1mm/min, sendo mantida constante até a ruptura do corpo de prova.

A tensão de ruptura em compressão foi calculada como a razão entre a força de compressão em Newtons (N) e a área da base do corpo de prova dada em mm², sendo expresso em MPa, conforme equação a seguir:

$$\sigma_c = F/A \quad (6)$$

Onde:

σ_c = tensão de ruptura em compressão (MPa)

F = força (N)

A = área da base (mm²)

3.4.1.4. Impacto de corpo duro

A determinação da energia para fratura por impacto de corpo duro foi feita baseado na norma técnica ABNT NBR 15845:2010, e em conformidade com as normas ASTM C373/72 e ABNT NBR 15575-3_2013. Apenas algumas alterações foram feitas, para viabilizar a análise de acordo com os equipamentos disponíveis. A primeira alteração foi nas dimensões dos corpos de prova, pois as dimensões recomendadas na norma ABNT NBR 15845:2010, de 200mm x 200mm, eram demasiadamente grandes para os equipamentos disponíveis para produção das placas de rocha artificial de vidro. A segunda alteração foi no peso do projétil, onde, no lugar da esfera de 1kg, usou-se uma de 200g, de forma que a altura de queda inicial e escala de diferença de altura do projétil também foi adaptada para que se mantivesse as mesmas relações energéticas referenciadas pela norma.

Foram preparados cinco corpos de prova quadrados com dimensões de 100mm x 100mm x 10mm, em formato compatível com as normas referenciadas.

Como não existe um equipamento regulamentado para execução, a norma instrui a construção do mesmo, e assim foi feito. O equipamento foi fabricado segundo as diretrizes da norma, com as adaptações para massa de projétil esférico de 200g e corpo de prova quadrado de dimensões de 100mm x 100mm x 10mm.

Conforme a norma, um projétil esférico de aço foi abandonado em queda livre sob os corpos de prova, diversas vezes, com alturas de queda crescentes em intervalos de 0,5J, até sua ruptura. Para cada altura de ruptura, foi-se calculada a energia necessária para o mesmo, pela equação 7. O aspecto da fratura também foi avaliado para caracterização do material.

$$E = 0,200 \times 9,81 \times h \quad (7)$$

Onde:

h = altura de queda do projétil esférico

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Avaliação do empacotamento ideal para trabalho

A Tabela 25 mostra os resultados da análise de empacotamento de acordo com a granulometria para o resíduo de vidro. Nesta tabela estão representadas as misturas de granulometrias usadas, respectivamente relacionadas ao volume e densidade das mesmas. Lembrando que para cada composição, foi usada a mesma massa de resíduo de 60g. Desta forma, buscou-se o menor volume e a maior densidade dentre as misturas elaboradas.

Tabela 25: Empacotamento das misturas de diferentes faixas granulométricas

Mistura	Massa de acordo com faixa granulométrica utilizada (g)				Volume final compactado (mL)	Densidade (g/cm ³)
	9# a 10#	10# a 24#	24# a 35#	Abaixo de 35#		
1	60	--	--	--	70	0,86
2	--	60	--	--	70	0,86
3	--	--	60	--	70	0,86
4	--	--	--	60	65	0,92
5	30	--	--	30	57	1,05
6	30	30	--	--	65	0,92
7	30	--	30	--	61	0,98
8	--	30	30	--	65	0,92
9	--	30	--	30	59	1,02
10	--	--	30	30	60	1,00
11	20	20	20	--	62	0,97
12	20	20	--	20	58	1,03
13	20	--	20	20	58	1,03
14	--	20	20	20	58	1,03
15	15	15	15	15	58	1,03

Inicialmente, percebeu-se uma grande diferença na compactação para as misturas de faixas granulométricas em relação às próprias faixas isoladas, podendo esta diferença chegar a melhorar a compactação em até 17%.

Desta forma, percebe-se que o melhor resultado se deu para as misturas que empregavam mais de uma granulometria, preferencialmente, de tamanho bem diferente, conforme esperado, segundo literatura, onde as partículas de menor tamanho se alojariam nos espaços entre as partículas de maiores tamanhos, permitindo a ocupação de espaços antes inacessíveis pelas partículas maiores (Liu e Ha, 2002).

A melhor composição verificada (mistura 5) foi a que continha apenas as faixas de 9# a 10# e abaixo de 35#. Contudo, outro grupo de misturas chamou a atenção também: as misturas de numeração 12 a 15. Estas misturas, apesar de apresentarem, aparentemente, menor densidade e compactação, possuem a vantagem de serem mais viáveis experimentalmente, visto que grande parte do material produzido se encontra nas faixas granulométricas intermediárias (de 10# a 24# e de 24# a 35#). Adicionalmente, a diferença de densidade entre estas últimas misturas (12 a 15) e a mistura 5 é ínfima (cerca de $0,02\text{g/cm}^3$).

Sendo assim, percebendo que qualquer uma das misturas de composição granulométrica contendo 3 ou 4 faixas diferentes produziria maior compactação, resolveu-se adotar estas faixas para confecção dos compósitos para as demais análises.

Os compósitos produzidos foram todos feitos escolhendo-se aleatoriamente uma das misturas ideais citadas anteriormente, conforme disponibilidade em estoque de material.

4.2. Densidade Aparente, Absorção de Água e Porosidade Aparente

Na Tabela 27 estão resumidas as densidades aparentes, absorção de água e porosidade aparente verificadas para a rocha artificial de vidro (presente trabalho), em comparação com dois outros materiais pesquisados por Ribeiro, 2011: mármore artificial e mármore calcítico.

Conforme descrito nos procedimentos, a densidade aparente obtida para a rocha artificial de vidro deste trabalho, determinada pelo método descrito na norma ASTM C373/72, apresentou um valor médio de $2,6 \pm 0,3 \text{ g/cm}^3$. Os fabricantes de

mármore artificial reportam valores de 2,4 a 2,5 g/cm³ (Alicante, 2009). Ao se considerar o desvio padrão, pode-se dizer que a densidade está compatível com os valores das rochas artificiais produzidas industrialmente, ou, no máximo, ligeiramente acima destes valores industriais.

Em todo caso, considerando a baixa densidade do vidro (cerca e 1,5 g/cm³), uma maior densidade poderia ser um indício da eficiência de compactação durante a produção do material, que tende a gerar maior densidade no compósito.

Em seu trabalho, Lee et al. (2008) alcançaram valores de densidade que variaram de 2,03 a 2,45 g/cm³ para rochas artificiais de carga de resíduo de vidro e granito. Apesar destes valores estarem compatíveis com os valores obtidos neste trabalho, no trabalho de Lee et al. (2008), os autores trabalharam com um processo de fabricação com metodologia e tecnologia diferente, onde variaram os parâmetros de pressão, nível de vácuo e frequência de vibração para alcançarem estes valores (Ribeiro, 2011).

A Figura 22 mostra um gráfico comparando a densidade aparente da rocha artificial de vidro em comparação com o mármore natural calcítico e o mármore artificial pesquisado por Ribeiro, 2011. Verifica-se que a densidade está um pouco acima dos valores relatados para estes dois materiais citados anteriormente, o que pode ser apenas uma consequência da carga de particulado usada ou ainda pode indicar uma melhor compactação, conforme citado anteriormente. Contudo, veremos adiante que o resultado de porosidade indica que o material ainda pode ser mais compactado, gerando maiores densidades.

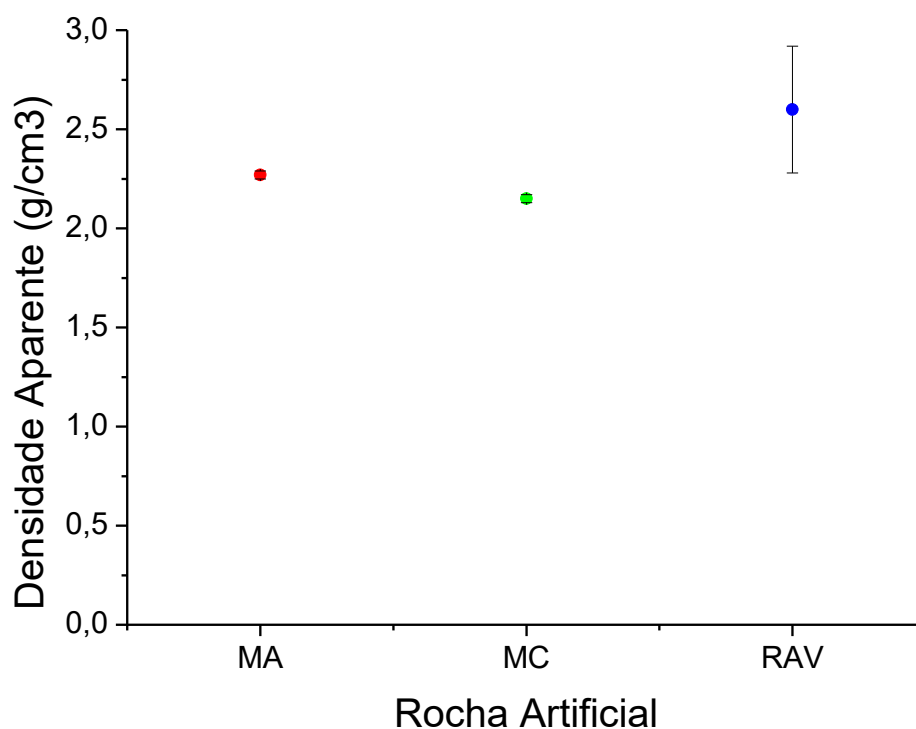


Figura 22 – Densidade aparente da rocha artificial de vidro (RAV) em comparação com o mármore calcítico (MC) e o mármore artificial (MA)

A densidade aparente obtida para a rocha artificial de vidro deste trabalho, determinada pelo método descrito na norma ASTM C373/72, apresentou um valor médio de $2,6 + 0,32 \text{ g/cm}^3$.

A absorção de água, assim como a densidade, foi determinada pelo método descrito na norma ASTM C373/72. O valor obtido para a rocha artificial de vidro foi de $7,01 \pm 0,52\%$.

Os fabricantes de mármore artificial reportam valores de 0,09 a 0,40% (Alicante, 2009), ao passo que Ribeiro, 2011, encontrou os valores de $3,64 \pm 0,36\%$ para o mármore artificial próprio de seu trabalho, e $9,16 \pm 0,24\%$ para o mármore calcítico. Ao comparar tais valores, verifica-se que a absorção de água ainda é alta, comparado às demais rochas artificiais, porém, baixo quando comparada ao mármore calcítico. Contudo, conforme informado por Ribeiro, 2011, este valor de 9,16 % chega a ser 20 vezes maior do que o informado pelo fabricante, o que demonstra que não é natural este resultado. Em todo caso, esta maior absorção de água pela rocha de vidro é consequência, como será discutido adiante, da porosidade do material.

Na figura 23 está uma comparação entre a absorção de água da rocha artificial de vidro e dos mármore artificiais e comercial (Ribeiro, 2011).

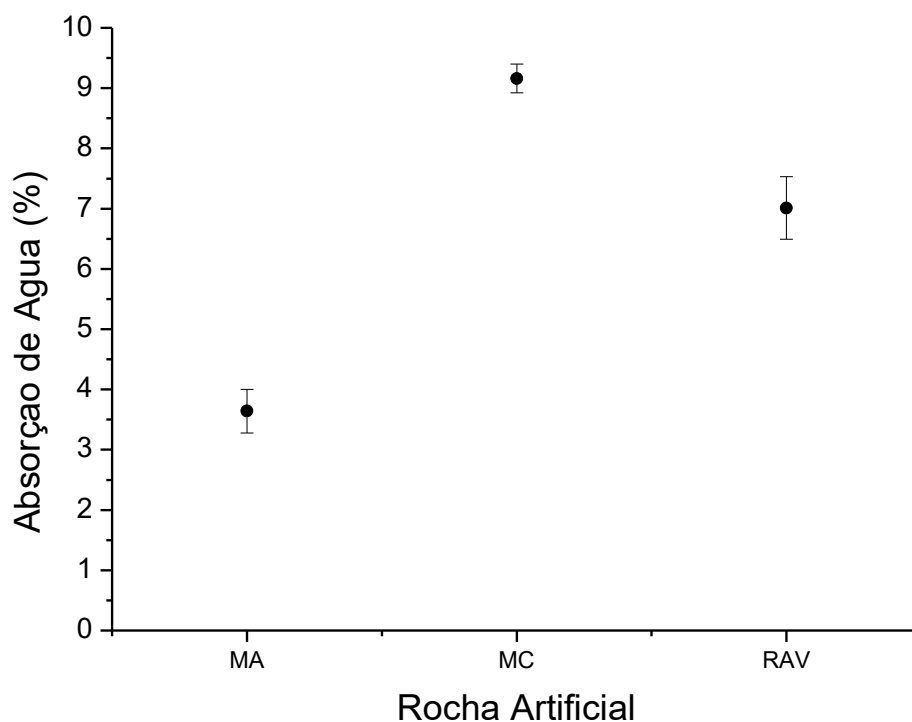


Figura 23 – Comparação entre a absorção de água da rocha artificial de vidro (RAV) e dos mármore artificiais (MA) e comercial (MC)

Conforme ocorrido nos procedimentos anteriores, a porosidade aparente para a rocha artificial de vidro deste trabalho também foi obtida pelo método descrito na norma ASTM C373/72. A rocha de vidro apresentou um valor médio de $18,31 \pm 3,36\%$.

Os fabricantes de mármore artificial não reportam os valores de porosidade de seus produtos, por motivos competitivos e relacionados ao processo de fabricação, protegido por patente. Contudo, se fará uma comparação com os valores de Ribeiro (2011), que encontrou, em seu trabalho, os valores de $8,28 \pm 0,75\%$ para o mármore artificial produzido por ele, e $19,64 \pm 0,46\%$ para o mármore calcítico.

Nota-se que a porosidade verificada para a rocha de vidro é muito acima do mármore artificial, chegando ao dobro do valor. Em comparação com o mármore calcítico, a porosidade está compatível, contudo, conforme já informado anteriormente, o valor da absorção chegou a ser 20 vezes maior do que o informado

pelo fabricante, o que é um indício de que esta porosidade também não é comum, por mais que o material seja de origem natural.

Provavelmente esta porosidade é resultado do processo de fabricação. O mármore artificial de Ribeiro (2011) foi fabricado com duas tecnologias a mais do que o presente trabalho: tecnologia do vácuo, que contribuiu para a captura do ar e gases decorrentes da cura do polímero; e vibração da amostra por um pequeno intervalo de tempo, que tende a mover as bolhas por entre a matriz polimérica viscosa até a superfície, devido à menor densidade destas bolhas. Desta forma, a porosidade de seu compósito foi reduzida significativamente. Porém, neste trabalho não tivemos tais tecnologias, apenas dispomos de compressão para expulsar uma fração das bolhas de gás dentro do compósito, o que não se mostrou eficiente, dado o resultado da porosidade aparente.

Esta porosidade aparente demonstra que há uma grande fração de vazios dentro da estrutura, sendo estes vazios diretamente responsáveis pela qualidade e propriedades mecânicas do material. Possivelmente, uma explicação para a menor resistência mecânica, tanto em flexão, quanto em compressão, pode ser encontrada na porosidade, que atua como concentradores de tensões dentro do material, contribuindo para a sua ruptura prematura, sob carregamento. A elevada absorção de água é consequência da elevada porosidade, onde os muitos poros na superfície atuam como locais de absorção e armazenamento de líquidos. Este fato pode ser um grande problema para algumas aplicações da rocha de vidro, especialmente em bancadas de produtos químicos ou alimentos, pois podem contribuir para a proliferação de bactérias e acúmulo de impurezas e produtos nocivos às atividades desenvolvidas. Por fim, este resultado elevado para a porosidade também pode indicar uma possibilidade de elevação ainda mais da densidade, dado que o compósito já apresentou elevada densidade, mesmo dotado de grandes vazios na estrutura. Desta forma, teoricamente, a densidade aparente poderia aumentar até mais de 3,0g/cm³ se houvesse uma redução de 10% na porosidade, até um valor compatível com outra rocha artificial.

A Figura 24 mostra um gráfico comparando a porosidade aparente da rocha artificial de vidro em comparação com o mármore calcítico e o mármore artificial pesquisado por Ribeiro, 2011.

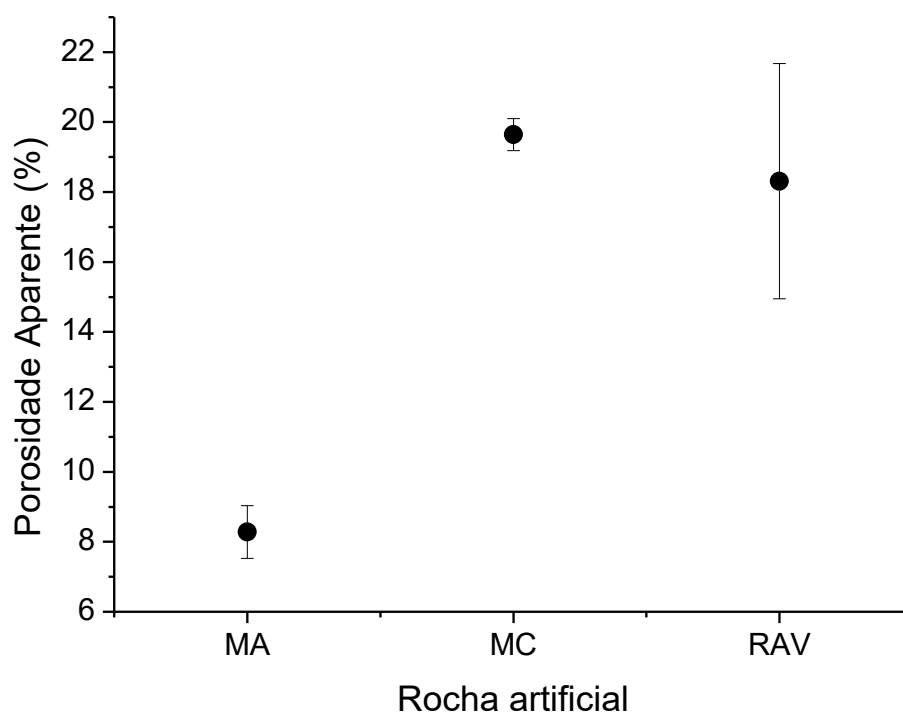


Figura 24 – Comparação entre a porosidade aparente da rocha artificial de vidro em comparação com o mármore calcítico e o mármore artificial

Na Tabela 26 estão resumidos os resultados dos ensaios realizados nesta etapa, juntamente às propriedades correspondentes ao mármore calcítico e artificial.

Tabela 26: Densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente para Rocha Artificial de Vidro, Mármore Artificial e Mármore Comercial.

Material	Corpo de prova	Densidade (g/cm ³)	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)
Rocha Artificial de Vidro	CP 1	2,34	6,70	15,66
	CP 2	2,49	7,28	18,14
	CP 3	3,12	8,01	24,94
	CP 4	2,43	6,91	16,82
	CP 5	2,53	7,08	17,90
	CP 6	2,99	6,63	19,85
	CP 7	2,30	6,45	14,82
	Média		2,60 ± 0,32	7,01 ± 0,52
Mármore Artificial	Média	2,27 ± 0,02	3,64 ± 0,36	8,28 ± 0,75
Mármore Comercial	Média	2,15 ± 0,02	9,16 ± 0,24	19,64 ± 0,46

4.3. Resistência à Flexão

Curvas típicas de força VS. extensão foram obtidas diretamente do programa de aquisição de dados da máquina, e estão apresentadas na Figura 25. Nesta figura, nota-se que a curva de flexão para a rocha artificial de resíduo de vidro apresenta comportamento estritamente elástico, corroborando para um caráter mecânico semelhante às rochas naturais. Como efeito, depois de alcançada a deformação elástica máxima, há a formação da trinca na superfície, com rápida propagação e fratura abrupta.

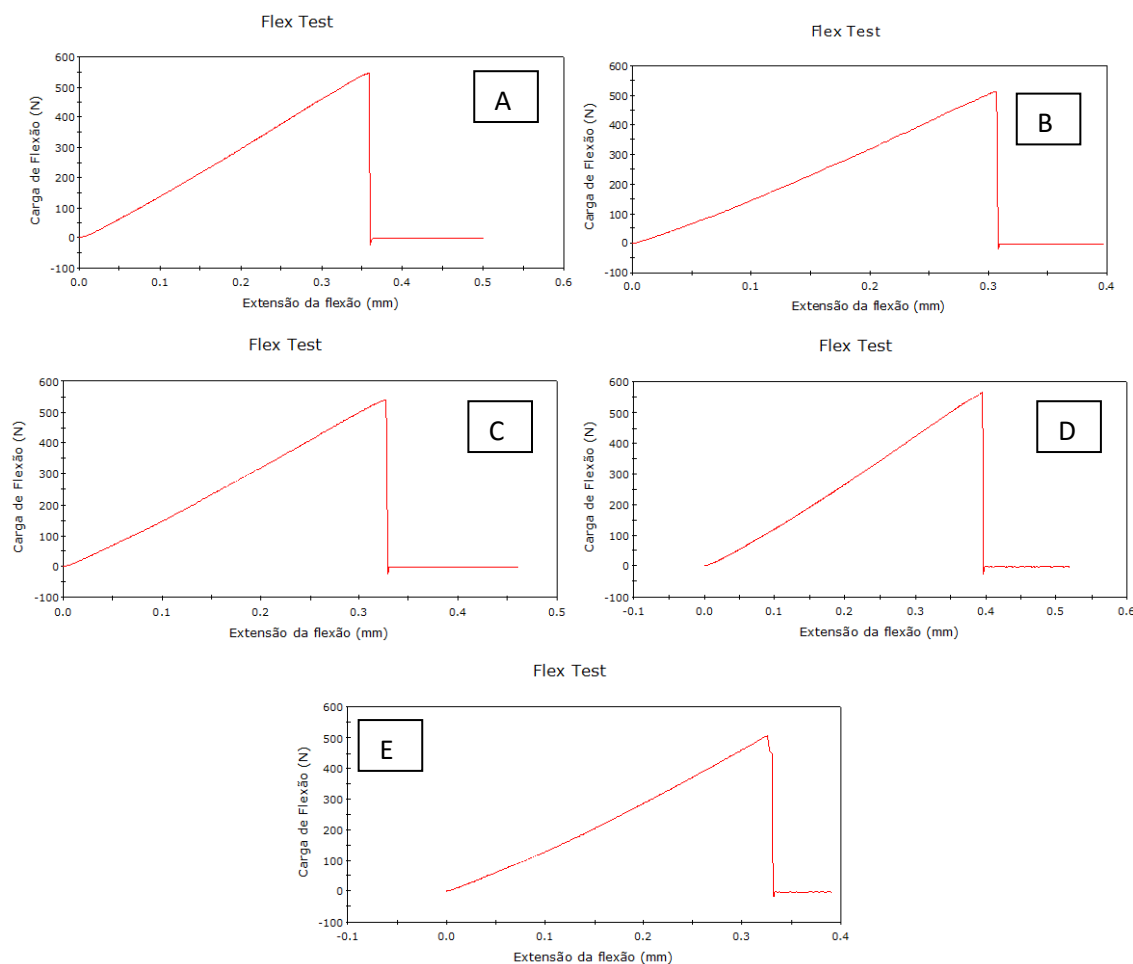


Figura 25 – Curvas de força VS. deflexão para teste de flexão de rocha artificial para os cinco primeiros corpos de prova (de A a E), com 75% em fração de volume de resíduo de vidro e 25% Epóxi,

A partir de curvas, tais como esta mostrada na Figura 24, a tensão de ruptura em flexão foi calculada para as amostras produzidas. A Tabela 27 apresenta os valores da força e tensão de ruptura alcançada para os compósitos em questão. O valor médio obtido para a tensão de ruptura em flexão é de:

$$\sigma_f = 35,89 \pm 2,89 \text{ MPa.}$$

É interessante observar, que a tensão de ruptura apresentou um valor pouco disperso, o que fornece uma confiabilidade do material para cálculos estruturais e projetos mecânicos.

Tabela 27 – Resultados de flexão de rocha artificial com 75% em fração de volume de resíduo de vidro e 25% de Epóxi.

CP	Força (N)	Tensão de ruptura em flexão (Mpa)
1	545,72	38,02
2	512,89	33,30
3	540,58	35,97
4	563,88	39,38
5	504,69	32,76

Neste trabalho, procedemos à análise comparativa de nossa rocha artificial de resíduo de vidro contra um mármore calcítico e um tipo de rocha artificial produzidos a partir deste, referenciado como “CB” (45% grosso, 30% médio e 25% fino), sendo os dados destes dois últimos materiais recolhidos da tese de doutorado de Ribeiro (2015). A composição do mármore artificial “CB” consiste em 85% de particulado de mármore calcítico (45% grosso, 30% médio e 25% fino, segundo parâmetros do autor), e 15% de resina Poliéster insaturado ortoftálico.

Sendo assim, o gráfico da Figura 26 apresenta uma comparação da tensão de ruptura obtida para a rocha artificial de vidro deste trabalho (RAV), contra a tensão de ruptura do mármore Calcítico (MC) e o mármore artificial (MA) de melhor resistência de Ribeiro (2015).

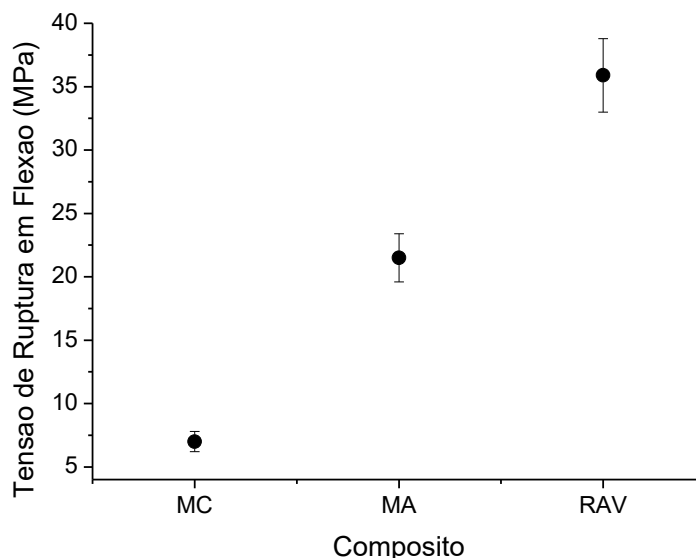


Figura 26 – Tensão de ruptura em flexão para Mármore Calcítico (MC), Mármore Artificial (MA) e Rocha Artificial de Vidro (RAV), respectivamente.

Conforme especificado na norma ASTM C503 (2003), é esperado para o mármore calcítico uma tensão de ruptura em flexão maior que 7 MPa. Considerando que a rocha artificial de vidro apresentou resistência muito acima deste valor (cerca de 5 vezes maior), pode-se afirmar, neste aspecto, que tal material é uma excelente opção de substituto ao mármore calcítico, com resistência muito superior a ele. Esta possível substituição acarretaria, conseqüentemente, economia de material, devido às menores dimensões para a seção resistiva (dada a maior resistência), que, aliada ao menor custo do material, geraria economia de custos na compra e instalação deste.

Adicionalmente, ao comparar os resultados da rocha artificial de vidro com o mármore artificial de Ribeiro (2015) percebe-se propriedade muito superior. Este resultado superior poderia já ser esperado, dado o fato do vidro ser mais resistente do que o mármore, o que tenderia a tornar o compósito mais resistente também, apesar do menor teor de material incorporado. Contudo, relativamente ao processo de fabricação, este resultado é um pouco contraditório em relação ao resultado esperado devido ao processo de fabricação do compósito. O compósito do Ribeiro (2015) foi fabricado usando-se a tecnologia de vibro-compressão a vácuo, onde, durante todo o processamento (mistura, vibração e compactação), a amostra se

encontrava sob vácuo; ao passo que o material produzido por este trabalho não teve este recurso. Possivelmente, o vácuo permitiria um melhor escoamento dos gases, o que corroboraria para menos vazios estruturais (porosidade) e melhor compactação nos compósitos de resíduo de vidro, o que iria se refletir em melhores propriedades mecânicas. De fato, este comportamento foi observado para o ensaio de compressão, mas para o de flexão não se precedeu desta forma. Provavelmente o reforça devido à resistência mecânica superior das partículas de vidro foi superior ao efeito concentrador de tensões dos vazios estruturais causados pelo processo de produção, o que acabou por criar um material mais resistente à flexão.

A Figura 27 mostra o típico aspecto macroscópico das amostras rompidas representativas dos compósitos em questão. Nesta figura, pode ser observado que a fratura se comporta como tipicamente esperado para um material frágil, sendo abrupta e majoritariamente transversal ao eixo do espécime, sem apresentar deformação plástica associada. Apesar da matriz ser composta por resina polimérica, e ter uma alta porcentagem de 25% em volume, o comportamento mecânico seguiu o perfil do componente majoritário – vidro – como esperado também, apesar da matriz que permeia as partículas possuir plasticidade (Callister, 2006; Dieter, 1988).

É possível se verificar que a trinca se propagou perfeitamente no meio do material, e de forma retilínea e transversal, como esperado. Este fato sugere que o material pode ser uniforme, dado que não há direções preferenciais para a trinca se propagar, senão as guiadas pela força aplicada.

O fato de que a trinca se propaga abruptamente pode ser um indício de baixa ou alta adesão do reforço à matriz do compósito, sendo esta análise apenas possível via microscopia de varredura (MEV), onde se veria se a trinca passa por entre os contornos dos grãos da fase de reforço (pouca adesão) ou por dentro deles (alta adesão). Contudo tal análise não foi abordada neste trabalho por razões técnicas (mas segue como sugestão para trabalho futuro).

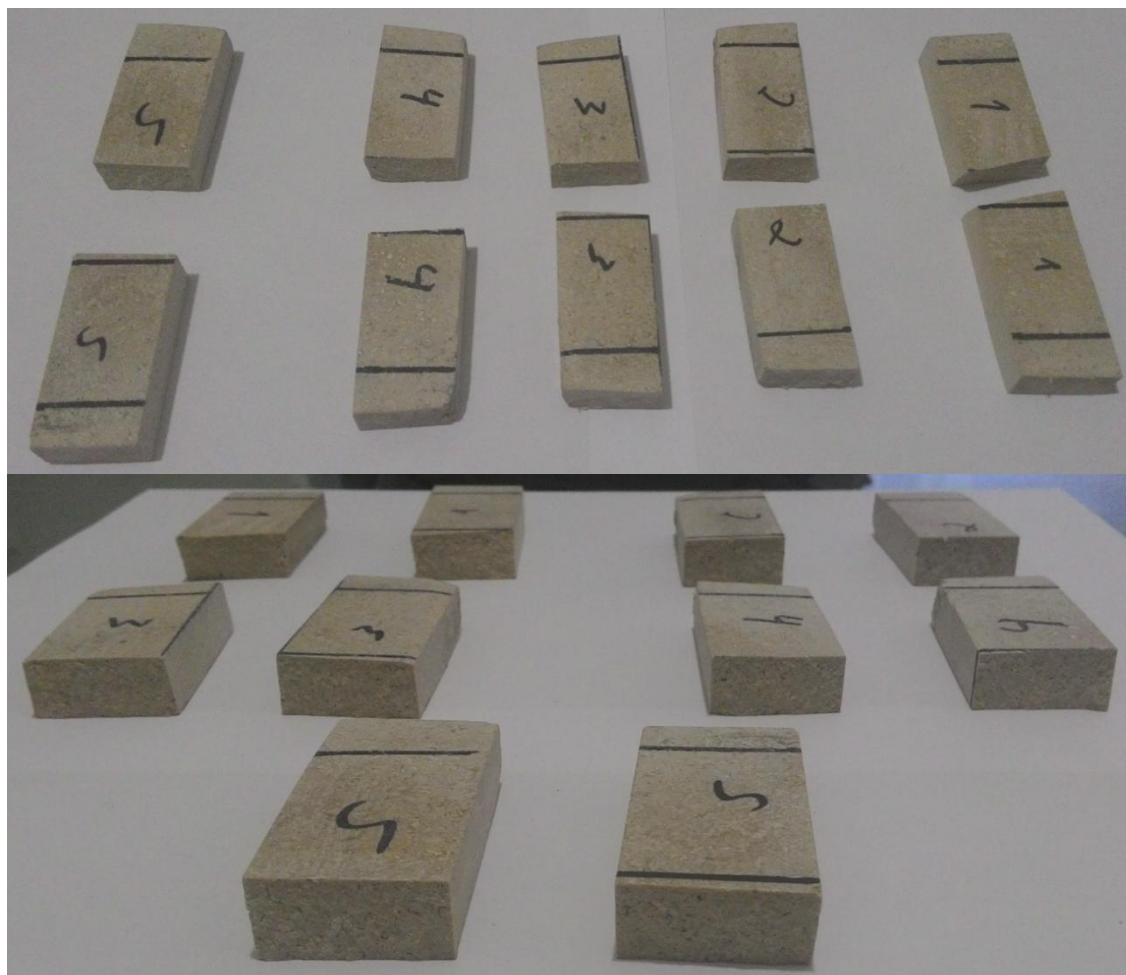


Figura 27 – Aspecto macroscópico da ruptura de amostras de compósitos de epóxi com diferentes frações de volume de resíduo de vidro.

4.4. Resistência à Compressão

Curvas típicas de tensão vs. Deformação, para cada amostra de rocha artificial de resíduo de vidro, são mostrados na Figura 28. Estas curvas foram obtidas diretamente do sistema de aquisição de dados da máquina Instron. O aspecto comum de todas as curvas é que elas apresentam praticamente apenas o comportamento elástico até fratura. A extensão sem carga no início é fruto do movimento livre das plataformas de compressão até alcançarem o corpo de prova. A curvatura inicial é uma consequência do ajuste de amostra para os apertos de compressão das plataformas até começar o regime elástico de compressão. O fim repentino desta presente fase linear indica que os compósitos se comportam como materiais frágeis, corroborado pelo ensaio de flexão, anteriormente.

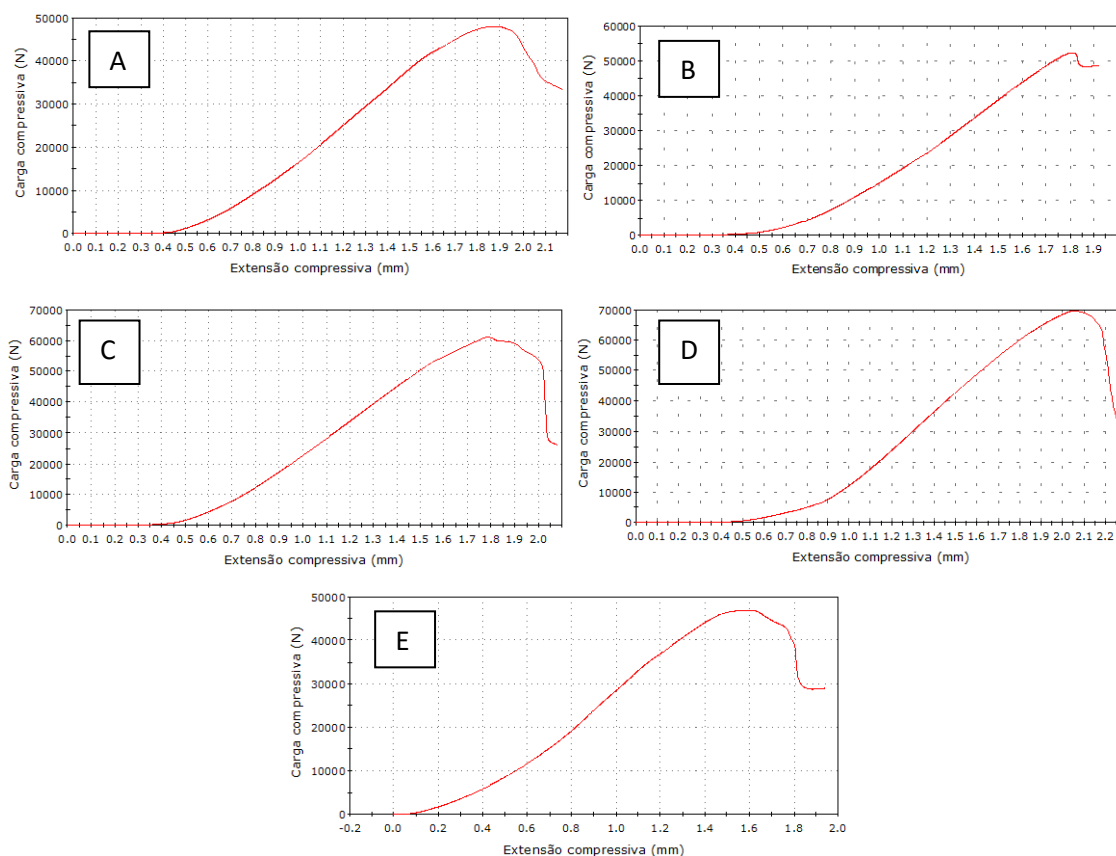


Figura 28 – Curvas típicas de Compressão vs. Deformação de rocha artificial para os cinco primeiros corpos de prova (de A a E), com 75% em fração de volume de resíduo de vidro e 25% Epóxi,

A partir de curvas, a tensão de ruptura em flexão foi calculada para as amostras produzidas. A Tabela 28 mostra os valores para a resistência à compressão (compressão de ruptura), módulo de elasticidade, e deformação total para a rocha artificial produzida com resíduo de vidro. Os valores médios obtidos para a Resistência a Compressão, Módulo de Elasticidade e Alongamento máximo são:

$$\sigma_c = 58,14 \pm 9,7 \text{ MPa}$$

$$E_c = 1,24 \pm 0,16 \text{ GPa}$$

$$\varepsilon_c = 4,67 \pm 0,24 \%$$

As três propriedades avaliadas acima apresentaram baixa dispersão, o que fornece uma confiabilidade do material para cálculos estruturais e projetos

mecânicos. É interessante notar que a Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade apresentaram valores relativamente mais dispersos (12,9% e 16,8%) do que a tensão de ruptura em flexão (8,3%), contudo, a deformação máxima foi muito pouco dispersa (diferença de 5%). Tal deformação máxima também se mostrou muito baixa, salientando a rigidez do material, não tolerando muita deformação compressiva.

Tabela 28 – Propriedades de compressão para rocha artificial de resíduo de vidro.

CP	Força (N)	Resistência à Compressão (Mpa)	E (Gpa)
1	48,03	50,94	1,13
2	52,28	56,06	1,22
3	61,19	62,70	1,39
4	69,82	72,51	1,43
5	46,95	48,47	1,05

Conforme feito anteriormente, para o ensaio de flexão, procedemos à análise comparativa de nossa rocha artificial de resíduo de vidro contra um mármore calcítico e um tipo de rocha artificial produzido a partir deste, referenciado como “CB” (45% grosso, 30% médio e 25% fino), sendo os dados destes dois últimos materiais recolhidos da tese de doutorado de Ribeiro (2015). A composição do mármore artificial “CB” consiste em 85% de particulado de mármore calcítico (45% grosso, 30% médio e 25% fino, segundo parâmetros do autor), e 15% de resina Poliéster insaturado ortoftálico.

Sendo assim, os gráficos das Figuras 29 e 30 apresentam, respectivamente, uma comparação da resistência a compressão e módulo de Elasticidade obtidos para a rocha artificial de vidro deste trabalho (RAV), contra a tensão de ruptura do mármore Calcítico (MC) e o mármore artificial (MA) de melhor resistência de Ribeiro (2015).

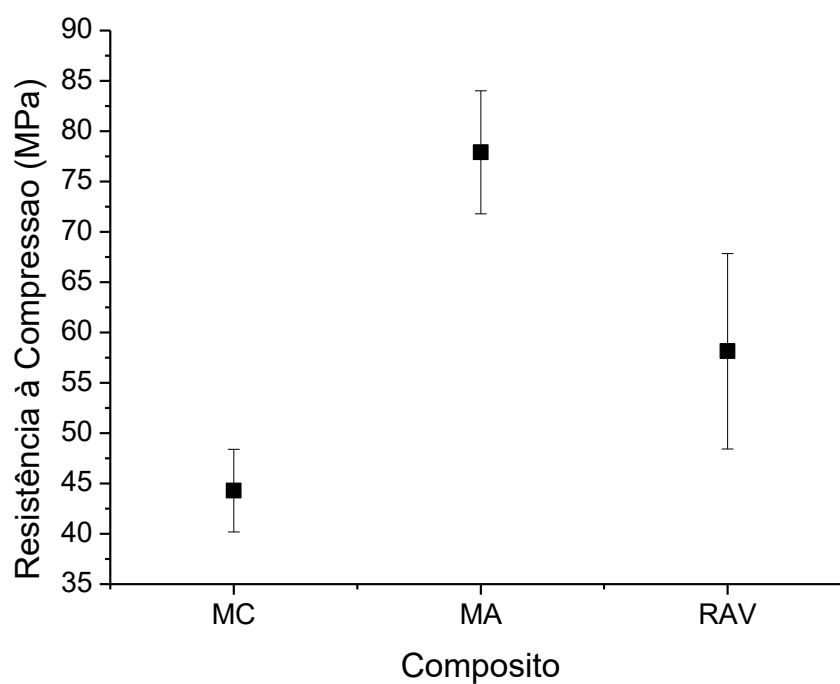


Figura 29 – Resistência à Compressão para Mármore Calcítico (MC), Mármore Artificial (MA) e Rocha Artificial de Vidro (RAV), respectivamente.

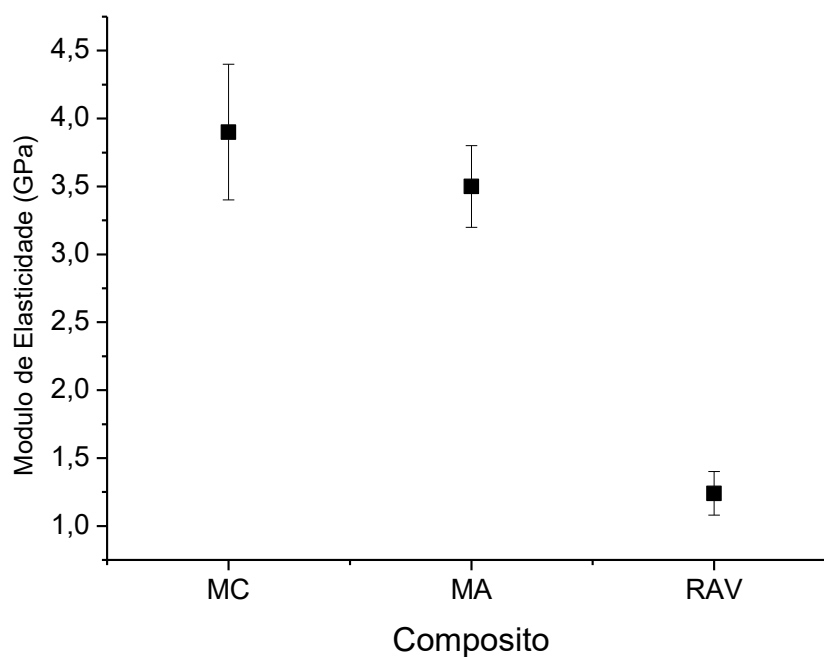


Figura 30 – Módulo de Elasticidade em compressão para Mármore Calcítico (MC), Mármore Artificial (MA) e Rocha Artificial de Vidro (RAV), respectivamente.

Conforme especificado na norma ASTM C503 (2003), é esperado para o mármore calcítico uma tensão de ruptura em compressão maior que 52 MPa. Considerando que a rocha artificial de vidro apresentou resistência acima deste valor (semelhante ao ocorrido no ensaio de flexão) pode-se afirmar, neste aspecto, que tal material é um possível substituto ao mármore calcítico, com resistência superior a ele.

Porém, os resultados também mostraram módulo de Elasticidade muito inferior ao mármore calcítico (quase 1/3). Considerando que a resistência da rocha artificial de vidro é superior ao mármore, pode-se estimar que a ela apresenta menor alongamento em compressão, o que explicaria o menor módulo. Sob este ponto de vista, a rocha artificial de vidro pode ser ainda mais vantajosa, dado que se deforma menos, conservando melhor suas dimensões, quando solicitada em compressão. Tal fato, aliado à sua maior resistência, colabora para a substituição do mármore pela rocha artificial de vidro.

Contudo, ao comparar os resultados da rocha artificial de vidro com o mármore artificial de Ribeiro (2015), percebe-se que tanto a resistência à compressão, quanto o módulo de elasticidade são inferiores. Acredita-se que uma hipótese para explicar esta discrepância pode ser o procedimento de produção destes dois materiais. O compósito do Ribeiro (2015) foi fabricado usando-se a tecnologia de vibro-compressão a vácuo, onde, durante todo o processamento (mistura, vibração e compactação), a amostra se encontrava sob vácuo; ao passo que o material produzido por este trabalho não teve este recurso, por problemas de ordem técnica. Possivelmente, o vácuo permitiria um melhor escoamento dos gases, o que corroboraria para menos vazios estruturais (porosidade) e melhor compactação nos compósitos de resíduo de vidro, o que iria se refletir em melhores propriedades mecânicas.

Apesar dos resultados apresentados para a rocha artificial de resíduo de vidro sugerirem superioridade em relação ao mármore, as propriedades ainda são inferiores em comparação às rochas artificiais compactas vendidas industrialmente.

Alguns fabricantes, presentes na Tabela 29, relataram valores para a resistência à compressão de mármore artificiais de 97 a 150 MPa, e para a tensão de ruptura em flexão de 14 a 31 MPa. Desta forma, os valores obtidos para este para a resistência à compressão e tensão de ruptura em flexão e das rochas artificiais de resíduo (RAV) de vidro se mostraram cerca de 40% menores que o

menor valor relatado pela indústria para esta propriedade. Isto sugere que, embora estejam acima dos mármore naturais, ainda é necessário aprimorar a RAV, para que fique competitiva no mercado; possivelmente pela melhoria do processamento.

Tabela 29. Propriedades relatadas para os mármore compactos (Ribeiro, 2015)

	RMC Polaris	RMC Tradicional	COMPAC MARBLE	Ribeiro (2014)	Borsellino (2009)	RAV
Densidade aparente (g/cm ³)	2,51 – 2,56	2,52 – 2,57	2,45 – 2,49	2,27	N.D	2,6 ± 0,3
Absorção de Água	0,06	0,09 – 0,32	0,04 – 0,11	0,67	0,25	0,07
Resistência à compressão (MPa)	130 – 150	97 - 131	130 - 137	81	N.D	58,1 ± 9,7
Resistência à flexão (MPa)	31	14 - 17	24 - 30	15	17	35,9 ± 2,9

- N.D. – não determinado

A Figura 31 mostra o aspecto dos corpos de prova após ensaio de compressão, onde é possível verificar, apesar das diferenças, que a forma de fratura foi a mesma em todos. As trincas se propagaram de dentro para fora, enquanto o corpo de prova expandia lateralmente pela compressão, até que estas trincas alcançassem a superfície, tendo o destacamento de alguns pedaços em alguns casos, ou simplesmente separação de porções do corpo de prova. É possível verificar também que as trincas iniciaram na porção do meio da parte superior do corpo de prova, perto de um canto. A partir deste ponto, estas trincas se irradiaram para a quina ou as bordas mais perto, o que é normal, dado o fator concentrador de tensão desta geometria de corpo de prova.

Em todo caso, não houve comportamento plástico, sendo todo o carregamento elástico, até a fratura, o que denuncia o caráter frágil do material. Desta forma, podemos caracterizar como um material frágil.



Figura 31 – Aspecto macroscópico da ruptura de amostras de compósitos de epóxi com diferentes frações de volume de resíduo de vidro.

4.5. Impacto de corpo duro

A Tabela 30 relaciona o resultado do ensaio de impacto de corpo duro realizado. Sabe-se que o ensaio não é considerado muito preciso, devido aos saltos energéticos bem definidos para quebra de material serem demasiadamente afastados entre si – quase 0,5 J. Contudo, ainda assim, foi possível obter um resultado bem aproximado dentro da escala proposta pelo experimento, onde percebe-se que a diferença entre os patamares de energia de impacto foi de apenas uma unidade (0,5 J).

A média de energia de impacto para a rocha artificial de vidro, nas dimensões propostas de 100mm x 100mm x 10mm, foi de:

$$E_{\text{imp}} = 2,26 \pm 0,27 \text{ J.}$$

Tabela 30. Energia de impacto de corpo duro necessária para quebra de placas de rocha artificial de resíduo Viminis

Corpo de prova	Altura de queda (m)	Energia (J)
1	1	1,968
2	1,25	2,46
3	1,25	2,46
4	1	1,968
5	1,25	2,46

Apesar de usarmos a norma ABNT NBR 15845:2010 para realização do ensaio em questão, há diversas variantes que devem ser consideradas, referentes à comparação destes resultados com outros sujeitos na literatura. Os resultados para esta análise de impacto de corpo duro sugerem inicialmente que o material em questão não se apresenta tão resistente quanto os outros tipos de rochas, sejam sintéticas ou de origem natural, como granitos.

Contudo, há uma diferença na interpretação de resultados entre este trabalho e outros semelhantes. Pode-se estimar que tal incompatibilidade provém da diferença de condições de geometria das peças utilizadas, onde os corpos de prova usados neste trabalho possuem dimensões reduzidas (cerca de 4 vezes) em relação aos corpos de prova padronizados pela norma, adotados pela maioria.

A razão de se adotar uma medida própria para este ensaio, diferente da norma, provém do equipamento usado para produzir a rocha artificial deste trabalho, que não permite alcançar geometrias da ordem estipulada pela norma. Adicionalmente, considerando que as placas produzidas tomam dimensões comparáveis a pisos comerciais, o resultado deste teste, nestas condições, ainda é importante, pois podem se referir às dimensões reais de placas que venham a ser comercializadas (ABNT NBR 15575-3_2013).

Sendo assim, as condições de distribuição de carga, energia, deformação e propagação de trinca são bem diferentes entre as amostras deste trabalho e os demais. Contudo, no geral, pode-se estimar que a rocha artificial de resíduo de vidro é moderadamente resistente, pois, ao se comparar a resistência relativamente às dimensões, os resultados se mostram favoráveis (Indústria de Mármore Italva Ltda - IMIL, 2008).

Tal fato é melhor verificado ao comparar os resultado: A média de energia de impacto para dimensões de 10cm x 10cm x 1cm da rocha de vidro é de 2.26J; já a média para placas de 20cm x 20cm x 1cm de granitos considerados resistentes é de 10J (Filho et al., 2005). Contudo, pode-se dizer que este valor de energia do granito é aproximadamente 4 vezes maior, pois sua área também é 4 vezes maior, logo, necessitando-se de maior energia. Apesar das condições para quebra de impacto não serem tão lineares o quanto analisado acima, percebe-se que o material possui resistência comparável aos produtos comercializados.

A Figura 32 mostra o aspecto típico dos corpos de prova após o ensaio: uma fratura frágil que se propaga do centro, onde houve o contato com o projétil, em 3

direções aproximadamente com a mesma angulação bem definida de 120° . Isto ocorreu a todos os corpos de prova. O fato da trinca se propagar nestas 3 direções já era esperado. Este fato ocorre pois a carga de impacto – força atuando rápido em um ponto – tende a transferir uma grande quantidade de energia, causando uma grande deformação em consequência desta. Esta onda de impacto tende a se propagar, carregando a energia, por todo o volume do material. Contudo, como a espessura é muito pequena perto das outras dimensões, o esforço tende a se propagar sobre a área de impacto. A carga e deformação, atuando como vetores, tendem a se dividir para cobrir a superfície de impacto, o que leva a tomar no mínimo 3 direções para alcançar isto.



Figura 32 – Aspecto típico dos corpos de prova após o ensaio de impacto de corpo duro

Todos os corpos de prova eram geometricamente uniformes, sem concentradores de tensão que gerassem direções preferenciais de fratura. Sendo assim, a ocorrência deste módulo de fratura revela que o material é isotrópico, o que indica que seu processo de produção gera um compósito estruturalmente bem definido e uniforme, independente da presença de defeitos como porosidade – onde estes defeitos estariam uniformemente distribuídos – não gerando direções preferenciais das propriedades mecânicas, o que permite que a fratura se comporte de forma natural.

Importante mencionar também que este módulo de fratura observado foi possível também devido à geometria e relação de dimensões dos corpos de prova.

A fratura do corpo de prova foi de forma frágil, como pode ser vista na Figura 33, pelo aspecto retilíneo, sem demonstração de deformação plástica; granular,

revelando as partículas de vidro usadas em sua confecção; e bem definido, onde é possível ver perfeitamente as superfícies de separação. Este comportamento da fratura também foi observado para os ensaios onde o material poderia apresentar plasticidade, o que não ocorreu. Logo, pode-se dizer que trata-se de um material inteiramente frágil.

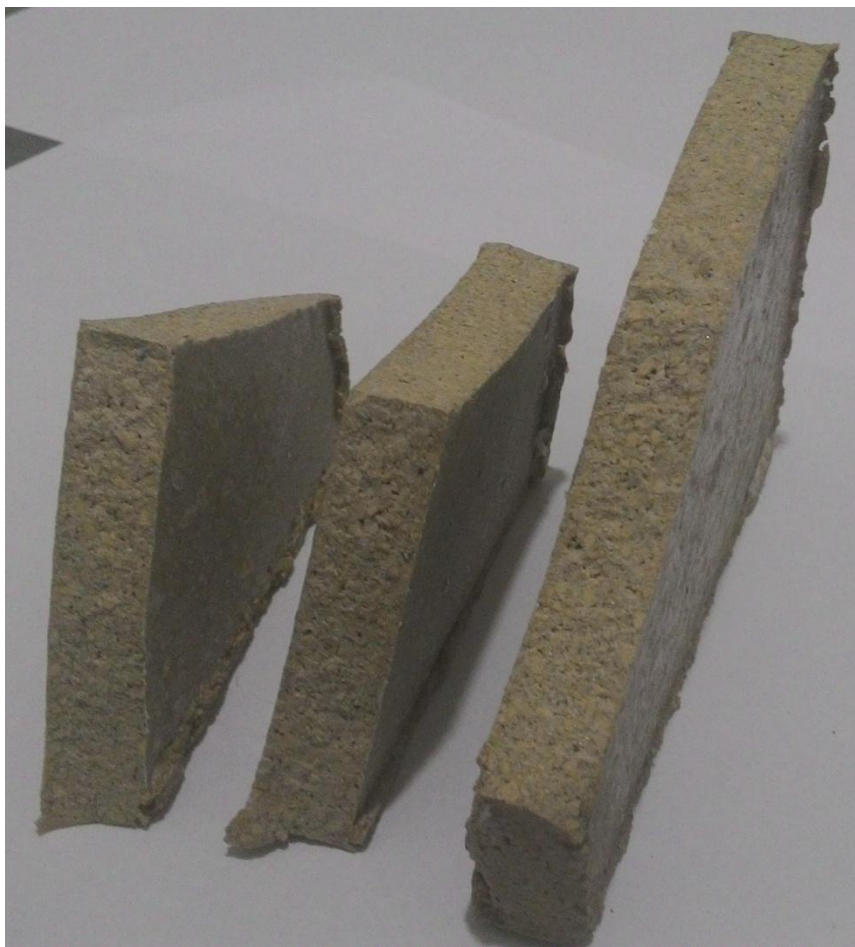


Figura 33 – Aspecto típico de superfície de fratura de corpo de prova de rocha artificial de vidro, por ensaio de impacto de corpo duro.

5. CONCLUSÕES

- A utilização do resíduo de corte e lapidação de vidro da Viminis na produção de rocha artificial pode ser uma excelente alternativa à disposição dos resíduos, minimizando problemas ambientais relacionados ao manejo e armazenamento de tais resíduos. Em especial, ao se considerar o grande volume deste resíduo produzido, esta alternativa se torna ainda mais interessante, por tornar um material que gera prejuízo para a empresa em uma alternativa de lucro.

- O resíduo de vidro de etapa de corte e lapidação provido pela Viminis consiste num típico vidro sodo-cálcico, sendo constituído majoritariamente de sílica (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e cálcio (CaO), respectivamente.

- O processamento do resíduo não influenciou na sua composição química ou estado vítreo.

- As temperaturas de transição vítrea e de amolecimento ocorrem respectivamente a 755 e 850°C, e a temperatura de fusão é de 1100°C.

- O resíduo de vidro tem um grande potencial para baixos tamanhos de grão (200 Mesh), o que pode favorecer melhores propriedades visuais e mecânicas. Contudo, dada a dificuldade de manejo do resíduo nesta granulometria, devido a problemas como produtividade e umidade, é mais viável trabalhar com tamanho de grãos maiores. Em especial, visou-se as granulometrias de 9# a 35#.

- A melhor compactação se deu ao misturar a mesma proporção de partículas das faixas granulométricas maiores e menores, podendo ainda serem adicionadas faixas intermediárias entre estas duas, sem praticamente alterar o resultado. A nível prático, as compactações mais viáveis, se deram usando as faixas de 9 – 10#, 10 – 24# e >35#.

- As partículas de resíduo de vidro se mostraram vantajosas à confecção de compósitos, devido à sua morfologia. Este fato sugere uma boa interface entre matriz e fase de reforço, o que tende gerar melhores propriedades mecânicas no compósito.

- A densidade aparente dos compostos confeccionados se mostrou compatível com os valores informados por outros fabricantes de rochas artificiais. Contudo, a absorção de água e a porosidade aparente se mostraram muito acima das demais rochas artificiais, demandando melhoras no processo produtivo para que o produto seja competitivo nestes aspectos.

- Para os compósitos confeccionados (contendo 25% de resina e 75% de vidro) foi observada uma tensão de ruptura em flexão de aproximadamente 8,5 MPa e uma tensão de ruptura em compressão em torno de 58 MPa. Ambos os valores, citados anteriormente, superam aos apresentados pelo mármore natural calcítico. Contudo, tais valores ainda estão abaixo dos valores apresentados pelas rochas artificiais comerciais, e, semelhante ao citado anteriormente, também deve-se buscar melhorar tais propriedades através da melhoria do processo produtivo, dado o potencial do particulado.

- A provável causa das baixas propriedades mecânicas reside na porosidade elevada, resultado do processo produtivo. Para melhorar tal aspecto, deve-se buscar a tecnologia de vácuo para evitar o aprisionamento de gases durante a produção do compósito.

- A rocha artificial de vidro apresentou resultado de resistência ao impacto de corpo duro comparáveis com as rochas comerciais. Considerando a elevada porosidade, conforme citado anteriormente, o fato deste resultado ser razoável indica um grande potencial deste compósito para aplicações de impacto, caso a porosidade seja reduzida.

- A partir dos resultados obtidos pode-se constatar que o resíduo estudado apresenta grande potencial de uso como rocha artificial, contudo, necessita-se diminuir a porosidade, através da melhoria da tecnologia de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akerman M. (2000) *Natureza Estrutura e Propriedade do Vidro*, CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro, São Paulo.

AKERMAN, M., (1990) Apostila: A Elaboração do Vidro, ABIVIDRO, Vila Buarque-SP.

ALVES, O.L., GIMENEZ, I.F., MAZALI, I.O. Vidros. Cadernos Temáticos - Química Nova na Escola, edição especial, fevereiro de 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1972) Water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products. United States of America.

American Society for Testing and Materials (2003) Standard specification for marble dimension stone (exterior): C 503. West Conshohocken.

Anghinolfi, D., Paolucci, M., Robba, M., Taramasso, A. C. (2013) A dynamic optimization model for solid waste recycling. *Waste Management*. 33:287–296.

Antônio A. P. (2012) *Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Vitória – ES. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 163p.

Aquino, R. C. M. P. (2003) *Desenvolvimento de Compósitos de Fibras de Piaçava da Espécie Attalea Funifera Mart e Matriz de Resina Poliéster*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 151p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). Solo: análise granulométrica: NBR 7181, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2010) Rochas para revestimento – Métodos de ensaio: NBR 15845. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) Edificações habitacionais – Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos: NBR 15575-3. Rio de Janeiro.

Barros, C.; Apostila de Vidros – Materiais de Construção – Edificações (2010). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Rio Grande do Sul, Campus Pelotas.

Bauer, L. A. F. (1991). *Materiais de Construção*. 5. ed. Brasil: Livros Técnicos e Científicos Editora, Vol. 2, 529p.

Bledski A.K., Gassan J. (1999). Composites reinforced with cellulose-based fibers. *Prog. Polym. Sci*, 4:221-274.

Brasil (2008) ARAASHLAND - Ara Química. ARAZYN 1.0 – RESINA POLIÉSTER INSATURADO, ORTOFTÁLICA, BAIXA REATIVIDADE, CRISTAL. Boletim Técnico da Família. São Paulo, SP.

Brasil (2008) Indústria de Mármore Italva Ltda – IMIL. *Mármore Branco Italva – Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado do Rio de Janeiro*. Italva, Rio de Janeiro – Brasil.

Brasil (2010) Guardian Industries Corporation. *Manual Técnico SunGuard – Guardian SunGuard*. Disponível em www.SunGuardGlass.com. Acessado em 13/06/2014. página mantida pela Guardian Industries Corporation.

Brasil (2014) Alicante, Aglostone, Marmoglass, Technistone. *Conheça o Marmoglass*. Disponível em <http://www.marmoglass.srv.br/conheca-a-marmoglass.php> Acessado em 19/06/2014, página mantida pelo grupo Alicante.

Brasil (2008) *Revista técnica* da Andiv - Abravidro. O Vidroplano –. Rio de Janeiro – RJ, 428:24-33.

Brasil (2014) Alicante, Aglostone, Marmoglass, Technistone, Auriom, Nanoglass, TheSize. *Mármore Composto*. Disponível em <http://marmorecomposto.com.br/>. Acessado em 19/06/2014. Página mantida pelo grupo Alicante.

Brasil (2014) Alicante, Aglostone, Marmoglass, Technistone, Auriom, Nanoglass, TheSize. *Pedra artificial*. Disponível em www.pedraartificial.com.br. Acessado em 11/05/2014. Página mantida pelo grupo Alicante.

Brasil (2014) Alicante, Aglostone, Marmoglass, Technistone, Auriom, Nanoglass, TheSize. *Superfície de Quartzo*. Disponível em www.superficiedequartzo.com.br. Acessado em 12/05/2014. Página mantida pelo grupo Alicante.

Brasil, (2014) Marmoglass. *Conheça o Marmoglass*. Disponível em <http://www.marmoglass.com/marmoglass/conheca.asp> Acessado em 19/06/2014.. página mantida pela Dkora Revestimentos Especiais.

Brasil, (2014) JDR SOLUÇÕES - FIBRA DE VIDRO E MÁRMORE SINTÉTICO. *Mármore Sintético*. Disponível em www.marmoresintetico.net. Acessado em 13/05/2014. Página mantida por JDR SOLUÇÕES.

Broutman L. J., Krock R. H. (1967) *Modern Composite Materials*, 3. ed.. USA: Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass. 412p.

CABLE, M. (1991) Classical Glass Technology. *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment, Glasses and Amorphous Materials*. New York, 9:1-89.

Callister, W. D. (2007) *Materials Science and Engineering – An Introduction*, 7. ed., Canadá: John Wiley and Sons, 975p.

CANDIDO, V. S., (2012) *UTILIZAÇÃO DE ARGILITO E CHAMOTE DE BLOCOS DE VEDAÇÃO NA COMPOSIÇÃO DE MASSA DE PAVIMENTO INTERTRAVADO CERÂMICO – ADOQUIM*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 156p.

Carvalho, C.L. (2005) Propriedades Mecânicas, morfologia, e biodegradação de poliolefinas pós-consumo e blendas com amido termoplástico. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Itabira – MG, Universidade São Francisco – USF, 143p.

Castelanos, O. L. (1987) Materiales Compuestos Termoplásticos. *Matrices, Partículas y Fibras Cortas*. Espanha, 54:722-725.

Cavalcanti M. S. L.; Porto V. S.; Meneses R. L.; Albuquerque A. V.; Guedes B. F. R.; Morais C. R. S.; Santana L. N. L. (2007) Characterization of plain glasses residues for applying in ceramic bodies. *International Latin-American Conference on Powder Technology - PTECH*, 6, Búzios: Anais do Congresso.

Chawla K. K. (1983) Composite Materials – Some Recent Development, *J. of Metals*. USA, 35(3):82-87.

Chawla, K.K. (1987) *Composite Materials Science and Engineering*, 1. ed., New York – USA: Springer-Verlag, 541p.

Chou T. W., McCullough R. L., Pipes R. B. (1986) Composites, *Scientific American*, USA, 255:192-203.

COMPAC MARMOL E QUARTZ. El Cuarzo Tecnológico. Disponível em www.compacmq2.com/web/portugues/producto/mc_prode.php?link=abe1d2d1 Acessado em 23/06/2014, página mantida pela Sedo.

CTB. Propriedades Mecânicas dos Materiais. Disponível em http://www.ctb.com.pt/?page_id=1834, acessado em 20 de janeiro de 2014, página mantida pelo grupo CTB.

D. J. Wulpi, (1985) *Understanding How Components Fail*, 1. ed., Metals Park – USA: American Society for Metals and Materials – ASM, 300p.

DAGHASH, S. M. (2009) *NEW GENERATION POLYMER CONCRETE INCORPORATING CARBON NANOTUBES*. Dissertation (Master of Science Civil Engineering) – Albuquerque – New Mexico, The University of New Mexico, 140p.

Diamond S. (1988) On the glass present in low-calcium and high-calcium fly ashes. *Cem Concr Res*, USA, 13(3):68-459.

DIETER, G.E.; (1988) *Mechanical Metallurgy: SI Metric Edition*. 2. ed. USA: McGraw Hill Book Company, 956p.

DONDI, M.; MARSIGLI, M; FABRI, B. (1997). Recycling of industrial and urban wastes in brick production – A Review. *Tile & Brick International*, USA, 13(3) 218-225.

DOREMUS, R.H. (1994) *Glass Science*. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 339p.

E. T. A. de Souza, C. M. F. Vieira, S. N. Monteiro (2003) Sistema Argila-Resíduo, Uma Análise Fundamental de Compósitos com Matriz Cerâmica, *Anais do Congresso Anual da Associação Brasileira de Materiais e Metalurgia*, 58, Rio de Janeiro: pub. ABM em CD-Rom, p. 1915-1926.

ELLIOT, S.R. (1989) *Physics of Amorphous Materials*, 1. Ed. London: Longman, Harlow, 432p..

English, L. K. (1987) Fabrication the Future with Composite Materials- part III: Matrix Resins. *Mater. Eng*, USA, 104(2):33-37.

Fattah, H.A.; El-Hawary, M.M. (1999) Flexural behavior of polymer concrete - *Construction and building materials*, USA, 13:253-262.

Feldmann, D. (1990) Some Considerations on Thermosetting Polymers as Matrixes for Composites. *Prog. Polym. Sci.*, USA, 15:603-628.

Fibercenter. Mármore sintético. Disponível em <http://www.fibercenter.com.br/processos/> Acessado em 13/05/2014, página mantida pela Fibercenter.

Filho, J. L. R., Souza, J. C., Lira, B. B., Barros, M. L. S. C., Oliveira, F. M. C., (2005) AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS PARA

CARACTERIZAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Artigo científico interno, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife – PE.

Freire E., (1992) *Caracterização e Análise Estrutural de Polipropileno Reforçado com Fibra de Vidro Através do Método de Elementos Finitos*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Rio de Janeiro- RJ, Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano/ Universidade Federal do Rio de Janeiro-- IMA/UFRJ, p 127.

Gerstle F. P. (1985) *Composites*, New York: John Wiley & Sons, 574p..

GIACOMINI, E.; FREITAS, V. P. *MATERIAL O VIDRO* (2010). Trabalho defendido na disciplina de TECNOLOGIAS DE FACHADAS (MESTRADO EM CONSTRUÇÕES DE EDIFÍCIOS) – Porto – Portugal, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, 39p.

Gibson R. F., (1994) *Principles of Composite Material Mechanics*, New York: McGraw-Hill, 683p.

Gimenez, I. F., Mazali, I. O., Alves, O. L. (2008). Transformação de Fase em Vidros. *Laboratório de Química do Estado Sólido*, São Paulo: Instituto de Química – UNICAMP, Disponível em <http://lqes.iqm.unicamp.br/index.html>. Acessado em 13/05/2014, página mantida pela UNICAMP.

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.

GUPTA, P.K. (1996) Non-crystalline solids: glasses and amorphous solids. *J. Non-Cryst. Solids*, USA, 195:158-164.

Hayson, H. W., McGrath, G. C., Collyer, A. A. (1986) Mechanical Properties of Reinforced Thermoplastics: Fibre, Whiskers and flakes for Composite Applications. *Elsevier Applied Science Publishers*, London, 1:29-64.

HILL, G. (1993) Science Matters: Materials, *Hodder & Stoughton*, London, Disponível em <http://gom.mse.iastate.edu/>. Acessado em 16/06/2014, página mantida pela Iowa State University.

Hull D. e Clyne T. W. (1986) *Composite Materials – An Introduction*, 2. Ed., Cambridge: Cambridge University Press, 344p.

Iyer, R. S., Sastry S. M. L. (1991) Consolidation of Nanoparticles – Development of a Micromechanistic Model, *Acta Mater*, USA, 47(10):3079-3098.

J. A. Youngquist, (1983) *Encyclopedia of Composite Materials and Components*, New York: John Wiley & Sons, 661p.

J.M.F Ferreira, P.M.C. Torres, M.S. Silva and J.A. Labrincha, (2002) Recycling of sludges generated from natural stones cutting processes in ceramic formulations. *Proc. TMS Fall Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects*, SEATTLE, WASHINGTON: pub. TMS, v.2, p.389-395.

Júnior, E. H. (1984) *Materiais Conjugados*. Pub. Universidade Federal de São Carlos São Carlos – UFSCar, São Paulo, 1:24.

Júnior, E. H.(1989) *Materiais Compósitos - Engenharia de Materiais*, Campinas: Universidade Mackenzie.

Karaca, Z., Hacımustafaoğlu, R., Gökçe, M.V. (2015). Grain properties, grainboundary interactions and their effects on the characteristics of marbles used as building stones. *Construction and Building Materials*, USA, 15:166-171

Licurgo, J. S. C. (2015) *Aproveitamento de Resíduo da Etapa de Lapidação de Vidro em Cerâmica Vermelha*. Monografia (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, 77p.

Lintz, R.C.C. (2003) *Estudo de Materiais Alternativos para Fabricação de Estruturas de Máquinas-Ferramenta*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Campinas - SP, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 104p.

Liu, S.; Ha, Z.; 2002. Prediction of random packing limit for multimodal particle mixtures, *Powder Technology*, USA, 126:283-296.

Lubin, G. (1982) *Handbook of Fibers Glass and Advanced Plastics Composites*, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 786p.

Maia, S. B. (2003) *O vidro e a sua fabricação*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 212p.

Mallick P. K., (1993) *Fiber Reinforced Composites: Materials Manufacturing and Design*, 2. ed. Michigan – USA: Marcel Dekker Inc., 584p.

Manjate, R. S. (2004) *Incorporação de resíduos derivados do corte e polimento de rochas naturais em pastas cerâmicas*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Portugal, Universidade de Aveiro, 128p.

Martins, J. G.; Pinto, E. L.; (2004) *Materiais de construção I: o vidro – material didático da Academia Militar*, 1. Ed. Porto – Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Instituto Superior Técnico de Lisboa.

Mathews F. L. e Rawlings R. D., (1999) *Composite Materials: Engineering and Science*, 1. Ed. Londres: Woodhead Publishing, 480p.

Mazumdar, S. K. (2002) *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*, New York: CRC Press, 416p.

MAZURIN, O. V., PORAI-KOSHITS, E.A. (1984) *Phase Separation in Glass*. Amsterdam: North Holland, 369p.

McLellan, G. W., Shand, E. B. (1984) *Glass Engineering Handbook*, 3. Ed. New York: McGraw-Hill Inc, 484p.

MENEZES; ROMUALDO R., NEVES; GELMIRES DE A., FERREIRA; HERBER C. (2002) O Estado da Arte Sobre o Uso de Resíduos como Matérias-primas Cerâmica Alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB, 6(2):303-313.

MOLINARI, E. J., (2007) *REUTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ROCHAS NATURAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLÍMERICOS COM MATRIZ TERMOFIXA NA MANUFATURA DE PEDRAS INDUSTRIAIS*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 135p.

Monteiro, S. N.; d'Almeida, J. R. M.; de Deus, J. F. (2005) Interfacial Strength of Curauá Fiber Reinforced Polyester Composites, *Congreso Binacional SAM-CONAMET 2005*, Mar Del Plata: Actas del Congreso Binacional SAM-CONAMET 2005, paper 269, p.1-6.

Monteiro, S. N.; Menezes, G. W.; Rodriguez, R. J. S.; Skury, A. L. D.; Bobrovnitchii, G. S. (2004) Processing and Mechanical Behavior of Diamond Reinforced DGEBA-TETA Epoxy Matrix Composites, *PPS-2000, America's Regional Meeting*, Florianopolis: Proceedings of the PPS-2000, America's Regional Meeting, pp. 108-109.

Monteiro, S. N.; Skury, A. L. D.; Bobrovnitchii, G. S. (2006) A Parametric Relationship for Synthesized Diamond Powder. *Diamond and Related Materials*, EUA, 15:61-66.

Monteiro, S. N.; Vieira, C. M. F. (2004) Solid State Sintering of Red Ceramics at Low Temperatures, *Ceramics International*, USA, 30:381-387.

Morais A. S. C. (2013) *Incorporação de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 179p.

Navarro, J. M. F. (2003) *El Vidrio*, 3. ed. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) – Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 471p.

Nunes, R. C. (1989) *Celulose Regenerada em Compósitos Poliméricos*. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Polímeros), Rio de Janeiro-RJ, Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano/ Universidade Federal do Rio de Janeiro-IMA/UFRJ, 119p.

PAUL, A. (1982) *Chemistry of Glasses*, London: Chapman & Hall, 292p.

Pereira, F.R. (2006) *Valorização de resíduos industriais como fonte de alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Portugal, Universidade de Aveiro, 240p.

PFAENDER, H.G. (1996) *Schott Guide to Glass*. London: Chapman & Hall, 224p.

Porras, A. C., Isaac, R.L., Morita, D. (2008) Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado do resíduo da construção civil em elementos de alvenaria – tijolos estabilizados com cimento. *Ciência e Ingeniería Neogranadina*. Bogotá:18(2):5-28.

Rabello, M.S. (2007) *Aditivação de polímeros*. 1. ed. São Paulo: Artliber, 242p.

Ribeiro, C. E. G. (2011) *PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE MÁRMORE EM MATRIZ POLIÉSTER*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, 106p.

Ribeiro, C. E. G. (2015) *DESENVOLVIMENTO DE UM MATERIAL MÁRMORE ARTIFICIAL ALTERNATIVO COM RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE MÁRMORE E POLIÉSTER INSATURADO*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, 127p.

Ribeiro, C.E.G; Rodriguez, R.J.S.; Vieira, C.M.F; Carvalho, E.A.; Cândido, V.S.; Monteiro, S.N. (2014) Production of synthetic ornamental marble as a marble waste added polyester composite. *Materials Sc. Forum*, USA, 775:341-345.

Richardson M. O. W., (1977) *Polymer Engineering Composites*. Londres: Applied Science, 219p.

RODRIGUES, L. P. (2012) *INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES EM CORPOS CIMENTÍCIOS PARA USO EM TIJOLO SOLO-CIMENTO*, Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 108p.

Roode M. V., Douglas E., Hemmings R. T. (1987) X-ray diffraction measurement of glass content in fly ashes and slags. *Cem Concr Res*, 17(2):183-197.

Sanchez, E.M.S. (1996) *Resinas de poliéster insaturado: relação estrutura e propriedades. Influência da adição de copolímero poli (estireno-b-isopreno-bestireno) nas propriedades mecânicas das resinas*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Campinas – SP, UNICAMP, 124p.

Santos, E. A. (2007) *Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN-PPGEM, 103p.

Scholze, H. (1980) *Le verre : Nature, structures et propriétés*, 1. ed. France: Institut du verre, 270p.

SHELBY, J.E. (1997) *Introduction to Glass Science and Technology*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 308p.

Sheldon R. P. (1982) *Composite Polymeric Materials*, Londres: Applied Science, 213p.

Shi, C.; Zheng, K. (2007) A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, USA 52: 234–247.

Silva, J.L.G. (1991) *Estudo do comportamento das Fibras de Carbono do Tipo I e do Tipo II em Simples e Tração em Nó*. Dissertação (Mestrado em Materiais, Processos e Dinâmica de Sistemas), São José dos Campos- SP, Instituto Tecnológico de Aeronáutica- ITA, 114p.

Soliman, E. (2011) *New generation fiber reinforced polymer composites incorporating carbon nanotubes*, Thesis (Ph.D of Science Civil Engineering) – Albuquerque – New Mexico, The University of New Mexico, 275p.

Suslick, K. S. (1998) Kirk – *Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, New York: John Wiley And Sons, Inc. vol.2, p.440.

Tjong, S. C.; Xu, Y. & Meng, Y. Z., (1999) *J. Appl. Polym. Sci.*, 72:1647-1653.

TURNER, W.E.S. (1962) A notable British seventeenth-century contribution to the literature of glassmaking, *Glass Technology*, 3:181-201.

USA (1996) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI Committee 548. *Polymer concrete – structural applications state-of-the-art report (ACI 548.6R-96)*, 23p.

VARSHNEYA., A.K. (1994) *Fundamentals of Inorganic Glasses*, 1. ed. London: Academic Press, 570p.

Vogel, W. (1994) *Glass Chemistry*, 2. ed., United States: Springer-Verlag, 464p.

Wigginton, M. (1996) *Glass in Architecture*, 1. ed. United States: Editora Phaidon, 320p.

ZACHARIASEN, W.H. (1932) The atomic arrangement in glass, *J. Am. Chem. Soc.*, 54(10):3841-3851.

Zacharuk, M., Coelho, L. A. F., Becker, D., Pezzin, S. H. (2009) ESTUDO DA REAÇÃO ENTRE POLIETILENO GLICOL E RESINAS EPÓXI USANDO N,N-DIMETILBENZILAMINA COMO CATALISADOR, *10º Congresso Brasileiro de Polímeros*, Foz do Iguaçu – PR: anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros.

Zanotto, E. D. (1989) Vidros: Arte, Ciência e Tecnologia de 4000 a.C. a 2000 d.C, *Engenharia de Materiais*, 1(1):33-36.