

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Louise Brasileiro Quirino Brito

RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS NO DESENVOLVIMENTO DE
ELEMENTOS VAZADOS APLICADOS A PROJETOS ARQUITETÔNICOS:
TECNOLOGIA E CONCEPÇÃO DE MOLDES

Campina Grande - PB

2019

Louise Brasileiro Quirino Brito

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS NO DESENVOLVIMENTO DE
ELEMENTOS VAZADOS APLICADOS A PROJETOS ARQUITETÔNICOS:
TECNOLOGIA E CONCEPÇÃO DE MOLDES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Orientadora: Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Moraes

Campina Grande - PB

2019

B862r Brito, Louise Brasileiro Quirino.

Reciclagem de resíduos vítreos no desenvolvimento de elementos vazados aplicados a projetos arquitetônicos: tecnologia e concepção de moldes / Louise Brasileiro Quirino Brito. – Campina Grande, 2019.

140 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof.^a Dr.^a. Crislene Rodrigues da Silva Morais".

Referências.

1. Reciclagem de Vidros. 2. Ecodesign. 3. Elementos Vazados. 4. Tratamento Térmico. 5. Ferramentas de Design. I. Morais, Crislene Rodrigues da Silva. II. Título.

CDU 502.174.1:666.1(043)

VITAE DO CANDIDATO

Formação Acadêmica:

2002 - 2006

Graduação em Desenho Industrial.

Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Brasil.

Título: Estojo para Itens de Primeiros socorros utilizado na prática de Esportes de Aventura.

Orientador: Itamar Ferreira da Silva.

2007 - 2008

Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais (Conceito CAPES 5).

Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Brasil.

Título: Design e Engenharia de Materiais na Reciclagem de Resíduos Vítreos Gerados no Município de Campina Grade - PB.

Bolsista do(a): Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Brasil.

Orientador: Crislene Rodrigues da Silva Moraes.

Vínculo institucional:

2007 - 2009

Vínculo: Professor Substituto

Enquadramento Funcional: Professora

Carga horária: 40

Regime: Dedicção exclusiva.

2009 - Atual

Vínculo: Enquadramento Funcional: Professor Assistente

Carga horária: 40

Regime: Dedicção exclusiva

Louise Brasileiro Quirino Brito

**RECICLAGEM DE RESÍDUOS VÍTREOS NO DESENVOLVIMENTO DE
ELEMENTOS VAZADOS APLICADOS A PROJETOS ARQUITETÔNICOS:
TECNOLOGIA E CONCEPÇÃO DE MOLDES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Aprovado em: 05 / 11 / 2019.

Dr.ª Crislene Rodrigues da Silva Moraes
Orientadora
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG

Dr. Tomás Jeferson Alves de Mélo
Examinador Interno
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG

Dr.ª Lisiane Navarro de Lima Santana
Examinadora Interna
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG)

Dr. Leonardo dos Santos Nascimento
Examinador Externo
UFPB/DDESIGN

Dr.ª Isis Tatiane de Barros Macedo Veloso
Examinadora Externa
UFCG/UAD

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que permitiu que eu pudesse chegar até aqui. Agradeço a Ele por tudo que fez e tem feito em minha vida e na vida daqueles que amo. Obrigada, Senhor, por tanto cuidado e carinho!

Agradeço aos meus pais, Marconi Quirino e Lili Brasileiro que tanto me orientaram, ensinando caminhos e valores, e também por terem me proporcionado tantas oportunidades. Obrigada por sempre acreditarem em mim!

Agradeço a minha orientadora, Professora Dra. Crislene Moraes, pela paciência e orientação dada durante esta jornada, que Deus abençoe grandemente sua vida.

Agradeço à UFPB, em especial ao CCAE e aos Professores do Departamento de Design por terem apoiado e possibilitado esta oportunidade.

Agradeço a todos os Professores, funcionários e Coordenadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, por tamanha dedicação e cuidado com os alunos.

Agradeço aos membros da banca por terem aceitado participar desta defesa. Cada uma das observações pontuadas servirá para melhorar a qualidade deste trabalho.

Agradeço aos meus filhos Henrique e Laura, que nasceram durante todo este processo de doutoramento e trouxeram mais vida e alegria aos meus dias. Vocês são presentes de Deus para toda nossa família e Mamãe ama muito vocês.

Agradeço muito ao meu esposo e companheiro de vida, Gustavo Brito, por tudo que ele é para mim e para os nossos filhos, por ser tão dedicado, paciente e amável. Obrigada por me tirar da zona de conforto e por ter sido o maior incentivador para que eu fizesse este doutorado. Obrigada por ter feito comigo, cada uma das etapas, por ter me direcionado, aberto tantas portas e ajudado para que tudo isso fosse realizado. Que Deus esteja sempre abençoando você, o nosso lar e a nossa família. Te amo!

RESUMO

O vidro pode ser infinitamente reciclado, sem que haja perda de massa ou de suas propriedades. Sabe-se da importância da reciclagem de resíduos sólidos para o meio ambiente, porém o uso de técnicas artesanais para reciclagem de vidro ainda está em ascensão. O presente trabalho teve por objetivo investigar a possibilidade da reciclagem de resíduos vítreos no desenvolvimento de elementos vazados aplicados a projetos arquitetônicos. Também foi enfatizada a possibilidade de substituição da sílica fina pura (99,00% de SiO₂) dos moldes pela areia de rio (77,62% de SiO₂) e de mar (83,26% de SiO₂), visando propor alternativas tecnológicas e ambientais para a concepção de moldes para o reaproveitamento desses resíduos. Os materiais foram beneficiados e foi possível identificar a composição dos vidros como sílica-soda-cal. Nos estudos das composições e caracterizações dos materiais foram geradas três composições de moldes (MR, MM e MS), onde o componente refratário foi o principal diferenciador. Após ensaios e análises, optou-se pelo uso da areia de rio pela facilidade de obtenção, desmolde e custo menos elevado. Utilizando-se principalmente das ferramentas de design, foram desenvolvidas novas configurações para os elementos vazados. Em seguida, novas formas e técnicas de prototipagem rápida foram estudadas e executadas. Para obtenção dos elementos vazados a partir do vidro, os moldes finais foram elaborados com a composição de gesso, areia de rio, caulim e água. Em seu interior foi depositada a mistura de vidros VB9A1-4, sendo esta uma mistura de textura heterogênea composta por 90% de vidro branco e 10% de vidro azul com dimensões de grãos entre 2,36 e 4,76mm. Em seguida, estes foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos, que variaram as temperaturas máximas atingidas 840, 880 e 920°C e o patamar de tempo deixado nas temperaturas de 30, 60 e 90 minutos, resultando na fusão e recozimento. As caracterizações físico-mecânicas dos elementos vazados apontaram que em temperaturas e tempos mais elevadas obtém-se um material mais resistente à compressão, fato atribuído à melhor sinterização ocorrida, com aparência da superfície mais fosca, homogênea, opaca e lisa, onde os picos cristalinos se mostraram mais intensos comparados aos dos submetidos a tratamentos térmicos de menor tempo e temperatura. Sendo TT3-B (temperatura de fusão de 920°C por 90 minutos) o mais adequado para este trabalho.

Palavras-chave: Reciclagem de vidros. Ecodesign. Elementos vazados. Tratamento térmico. Ferramentas de design.

SUBSTRACT

Glass can be endlessly recycled without loss of mass or properties. The importance of solid waste recycling to the environment is known, but the use of artisanal techniques for glass recycling is still on the rise. The present work aimed to investigate the possibility of recycling glassy residues in the development of cast elements applied to architectural projects. It was also emphasized the possibility of replacing the pure fine silica (99.00% SiO₂) of the molds by river (77.62% SiO₂) and sea sand (83.26% SiO₂), aiming to propose technological and technological alternatives. for the design of molds for the reuse of such waste. The materials were benefited and it was possible to identify the composition of the glasses as silica-soda-lime. In the studies of composition and characterization of materials, three mold compositions (MR, MM and MS) were generated, where the refractory component was the main differentiator. After testing and analysis, we chose to use river sand for ease of obtaining, demoulding and lower cost. Using mainly the design tools, new configurations for the hollow elements were developed. Then new forms and techniques of rapid prototyping were studied and performed. To obtain the castings from the glass, the final molds were made with the composition of plaster, river sand, kaolin and water. Inside was deposited the glass mixture VB9A1-4, which is a mixture of heterogeneous texture composed of 90% white glass and 10% blue glass with grain size between 2.36 and 4.76mm. Then, they were submitted to different heat treatments, which varied the maximum temperatures reached 840, 880 and 920oC and the time left at 30, 60 and 90 minutes, resulting in melting and annealing. The physical-mechanical characterization of the castings showed that at higher temperatures and times, a material more resistant to compression is obtained, a fact attributed to the better sintering occurred, with the appearance of the mattest surface, homogeneous, opaque and smooth, where the crystalline peaks. showed to be more intense compared to those submitted to heat treatments of shorter time and temperature. Being TT3-B (melting temperature 920oC for 90 minutes) the most suitable for this work.

Keywords: Glass recycling. Ecodesign. Hollow elements. Heat treatment. Design tools.

PUBLICAÇÕES

BRITO, L. B. Q.; BRITO, G. F.; MORAIS, C.R.S. Alternative for fine pure silica in kiln-castign glass molds. **Materials Letters Volume 252, 1 October 2019, Pages 19-22.**

BRITO, L. B. Q.; BRITO, G. F.; MORAIS, C.R.S. Reciclagem de resíduos vítreos utilizando tecnologias de prototipagem rápida para desenvolvimento de moldes. **23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 537-558, 2018.

BRITO, L. B. Q.; BRITO, G. F.; MORAIS, C.R.S. Alternativas para utilização de sílica fina pura no desenvolvimento de moldes direcionados para manufatura de peças em vidro por conformação por moldagem em forno. **23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 1295-1307, 2018.

BRITO, L. B. Q.; BRITO, G. F.; MORAIS, C.R.S. Reciclagem de vidros ociosos utilizando a prototipagem rápida para desenvolvimento de moldes. **63º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 2019.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de embalagens em vidro (www.yunboglass.com , 2018).	21
Figura 2 – Obsidiana à esquerda; obsidiana utilizada como ponta de flechas à direita (zurcstore.com , 2018).	22
Figura 3 – Fulgurita formada a partir de relâmpagos (pbs.twimg.com , 2017).	22
Figura 4 – Mudança de volume durante o resfriamento de um líquido, (adaptado de ALVES <i>et al</i> , 2001).	26
Figura 5 – A forma Básica da Sílica (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).	26
Figura 6 – Rede tetraédrica de SiO ₄ (ALVES, 2001).	27
Figura 7 – Representação bidimensional do arranjo cristalino da Sílica (ALVES, 2001).	27
Figura 8 – Estrutura química do vidro sódio-cálcio (Adaptado de PARTYKA <i>et al.</i> , 2014).	28
Figura 9 – Reação química básica do vidro (PARTYKA <i>et al.</i> , 2014).	29
Figura 10 – Funções relativas dos óxidos de vidro (Adaptado de AKERMAN, 2006).	30
Figura 11 – Gráfico de Deformação Elástica e Plástica (AKERMAN, 2013).	34
Figura 12 – Gráfico Tensão/Deformação em cerâmicas (ASHBY, 2012).	37
Figura 13 – O ensaio de dureza (ASHBY, 2012).	37
Figura 14 – Sequência de corte de uma chapa de vidro (wikividros.eesc.usp.br , 2018).	39
Figura 15 – Programação de Tratamento Térmico (FUSEDGLASS, 2017).	41
Figura 16 - Cristalização de um vidro por tratamento térmico em dois (I) e um (II) estágios (RAWLINGS, WU e BOCCACCINI, 2006)	47
Figura 17 – Cacos de vidros oco utilizado na reciclagem industrial (folha.uol.com.br , 2017).	49
Figura 18 – Montanha de cacos de vidro para reciclagem (setorreciclagem.com.br , 2017).	51
Figura 19 – Índices de reciclagem de vidro no Brasil entre 1997 e 2007 (ABIVIDRO, 2017)	51
Figura 20 – Temperaturas (°C) de resistência dos moldes (adaptado de SCHUARTZ, 2002).	55
Figura 21 – Posição e resultado da fusão do vidro em relação ao molde (QUIRINO, 2008)	56
Figura 22 – Ângulo de saída das peças (QUIRINO, 2008).	56

Figura 23 – Reação química do gesso (A) (BALLIRANO e MELIS, 2009; BARDELLA et al., 2011); (B) (SIEVERT et al., 2005; ZUHAIMI et al., 2015).....	58
Figura 24 – Pulmão Normal e Pulmão Silicótico (JACKSON, 2005).....	60
Figura 25 – Exemplos de modelos impressos tridimensionais	63
Figura 26 – Borracha de silicone para moldes (elo7.com.br).	63
Figura 27 – Elementos Vazados separando ambientes internos e externos	65
Figura 28 – Cobogó no interior de um ambiente residencial (anitabemcriada.com, 2016)....	66
Figura 29 – Elementos Vasados utilizados para dividir ambientes.....	67
Figura 30 – Soluções sustentáveis e não-sustentáveis (Adap. de MANZINI & VEZZOLI (2005)	69
Figura 31 – Três níveis de percepção de um produto (adaptado de NORMAN, 2008).....	71
Figura 32 – Garrafas de vidro similares às utilizadas na pesquisa (mospensstudio.com, 2018).	75
Figura 33 – Metodologia utilizada durante a pesquisa (acervo do autor, 2019).....	76
Figura 34 – Composição dos Moldes em Porcentagem de Peso (acervo do autor, 2019). ..	80
Figura 35 – Curva Temperatura/Tempo de TTi (acervo do autor, 2019).	82
Figura 36 – Tratamento Térmico TT1 - A (acervo do autor, 2019).	88
Figura 37 – Tratamento Térmico TT1 - B (acervo do autor, 2019).	88
Figura 38 – Tratamento Térmico TT1 - C (acervo do autor, 2019).	88
Figura 39 – Tratamento Térmico TT2 - A (acervo do autor, 2019).	89
Figura 40 – Tratamento Térmico TT2 - B (acervo do autor, 2019).	89
Figura 41 – Tratamento Térmico TT2 - C (acervo do autor, 2019).	89
Figura 42 – Tratamento Térmico TT3 - A (acervo do autor, 2019).	90
Figura 43 – Tratamento Térmico TT3 - B (acervo do autor, 2019).	90
Figura 44 – Tratamento Térmico TT3 - C (acervo do autor, 2019).	90
Figura 45 – Micrografias do Resíduo vítreo beneficiado, triturado e peneirado (acervo do autor, 2019).	93
Figura 46 – Micrografia da areia de rio (a) Material retido da areia de rio na peneira (b) (acervo do autor, 2019).	94

Figura 47 – Micrografia da areia de mar (a) Material retido da areia de mar na peneira (b) (acervo do autor, 2019).....	94
Figura 48- Composição Química das amostras (acervo do autor, 2019).....	96
Figura 49 – Micrografia do Gesso (a) 200 μ m e (b) 20 μ m (Acervo do autor, 2019).....	97
Figura 50 – Micrografia da Sílica fina pura (a) 200 μ m e (b) 20 μ m (Acervo do autor, 2019).	97
Figura 51 – Micrografia da areia de rio (a)1000 μ m e (b) 500 μ m (Acervo do autor, 2019). .	98
Figura 52 – Micrografia da areia de mar (A)1000 μ m e (B) 500 μ m (Acervo do autor, 2019).	98
Figura 53 – Estrutura dos resíduos vítreos (acervo do autor, 2019).....	99
Figura 54 – Micrografias do estudo de tamanho do grão e proporção entre cores (acervo do autor, 2019).	100
Figura 55 – Micrografia da formulação de resíduos vítreos branco e azul (VB9A1-4) (acervo do autor, 2019).	101
Figura 56 – Difratograma de Raios X da amostra VB9A1 (acervo do autor, 2019).....	102
Figura 57 - Corpos de prova secando sobre base (acervo do autor, 2019).....	103
Figura 58 - Corpos de prova no interior do forno (acervo do autor, 2019).....	103
Figura 59 – Corpos de prova antes do TTi (topo) e após o TTi (base) (Acervo do autor, 2019).	104
Figura 60 – Resultados obtidos no Teste de resistência à compressão simples nas amostras MR, MR-TTi, MM, MM-TTi, MS e MS-TTi (BRITO <i>et al</i> , 2019).....	105
Figura 61 – Micrografia da Amostra de MR e MR-TTi (BRITO <i>et al</i> , 2019).	106
Figura 62 – Micrografia da Amostra de MM e MM-TTi (BRITO <i>et al</i> , 2019).....	107
Figura 63 – Micrografia da Amostra de MS e MS-TTi (BRITO <i>et al</i> , 2019).....	108
Figura 64 – Caixa Morfológica com formas externas (acervo do autor, 2019).....	109
Figura 65 – Caixa Morfológica com formas internas (acervo do autor, 2019).....	110
Figura 66 – Estudo das combinações das formas para o elemento vazado (acervo do autor, 2019).	111
Figura 67 – Estudo das alternativas para o elemento vazado (acervo do autor, 2019).	111
Figura 68 – Estudo de rotação e paginação de A3y (acervo do autor, 2019).	112

Figura 69 – Estudo de rotação e paginação de B2z (acervo do autor, 2019).	113
Figura 70 – Estudo de rotação e paginação de C4x (acervo do autor, 2019).	113
Figura 71 – Estudo de rotação e paginação de D1z (acervo do autor, 2019).	114
Figura 72 – Dimensões básicas do elemento vazado (acervo do autor, 2019).	115
Figura 73 – Simulação do elemento vazado escolhido e proporção com um homem de 1,7 m (acervo do autor, 2019).	115
Figura 74 – Rendering de conjunto de 9 elementos vazados (acervo do autor, 2019).	116
Figura 75 – a) elemento vazado b) “molde” impresso em PLA c) contramolde em silicone d) molde em gesso e) elemento vazado obtido (acervo do autor, 2019).	116
Figura 76 – Interface do Software Repetier-Host (acervo do autor, 2019).	117
Figura 77 – “Molde” do elemento vazado (acervo do autor, 2019).	118
Figura 78– À esquerda: manufatura do Molde de Silicone; no centro: Molde de silicone pronto; à direita: Molde de silicone bipartido (acervo do autor, 2019).	118
Figura 79 – Peça em MR sendo conformada no contra molde de silicone (acervo do autor, 2019).	119
Figura 80 – Moldes em MR secando (acervo do autor, 2019).	119
Figura 81 – Molde em MR preenchido pela mistura VB9A1-4 (acervo do autor, 2019).	120
Figura 82 – Aspectos Visuais dos Elementos vazados em diferentes tratamentos térmicos e ângulos. (acervo do autor, 2019).	121
Figura 83 – Difractogramas das Amostras de VB9A1 com os tratamentos térmicos TT1-B, TT2-B e TT3-B e de VB9A1 antes do tratamento térmico (acervo do autor, 2019).	124
Figura 84 – Aspectos visuais frontais e micrografias ópticas de TT1-B, TT2-B e TT3-B. (acervo do autor, 2019).	126
Figura 85 – Aspectos visuais através do MEV de TT1-B, TT2-B e TT3-B (acervo do autor, 2019).	127
Figura 86 – Equipamento de ensaio de resistência à compressão simples com o elemento vazado (acervo do autor, 2019).	128
Figura 87 – Resultados obtidos durante o ensaio de resistência à compressão simples dos elementos vazados (acervo do autor, 2019).	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades e Características dos vidros de óxidos	32
Tabela 2 – Etapas de Programação térmica	40
Tabela 3 – Classificação de vitrocerâmicos de acordo com a fase cristalina predominante .	45
Tabela 4 – Nomenclaturas, Coloração e Granulometrias das Misturas de vidro.	77
Tabela 5 – Combinações de Proporções entre cores e tamanho do grão	79
Tabela 6 – Nomenclaturas das Composições dos moldes sem tratamento térmico	80
Tabela 7 – Dados do Tratamento Térmico inicial (TTi).....	82
Tabela 8 – Nomenclaturas das Composições dos moldes após o tratamento térmico inicial	82
Tabela 9 – Tratamentos Térmicos (TT1 – A, TT1 – B. TT1 – C)	87
Tabela 10 – Tratamentos Térmicos (TT2 – A, TT2 – B. TT2 – C)	87
Tabela 11 – Tratamentos Térmicos (TT3 – A, TT3 – B. TT3 – C)	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
3DP	<i>Three-dimensional Printing</i> – Impressão Tridimensional
ABIVIDRO	Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
DRX	Difração de Raios X
EST	Engenharia de Segurança do Trabalho
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> – Modelagem por deposição fundida
FRX	Fluorescência de raios-X
LASMAV	Laboratório de Síntese e Materiais Vítreos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MM	Molde composto por Areia do Mar/caulim/gesso e água
MO	Microscopia Óptica
MR	Molde composto por Areia de Rio/caulim/gesso e água
MS	Molde composto por sílica fina pura/caulim/gesso e água
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OM	Ocupacional Medicina
PC	Policarbonato
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PLA	Poliácido Láctico
PPSU	Polifenilsulfona
PR	Prototipagem Rápida
SLA	<i>StereoLithography Apparatus</i> – Aparelho de Litografia
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> - Sinterização seletiva a laser
Tm	Temperatura de Fusão
TT1	Tratamento Térmico 1
TT2	Tratamento Térmico 2
TT3	Tratamento Térmico 3
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VA26	Vidro azul passado pela peneira #26
VA4	Vidro azul passado pela peneira #4

VA8	Vidro azul passado pela peneira #8
VB26	Vidro branco passado pela peneira #26
VB4	Vidro branco passado pela peneira #4
VB8	Vidro branco passado pela peneira #8
XRF	Fluorescência de Raios X

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	O VIDRO	21
2.1.1	Formação do Vidro	22
2.1.2	Definição e Características do Vidro	24
2.1.3	Composição Química do Vidro	25
2.1.4	Propriedades dos Vidros.....	29
2.1.5	Resistência Mecânica em Vidros	33
2.1.6	Tratamentos Térmicos em Vidros.....	39
2.1.6.1	Vitrocerâmicas	42
2.2	RECICLAGEM DE VIDRO	48
2.2.1	Reciclagem industrial no Brasil.....	49
2.2.2	Reciclagem artesanal	52
2.3	MOLDES ARTESANAIS PARA VIDRO	54
2.3.1	Composição dos Moldes	57
2.4	ARQUITETURA E DESIGN	64
2.4.1	Uso do Vidro em Projetos Arquitetônicos.....	64
2.4.2	Elementos Vazados (COBOGÓ).....	65
2.4.3	Ecodesign.....	67
2.4.4	Design de Superfície.....	71
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
3.1	MATERIAIS	75
3.1.1	Resíduos Vítreos.....	75
3.1.2	Matéria Prima para Fabricação dos Moldes.....	75
3.2	METODOLOGIA.....	76
3.2.1	Beneficiamentos	77
3.2.1.1	Resíduos Vítreos	77
3.2.1.2	Areias	77
3.2.2	Caracterizações	77

3.2.2.1	Caracterizações das Matérias Primas.....	77
3.2.2.1.1	Fluorescência de Raios X.....	78
3.2.2.1.2	Microscopia Óptica.....	78
3.2.2.1.3	Difração de Raios X.....	78
3.2.2.2	Caracterizações das Composições Vítreas.....	79
3.2.2.2.1	Microscopia Óptica.....	79
3.2.2.2.2	Difração de Raios X.....	79
3.2.3	Composições e Caracterizações dos Moldes.....	80
3.2.3.1	Composições dos Moldes.....	80
3.2.3.2	Tratamento Térmico inicial.....	81
3.2.3.3	Teste de Resistência à Compressão Simples.....	83
3.2.3.4	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	83
3.2.4	Design dos Moldes dos Elementos Vazados.....	83
3.2.4.1	Projeto do Elemento vazado.....	83
3.2.4.2	Modelagem Tridimensional da Peça.....	84
3.2.4.3	Geração da Geometria 3D.....	84
3.2.4.4	Impressão Tridimensional da Matriz.....	85
3.2.4.5	Obtenção do Contramolde em Silicone.....	85
3.2.4.6	Preparação dos Moldes Finais.....	85
3.2.5	Obtenção dos Elementos Vazados de Vidro.....	86
3.2.5.1	Preenchimento dos Moldes com Vidro.....	86
3.2.5.2	Tratamentos Térmicos.....	86
3.2.6	Caracterização Físico Mecânica dos Elementos Vazados.....	91
3.2.6.1	Difração por Raios X.....	91
3.2.6.2	Microscopias.....	91
3.2.6.2.1	Microscopia Óptica.....	91
3.2.6.2.2	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	92
3.2.6.3	Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	92
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
4.1	BENEFICIAMENTOS.....	93
4.1.1	Resíduos Vítreos.....	93
4.1.2	Areias.....	93
4.2	CARACTERIZAÇÕES.....	94
4.2.1	Caracterizações das Matérias Primas.....	94
4.2.1.1	Composição Química.....	95

	18
4.2.1.2 Aspectos Visuais.....	97
4.2.1.3 Características Estruturais dos Resíduos Vítreos	98
4.2.2 Caracterizações das Composições Vítreas.....	100
4.2.2.1 Características Visuais.....	100
4.2.2.2 Características Estruturais	102
4.3 COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MOLDES	102
4.3.1 Composição para Moldes e Tratamento Térmico	102
4.3.2 Caracterização dos Moldes	103
4.3.2.1 Perda de Massa.....	103
4.3.2.2 Aspectos Visuais.....	104
4.3.2.3 Propriedades Mecânicas.....	104
4.3.2.4 Microestrutura.....	106
4.4 PROJETAÇÃO DOS MOLDES DOS ELEMENTOS VAZADOS	109
4.4.1 Design do elemento vazado	109
4.4.2 Modelagem Tridimensional do Elemento vazado	116
4.4.3 Geração da Geometria 3D	117
4.4.4 Impressão Tridimensional da Matriz.....	117
4.4.5 Obtenção do Contramolde em Silicone.....	118
4.4.6 Preparação dos Moldes Finais.....	119
4.5 OBTENÇÃO DOS ELEMENTOS VAZADOS DE VIDRO	120
4.5.1 Preenchimento dos Moldes com Vidro	120
4.5.2 Tratamento Térmico e seus Aspectos Visuais.....	120
4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO MECÂNICA: ELEMENTOS VAZADOS	123
4.6.1 Características Estruturais.....	123
4.6.2 Microestruturas	125
4.6.2.1 Microscopia Óptica	125
4.6.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	127
4.6.3 Resistência Mecânica	128
5 CONCLUSÕES	130
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	133
7 REFERÊNCIAS	134

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de produtos industrializados vem produzindo grande quantidade de resíduos oriundos dos descartes domésticos e industriais, os quais se acumulam em lixões e geram problemas ambientais consideráveis.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (PNRS, 2019).

Devido a impactos ambientais com proporções que hoje afetam a saúde e o bem-estar de milhares de pessoas, a população mundial, sentindo-se ameaçada, começou a reagir para que esse quadro possa ser minimizado e que a qualidade de vida possa ser melhorada. Não diferente dos demais segmentos da sociedade, a comunidade acadêmica começa a dirigir esforços em estudos e pesquisas que venham a auxiliar a recuperação ambiental. Do ponto de vista da engenharia de materiais, o estudo de reciclagem e reaproveitamento de materiais tem tomado grandes proporções em todo o mundo.

O Ecodesign tem como objetivo principal projetar produtos que reduzam o uso de recursos não-renováveis e/ou minimizem o impacto ambiental. Ele é visto como uma ferramenta necessária para atingir o desenvolvimento sustentável.

Conforme Gomez e Braun (2007), na sociedade do conhecimento é fundamental a cooperação entre as diversas especialidades das engenharias com outras áreas de conhecimento. No caso do ecodesign, a parceria entre desenhistas industriais e engenheiros de materiais é bastante interessante, tanto na fase de concepção quanto no reaproveitamento de resíduos sólidos provenientes de atividades industriais e domésticas.

O vidro é um material infinitamente reciclável, podendo ser usado e posteriormente reutilizado como matéria-prima na fabricação de novos produtos. Sua reciclagem utiliza resíduos descartados como fonte de matéria prima para a geração de novos produtos, contribuindo, portanto, para preservação dos recursos naturais. Quando comparada à energia elétrica necessária para produção de vidro, através da

matéria prima bruta, a reciclagem gera uma economia de até 30% dos custos finais de sua produção.

Desde os anos oitenta, o vidro tem conquistado espaço na arquitetura e construção civil. Ele é utilizado com frequência em fachadas, coberturas, pisos, divisórias, portas, janelas, escadas e paredes (RONDON, 2014). Outra aplicação é no uso de elementos vazados de vidro os quais levam privacidade às casas sem comprometer a luminosidade e circulação do ar.

Dentro deste contexto, o presente trabalho teve por objetivo investigar a possibilidade da reciclagem de resíduos vítreos no desenvolvimento de elementos vazados aplicados a projetos arquitetônicos, visando propor alternativas tecnológicas e ambientais para a concepção de moldes para o reaproveitamento desses resíduos. Gerando, desta maneira, produtos com apelo estético diferenciado e valor ambiental agregado.

Desta maneira, pretendeu-se verificar a possibilidade do uso de duas areias, de mar e de rio como substitutas da sílica fina pura. Naturalmente, estas areias têm um alto teor de sílica, o que lhes dará o potencial de se tornar substituto da sílica fina pura para o uso em moldes de fusão em vidro. Por terem um tamanho de partícula variável podem proporcionar um melhor empacotamento das partículas dos moldes. Elas também têm partícula maiores do que a sílica fina pura, evitando problemas respiratórios. Sendo estas areias, materiais mais acessíveis, menos nocivos à saúde e de custo inferior ao da sílica fina pura.

Para tal, ocorreram beneficiamentos e caracterizações das matérias primas; estudos das composições e caracterizações dos materiais para os moldes; projeção dos elementos vazados; manufatura de moldes e contramoldes; obtenção dos elementos vazados a partir do vidro; e as caracterizações físico mecânicas dos mesmos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O VIDRO

Os materiais desempenham um papel importante na experiência sensorial de produtos. A impressão visual (cor, brilho, padrão), sensação tátil (calor, textura, peso), o som (propriedades acústicas), cheiro - quando pertinente - depende do material. Cada material tem um conjunto de propriedades inerentes que afetam a experiência do usuário. Mesmo que os sentidos sejam usualmente empregados simultaneamente, a experiência visual é proeminente na experiência material, em parte porque é muitas vezes a primeira modalidade a observar as características do material (SCHIFFERSTEIN, HENDRIK, 2014).

Conforme Ashby, 2012, vidros são sólidos não cristalinos (“amorfos”), os mais comuns são os vidros de cal e soda e os borossilicatos. A falta de estrutura cristalina bem definida suprime a plasticidade, portanto, como as cerâmicas, os vidros são duros e extraordinariamente resistentes à corrosão. São excelentes isolantes elétricos e, claro, são transparentes à luz. Porém, como as cerâmicas, são frágeis e vulneráveis a concentrações de tensões.

O vidro (Figura 1) é um material versátil, que pode ser aplicado para diversos fins. Para Shelby (2005), o que o diferencia dos outros materiais é a capacidade de transmitir luz visível, uma vez que poucos existentes na natureza são transparentes. Seja um lustre ou taça de cristal, esculturas presentes em museus de arte, vitrais de grandes catedrais ou ainda objetos de usos mais pragmáticos, vidros são sempre atraentes e representam beleza.



Figura 1 – Exemplos de embalagens em vidro (www.yunboglass.com, 2018).

2.1.1 Formação do Vidro

Segundo Maia (2003), embora o uso do vidro só tenha sido incrementado a partir da Idade Média, os homens das cavernas faziam uso de pedaços lascados de obsidiana em ferramentas e armas, aplicados em pontas de lanças e flechas, em machados e facas (Figura 2). As obsidianas eram rochas vulcânicas, uma forma natural de vidro. Nos desertos, o impacto dos relâmpagos com a areia é capaz de produzir tubos de sílica fundida, chamados fulguritas (Figura 3).



Figura 2 – Obsidiana à esquerda; obsidiana utilizada como ponta de flechas à direita (zurcstore.com, 2018).



Figura 3 – Fulgurita formada a partir de relâmpagos (pbs.twimg.com, 2017).

Shelby (2005), afirma que os primeiros registros dos vidros artificiais remontam do Antigo Egito, por volta de 7000 anos A.C. Pela junção entre cerâmica e vidro durante a queima das cerâmicas, a presença acidental de areias ricas em cálcio

e ferro, combinadas com carbonato de sódio, poderia ter resultado nas coberturas vitrificadas das peças. Eram considerados materiais preciosos, encontrados nas máscaras mortuárias de ouro e tumbas dos antigos faraós.

Os primeiros vidros isentos de cerâmica e a adição de compostos de cobre e cobalto para proporcionar tonalidades azuladas ao vidro, também são atribuídos aos egípcios (ALVES *et al*, 2001).

O vidro transparente teve como precursores os árabes. Com as Cruzadas, o vidro foi introduzido na Europa, Veneza foi o primeiro empório, visto que era o centro das atenções bélicas. Ali foi desenvolvida a alta técnica garantindo assim o monopólio. No entanto, em 1612 foi publicado um livro “*Laerte Vetraria*”, que difundiu estas técnicas inclusive o consumo por todo o mundo. A partir do século XVIII, a indústria começou a prosperar e se espalhar pelo mundo inteiro, com a fabricação do cristal branco na Inglaterra, o vidro deixou de ser um elemento da nobreza e passou a ser mais acessível (SHELBY, 2005).

No século XX, três poderosos centros de produção do vidro emergiram e neles permaneceram os mais importantes centros a leste do Atlântico. A França, berço de muitas técnicas originais, a Inglaterra, berço da Revolução Industrial, e a Bélgica, o berço de *Fourcault*, assim começaram as pesquisas sobre as propriedades físicas e químicas, possibilitando o desenvolvimento de novos tipos de vidro como o vidro cerâmico, vidros com superfície tratada, fibras óticas, vidros de segurança entre outros (USP, 2018).

A indústria do Reino Unido consolidou-se quando a *Pilkington Borthers*, fundada em 1826, assim como a *St. Helens Crown Glass Company*, tentou alguns experimentos em 1923, relacionados ao uso do processo Ford para fazer folhas maiores. Por volta de 1938, Pilkington criou uma máquina contínua de prensagem com cilindros, desgaste e polimento, operando comercialmente. Por volta de 1940, a estrutura da indústria primária do vidro no mundo ocidental estava estabelecida com quatro nações envolvidas, cada uma dominada por um pequeno número de fabricantes principais, todos relacionados e separados por uma rede de patentes e interdependências (PILKINGTON, 2017).

2.1.2 Definição e Características do Vidro

O vidro é um material inorgânico e que não entra em combustão, não produz alterações biológicas ou de contaminação da atmosfera quando da sua incineração. A sua degradação química e a erosão física são muito lentas e inocuas em termos ambientais. Por outro lado, a demora da biodegradação do vidro, quando exposto ao meio ambiente, pode ser associada a um aspecto negativo deste material (LIMA & ROMEIRO FILHO, 2001).

Quanto à definição, trata-se de um material sólido, cujos átomos se ligam sem estrutura definida, ao acaso e sem repetição, sem propriedades vetoriais como ocorre nos sólidos cristalinos. Quando se funde, torna-se um líquido viscoso e quando resfriado, se solidifica sem cristalizar (MAIA, 2003).

Essas características poderiam denominá-lo como material amorfo, no entanto, não podem ser caracterizados como tal, pois pode apresentar certa ordenação, mesmo que a curto alcance na estrutura, podendo até apresentar mais de uma fase vítrea e até mesmo fases cristalinas. Por este motivo, o mais correto é chamar os materiais vítreos de “sólidos não cristalinos” (MARI, 1982).

Conforme Navarro (1991), um sólido cristalino, ao passar do estado sólido para o líquido sofre uma mudança na fase cristalina, de maneira que aumenta o grau de liberdade de seus elementos. Isto não ocorre quando um vidro sofre a mesma transição. Neste caso a fase estrutural permanece a mesma, ou seja, não há mudança de fase.

Segundo dados da ABIVIDRO (2014), apesar de ser um resíduo sólido não poluente, o vidro não é biodegradável, ou seja, é um material que não se decompõe pela ação de micro-organismos, permanecendo no meio ambiente por tempo indeterminado, reduzindo assim a vida útil de vários lixões e aterros sanitários em função de uma ocupação volumétrica muito elevada.

As embalagens de vidro possuem algumas qualidades que se destacam quando comparados às de outros materiais. Elas são inertes, práticas, versáteis, higiênicas, impermeáveis, reutilizáveis, recicláveis e retornáveis. Inertes porque o vidro não reage quimicamente, por ser neutro, o conteúdo colocado em uma embalagem de vidro não sofre alteração de sabor, odor, cor ou qualidade. Práticas, pois após o uso, a embalagem pode ser novamente fechada, caso não seja utilizado

todo o conteúdo. Versáteis devido às formas, cores e tamanhos possíveis em peças de vidro. Higiênicas por serem fabricadas com elementos naturais que protegem o conteúdo durante mais tempo e dispensando a utilização de conservantes adicionais. Impermeáveis por não serem porosas e funcionarem como uma barreira contra qualquer agente exterior. Reutilizáveis por servirem para armazenar qualquer outro conteúdo. Recicláveis por serem infinitamente reprocessados e reaquescidos, dando assim origem a novos produtos, sem perder sua qualidade ou pureza. Uma garrafa de vidro gera outra exatamente igual, independente do número de vezes que o caco de vidro vai ao forno para ser reciclado. E retornáveis devido ao processo de novo envase em garrafas de cerveja e refrigerantes (ABVIDRO, 2014).

2.1.3 Composição Química do Vidro

Van Vlack (1998) afirma que é devido principalmente à estrutura microscópica do vidro, que o mesmo é transparente, visto que, seus átomos constituintes não se arranjam em estruturas ordenadas, sua densidade micro estrutural fica relativamente baixa, sendo que a radiação tem muito mais facilidade para atravessar a estrutura sem ser absorvida ou colidir.

Ainda conforme Van Vlack (1998) os materiais vítreos possuem características que provocam curiosidades e possuem também propriedades tecnológicas especiais e úteis, que decorrem de sua natureza. As substâncias vítreas, em estado fundido, são líquidos relativamente viscosos que, ao ser resfriado, aumenta notavelmente (ou rapidamente) esta viscosidade até que suas moléculas constitutivas percam toda mobilidade, conservando, entretanto, a mesma disposição caótica que possuíam no estado líquido.

Vidros produzidos tradicionalmente são obtidos, de modo convencional, pelo método de fusão/resfriamento, em que o material é elevado a altas temperaturas e submetido a resfriamento rápido. Quando fundidas, as matérias-primas guardam estruturas semelhantes à de um líquido. Na medida em que ocorre o resfriamento, o arranjo estrutural sofre modificações, de acordo com a taxa de resfriamento utilizada, ocorrendo variação do volume (VELOSO, 2016).

De acordo com a Figura 4, na T_m (temperatura de fusão), ocorre a fusão do vidro. Para obtenção do vidro, é necessário que o resfriamento seja abaixo da T_g

(temperatura de transição vítrea), de modo que a velocidade de resfriamento seja suficiente para não formar cristais, caracterizando assim um material amorfo (ALVES *et al*, 2001).

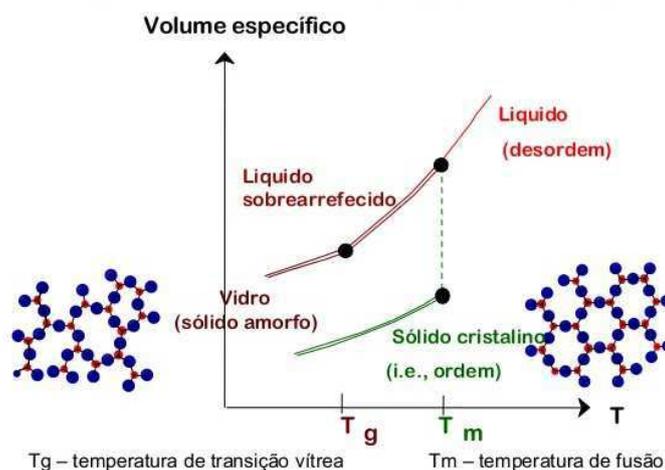


Figura 4 – Mudança de volume durante o resfriamento de um líquido, (adaptado de ALVES *et al*, 2001).

Nos vidros não existe uma temperatura de fusão bem definida ou fixa como nos sólidos cristalinos onde, neste ponto, a fase sólida coexiste com a líquida. Sua habilidade de passar progressiva e reversivelmente a um estado cada vez mais fluido, à medida que a temperatura aumenta é, também, uma característica muito importante destes materiais.

A unidade estrutural básica da maioria das formas da sílica e dos silicatos é um arranjo tetraédrico de 4 átomos de oxigênio ao redor de um átomo de silício centralizado, silício tetraédrico, SiO_4 (Figura 5).

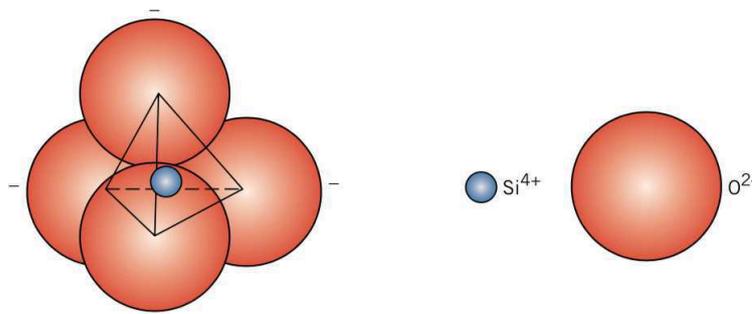


Figura 5 – A forma Básica da Sílica (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

Esse arranjo tetraédrico possibilita a formação de uma rede cristalina tridimensional (Figura 6) infinita por meio do compartilhamento de todos os átomos de oxigênio de um tetraedro com os grupos vizinhos (KIRK, 1997).

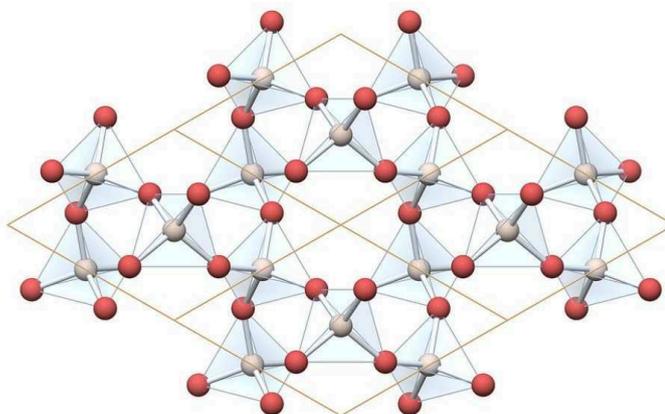


Figura 6 – Rede tetraédrica de SiO₄ (ALVES, 2001).

A sílica derretida resfria rápido, tendo uma organização randômica do tetraedro, é formada ligando pelas pontas, dando um material amorfo conhecido como sílica vítrea (PILKINGTON, 2016).

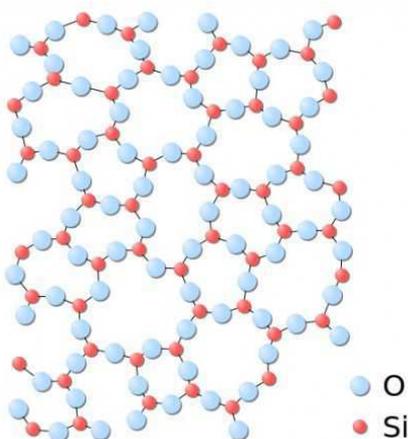


Figura 7 – Representação bidimensional do arranjo cristalino da Sílica (ALVES, 2001).

As composições dos vidros são muito variadas, pois pequenas alterações são feitas para proporcionar propriedades específicas, tais como índice de refração, cor, viscosidade, etc. Os vidros industriais são formados, praticamente, por sílica ou óxido de silício (SiO₂). O óxido de silício, presente em maior quantidade nos vidros, é o formador de rede, conforme anteriormente ilustrado na Figura 7.

Devido à vasta faixa de composição química dos vidros – o que permite que quase todos os elementos da tabela periódica possam ser incorporados – podem apresentar uma ampla variação de propriedades mecânicas, ópticas, térmicas, elétricas e químicas. Os vidros industriais são formados, praticamente, por sílica ou óxido de silício (SiO_2). O óxido de silício, presente em maior quantidade nos vidros, é o formador de rede (VELOSO, 2016).

A sílica sozinha produz um vidro com ótimas propriedades, no entanto a produção de vidros de sílica fina pura se torna onerosa às indústrias, pois seu ponto de fusão é elevado (aproximadamente 1.710°C), requerendo fornos especiais e um consumo maior de energia (VELOSO, 2016).

Para contornar este problema, elementos fundentes são adicionados à sílica, diminuindo a temperatura de fusão da mistura para cerca de 1.550°C , proporcionando uma menor viscosidade e temperatura de transição vítrea, ao passo que mantém as características adequadas para a fabricação dos vidros. Em outras palavras, aumentam a fluidez, expansão e solubilidade do vidro, porém diminuem sua resistência (MARI, 1982; AKERMAN, 2013).

Azambuja (2002), afirma que o vidro é composto por uma mistura de várias matérias-primas que consistem em silicatos não-cristalinos que também contêm outros óxidos, notavelmente o CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 . Cada substância tem uma função específica que confere uma dada propriedade ao vidro. Por exemplo, um vidro de soda-cal típico (Figura 8), consiste em aproximadamente 70% SiO_2 , sendo o restante composto principalmente por Na_2O (soda) e CaO (cal).

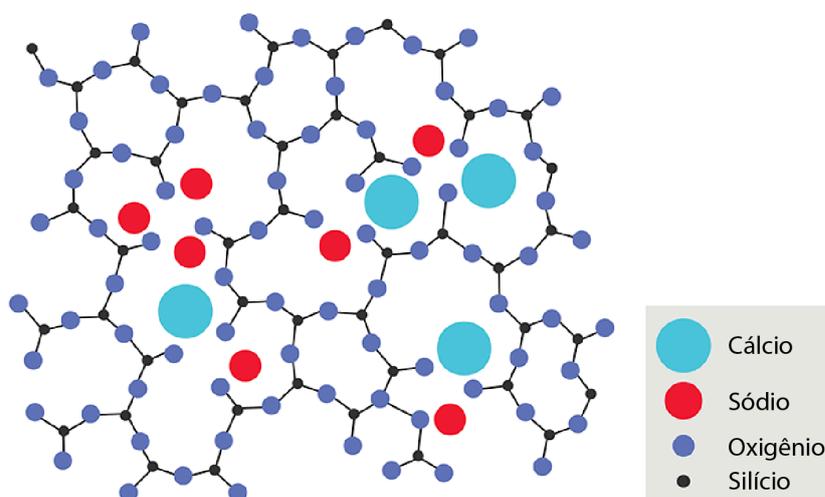


Figura 8 – Estrutura química do vidro sódio-cálcio (Adaptado de PARTYKA et al., 2014).

A Figura 9 representa a reação química básica que ocorre para a formação do vidro. O carbonato de sódio reage com dióxido de silício (sílica) a 1500°C produzindo silicato de sódio que reage moléculas de sílicas formando a estrutura do vidro.

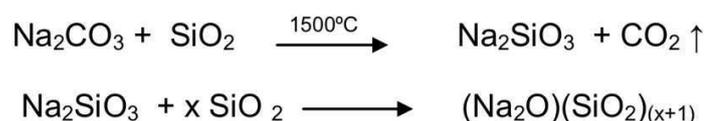


Figura 9 – Reação química básica do vidro (PARTYKA et al., 2014).

2.1.4 Propriedades dos Vidros

A tecnologia criou muitas oportunidades para a aplicação de vidros, como a evolução da química, por exemplo, fortemente influenciada pela invenção de vidros borossilicatos quimicamente resistentes, ou o desenvolvimento de fibras ópticas de vidro substituindo fios de cobre, revolucionando a indústria das telecomunicações ao expandir radicalmente a capacidade de transmitir dados livres de defeitos por todo mundo (SHELBY, 2005).

Conforme Akerman (2013), as propriedades do vidro variam com a sua composição química. Como a composição do vidro não é fixa e vários componentes podem ser adicionados, em diferentes proporções, se obtém vidros com propriedades variando dentro de determinadas faixas. Com o conhecimento do efeito de cada componente na estrutura do vidro é possível se projetar composições de vidros apropriadas para cada processo produtivo e aplicação final.

Essas matérias-primas são divididas em cinco grupos principais: sílica (areia), fundentes, estabilizantes, afinantes e componentes secundários. A sílica (areia) deve ser tão pura quanto possível e proveniente das areias ou das rochas de quartzo; considerada, pela sua natureza, o vitrificante, ou seja, a verdadeira base do vidro. Os fundentes têm a função de reduzir a temperatura de fusão da sílica, de 1.700°C para aproximadamente 1.550°C. Ex.: carbonato de sódio (Na_2CO_3), carbonato de potássio (K_2CO_3) e óxido de chumbo (PbO). Os estabilizantes conferem a resistência química a fatores ambientais como a umidade, o calor, a luz e gases naturais. Ex.: carbonato de bário (BaCO_3), carbonato de cálcio (CaCO_3), carbonato de magnésio (MgCO_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Os afinantes têm por função a formação de grandes bolhas

gasosas na massa vítrea em fusão, que ao libertarem-se para a superfície, arrastam o gás retido sob a forma de minúsculas bolhas. Ex.: óxido de arsênio (As_2O_3), óxido de antimônio (Sb_2O_3) e nitrato de sódio (NaNO_2). Os descorantes são utilizados nos vidros brancos para compensarem a cor esverdeada ou amarelo-esverdeada da massa fundida, resultante das impurezas das matérias-primas naturais como o ferro, o níquel e o cobre. Ex.: óxido de manganês (Mn_2O_7) e nitrato de potássio (KNO_3). Os corantes são matérias-primas que, misturadas à composição dos vidros brancos, lhes dão a coloração desejada. Ex.: óxido de prata (Ag_2O) para obtenção de vidros amarelos; cobalto (Co) para vidros azuis; manganês (Mn) para vidros ametista; óxido de ferro (FeO) para vidros verdes (MAIA, 2003).

Segundo Akerman, 2006, se tratando da composição, à exemplo da influência dos componentes óxidos nas propriedades do vidro, tem-se que ao ser aumentado o percentual de óxido de sódio (Na_2O), aumenta-se a fluidez, expansão e solubilidade do vidro, mas por outro lado diminui-se a resistência. Ao contrário do Na_2O , a alumina (Al_2O_3) aumenta a resistência e faz aumentar a viscosidade. Isso porque é um óxido estabilizador de rede, capaz de proporcionar maior resistência química e mecânica. O óxidos de bário (BaO) e chumbo (PbO) aumentam a densidade e a expansão térmica, além de reduzirem a viscosidade. O óxido de cálcio (CaO) favorece a desvitrificação. O total de óxidos na composição deve ser sempre 100%. Suas funções relativas no vidro podem ser vistas de acordo com a Figura 10.

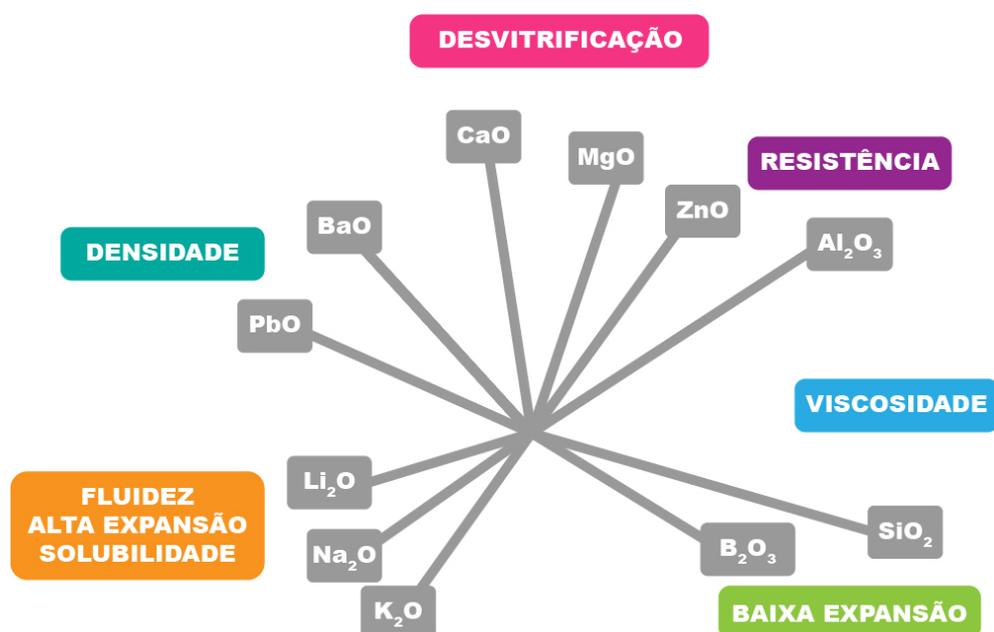


Figura 10 – Funções relativas dos óxidos de vidro (Adaptado de AKERMAN, 2006).

Em vidros sódico-cálcicos, a principal matéria-prima usada como afinante é o sulfato ou sulfito de sódio (Na_2SO_3 , Na_2SO_4), ou o sulfato de cálcio hidratado, a gipsita (FELISBERTO, 2006).

Nem sempre é possível diferenciar os óxidos entre fundentes e estabilizadores (MAIA, 2003). Isso porque, na rede vítrea, os óxidos cujos componentes são metais alcalinos ou alcalinos terrosos são bastante reativos, conseguindo quebrar as ligações Si-O. No entanto, caso as moléculas estejam presentes em pequenas quantidades, seus cátions irão ser compartilhados, estabilizando-se na rede.

Portanto, são óxidos cujo estado de oxidação é importante para determinar a fusão, a afinagem (redução de bolhas, a coloração e descoloração dos vidros. A partir da composição dos vidros, é possível calcular as propriedades aditivas, considerando-o uma solução sólida, por exemplo, densidade, índice de refração, coeficiente de dilatação térmica e calor específico. Já as propriedades não aditivas também dependem da composição, mas muito mais da estrutura do material. A partir delas, pode-se identificar viscosidade, condutividade térmica, perdas dielétricas, etc. (FELISBERTO, 2006).

Maia (2003), aponta como principais propriedades dos vidros a viscosidade – que permitirá a ocorrência do estado vítreo, além de controlar a ascensão de bolhas na fase de refinação e permitir que trabalhabilidade de formas, permitindo a elaboração de peças que requerem o uso de ferramentas diversas; a densidade – peso específico de determinado volume de vidro; a expansão térmica – o vidro não se expande uniformemente com o calor em todas as temperaturas e depende de sua composição química; a resistência química – capacidade dos vidros resistirem mais ou menos à ação de agentes naturais (gases da atmosfera, umidade do ar, água, etc.) ou artificiais (ácidos, álcalis, etc.); a resistividade ou condutividade elétrica – o vidro é mau condutor de calor, tem sua resistência diminuída com o aumento da temperatura e a uma temperatura próxima ao amolecimento, torna-se bom condutor de eletricidade; índice de refração – propriedade importante na fabricação de vidros ópticos.

Outras propriedades dependem em última instância da composição e da estrutura, sendo fundamentalmente determinadas, em nível macroscópico, pelo estado da superfície do material. A partir dessas propriedades pode-se verificar, por

exemplo, a resistência mecânica, resistência ao ataque de águas e ácidos e reflexão da luz (MARI, 1982).

Segundo Zanotto (1998), a grande variabilidade quando aos tipos de vidros os torna extremamente atraentes, tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico. Os vidros de óxidos possuem enorme variabilidade e flexibilidade de propriedades físico-químicas, aliadas à possibilidade de se testar um número infinito de composições, devido ao tipo de estrutura desordenada que pode aceitar quaisquer elementos químicos em sua estrutura. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades dos vidros de óxidos.

Tabela 1 – Propriedades e Características dos vidros de óxidos

<i>Propriedades</i>	<i>Características</i>
Ópticas	Isotrópicos; Transparentes, opacos ou coloridos com índice de refração: 1,2 a 2,2.
Mecânicas	Duros e frágeis ($K_{Ic} < 1 \text{ MPa.m}^{1/2}$)
Elétricas	Isolantes a condutores; ($T_a = 10^{-6}$ a 10^{-18} (ohm.cm)-1
Químicas	Resistentes a ácidos até solúveis H ₂ O
Térmicas	Expansão: $0,3 \times 10^{-6}$ – 30×10^{-6} oC ⁻¹ . Tg: 150 a 1200oC Metaestáveis – podem se cristalizar vitro-cerâmicas
Matérias-Primas	Abundantes. Contém principalmente O, Si, Al, Ca, Na, Mg
Processo	Facilmente recicláveis

Fonte: ZANOTTO, 1998

Akerman (2013) afirma que a viscosidade é a dificuldade de um líquido de escoar e é o inverso de fluidez. O vidro para existir, tem que apresentar alta viscosidade para impedir a cristalização de suas moléculas. Quando um material se cristaliza, ao se esfriar, perde a estrutura desordenada de líquido e não se torna um vidro. A temperatura do forno de fusão é regulada para que o vidro atinja uma viscosidade suficiente para que a massa se homogeneíze e as bolhas presas no seu interior possam ser liberadas. Para fabricar uma peça de vidro a viscosidade tem papel fundamental. No início da conformação deve-se ter uma viscosidade suficientemente alta para poder formar uma gota. Se estiver muito fluido, como a água, por exemplo, é impossível dar forma, pois ela escoar muito facilmente. Por outro lado, se a viscosidade estiver excessivamente alta o vidro estará muito duro e será difícil imprimir forma.

Durante o processo de conformação o vidro vai se esfriando e ficando mais viscoso. Ao se chegar à forma final desejada ele deve estar viscoso o bastante para

não continuar a fluir pois se isso ocorrer ele escoar e se perde a forma necessária. Por outro lado, ele não pode ficar demasiadamente viscoso enquanto se está fazendo a conformação, pois fica difícil de trabalhar e pode se chegar a um ponto no qual ele já está rígido mas a forma final não foi atingida. Depois de conformada a peça de vidro possui tensões devido ao esfriamento desigual que sempre ocorre durante qualquer processo de conformação e deve ser recozida. O recozimento consiste em aquecer o produto até uma temperatura na qual a viscosidade seja baixa o suficiente para que microscopicamente o vidro flua e alivie as tensões existentes na massa, mas não se pode aquecer demais abaixando em demasia a viscosidade sob pena de fazer o vidro escoar pela força de seu próprio peso e se perder a forma necessária. Ajustando a composição química pode se alterar a viscosidade adaptando-a ao processo de conformação empregado (AKERMAN, 2013).

2.1.5 Resistência Mecânica em Vidros

A resistência de um material é uma propriedade que não pode ser descrita em termos de uma característica. A capacidade de suportar compressão, tensão, flexão, torção e outros esforços, não são uniformes nos materiais. O vidro, com sua composição química extraordinária, e seu estado de pseudo-líquido não cristalizado, é um material quebradiço com qualidades de resistência muito diferentes (WIGGINTON,1996).

A resistência mecânica de um material pode ser definida como a resistência que opõe a ação de forças mecânicas externas e internas. Segundo Navarro (1991), o comportamento do vidro ante os distintos tipos de esforços mecânicos aos quais pode ser submetido durante seu uso (tração, compressão, torção, impacto) constitui em geral uma importante limitação para algumas de suas aplicações.

Conforme Akerman (2013) o vidro é um material frágil, porém tem boa resistência à ruptura, por isso pode ser utilizado em pisos. É duro (difícil de riscar) e rígido (resistente à deformação elástica), porém não é tenaz (resistente ao impacto). Sabendo-se que todo material sofre deformação quando se aplica uma força externa (Figura 11), uma vez sendo eliminada essa força, o material pode recuperar sua forma inicial, ou seja, o processo pode ser reversível (deformação elástica), ou permanecer irreversivelmente deformado (deformação plástica).

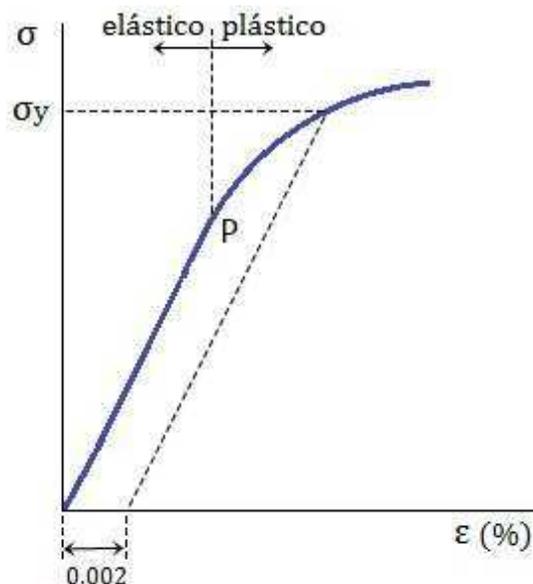


Figura 11 – Gráfico de Deformação Elástica e Plástica (AKERMAN, 2013)

No caso dos vidros, apresenta-se como um material elástico quase ideal, embora a deformação elástica que sofre por aplicação de uma tensão (força ou carga de unidade de superfície) é pequena e se fratura após um determinado limite. O vidro segue a lei de HOOKE, que diz que a deformação (ϵ) que sofre um corpo elástico é proporcional à tensão aplicada (σ); a constante de proporcionalidade se denomina módulo de elasticidade ($\sigma = M \cdot \epsilon$) (MARI, 1982). O vidro não sofre deformação plástica à temperatura ambiente, rompendo-se drasticamente ao passar de seu limite de resistência, que é igual ao seu limite de ruptura (AKERMAN, 2013).

A rigidez é um conceito que depende das qualidades intrínsecas do material de resistir às mudanças de forma, e na forma que o material é encontrado. Uma importante medida de resistência é o esforço de tensão, isso é conhecido como o Módulo de Young (E), e é expresso pela força sobre a unidade de área, ou seja, este módulo exprime a força de tração necessária a aplicar numa amostra de vidro para lhe provocar um alongamento igual ao seu comprimento inicial.

Conforme Wigginton (1996), o vidro tem um Módulo de Young no valor de 70.000 MPa, para dar alguns exemplos o diamante tem o valor de 1.200.000 MPa, um tecido biológico 0,2 MPa, o alumínio 73.000 MPa, o aço 210.000 MPa. Com isso nota-se que o vidro apresenta uma elasticidade bastante boa. O conceito de rigidez depende da forma do objeto assim como das propriedades físicas inerentes do material com que ele é feito. A rigidez de um elemento ou membro estrutural é o

resultado do Módulo de Young e a forma expressa pela equação: $R = E \times I$, onde “I” é a inércia, o segundo momento da área, onde leva em consideração a forma da seção transversal. Assim como o concreto, o vidro é muito resistente a compressão e pouco resistente à tração, sendo os valores de 1.000 MPa e 100 MPa respectivamente. Valores teóricos para a resistência a tração do vidro são muitas vezes maiores do que os que podem realmente ser conseguidos num produto manufaturado, e isso é significativamente graças aos defeitos na superfície. A presença normal de um grande número de microfissuras na superfície resulta na resistência prática muito abaixo da teórica, assim a qualidade da superfície é muito mais importante que a composição.

Segundo Mari (1982), há uma grande discrepância entre a resistência mecânica dos vidros real e teórica. A teórica é calculada com base na energia necessária para romper as ligações Si–O e é extremamente elevada, da ordem de 10^{10} Pa, muito superior a dos melhores aços e muitos outros materiais. Porém, na prática, esta resistência mecânica raramente supera os 50 MPa, cerca de três ordens de grandeza inferior ao que se é calculado na teoria. Essa discrepância entre resistência mecânica na teoria e na prática existe em quase todos os materiais, mas raramente supera uma ordem de grandeza.

Os resultados experimentais dos ensaios mais comuns (compressão, tração, flexão, impacto, resistência ao choque térmico) em objetos de vidro mostram que o vidro se rompe sempre por tração e a fratura tem sempre sua origem num ponto da superfície; Que os valores obtidos não têm nenhuma relação aparente com a composição dos vidros ensaiados nem com seus módulos de elasticidade; Que os valores de resistência mecânica medidos são sempre de duas ou três ordens de magnitude inferiores à resistência teórica do vidro; Que os resultados apresentam uma grande dispersão e muito baixa repetitividade; e que o estado da superfície tem uma enorme influência sobre as medições. Destas características, é a influência do estado da superfície que explica a grande discrepância entre os valores teóricos e reais e o que influencia de maneira decisiva sobre o comportamento mecânico do vidro (MARI, 1982), uma vez que falhas internas ou superficiais atuam como amplificadores de tensão (AKERMAN, 2013).

Assim, a “teoria da fratura frágil” (MARI, 1982) explica a ocorrência de fissuras na superfície do material, comprometendo sua resistência mecânica, de modo que, quanto maior for a fissura, menor será o esforço necessário para fraturar o material.

Em consequência, quanto maior for o tamanho e a quantidade de fissuras de um objeto de vidro, menor será sua resistência mecânica. Deste modo, a fratura em vidros é dada pela presença de defeitos e não representa a resistência inerente das ligações entre os átomos (SHELBY, 2005).

Conforme Mari (1982), conclui-se que não é possível medir a resistência mecânica de um vidro, o que deve ser feito é realizar ensaios para este fim, considerando suas características, seus campos de aplicação e os significados dos resultados proporcionados. Outro fator que precisa ser considerado é que, independentemente do método de ensaio mecânico utilizado, haverá uma dispersão nos valores obtidos, mesmo em se tratando de objetos analisados oriundos de um mesmo lote. Não é possível, também, encontrar diferenças de resistência mecânica em vidros de diferentes composições. A presença de microfissuras superficiais também provoca a dispersão dos resultados e dificulta sua reprodução, já que nenhuma amostra é exatamente igual à outra, ainda sendo do mesmo lote.

Porém, conforme Ashby, 2012, as propriedades de escoamento e ductilidade são medidas pelos ensaios de tração padrões, nos quais os materiais são levados à falha. A ductilidade é uma medida da deformação plástica que um material pode tolerar. É medida em ensaios de tração padronizados pelo *alongamento* ϵ_f (a tensão de deformação à qual sofrem ruptura) expresso como porcentagem. Em termos estritos, ϵ_f não é uma propriedade de material, porque depende das dimensões da amostra mas continua útil como indicador da capacidade de deformação de um material.

Cerâmicas e vidros são frágeis à temperatura ambiente (Figura 12). Na verdade, eles têm tensões de escoamento, mas elas são tão altas que, sob tração, nunca são alcançadas: os materiais sofrem fratura antes. Mesmo sob compressão, cerâmicas e vidros são esmagados antes de escoarem. Para medir suas tensões de escoamento são necessários ensaios especiais que suprimem a fratura. É útil ter uma medida prática da resistência das cerâmicas que permita sua comparação com outros materiais. Será utilizada a resistência ao esmagamento sob compressão e, visto que não é verdadeiro escoamento, ainda que esteja no final da parte elástica da curva tensão-deformação, a é denominada de limite elástico, com o símbolo σ_{el} (ASHBY, 2012).

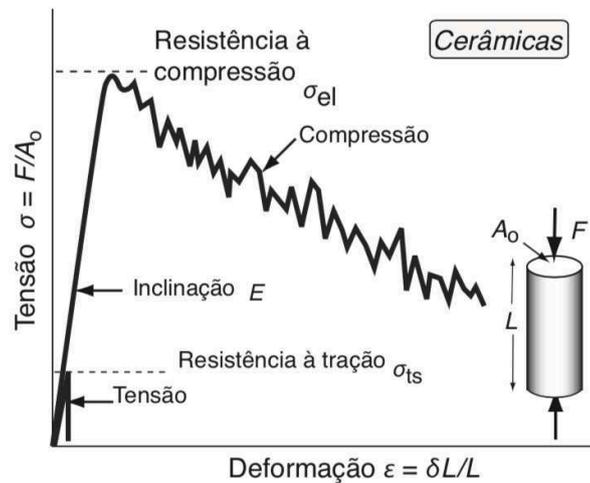


Figura 12 – Gráfico Tensão/Deformação em cerâmicas (ASHBY, 2012).

Ensaio de tração e compressão nem sempre são convenientes: exigem uma amostra grande e o ensaio a destrói. O ensaio de dureza (Figura 13) evita esses problemas, embora também tenha os seus próprios. Nesse ensaio, um diamante em formato de pirâmide ou uma esfera de aço endurecido é pressionado contra a superfície do material, deixando ali uma minúscula impressão permanente, cujo tamanho é medido com um microscópio. A impressão significa que ocorreu plasticidade, e a resistência a ela — uma medida da resistência — é a carga F dividida pela projeção da área A do entalhe em um plano perpendicular à carga:

$$H = \frac{F}{A}$$

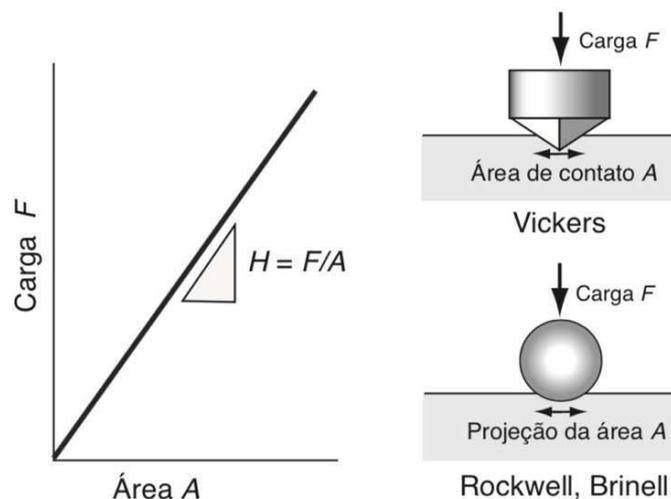


Figura 13 – O ensaio de dureza (ASHBY, 2012).

A região da impressão é cercada por material que não se deformou, e isso o restringe de modo que H é maior do que a tensão de escoamento σ_y ; na prática, é aproximadamente $3\sigma_y$.

O ensaio de dureza tem a vantagem de ser não destrutivo, portanto a resistência pode ser medida sem destruir o componente, e requer apenas um minúsculo volume de material, mas a informação que ele dá é menos precisa e menos completa do que a do ensaio de tração, assim, não é usado para obter dados críticos de projeto.

Akerman (2013) afirma que a quebra do vidro se dá pela conjunção de dois fatores: um defeito na superfície que pode se tornar o início de uma trinca e uma força de tração que tende a abrir esta trinca. A resistência de qualquer material se dá pela força como suas moléculas estão ligadas. No caso do vidro estas ligações são muito fortes, porém, quando há um defeito no vidro como um risco, na ponta deste defeito ocorre uma concentração de tensões que chega a ser muitas vezes superior à tensão que se está aplicando à peça de vidro como um todo e então esta trinca pode abrir um pouco e aí a tensão em sua ponta aumenta e ela abre mais e assim sucessiva e rapidamente e o vidro se parte. A quebra ocorre quando essa trinca atravessa toda a peça.

Portanto a resistência mecânica de uma peça de vidro está diretamente ligada ao estado de superfície. Riscos, mesmos microscópios, lascas nos bordos ou qualquer outra imperfeição reduzem significativamente a resistência. Este princípio é utilizado para cortar chapas de vidro (Figura 14). Com uma ferramenta se faz um risco no vidro que será o início de uma trinca e depois se flete o vidro para gerar tensão de tração neste risco e a trinca atravessa a chapa dividindo-a em duas. Na verdade, o termo corte nem seria o mais adequado a esta operação mas sim “destaque”.

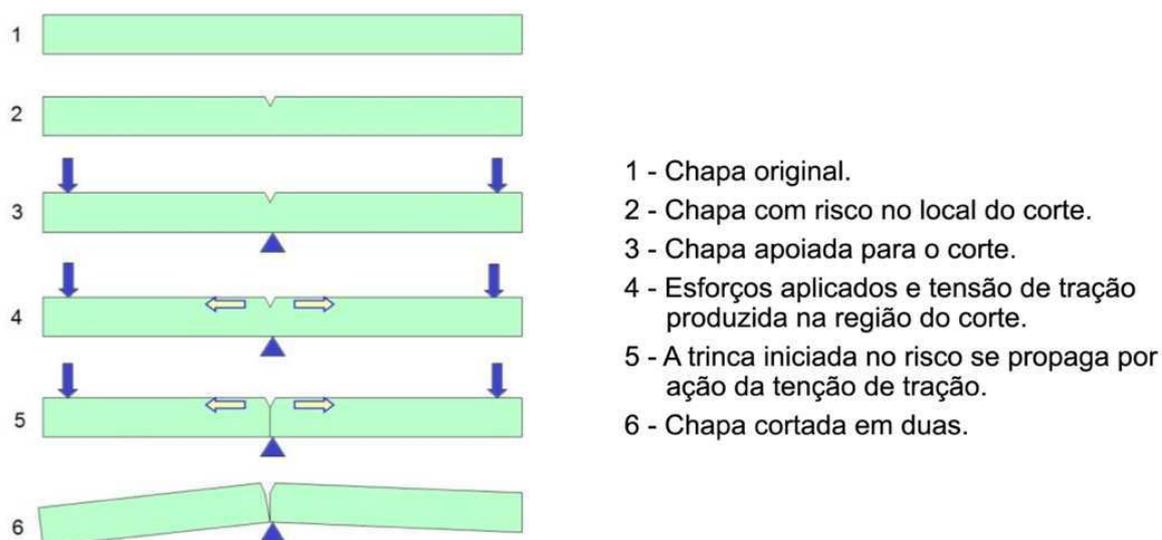


Figura 14 – Sequência de corte de uma chapa de vidro (wikividros.eesc.usp.br, 2018).

Com exceção da adição de alumina, não há muito que se possa fazer em termos de composição química para se aumentar a resistência mecânica dos vidros, pois, o estado da superfície, têm participação muito superior que as ligações entre as moléculas. Então deve-se proteger a superfície contra fissuras decorrentes do manuseio. A têmpera, por exemplo, cria uma tensão de compressão em toda a superfície da peça dificultando a penetração da trinca e sua propagação (AKERMAN, 2013).

2.1.6 Tratamentos Térmicos em Vidros

Conforme Mari (1982) os vidros são compostos por tensões internas temporárias (provocadas pela aplicação de um esforço mecânico sobre o material) ou permanentes (de origem térmica). As tensões permanentes diminuem a resistência mecânica dos objetos de vidro, porque o esforço aplicado é distribuído de forma irregular, produzindo zonas de sobrecarga onde se adicionam às tensões temporárias. A avaliação de tensões temporárias é importante quando um objeto de vidro precisa suportar algum esforço durante condições de uso, como vidros de janelas de veículos ou garrafas de envase de bebidas gasosas. Já a avaliação de tensões permanentes é indispensável para controle nos processos de fabricação, em particular do recozimento e da têmpera.

O vidro acaba ficando frágil devido às tensões térmicas, tendo em vista que a superfície externa se resfria com maior rapidez, através da troca de calor com o meio,

gerando uma zona de compressão. Já a massa interna se resfria lentamente, devido à baixa condutividade térmica do vidro, gerando zonas de tração. Deste modo, Maia (2003) complementa afirmando que:

devido à má condutibilidade do vidro, as paredes externas ficam bem mais frias do que as internas, gerando tensões que permanecem na peça após atingirem a temperatura ambiente e podem resultar em sua rachadura ou quebra. Para minimizar a fragilidade do material, tratamentos térmicos devem ser feitos durante a fabricação dos vidros no intuito de melhorar sua resistência, sendo os mais utilizados a têmpera e o recozimento.

Durante o processo de têmpera, as tensões são distribuídas de tal modo que as camadas externas permanecem em compressão e o núcleo em tração, dificultando a propagação das fissuras e, deste modo, aumentando a resistência mecânica. Akerman (2013) afirma que o núcleo estando em tração, mas uma vez envolto pela camada externa, não há risco de que uma trinca se propague até ele. No entanto, se uma fissura atravessar a camada comprimida e atingir o núcleo tracionado, a peça irá se estilhaçar em inúmeros pedaços. O tratamento térmico de têmpera consiste em aquecer o objeto até uma temperatura superior ao ponto de recozimento e em seguida resfriá-lo bruscamente (MARI, 1982).

Já no recozimento, o vidro é aquecido desde uma temperatura acima do ponto de recozimento e resfriado lentamente, para permitir o relaxamento das tensões permanentes (Mari, 1982). Para tanto, deverão ser integradas uma série de fases previamente estabelecidas, a serem definidas pelo comportamento especial do vidro. De um modo geral, ocorre uma sequência de fases de aquecimento, seguidas de outras fases de resfriamento, aumentando-se e diminuindo-se a temperatura durante certo tempo. O recozimento é, portanto, o resultado de uma combinação correta de dois parâmetros: tempo e temperatura (BEVERIDGE *et al*, 2004).

Conforme Beveridge *et al*, (2004), durante uma programação de queima, cada etapa tem sua função específica (Tabela 2 e Figura 15) e servirá para que o vidro mantenha seu aspecto visual e sua resistência, tornando necessário o entendimento de cada uma destas, a fim de propor novas programações de queima ao projeto.

Tabela 2 – Etapas de Programação térmica

<i>Etapa</i>	<i>Velocidade de aquecimento (°C/min)</i>	<i>Temperatura anterior</i>	<i>Temperatura a ser atingida (°C)</i>	<i>Tempo para manter a temp. (min)</i>	<i>Observações</i>
1	2,5	24	482	15	Aquecimento inicial
2	0,6	482	663	30	Remover bolhas de ar
3	MRP*	663	824	15	Fusão total
4	MRP*	824	516	60	Têmpera
5	1,6	516	385	0	Recozimento
6	4,3	385	24	0	Resfriamento final

*MRP= Mais rápido possível

Fonte: FUSEDGLASS, 2017

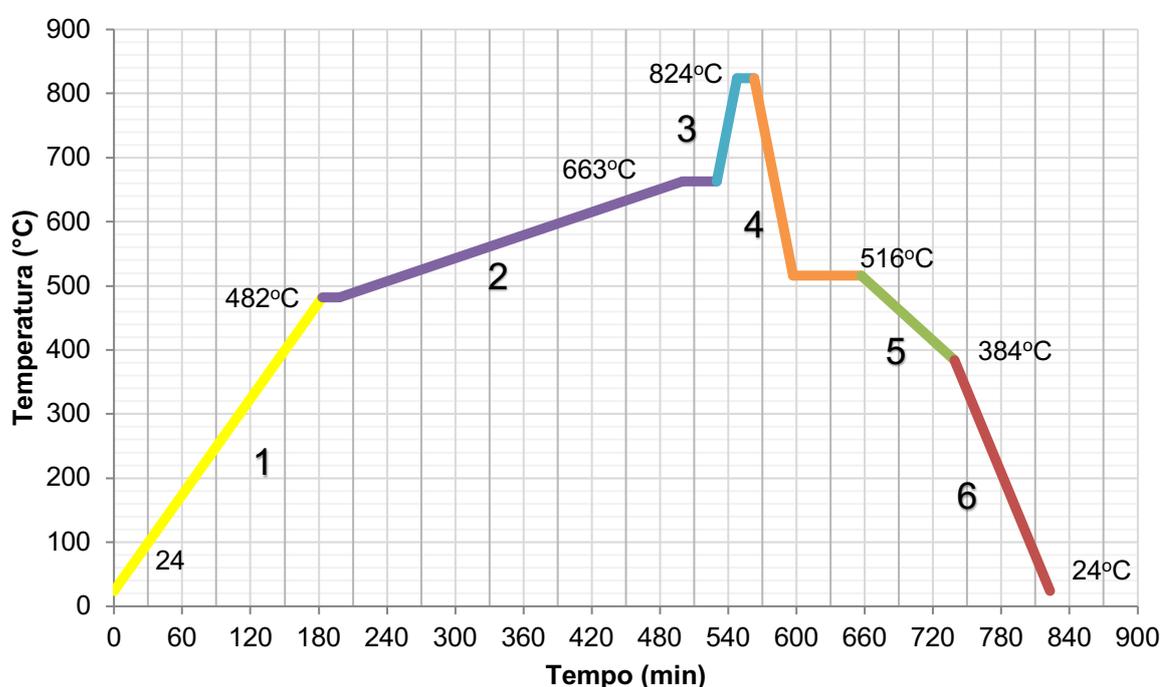


Figura 15 – Programação de Tratamento Térmico (FUSEDGLASS, 2017)

- Aquecimento inicial:** Deve-se aquecer o vidro da temperatura ambiente até cerca de 482 °C. Para a maioria dos aquecimentos vítreos, a única preocupação sobre o aquecimento inicial é o choque térmico. Deve-se evitar o aquecimento de forma desigual, evitando que uma parte do vidro se expanda muito mais do que outra parte. A melhor defesa contra choque térmico é diminuir a velocidade do aquecimento.
- Remover bolhas de ar:** Deve-se reduzir o número e o tamanho das bolhas entre as camadas de vidro e entre o vidro e a prateleira do forno. Este estágio

também prepara o vidro para uma fusão mais uniforme. Como o vidro é denso, ao gastar mais tempo no intervalo de aquecimento, o peso do vidro ajudará às camadas de vidro a se unirem, espremendo o ar que de outro modo poderia estar preso entre eles ou entre o vidro e a prateleira. Com menos ar preso, as bolhas tornam-se menores e ocorrem com menos frequência.

-  Fusão total: Após a aquecimento inicial, deve-se aquecer o forno, o mais rápido possível, para obter a temperatura de fusão do vidro. Enquanto a temperatura do processo é importante, o tempo do processo é igualmente crítico para seus resultados. Deve-se escolher sempre a menor temperatura, com aquecimento mais lento e duração mais longa, pois o derretimento do vidro é mais previsível quando ele se aquece uniformemente.
-  Têmpera: Após atingir a temperatura de fusão, deve ocorrer um choque térmico para evitar uma organização das estruturas, caso contrário o vidro se tornará uma vitrocerâmica. Esta é uma fase de transição - um passo para levar de uma temperatura (processo) a outra (recozimento).
-  Recozimento: Controla a taxa de resfriamento para reduzir o estresse permanente no vidro. Mantenha a temperatura do forno firme o suficiente para garantir que a temperatura do vidro seja uniforme durante todo o período. Deve-se esfriar gradualmente o vidro para minimizar o intervalo de temperatura entre o interior e o exterior do vidro.
-  Resfriamento final: Irá refrigerar o vidro até a temperatura ambiente. Tal como acontece com o aquecimento inicial, o choque térmico é a principal preocupação durante o resfriamento final.

2.1.6.1 Vitrocerâmicas

Segundo Oliveira (2012), a indústria cerâmica é uma grande consumidora de matérias-primas naturais, com elevada degradação da natureza. Logo, é necessário procurar alternativas que prolonguem a vida das jazidas e não alterem as características físico-químicas dos produtos fabricados, além da saúde, segurança e qualidade de vida das populações envolvidas na atividade. Devido à heterogeneidade

dos produtos cerâmicos, estudos têm comprovado que a incorporação de resíduos na sua formulação cumpre esse objetivo, além de reduzir custos na fabricação, como é o caso das Vitrocerâmicas.

Vitrocerâmicas são materiais policristalinos obtidos geralmente a partir da cristalização controlada de vidros e sua fabricação usando vários tipos de resíduos industriais também vem sendo bastante estudada, gerando produtos quimicamente estáveis e com propriedades mecânicas melhoradas em relação ao vidro de origem (CHINNAM et al., 2015).

De acordo com Callister (2010), a maioria dos vidros inorgânicos pode ser transformada de um estado não-cristalino em um estado cristalino mediante um tratamento térmico apropriado a altas temperaturas. Esse processo é conhecido como devitrificação, e o seu produto consiste em um material policristalino com grãos finos chamado frequentemente de vitrocerâmica. Para se obter esse produto, um agente de nucleação deve ser adicionado para induzir o processo de cristalização ou devitrificação. Uma característica desejável para esse material é o baixo coeficiente de expansão térmica, tal que os materiais vitrocerâmicos não venham a experimentar choques térmicos; adicionalmente, são obtidas resistências mecânicas relativamente elevadas. O atributo mais atraente dessa classe de materiais é a facilidade com o qual eles podem ser fabricados. As técnicas convencionais de conformação dos vidros podem ser usadas de maneira conveniente na produção em massa de peças praticamente isentas de poros.

Conforme Alves (2008), as vitrocerâmicas têm grande importância científica e tecnológica, uma vez que os processos de preparação estão diretamente relacionados aos estudos de devitrificação de vidros. Além disso, a grande variedade de composições que podem ser obtidas no estado vítreo é particularmente interessante, pois permitem investigar as transformações de fases em diferentes ambientes químicos. O desenvolvimento dos cristais, incluindo fases estáveis, metaestáveis e a formação de soluções sólidas podem, portanto, ser investigados sob condições controladas. Sendo o vidro fundido um bom solvente para muitos óxidos, alguns metais e haletos, torna-se possível investigar seus efeitos sobre os processos de nucleação e crescimento dos cristais. Tais estudos, além de sua importância básica, têm grande interesse no desenvolvimento de microestruturas nas vitrocerâmicas potencialmente utilizadas.

A importância tecnológica das vitrocerâmicas deve-se a vários aspectos, sendo que o principal, talvez, esteja na possibilidade de obtenção do vidro com composição química uniforme e moldada na forma desejada. Materiais cerâmicos funcionais avançados preparados via devitrificação controlada de um vidro precursor oferece uma grande vantagem sobre os métodos convencionais de sinterização de pós, pois, permite o desenvolvimento controlado dos cristais, com estrutura de grãos uniforme e livre de porosidade, além de evitar todas as variáveis intrínsecas do processo de sinterização. Outra característica importante do processo é que as composições químicas podem ser variadas em uma grande faixa de concentrações, juntamente com as variações nas condições de tratamento térmico. Como resultado, as características das vitrocerâmicas podem ser variadas de maneira controlada, implicando na versatilidade das suas aplicações (GIMENEZ; MAZALI; ALVES, 2008)

Segundo Navarro (1991) *apud* Bertan (2006) quando se conhece os fatores que interferem na cristalização, consegue-se converter um defeito temido em uma vantagem desejável. Sendo assim, o desenvolvimento controlado de fases microcristalinas nos vidros deu lugar a um novo tipo de material vitrocristalino, que adquire um grande interesse do ponto de vista científico, tecnológico e comercial.

As qualidades desses materiais unem os produtos vitrocerâmicos a considerável vantagem de serem elaborados por fusão utilizando os procedimentos convencionais empregados pela indústria vidreira. Uma vez conformadas, as peças são submetidas a um tratamento térmico adequado para conseguir primeiro a formação de núcleos e, posteriormente, o crescimento dos microcristais. O aspecto mais delicado de todo o processo é o controle desta devitrificação e o desenvolvimento dos cristais entre os limites desejados. O tratamento térmico compreende uma etapa de resfriamento até uma primeira temperatura de estabilização, a qual tem lugar a formação dos núcleos, seguida de um novo aquecimento até uma segunda temperatura para crescimento dos cristais até o tamanho desejado (BERTAN, 2006).

Para Bertan (2006) a idéia que serviu de base para o desenvolvimento dos materiais vitrocerâmicos consiste em introduzir na composição do vidro uma pequena concentração de uma substância que se segue por um processo de nucleação homogênea durante o tratamento térmico, formando uma fase nucleadora heterogênea que induzia à precipitação e ao crescimento da fase cristalina majoritária.

Devido a suas propriedades melhoradas e vasta aplicação, esses materiais são de grande interesse do ponto de vista tecnológico e comercial, tendo assim um alto valor agregado. Essa importância tecnológica se dá devido às suas estruturas homogêneas, em geral mais homogêneas que cerâmicas sinterizadas, com microestrutura fina e praticamente sem poros. (ZANOTO, 1986 apud CADIOLI; BAITELO, 2015)

Usualmente, durante o tratamento térmico, a cristalização desses materiais ocorre primeiramente com a nucleação e em seguida com o crescimento de grãos. Os produtos obtidos são caracterizados por sua alta densidade, podendo ser compostos por mais de 95% em massa de cristais em uma matriz vítrea. A Tabela 3 apresenta a classificação usual de vitrocerâmicas de acordo com sua fase predominante formada. (CARTER; NORTON, 2007)

Tabela 3 – Classificação de vitrocerâmicos de acordo com a fase cristalina predominante

<i>Fase cristalina</i>	<i>Composição química</i>
Espodumeno-β	$\text{Li}_2\text{AlSi}_3\text{O}_8$
Quartzo-β	SiO_2
Cordierita	$2\text{MgO}_2 \cdot 2\text{AlO}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$
Mica	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\text{F}_2$
	$\text{KMg}_{2,5}\text{SiO}_{10}\text{F}_2$ (Ca, Sr, Ba) $0,5\text{Mg}_3\text{AlSi}_3\text{F}_2$
Silicatos de lítio	$\text{Li}_2\text{SiO}_3, \text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$

Fonte: Oliveira & Alarcon, apud RACHADEL, 2010

Vitrocerâmicas formadas a partir de composições do sistema $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ foram as primeiras a serem desenvolvidas e ainda são umas das mais estudadas, principalmente devido ao baixo coeficiente de expansão térmica ($\alpha = 0,02 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) e alta resistência a choque térmico. Igualmente interessantes por seu baixo coeficiente de expansão térmica ($\alpha =$) e boas propriedades dielétricas, vidros oriundos do sistema magnésia-alumina-sílica ($\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$) também têm sido bastante estudados. (ZANOTTO, 1986 e BERTAN, 2006).

Vitrocerâmicas maquináveis usadas em algumas ferramentas são derivadas do sistema $\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ com adição de flúor. Outra vitrocerâmica comercial muito usada em restaurações dentais é baseada em mica ($\text{KMg}_{2,5}\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$), assim como uma formada a partir de vidros de fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)$), que se assemelha a partes ósseas (CARTER; NORTON, 2007). Rawlings, Wu e Bocaccini

(2006) apontaram em um estudo de revisão pesquisas inovadoras desenvolvidas nas últimas décadas usando resíduos provenientes de diversas atividades industriais. De acordo com as características dos materiais usados como matéria prima são obtidos produtos finais mecanicamente resistentes, duráveis, com vasta aplicabilidade e economicamente vantajosos.

Vitrocerâmicas podem ser obtidas a partir do tratamento térmico de vidros orgânicos a altas temperaturas empregando a técnica usual de fusão, solidificação e cristalização controlada. Em vidros onde ocorre a nucleação heterogênea na superfície, no entanto, caso a velocidade de sinterização seja superior à de cristalização, esse processo pode ser ativado a partir da produção precursor vítreo que será moído, compactado e sinterizado. Com a formação de grãos muito finos e tratamento térmico subsequente pode ocorrer a cristalização total. (RACHADEL, 2010; SCUDELLER et al., 2002)

Para Rawlings, Wu e Boccaccini (2006) existem diferentes maneiras de se processar uma vitrocerâmica, como o método convencional, o petrúrgico e o de pós. O método convencional, segundo os autores, pode ter dois ou um único estágio. O primeiro estágio consiste em aquecer um vidro uma temperatura tal que aumente a taxa de nucleação (T_N), e o segundo, aquecer a uma temperatura maior para incentivar o crescimento dos cristais (T_G). Se for observada uma sobreposição nas curvas de nucleação e devitrificação do material o processo poderá ser realizado a uma única temperatura, ou um só estágio, como mostra a Figura 16. No método Petrúrgico, o vidro fundido é submetido a um resfriamento lento para promover a nucleação e crescimento das fases cristalinas.

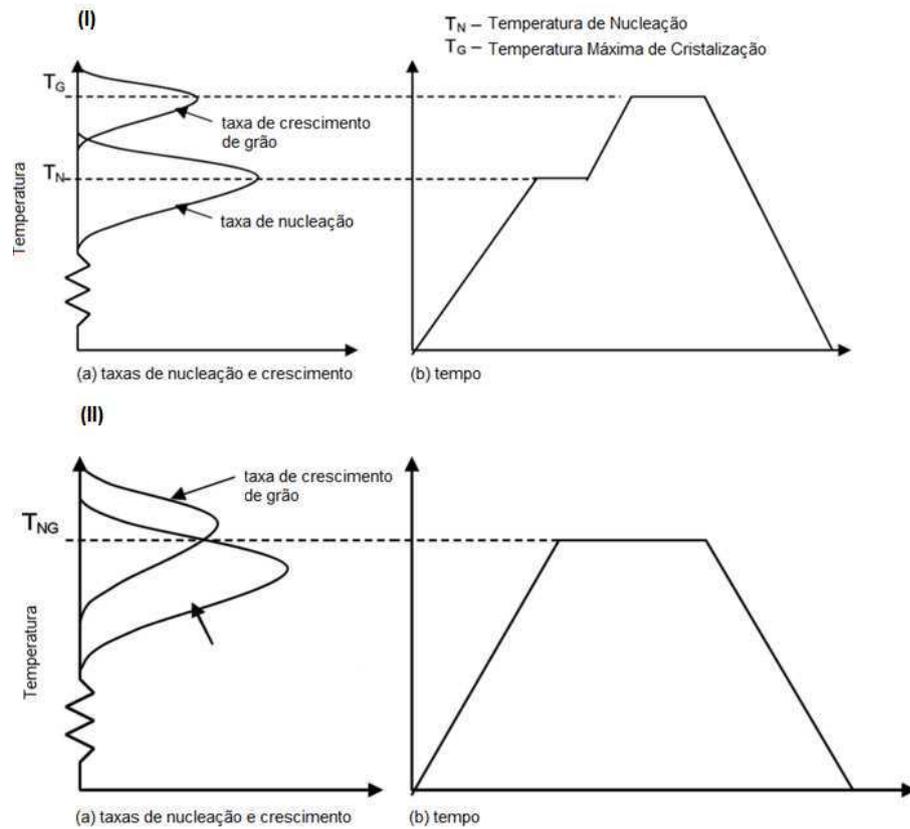


Figura 16 - Cristalização de um vidro por tratamento térmico em dois (I) e um (II) estágios (RAWLINGS, WU e BOCCACCINI, 2006)

O método adotado na fabricação de cada vitrocerâmica é função do tipo de material usado, principalmente depois de analisado seu comportamento da cristalização. De acordo com Rachadel (2010), a técnica de obtenção de um precursor vítreo (método de pós) permite também que se obtenha um material com propriedades químicas e mecânicas melhoradas adicionando e/ou modificando elementos na sua composição.

2.2 RECICLAGEM DE VIDRO

Rocha (2002), afirma que a reciclagem de resíduos vítreos consiste em utilizar vidros que já foram descartados, como fonte de manufatura de novos produtos. Este sistema de tratamento de lixo contribui para preservar os recursos naturais e diminuir a poluição.

Conforme Belchior *et al*, (2014) a reciclagem consiste na introdução de um material (resíduo) no seu ciclo produtivo, sem que seja submetido a processamento físico ou químico para transformação da matéria prima na fabricação de um mesmo produto, com as mesmas características. Quando isto não é possível, tem-se, então, o reaproveitamento do resíduo e não a reciclagem. Dentro desta perspectiva, o único material considerado reciclável é o vidro, pois não há perda de massa ou de suas propriedades quando reciclado.

Segundo Dias (2009), os benefícios ambientais e socioeconômicos da reciclagem do vidro são inúmeros. A implantação da coleta e da reciclagem do vidro gera empregos que demandam pouca especialização, permitindo a inclusão de pessoas em situação de vulnerabilidade social. É importante também ressaltar que as centrais de triagem, os aterros sanitários, as indústrias de reciclagem e compostagem também atuam como instrumentos para a formação e a educação ambiental de crianças, jovens e adultos, pois são locais onde é possível vivenciar e discutir os conceitos sobre a redução, a reutilização e a reciclagem.

A reciclagem de resíduos vítreos, além de reduzir o impacto ambiental, pode contribuir para a diversificação da fabricação de produtos e para a diminuição dos custos finais de sua produção (CEMPRE, 2017).

Segundo Belchior *et al*, (2014) a reciclagem do vidro surge como alternativa para diminuir o impacto causado pelo seu descarte. Devido às suas características, quando descartado, não polui o meio ambiente e é fabricado exclusivamente por matérias-primas naturais como areia, barrilha, calcário e feldspato. Há, ainda, economia de matérias-primas naturais, energia, sendo a temperatura necessária para a fusão do vidro reciclado mais baixa, gerando menos poluentes.

Conforme Pereira (2008), a exploração de agregados da natureza tem se tornado cada dia mais preocupante, pois a degradação ambiental quando da retirada desse material é muito grande, fazendo com que haja uma destruição desordenada

da natureza. Portanto é necessária a busca de agregados alternativos para a construção civil, sem causar impacto ambiental, e uma solução é a reciclagem dos resíduos vítreos em substituição parcial ao agregado miúdo.

Apesar de o vidro ser 100% reciclável ele não é biodegradável o que o torna um grande problema ambiental quando é simplesmente descartado, pois há o acúmulo de grande quantidade desse material e o mesmo não é absorvido pela natureza em aterros sanitários (VASQUES *et al*, 2007).

2.2.1 Reciclagem industrial no Brasil

Os cacos (Figura 17) são os mais visados pela indústria vidreira, pois se adicionados à matéria prima no forno para serem refundidos, podem ser utilizados para fazer novos produtos. Como o caco já passou pelo processo de fusão, irá derreter com facilidade, gerando economia de energia elétrica com o forno. É importante considerar que os cacos encaminhados para reciclagem não devem conter elementos contaminantes: pedaços de cristais, espelhos, lâmpadas e vidro plano usados em automóveis e na construção civil, pois, por terem composição química diferente, podem causar trincas e defeitos nas embalagens, embora algumas empresas já incorporem vidros planos na produção; terras, areia, cerâmica e louças, quando misturadas ao vidro, geram micropartículas que comprometem sua resistência; plásticos em excesso podem alterar a cor no material e gerar bolhas; metais, além de causar bolhas e manchas, podem danificar o forno (CEMPRE, 2017).



Figura 17 – Cacos de vidros oco utilizado na reciclagem industrial (folha.uol.com.br, 2017).

Conforme Alves (2001), reciclar vidros poderá contribuir para a matriz energética nacional através da economia de enormes quantidades de energia, visto que para produzir 1 kg de vidro novo são necessários 4500 KJ (kilojoules), enquanto que para produzir 1 kg de vidro reciclado necessita-se de 500 KJ. Um dado importante sobre reciclagem de vidro recentemente apresentado, mostra que em 1999, de cada 100 potes de vidro fabricado por uma companhia líder no Brasil, 38 já eram feitos a partir do produto reciclado (cacos). Em fevereiro de 2000, a cotação da sucata de vidro era de R\$75,00/tonelada, e mostrava tendência de alta. Cabe aos pesquisadores desenvolver novas tecnologias de reciclagem e encontrar novas oportunidades de aplicação para o vidro reciclado. Aos governos, sobretudo às Prefeituras, cabe encorajar os cidadãos a reciclarem o vidro, gerando inclusive verbas extra orçamentárias para a aplicação em programas sociais, a exemplo do que tem sido feito, com sucesso, em várias cidades do Brasil e do exterior.

De acordo com dados da CEMPRE (2017), o Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, usando cerca de 45% de matéria-prima reciclada na forma de cacos. Parte deles foi gerado como refugo nas fábricas e parte retornou por meio da coleta seletiva. O principal mercado para recipientes de vidros usados é formado pelas vidrarias, que compram o material de sucateiros na forma de cacos ou recebem diretamente de suas campanhas de reciclagem. Além de voltar à produção de embalagens, a sucata pode ser aplicada na composição de asfalto e pavimentação de estradas, construção de sistemas de drenagem contra enchentes, produção de espuma e fibra de vidro, bijuterias e tintas reflexivas.

Cerca de 47% das embalagens de vidro foram recicladas (Figura 18) em 2011 no Brasil, somando 470 mil ton/ano. Desse total, 40% é oriundo da indústria de envase, 40% do mercado difuso, 10% do "canal frio" (bares, restaurantes, hotéis etc.) e 10% do refugo da indústria. Na Alemanha, o índice de reciclagem em 2010 foi de 87%, correspondendo a 2,6 milhões de toneladas e em 2009 foi de 81%. Na Suíça o índice foi de 95% e nos EUA 40% (CEMPRE, 2017).



Figura 18 – Montanha de cacos de vidro para reciclagem (setorreciclagem.com.br, 2017).

Segundo dados da ABIVIDRO (2014), o índice de reciclagem de vidro no Brasil em 1997 era de 39%, devido ao crescimento no setor, este indicador atinge 47% em 2007 (Figura 19), obtendo assim um crescimento de cerca de 8% em dez anos.

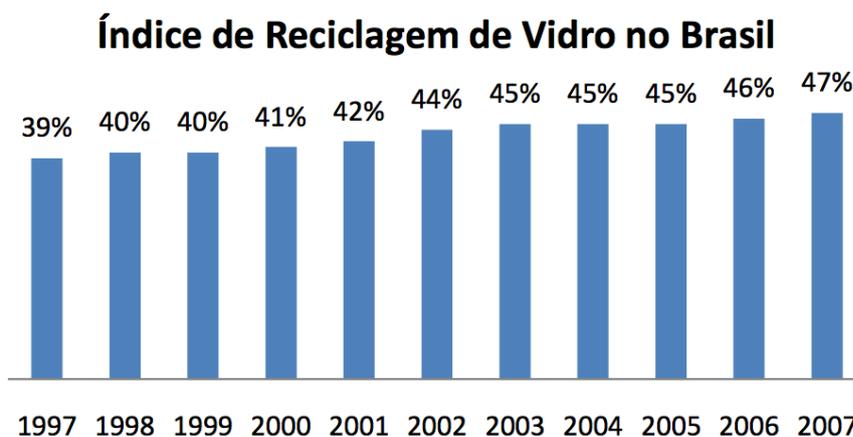


Figura 19 – Índices de reciclagem de vidro no Brasil entre 1997 e 2007 (ABIVIDRO, 2017)

Até novembro de 2019 não foram encontrados dados mais recentes do ABIVIDRO, a respeito do índice de reciclagem de vidro no Brasil, a única informação disponível é de que em anos recentes (publicado em 2013), o índice de reciclagem no setor de embalagem de vidro tem se situado ao redor de 40%, com o uso de caco externo de origem diversa. Eles também afirmam que 32,3% das cidades brasileiras possuem um programa de Coleta Seletiva e que as regiões Sudeste com 41,5% e Sul com 55,8% são as que possuem mais programas desta natureza.

2.2.2 Reciclagem artesanal

Segundo Schuartz (2002), a fabricação artesanal de vidro pode ser dividida em vidro frio e vidro quente devido à forma de trabalho e às ferramentas utilizadas. As técnicas de vidro frio são aquelas onde não há o aquecimento de vidro. Portanto se trabalha com o vidro já fundido, seja ele plano ou oco. Dentre as técnicas tem-se: corte, lapidação, gravação, jato de areia, corrosão e colagem.

No processo de corte, o vidro pode ser “cortado” através do risco feito pelo diamante, que possui uma dureza superior à do vidro. Ao ser riscado, o vidro cria um “defeito” na superfície que facilita o corte no local marcado. Em seguida é exercida uma pequena força no vidro e ocorre a separação.

Conforme Schuartz (2002), a lapidação é uma técnica que visa eliminar rebarbas, cantos vivos e partes cortantes de qualquer técnica utilizada na confecção da peça. A gravação utiliza-se uma ponta diamantada muito fina acoplada a um motor elétrico de baixa rotação. Ao entrar em contato com a peça de vidro a ponta diamantada remove uma pequena parte da superfície.

O processo de jato de areia consiste em jatear o vidro com areia e água, fazendo com que o mesmo fique com uma superfície fosca e desgastada; pode ser utilizado para a opacação e para o desbaste. A opacação é um recurso de desenho, enquanto o desbaste é um recurso de escultura já que produz baixo relevo. Durante a corrosão ocorre o ataque da superfície do vidro através do ácido fluorídrico, que possui um forte poder corrosivo. Ao atacar o vidro, o ácido deixa uma superfície fosca e desgastada, semelhante à do jato de areia. Já no processo de colagem, um recurso bastante utilizado para restauro e acabamento de peças, principalmente na área artística. Podem ser utilizados diversos adesivos, como é o caso do silicone, do epóxi e da resina UV (SCHUARTZ, 2002).

Schuartz (2002) afirma que as técnicas de vidro quente são aquelas onde há o aquecimento de vidro. Pode-se dividir em baixas temperaturas e altas temperaturas. As baixas trabalham com o vidro entre 450 e 950°C e as altas trabalham entre 950 e 1600°C. Cada uma destas técnicas utiliza um tipo de forno específico. Para trabalhos em baixas temperaturas empregou-se técnicas como a moldagem, o *fusing*, o *casting* e a tocha, enquanto para o trabalho em altas temperaturas temos o sopro em cana.

No processo de Moldagem, o vidro é aquecido sobre um molde confeccionado em fibra cerâmica, manta seca ou molhada, ferro-aço, concreto celular ou gesso, onde o vidro obterá a mesma forma do molde. No processo de *fusing*, segundo Fernandes (2004), ocorre a fusão de uma ou mais chapas ou cacos de vidro acomodadas sobre um molde e fundidas em média a 800°C. Esta técnica é muito utilizada em ateliês, por artistas e artesãos. Além dos variados formatos, os produtos obtidos pelo *fusing* podem ter inúmeras variações decorrentes do uso de chapas de vidro de diferentes espessuras, cores e acabamentos.

Ainda conforme Schuartz (2002), o *Casting* é um processo onde um ou mais pedaços de vidro perdem totalmente sua forma inicial, soldando-se um ao outro; formando assim um trabalho maciço. Dependendo da qualidade de vidro, as marcas da solda podem aparecer mais ou menos e até desaparecer. Já na técnica utilizando a tocha (Maçarico), trata-se do aquecimento de bastões de vidro, maciços ou ocos, através de um maçarico a gás. O sopro em cana, segundo Fernandes (2004), é predominantemente utilizado na produção industrial. Artesanalmente é um processo milenar de difícil execução que consiste na colocação de massa vítrea na extremidade de uma haste metálica e soprá-la na outra extremidade. Por ser de difícil execução, requer anos de treino e experiência dos operadores, necessitando assim, de mão de obra especializada.

2.3 MOLDES ARTESANAIS PARA VIDRO

Segundo Thwaites (2011), para adquirir formatos bi ou tridimensionais pode-se recorrer aos moldes. Estes, por sua vez, se comportam como fôrmas que com o aquecimento do vidro permitem a acomodação sobre os mesmos. Antes de realizar qualquer fabricação de moldes, é essencial entender as propriedades dos ingredientes constituintes envolvidos em uma mistura de moldes.

Segundo Schuartz (2002), os moldes para vidro podem ser, principalmente, de: biscoito de cerâmica, gesso e quartzo, *wet felt* (manta molhada), grafite, placa de fibra cerâmica, aço, ferro, concreto celular, gesso e manta de fibra cerâmica.

- Biscoito de cerâmica – são moldes em barro, permanentes e rígidos. Quanto mais são utilizados, mais duros e resistentes ficam. Neste tipo de molde é fundamental manter um ângulo de saída, pois qualquer reentrância irá travar o objeto no mesmo.
- Gesso e quartzo – Trata-se de uma mistura, em partes iguais, de gesso e quartzo. É um molde descartável e se desmancha ao desenformar quando trabalhado acima de 950°C. Ideal para esculturas e trabalhos muito detalhados.
- Wet felt – é uma manta umedecida que pode ser moldada e ao secar endurece. É um molde permanente e rígido, um material extremamente versátil e de fácil utilização, porém dificilmente é encontrado no Brasil.
- Grafite – trata-se de um molde que possui maior aplicação na indústria devido ao seu alto custo. É um material extremamente resistente e permanente, adquirido em blocos que podem ser torneados.
- Placa de fibra-cerâmica – são placas recortáveis, ideais para formas geométricas retas. São moldes permanentes que se desgastam em aproximadamente 20 queimas.
- Aço – são fôrmas feitas em chapas de aço repuxadas que dão origem a um molde permanente, porém sem muitos detalhes devido à técnica de repuxo.
- Ferro – são moldes bastante similares aos de aço, porém indicados para temperaturas inferiores.

- Concreto celular – é um molde de fácil fabricação, baixo custo e fabricação artesanal. Através de ferramentas especializadas o bloco é esculpido ou escavado, porém não resiste a mais de 10 queimas.
- Gesso – é um molde feito em gesso comum preparado com a adição de água e em seguida ressecado. Possui as mesmas propriedades que o molde de gesso e quartzo, porém trinca a partir de 650°C.
- Manta de fibra cerâmica – trata-se do mesmo material da placa de fibra cerâmica, porém mais fácil de trabalhar. O resultado de um revestimento de manta é uma superfície rugosa, que pode ser suavizado polvilhando-se pó de caulim por sobre a mesma.

A escolha do molde ideal pode ajudar no processo de fabricação artesanal de peças em vidro, tendo em vista que cada molde possui uma temperatura máxima de resistência (Figura 20).

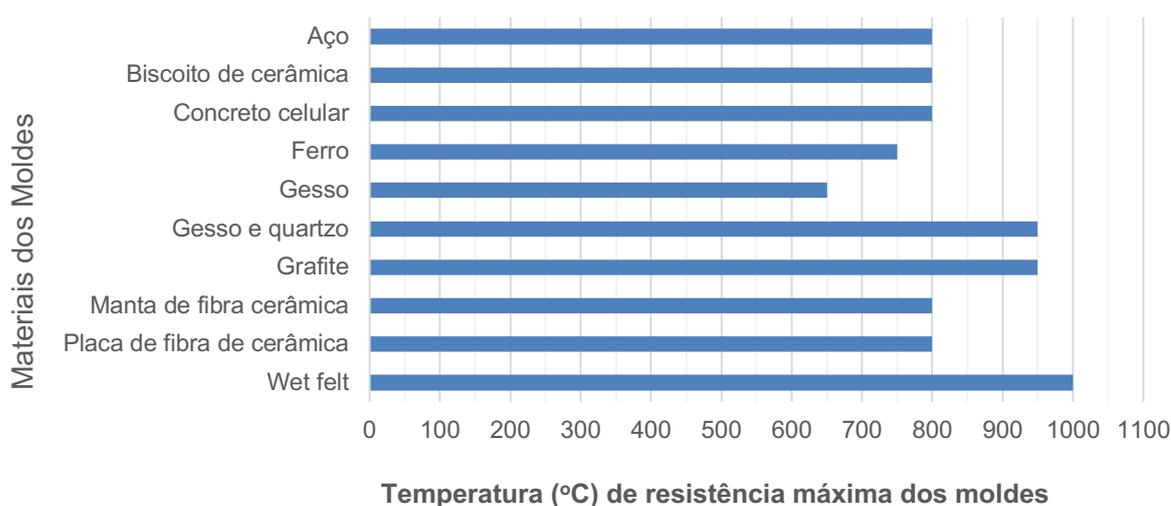


Figura 20 – Temperaturas (°C) de resistência dos moldes (adaptado de SCHUARTZ, 2002).

O vidro pode estar posicionado sobre o molde de três maneiras principais: interno sem aba, interno com aba e externo (Figura 21). No interno sem aba, o vidro fica totalmente no interior da parte côncava do molde. Neste caso, após a fusão o vidro desce em relação à posição inicial, diminuindo a largura. No interno com abas, o vidro fica apoiado em abas laterais, de maneira que requer um mínimo de elasticidade para entrar na parte côncava do molde durante a fusão. Já o externo, se

trata de um molde convexo, onde o vidro é trabalhado pelo lado de fora (QUIRINO, 2008).

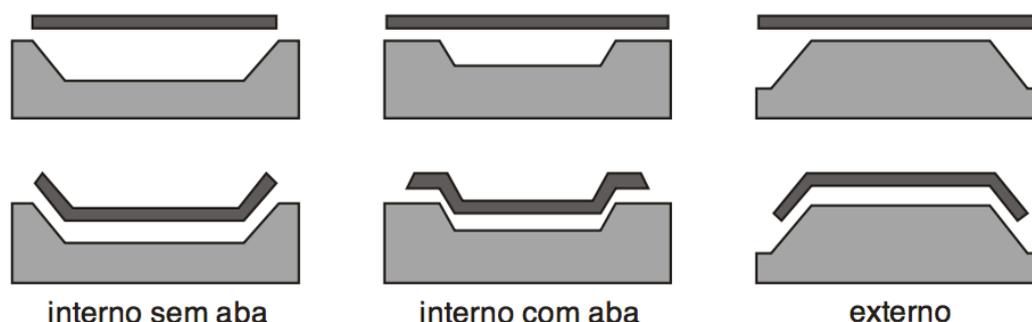


Figura 21 – Posição e resultado da fusão do vidro em relação ao molde (QUIRINO, 2008)

Conforme Quirino (2008), os moldes precisam possuir ângulos de saída das peças, garantindo, portanto que o vidro não fique fixado ao molde. Para tal adota-se um ângulo mínimo de 110° com a base (Figura 22), onde valores inferiores poderão acarretar em perda do molde e da peça, dependendo da temperatura em que a mesma for submetida.

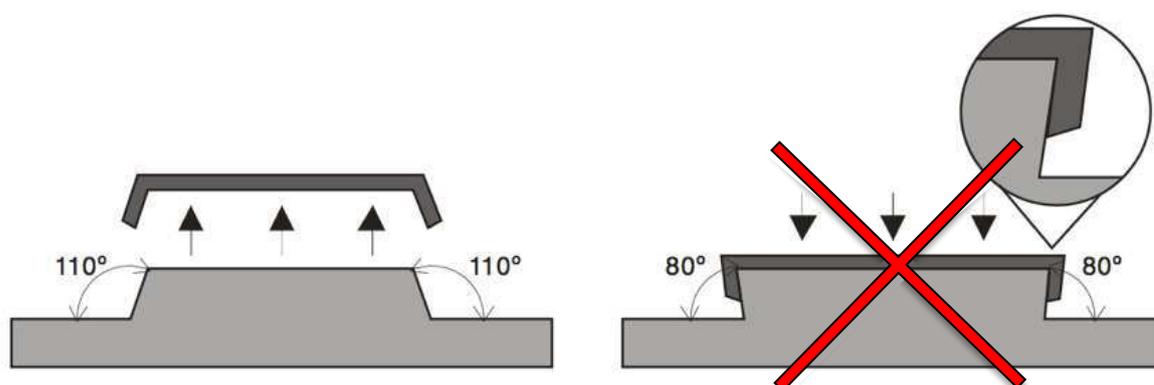


Figura 22 – Ângulo de saída das peças (QUIRINO, 2008)

Os moldes do tipo Gesso e Quartzo (Sílica) se mostraram os mais indicados para este projeto, tendo em vista que serão moldes de fácil reprodução, descartável e ideal para esculturas e trabalhos muito detalhados. Testes da composição e granulometria serão feitos a fim de obter a melhor composição de molde para este projeto.

2.3.1 Composição dos Moldes

Com base em um conceito sugerido por James Kervin e Dan Fenton em seu livro *Pâte de Verre and Kiln Casting of Glass* (1997), uma mistura para moldes deve ser analisada como tendo três constituintes principais: ligantes, refratários e modificadores. Cada uma delas tem funções específicas e pode ser combinada com outras em proporções diferentes, usando uma variedade de materiais prontamente disponíveis, para produzir moldes refratários.

Conforme Thwaites (2011), o ligante retém a forma do modelo original e mantém os outros constituintes do corpo do molde juntos. O gesso é o aglutinante mais comum entre os utilizados para conformação de vidro por moldagem em forno, e também é relativamente barato e prontamente disponível. Ele geralmente constitui entre 25 e 75% do material seco em uma composição de mistura.

O refratário é o constituinte de uma mistura de moldes que mais resiste à ação do calor. Muitos praticantes usam sílica fina pura (malha 200-300) como seu principal ingrediente refratário. O quartzo e o sílex são as principais fontes de sílica.

Os modificadores são geralmente adicionados em quantidades relativamente pequenas por poderem alterar o comportamento geral de uma mistura. Eles podem ser usados para ajustar o tempo de cura do molde, dar mais detalhes de superfície ou reduzir a probabilidade de a mistura do molde ser aderindo ao vidro. Um exemplo de modificador é o caulim, um minério composto de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita. Este mineral é formado pela caulinita, em geral de cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de óxido de ferro. É um dos seis minerais mais abundantes da crosta terrestre e ocorre à profundidade até 10 metros. Funde-se a 1.800°C (temperatura nominal). A fórmula química dos minerais do grupo da caulinita é $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, em que m varia de 1 a 3 e n de 2 a 4.

O caulim é um mineral que apresenta um vasto campo de aplicações industriais, em função de suas características tecnológicas, pois é quimicamente inerte, macio e não abrasivo, branco ou quase branco (alvura), tem capacidade de cobertura quando usado como pigmento, reforçador para as aplicações de carga e apresenta baixa condutividade térmica e elétrica (LUZ *et al*, 1993). Sua função neste projeto será isolar as paredes dos moldes a fim de impedir reações químicas durante o processo de queima das peças de vidro nos moldes.

Existem dois tipos principais de gesso, beta e o alfa. O tipo beta é uma gama de gessos médios a suaves; estes são mais baratos e mais amplamente disponíveis do que os alfa, que foram preparados a partir de gesso a temperaturas mais elevadas. Utilizado como aglutinante, o gesso beta é um agente aglutinante mineral obtido pela calcinação com sulfato de cálcio. Neste processo, o sulfato de cálcio di-hidratado perde 75% da sua água combinada, produzindo hemi-hidrato de sulfato de cálcio, como mostrado na reação, Figura 23-A. Quando em contato com a água, reidrata formando o di-hidrato ou sulfato de cálcio, reação Figura 23-B (BALLIRANO e MELIS, 2009; BARDELLA et al., 2011).



Figura 23 – Reação química do gesso (A) (BALLIRANO e MELIS, 2009; BARDELLA et al., 2011); (B) (SIEVERT et al., 2005; ZUHAIMI et al., 2015).

Uma reação química ocorre quando o gesso é adicionado à água e ele se reidrata, engrossa e depois se transforma em uma massa sólida e densa. A quantidade de água no gesso deve ser proporcionalmente correta para que o gesso desenvolva toda a sua força e densidade, e deve ser bem misturado. O gesso é indicado para a construção de moldes grandes e sua dureza é uma vantagem para o manuseio durante a vaporização, secagem e embalagem do forno. Entretanto, um molde feito apenas de gesso racharia completamente em um forno durante o processo de queimas elevadas (acima de 600°C). Isso mostra a necessidade de ingredientes refratários em misturas de moldes (SIEVERT et al., 2005; ZUHAIMI et al., 2015).

Durante o processo de moldagem em um forno, quando a temperatura chega a 573°C, os cristais de quartzo se rearranjam, mudando de alfa para quartzo beta. Essa mudança é chamada de inversão de quartzo e é marcada por um ligeiro aumento no volume (aproximadamente 2% de expansão): é um processo reversível, portanto, durante o resfriamento, o quartzo se contrai novamente e reverte para o seu estado alfa. Essa expansão e contração podem causar rachaduras no molde, portanto, é aconselhável adicionar outros materiais a uma composição de molde para reduzir o impacto da inversão de quartzo.

Refratários geralmente compõem entre 50 e 75% de uma composição de molde para fundição de vidro. Eles são resistentes a mudanças nas temperaturas de fundição em uma faixa de trabalho que normalmente é entre 780 e 950°C. O refratário dá estabilidade ao molde após o ligante de gesso perder toda a resistência significativa. Os tipos mais comuns de refratários são: Alumina e Sílica fina pura (200-300 malha) em forma de quartzo. Existem três formas cristalinas de sílica, são elas o quartzo, tridimita e cristobalita. A sílica é o elemento mais abundante na Terra após o oxigênio. É também um dos constituintes do próprio vidro (THWAITES, 2011).

A temperatura de fusão da sílica é de 1710 °C. Por se tratar de um dos ingredientes da mistura de molde é provável que se torne reativa com o vidro na temperatura de fundição, devido às transferências de fluxos entre o vidro e a camada limite do molde, resultando na união dos dois. Isto é aliviado pela secagem em pré-queimas dos moldes antes de moldar o vidro neles. Outra maneira é a adição de modificadores, como o caulim, que na proporção de 10% da mistura ajuda a evitar esta união da sílica do molde com o vidro. O quartzo (SiO_2) é a forma mais estável de sílica e é o refratário mais amplamente usado em composições básica de mistura de 50:50 com um aglutinante de gesso.

Quando finamente moída em forma de farinha, a poeira de sílica apresenta sérios problemas de saúde e segurança, especialmente em um tamanho de partícula de 2-8 microm (contido no tamanho de malha 200-300). Segundo dados da Assessoria OM (Ocupacional Medicina) e EST (Engenharia de Segurança do Trabalho), os trabalhadores que atuam em minas, setores da construção civil e da indústria química devem ficar atentos ao contato diário com a Sílica, pois segundo o Ministério da Saúde estima-se que mais de três milhões de pessoas estejam expostas, anualmente, a esse componente causador de doenças ocupacionais graves (KULCSAR, 2010).

Uma das doenças causadas pela exposição à Sílica é a Silicose (Figura 24). Ela surge a partir de inflamações no pulmão, que podem desenvolver no paciente uma tuberculose, ou até mesmo um câncer no órgão. Trata-se do endurecimento dos pulmões causado pela poeira de sílica respirada durante o trabalho. Provoca cansaço, falta de ar, tosse, tontura e fraqueza. Quando a doença está avançada, podem aparecer também dores nas pernas, no peito, na cabeça e emagrecimento. Os pulmões ficam fracos, facilitando outros tipos de doenças pulmonares (JACKSON, 2005).

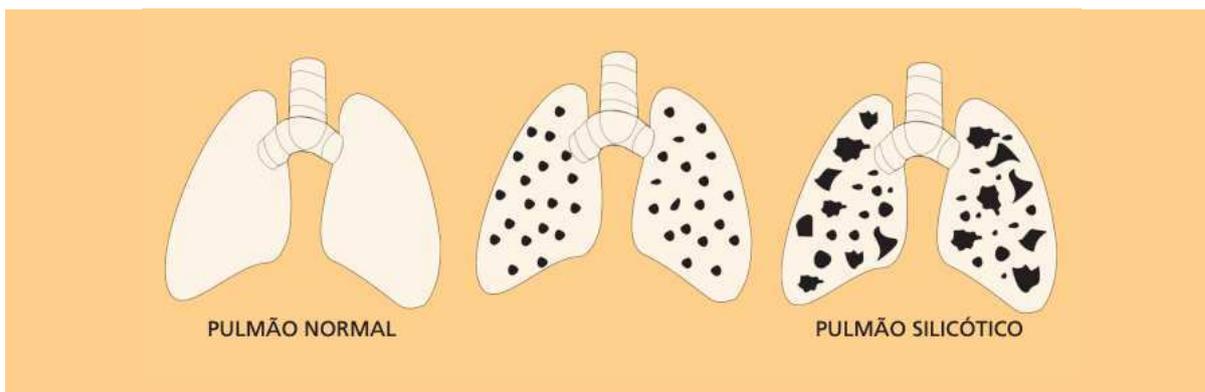


Figura 24 – Pulmão Normal e Pulmão Silicótico (JACKSON, 2005).

Ainda conforme Jackson (2005), o uso irregular da Sílica nos ambientes laborais e a negligência de trabalhadores e de empresas na correta utilização dos equipamentos de proteção individual, são considerados como os principais fatores para o aumento dos casos de patologias como a Silicose. A Sílica pode penetrar o pulmão e provocar alterações celulares e dificultar a troca gasosa. Com o passar do tempo, as artérias do pulmão se tornam rígidas e órgão fica comprometido.

Uma maneira de tentar reduzir os possíveis problemas devido à inalação da sílica seria a utilização de areias ricas em sílica, porém com partículas de tamanhos maiores, como é o caso das areias de mar e areias de rio, em aberturas #26.

O processo de formação da areia começa com a ação do vento, da chuva, de raízes e de microorganismos sobre uma pedra em um intervalo de milhões de anos, esses agentes lixam a pedra, decompondo-a em partículas minúsculas (KULCSAR, 2010).

O termo areia apresenta muitas definições. Na literatura geológica, define-se areia, como um material detrítico com variação de tamanho de partículas definidos composto principalmente por partículas de quartzo. Porém, as principais definições são feitas no sentido de representar um material mineral granular não coesivo, com tamanho de partículas situado entre limites definidos, com composição química e mineralógica variada e com origem inorgânica (CANTO, 2001).

Conforme Chaves (1999) em decorrência da sua origem, admite-se que as areias são constituídas predominantemente por quartzo, mas outros minerais também podem ser encontrados, tais como: feldspato, mica, turmalina etc. A proporção com

que os minerais se apresentam nas areias, lhes confere características específicas, como coloração e a composição mineralógica.

A areia de mar é formada, principalmente por sílica (SiO_2), mas dependendo da composição da rocha da qual é originária, pode agregar outros minerais como: feldspato, mica, zircão, magnetita, ilmenita, mônazita, cassiterita, entre outros.

A areia de rio é extraída de leito de rios várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, pegmatitos e arenitos decompostos. Sua composição é basicamente quartzo e outros tipos de grão (micas, feldspato, piroxenas, granadas, olivinas). Os grãos extraídos deste tipo de ambiente são angulosos porque estiveram sujeitos a pouco transporte, foram pouco rolados, sofreram poucos choques (quanto mais a montante mais evidente este registo). Têm algum brilho que se deve o fato de terem sido serem transportados pela água (são lavados pela água, sendo-lhes retirado qualquer tipo de sujidade). Muitas vezes têm colorações diversas pelo fato de se depositarem à superfície e sofrerem oxidação (CHAVES, 1999).

Os moldes de quartzo e gesso podem utilizar outros materiais em seu processo de conformação, como é o caso da borracha de silicone e do PLA, através da Prototipagem Rápida.

Conforme Cooper (2001), a Prototipagem Rápida (PR) é a expressão que designa um conjunto de tecnologias de reprodução física, camada-a-camada, de protótipos virtuais 3D. A reprodução física camada-a-camada propicia uma grande liberdade de formas, difíceis ou mesmo impossíveis de serem obtidas por tecnologias industriais já estabelecidas, pelo menos de forma rápida. Por isso, as expressões Fabricação por Camadas e Fabricação de Formas Livres têm sido utilizadas além, também, da expressão Impressão Tridimensional. Prototipagem Rápida tem sido, no entanto, a expressão mais utilizada porque ela foi a primeira a ser cunhada e, desta forma, se estabeleceu mais facilmente. Conforme Hilton et al. (2000), Hopkinson et al. (2006) e Pham et al. (2001), ela é também usada indistintamente para designar duas outras tecnologias dela derivadas que são o Ferramental Rápido e a Manufatura Rápida.

Tecnologicamente, a PR é resultado da integração de diversos processos, tanto físicos quanto químicos, com a finalidade de produzir modelos físicos ou protótipos. Existem diferentes implementações desse conceito tecnológico e o número

dessas implementações vem crescendo desde o lançamento do primeiro equipamento em 1986. Segundo Kai et al. (2003), até o ano de 2003 existiam mais de 20 diferentes técnicas de PR. Todas têm em comum as seguintes etapas de processo: 1) modelagem tridimensional da peça; 2) geração da geometria 3D no padrão STL (formato de arquivo padrão para prototipagem rápida que cria uma aproximação da superfície da peça usando malha de triângulos); 3) verificação da integridade do arquivo de dados; 4) processo para a fabricação por camada; e 5) pós-processamento da peça, quando necessário.

De acordo com Kai et al. (2003), dentre as técnicas de prototipagem rápida destacam-se a SLS (*Selective Laser Sintering*) que utiliza um laser de CO₂ para sinterizar um material que se encontra originalmente na forma de pó; A SLA (*StereoLithography Apparatus*) que utiliza um laser de ultravioleta ou de estado-sólido para foto polimerizar uma resina (acrílica ou epóxi); A FDM (*Fused Deposition Modeling*), constrói o protótipo por deposição de um polímero extrudado sobre uma mesa com movimentação vertical; E a 3DP (*Three-dimensional Printing*), a camada de pó (gesso ou amido) é produzida da mesma forma que na SLS. Todas estas tecnologias são passíveis de serem utilizadas na produção de contramoldes. O presente trabalho foca, porém, na tecnologia FDM, que foi a mais acessível e escolhida para gerá-los.

Conforme Stratasys (2016), A tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*), constrói o protótipo por deposição de um polímero extrudado sobre uma mesa com movimentação vertical. A cabeça de extrusão se movimenta no plano x-y e é alimentada por polímero na forma de fio que é aquecido para ser dispensado na forma de filetes em estado semilíquido ou pastoso. A movimentação da mesa forma a camada da peça arranjando os filetes paralelamente. Concomitantemente à construção do objeto, é construído seu suporte que é removido após a finalização do processo de construção. Uma variada gama de materiais está atualmente disponível para a construção de protótipos neste processo. Entre eles estão: cera, poliéster, PLA (Poli (Ácido Láctico)), ABS (Acrilonitrila-Butadieno-Estireno), ABS (esterilizável), PC (policarbonato), PPSU (polifenilsulfona), PEEK (Poli-éter-éter-cetona).

O PLA, ou Poli (Ácido Láctico), é um polímero sintético termoplástico de baixa contração, biodegradável e robusto que vem substituindo os plásticos convencionais

em diversas aplicações. É formado por várias cadeias de repetição do ácido láctico (composto orgânico de função mista - ácido carboxílico e álcool).



Figura 25 – Exemplos de modelos impressos tridimensionais (impressao3dfacil.com.br, 2017).

Desta forma, este trabalho pretende verificar a possibilidade da manufatura de moldes, mediante o uso de técnicas de prototipagem rápida para auxílio na reciclagem de resíduos de vidro visando a melhora na qualidade das réplicas reproduzidas. Estes processos permitem obter rapidamente ferramentas para a termo formação, usufruindo de maior liberdade na criação de objetos com moldes tridimensionais, reduzindo o tempo de colocação de novas peças no mercado e abrindo novas oportunidades no design de peças em vidro.

A borracha de silicone (Figura 26) é um elastômero de cura por poli-condensação que resulta num produto elástico que apresenta boa resistência e moldabilidade, baixa retração linear; dureza após cura: Shore A 15 - 19. Suas vantagens são: boa fluidez, boa moldabilidade e baixa retração linear. Foi utilizado para fabricação de matriz para reprodução dos moldes que irão ao forno.



Figura 26 – Borracha de silicone para moldes (elo7.com.br).

2.4 ARQUITETURA E DESIGN

2.4.1 Uso do Vidro em Projetos Arquitetônicos

O vidro até a década de 1990 era visto como algo de natureza frágil, impedindo aplicações estruturais deste material. Como resultado de intensas pesquisas, hoje em dia os vidros são capazes de exercer aplicações especiais tais como arquitetônicas, estruturais e solares, devido à sua resistência mecânica e térmica (SCHNEIDERA, *et al*, 2012).

Com a melhora da economia, o vidro está sendo cada vez mais utilizado na construção. Se este era um elemento raro utilizado no Brasil até alguns anos atrás, agora é um produto comum e está sendo aplicado em larga escala, como por exemplo, nas fachadas de muitos edifícios. Algumas vantagens como transparência, reutilização, resistência e praticidade, aliadas a boa estética fazem do vidro um material cobiçado no mercado da Construção Civil.

Uma das grandes vantagens do vidro está o tornando uma alternativa a muitos materiais não sustentáveis que existem atualmente. Hoje se desenvolvem tecnologias que permitem a geração de recursos através dele de maneira a não agredir o meio ambiente, como a energia elétrica. Uma das tecnologias que se difundem a cada dia é a conversão de energia solar em elétrica pelo vidro fotovoltaico, onde peças de vidros simples, laminados ou duplos, possuem lâminas de células fotovoltaicas feitas com silício, unidas e instaladas aos fios que se ligam as baterias e convertem a energia solar em elétrica, geralmente para ser utilizada no local que está instalado. Alguns edifícios já utilizam esse conhecimento, seja para a geração total ou parcial de energia, que será consumida no local.

Segundo Ferreira & Zanotto (2002), ao longo dos últimos 40 anos vitrocerâmicas vêm sendo desenvolvidas a partir de escórias de siderurgia e aciaria, e de vidros reciclados – para aplicação em construção civil e arquitetura – e também materiais mais sofisticados para uso odontológico e médico.

2.4.2 Elementos Vazados (COBOGÓ)

Arquitetura e luz estão intimamente ligadas, sendo a visão o principal sentido pelo qual vivenciamos a arquitetura. Entretanto, a luz não está somente relacionada à experiência visual da forma e espaço, mas está fortemente conectada à qualidade térmica (Baker, 2002), pois direta ou difusa, a luz natural é apenas uma parcela da radiação solar que também fornece calor. O aproveitamento da luz natural, que nos trópicos normalmente excede a quantidade de luz requerida pelas tarefas, traz diversos benefícios como a redução no consumo de energia elétrica.

Segundo a ABNT- NBR 7173, elementos vazados são blocos cuja seção transversal média útil seja inferior a 75% da seção transversal bruta. São blocos com dimensões coordenadas, para a execução de alvenarias modulares, isto é, alvenarias com dimensões múltiplas do módulo $M = 10$ cm.

Apesar disso e a depender da função do ambiente, a luz solar direta deve ser controlada através de mecanismos de difusão e redirecionamento para que sejam evitados ganhos de carga térmica, problemas de ofuscamento e variações de luz acentuadas e imprevisíveis. Assim, a configuração, o dimensionamento e a orientação das aberturas e dos dispositivos de controle solar têm significativa importância na distribuição e nos níveis iluminação natural em um ambiente.

Conforme o E-Civil (2017), o cobogó, chamado também de elemento vazado, é feito de concreto ou cerâmica e limita os ambientes sem impedir a entrada de ar. Eles completam paredes e muros para possibilitar maior ventilação e luminosidade no interior de um imóvel, seja residencial (Figura 27), comercial ou industrial. Foi inventado por três engenheiros-arquitetos brasileiros, na primeira metade do século, que o batizaram com a união de suas iniciais: Coimbra, Boeckmann e Góis.



Figura 27 – Elementos Vazados separando ambientes internos e externos (anitabemcriada.com, 2016).

O cobogó leva privacidade às casas sem comprometer a visão do exterior e a luminosidade. A inspiração veio dos muxarabiês, treliças comuns na arquitetura mourisca, recorrentes por aqui durante o período colonial. Os elementos vazados, ou cobogós, são protetores solares bastante utilizados, devido ao seu baixo custo e fácil fabricação. Por outro lado, há poucos estudos quanto à sua eficiência do ponto de vista da iluminação natural (ARAÚJO, *et al*, 2007).

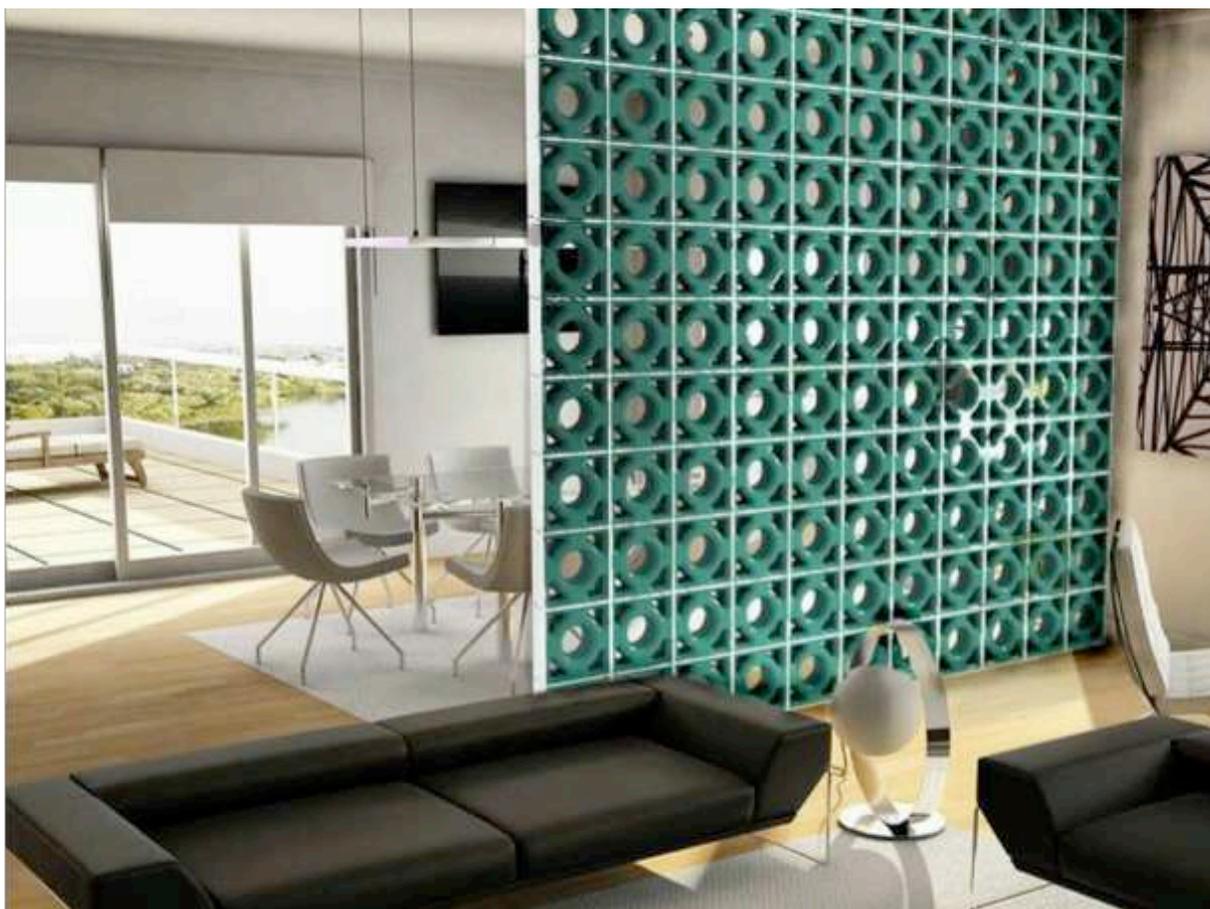


Figura 28 – Cobogó no interior de um ambiente residencial (anitabemcriada.com, 2016).

Usado para conferir privacidade ainda que garantindo a passagem de luz e permitir a ventilação evitando grandes ventos, o cobogó é bastante utilizado para a divisão de ambientes (Figura 28) formando um jogo de luz e sombra com efeito muito bonito. Excelente para ampliar os espaços e, simultaneamente, esconder alguns ambientes quando não se quer deixá-los totalmente a mostra, os cobogós também são uma opção de divisória. Elemento bastante presente em obras de Lucio Costa, Niemeyer e outros grandes arquitetos da metade do século passado, está de volta, totalmente repaginado.

Os cobogós podem ser utilizados para substituir paredes dentro de casa (Figura 29), delimitando o espaço e ainda contribuindo com a circulação de ar e com a claridade natural. Apesar dos elementos vazados, a privacidade é sempre levada a sério, de maneira que os cobogós atuam como divisórias adicionais na ausência de paredes em ambientes integrados.



Figura 29 – Elementos Vasados utilizados para dividir ambientes (anitabemcriada.com, 2016).

Na parte externa, eles embelezam a fachada, tornando-a personalizada e moderna. Para destacar os elementos vazados, o projeto pode incluir iluminação artificial para dar ênfase às formas.

Segundo a Empresa Porto Bello (2017), a versatilidade na aplicação também ajuda a personalizar o uso do cobogó. Uma dica é utilizar o elemento em pequenos vãos na parede, dando um toque único de personalidade ao ambiente.

2.4.3 Ecodesign

O tema ambiental é um assunto cujo debate tem adquirido bastante força nos dias atuais e, de fato, essa corrente tende a crescer mais e mais à medida que os sinais da degradação do meio ambiente vão se incrementando de forma potencial. A preocupação em diferentes entidades que formam a sociedade é crescente, assim mesmo, a sugestão e a adoção de medidas para lidar com o assunto ambiental são cada vez mais frequentes. No campo da Indústria, as soluções apontadas têm seguido

uma evolução: desde as medidas reativas adotadas na saída dos processos, passando por medidas corretivas focadas nos mesmos, chegando à atual tendência de considerar os aspectos ambientais logo no início do desenvolvimento do produto.

Estudos mostram que o design e a fase de desenvolvimento influenciam mais de 80% dos impactos ambientais ocasionados pelo produto (Tischner *et al*, 2001), assim, os esforços colocados durante o projeto são essenciais para definir a carga imposta ao meio ambiente durante o ciclo de vida. Cada decisão tomada durante a concepção de novos produtos, sejam estas focadas ao meio ambiente ou não, ocasionará um correspondente impacto ambiental; por exemplo, um projeto cujo problema consista na redução dos custos eventualmente poderá ocasionar uma diminuição no impacto ambiental do produto. Assim mesmo, a adaptação do produto a novas tecnologias poderá também implicar positivamente nos impactos ambientais. O mesmo pode-se dizer das mudanças em determinados setores da economia; por exemplo, o setor de serviços, ao igual que outros setores, precisa se adaptar a novas tecnologias e reduzir seus custos de operação o qual, à sua vez, origina mudanças no setor industrial e comercial – aspecto que também pode influir positivamente no meio ambiente.

Lewis & Gertsakis (2001) definem ecodesign como:

[...] projetar produtos como se o meio ambiente importasse, e minimizando seus impactos ambientais diretos e indiretos a qualquer oportunidade possível. [...] o objetivo fundamental é projetar produtos com o meio ambiente em mente e assumir certa responsabilidade pelas consequências ambientais do produto uma vez que estas estão relacionadas a decisões e ações específicas executadas durante o processo de design.

O ecodesign é uma disciplina que pode ir além do produto em si e à medida que passa o tempo, como ocorre com o design convencional, seu escopo vai sendo cada vez mais abrangente.

Segundo a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CMMAD (1991) o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades. O conceito de desenvolvimento sustentável implica a imposição de limites ao consumo de recursos para a produção de bens e serviços (Lewis & Gertsakis, 2001), só assim se poderá pensar na possibilidade de não

comprometer o desenvolvimento das futuras gerações. As mudanças que terão que acontecer, e de fato já estão começando a acontecer, devem ser produto de uma sinergia entre os campos ecológico, social e econômico.

Esses argumentos reforçam a asserção de que a sustentabilidade só será atingida a partir da imposição rigorosa de limites ao consumo de recursos para a produção de bens e serviços. No campo do design, as soluções dirigidas em direção à racionalização dos recursos em prol da sustentabilidade devem possuir graus de inovação cada vez mais altos. Manzini & Vezzoli (2005), indica que os níveis de inovação (mudança técnica) devem ir acompanhados de mudanças culturais (Figura 30); não adianta favorecer isoladamente alguma dessas variáveis. Dessa forma, quanto maior a mudança técnica, acompanhada da correspondente mudança cultural, tanto mais as soluções apresentadas contribuirão para o desenvolvimento sustentável.

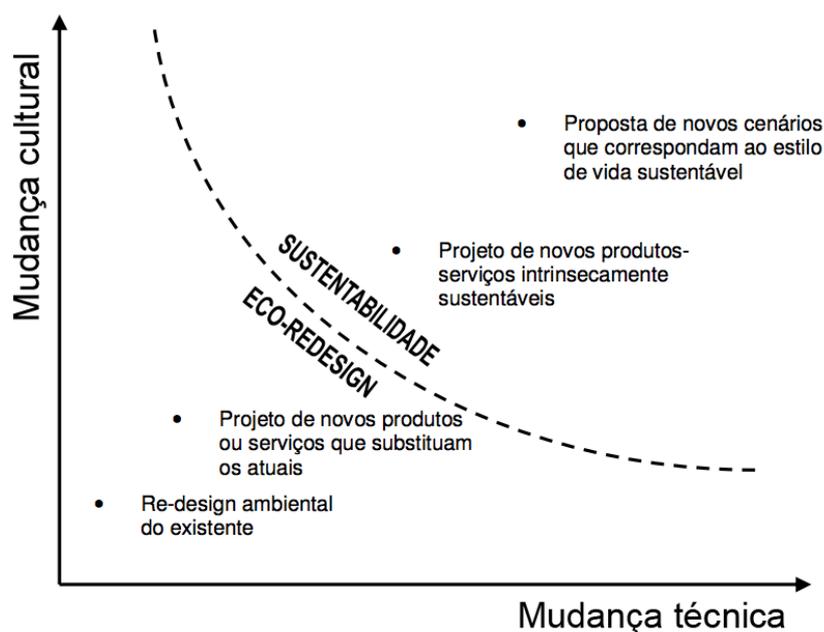


Figura 30 – Soluções sustentáveis e não-sustentáveis (Adap. de MANZINI & VEZZOLI (2005))

Pode-se dizer que as melhorias ambientais atingidas pela introdução do ecodesign apresentam atualmente soluções que recaem nos campos do re-design ambiental do existente e projeto de novos produtos ou serviços que substituem os atuais. Esses tipos de soluções ainda não contribuem para o desenvolvimento sustentável, já que possuem mudanças técnicas e culturais relativamente baixas. O

grau de inovação necessário deve ser tal que as soluções propostas sejam intrinsecamente sustentáveis ou sejam novos cenários que correspondam ao estilo de vida sustentável, onde grandes mudanças técnicas e culturais são requeridas. Por este motivo, a preocupação do designer com o pós-uso dos produtos é fundamental.

O design para reciclagem consiste em toda consideração, durante o projeto, que facilite a recuperação e re-processamento dos materiais uma vez que o produto seja descartado (LEWIS *et al*, 2001) Esses autores indicam algumas estratégias de design que visam facilitar a reciclagem dos materiais, entre elas: escolher materiais que sejam comumente reciclados; minimizar a variedade de materiais; usar materiais compatíveis; e marcar materiais para facilitar sua identificação.

Segundo Garcia (2007), as estratégias de ecodesign oferecem orientação enquanto a medidas de ação a serem tomadas durante a implementação prática do ecodesign. É através dessas medidas que a redução dos impactos ambientais do produto será efetivamente realizada. A seleção das estratégias apropriadas é fundamental para a aplicação, bem sucedida, do ecodesign.

Outra linha de raciocínio do design é o design para modularidade, que vem sendo aplicado em diversos projetos. Um módulo pode ser definido como um “produto dentro do produto” (Erixon, 1996), pelo qual o Design para Modularidade implica na projeção de produtos a partir da concepção planejada de módulos. Esta técnica oferece importantes vantagens na fabricação dos produtos: é uma base excelente para a renovação contínua do produto e desenvolvimento simultâneo do sistema de manufatura; o reporte de falhas é mais rápido se módulos forem testados antes de serem destinados à linha principal; a modularidade de um produto resulta em efeitos positivos no fluxo total de informação e materiais no ciclo de vida; o processo de desenvolvimento do produto é simplificado para posteriores gerações do mesmo; e cada módulo pode ser projetado por separado.

Além dessas vantagens, os ganhos ambientais gerados são consideráveis; por exemplo: o design modular permite a substituição do(s) módulo(s), o qual possibilita a troca de partes durante o uso, facilitando o melhoramento e manutenção do mesmo; favorece a racionalização no uso de recursos durante a manufatura; incrementa a versatilidade e flexibilidade do produto, o qual pode retardar a obsolescência do mesmo; e permite otimizações no espaçamento durante o transporte.

2.4.4 Design de Superfície

Etimologicamente, superfície é uma palavra que deriva do latim (*super*, superior e *facies*, face) e está relacionada geometricamente ao conceito de área/face, definida por comprimento e largura, e figurativamente à parte externa dos corpos, à aparência (WEISZFLOG, 2001).

Manzini & Vezzoli (2005) afirmam que a superfície é a localização do conjunto de pontos em que acaba o material de que o objeto é feito e começa o ambiente exterior. Sua função é de servir de interface entre dois ambientes distintos. Sendo assim, existe um grande potencial de exploração da superfície no processo de desenvolvimento de novos produtos, tendo em mente que este é o primeiro contato do destinatário com o objeto.

O Design de superfície é uma área do design que projeta texturas e estampas para diferentes tipos de superfícies. Este ramo do Design pode ser encontrado em diversas áreas, como têxtil, papelaria, imagens digitais etc. Ele pode ser aplicado em diversas áreas industriais: painéis de madeira industrializada, materiais sintéticos (plásticos e resinas), têxteis (estamparia, tecidos planos, malharia, rendas, tapeçaria, tecelagem), papelaria (papéis de parede e de embalagens), cerâmica, vidros e imagens digitais (sites, vídeos, games).

Segundo Norman, 2008, o primeiro contato com o objeto acontece de maneira completamente instintiva (nível visceral), tendo a visão como principal sentido disparador das reações provocadas pelo produto (Figura 31). Deste primeiro contato visual surgem relações inconscientes que são desencadeadas automaticamente, de maneira pré-programada, de origem primitiva. Produtos com um apelo estético ou intrigante parecem ser mais bem-sucedidos neste nível.

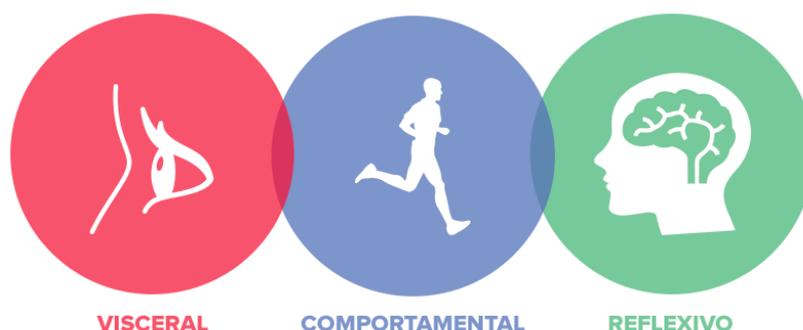


Figura 31 – Três níveis de percepção de um produto (adaptado de NORMAN, 2008).

Norman (2008) ainda aponta que no segundo momento, o indivíduo começa a relacionar o objeto com uma bagagem cultural adquirida ao longo de uma vida de experiências positivas e negativas com o mundo físico e o universo subjetivo. Este processo ocorre de maneira totalmente inconsciente (nível comportamental). No terceiro momento (nível reflexivo) é que o indivíduo é capaz de aprender, fazer as relações com o passado e abstrair o presente e o futuro, projetando suas expectativas no objeto. É neste nível que a cognição atribui significado, enquanto nos outros níveis há apenas afeto, sem consciência ou interpretação. Nesta etapa há a interpretação, a compreensão e o raciocínio. Porém, é baseado nas duas primeiras percepções que a reflexão acontece, tendo como ponto de partida o estado de afeto positivo ou negativo inicial, desencadeados pelos níveis visceral e comportamental.

Para Schwartz (2008), o design de superfície é uma área na fronteira entre o design gráfico e o design de produtos, freqüentemente associado ao ambiente bidimensional, mas cada vez mais encorpado ao contexto do produto físico tridimensional. Segundo a autora, podem existir 3 abordagens distintas para o design de superfície: a representacional (que concerne a geometria e representação gráfica do projeto); a constitucional (que lida com as técnicas de fabricação e com as características particulares de cada material) e a relacional (que trata das relações estabelecidas entre o sujeito, o objeto e o meio).

Conforme Nascimento (2017), é possível traçar um paralelo entre o estudo de Schwartz (2008) e o trabalho de Norman (2008). O objetivo do projeto de superfície pode determinar o nível de processamento a ser atingido, uma vez que a percepção da superfície é equivalente aos níveis de processamento. A abordagem relacional proposta por Schwartz (2008) pode ser comparada com o 3º nível de processamento em que as experiências são interpretadas pelo usuário durante a experiência com o produto, sendo essa então a abordagem na projeção de superfícies a mais significativa e importante para o desenvolvedor de novos produtos.

Essa questão aponta para uma análise geométrica de superfícies seguida por uma análise perceptiva daquelas, com suas possíveis implicações e inter-relações. No entanto, quando a superfície é trazida para o mundo “factível” do ser humano, elementos relativos à sua materialidade aparecem para discussão e precisam ser considerados. Eles influem diretamente na maneira como as superfícies são

percebidas pelo homem e ajudam a configurar e definir o objeto (NASCIMENTO, 2017).

Segundo Freitas (2011), o planejamento da superfície tornou-se mais significativo com o desligamento desta atividade da condição de desdobramento do design têxtil, ou de ferramenta de expressão do design gráfico. Desta maneira, este elemento que constitui o objeto deixa de ser apenas um suporte material de proteção e acabamento, mas passa a ter uma carga comunicativa com o exterior do objeto e também com o interior, transmitindo informações sgnicas que podem ser percebidas através dos sentidos, tais como cores, texturas e grafismos. O profissional que trabalha esta superfície tem a função de tratar, explorar e ressaltar a interface comunicativa dos objetos, unindo características funcionais e estéticas que se apresentam também em outras especialidades do design, porém aparentemente dissociadas entre si.

No projeto da superfície, a materialidade permite tornar real a imaterialidade. Através do estudo das características de cada material aplicado na interface exterior do produto o projetista pode inserir uma estrutura tátil ou gráfica que será o estímulo dos sentidos humanos, auxiliando o usuário a conectar-se com o objeto e refletir neste, seus valores e estilo de vida, aproximando o produto do seu “eu” e proporcionando neste consumidor uma experiência única. A identificação imaterial se dará na convergência de signos entre a experiência oferecida pelo objeto e as expectativas, os valores e as referências emocionais prévias do consumidor. É possível concluir, desta forma, que o projeto da superfície está relacionado com o nível mais alto de interação com o objeto, como descrito por Norman (2008), o nível reflexivo, pois é neste nível que estas associações ocorrem (FREITAS, 2011)..

É quase inevitável pensarmos em superfície e não pensarmos em aparência, ou em revestimento de áreas e de objetos. Segundo Santos (2000):

quando o design é associado apenas à aparência dos produtos, isso significa que o processo de design está sendo mal gerenciado e que nem todas as possibilidades acerca do produto e do mercado foram devidamente levantadas, analisadas e solucionadas.

Em nosso entorno, por exemplo, são exatamente as superfícies industrializadas com características de uma “linguagem chapada”, cuja função principal se coloca aparentemente como revestimentos incorporados de forma

deslocada entre a concepção da superfície e sua relação com os objetos e com o meio (seja este privado ou público), que nos leva a percebê-las muitas vezes com estranheza e distanciamento. Para um olhar mais desatento, estas superfícies causam a falsa sensação de exclusão para outras potencialidades, portanto, cabe ao designer de superfícies, pensar o seu cotidiano não somente sob o aspecto sociológico ou econômico, mas sob o aspecto estético para tentar inferir novas possibilidades projetuais nas superfícies que se inserem em nossa subjetividade. Neste sentido, o designer deve ser aquele que participa através de ações efetivas do desenvolvimento dos produtos, conceitualizando e catalisando toda forma de conhecimento estético/teórico e/ou prático (NASCIMENTO, 2017).

Refletindo acerca do processo perceptivo, Merleau-Ponty (1994) coloca que “o algo perceptivo está sempre no meio de outra coisa, ele sempre faz parte de um campo. Uma superfície verdadeiramente homogênea, não oferecendo nada para se perceber, não pode ser dada a nenhuma percepção”, e continua afirmando que, “portanto, a pura impressão não é apenas inencontrável, mas imperceptível e, portanto, impensável como momento da percepção”.

Retomando então, o conceito de espaço ativo, fomentado por superfícies-objetos, no qual não se objetiva apenas as questões referentes à estampagem como representações de temáticas voltadas ao mercado, mas sim como elemento plástico que conserva as especificidades de cada suporte em sua provável aplicabilidade posterior. E que, assim, ao mesmo tempo possamos nos deparar com o questionamento da manutenção ou não de estruturas visuais intrínsecas determinadas como pertinentes e únicas ao objeto proposto.

Ainda conforme Nascimento (2017), as possibilidades de aplicações de uma forma híbrida da matéria e de suas diferentes estruturas na construção de espaços reapresentados como elementos visuais, em uma reapropriação do fazer e do apresentar-se sobre, resgata a inquietude das questões poéticas para o designer. As superfícies têxteis, as cerâmicas e os papéis se subdividem em inúmeras aplicações dentro do design e tornam-se um elemento ativo na medida em que redimensionam a nossa condição sensível tanto no âmbito individual como no ambiente coletivo através percepção do corpo. Criam, desta forma, um produto que não se esgota em uma única possibilidade de estar no espaço do cotidiano, mas resgata o sujeito criativo no outro, um consumidor diferenciado e não passivo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Resíduos Vítreos

Os vidros utilizados foram do tipo sódico-cálcicos (Figura 32), provenientes de garrafas de envase nas cores azul e branco obtidas de fabricantes nacionais. Os resíduos foram oriundos da coleta seletiva e foram beneficiados (separação por tipo e cor, lavagem e trituração) antes da caracterização e processamento. Foram utilizadas três granulometrias, passando em peneiras com aberturas: #26, #8 e #4 (0,7mm, 2,38mm e 4,76mm respectivamente).



Figura 32 – Garrafas de vidro similares às utilizadas na pesquisa (mospensstudio.com, 2018).

3.1.2 Matéria Prima para Fabricação dos Moldes

Gesso-beta (gesso comum utilizado na construção civil) adquirido em lojas de materiais de construção. **Caulim** fornecido pela DOLOMIL, Distribuição de Minerais e Minérios em Geral. **Sílica fina pura** (Dióxido de Silício - SiO_2) peneirado em peneira #325 adquirido pela Distribuidora diLuca; **Areia de Mar** coletada na Praia do Bessa em João Pessoa-PB. **Areia de Rio** adquirida em lojas de materiais de construção. **Filamento de PLA** – Poli (Ácido Láctico) para impressora 3D do fabricante DigiStruct PLA, com espessura de 1.75 mm na cor azul claro. **Borracha de Silicone** do tipo Azul Shore A 20 do fabricante NautiCurso.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa foi organizada de maneira a expor as diversas etapas que foram executadas neste trabalho. Dentre elas tem-se: os beneficiamentos; a caracterização das matérias primas; a composição e caracterização dos moldes; a projeção dos moldes dos elementos vazados; a obtenção dos elementos vazados em vidro; e a caracterização físico mecânica dos elementos vazados.



Figura 33 – Metodologia utilizada durante a pesquisa (acervo do autor, 2019).

3.2.1 Beneficiamentos

3.2.1.1 Resíduos Vítreos

Os resíduos vítreos do tipo sódico-cálcicos ocós foram lavados e separados por cor. Foram utilizados neste projeto os vidros da cor branca (transparente) e o vidro azul. Em seguida eles foram triturados e peneirados em diferentes granulometrias (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), utilizando as peneiras #26 (abertura de 0,7mm), #8 (abertura de 2,36 mm) e #4 (abertura de 4,76 mm). A tabela 4 mostra as nomenclaturas atribuídas, colocações dos vidros e granulometrias.

Tabela 4 – Nomenclaturas, Coloração e Granulometrias das Misturas de vidro.

<i>Nomenclaturas</i>	<i>Peneiras</i>		<i>Colorações dos Vidros</i>
	Passa pela	Retido na	
VB-26	#26	-	Branco
VB-8	#8	#26	
VB-4	#4	#8	
VA-26	#26	-	Azul
VA-8	#8	#26	
VA-4	#4	#8	

Fonte: Acervo do autor, 2019.

3.2.1.2 Areias

As areias de rio e de mar foram beneficiadas para servirem de base para os moldes para fusão de vidro em forno. Elas foram peneiradas utilizando a peneira #26 (abertura de 0,7mm), todo o material retido na peneira foi descartado e todo o material que passou pela peneira foi utilizado na pesquisa.

3.2.2 Caracterizações

3.2.2.1 Caracterizações das Matérias Primas

Com o objetivo de conhecer melhor os elementos componentes dos moldes, optou-se pelas análises através da fluorescência de Raios X e pela Microscopia Óptica.

3.2.2.1.1 Fluorescência de Raios X

A análise química por XRF (Fluorescência de Raios X) foi realizada a partir da detecção dos raios-x característicos (fluorescentes) de cada elemento. Tal análise foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, utilizando um equipamento da Shimadzu, modelo EDX-720/800HS (*Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer*). Foram analisadas amostras de areia do mar, areia de rio, caulim, sílica fina pura, gesso, vidro branco (incolor) e vidro azul. Todas as amostras foram moídas e passaram em peneira com abertura #200.

3.2.2.1.2 Microscopia Óptica

A técnica de MO, foi realizada em um Microscópio OLYMPUS BX51 e variação de 100X-1000X, acoplado a uma estação de Análise de Imagens. Tal análise foi realizada no Lab.Micros – Laboratório de Microscopia - da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG. Foram analisadas amostras de areia do mar, areia de rio, caulim, sílica fina pura, gesso, vidro branco (incolor) e vidro azul.

3.2.2.1.3 Difração de Raios X

A caracterização por Difractometria de Raios-X foi obtida através do difratômetro de raios-X Bruker, D2Phaser e realizada no Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LabSMaC). Foi utilizada a fonte de radiação monocromática Cu-K α de $\lambda = 1,5418$, com tensão de 40 Kv e uma corrente de 30 mA. As medidas varreram a faixa entre 5° e 80° (2 θ) com fendas 1 (fendas de divergência: DS): 1 (fendas de espalhamento: SS): 0,3 (fendas de recepção: RS); modulo tempo fixo (fixed time), com passo de 0,02° (2 θ) e tempo de contagem de 0,6 segundos por passo. Para identificação das fases utilizou-se o software DIFFRAC.EVA, que fornece uma coleção completa dos melhores algoritmos para análise de dados por XRD (difração de raios X), com acesso total a todos os parâmetros de funções. O EVA realiza pesquisa simultânea em várias bases de dados de referência, tais como ICDD PDF2/PDF4+/PDF4 Minerais/PDF4 Base de Dados de Orgânicos. Foram analisadas duas amostras, sendo elas: **vidro branco** (incolor) e **vidro azul**.

3.2.2.2 Caracterizações das Composições Vítreas

Foram elaboradas diversas composições de resíduos vítreos, com o objetivo de se obter uma maior heterogeneidade entre os grãos e escolher a melhor proporção entre as cores (azul e branco) e tamanhos de grãos para o desenvolvimento dos elementos vazados (Tabela 5).

Tabela 5 – Combinações de Proporções entre cores e tamanho do grão

<i>Nomenclaturas</i>	<i>Proporção da Coloração dos Vidros</i>	<i>Peneira</i>
VB9A1-26	90% Branco + 10% Azul	
VB7A3-26	70% Branco + 30% Azul	Passou pela #26
VB5A5-26	50% Branco + 50% Azul	
VB9A1-8	90% Branco + 10% Azul	
VB7A3-8	70% Branco + 30% Azul	Passou pela #8 e foi retida na #26
VB5A5-8	50% Branco + 50% Azul	
VB9A1-4	90% Branco + 10% Azul	
VB7A3-4	70% Branco + 30% Azul	Passou pela #4 e foi retida na #8
VB5A5-4	50% Branco + 50% Azul	

Fonte: acervo do autor, 2019.

Com o objetivo de entender os aspectos visuais e a estrutura cristalina da composição escolhida, foi realizada a microscopia óptica e o ensaio de difração de raios X.

3.2.2.2.1 Microscopia Óptica

A técnica de MO, foi realizada em um Microscópio OLYMPUS BX51 e variação de 100X-1000X, acoplado a uma estação de Análise de Imagens. Tal análise foi realizada no Lab.Micros – Laboratório de Microscopia - da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG. Foi analisada a **mistura de vidro branco com vidro azul** na mesma proporção escolhida para as etapas posteriores.

3.2.2.2.2 Difração de Raios X

Para a caracterização por Difractometria de Raios-X foi utilizada a mesma técnica e equipamento descrito no item 3.2.2.2 (Página 78). Foi analisada a **mistura**

de vidro branco com vidro azul na mesma proporção escolhida para as etapas posteriores.

3.2.3 Composições e Caracterizações dos Moldes

3.2.3.1 Composições dos Moldes

Foram elaboradas três composições de molde, com as seguintes matérias primas: gesso, a água, o caulim, a sílica fina pura e dois tipos de areia (de mar e de rio). As areias de rio e de mar foram peneiradas utilizando a granulometria da peneira #26 (abertura de 0,70mm), já a sílica fina pura foi adquirida na utilizando a granulometria da peneira #325 (abertura de 0,045mm). Cada composição foi catalogada e recebeu as denominações e proporções conforme a Tabela 6 e Figura 34. Para a composição elaborada com sílica fina pura foi necessária uma maior adição de água, quando comparada às demais, devido à dimensão dos grãos serem inferiores.

Tabela 6 – Nomenclaturas das Composições dos moldes sem tratamento térmico

Descrição		Componentes dos Moldes			
		Gesso	Caulim	Areia	Água
MR	Molde de areia de rio , gesso, caulim e água	32,5%	10%	32,5% rio #26	25%
MM	Molde de areia de mar , gesso, caulim e água	32,5%	10%	32,5% mar #26	25%
MS	Molde de sílica fina pura , gesso, caulim e água	26%	8%	26% sílica fina pura #325	40%

Fonte: acervo do autor, 2019.

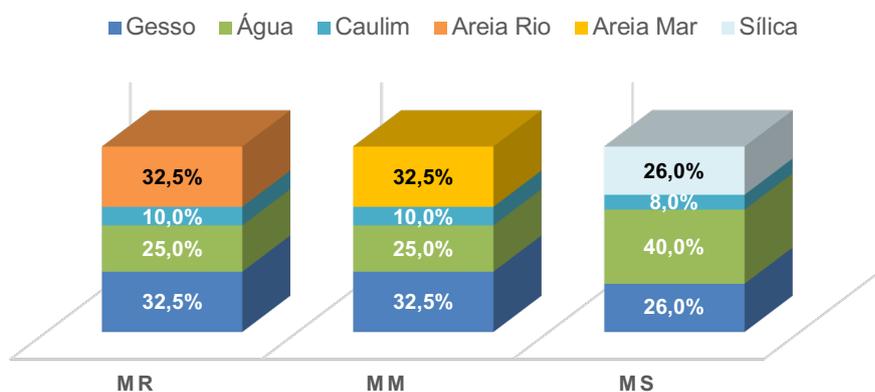


Figura 34 – Composição dos Moldes em Porcentagem de Peso (acervo do autor, 2019).

Seguindo as proporções da Figura 34, os componentes foram pesados e misturados, em seguida as massas foram depositadas em moldes cilíndricos feitos de canos de PVC, com um raio de 47 mm e um comprimento de 109 mm, dando um total de 20 corpos de prova de cada composição. Todas foram feitas no mesmo dia, portanto submetidas às mesmas condições de tempo e secagem. Após 5 dias de secagem ao ar livre, metade dos corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico inicial (TTi).

3.2.3.2 Tratamento Térmico inicial

Todos os tratamentos térmicos realizados nesta pesquisa foram realizados no forno da marca *Linn High Therm*, modelo *Elektro-Term KK260* com resistências internas nas laterais e fundo do forno e controlador para programação de até 20 ciclos de temperaturas. Tais análises foram realizada no LASMAV – Laboratório de Síntese e Materiais Vítreos - da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Durante o Tratamento Térmico inicial (**TTi**) (Tabela 6 e Figura 35) foi utilizado como referência o modelo utilizado por Fusedglass (2017) o aquecimento inicial foi até a temperatura de 482°C, com razão de aquecimento de 2,5 °C.min⁻¹ e a temperatura foi mantida por 15 minutos. Em seguida ocorreu a etapa de remoção de bolhas de ar, onde atingiu-se a temperatura de 663 °C, com razão de aquecimento de 0,6°C/min e a temperatura foi mantida por 30 minutos. Após esta etapa atingiu-se a temperatura mais alta do tratamento térmico, onde deverá ocorrer a fusão do vidro, aos 824°C, com razão de aquecimento de 10,0°C e esta foi mantida por 15 minutos. Logo em seguida buscou-se um resfriamento rápido, atingindo a temperatura de 516°C através da razão de resfriamento de 10,0 °C.min⁻¹ e esta temperatura foi mantida durante 60 minutos, para que se obtivesse o recozimento das peças, no intuito de melhorar a resistência das mesmas. Em seguida o forno iniciou o processo de resfriamento lento, para evitar falhas e rachaduras, este processo utilizou razão de resfriamento de 1,6 °C.min⁻¹ e atingiu a temperatura de 385°C, porém não manteve esta temperatura e em seguida, através da razão de resfriamento de 4,3 °C.min⁻¹ atingiu-se a temperatura ambiente, através do resfriamento total.

Tabela 7 – Dados do Tratamento Térmico inicial (TTi)

	<i>Faixa de Temperatura (°C)</i>	<i>Razão de Aquecimento/Resfriamento (°C.min⁻¹)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Patamares de Tempo (Min)</i>	<i>Aquecimento/Resfriamento</i>
1	24 – 482	2,5	482	15	Aquecimento
2	482 – 663	0,6	663	30	Aquecimento
3	663 – 824	10,0	824	15	Aquecimento
4	824 – 516	10,0	516	60	Resfriamento
5	516 – 385	1,6	385	0	Resfriamento
6	385 – 24	4,3	24	0	Resfriamento

Fonte: acervo do autor, 2019.

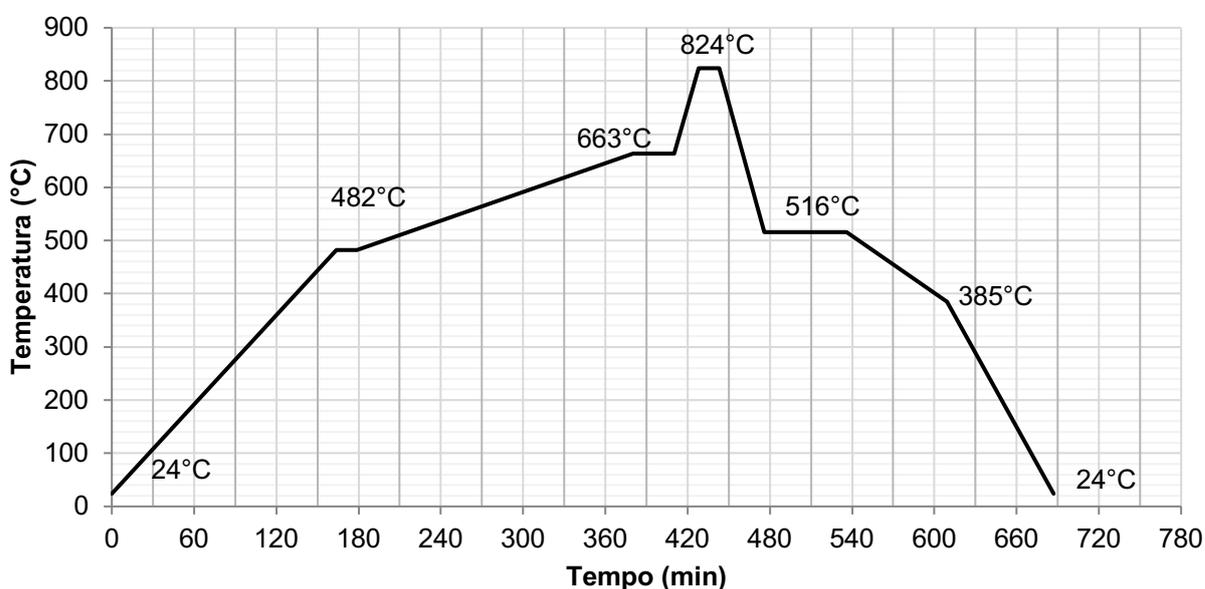


Figura 35 – Curva Temperatura/Tempo de TTi (acervo do autor, 2019).

Após submetidas ao tratamento térmico inicial, as amostras adquiriram as seguintes nomenclaturas (Tabela 8).

Tabela 8 – Nomenclaturas das Composições dos moldes após o tratamento térmico inicial

<i>Componentes dos Moldes</i>	<i>Nomenclaturas antes do TTi</i>	<i>Nomenclaturas após TTi</i>
Molde de areia de rio, gesso, caulim e água	MR	MR - TTi
Molde de areia de mar, gesso, caulim e água	MM	MM - TTi
Molde de sílica fina pura, gesso, caulim e água	MS	MS - TTi

Fonte: acervo do autor, 2019.

3.2.3.3 Teste de Resistência à Compressão Simples

Os testes de resistência à compressão simples, foram realizados utilizando a Máquina Universal de Ensaio Emic DL 10000, com carga de 100KN. A velocidade de compressão foi fixada em $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ e uma média de 10 corpos de prova para cada amostra (MR, MM, MS, MR-TTi, MM-TTi e MS-TTi). Os testes foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais - da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

3.2.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizada para investigar o efeito da composição de cada molde em suas características microestruturais. As amostras MR, MM, MS, MR-TTi, MM-TTi e MS-TTi, foram revestidas por pulverização catódica com uma fina camada de ouro e depois analisadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura Superscan SSX-550, Shimadzu, a uma voltagem de aceleração de 15 kV. As micrografias foram obtidas no Laboratório de Caracterização de Materiais - da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

3.2.4 Design dos Moldes dos Elementos Vazados

Para geração de um novo elemento vazado, foram executadas diversas etapas, tais como: desenvolvimento do projeto de design; modelagem tridimensional da peça; geração da geometria 3D; impressão tridimensional da Matriz; obtenção do contramolde em silicone; e a preparação dos moldes finais.

3.2.4.1 Projeto do Elemento vazado

Buscando atingir os três níveis de percepção de um produto, sugerido por Norman (visceral, comportamental e reflexivo), a Caixa Morfológica foi utilizada como ferramenta para o desenvolvimento dos elementos vazados em vidro. Esta é uma técnica de auxílio de geração de soluções que permite exercitar o pensamento combinatório. Quando é criada uma lista de atributos para um determinado objeto, ganha-se uma visão estratégica do objeto. Fica-se com uma melhor noção de todos

os elementos e processos que definem esse objeto. A partir dessa lista de atributos foi possível organizar todo um conjunto de variações possíveis para cada um desses atributos. O formato da caixa morfológica permite que o utilizador crie associações facilmente, visto que as possibilidades se encontram discriminadas na matriz. Através desta técnica, foram realizados estudos de novas formas de elementos vazados para que, através das repetições modulares, os mesmos possam ser sobrepostos, formando assim, diferentes composições.

O projeto foi esboçado no Autodesk Sketchbook Pro, levando-se em consideração principalmente as limitações do processo devido ao ângulo de saída. Em seguida passado à limpo para o *software* vetorial Adobe Illustrator, onde os desenhos bidimensionais foram vetorizados e foram feitas simulações da peça.

3.2.4.2 Modelagem Tridimensional da Peça

Visando a melhora na qualidade das réplicas reproduzidas, buscou-se verificar a possibilidade da manufatura de moldes, mediante o uso de técnicas de prototipagem rápida. Estes processos permitem obter rapidamente ferramentas para a termo formação, usufruindo de maior liberdade na criação de objetos com moldes tridimensionais. Utilizando o *software* Rhinoceros 3D, a peça, seu molde e contramolde foram modelados tridimensionalmente e foram feitos ajustes de medidas, ângulos e formas, possibilitando assim, a geração de simulações tridimensionais e estudo de volumes.

3.2.4.3 Geração da Geometria 3D

Visando dar origem à impressão 3D, foi gerado o arquivo no formato .STL através do *Software* Rhinoceros. Em seguida o arquivo (.STL) foi aberto no *Software* Slic3r, onde as configurações de impressão, como resolução, tipo de filamento, velocidade, temperaturas entre outras foram ajustadas e por fim geraram um arquivo no formato de impressão (.Gcode).

3.2.4.4 Impressão Tridimensional da Matriz

O arquivo de impressão (.Gcode) então foi aberto no Software Repetier Host e em seguida iniciou-se a impressão do molde da peça em PLA ou Poli (Ácido Láctico), como matéria prima e o equipamento de impressão foi a REPRAP Prusa i3 Guru.

3.2.4.5 Obtenção do Contramolde em Silicone

Para geração do contramolde, foi utilizada a borracha de silicone, um elastômero de cura por poli-condensação, que possui boa fluidez, boa moldabilidade e baixa retração linear.

Utilizou-se uma caixa de papelão com dimensões 2cm maiores do que o tamanho do objeto em PLA. O objeto foi fixado no meio da caixa com cola branca e aguardou-se a secagem total da mesma no interior da caixa. Como desmoldante optou-se pelo uso do White Lub Spray aplicado em todas as faces do modelo em PLA e da caixa. Foram utilizados cerca de 3kg de borracha de silicone e 90g de catalizador para geração do contramolde. Foi feita a mistura do silicone com o catalizador, evitando a geração de bolhas e esta, por sua vez, foi inserida no interior da caixa. Movimentos de trepidação foram realizados para auxiliar na remoção de bolhas de ar. Aguardou-se cerca de 10 horas até o processo de cura total e desmolde.

Visando facilitar o desmolde das peças finais, o contramolde foi bipartido na parte inferior, separando o meio da borda.

3.2.4.6 Preparação dos Moldes Finais

Para conseguir resistir às altas temperaturas do forno (acima de 824°C), foram produzidos moldes compostos por um ligante, um refratário e um modificador. Após avaliações de composição e testes de resistência, optou-se por uma das areias para compor os moldes.

Utilizando aproximadamente 1200g de **areia** (#26), 1200g de **gesso**, 125g de **caulim** e 860g de **água**. Os elementos secos foram misturados previamente, em seguida a água foi adicionada. Dando um total de 3.385g. Por fim a mistura foi introduzida no Contramolde de borracha de silicone. Aguardou-se aproximadamente

2 horas para o desmolde. Após removido do contramolde, cada molde foi pesado, catalogado e estocado sobre uma superfície apropriada para secagem durante pelo menos 5 dias em temperatura ambiente. Após o processo de secagem, os moldes deveriam perder aproximadamente 20% do peso total, através da evaporação, para que então, estivessem prontos para receber o resíduo vítreo.

3.2.5 Obtenção dos Elementos Vazados de Vidro

Para obtenção das peças de vidro, foi necessário introduzir os resíduos vítreos no interior dos moldes e levá-los ao forno de *kiln-casting*, onde foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos.

3.2.5.1 Preenchimento dos Moldes com Vidro

Após totalmente secos, os moldes receberam as misturas de vidro nas diferentes granulometrias e cores. Para uma maior compactação dos resíduos, o molde foi agitado algumas vezes, promovendo um melhor empacotamento dos grãos de vidro. Em seguida estes foram levados a diferentes tratamentos térmicos controlados.

3.2.5.2 Tratamentos Térmicos

Os moldes com as misturas de vidro foram levados ao forno da marca *Linn High Therm*, modelo *Elektro-Term KK260* com resistências internas nas laterais e fundo do forno e controlador para programação de até 20 ciclos de temperaturas. Tais análises foram realizada no LASMAV – Laboratório de Síntese e Materiais Vítreos - da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Foram realizados diversos tratamentos térmicos e posteriormente selecionados nove diferentes. Dos selecionados, a temperatura de fusão variou entre 840°C (TT1), 880°C (TT2) e 920°C (TT3) e o patamar de tempo de fusão entre 30 (A), 90 (B) e 150 (C) minutos, conforme as Tabelas de Tabela 9 a Tabela 11 e das Figura 39 à Figura 47.

Tabela 9 – Tratamentos Térmicos (TT1 – A, TT1 – B, TT1 – C)

	Faixa de Temperatura (°C)	Razão de Aquecimento/Resfriamento (°C.min ⁻¹)	Temperatura (°C)	Patamares de Tempo (Min)			Aquecimento/Resfriamento
				TT1 - A	TT1 - B	TT1 - C	
1	24 – 482	2,5	482	15	15	15	Aquecimento
2	482 – 663	0,6	663	30	30	30	Aquecimento
3	663 – 840	10,0	840	30	90	150	Aquecimento
4	824 – 516	10,0	516	60	60	60	Resfriamento
5	516 – 385	1,6	385	0	0	0	Resfriamento
6	385 – 24	4,3	24	0	0	0	Resfriamento

Fonte: acervo do autor, 2019.

Tabela 10 – Tratamentos Térmicos (TT2 – A, TT2 – B, TT2 – C)

	Faixa de Temperatura (°C)	Razão de Aquecimento/Resfriamento (°C.min ⁻¹)	Temperatura (°C)	Patamares de Tempo (Min)			Aquecimento/Resfriamento
				TT2 - A	TT2 - B	TT2 - C	
1	24 – 482	2,5	482	15	15	15	Aquecimento
2	482 – 663	0,6	663	30	30	30	Aquecimento
3	663 – 880	10,0	880	30	90	150	Aquecimento
4	824 – 516	10,0	516	60	60	60	Resfriamento
5	516 – 385	1,6	385	0	0	0	Resfriamento
6	385 – 24	4,3	24	0	0	0	Resfriamento

Fonte: acervo do autor, 2019.

Tabela 11 – Tratamentos Térmicos (TT3 – A, TT3 – B, TT3 – C)

	Faixa de Temperatura (°C)	Razão de Aquecimento/Resfriamento (°C.min ⁻¹)	Temperatura (°C)	Patamares de Tempo (Min)			Aquecimento/Resfriamento
				TT3 - A	TT3 - B	TT3 - C	
1	24 – 482	2,5	482	15	15	15	Aquecimento
2	482 – 663	0,6	663	30	30	30	Aquecimento
3	663 – 920	10,0	920	30	90	150	Aquecimento
4	824 – 516	10,0	516	60	60	60	Resfriamento
5	516 – 385	1,6	385	0	0	0	Resfriamento
6	385 – 24	4,3	24	0	0	0	Resfriamento

Fonte: acervo do autor, 2019.

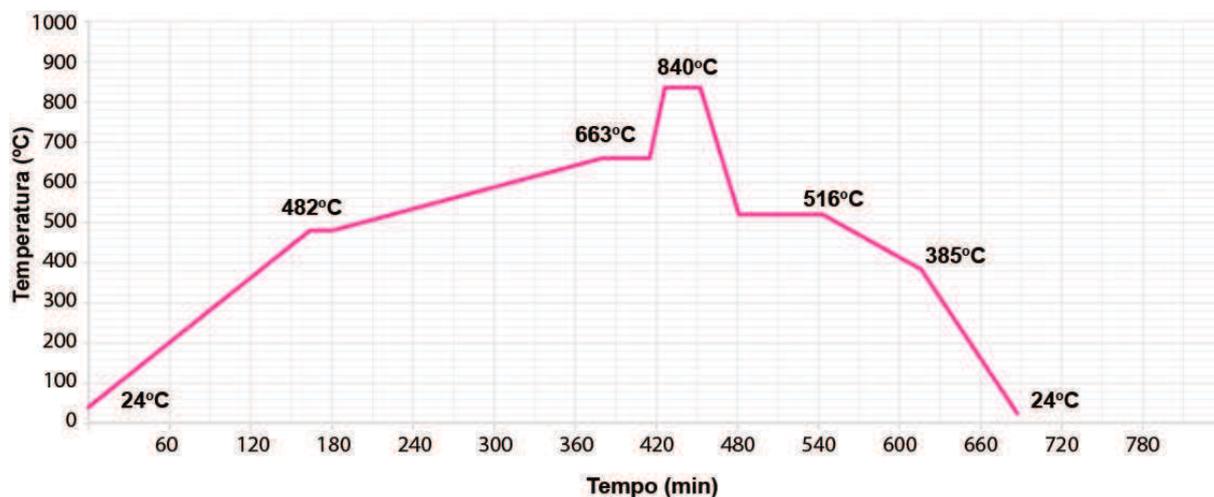


Figura 36 – Tratamento Térmico TT1 - A (acervo do autor, 2019).

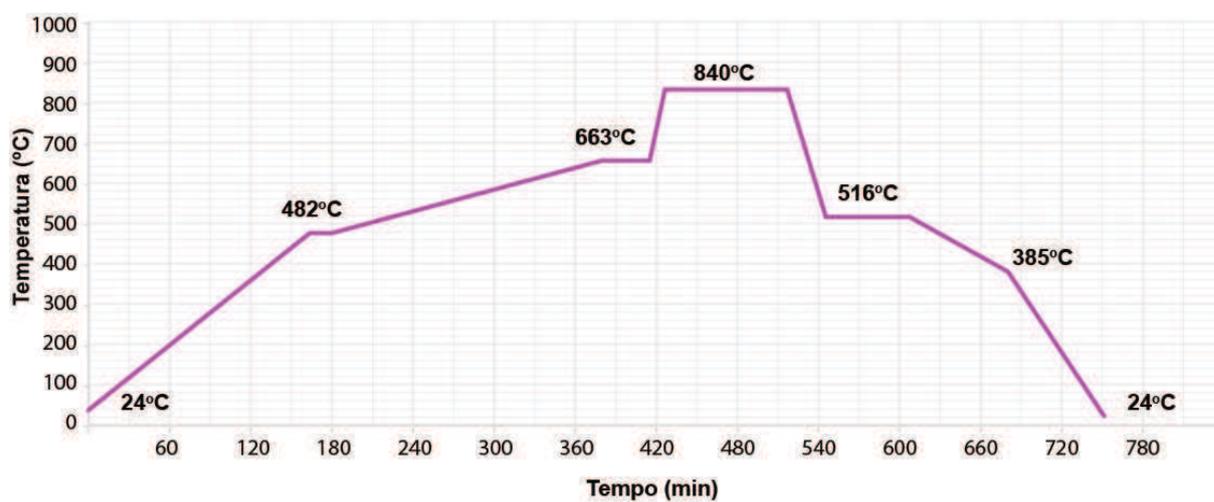


Figura 37 – Tratamento Térmico TT1 - B (acervo do autor, 2019).

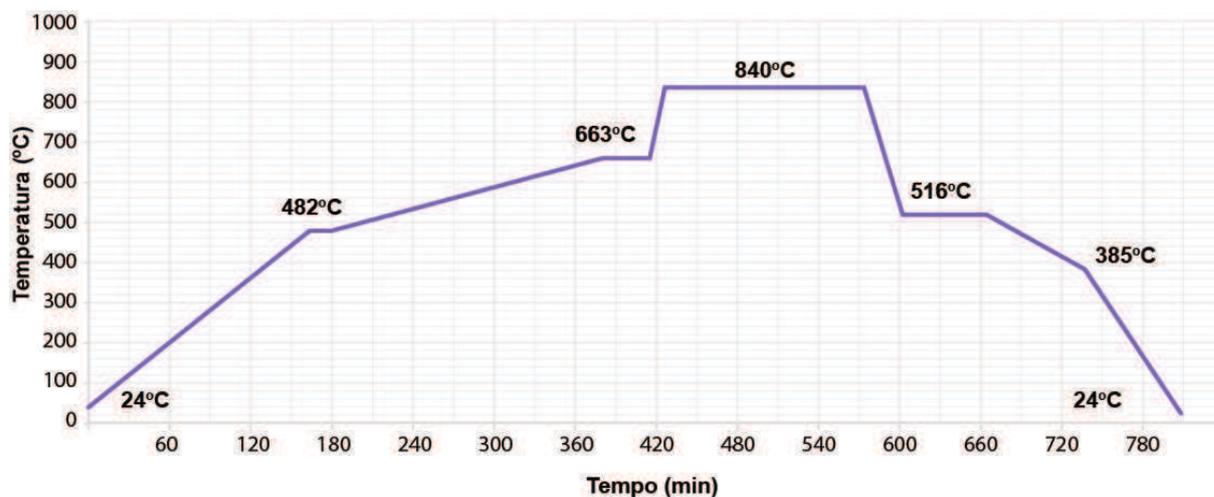


Figura 38 – Tratamento Térmico TT1 - C (acervo do autor, 2019).

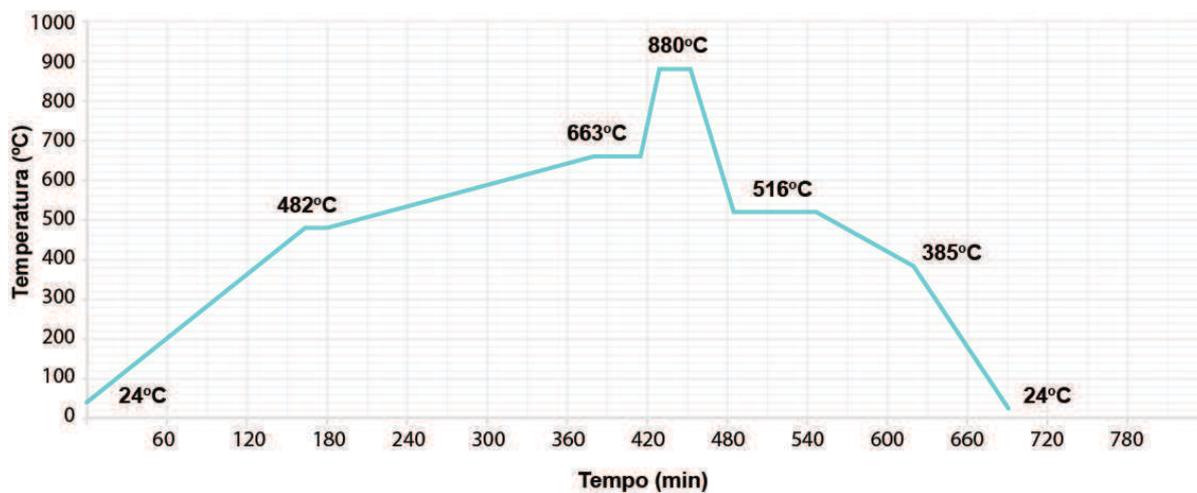


Figura 39 – Tratamento Térmico TT2 - A (acervo do autor, 2019).

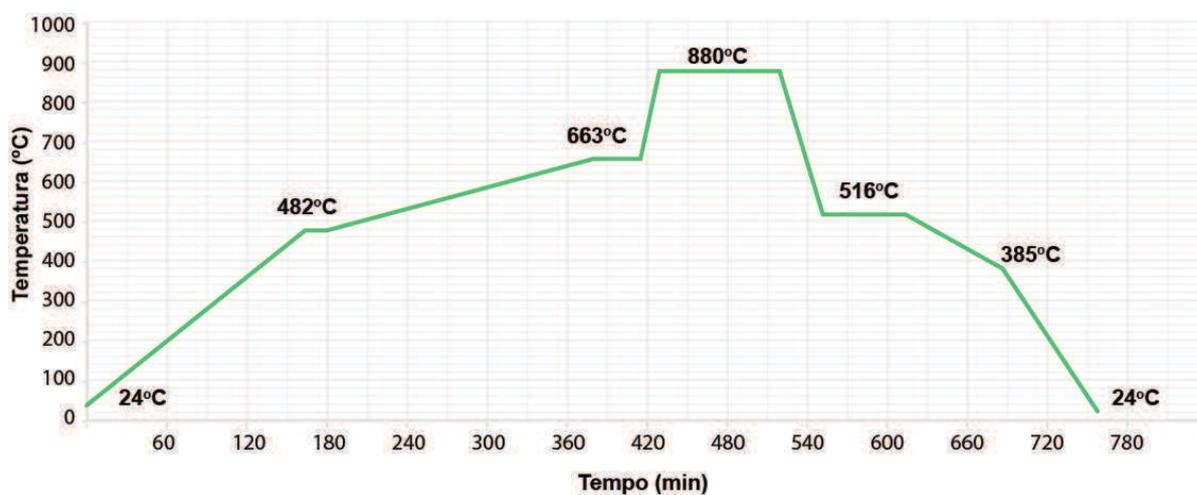


Figura 40 – Tratamento Térmico TT2 - B (acervo do autor, 2019).

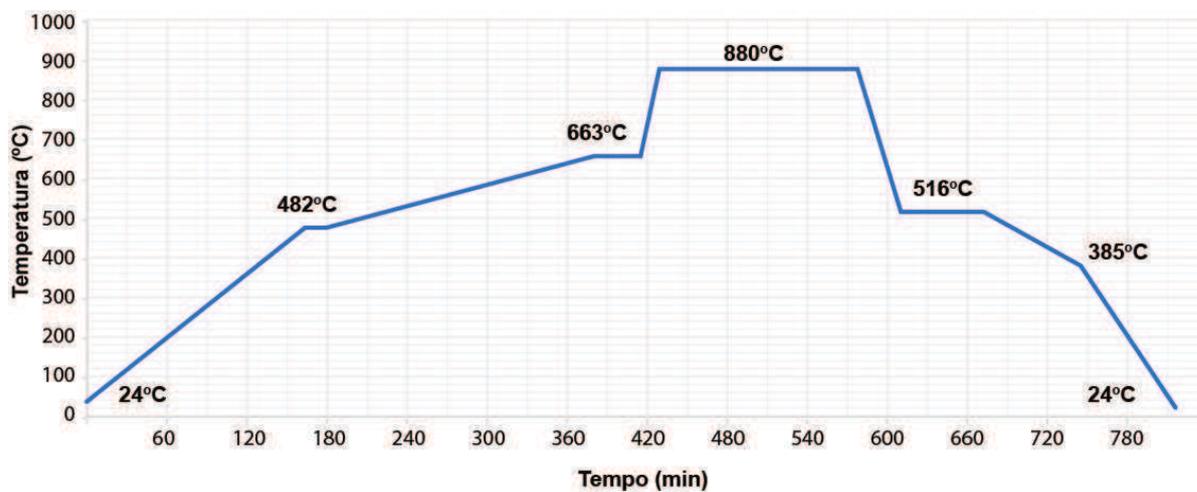


Figura 41 – Tratamento Térmico TT2 - C (acervo do autor, 2019).

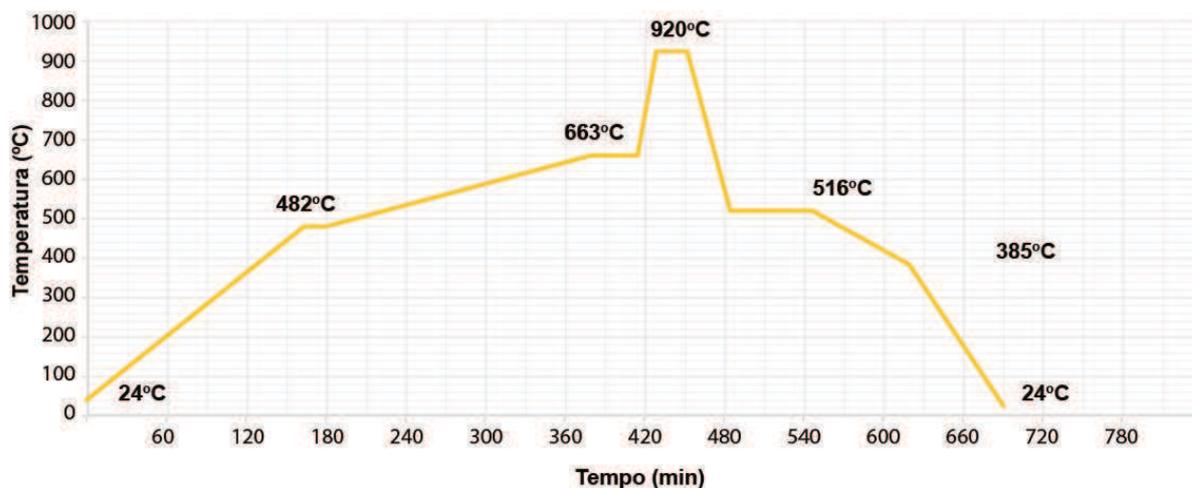


Figura 42 – Tratamento Térmico TT3 - A (acervo do autor, 2019).

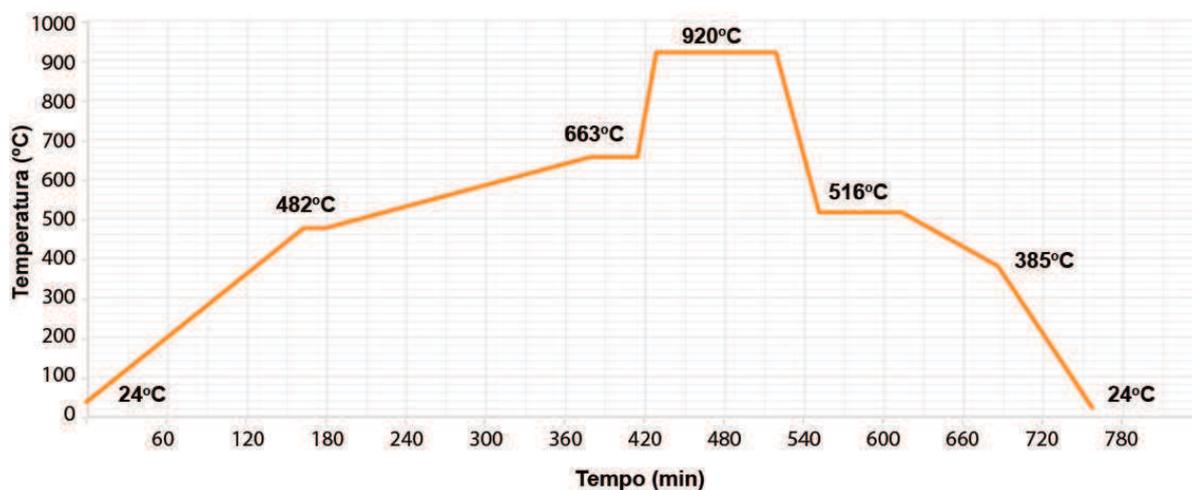


Figura 43 – Tratamento Térmico TT3 - B (acervo do autor, 2019).

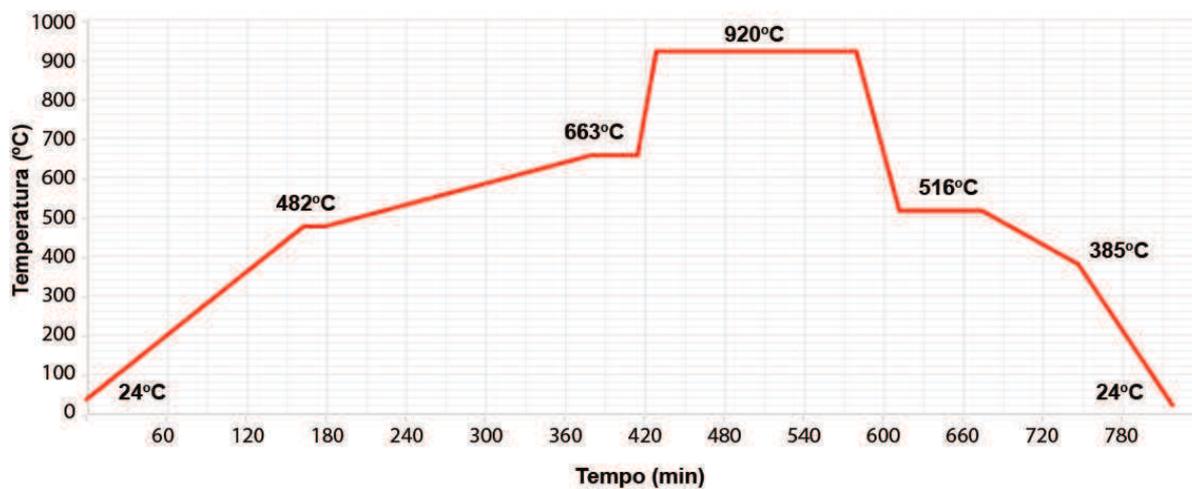


Figura 44 – Tratamento Térmico TT3 - C (acervo do autor, 2019).

3.2.6 Caracterização Físico Mecânica dos Elementos Vazados

3.2.6.1 Difração por Raios X

A caracterização por Difractometria de Raios-X foi obtida através do difratômetro de raios-X Bruker, D2Phaser e realizada no Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LabSMaC). Foi utilizada a fonte de radiação monocromática Cu-K α de $\lambda = 1,5418$, com tensão de 40 Kv e uma corrente de 30 mA. As medidas varreram a faixa entre 5° e 80° (2 θ) com fendas 1 (fendas de divergência: DS): 1 (fendas de espalhamento: SS): 0,3 (fendas de recepção: RS); modulo tempo fixo (fixed time), com passo de 0,02° (2 θ) e tempo de contagem de 0,6 segundos por passo. Para identificação das fases utilizou-se o software DIFFRAC.EVA, que fornece uma coleção completa dos melhores algoritmos para análise de dados por XRD (difração de raios X), com acesso total a todos os parâmetros de funções. O EVA realiza pesquisa simultânea em várias bases de dados de referência, tais como ICDD PDF2/PDF4+/PDF4 Minerais/PDF4 Base de Dados de Orgânicos. Foram analisadas amostras dos materiais obtidos através do tratamento térmico feitos a partir da composição de vidro escolhida.

3.2.6.2 Microscopias

Análises Microscópicas do tipo ótica e eletrônica de varredura foram realizadas nos elementos vazados obtidos através dos tratamentos térmicos escolhidos.

3.2.6.2.1 Microscopia Óptica

A técnica de MO, foi realizada em um Microscópio OLYMPUS BX51 e variação de 100X-1000X, acoplado a uma estação de Análise de Imagens. Tal análise foi realizada no Lab.Micros – Laboratório de Microscopia - da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. A microscopia Óptica foi realizada nas amostras de vidro obtidas após os processos de tratamentos térmicos nos elementos vazados.

3.2.6.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizada para investigar o efeito da fusão do vidro e suas características superficiais após os tratamentos térmicos dos elementos vazados. As amostras de TT1-B, TT2-B e TT3-B foram revestidas por pulverização catódica com uma fina camada de ouro e depois analisadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura Superscan SSX-550, Shimadzu, a uma voltagem de aceleração de 15 kV. As micrografias foram obtidas no Laboratório de Caracterização de Materiais - da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

3.2.6.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado a fim de verificar, principalmente, qual a carga máxima suportada por um elemento vazado durante a compressão. Seguindo, desta maneira, a NBR 14899-1 (Blocos de Vidro para a construção Civil. Parte 1: Definição, requisitos e métodos de ensaios). Foram seguidas todas as normas de ensaio e elaborados 3 elementos vazados de cada um dos 3 tratamentos térmicos escolhidos e estes foram submetidos aos testes. Para tal foi utilizada uma máquina universal de ensaios, Shimadzu AG-IS 100 kN, equipada com uma célula de carga de 100 kN. A velocidade de compressão foi fixada em $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Os testes foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 BENEFICIAMENTOS

4.1.1 Resíduos Vítreos

Os aspectos visuais dos resíduos vítreos beneficiados podem ser observados na Figura 45, onde todos possuem brilho e transparência e superfície com quinas cortantes. VA-26 e VB-26 possuem dimensões menores ou iguais a 0,7mm, VA-8 e VB-8 entre 0,7mm e 2,36mm e VA-4 e VB-4 entre 2,36mm e 4,76mm.

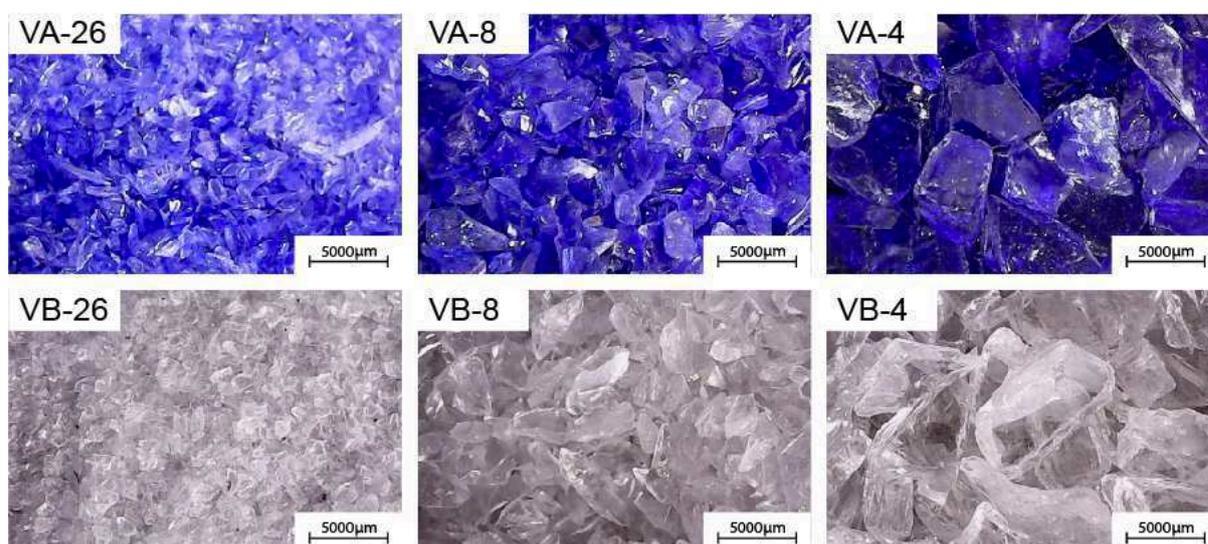


Figura 45 – Micrografias do Resíduo vítreo beneficiado, triturado e peneirado (acervo do autor, 2019).

Após beneficiados, os resíduos foram misturados em diferentes granulometrias e proporções de cores até se obter a proporção e tamanho adequado para o trabalho.

4.1.2 Areias

A areia de rio (Figura 46 - a) foi peneirada em peneira #26. Nos resíduos retidos (Figura 46 – b) verifica-se a presença de elementos de medidas entre 2 e 10 mm, pedaços de folhas secas e pequenos animais, ainda vivos. Estes resíduos retidos foram descartados. Os grãos de areia que passaram na peneira #26 foram o foco de estudo desta pesquisa.

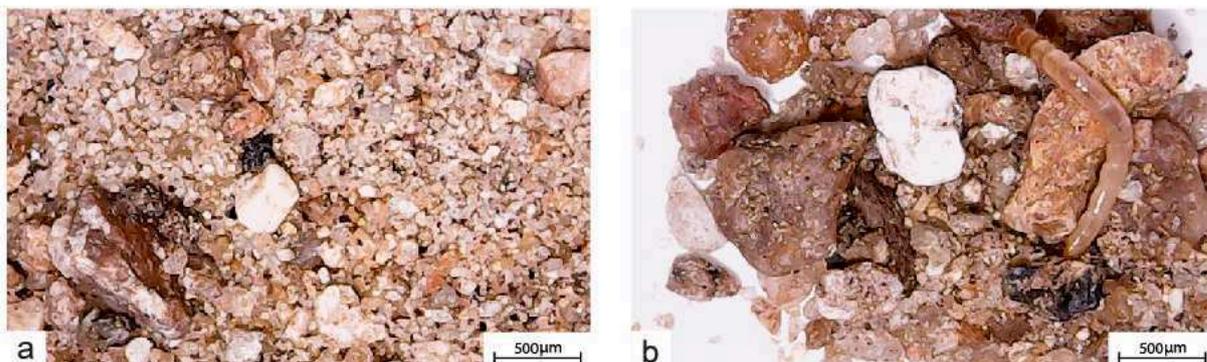


Figura 46 – Micrografia da areia de rio (a) Material retido da areia de rio na peneira (b) (acervo do autor, 2019).

A areia de mar (Figura 47 - a) foi peneirada em peneira #26. Nos resíduos (Figura 47 - b) verifica-se a presença de algas, pedaços de madeiras secas e grãos de areia maiores que 0,7 mm. Estes resíduos retidos foram descartados. Os grãos de areia que passaram na peneira #26 foram o foco de estudo desta pesquisa.

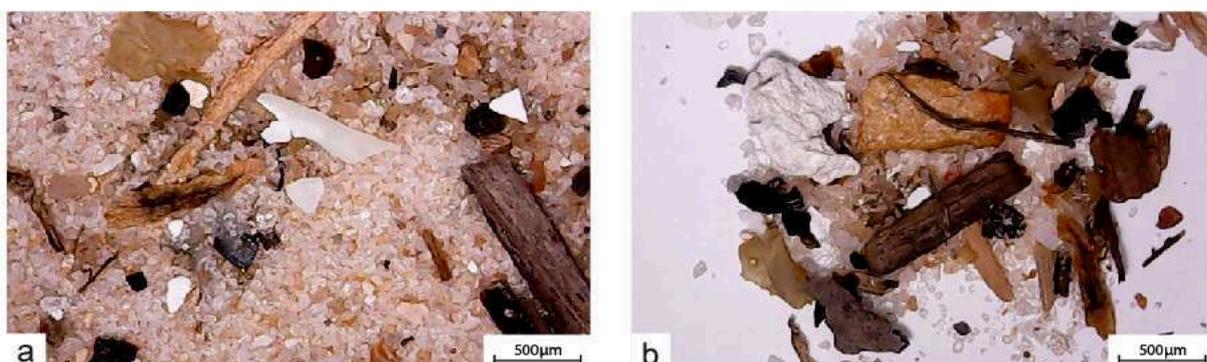


Figura 47 – Micrografia da areia de mar (a) Material retido da areia de mar na peneira (b) (acervo do autor, 2019).

4.2 CARACTERIZAÇÕES

As matérias primas e composições vítreas foram caracterizadas com o objetivo de adquirir maiores conhecimentos sobre as mesmas.

4.2.1 Caracterizações das Matérias Primas

As matérias primas dos moldes foram caracterizadas pelas técnicas de Fluorescência de Raios X e Microscopia Óptica, a fim de verificar a composição químicas e suas características visuais.

4.2.1.1 Composição Química

A Figura 48 apresenta a composição química do gesso, do caulim, da sílica, das areias de mar e de rio, e das amostras de vidro branco (incolor) e vidro azul.

Os resultados da amostra de gesso apresentam que o mesmo é composto por aproximadamente 43% de óxido sulfúrico (SO_3) e 35% de óxido de cálcio (CaO), corroborando os resultados obtidos por Barbosa (2014). A análise da amostra de caulim aponta que o mesmo é composto por 63% de dióxido de silício (SiO_2) e 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3), o que corrobora os resultados obtidos por Bragança (2007). Os resultados da amostra de sílica fina pura indicam que a mesma é composta 99% de dióxido de silício (SiO_2). Tal informação confirma os resultados obtidos por Della (2006).

A análise da amostra de areia do mar e de areia de rio mostraram que as duas possuem 83% e 77%, respectivamente de dióxido de silício (SiO_2). A areia de mar apresentou aproximadamente 10% de Óxido de Cálcio (CaO) e 3,3% óxido de alumínio (Al_2O_3), e a areia de rio apresentou aproximadamente 13% de óxido de alumínio (Al_2O_3), 3,8% de óxido de potássio (K_2O), 1,55% de óxido de ferro (Fe_2O_3), 1,14% de óxido de cálcio (CaO) e 1 % de óxido de sódio (Na_2O). Observa-se, portanto, que as duas areias estudadas possuem grande potencial, do ponto de vista da composição química, para substituir a sílica fina pura na mistura para moldes de gesso/sílica para vidro recomendada por Schuartz, (2002). Deixando assim a produção de moldes mais econômica e menos prejudicial à saúde.

Os resultados das amostras de vidro branco (transparente) e vidro azul mostram que elas possuem aproximadamente 67% e 65%, respectivamente de dióxido de silício (SiO_2), 9,25% e 7,12% de óxido de sódio (Na_2O) e 7,85% e 8,01% de óxido de cálcio (CaO), classificando-os como vidros do tipo sílica-soda-cal. No vidro azul observa-se a presença de 0,15% de óxido de cobalto (CoO).

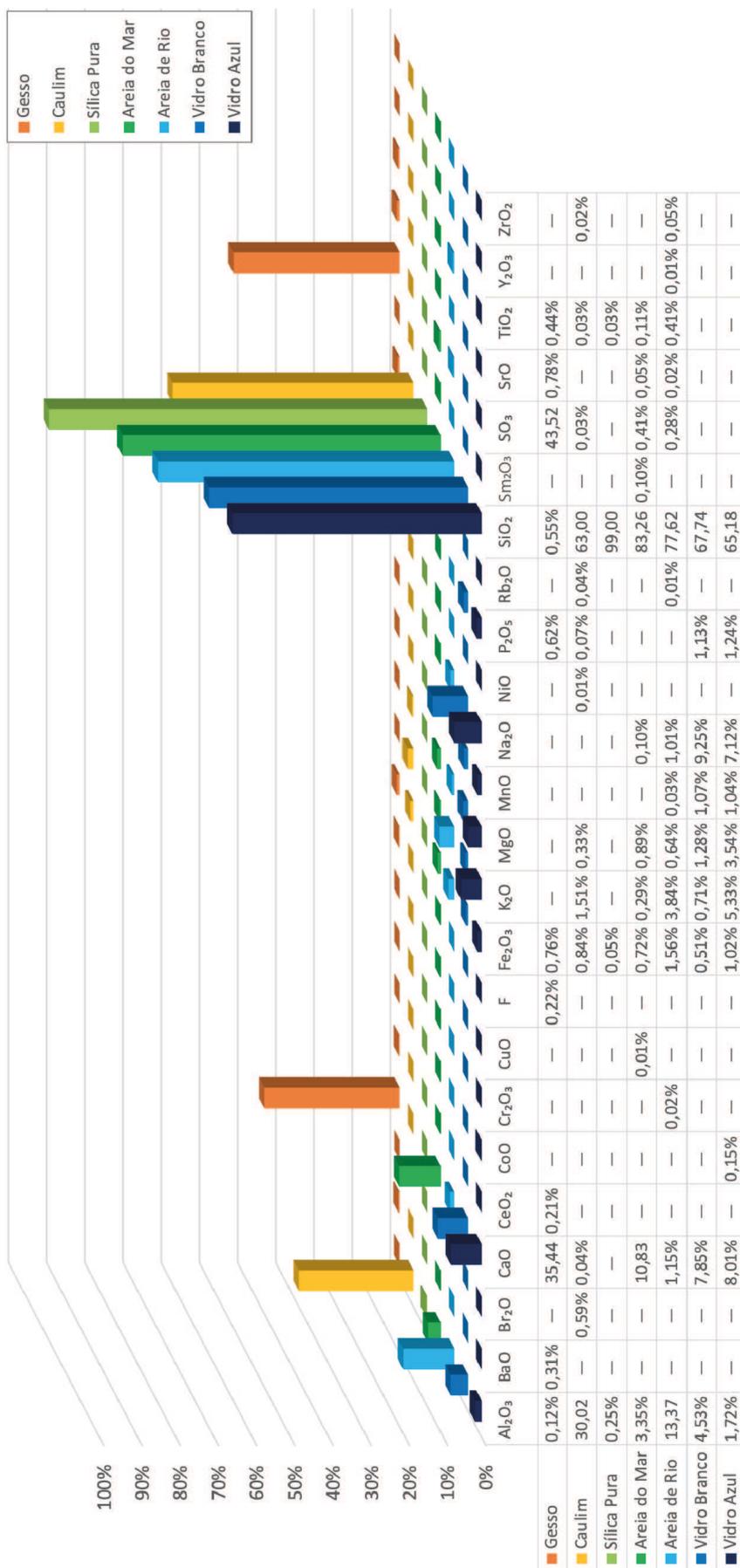


Figura 48- Composição Química das amostras (acervo do autor, 2019).

4.2.1.2 Aspectos Visuais

As micrografias a seguir exibem os aspectos visuais das amostras de gesso, sílica fina pura e areias de rio e mar em duas ampliações distintas.

O Gesso apresentou partículas brancas, homogêneas e minúsculas, praticamente imperceptíveis a olho nu, no entanto, podem ser vistos pequenos sinais de impurezas, destacados em vermelho (Figura 49 – a) e pouca variação de tamanho e aparência (Figura 49 – b).

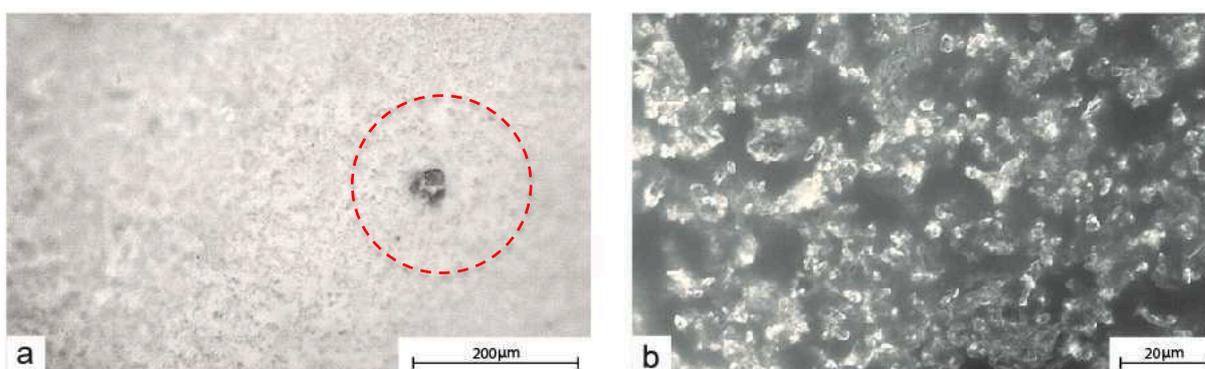


Figura 49 – Micrografia do Gesso (a) 200 μm e (b) 20 μm (Acervo do autor, 2019).

A Sílica fina pura apresentou partículas brancas, homogêneas, minúsculas e brilhosas, sem quase variação de seu tamanho e aparência (Figura 50).

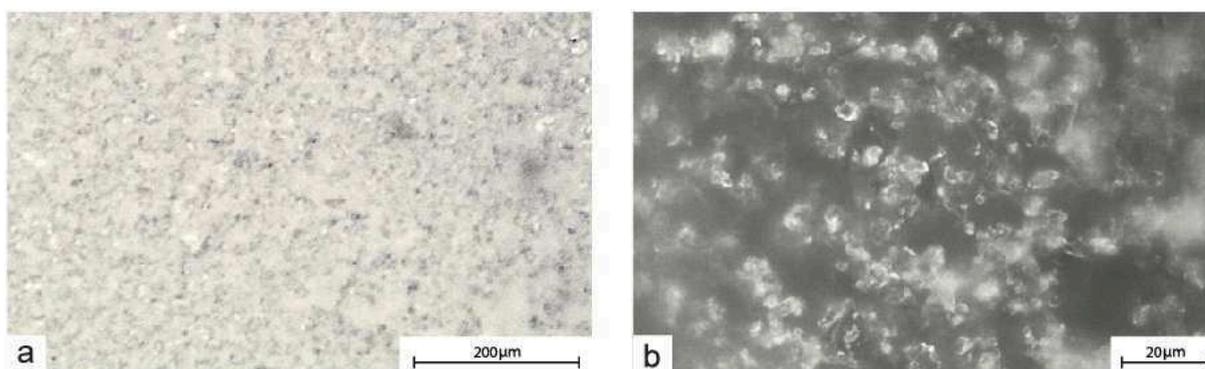


Figura 50 – Micrografia da Sílica fina pura (a) 200 μm e (b) 20 μm (Acervo do autor, 2019).

A Areia de rio apresentou grãos perceptíveis a olho nu com grande variação de coloração, formato, tamanho e transparência, além de alguns sinais de impureza, destacados em azul (Figura 51).

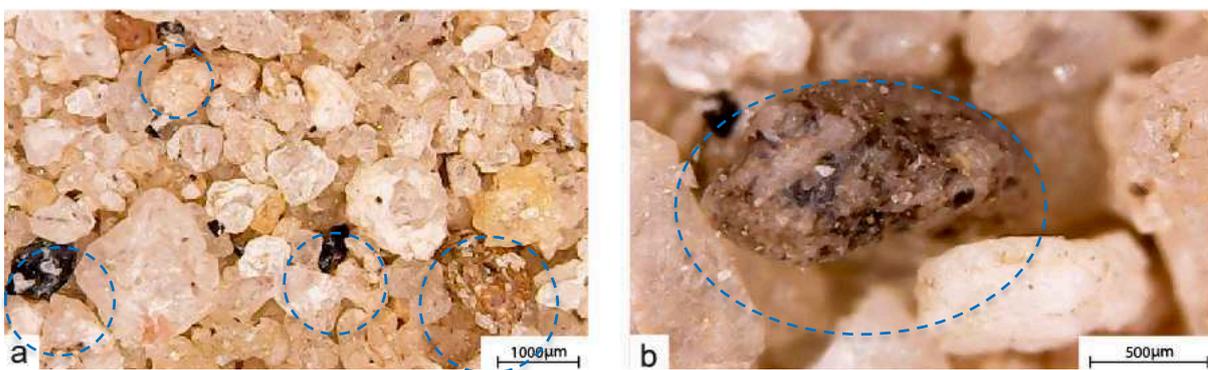


Figura 51 – Micrografia da areia de rio (a)1000 µm e (b) 500 µm (Acervo do autor, 2019).

A areia de mar mostrou grãos perceptíveis a olho nu. Também podem ser vistos alguns sinais de impurezas, destacados em vermelho, com variação de coloração, formato, tamanho e transparência (Figura 52).

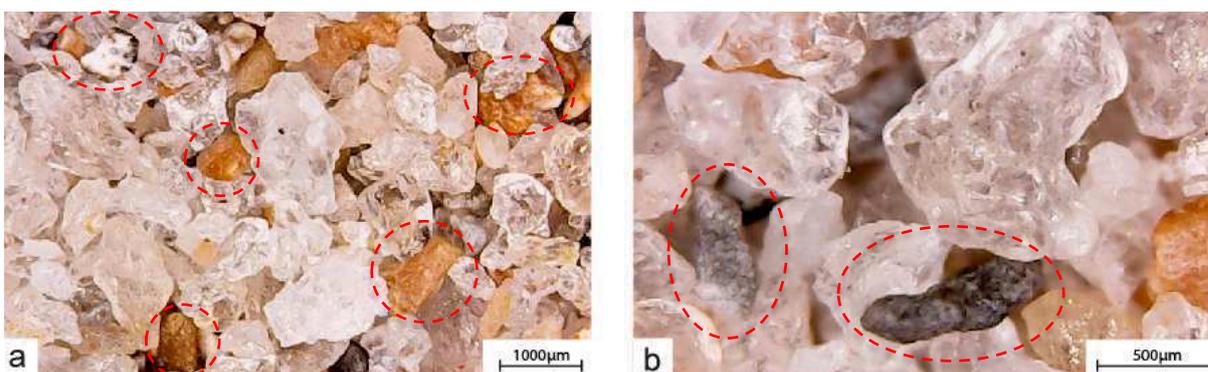


Figura 52 – Micrografia da areia de mar (A)1000 µm e (B) 500 µm (Acervo do autor, 2019).

Ao comparar a areia de Rio com a de Mar, verifica-se que a de mar possui partículas mais transparentes com menor variação de tamanho e menor quantidade de impurezas.

4.2.1.3 Características Estruturais dos Resíduos Vítreos

O difratograma de raios X das amostras de vidro branco e vidro azul (**VB**, **VA**) estão apresentados na Figura 53. Uma banda próxima ao $2\theta = 25$, com maior intensidade em **VA**, sem indicação de picos de difração pode ser observada nas duas amostras, confirmando a natureza amorfa das mesmas.

Mesmo sem a presença de picos cristalinos evidentes, foi encontrada em **VB** a presença de Tridimite hexagonal (T) que também faz parte da classe dos silicatos,

do grupo tectossilicato e subgrupo grupo do Quartzo e sua classe cristalográfica é do tipo biesfenoédrica rômica. Seu pico principal ocorre no $2\theta = 30,0$ e secundário no $2\theta = 22,5$, (PDF 01-071-0261). Ocorre apenas em rochas magmáticas efusivas, ácidas, de alta temperatura (riólitos, obsidianas, traquitos, andesitos e dacitos). Geralmente forma-se pela devitrificação de vidro vulcânico, como obsidiana. Mineral estável entre $870^{\circ}\text{C} - 1.470^{\circ}\text{C}$ e funde a 1.670°C .

Mesmo sem a presença de picos evidentes, foi encontrada em **VA** a presença da Tridimite hexagonal (T) e da Coesita monoclinica (C), fazendo, esta ultima, parte da classe dos silicatos, do grupo tectossilicato e subgrupo grupo do Quartzo, e cuja classe cristalográfica é prismática e seu pico principal ocorre no $2\theta = 28,5$ (PDF 01-083-1828). Trata-se de um mineral formado em pressões que excedem 20 kbar, finamente granulado intercrescido com quartzo e sílica amorfa (vidro) resultado de metamorfismo por impacto e tectitos. É um mineral primário em xenólitos com cianita-granada-clinopiroxênio em kimberlitos, e intercrescido com quartzo como inclusões em granada e clinopiroxênio em eclogitos (terrenos metamórficos de alto grau).

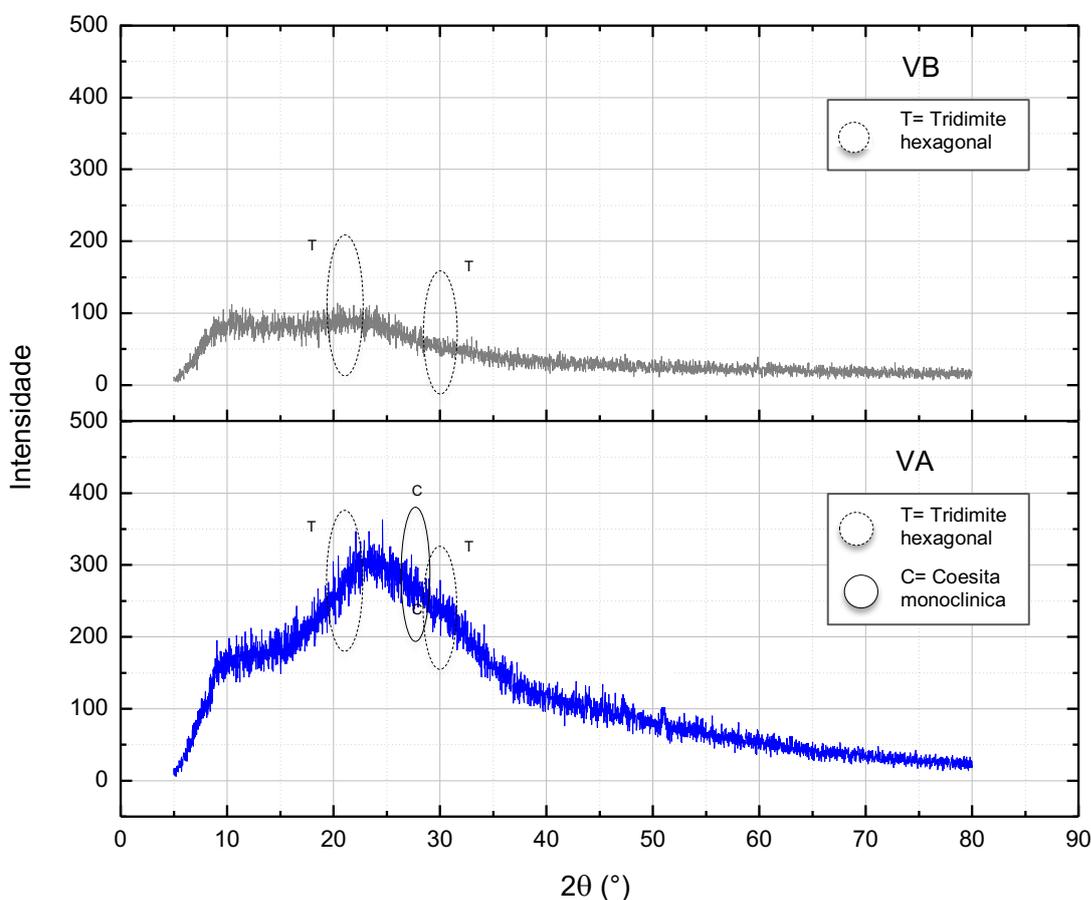


Figura 53 – Estrutura dos resíduos vítreos (acervo do autor, 2019).

Os picos cristalinos referentes à Tridimite hexagonal (T) e Coesita monoclinica (C) estão presentes nas amostras devido à alta temperatura de obtenção do vidro (cerca de 1650°C), antes do mesmo se tornar resíduo vítreo.

4.2.2 Caracterizações das Composições Vítreas

4.2.2.1 Características Visuais

Na Figura 54 pode-se observar a mistura dos vidros branco e azul e diferentes granulometrias e proporções de cores. Todas as amostras nomeadas VB9A1 foram compostas por 90% de sua massa de vidro branco e 10% de vidro azul. As amostras iniciadas em VB7A3 foram compostas por 70% de vidro branco e 30% de vidro azul. As amostras iniciadas em VB5A5 foram compostas por 50% de vidro branco e 50% de vidro azul.

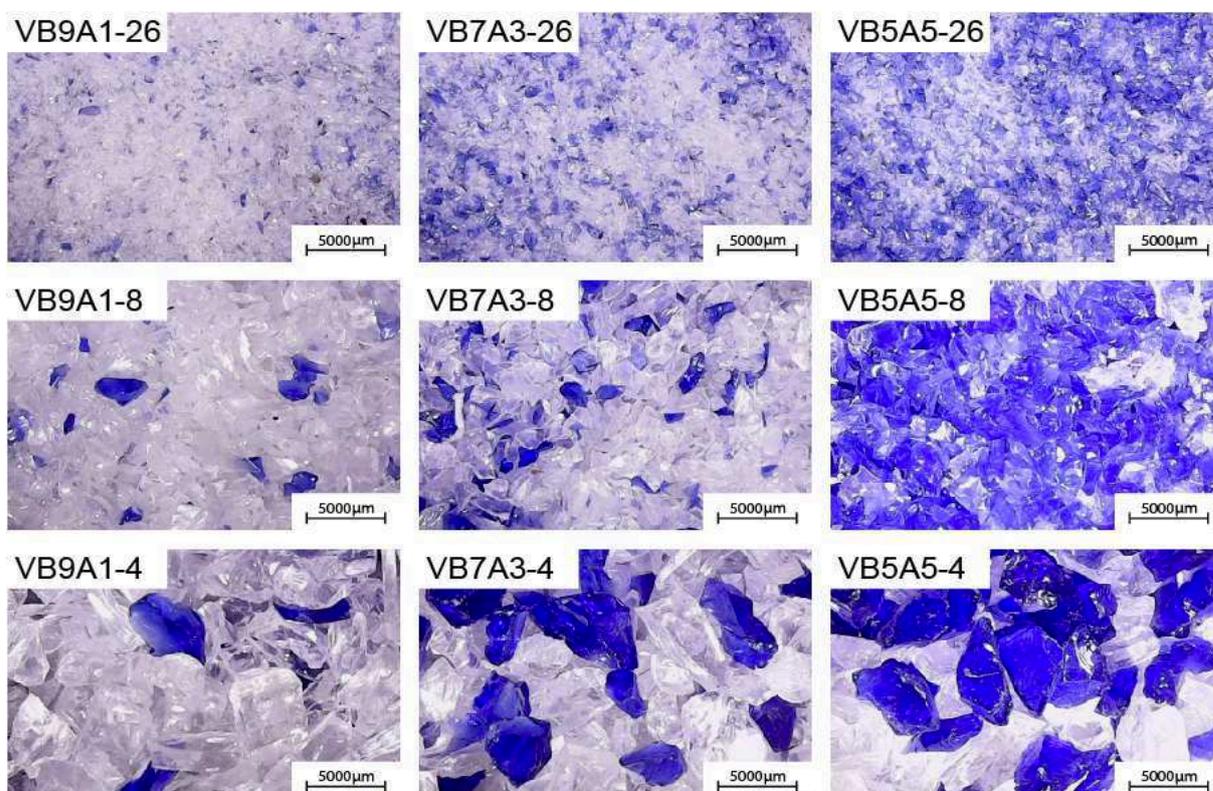


Figura 54 – Micrografias do estudo de tamanho do grão e proporção entre cores (acervo do autor, 2019).

As amostras da primeira linha (VB9A1-26, VB7A3-26 e VB5A5-26) foram elaboradas com vidros com dimensões menores ou iguais a 0,7mm. As da linha do

meio (VB9A1-8, VB7A3-8 e VB5A5-8) foram elaboradas utilizando os grãos com dimensões entre 0,7mm e 2,36. As amostras da última linha (VB9A1-4, VB7A3-4 e VB5A5-4) foram elaboradas utilizando os grãos com dimensões entre 2,36mm e 4,76mm.

Era desejado obter um acabamento com mistura heterogênea das duas cores de vidro, garantindo assim um maior contraste, por este motivo, todas as combinações com tamanhos de grãos menores ou iguais a 0,7mm geraram misturas entre as cores pouco heterogêneas e não foram escolhidas.

As combinações de 50% de vidro branco e 50% de vidro azul (VB5A5-26, VB5A5-8 e VB5A5-4) apresentaram colorações muito escuras, devido à predominância de coloração azul e foram descartadas.

Como foco de estudo deste trabalho, optou-se pela composição **VB9A1-4** (Figura 55), que apresentou maior heterogeneidade entre as cores. A proporção da mistura escolhida foi de 10% de vidro azul e 90% de vidro branco e dimensões dos resíduos que passaram pela peneira #4 e foram retidas na peneira #8, mantendo grãos entre 2,36mm e 4,76mm. Os resíduos obtidos a partir das peneiras #26 e #8 foram armazenados para pesquisas posteriores.



Figura 55 – Micrografia da formulação de resíduos vítreos branco e azul (VB9A1-4) (acervo do autor, 2019).

4.2.2.2 Características Estruturais

O difratograma de raios X da amostra de VB9A1 está apresentado na Figura 56. Uma banda próxima ao $2\theta = 25$ sem indicação de picos de difração evidentes pode ser observada, confirmando a natureza amorfa da mesma.

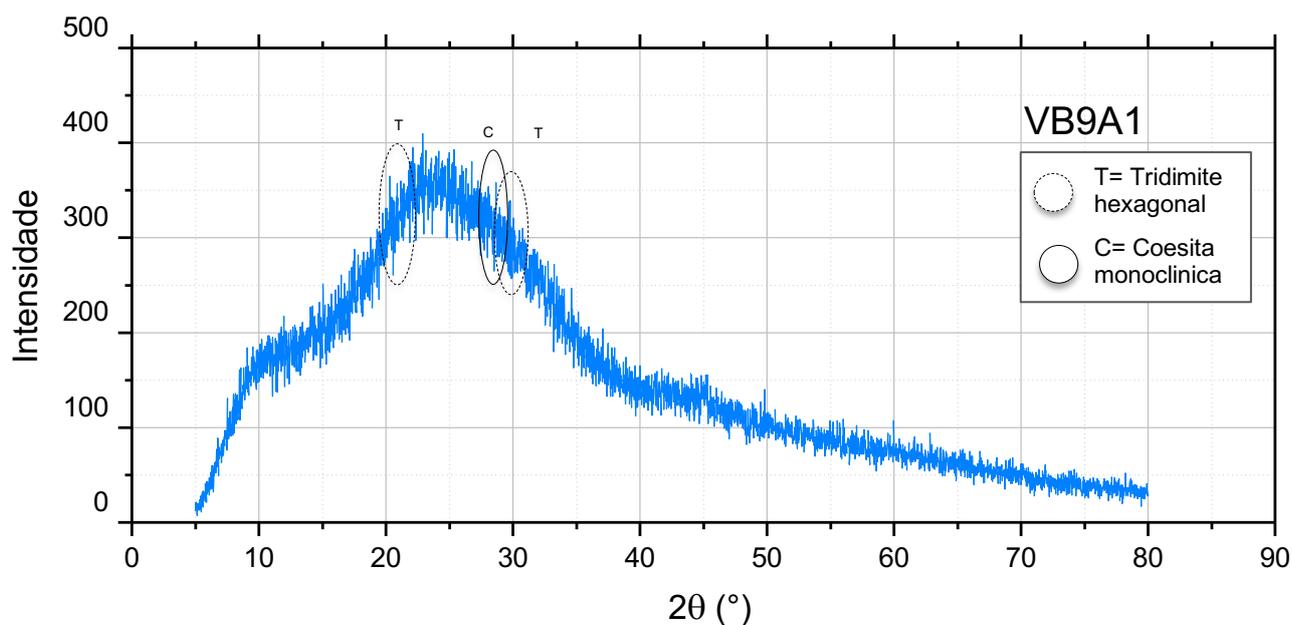


Figura 56 – Difratograma de Raios X da amostra VB9A1 (acervo do autor, 2019).

Mesmo sem a presença de picos evidentes, foram encontradas diferentes fases cristalinas do Quartzo, como é o caso da Tridimite hexagonal (T) com pico principal no $2\theta = 30,0$ e secundário no $2\theta = 22,5$, (PDF 01-071-0261). E da Coesita monoclinica (C), com pico principal no $2\theta = 28,5$ (PDF 01-083-1828).

4.3 COMPOSIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MOLDES

4.3.1 Composição para Moldes e Tratamento Térmico

Como pode ser observado na Figura 57, os corpos de prova foram conformados em um formato cilíndrico e ficaram secando sobre uma base para serem encaminhados ao tratamento térmico e ensaio de compressão simples.



Figura 57 - Corpos de prova secando sobre base (acervo do autor, 2019).

A Figura 58 mostra alguns dos corpos de prova no interior do forno para o tratamento térmico inicial.



Figura 58 - Corpos de prova no interior do forno (acervo do autor, 2019).

4.3.2 Caracterização dos Moldes

4.3.2.1 Perda de Massa

Verificou-se que nas amostras MR-TTi e MM-TTi ocorreu a perda de aproximadamente 25% da sua massa, comparadas a MR e MM, referente à água evaporada durante o processo de Tratamento Térmico inicial. Nas amostras MS-TTi observou-se uma perda de aproximadamente 40% da sua massa quando comparada

a MS, também reverente à água evaporada durante o processo de tratamento térmico inicial.

4.3.2.2 Aspectos Visuais

Após o tratamento térmico inicial, todas as amostras apresentaram aparência mais esbranquiçada do que antes do TTi. As amostras de MR-TTi obtiveram uma coloração mais clara e levemente avermelhada do que antes do tratamento térmico, devido à maior presença de Óxido de Ferro (Figura 59).

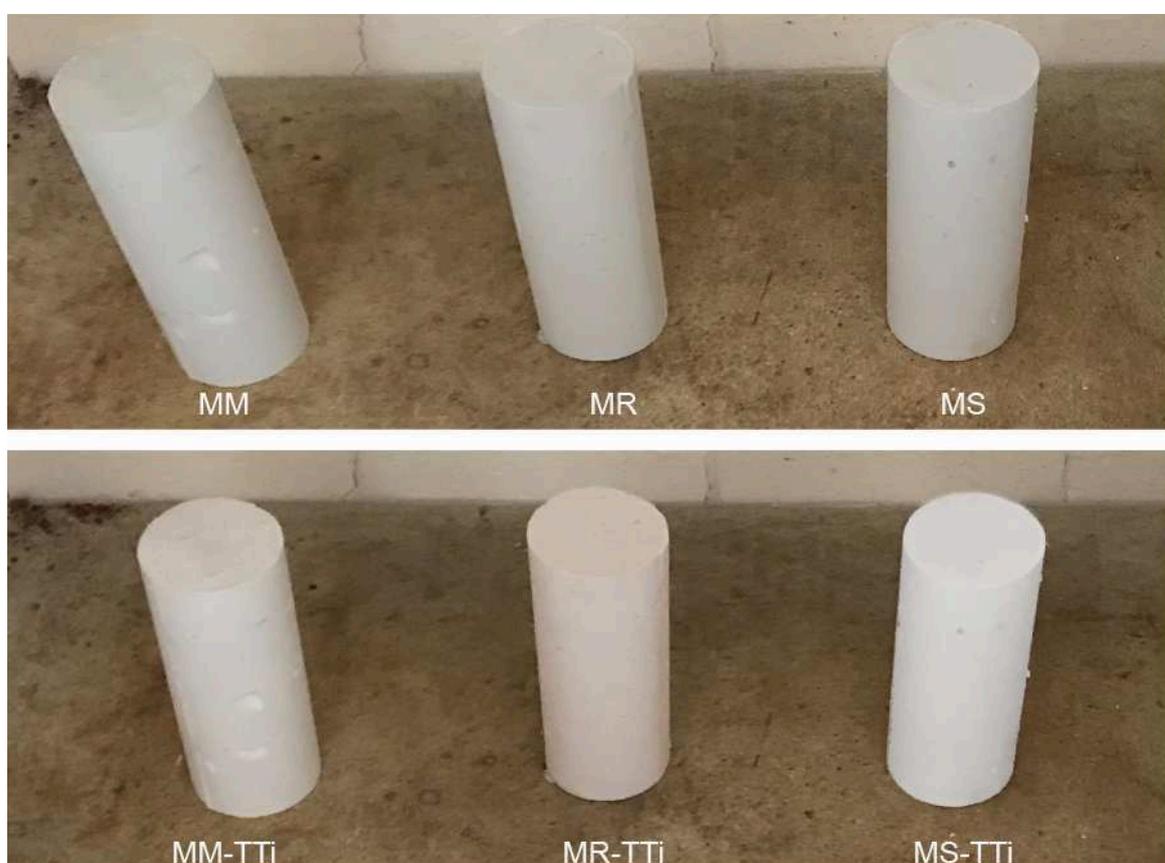


Figura 59 – Corpos de prova antes do TTi (topo) e após o TTi (base) (Acervo do autor, 2019).

4.3.2.3 Propriedades Mecânicas

Foram submetidas ao ensaio um total de 60 amostras. Sendo 10 do tipo MR, 10 MM, 10 MS, 10 MR-TTi, 10 MM-TTi e 10 do tipo MS-TTi.

Quanto aos resultados de resistência à compressão, os corpos de prova obtidos com a composição MR resistiam aproximadamente 1,7 MPa e passaram a resistir 0,52 MPa, perdendo aproximadamente 70% da sua resistência. Os obtidos

com a composição MS resistiam aproximadamente 2,65 MPa e passaram a resistir 0,77 MPa, perdendo aproximadamente 70% da sua resistência. Os obtidos com a composição MM obtiveram a maior perda, quando comparado aos demais, pois resistiam até aproximadamente 1,52 MPa e passaram a resistir 0,24 MPa, perdendo aproximadamente 84% da sua resistência (Figura 60).

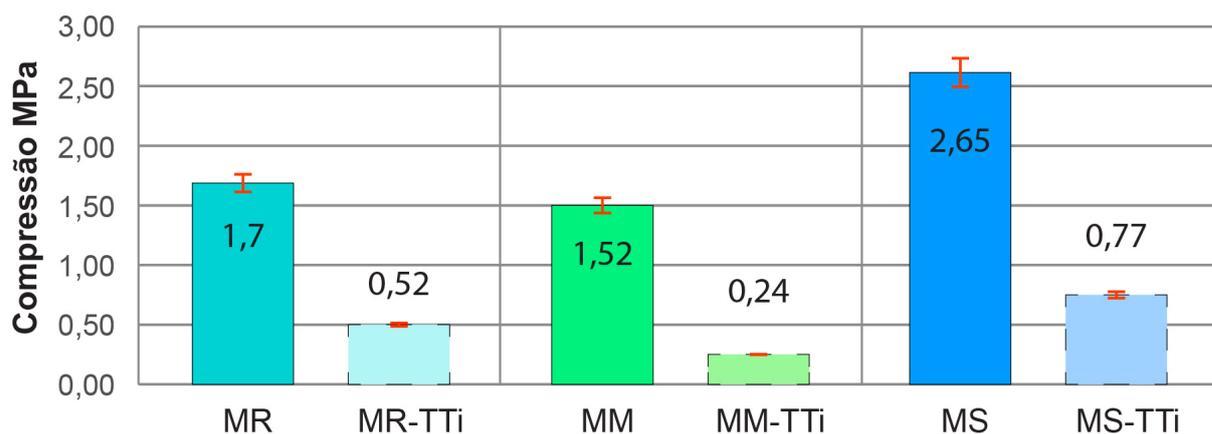


Figura 60 – Resultados obtidos no Teste de resistência à compressão simples nas amostras MR, MR-TTi, MM, MM-TTi, MS e MS-TTi (BRITO *et al*, 2019).

Verifica-se, portanto, que todas as amostras apresentaram diminuição na resistência após o tratamento térmico inicial (TTi), sendo este um resultado desejável, tendo em vista a maior facilidade durante o desmolde da peça a ser realizado após o tratamento térmico. A proporção de perda de resistência dos moldes feitos com areia de rio, foi similar aos resultados obtidos (70%) com os corpos de prova compostos por sílica fina pura.

Desta maneira observa-se a viabilidade, do ponto de vista mecânico da substituição da sílica fina pura por areia de rio e de mar no processo de desenvolvimento de moldes para fusão em vidro.

4.3.2.4 Microestrutura

Nas micrografias de MR e MT-TTi, com ampliações de 200x, 1000x e 2000x, as setas em vermelho representam a sílica e as em amarelo representam o gesso (Figura 61).

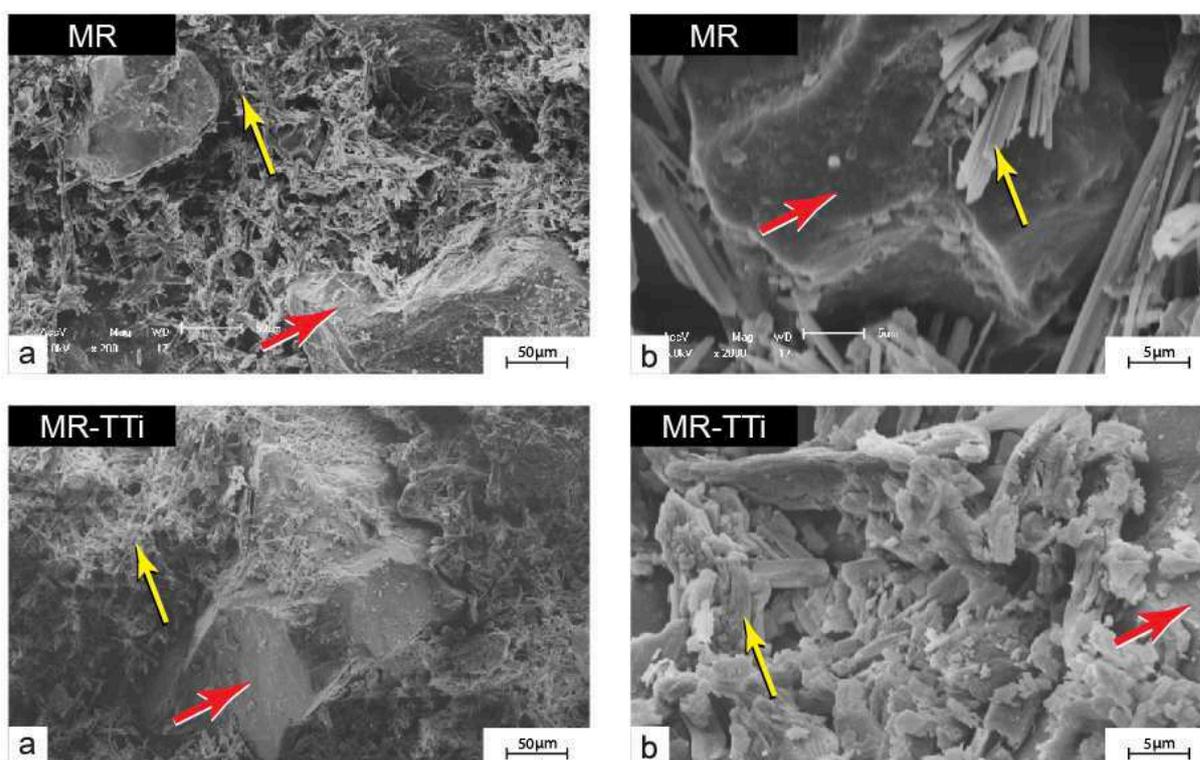


Figura 61 – Micrografia da Amostra de MR e MR-TTi (BRITO *et al*, 2019).

Na micrografia de MR podem ser verificadas que as “agulhas” de gesso (em amarelo) aderem às partículas de areia (em vermelho). Verifica-se também uma grande variação de tamanho das partículas, gerando uma maior miscigenação entre os demais elementos. Observa-se que após o tratamento térmico desta composição MR-TTi as “agulhas” de gesso encontram-se mais aderidas à superfície da sílica e encontram-se menos definidas do que antes do TTi.

Nas micrografias de MM e MM-TTi, com ampliações de 200x, 1000x e 2000x, as setas em vermelho representam a sílica e as em amarelo representam o gesso (Figura 62).

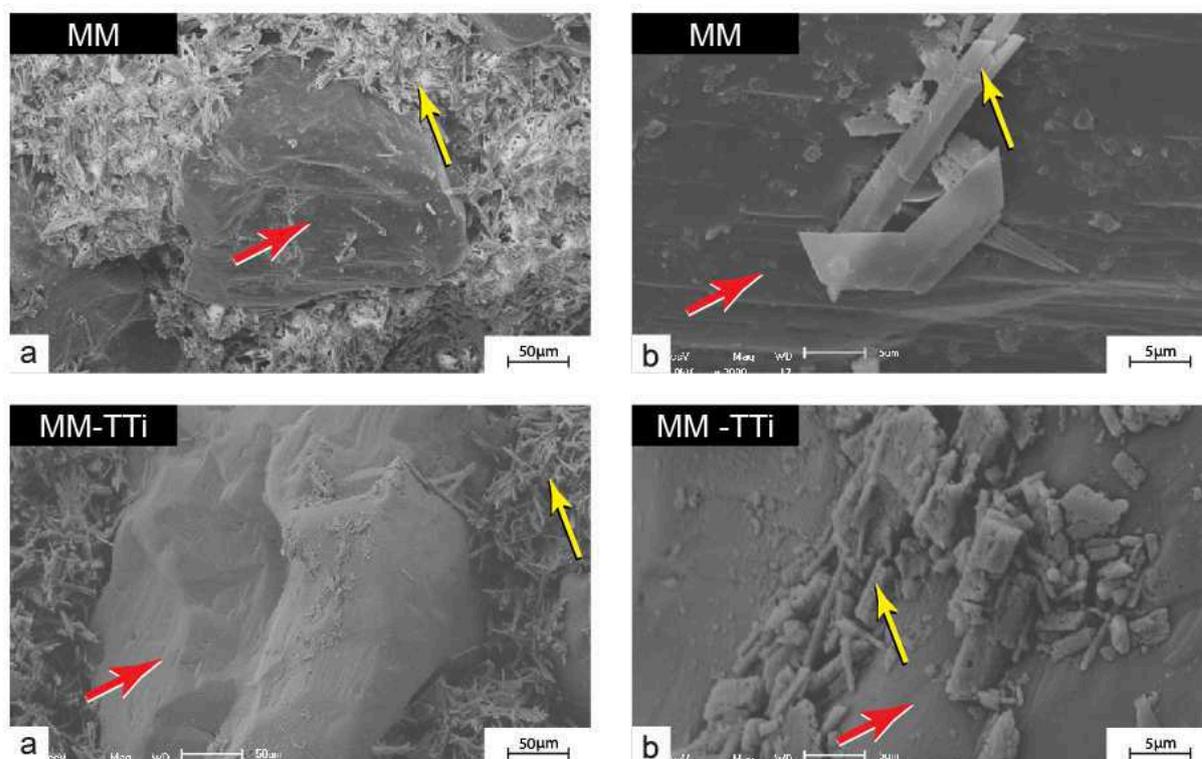


Figura 62 – Micrografia da Amostra de MM e MM-TTi (BRITO et al, 2019).

Verifica-se em MM que as “agulhas” de gesso (em amarelo) parecem estar depositadas sobre as partículas de areia de mar (em vermelho), mostrando uma grande disparidade entre o tamanho dela e o tamanho do gesso. Observa-se que após o tratamento térmico desta composição MM-TTi, as “agulhas” de gesso encontram-se mais aderidas à superfícies da sílica e encontram-se menos definidas do que antes do TTi.

Nas Micrografia de MS e MS-TTi, com ampliações de 200x, 1000x e 2000x, as setas em vermelho representam a sílica e as em amarelo representam o gesso (Figura 63).

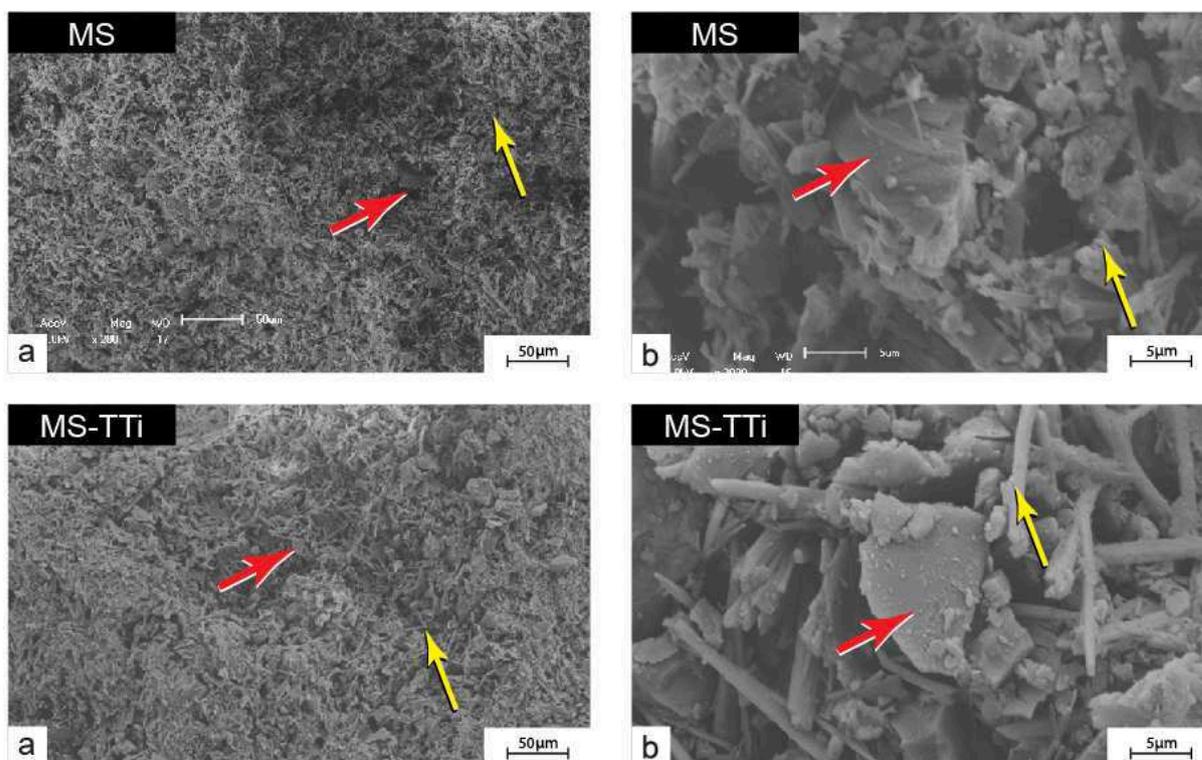


Figura 63 – Micrografia da Amostra de MS e MS-TTi (BRITO *et al*, 2019).

Observa-se que as “agulhas” de gesso (em amarelo) se misturam às partículas de sílica (em vermelho), devido à proximidade de tamanho entre elas. Após o tratamento térmico desta composição MS-TTi as “agulhas” de gesso encontram-se ainda mais definidas do que antes do TTi.

Do ponto de vista microestrutura, as duas areias mostraram-se eficazes para substituição da sílica fina pura neste projeto.

Através das propriedades mecânicas e microestruturais e da composição química de cada componente, verifica-se que MR e MM se mostraram eficazes para manufatura de moldes para fusão em forno para peças de vidro. Optou-se pelo uso da composição **MR** (com areia de rio), tendo em vista a facilidade de acesso e custo menos elevado para o seu transporte até o laboratório LASMAV (Laboratório de Síntese e Materiais Vítreos) da UFCG, localizado a cerca de 140km do litoral paraibano.

4.4 PROJETAÇÃO DOS MOLDES DOS ELEMENTOS VAZADOS

Esta etapa envolveu o Projeto de Design, a Modelagem Tridimensional do Elemento Vazado, a Geração da Geometria 3D, a Impressão Tridimensional da Matriz, a Obtenção do Contramolde em Silicone e a Preparação dos Moldes Finais.

4.4.1 Design do elemento vazado

Utilizando a Caixa Morfológica, uma técnica de geração de ideias, foram listadas diversas possibilidades de formas para as estruturas externas (Figura 64) e áreas internas vazadas (Figura 65). Foram estudadas formas com baixa complexidade e de fácil empilhamento, sendo elas a forma quadrada, retangular, triangular e hexagonal, facilitando, desta maneira, a paginação dos elementos vazados quando instalados em um ambiente. Cada forma foi catalogada com letras de (A) até (D).

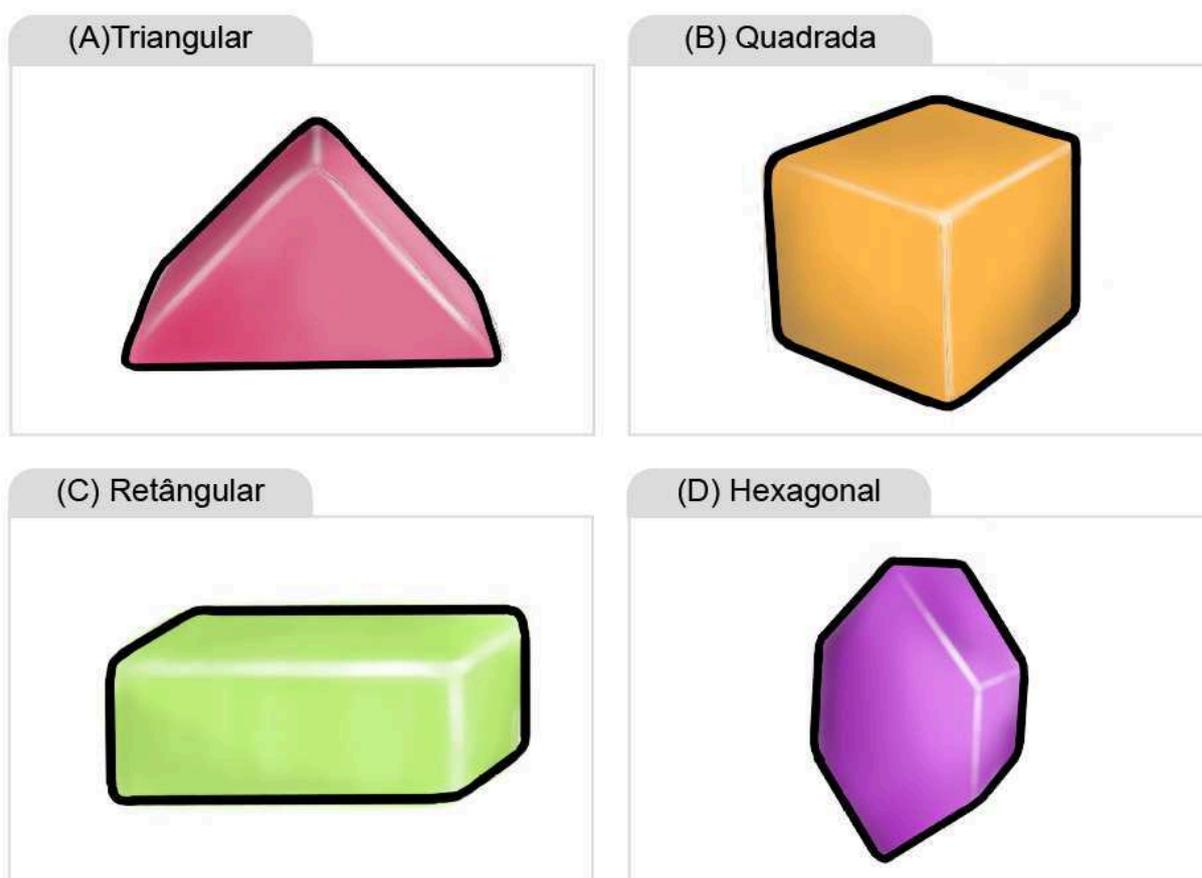


Figura 64 – Caixa Morfológica com formas externas (acervo do autor, 2019).

Para as partes internas foram escolhidas quatro formas básicas, que foram a forma circular, quadrada, retangular e triangular. Elas servirão para elaborar a forma dos espaços vazados que irão possibilitar a passagem de ar e luz. As formas internas foram catalogadas de (1) até (4).

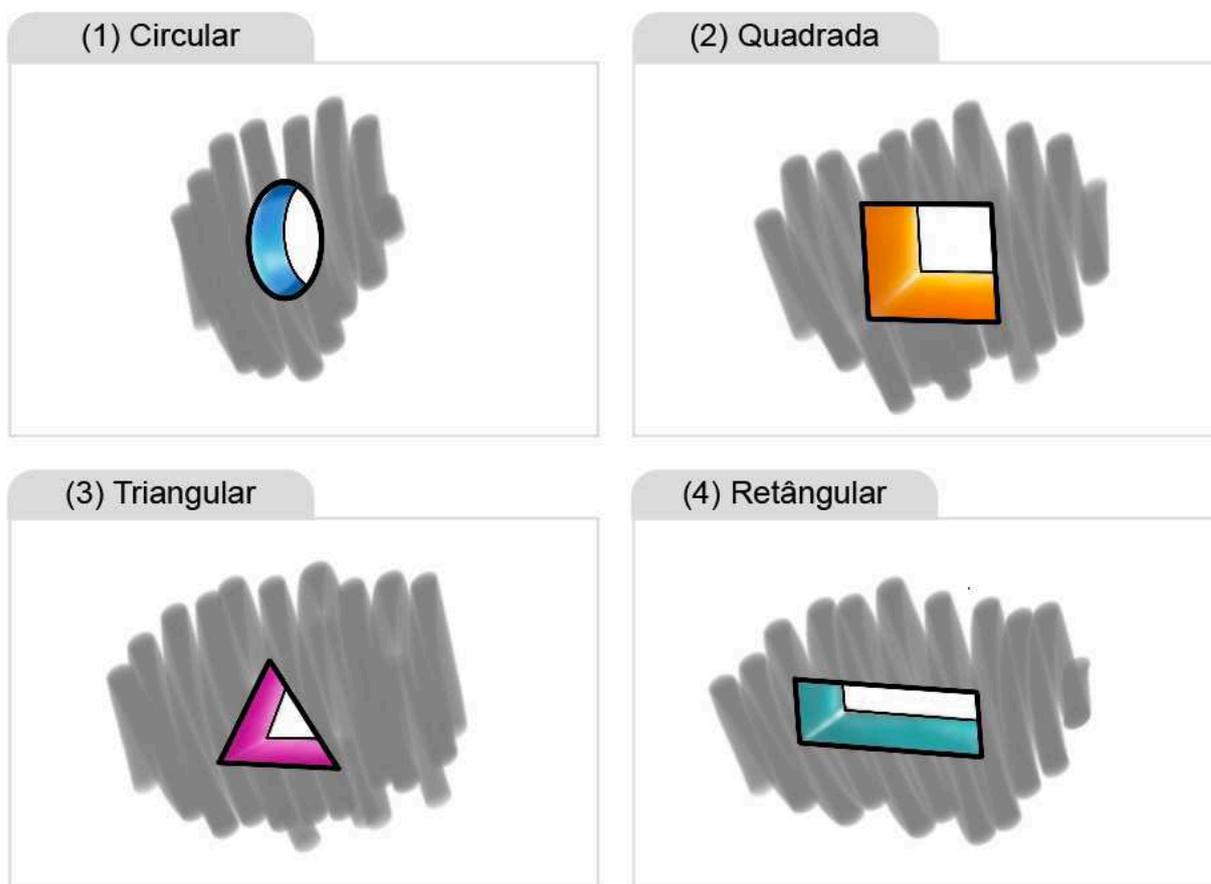


Figura 65 – Caixa Morfológica com formas internas (acervo do autor, 2019).

As formas externas e internas foram combinadas a fim de gerar novas soluções para elementos vazados para uso em projetos arquitetônicos. Todas as quatro opções de formatos externos (A, B, C e D) foram combinadas com as quatro outras opções para formatos internos (1, 2, 3 e 4), somando um total de 16 opções de ideias preliminares (Figura 66).

Dentre as opções elaboradas, foram escolhidas as combinações A3, B2, C4 e D1 (Figura 66). Visando obter mais opções destas configurações, e melhorar ainda mais o desenvolvimento projetual, foram geradas mais três opções de cada uma delas.

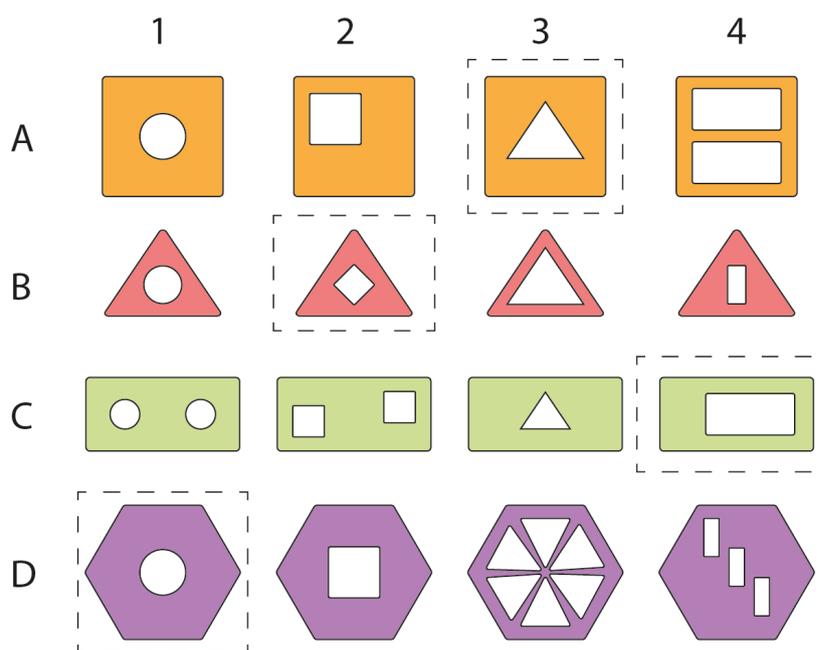


Figura 66 – Estudo das combinações das formas para o elemento vazado (acervo do autor, 2019).

Após geradas três novas propostas para cada uma das configurações, foram escolhidas quatro modelos, sendo eles o A3y, o B4z, o C4x e o D1z (Figura 67)

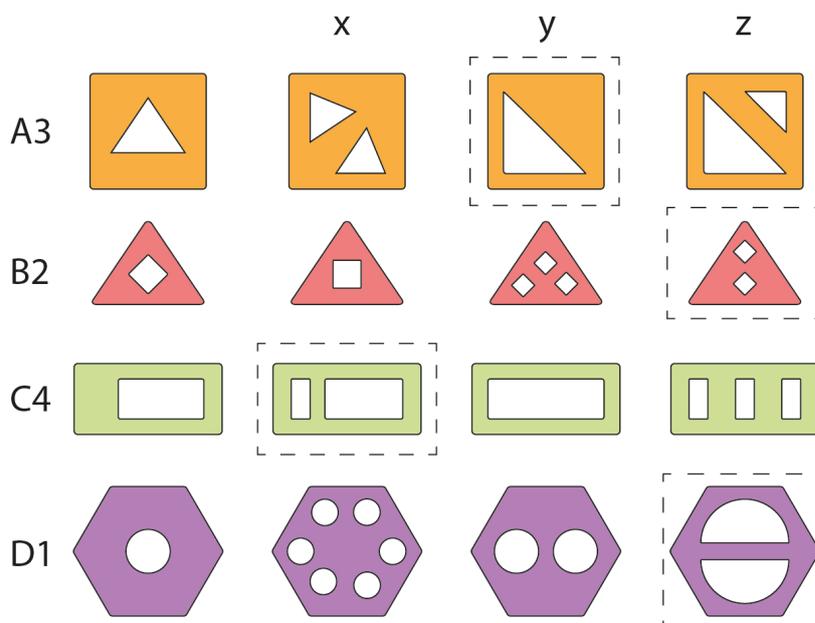


Figura 67 – Estudo das alternativas para o elemento vazado (acervo do autor, 2019).

Para cada uma das propostas escolhidas foi feito um estudo de paginação e distribuição do posicionamento. Algumas formas apresentaram poucas opções de

ângulos e por consequência, poucas opções de paginação, já outras apresentaram maior diversidade.

A forma A3y possui formato externo de um quadrado e interno de um triângulo isósceles com ângulo reto. Este elemento vazado poderá ser utilizado em quatro ângulos diferentes, tendo uma combinação a cada ângulo de 90° . Desta maneira, diversas combinações de paginação poderão ser utilizadas.

A3y

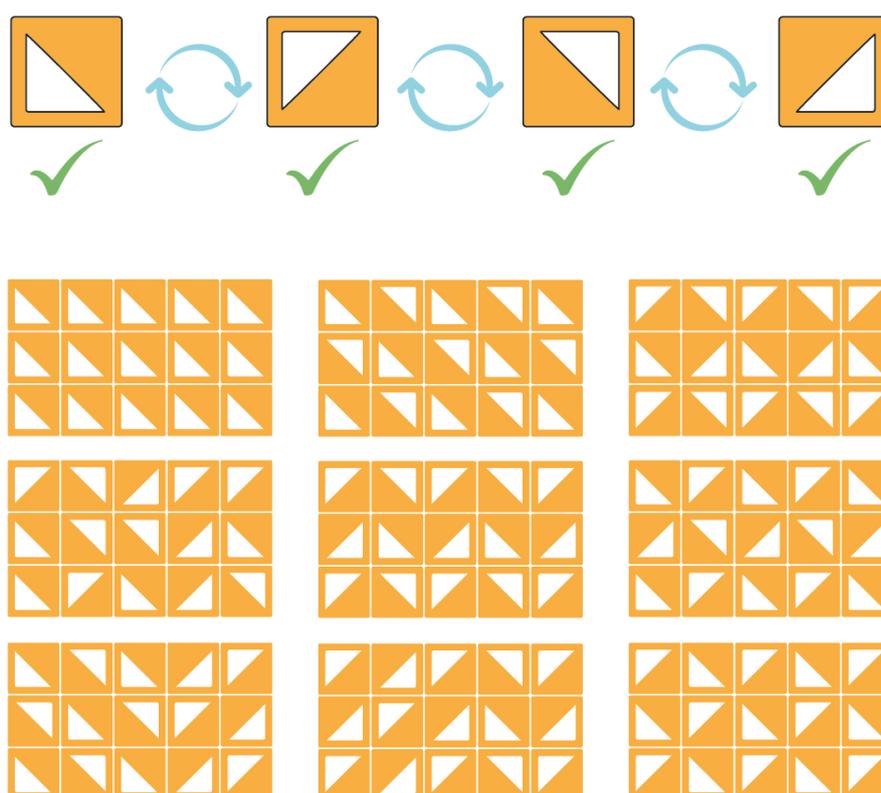


Figura 68 – Estudo de rotação e paginação de A3y (acervo do autor, 2019).

A forma B2z (Figura 69) possui formato externo de um triângulo equilátero e interno de dois quadrados. A combinação entre as peças acabou ficando limitada a três em ângulos de 60° , limitando, desta maneira, a paginação dos elementos vazados.

B2z

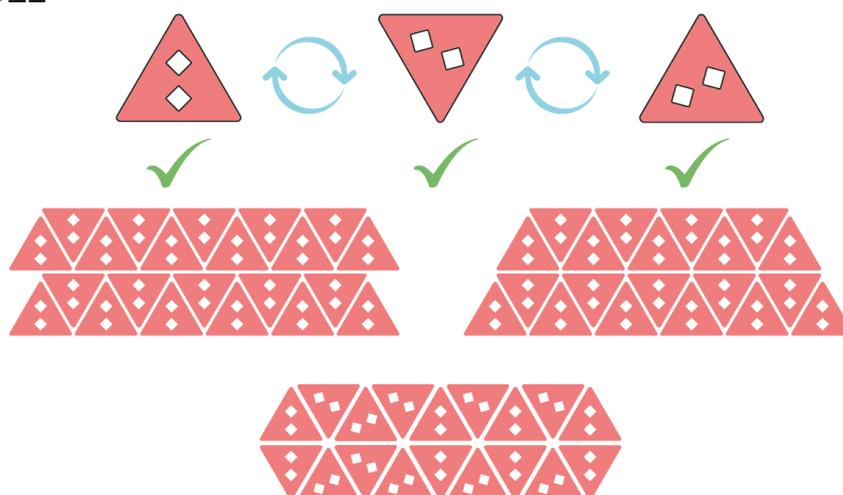


Figura 69 – Estudo de rotação e paginação de B2z (acervo do autor, 2019).

A forma C4x (Figura 70) possui formato externo de um retângulo e interna de dois retângulos de dimensões distintas. Este elemento vazado poderá ser utilizado em quatro ângulos diferentes, tendo uma combinação a cada ângulo de 90°. Porém para um ajuste perfeito, cada duas peças na vertical substituem duas peças na horizontal, limitando as opções de paginação.

C4x

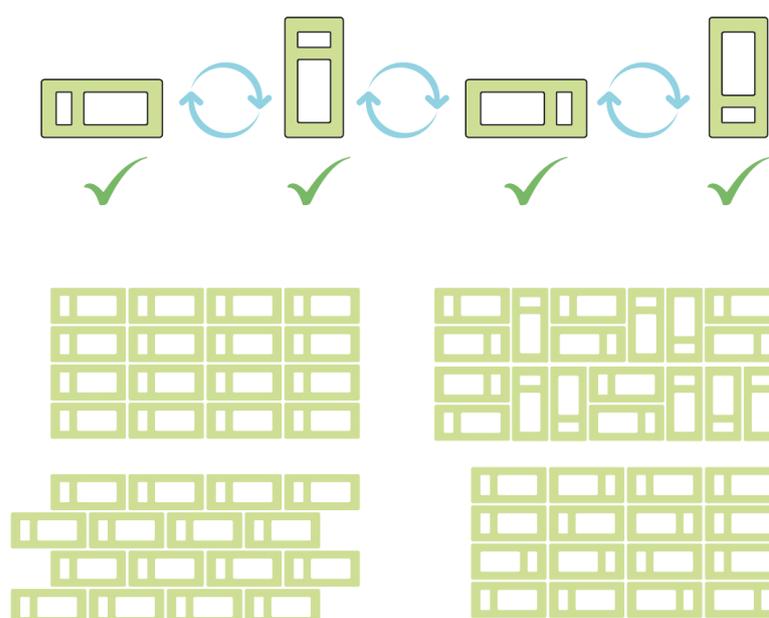


Figura 70 – Estudo de rotação e paginação de C4x (acervo do autor, 2019).

A forma D1z (Figura 71) possui formato externo de um hexágono e interna de dois semicírculos. Este elemento vazado poderá ser utilizado em três ângulos diferentes, tendo uma combinação a cada ângulo de 60°. Infelizmente, devido ao formato externo de um hexágono, combinações em ângulos de 90° não serão possíveis.

D1z

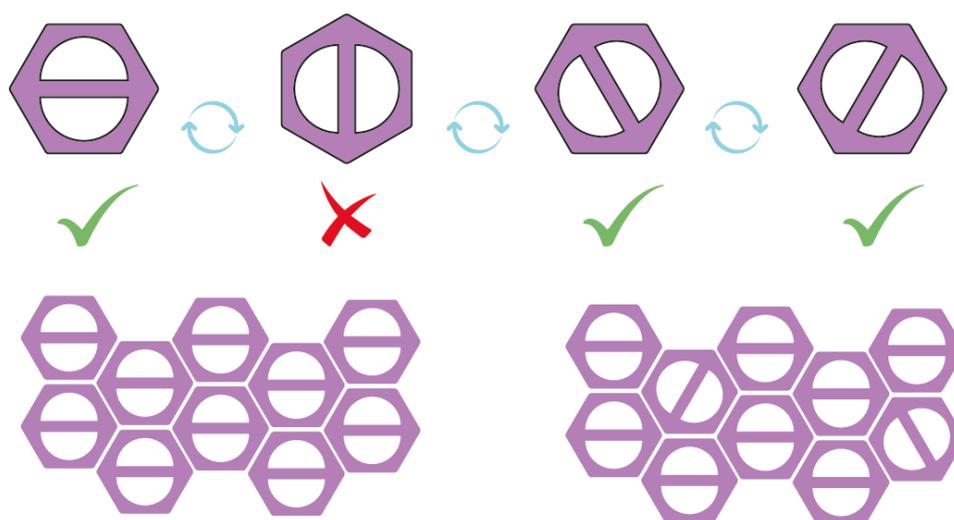


Figura 71 – Estudo de rotação e paginação de D1z (acervo do autor, 2019).

Baseando-se nos pensamentos de Merleau-Ponty (1994), em A3y é possível observar misturas heterogêneas de superfície, com maior diversidade de aplicação e paginação, fazendo com que o mesmo se destaque dos demais.

O elemento vazado além de possuir grande apelo estético, devido seu cuidado com o design de superfície, possui valor agregado devido a sua preocupação ambiental, atingindo desta maneira o nível reflexivo, onde é atribuído um significado, quando analisado através do modelo de Norman (2008), onde os três níveis de percepção visual (visceral, comportamental e reflexivo) foram levados em conta.

Em seguida o elemento vazado escolhido foi utilizado atribuir suas dimensões básicas (Figura 72) e para fazer simulações de sua aplicação e a proporção com pessoas e ambientes (Figura 73). Como visto anteriormente, foi possível obter-se diversos resultados de composições através do mesmo módulo, apenas através do posicionamento e rotação do mesmo.

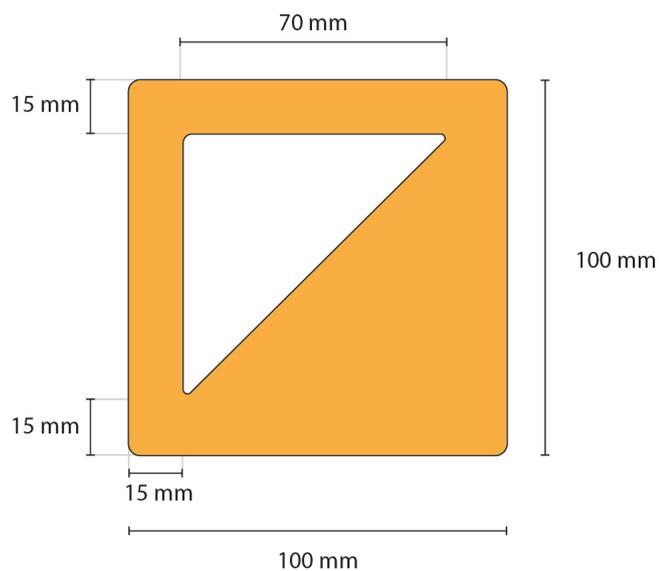


Figura 72 – Dimensões básicas do elemento vazado (acervo do autor, 2019).

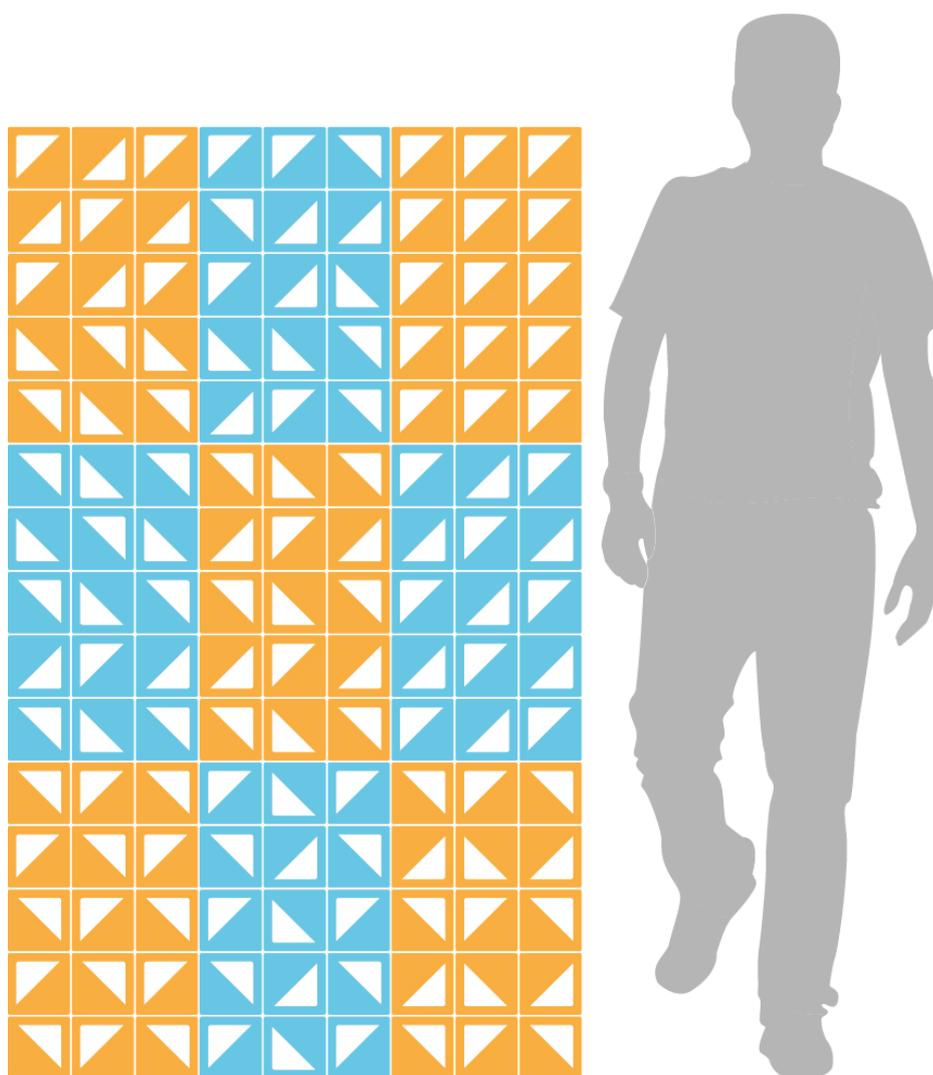


Figura 73 – Simulação do elemento vazado escolhido e proporção com um homem de 1,7 m (acervo do autor, 2019).

4.4.2 Modelagem Tridimensional do Elemento vazado

A partir da forma escolhida para o elemento vazado foi elaborada a modelagem tridimensional da peça no software 3D Rhinoceros. Em seguida foi gerada uma simulação de distribuição de nove elementos vazados compostos por três colunas e três linhas (Figura 74)

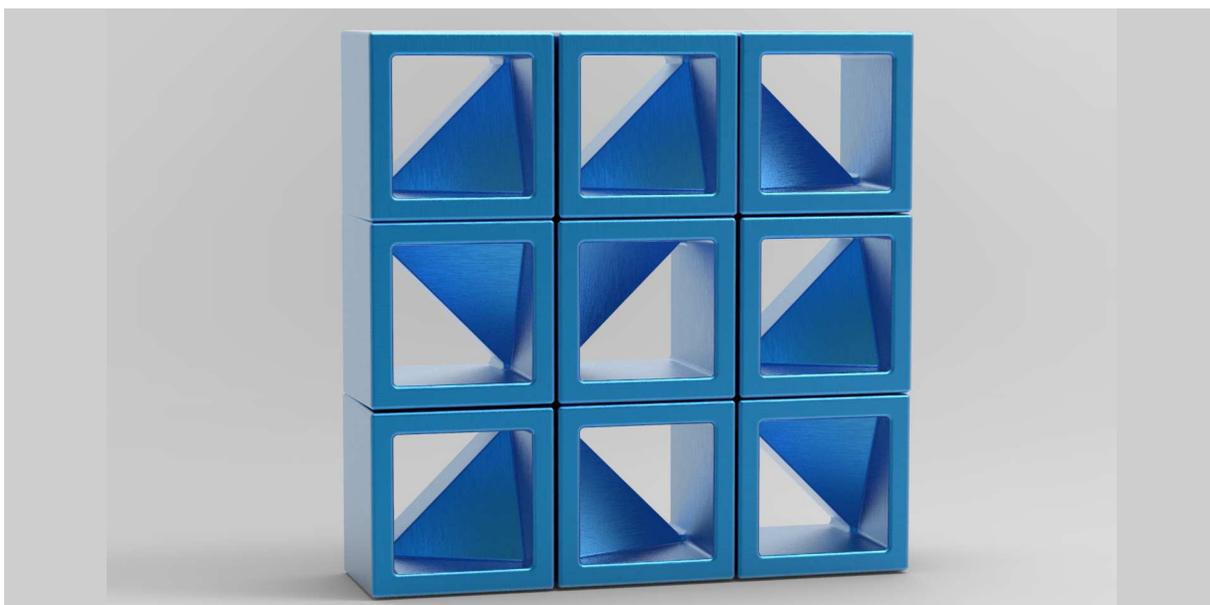


Figura 74 – Rendering de conjunto de 9 elementos vazados (acervo do autor, 2019).

As formas tridimensionais das simulações de “molde” impresso em PLA, contramolde em silicone, molde em gesso e do elemento vazado final (Figura 75) também foram modeladas utilizando o software Rhinoceros,

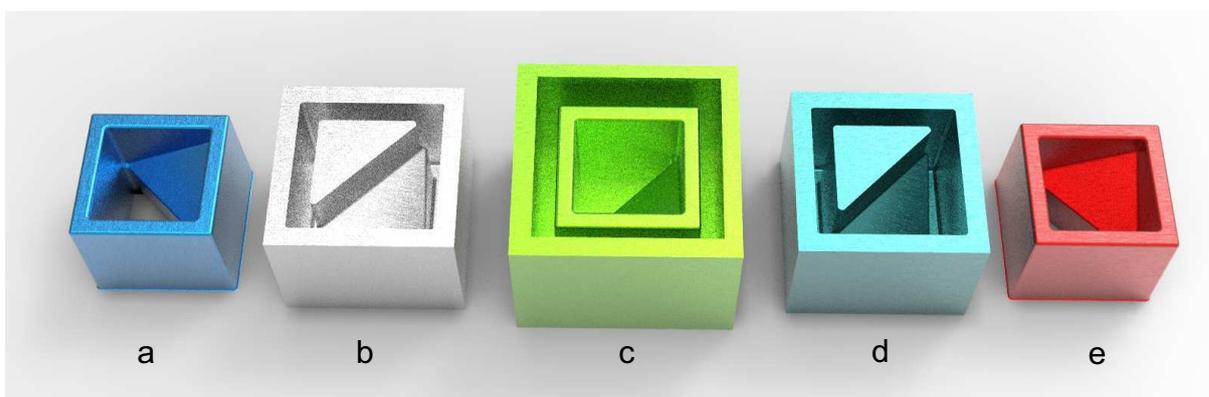


Figura 75 – a) elemento vazado b) “molde” impresso em PLA c) contramolde em silicone d) molde em gesso e) elemento vazado obtido (acervo do autor, 2019).

4.4.3 Geração da Geometria 3D

Após gerado o arquivo no formato .STL através do Software Rhinoceros, o molde mesmo foi aberto no Software Slic3r, onde as configurações de impressão, como resolução, tipo de filamento, velocidade, temperaturas entre outras foram ajustadas e por fim geraram um arquivo no formato de impressão (.Gcode).

4.4.4 Impressão Tridimensional da Matriz

O arquivo de impressão (.Gcode) então foi aberto no Software Repetier Host (Figura 76) e em seguida iniciou-se o processo de impressão do molde da peça em PLA ou Poli (Ácido Láctico), como matéria prima e o equipamento de impressão foi a REPRAP Prusa i3 Guru.

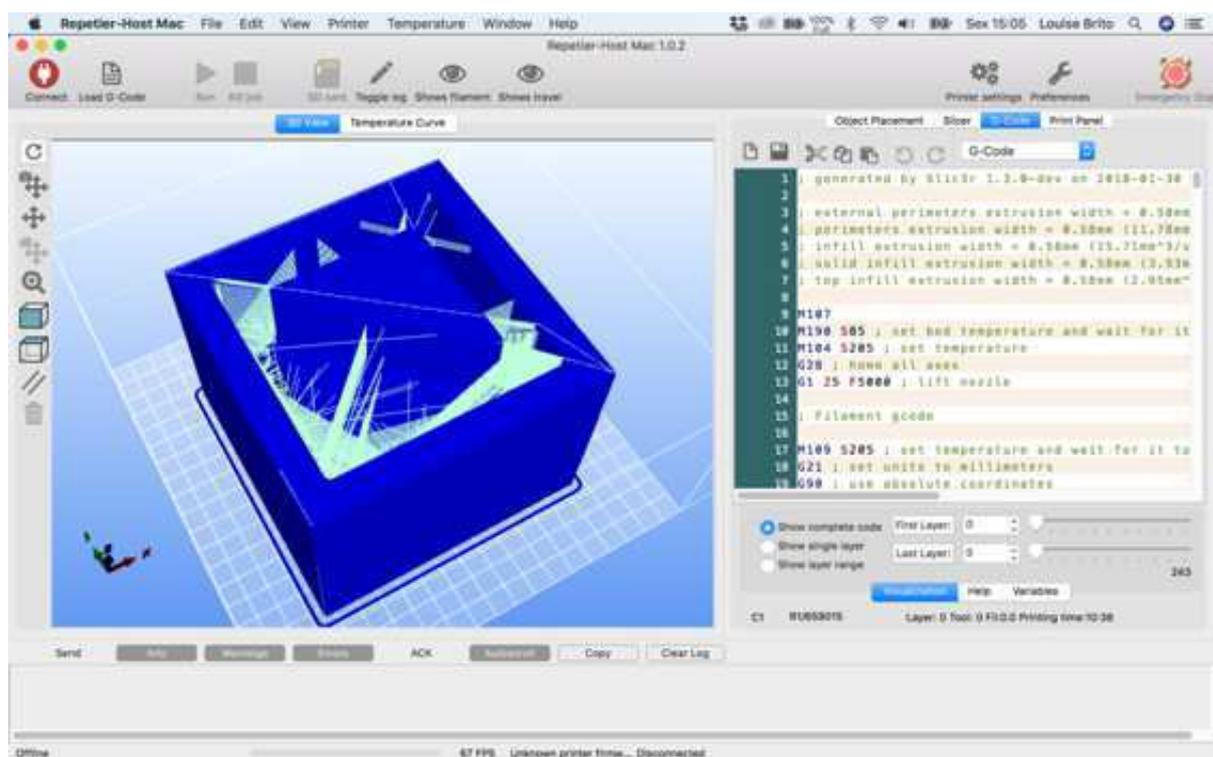


Figura 76 – Interface do Software Repetier-Host (acervo do autor, 2019).

A Figura 77 apresenta o molde em PLA do elemento vazado após impresso. O acabamento em cinza se deu através da aplicação de massa plástica para cobertura de pequenas falhas na textura da impressão.



Figura 77 – “Molde” do elemento vazado (acervo do autor, 2019).

4.4.5 Obtenção do Contramolde em Silicone

O contramolde em silicone foi elaborado (Figura 78) utilizando o molde em PLA como base e uma caixa de suporte que possibilitou uma parede de 2cm ao redor do molde. Após desinformado, o contramolde foi cortado com auxílio de estilete para facilitar o desmolde da peça em gesso. Foi utilizado White Lub Spray como desmoldante.



Figura 78– À esquerda: manufatura do Molde de Silicone; no centro: Molde de silicone pronto; à direita: Molde de silicone bipartido (acervo do autor, 2019).

4.4.6 Preparação dos Moldes Finais

Em seguida, os moldes utilizando a composição MR foram produzidos utilizando a mistura de 900g de gesso, 900g de areia de rio na peneira #26, 270g de caulim e 600g de água. A massa foi misturada e depositada no contramolde de silicone (Figura 79). Os moldes de MR permaneceram para secagem inicial por cerca de uma hora dentro do contramolde de silicone. Posteriormente o molde foi retirado e colocado sobre uma base vazada para secagem total, que durou cerca de cinco dias (Figura 80).



Figura 79 – Peça em MR sendo conformada no contra molde de silicone (acervo do autor, 2019).



Figura 80 – Moldes em MR secando (acervo do autor, 2019).

4.5 OBTENÇÃO DOS ELEMENTOS VAZADOS DE VIDRO

4.5.1 Preenchimento dos Moldes com Vidro

Os moldes de MR receberam cerca de 1,3kg da mistura de VB9A1-4 (Figura 81). A cada 300g o molde de MR e seu conteúdo eram agitados a fim de melhorar o empacotamento dos grãos.



Figura 81 – Molde em MR preenchido pela mistura VB9A1-4 (acervo do autor, 2019).

4.5.2 Tratamento Térmico e seus Aspectos Visuais

Foram selecionados nove Tratamentos Térmicos diferentes onde a temperatura de fusão variou entre 840°C, 880°C e 920°C e o patamar de tempo de fusão entre 30, 90 e 150 minutos.

A Figura 82 apresenta os aspectos visuais obtidos nos elementos vazados em cada um dos tratamentos térmicos. As imagens são referentes às faces frontais dos elementos vazados e, abaixo de cada uma, sua micrografia expõem uma mesma área localizada na mesma parte superior do bloco. As micrografias auxiliaram na percepção do efeito gerado entre os grãos de vidro em diferentes tratamentos térmicos

Em **TT1-A** ainda se observa boa parte da transparência e brilho. Os contornos entre os grãos são facilmente percebidos. As paredes do elemento vazado possuem textura rugosa. Em **TT1-B** observa-se uma aparência mais opaca e com menos brilho do que TT1-A. Os contornos entre os grãos são perceptíveis. As paredes do elemento vazado possuem textura mais lisa do que TT1-A, porém mais rugosa do que as demais.

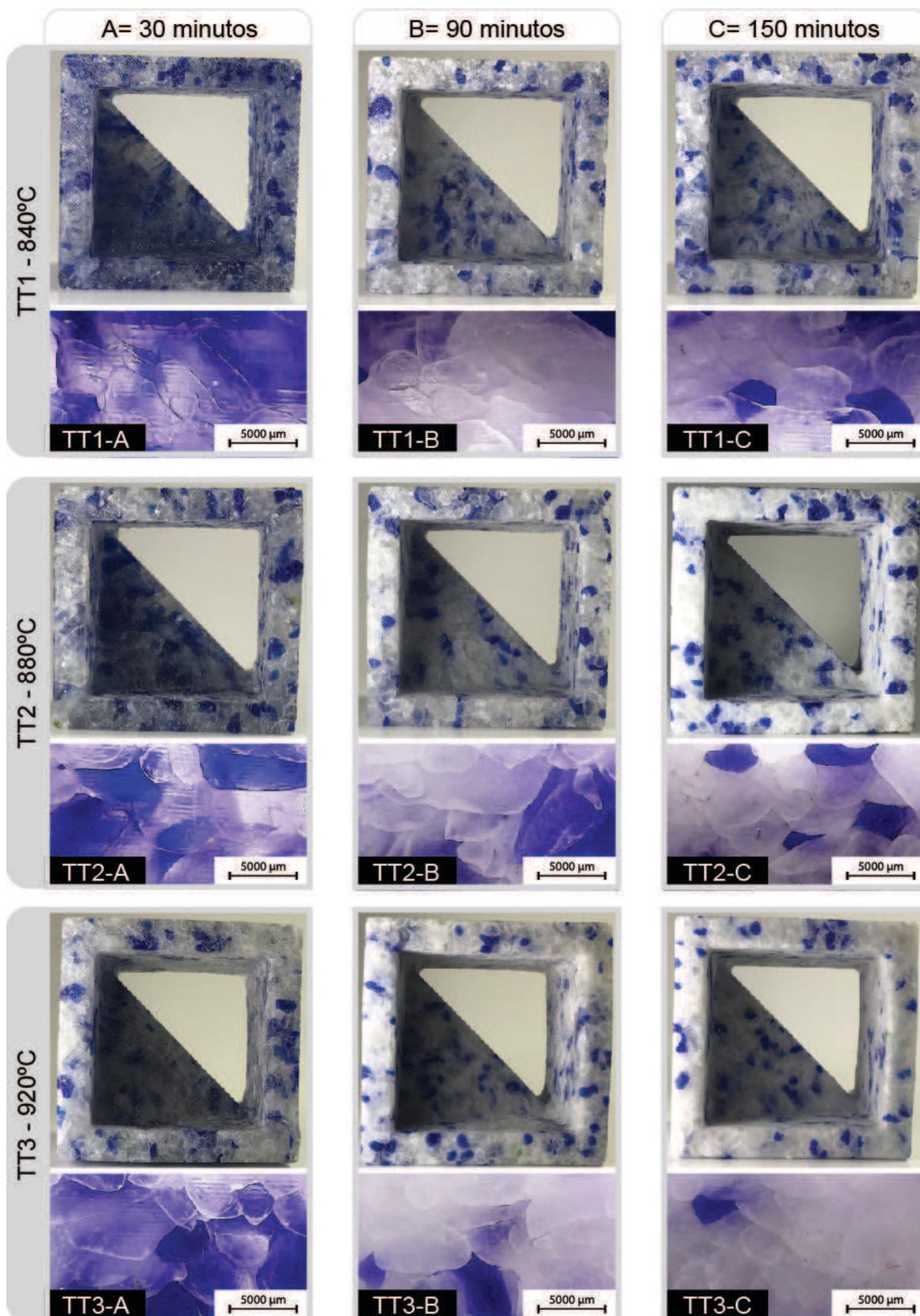


Figura 82 – Aspectos Visuais dos Elementos vazados em diferentes tratamentos térmicos e ângulos. (acervo do autor, 2019).

Em **TT1-C** percebe-se uma superfície mais lisa e homogênea do que em TT1-B e TT1-A, porém mais opaca, esbranquiçada e com menos brilho. Os contornos entre os grãos ainda são perceptíveis. As paredes do elemento vazado possuem textura um pouco mais lisa do que anteriores TT1-A/B, porém mais rugosa do que os demais.

Em **TT2-A** ainda se observa boa parte da transparência e brilho. Os contornos entre os grãos são facilmente percebidos. As paredes do elemento vazado possuem textura menos rugosa quanto comparado a TT1-A, porém mais rugosa, quando comparada aos demais. Em **TT2-B** observa-se uma aparência mais opaca e com menos brilho do que TT1-A, TT1-B e TT2-A, porém bastante parecida com TT1-C. Os contornos entre os grãos são perceptíveis. As paredes do elemento vazado possuem textura mais lisa do que TT1-A/B e TT2-A, porém mais rugosa do que os demais. Em **TT2-C** percebe-se uma superfície mais lisa do que em TT1-A/B/C e TT2-A/B, porém mais opaca, esbranquiçada e com menos brilho, similar a TT2-B. Os contornos entre os grãos ainda são perceptíveis. As paredes do elemento vazado possuem textura um pouco mais lisa do que anteriores (TT1-A/B/C e TT2-A/B) e mais rugosa, quando comparada aos demais.

Em **TT3-A** se observa pouca transparência e brilho, similar a TT2-B. Os contornos entre os grãos são perceptíveis. As paredes do elemento vazado possuem textura mais lisa quanto comparado a TT1-A/B/C e TT2-A/B, porém mais rugosa, quando comparada a TT1-B e TT1-C. Em **TT3-B** observa-se uma aparência similar a TT2-C mais opaca e com menos brilho do que TT1-A/B/C e TT2-A/B. Os contornos entre os grãos são quase imperceptíveis. As paredes do elemento vazado possuem textura mais lisa do que TT1-A/B/C, TT2-A/B/C e TT3-A, porém mais áspera do que TT3-C. Em **TT3-C** percebe-se a superfície mais lisa de todas (TT1-A/B/C, TT2-A/B/C e TT3-A/B), porém a mais opaca, esbranquiçada e com menos brilho de todas. Os contornos entre os grãos estão praticamente imperceptíveis. As paredes do elemento vazado possuem textura lisa.

Percebe-se que quanto maior o tempo em uma determinada temperatura de fusão, mais a superfície torna-se fosca, homogêneas e opaca e lisa. O mesmo ocorre com o aumento da temperatura de fusão. Portanto, para aparências mais lisas, foscas e opacas, recomenda-se o aumento da temperatura e do tempo.

4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO MECÂNICA: ELEMENTOS VAZADOS

Os elementos vazados obtidos através dos Tratamentos Térmicos, TT1-B, TT2-B e TT3-B foram submetidos a um ensaio de Difração de Raios X (DRX), de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e microscopia óptica e um ensaio de resistência à compressão simples, visando entender melhor as fases cristalinas obtidas a partir dos elementos vazados, verificar seus aspectos microestruturais e sua resistência mecânica.

4.6.1 Características Estruturais

Os difratogramas de raios X das amostras de VB9A1, quando submetidas aos diferentes tratamentos térmicos (TT1-B, TT2-B e TT3-B), podem ser observados na Figura 82. Uma banda próxima ao $2\theta = 25$ pode ser observada em todas as amostras, confirmando a natureza amorfa das mesmas.

Ocorreram picos cristalinos evidentes apenas nas submetidas aos tratamentos térmicos, porém foram encontradas em todas as amostras diferentes fases cristalinas do Quartzo, como é o caso da presença de Tridimite hexagonal (T) com pico principal no $2\theta = 30,0$ e secundário no $2\theta = 22,5$, (PDF 01-071-0261). Em todas as amostras, também está presente a Coesita monoclinica (C), com pico principal no $2\theta = 28,5$ (PDF 01-083-1828).

A presença destas duas fases cristalinas já era vista antes mesmo do tratamento térmico realizado nesta pesquisa. Isso se dá devido ao tratamento térmico em que a matéria prima do vidro foi submetida até que o vidro fosse gerado, que se deu por volta dos $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$. O que pode ser observado neste difratograma é um aumento de intensidade dos picos devido aos diferentes tratamentos térmicos em que a mistura de resíduos vítreos foi submetida.

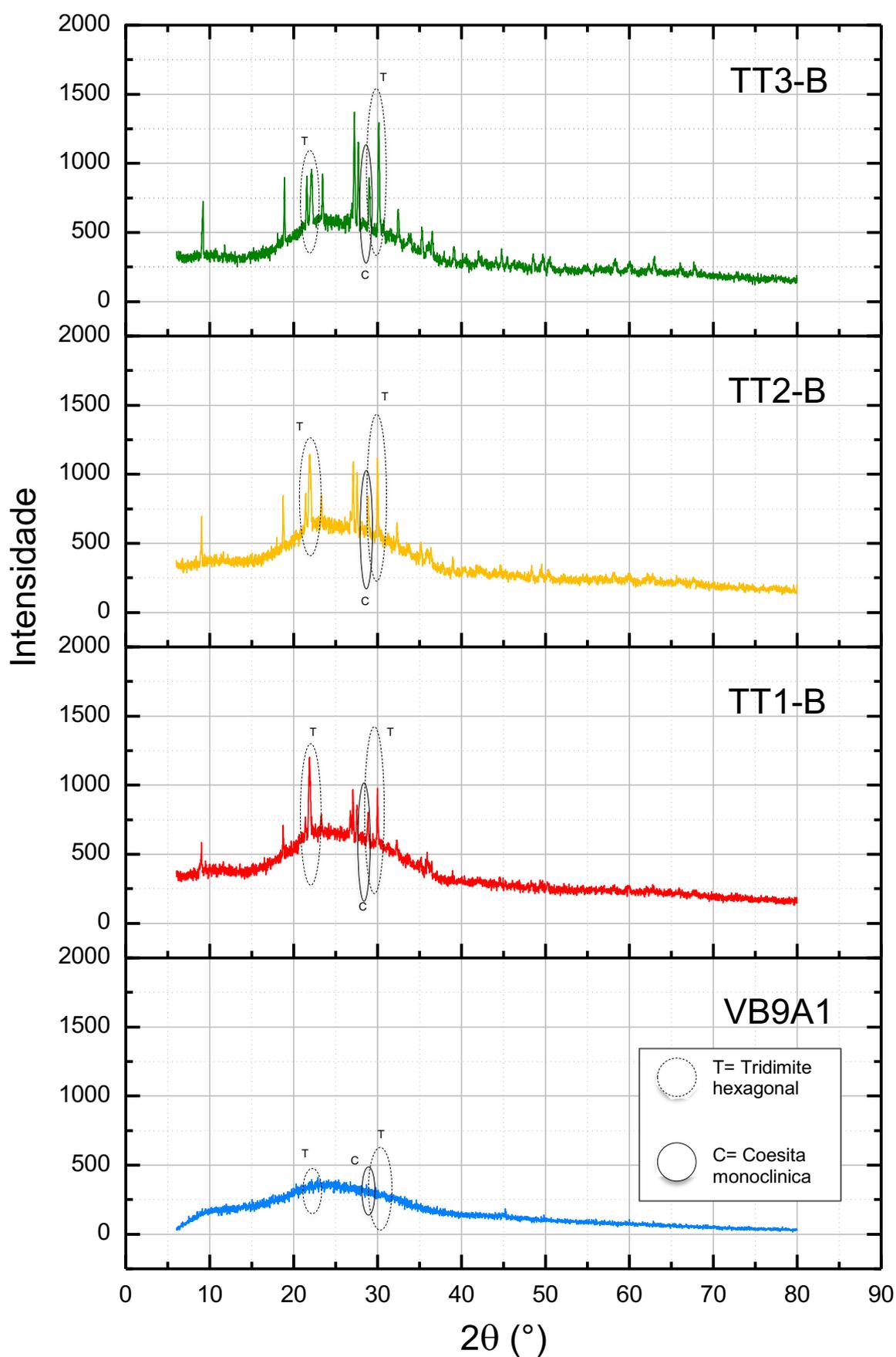


Figura 83 – Difractogramas das Amostras de VB9A1 com os tratamentos térmicos TT1-B, TT2-B e TT3-B e de VB9A1 antes do tratamento térmico (acervo do autor, 2019).

Observa-se que nas três amostras submetidas aos tratamentos térmicos, podem ser vistos, praticamente, os mesmos picos cristalinos, porém com intensidades diferentes.

VBA9B1 possuía 9% de cristalinidade, ao ser submetido ao TT1-B apresentou a 18,5%, em TT2-B obteve 26,4% e em TT3-B atingiu 33,9% de cristalinidade. Os picos cristalinos mais intensos foram identificados em TT3-B, onde a temperatura de fusão foi de 920°C. Os picos cristalinos menos intensos foram identificados em TT1-B, onde a temperatura de fusão foi de 840°C.

Verifica-se, portanto, que quanto maior a temperatura de fusão, mantida sob um mesmo intervalo de tempo, mais intensos serão os picos cristalinos, caracterizando-os como vitrocerâmicas. Esta análise vem a corroborar os aspectos visuais obtidos nas três amostras, conforme Figura 82, onde TT3-B obteve aparência mais opaca do que TT1-B e TT2-B, devido à desvitrificação através da cristalização.

4.6.2 Microestruturas

4.6.2.1 Microscopia Óptica

Para um melhor entendimento do efeito dos diferentes tratamentos térmicos na microestrutura dos blocos, os mesmos foram examinados por microscopia óptica (MO). As microscopias foram realizadas nas superfícies de fratura dos blocos submetidos ao ensaio de compressão, e estão apresentadas na Figura 84. A partir destas, pode-se verificar que todos os blocos, submetidos aos distintos tratamentos térmicos, apresentam características microestruturais de haverem sofrido uma fratura frágil.

Nas microscopias dos blocos submetidos ao tratamento TT1-B é possível observar uma superfície de fratura frágil contendo nervuras de propagação que irradiam a partir do ponto de origem da mesma, seguindo um padrão em forma de leque (CALLISTER & RETHWISCH, 2010). Para os blocos submetidos ao tratamento TT3-B, observa-se um comportamento que segundo Callister Jr. e Rethwisch (2010) ocorre para a maioria dos materiais cristalinos frágeis, denominado fratura transgranular, uma vez que as trincas da fratura passam através dos grãos. Como resultado, a superfície da fratura pode exibir uma textura granulada. Para os blocos

submetidos ao tratamento TT2-B observa-se um comportamento intermediário aos descritos para os tratamentos TT1-B e TT3-B, ou seja, é possível observar tanto a presença de nervuras quanto de granulações. Estes resultados corroboram os obtidos por difração de raios-X, que indicaram um crescente aumento da cristalinidade dos blocos, sendo a menor cristalinidade observada para o TT1-B e a maior para o TT3-B.

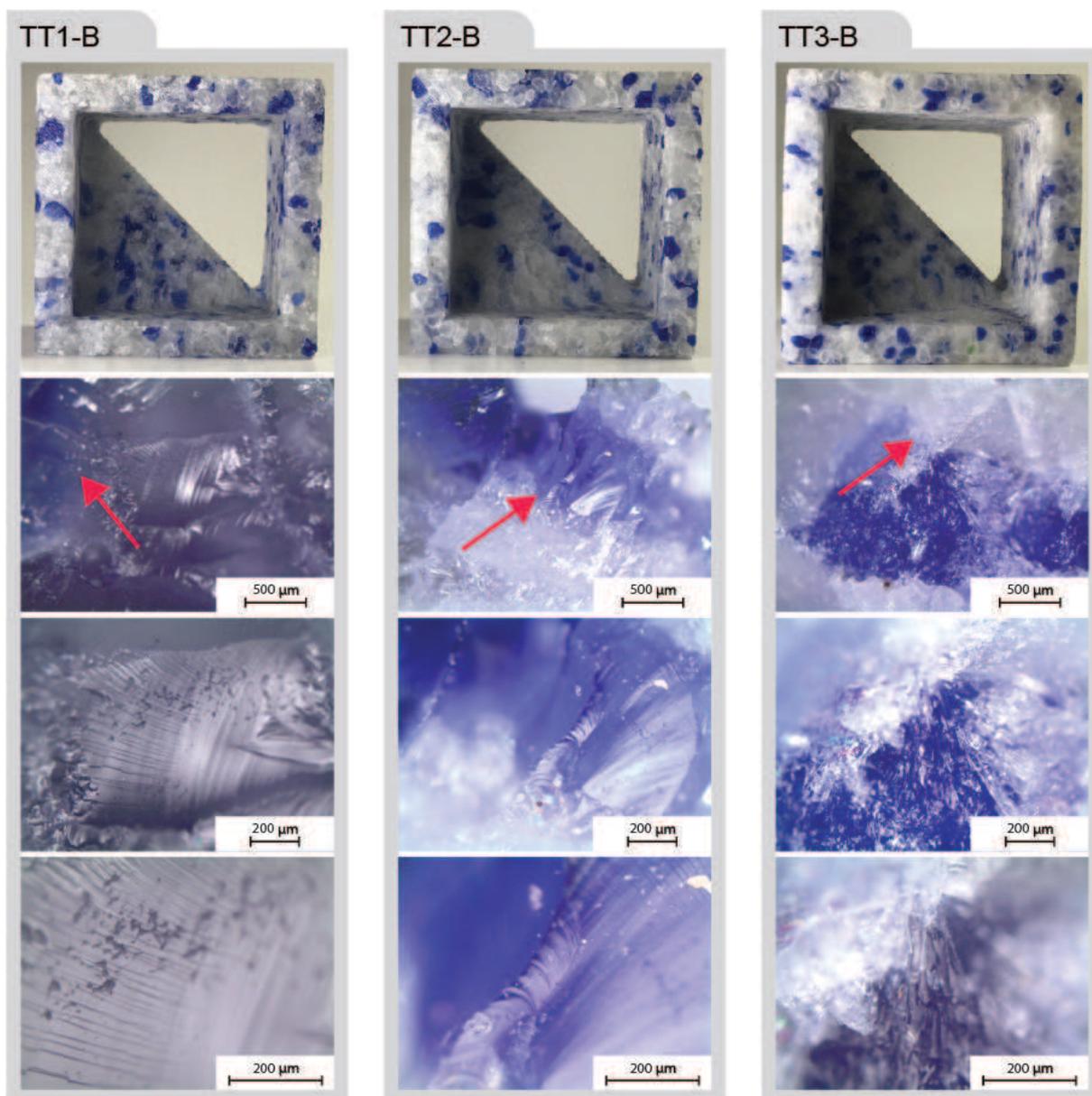


Figura 84 – Aspectos visuais frontais e micrografias ópticas de TT1-B, TT2-B e TT3-B. (acervo do autor, 2019).

As microscopias também permitem observar, de forma qualitativa, a boa interação das partículas dos vidros branco e azul (ou dos vidros de mesma cor),

evidenciadas por interfaces nas quais não se consegue distinguir claramente os contornos das partículas, como indicam as setas em vermelho.

4.6.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Ainda com o objetivo de adquirir entendimento do efeito dos diferentes tratamentos térmicos na microestrutura dos blocos, os mesmos foram examinados por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As microscopias foram realizadas nas superfícies externas dos blocos (Figura 85).

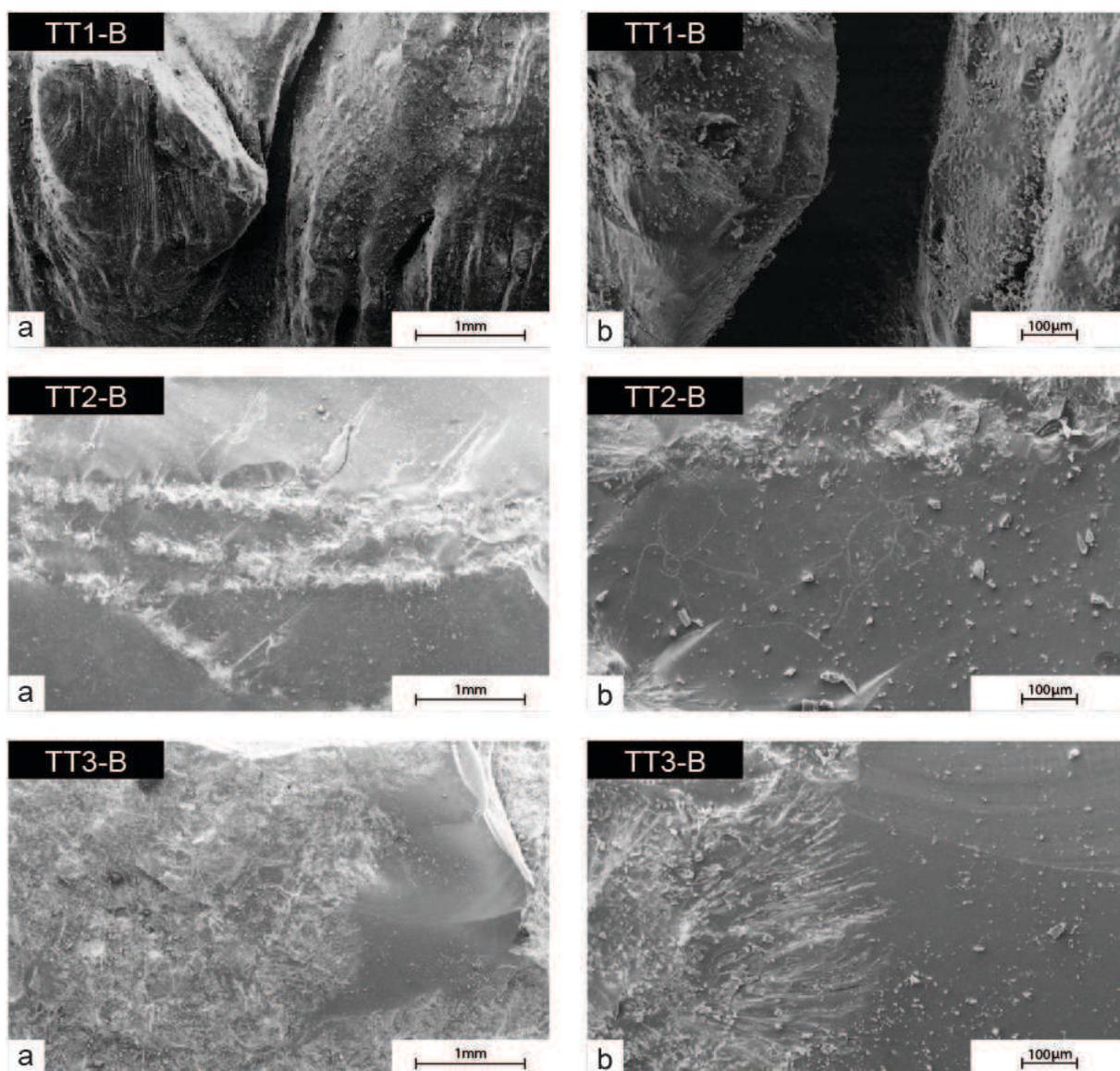


Figura 85 – Aspectos visuais através do MEV de TT1-B, TT2-B e TT3-B (acervo do autor, 2019).

Analisando-se as microscopias das superfícies dos blocos submetidos ao TT1-B, observa-se que as partículas do vidro, na região examinada, apresentam fraca adesão interfacial. Entretanto, por MO observou-se um resultado contrário, ou seja, uma boa interação interfacial para os blocos submetidos ao TT1-B. Provavelmente, este tratamento não atuou de maneira uniforme, resultando em regiões com boa e regiões com fraca interação. Outro fato que deve ser levado em consideração é que a MO foi realizada de uma superfície interna (fratura) e o MEV foi realizado de uma área de superfície externa, portanto sem fratura.

Examinando-se as microscopias das superfícies dos blocos submetidos ao TT2-B e TT3-B observa-se que as partículas de vidro, na região examinada, apresentam boa interação interfacial, estando estes resultados em conformidade com o observado por MO. Os tratamentos TT2-B e TT3-B foram realizados em temperaturas mais elevadas o que provavelmente favoreceu uma maior interação interfacial de forma mais homogênea nos blocos.

4.6.3 Resistência Mecânica

Foram submetidos ao ensaio um total de 9 amostras (Figura 86), sendo três elementos vazados de TT1-B, três de TT2-B e três de TT3-B. Toda as amostras se romperam, tendo em vista que era necessário observar a resistência máxima suportada pelos elementos vazados.

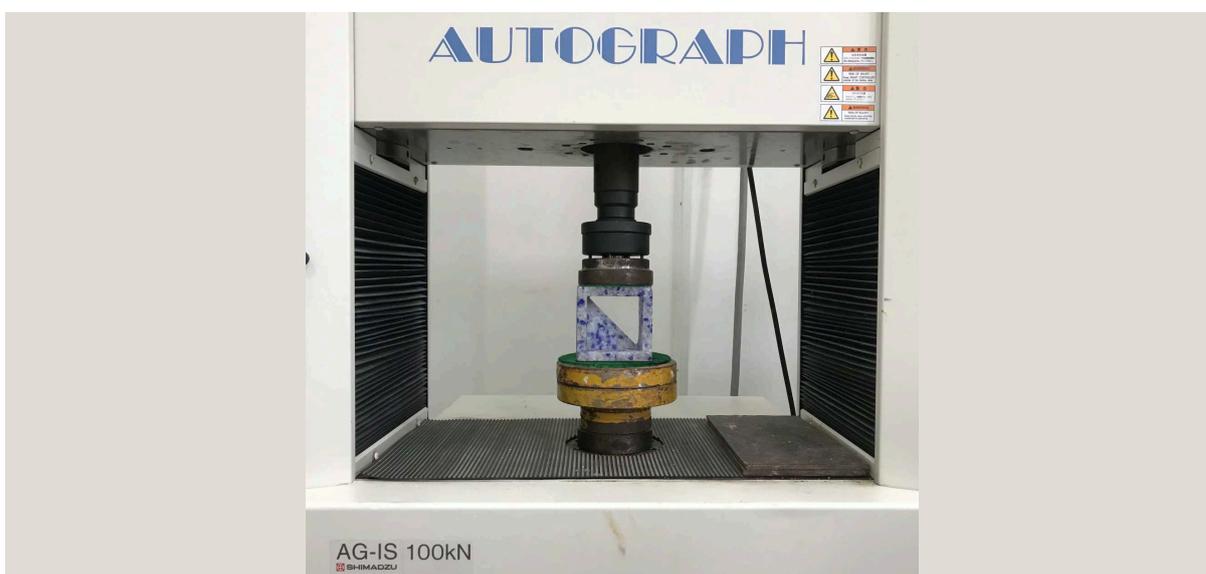


Figura 86 – Equipamento de ensaio de resistência à compressão simples com o elemento vazado (acervo do autor, 2019).

Verifica-se com os resultados obtidos durante o ensaio de resistência à compressão simples (Figura 87), que a carga máxima suportada por TT1-B foi de 5,0 MPa (50.986 kgf/cm²). TT2-B suportou até 5,8 MPa (59.144 kgf/cm²) antes de se romper e TT3-B até 6,2 MPa (63.222 kgf/cm²). TT3-B obteve a maior resistência. Isso se dá pela melhor fusão e compactação ocorrida durante seu tratamento térmico, como pode ser observado nos ensaios anteriores. De acordo com a NBR14899-1 (Blocos de Vidro para a construção Civil. Parte 1: Definição, requisitos e métodos de ensaios), a carga mínima individual suportada pelos elementos vazados deverá ser superior a 4,0 MPa, portanto, todos os elementos vazados testados estão de acordo com as normas previstas.

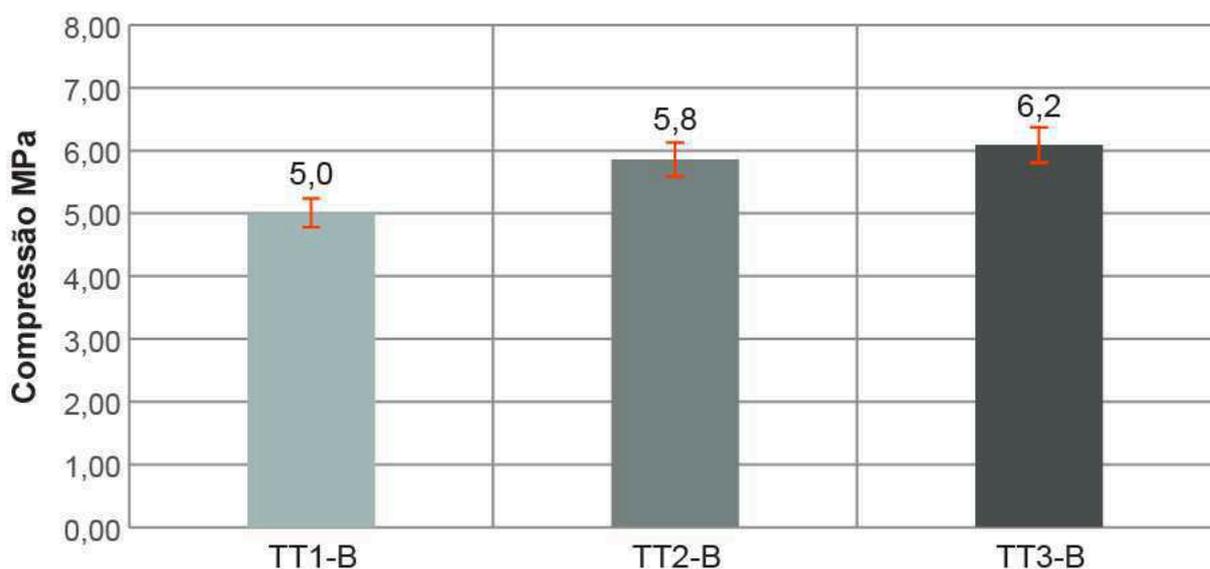


Figura 87 – Resultados obtidos durante o ensaio de resistência à compressão simples dos elementos vazados (acervo do autor, 2019).

Estes resultados corroboram os obtidos nos ensaios anteriores, onde observa-se que quanto maior a temperatura, maior será a cristalinidade obtida e maior será a resistência mecânica.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo investigar a possibilidade da reciclagem de resíduos vítreos no desenvolvimento de elementos vazados aplicados a projetos arquitetônicos e averiguar a possibilidade de substituição da sílica fina pura dos moldes, por outros tipos de areias mais acessíveis e menos nocivas à saúde, visando propor alternativas tecnológicas e ambientais para a concepção de moldes para o reaproveitamento desses resíduos.

Para tal, ocorreram beneficiamentos e caracterizações das matérias primas; estudos das composições e caracterizações dos materiais para os moldes; projeção dos elementos vazados; obtenção dos elementos vazados a partir do vidro e as caracterizações físico mecânicas dos mesmos. Dos resultados obtidos e análises realizadas, pôde-se concluir que:

- **Matérias primas:**

Pela Fluorescência de Raios X, verificou-se que os vidros utilizados foram identificados como do tipo sílica-soda-cal, e a maior diferença entre o branco e o azul é a presença de 0,15% de óxido de cobalto (CoO) no vidro azul. No difratograma de raios X de VB foi detectada a presença da Tridimite hexagonal e no difratograma de raios X de VA foi detectada a presença da Tridimite hexagonal e da Coesita monoclinica. As areias de rio (77,62% de SiO₂) e de mar (83,26% de SiO₂) possuem grande potencial para substituir a sílica fina pura (99,00% de SiO₂), do ponto de vista da composição química, devido à alta percentagem de dióxido de silício encontrado em cada uma delas.

Através das micrografias ópticas verificou-se que as areias apresentaram grandes partículas, com diâmetro médio de 0,6mm, perceptíveis a olho nu, com variação de coloração, formato, tamanho e transparência, além da presença de impurezas. A areia de mar apresentou partículas mais transparentes e com menor variação de tamanho do que as de rio.

A partir de uma análise visual qualitativa, a maior heterogeneidade entre as cores foi obtida utilizando-se a proporção de 10% de vidro azul e 90% de vidro branco, com dimensões entre 2,36 mm e 4,76 mm, denominada VB9A1-4.

- **Estudo da composições e caracterizações dos Moldes:**

Observou-se uma perda de massa em todas as amostras referente à evaporação da água durante o processo de Tratamento Térmico inicial (TTi). Nos corpos de prova compostos por areia de rio e de mar esta perda foi de 25%. Porém os corpos de prova feitos com sílica fina pura tiveram perda de 40% de massa, devido ao menor tamanho do grão da sílica fina pura, que resultou em uma maior quantidade de água na mistura.

Quanto aos aspectos visuais, verifica-se que após TTi, todas as amostras apresentaram aparência mais esbranquiçada do que antes. As propriedades mecânicas indicam que todas as amostras apresentaram diminuição na resistência após o tratamento térmico inicial (TTi), sendo este um resultado desejável, tendo em vista o desmolde da peça a ser realizado após o tratamento térmico.

Observa-se a viabilidade, do ponto de vista mecânico, químico e visual da substituição da sílica fina pura por areia de rio e de mar no processo de desenvolvimento de moldes para fusão em vidro, sendo estas opções mais acessíveis, menos nocivas à saúde e de menor custo.

- **Design dos Elementos vazados:**

Verificou-se que a Caixa Morfológica, foi de grande importância para a obtenção de opções de formatos para o elemento vazado, onde o escolhido foi de formato quadrado para a estrutura externa e triangular para a área vazada. Além de ter sido o conceito com maior aceitação visual, foi também o que apresentou maior diversidade de aplicação e paginação.

A impressão tridimensional do elemento vazado em PLA, foi essencial para a inserção de um modelo específico para aplicação da técnica apresentada neste trabalho. Além de garantir a exatidão do projeto, a impressão 3D permitiu a manufatura do contramolde em silicone. Este por sua vez possibilitou a reprodução de diversos moldes feitos a partir da mistura de gesso, areia, caulim e água.

- **Obtenção e caracterização dos elementos vazados:**

Percebeu-se que quanto maior o tempo, durante determinada temperatura (30, 60 e 90 minutos), mais a superfície tornou-se fosca, homogênea e opaca. O mesmo ocorreu com o aumento da temperatura de fusão (840°C, 880°C e 920°C).

Portanto, pôde-se concluir que o aumento de temperatura e tempo gera peças com aparências mais homogêneas, foscas e opacas.

Os difratogramas de raios X apresentaram diferentes fases cristalinas do Quartzo nas quatro amostras. Verificou-se que em temperaturas mais elevadas, o material obtém picos cristalinos mais intensos, devido à desvitrificação através da cristalização, podendo ser caracterizados como vitrocerâmicas.

As microscopias ópticas dos elementos vazados realizados na região de fratura, apontaram que quanto menor a temperatura, mais frágeis serão as fraturas e que as mesmas ocorreram em forma de leque. Já nas temperaturas mais altas verificou-se fraturas do tipo transgranular, exibindo uma textura granulada.

Nas micrografias eletrônicas de varredura, observou-se que quanto menor foi a temperatura de fusão, mais fraca foi a adesão interfacial das partículas do vidro. Já em temperaturas mais elevadas foi possível observar uma maior interação interfacial de forma mais homogênea nos elementos vazados.

Quando submetidos a temperaturas de fusão mais elevadas, os blocos obtiveram maior resistência à compressão. Fato atribuído à melhor sinterização ocorrida em temperaturas mais elevadas.

Verificou-se que o TT3-B (temperatura de fusão de 920°C por 90 minutos) foi o mais adequado para este trabalho, obtendo elementos vazados com superfície aparentemente mais homogênea, fosca, opaca e lisa, além de ter obtido uma maior resistência à compressão simples e os maiores picos cristalinos que os caracterizam como vitrocerâmicas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar novos tratamentos térmicos que permitam a formação de elementos vazados com outras aparências mais transparentes;
- Estudar novas proporções e novas combinações de cores de resíduos vítreos para geração de novos produtos gerados à partir das técnicas de fabricação expostas neste trabalho;
- Estudar a possibilidade de diminuição da proporção de caulim e Gesso, aumentando assim a quantidade de areia na composição dos moldes;
- Utilização das técnicas apresentadas neste trabalho para desenvolver novos produtos e aplicações.

7 REFERÊNCIAS

- ABIVIDRO. **Associação Brasileira das Indústrias de Vidro**. Disponível em <[http://www.abividro.org.br/vidro/cenario/vidro-construcao -civil](http://www.abividro.org.br/vidro/cenario/vidro-construcao-civil)> Acesso em: 20 nov. 2014.
- ABNT, NBR. 14899-1: **Blocos de vidro para a construção civil - Parte 1: Definições, requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, Setembro de 2002.
- ABNT, NBR. 7173: **Elementos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural**. Rio de Janeiro de 1982.
- AKERMAN, M. **Apostila de Natureza, Estrutura e Propriedades do vidro**, 2006.
- AKERMAN, M. **Introdução ao vidro e sua produção**. Escola do Vidro. 2013.
- ALVES, O. L., GIMENEZ, I. de F., MAZALI, I. O. Vidros, **Revista Química Nova na Escola**, v. 02, p. 13-24. 2001.
- ARAÚJO, M. R.; GONÇALVES, V.; CABÚS, R. **Análise Da Iluminação Natural A Partir De Elementos Vazados**. IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007.
- ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materiais**. Elsevier, 2012.
- AZAMBUJA, E. et al. **Proposta de gestão de resíduos sólidos urbanos: análise do caso de Palhoça/SC**. 2002.
- BAKER, N. e STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. London: James & James, 2002.
- BARBOSA, A. A. **Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe**. *Cerâmica* 60 (2014) 501-508.
- BARDELLA, P.S., CAMARINI, G., 2011. **Recycled plaster: physical and mechanical properties**. *Adv. Mater. Res.* 374e377, 1307e1310.
- BELCHIOR, M. F.; SILVA, D. D. E.; MORAIS, C. R. S. **A tecnologia social na reciclagem de vidros: o caso da Associação de Catadores e Recicladores do município de Campina Grande**. Encontro Nacional Conhecimento e Tecnologia: Inclusão Socioeconômica de Catadores de Materiais Recicláveis, Brasília, 2014.

BERTAN, F.M. **Extrusão de material vitrocerâmico do sistema LZSA reforçado com partículas de $ZrSiO_4$** . 2006. 104f. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BEVERIDGE, P., DOMÉNECH, I., PASCUAL, E. **O vidro: técnicas de trabalho de forno**, Lisboa, 2004

BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN C. P. **Materiais refratários e abrasivos. "Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais, Vol. 1, Ibracon - São Paulo: G. Isaia, Ed, 2007.**

BRITO, L. B. Q.; BRITO, G. F.; MORAIS, C.R.S. **Alternative for fine pure silica in kiln-castign glass molds**. Materials Letters Volume 252, 1 October 2019, Pages 19-22.

CADIOLI, L. P.; BAITILO, L. G. **Materiais cerâmicos: um estudo sobre vitrocerâmico**. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, v. 4, n. 4, p. 147-161, 2015.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. New York: John wiley & sons, 2010.

CANTO, E. L. **Minerais, minérios, metais: de onde vêm? Pra onde vão?**. São Paulo: Moderna, 2001.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials. Science and Engineering**. 2 ed., Springer/Verlag: Nova Iorque, 2013.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus, 1999. 3v.

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br> > Acesso em 20 de julho de 2017.

CHINNAM, R. K. et al. **Processing of porous glass ceramics from highly crystallisable industrial wastes**. Advances in Applied Ceramics, v. 6753, n. April 2016, p. 11–17, 2015.

CMMAD – Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

COOPER, G.K., **Rapid Prototyping Technology** – Selection and Application, 1 ed., New York, Marcel Dekker Inc, 2001.

DELLA, V.P. **Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz.** Química Nova vol.29 no.6 São Paulo Nov./Dec. 2006.

DIAS, G. G. **Plano de gerenciamento integrado de resíduos vítreos – PGIRV.** Belo Horizonte: Fundação Israel Pinheiro, 2009

E-Civil. **Definição de Cobogó.** Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-cobogo.html>> Acesso em: 18 agosto de 2017.

ERIXON, G. **Design for modularity.** London: Chapman & Hall, 1996.

FELISBERTO, C. B. **Rendimento e cor de selênio e seus compostos na coloração de vidros sódico-cálcicos.** 2006, 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, 2006

FERNANDES, D. **Desenvolvimento de novas técnicas para utilização de sucata de vidro visando a produção de novos produtos.** Curitiba: UFPR, 2004.

FERREIRA, E.B.; ZANOTTO, E.D. **Nano vitrocerâmica de escoria de aciaria.** Química Nova, v. 25, n. 5, 2002.

FREITAS, R. O. T. de. **Design de Superfície. Ações Comunicacionais Táteis nos Processos de Criação,** São Paulo: Editora Blucher, 2011.

FUSEDGLASS. Disponível em <www.fusedglass.org> Acesso em: 25 nov. 2017.

GARCIA, J. C. Ecodesign: **Estudo De Caso Em Uma Indústria De Móveis De Escritório.** Dissertação - Escola de Engenharia da UFMG - Belo Horizonte, 2007.

GIMENEZ, I.F.; MAZALI, I.O.; ALVES, O.L. **Transformação de fase em vidros. Laboratório de Química do Estado Sólido** – Unicamp, 2008.

GOMEZ, L. S. R; BRAUN, J. R. R. **Ecodesign como estratégia de valorização e divulgação de entidades ambientais: a atuação do setor gráfico.** I Encontro De Sustentabilidade Em Projeto Do Vale Do Itajaí, 12 E 13 De Abril De 2007.

HILTON, P.D., JACOBS, P.F., **Rapid Tooling – Technologies and Industrial Applications,** 1 ed., New York, Marcel Dekker, 2000.

HOPKINSON, N., HAGUE, R.J.M., DICKENS, P.M., **Rapid Manufacturing – An Industrial Revolution for the Digital Age,** 1 ed., West Sussex, Wiley & Sons, 2006.

JACKSON, J. M. F. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**. São Paulo. Volume 30, Número 112, ano 2005.

KERVIN, J.; FENTON, D.. **Pate de verre and kiln casting of glass**. GlassWear Studios, 1997.

KIRK, O. **Encyclopedia of Chemical Technology. Silica**. Volume 21: p 977-1005 Fourth Edition. A Willy Interscience Publication. John Wiley Sons. Inc. 1997

LEWIS, H.; GERTSAKIS, J. **Design + environment: a global guide to designing greener goods**. Sheffield: Greenleaf Publishing, 2001.

LIMA, R. M. R.; ROMEIRO FILHO, E. **A reciclagem de materiais e suas aplicações no desenvolvimento de novos produtos—um estudo de caso**. In: Anais do 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento do Produto. 2001.

LUZ, A. B. et al. **Caulim: um mineral industrial importante**. In: CNPq Serie Estudos e Documentos. CETEM, 1993.

MAIA, S. B. **O vidro e sua fabricação**, Rio de Janeiro, 2003.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: Os requisitos Ambientais dos Produtos Industriais**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

MARI, E. A. **Los Vidrios: propiedades, tecnologias de fabricación y aplicaciones**, Buenos Aires, 1982.

MERLEAU-PONTY, M. **Fenomenologia da Percepção**. São Paulo: Martins Fontes, 1994.

NASCIMENTO, L.S. **A transmissão de informação contida nas superfícies de revestimento cerâmico dotadas de textura tátil** 2017.

NAVARRO, J. M. F. **El Vidrio**. Consejo Superior de Invest. Científicas - Fundación Centro Nacional del Vidrio, Madrid, Espanha 1991.

KULCSAR, F. N. **Sílica : manual do trabalhador**. São Paulo: Fundacentro, 2010.

NORMAN, D. A. **Design emocional: por que adoramos (ou detestamos) os objetos do dia-a-dia**. Rocco, 2008.

OLIVEIRA, C. L. E. DE. **Obtenção de revestimento cerâmico a partir da mistura de argila plástica com resíduos de caulim, da esmeralda, chamote de telha e cinza vegetal.** Natal, RN: 2012. 149 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ciência e Engenharia de Materiais.

PARTYKA, J.; GAJEK, M.; GASEK, K. **Effects of quartz grain size distribution on the structure of porcelain glaze.** *Ceramics International*, v. 40, n. 8, p. 12045-12053, 2014.

PEREIRA, V. S. **Utilização de Resíduos de Vidros Planos como Filler em Misturas Asfálticas** – Avaliação das Propriedades Físico-Químicas e Mecânicas, 2008.

PHAM, D.T., DIMOV, S.S., **Rapid Manufacturing**, 1 ed., London, Springer-Verlag, 2001.

PILKINGTON. **Architectural projects magazine.** Pilkington IGP Sp. z o.o. 18 Wołoska Str. 02-675 Warsaw, Poland. 2016.

PILKINGTON. **A História do vidro plano no Brasil.** Disponível em: <<http://www.pilkington.com/the+americas/brazil/portuguese/about+pilkington/history+of+float+in+brazil/default.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

PNRS. **Política Nacional De Resíduos Sólidos.** Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso em 10 de janeiro de 2019.

PORTO BELLO Cerâmicas. Cobogós. Disponível em: <<http://www.portobello.com.br/blog/cobogo-tendencia-na-arquitetura/>> Acesso em 20 de maio de 2017.

QUIRINO, L. B. **Caracterização e Processamento de Resíduos Vítreos Visando a Reciclagem no Município de Campina Grande – PB.** Dissertação de Mestrado. Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

RACHADEL, P. L. **Selantes vitrocerâmicos para células a combustível de óxido sólido.** Florianópolis, SC: 2010. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

RAWLINGS, R. D.; WU, J. P.; BOCCACCINI, A. R. **Glass-ceramics: Their production from wastes-A Review.** *Journal of Materials Science*, v. 41, n. 3, p. 733–761, 2006.

RECICLOTECA. Centro de Informações sobre Reciclagem e Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.recicloteca.org.br>> Acesso em 10 de maio de 2014.

ROCHA, S. P. B.; ESTIVAL, K.; SILVA, G. G. A. **Aspectos logísticos ambientais na aquisição de insumo reciclável de uma indústria de reciclagem de vidro.** Universidade Federal de Pernambuco/UFPE. 2002.

RONDON, L. Site ARQuitetônico Beta. Disponível em <<http://portalarquitetonico.com.br/o-vidro-e-sua-aplicacao-na-construcao-civil>> Acesso em: 20 nov. 2014.

SANTOS, F. A. **O Design como Referencial Competitivo.** Itajaí: Univali, 2000.

SCHIFFERSTEIN, HENDRIK. **Materials Experience, Fundamentals of Materials and Design**, 2014, Pag. 15–26.

SCHNEIDERA, J., SCHULAA, S., WEINHOLDB, W.P. **Characterisation of the scratch resistance of annealed and tempered architectural glass.** *Thin Solid Films*. Volume 520, Issue 12, 2 April 2012, Pages 4190–4198. 8th International Conference on Coatings on Glass and Plastics — ICCG8.

SCHUARTZ, E. M. **Manual de Vidraria Artesanal**, São Paulo, 2002.

SCHWARTZ, A. R. D. **Design de superfície: por uma visão projetual geométrica e tridimensional.** 2008. 200p. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – Universidade Estadual Paulista.

SCUDELLER, L. A. M. et al. **Processo para obtenção de vidro negro e vitrocerâmica escura a partir de escória de aciaria.** 04 jun. 2002.

SHELBY, J. E. **Introduction of Glass Science and Technology.** 2nd Edition, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2005.

SIEVERT, T., WOLTER, A., SINGH, N.B., **Hydration of anhydrite of gypsum (CaSO₄.II) in a ball mill.** *Cem. Concr. Res*, 2005.

STRATASYS, <http://www.stratasys.com>, Acesso em maio de 2016.

THWAITES, A. **Mould making for glass**. A & C Black, 2011.

TISCHNER, U.; et al. **Sustainable solutions: developing products and services for the future**. Sheffield: Greenleaf Publishing, 2001.

USP, Santos Andréia Romano dos. **Vidro**. Departamento de Construção Civil (DCC). Disponível: < <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/vidro.htm>>. Acesso em: 03 mai. 2018.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciências dos Materiais**. 12ª reimpressão. São Paulo.: Editora Edgard Blücher Ltda, 1998

VASQUES, R. A., ROCHA, V.C, FERNANDES, D.M.P. **Vidro Reciclado Aplicado a Revestimentos Cerâmicos**. In: 51 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2007. Anais. Bahia, Volume 1, Brasil, 2007.

VELOSO, I. T. **Desenvolvimento de pastilhas vítreas para revestimento a partir da reciclagem de vidros sódico-cálcicos**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) UFCG, CCT, 2016.

WEISZFLOG, W. **Michaelis: moderno dicionário da língua portuguesa**. São Paulo: Companhia Melhoramentos, p.757, 2001

WIGGINTON, M. **Glass in Architecture**, editora Phaidon 1996.

ZANOTTO, E.D. **Vidro: Ciência, Tecnologia e Emprego no Brasil no Limiar do Terceiro Milênio**. 1998.

ZUHAIMI, N.A.S., INDRAN, V.P., DERAMAN, M.A., MUDRIKAH, N.F., MANIAM, G.P., TAUFIQ- YAP, Y.H., RAHIM, M.H.A., **Reusable gypsum based catalyst for synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea**. Appl. Catal. A General 502. 2015