



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO
RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO BLINDEX® PARA
PRODUÇÃO DE UM REVESTIMENTO ECOLÓGICO**

MAYARA FATTAH PEREIRA

Campo Grande – MS
06 de março de 2020

INSTITUTO DE FÍSICA- INFI
Cidade Universitária | Unidade 5 |
Fone 67 3345 7485
79070-900 | Campo Grande | MS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO
RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO
BLINDEX® PARA PRODUÇÃO DE UM
REVESTIMENTO ECOLÓGICO**

MAYARA FATTAH PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS – Instituto de Física - INFI, para obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.
Área de concentração: Física e Química de Materiais.

Campo Grande – MS
06 de março de 2020

AGRADECIMENTOS:

À UFMS pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Ao corpo docente e técnico do programa de pós-graduação em Ciência dos Materiais, pelos ensinamentos que colaboraram para concretização desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza, pela atenção, paciência e ensinamentos. Conhecimento este, que levarei para o resto vida.

À minha mãe, Fátima, pelo incentivo aos estudos desde sempre.

Ao meu esposo, Régis, por estar presente em todo o período do mestrado com incentivo, compreensão e amor.

Ao meu amigo, Wallace, que me ajudou inúmeras vezes ao longo desses quase dois anos.

A LM Vidros por fornecer a matéria prima que gerou esse trabalho.

E a todos que direta e indiretamente contribuíram de alguma forma para realização do meu trabalho, obrigado a todos e desejo o melhor.

“Que nada nos defina,
Que nada nos sujeite.
Que a liberdade seja a nossa própria substância,
Já que viver é ser livre.”

Simone de Beauvoir

RESUMO:

As organizações mundiais têm se reunido e mostrado grande interesse com os problemas envolvendo danos ambientais. Na área de materiais, o vidro representa um dos materiais mais utilizados e aplicados em todos os setores tecnológicos e principalmente na construção civil. Este trabalho tem como objetivo geral estudar e caracterizar amostras de resíduos de pó de vidro Blindex® obtidos da indústria LM Vidros Temperados, situada em Campo Grande – MS. O resíduo utilizado no estudo trata-se de uma lama advinda do processo de lapidação para fabricação de vidros planos. A lama colhida na LM foi desidrata por 24h a uma temperatura de 100 °C, em seguida foram prensadas sob uma carga de 5 ton/cm², obtendo pastilhas com dimensões na ordem de 1.2 cm de diâmetro e espessura 0,8 cm, outros corpos de prova foram processados utilizando uma prensa hidráulica com capacidade de 150 ton/cm², resultando em amostras com 10cm x 15cm x 2cm (largura x comprimento x espessura). Todas as amostras foram submetidas a sinterizações em diferentes temperaturas com fluxo de gás inerte. Os resultados da análise de fluorescência nos pós de vidro precursores foram enviados pela Indústria LM, apresentando a composição dos pós do resíduo como elemento principal o óxido de silício, seguido pelos óxidos de cálcio, sódio, magnésio, alumínio, ferro. Foram realizadas as análises de difração de raios-X da amostra como recebida, a qual apresentou característica de uma estrutura padrão amofa, mas após o processo de sinterização foi observado os picos característicos de cristais de Calcita, Cristobalita, Quartzo e baixo Óxido de Silício. As análises de microscopia eletrônica de varredura mostraram uma distribuição homogênea das partículas com tamanhos na ordem de 30µm e uma pequena concentração de poros antes da sinterização, após os processos de sinterização observou uma diminuição na densidade de poros em função da temperatura. Os corpos de prova foram submetidos ao teste mecânico de rompimento por flexão e os resultados mostraram que os corpos de prova sinterizados em 350°C, 550° e 600°C apresentaram os melhores módulos de ruptura. Os resultados mostraram a necessidade de obter novos parâmetros de sinterização de forma obter materiais com propriedades físico-química que poderão ser aplicados na construção civil.

LISTA DE FIGURAS:

Figura 01: Capacidade Nominal de produção de vidros planos (t/dia). [12,13]	19
Figura 02: Porcentagem de produção separado por tipo de vidro em 2018 (m2). [12,13]	20
Figura 03: Formação dos vidros onde T_e : Temperatura de estabilização, T_g : Temperatura de transição vítrea e T_f : Temperatura de fusão [5]	27
Figura 04: Intervalo da transição vítrea em que β é a taxa de resfriamento onde $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$. [39]	29
Figura 05: Unidade básica da rede de sílica. [44]	31
Figura 06: Ions sodio na estrutura dos silicatos. [5]	31
Figura 07: Representação da distribuição dos átomos de silício e oxigênio, no caso da sílica cristalina. [44]	32
Figura 08: Representação da distribuição dos átomos de silício e oxigênio, no caso da sílica cristalina. [44]	33
Figura 09: Ilustração Revestimento Ecológico Rivesti [71]	38
Figura 10: Fluxograma da metodologia utilizada	42
Figura 11: Material antes (a) e depois (b) da secagem.	40
Figura 12: PVS e destorroado.	41
Figura 13: a) Prensa Marcon e b) Pastilha prensada (PP).	43
Figura 14: Representação do processo de sinterização. [61]	44
Figura 15: Forno mufla EDG10P-S para sinterização.	44
Figura 16: Representação do penetrador do método Vickers. [65]	45
Figura 17: Representação da impressão do método Vickers. [65]	46
Figura 18: (a) Representação da matriz e (b) prensa.	47
Figura 19: (a) CP e (b) representação do CP de PVS com suas dimensões aproximadas	47
Figura 20: Detalhe do posicionamento do corpo de prova no ensaio de flexão por 3 pontos.	49
Figura 21: Prensa Emic modelo DL10000.	49
Figura 22: Estrutura molecular do vidro sodo-cálcico. [44]	51

Figura 23: (a)Imagem do MEV do PVS com ampliação de 200X. (b) PVS com ampliação de 2000X	53
Figura 24: (a)Imagem do MEV da pastilha de PVS com ampliação de 200X. (b) Imagem do MEV da pastilha de PVD com ampliação de 2000X.	53
Figura 25: Representação da localização das impressões nas pastilhas.....	54
Figura 26: Imagens dos CPs em diferentes temperaturas de sinterização	55

LISTA DE TABELAS:

Tabela 01: Porcentagens das composições típicas dos vidros mais comuns [5].....	35
Tabela 02: Porcentagens das composições típicas dos vidros especiais. [5].....	36
Tabela 03: Composição química do PSV (% em porcentagem)	51
Tabela 04: Resultados dos ensaios de microdureza Vickers.....	54
Tabela 05: Identificação dos corpos de prova com suas respectivas temperaturas de sinterização, massa inicial e final, onde: MEA (1) é Massa Específica Aparente Inicial, MEA (2) é Massa Específica Aparente Final e PF: Perda de Massa Final.....	56
Tabela 06: Índice de Absorção de Água.	64

LISTA DE GRÁFICOS:

Gráfico 01: TG do pó de vidro.	52
Gráfico 02: MEA e perda de massa em função da temperatura de sinterização, dos corpos de prova.....	56
Gráfico 03: Raio-X do Pó de vidro sem sinterizar.	57
Gráfico 04: Difratoograma do Pó de vidro sinterizada em 300 °C.	58
Gráfico 05: Difratoograma do Pó de vidro sinterizado em 350 °C.	59
Gráfico 06: Difratoograma do Pó de vidro sinterizado em 450 °C.	60
Gráfico 07: Difratoograma do Pó de vidro sinterizado em 550 °C.	61
Gráfico 08: Difratoograma do Pó de vidro sinterizado em 600 °C.	62
Gráfico 09: Módulo de Ruptura à Flexão (MRF) em função da temperatura de sinterização dos CP.....	63

SUMÁRIO:

1	INTRODUÇÃO:.....	11
2	OBJETIVOS:.....	13
2.1	Objetivo Geral:.....	13
2.2	Objetivo Específico:.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:.....	14
3.1	O Histórico e o Processo Produtivo:.....	14
3.2	O Vidro no Brasil: História, Capacidade Produtiva e Reciclagem:.....	15
3.3	Definição do Vidro:.....	24
3.4	Transição Vítreo:.....	26
3.5	Estrutura do Vidro:.....	30
3.6	Composição do Vidro:.....	33
3.7	Principais Tipos de Vidros:.....	35
3.8	Revestimento Ecológico:.....	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS:.....	40
4.1	Pó de Vidro.....	41
4.2	Fluorescência de Raios-X.....	42
4.3	Difração de Raios-X.....	43
4.4	Análises Termogravimétricas (TG - DSC).....	43
4.5	Preparação das Amostras:.....	44
4.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):.....	45
4.8	Análise de Microdureza Vickers:.....	46
4.9	Prensagem da Amostra:.....	47
4.10	Absorção de Água - AA(%):.....	48
4.11	Análises de Resistência a Flexão:.....	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES:.....	51
5.1	Fluorescência de Raios X:.....	51
5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	53
5.3	Difração de Raios X:.....	58
5.4	Análise Termogravimétrica por TG E DSC:.....	52
5.5	Microdureza Vickers:.....	55
5.6	Análises de Resistência a Flexão:.....	64
5.7	Absorção de Água:.....	64
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	67

1 INTRODUÇÃO:

Os vidros são utilizados em vários segmentos, tanto no cotidiano quanto em indústrias, desde frascos para laboratórios, farmácias e até para acondicionar alimentos, como para as janelas de carros e casas. Isso é devido as suas características e da ampla capacidade de ajustes as diversas áreas.

Os vidros são constituídos por silicatos não-cristalinos que também contêm outros óxidos em sua composição, como CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 , tais óxidos influenciam em suas propriedades como fluidez, durabilidade, coloração entre outras.

Nos últimos anos estudos foram efetuados no âmbito da substituição parcial de materiais convencionais, por resíduos de diversas indústrias. Tal fato tem alertado as indústrias para o desenvolvimento de alternativas tecnológicas, ao nível do processamento e até mesmo do consumo de matérias primas, a fim de poupar recursos para as gerações futuras e preservar o ambiente. Em alguns casos, surgiu a oportunidade de desenvolver novos materiais e produtos, com características físicas e mecânicas semelhantes ou até mesmo superiores quando comparadas aos materiais e produtos convencionais.

O vidro na forma de pó é um rejeito industrial que não pode ser reaproveitado no próprio processo, pois o pó quando misturado as matérias-primas para a produção do vidro é suspenso ao ar devido à ação de queimadores, que sopram sobre os constituintes da mistura para que ocorra a fusão dos mesmos. O pó de vidro também pode gerar bolhas no material, devido ao grande volume de ar adsorvido nas superfícies das partículas [2,3].

Contudo, a reciclagem de resíduos, assim como qualquer atividade humana, também pode causar impactos ao meio ambiente. Variáveis como o tipo de resíduo, a tecnologia empregada, e utilização proposta para o material reciclado, podem tornar o processo de reciclagem ainda mais impactante do que o próprio resíduo que era antes de ser reciclado. [4].

Tendo em vista a relevância do tema, este trabalho visa dar um destino ambientalmente correto ao resíduo do pó de vidro, realizando o processamento e a

caracterização do resíduo com a proposta de obtenção de um revestimento ecológico.

2 OBJETIVOS:

2.1 Objetivo Geral:

Este trabalho tem por objetivo geral estudar e caracterizar amostras de resíduos de pó de vidro Blindex[®], gerado na forma de lama proveniente da etapa de lapidação da fabricação de vidros planos, visando avaliar o seu potencial de emprego, como revestimento ecológico, voltado para a construção civil.

2.2 Objetivo Específico:

- Processamento e desidratação do pó de vidro precursor;
- Prensagem e obtenção de corpos de prova;
- Análise termogravimétrica (TG);
- Processo de sinterização em diferentes temperaturas em fluxo de gás inerte;
- Análises e caracterização de difratometria de Raio-x;
- Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Caracterização da microdureza Vickers;
- Medidas e análises da resistência à flexão de corpos de prova sinterizados em diferentes temperaturas;
- Analisar a absorção de água e densidade do compósito obtido após cada processo de sinterização.
- Identificar a potencialidade do resíduo do pó de vidro, processado e caracterizado, como revestimento ecológico voltado para a construção civil.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

3.1 O Histórico e o Processo Produtivo:

A data de invenção do processo de fabricação do vidro não é conhecida. Todavia, o vidro já era utilizado pelos nossos ancestrais na Idade da Pedra sob sua forma natural, que é uma rocha vulcânica, conhecida pelo nome de “Obsidiana”. Foi utilizada para a fabricação de pontas de lança, de flechas e facas. Essas peças feitas de obsidiana têm sido encontradas nas mais diferentes partes do mundo, como Patagônia, México, Estados Unidos, Europa e Ásia [5].

Até 1500 a.C., o vidro tinha pouca utilidade prática e era empregado principalmente como adorno. A partir desta época no Egito iniciou-se a produção de recipientes da seguinte maneira: a partir do vidro fundido faziam-se filetes que eram enrolados em forma de espiral em moldes de argila. Quando o vidro se esfriava tirava-se a argila do interior e se obtinha um frasco, que pela dificuldade de obtenção era somente acessível aos muito ricos [6].

No entanto, foram os babilônios que impulsionaram a fabricação do vidro ao inventarem, no século II a.C., o ferro de assoprar, instrumento que permite moldar o material no formato desejado. Na Roma antiga, pequenos pedaços de vidro de cores diferentes eram cortados e colados juntos, formando mosaicos. Essa técnica tornar-se-ia a base da famosa produção veneziana, que, a partir do século XIII, elevou a utilização de vidro a uma nova categoria artística [7].

Apreendeu-se mais a respeito do vidro e de seu processamento nos últimos 30 anos que durante toda a história precedente da tecnologia. Os vidros são hoje utilizados em quase todos os aspectos das atividades humanas; em casa, na ciência, na indústria e mesmo em arte, pois eles podem ser ajustados as suas finalidades [6].

O processo do vidro float foi desenvolvido pela Pilkington em 1952 e é padrão mundial para a fabricação de vidro plano de alta qualidade. Este processo, produz atualmente vidros que variam entre 1,8 e 19 mm. As matérias-primas são misturadas com precisão e fundidas no forno. O vidro fundido, a aproximadamente

1600°C, é continuamente derramado num tanque de estanho liquefeito. Ele flutua no estanho, espalhando-se uniformemente [8,9].

3.2 O Vidro no Brasil: História, Capacidade Produtiva e Reciclagem:

As primeiras peças de vidro fabricadas no Brasil, foram produzidas por vidreiros holandeses que aqui chegaram com Mauricio de Nassau, que conquistou a região onde hoje é Pernambuco, e aqui permaneceu de 1624 até 1635. Com a expulsão dos holandeses, a nascente indústria do vidro desapareceu [5].

Foi em Salvador, em 1810, que surgiu a primeira fábrica de vidros, montada por Francisco Inácio de Siqueira Nobre, com a devida autorização do Regente D. João recém-chegado no Brasil. As notícias são incertas. Dão conta que a Real Fábrica de Vidros da Bahia – feita à imagem e semelhança da Real Fábrica da Marinha Grande criada em Portugal algumas décadas antes – começou logo a entregar os primeiros vidros. Mas não teria tido vida longa, atingida pelos conflitos e combates da Independência, muito acesos na Bahia (Pilkington) [10].

Durante o século XIX, várias tentativas foram feitas para a instalação de fábricas de vidro. Algumas falharam e outras conseguiram vingar, e em 1861 a indústria brasileira já apresentou artigos de vidros nacionais em uma Exposição Nacional [5].

Na Exposição Nacional de 1861 – “1ª Exposição Nacional de Produtos Naturais e Industriais” – promovida pelo governo imperial no Rio de Janeiro para mostrar aos estrangeiros que o Brasil não produzia só açúcar, café, algodão, cacau, couros e carnes salgadas, foi exibida boa variedade de produtos manufaturados. Entre os vidros, apenas alguns tipos bem simples de garrafas, garrafões, frascos e globos para lampiões. Eram fabricados por pequenas manufaturas de vidreiros portugueses, herdeiros da cultura e da formação técnica da fábrica da Marinha Grande, ou por artesãos italianos que começavam a chegar com as primeiras levas de imigrantes europeus. De vidro cristal, nada [10].

No fim do século XIX, pode-se dizer que, efetivamente foi introduzida a fabricação de vidro em moldes industriais através de Francisco Antônio Esberard. Nessa indústria, com a modernização dos processos fabris, eram fabricados desde

garrafas até serviços de mesas em cristal com qualidade comparável ao produto europeu. Em São Paulo, em 1895 foi fundada a Vidraria Santa Marina para a produção de garrafas [5].

A fabricação do vidro brasileiro cresceu após a Revolução de 30, liderada por Getúlio Vargas, e foi intensificada pela conjuntura mundial da época, centralizada nos problemas deflagrados pela 2ª Guerra Mundial [11].

Inicialmente o vidro não era considerado um insumo essencial para o país, muito pelo contrário, era classificado como um artigo supérfluo, com taxas de até 40% na importação; mesmo sem uma produção interna suficiente, o mercado possuía grande interesse em explorar tal negócio, visto que pelo seu potencial de consumo, vislumbrava um futuro promissor. Quando houve então a intensificação da 2ª Guerra Mundial, a conjuntura do mercado tornou-se favorável para a produção do vidro nacional, visto que a Europa, principal exportadora de vidro para o Brasil, não conseguia manter sua produção e de certa forma passou a ser importadora de vários produtos, não só do vidro [11].

Foi fundada em 1942 a Companhia Vidreira Nacional Covidra, instalada em São Gonçalo, na época distrito de Niterói, no estado do Rio de Janeiro, cujo objetivo principal era aproveitar a disponibilidade de areias de boa qualidade no local para fornecer vidro plano para a Capital Federal, na época a cidade do Rio de Janeiro, e toda a baixada fluminense [11].

Quase ao final da guerra, em São Paulo, mais especificamente na Barra Funda, os proprietários da Vidraria Santa Marina criaram a Companhia Paulista de Vidro Plano, CPVP, com o objetivo inicial de produzir garrafas; a nova fábrica produziria vidro para o mercado da capital paulista, para o interior do estado e regiões vizinhas [11].

Em 1953 fundiu-se a Covidra e CPVP resultando na criação das Indústrias Reunidas Vidrobrás, com o intuito de produzir vidro para todo o Brasil.

Desde então, com a crescente industrialização do Brasil, inúmeras fábricas de vidro foram sendo implantadas, principalmente em São Paulo [5].

Um dos setores que mais progrediu foi o da fabricação do vidro plano, isto porque, os seus principais consumidores são as indústrias automobilística e da construção civil que cada vez usam mais o vidro nas suas obras [5].

A Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (Abravidro) é uma entidade de classe sem fins lucrativos que reúne empresas do setor vidreiro de todo o País, além de sindicatos e associações regionais [12,13].

Fundada em 1990, a Abravidro trabalha pelo desenvolvimento do setor vidreiro do Brasil e acompanha de perto a evolução do material e de seu uso nos segmentos de construção civil, automobilístico moveleiro, decoração e linha branca [12,13].

A Abravidro criou, em 2012, o Panorama Abravidro. O documento é publicado anualmente e traz dados atualizados do mercado brasileiro, incluindo informações sobre as indústrias de base e de transformação, assim como os números da produção de vidro no País, faturamento, balança comercial internacional, entre outras. Para se chegar aos dados divulgados no documento, a Abravidro convida empresas a participarem de uma pesquisa. Os resultados são consolidados pela GPM Consultoria Econômica, contratada para apurar as informações do setor e relacioná-las com a Pesquisa Industrial Anual do IBGE, números oficiais de importação e exportação do governo, além de declarações da indústria de base à revista O Vidroplano [12,13].

Segundo os dados fornecidos pelo Panorama Abravidro, 2018 mudou a dinâmica do setor, num movimento que parece indicar o início da retomada das atividades vidreiras. Após três anos de queda na produção de vidros processados e, conseqüentemente, no faturamento do setor, registrou-se um aumento de 1,9% no volume produzido e de 8% no faturamento. Isso confirma as expectativas do empresariado coletadas pela pesquisa no início do ano. Os percentuais são positivos, mas, ao olhar os números brutos, o choque é inevitável: voltamos aos níveis de 2012 e 2009, respectivamente [12,13].

A indústria de vidros é dividida em quatro segmentos de acordo com o produto fabricado: plano, embalagem, doméstico e “vidros especiais/técnicos” (por

exemplo vidros que receberam tratamento para ter proteção termoacústica). Dados de 2011 mostram que do total produzido, os vidros planos corresponderam por 51%, as embalagens por 36%, os vidros especiais por 5,5% e os domésticos por 8% [14].

Quatro grandes grupos multinacionais dominam o mercado mundial: as japonesas AGC e NSG, a francesa Saint-Gobain e a norte-americana Guardian. Em 2014, o mercado mundial de vidro plano atingiu cerca de 65 milhões de toneladas em 2014. A China, Europa e América do Norte respondem por 70% da demanda mundial. No Brasil, a produção de vidros planos está dividida em 6 grandes empresas listadas a seguir [15]:

- CEBRACE: líder de mercado no segmento brasileiro de vidro plano e a maior produtora de vidros e espelhos da América do Sul. É uma joint-venture entre a Saint-Gobain e a NSG/Pilkington. Possui cinco linhas em funcionamento. Anunciou a construção da nova fábrica na cidade de Camaçari (BA) – a C6 - com capacidade de produção de 800t de vidro por dia. Atua com uma gama variada de produtos, abrangendo tanto a demanda da construção civil e da indústria automobilística quanto às necessidades das linhas de produção de eletrodomésticos e móveis [15];
- GUARDIAN: empresa americana presente em 25 países. Especializada em vidro plano, resistente e com desempenhos térmicos, largamente utilizados na construção civil em janelas, portas, vidraças e fachadas inteiras de prédios, além de mobiliário de design moderno [15];
- AGC: empresa japonesa que fabrica vidros para aplicação solar: espelhos para concentração de energia solar, painéis fotovoltaicos (focados em geração de eletricidade) e painéis termo solares (produção de águas aquecível fotovoltaica), além de uma gama de vidros automotivos: para-brisas, janelas laterais, traseiras (vigias), tetos panorâmicos. A empresa fabrica também materiais com características avançadas, como os para-brisas aquecidos, com proteção UV e infravermelho e displays [15];

- VIVIX: antiga Companhia Brasileira de Vidros Planos – CBVP é a única empresa de origem brasileira, pertencente ao Grupo Cornélio Brennand. Localizada no município de Goiana (PE). Produz vidros incolores, coloridos, laminados e espelhos, tendo como principais clientes as indústrias da construção civil e moveleira [15];
- SAINT GOBAIN GLASS: francesa, que desenvolve a partir do vidro float fabricado pela Cebrace, vidros laminados, refletivos de controle solar, vidros duplos, serigrafados, temperados, automotivos, espelhos, entre outros [15];
- UBV - União Brasileira de Vidros: empresa brasileira de vidro plano impresso, possui uma gama de produtos diferenciados, destinados aos mercados de decoração e construção civil com diferentes tipos de aplicação, tais como esquadrias, boxes de banheiro, portas, divisórias, móveis e molduras [15].

Figura 01: Capacidade Nominal de produção de vidros planos (t/dia). [12,13]

*A AGC iniciou a produção de vidros em seu segundo forno, o Guará 2, em maio de 2019.

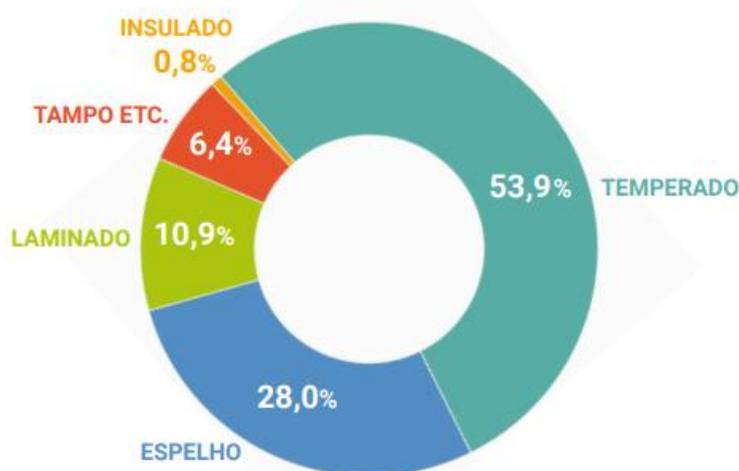
** A UBV parou seu forno em abril de 2018, a data que anunciou o fim das suas atividades.

Produtor	Planta	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
CEBRACE	C1	900	900	900	900	900	900	900	900
	C2	600	600	600	600	600	600	600	600
	C3	600	600	600	600	600	600	600	600
	C4	600	600	600	600	600	600	600	600
	C5	900	900	900	900	900	900	900	900
AGC	Guará 1	-	600	600	600	600	600	600	600
	Guará 2	-	-	-	-	-	-	-	850*
GUARDIAN	RJ	600	600	600	600	600	600	600	600
	SP	800	830	830	830	830	800	800	800
VIVIX	PE	-	-	900	900	900	900	900	900
SAINT-GOBAIN GLASS	SP	160	180	180	180	180	180	180	180
UBV	SP	240	240	240	240	240	240	**	-
Total		5.400	6.050	6.950	6.950	6.950	6.920	6.680	7.530

Conforme os dados apresentados na figura 01 acima a capacidade dos seis fabricantes de vidro float e impresso, em 2019, ultrapassa as 7500 t/dia. Salientando, entretanto, que a capacidade produtiva total dos fornos geralmente não é atingida.

O vidro temperado consolida ano a ano sua participação como o principal produto entre os processados não automotivos, sendo responsável por mais da metade da produção nacional [12,13].

Figura 02: Porcentagem de produção separado por tipo de vidro em 2018 (m²). [12,13]



A questão ambiental é hoje um fato presente no cotidiano de todas as pessoas. Diariamente, por meio de algum meio de comunicação, as pessoas defrontam-se com notícias sobre diferentes faces desta questão. Entretanto, esta situação não é nova; a novidade é a intensidade com que os problemas ambientais vêm ocorrendo. Conseqüentemente vive-se numa crise em relação aos resíduos sólidos urbanos que é produzido, pois ao mesmo tempo em que cresce o volume produzido, resultante do aumento do consumo, mais dispendiosas tornam-se as alternativas de disposição dos resíduos em aterros sanitários ou até mesmo em lixões [16].

Segundo Coelho, o consumo de embalagens de vidro, por exemplo, em garrafas de bebidas e recipientes que acondicionam alimentos, entre os brasileiros é de 12 kg por habitante por ano. Nos países europeus, tais como na França, o

consumo per capita pode chegar a 65 kg. No entanto a maior demanda do setor está concentrada na construção civil [17].

Há bastante tempo, para a preservação do meio ambiente, todos os esforços são dirigidos para a eliminação dos resíduos, que aparecem como resultado da produção de inúmeros produtos [5].

Esse problema é enfrentado de três maneiras: reduzindo o volume dos resíduos, reutilizando o que for viável e reciclando o máximo possível [5].

A Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é bastante atual e contém instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos [18,19].

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 (aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado) [18,19].

Institui a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos: dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o cidadão e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos na Logística Reversa dos resíduos e embalagens pré e pós-consumo [18,19].

Cria metas importantes que irão contribuir para a eliminação dos lixões e institui instrumentos de planejamento nos níveis nacional, estadual, microregional, intermunicipal e metropolitano e municipal; além de impor que os particulares elaborem seus Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. [18,19]

Também coloca o Brasil em patamar de igualdade aos principais países desenvolvidos no que concerne ao marco legal e inova com a inclusão de catadoras e catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis, tanto na Logística Reversa quando na Coleta Seletiva [18,19].

Em consequência das diversas possibilidades de aplicações do vidro, é gerado constantemente, uma grande variedade de resíduos. O vidro está presente no cotidiano das pessoas como em embalagens de conserva de produtos, utensílios domésticos, nos automóveis etc, podendo ser reaproveitado ou reutilizável por diferentes tecnologias [20].

De acordo com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 de julho de 2002 os reaproveitamentos dos resíduos em geral podem ser abordados em três pontos distintos [21]:

- Recuperação: O processo de recuperação compreende a etapa de extração e remoção de substâncias indesejáveis, eventualmente presentes nos resíduos e que podem comprometer o processo de reciclagem ou reutilização [21];
- Reutilização: Compreende o processo pelo qual se faz o reuso do resíduo, sem que haja qualquer tipo de transformação ou de beneficiamento do material [21];
- Reciclagem: Processo que consiste no aproveitamento do resíduo, sendo necessário, portanto, que o material sofra algum tipo de transformação; [21]

A reciclagem do vidro, sob forma de cacos e de resíduos em geral redonda em vários benefícios [5];

- Contribui para a proteção do meio ambiente porque diminui o volume dos lixões, retirando um material que não é perecível, que de outro modo lá permaneceria eternamente [5];
- Diminuição do processo de poluição do ar, da fauna, da flora etc [22];
- O aproveitamento do caco de vidro na fabricação do vidro reduz a poluição atmosférica, pois permite que os fornos operem a temperaturas mais baixas, reduzindo assim a emissão de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, ao mesmo tempo economizando até 22% no consumo de energia. Além disso, o trabalho em temperatura mais baixa resulta no aumento do período de vida útil dos fornos, pois o desgaste dos refratários é reduzido. O uso do caco permite que se reduza o consumo das matérias primas como a areia, a barrilha e o calcário.

Todas de custo mais alto que o caco, além de facilitar o processo de fusão e refino do vidro [5];

- Redução no consumo de recursos não renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados [23];
- Redução das áreas necessárias para o aterro, devido a diminuição do volume de resíduos produzidos [24];

A NBR 10004 classifica os resíduos de construção e demolição como inertes, não sendo considerados perigosos [25]. Porém, podem ocorrer importantes contaminações durante a fase de uso da construção, ou mesmo no manuseio posterior à sua utilização. Para garantir o funcionamento eficiente de uma usina de reciclagem é necessária uma triagem inicial do material coletado, retirando os materiais que não sejam da Classe A (alvenaria, concreto, argamassas e solos destinados à reutilização e reciclagem com uso na forma de agregados), evitando, assim, que materiais não recomendados para este processo se misturem ao material processado [26].

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2000), no Brasil são produzidos diariamente cerca de 126 mil toneladas de resíduos sólidos. Os dados relativos às formas de disposição final de resíduos sólidos distribuídos de acordo com a população dos municípios, indicam que 63,60% dos municípios brasileiros depositam seus resíduos sólidos em vazadouro a céu aberto (lixões), 13,80% informam que utilizam aterros sanitários e 18,40% dispõem seus resíduos em aterros controlados. Os 5% dos entrevistados restantes não declaram o destino de seus resíduos [27].

O Estado de Mato Grosso do Sul coleta uma quantidade diária de 1.756,5 toneladas de resíduos sólidos, sendo que 11% são destinados a aterros sanitários, 44,7% a aterros controlados, 42% a vazadouro a céu aberto (lixões), 1,45% estação de triagem e 0,88% outra forma (IBGE, 2000). Ou seja, Mato Grosso

do Sul, como muitos estados brasileiros, precisa avançar no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos [27].

A coleta seletiva dos resíduos sólidos é um sistema de recolhimento de materiais recicláveis, tais como papéis, plásticos, vidros e metais. Existem várias formas de se desenvolver um sistema de coleta seletiva de resíduo sólido, sendo que no município de Campo Grande são duas as modalidades praticadas, a porta a porta (ou domiciliar) e em locais de entrega voluntária (LEV). A coleta porta a porta é semelhante à coleta domiciliar convencional, porém, os veículos coletores percorrem as residências em dias e horários específicos que não coincidam com a coleta convencional. Os moradores colocam os recicláveis nas calçadas, acondicionados em qualquer recipiente ou embalagem. Atualmente apenas parte da capital conta com o sistema de coleta seletiva, sendo ampliado gradativamente, ano a ano [28].

O vidro pode ser reciclado ilimitadamente. No entanto, o processo da reciclagem do vidro implica em custos elevados seja pelo emprego intensivo de mão de obra ou ainda pelo aporte de grande quantidade de água ou de energia necessários para que o processo da reciclagem se complete [17].

O resíduo do vidro é um material que possui infinitas possibilidades de reaproveitamento e reutilização. Diferente de outros materiais, o resíduo de vidro possui um aproveitamento de 100% em sua reciclagem, ou seja, a quantidade de vidro descartado pelo homem pode ser totalmente reciclável simplesmente pelo processo de fusão [29].

3.3 Definição do Vidro:

Segundo FERNANDES, os vidros existem na natureza desde que se formou a crosta terrestre e o homem fez uso dele muito antes de produzi-lo [30].

O termo vidro se refere aos sólidos amorfos, que ao se fundirem tornam-se líquidos viscosos, e que ao serem resfriados se solidificam sem cristalizar [5].

George W. Morey define o vidro como: *“Uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substância, a qual tem como resultado uma mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, atingiu um alto grau de viscosidade de modo a ser para todos os fins práticos rígido.”* [31].

A American Society for Testing and Materials (ASTM, 2009), define o vidro como um produto inorgânico de fusão, que foi resfriado até atingir condição de rigidez, sem sofrer cristalização [32].

Os vidros são considerados materiais frágeis, embora, com o avanço tecnológico, eles podem ser mais resistentes e empregados em aplicações nunca antes imaginadas, por exemplo, as fibras óticas. A técnica de têmpera térmica é responsável pela alta resistência dos pára-brisas de automóveis, dos vidros balísticos e de lentes [6].

De acordo com Romano, 1998, o vidro é um material 100% reciclável e largamente utilizado em todo o mundo. Em geral é uma substância amorfa, inorgânica e fisicamente homogênea, obtida pelo resfriamento de uma massa em fusão que endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez [33].

Em ciência dos materiais o vidro é uma substância sólida e amorfa, que apresenta temperatura de transição vítrea [34].

Shelby (1997) define o vidro como um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea. Qualquer material inorgânico, orgânico ou metálico, formado por qualquer técnica, que exibe um fenômeno de transição vítrea é um vidro [35].

O vidro se apresenta como um sólido, não muda de forma, tem a mesma densidade dos cristais de igual composição e várias outras propriedades comuns aos cristais. Além disso, existe uma relação estreita entre o estado vítreo, o estado sólido e o estado líquido, como pode ser visto no gráfico 1 abaixo, que mostra a variação do volume com a temperatura numa substância que pode existir nesses três estados [5].

Os vidros são substâncias termodinamicamente instáveis, estruturalmente desordenadas, quimicamente complexas; apresentam-se de formas variadas e tecnologicamente com propriedades e aplicação muito diversas [36].

Por último a definição mais atual foi proposta pelo Prof.º Dr.º Edgar Dutra Zanotto: “ O vidro é um estado da matéria condensada fora do equilíbrio termodinâmico, não cristalino da matéria condensada, que exhibe uma transição vítrea. As estruturas dos vidros são semelhantes às dos seus líquidos super-resfriados (LSR) e relaxam espontaneamente em direção ao estado de LSR. Seu destino final, para tempos infinitamente longos, é cristalizar” [69].

3.4 Transição Vítrea:

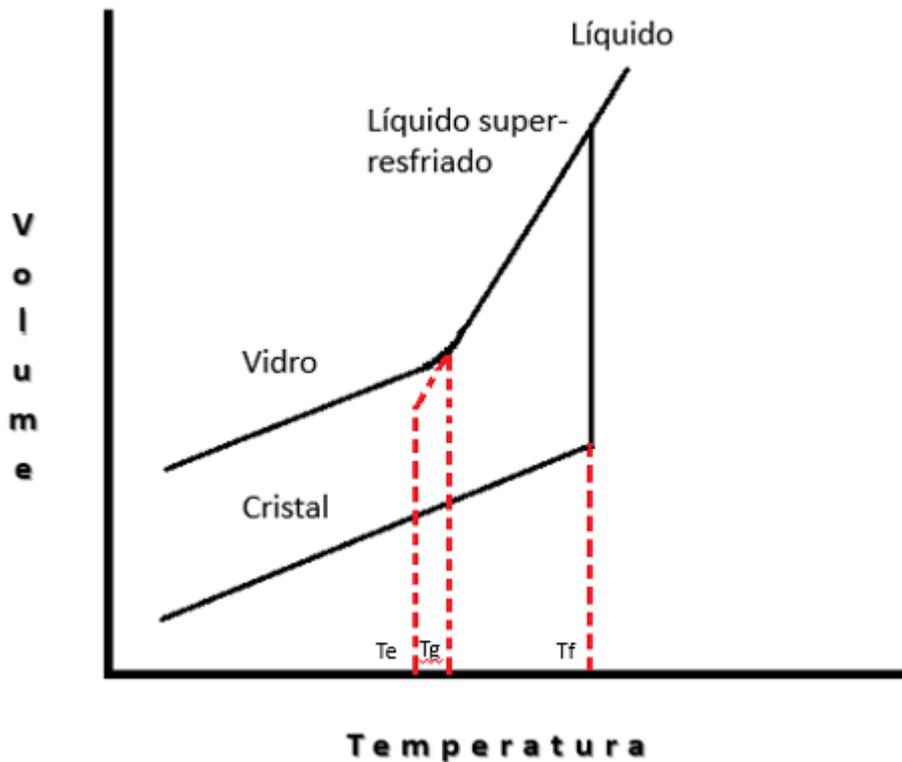
Sob a ampla denominação genérica dos vidros ou de corpos vítreos, esta compreendida uma grande variedade de substâncias que, embora à temperatura ambiente tenham a aparência de corpos sólidos proporcionada por sua rigidez mecânica, não podem se considerar como tais, já que carecem da estrutura cristalina que caracteriza e define o estado sólido. Se pela estabilidade de sua forma os vidros podem assimilar-se a sólidos, do ponto de vista estrutural suas semelhanças são muito menos evidentes. Este fato que constitui uma limitação para incluir os vidros entre os sólidos, por outro lado resulta insuficiente para autorizar a aceitá-los como líquidos, ainda que possa justificar a designação de líquidos de viscosidade infinita, que em muitas vezes é aplicado [6].

A dificuldade para se enquadrar adequadamente os corpos vítreos dentro de um dos três estados de agregação da matéria, deu lugar a se pensar em integrá-los em um quarto estado de agregação: o estado vítreo. Esta sugestão, entretanto, nunca chegou a ter uma aceitação generalizada [6].

Outros consideram o vidro um sólido não cristalino, ou um sólido amorfo. Um material é amorfo quando ele não apresenta ordem a longas distâncias, isto é, quando não há regularidade dos seus constituintes moleculares em uma escala superior a algumas vezes o tamanho destes grupos. Por exemplo, a

distância média entre átomos de silício em sílica vítrea (SiO_2) é cerca de $3,6 \text{ \AA}$, e não há ordem entre estes átomos a distâncias superiores a cerca de 10 \AA [6].

Figura 03: Formação dos vidros onde T_e : Temperatura de estabilização, T_g : Temperatura de transição vítrea e T_f : Temperatura de fusão [5].



Todo material possui uma temperatura característica de fusão; por exemplo, a da água é $0 \text{ }^\circ\text{C}$, a do alumínio $660 \text{ }^\circ\text{C}$, do mercúrio é $-38 \text{ }^\circ\text{C}$, e assim por diante. Isto significa, que acima de sua temperatura de fusão (T_f) o estado em que o material vai estar é o líquido e abaixo é o sólido [5].

Na figura 03, verificamos que no caso dos cristais, pelo aumento da temperatura o volume aumenta até a T_f . Enquanto o cristal está fundindo, a temperatura de fusão permanece constante, pois o calor fornecido é consumido no processo de fusão (calor latente de fusão). Após a fusão completa da massa, o volume continua a aumentar com a temperatura. Partindo agora do lado da alta temperatura no gráfico, verificamos que por resfriamento a massa fundida ao chegar a T_f pode se solidificar voltando ao estado cristalino, com uma

transformação descontínua no seu volume, ou pode continuar como um líquido super resfriado [5].

A ocorrência do líquido super-resfriado é possível pela ausência de núcleos de cristalização. Em uma temperatura mais baixa, a curva volume x temperatura mostra um desvio e muda de inclinação, mas essa nova inclinação é igual a inclinação da curva do cristal. A temperatura que ocorre a mudança de inclinação da curva, não é termodinamicamente definida, é chamada de temperatura de transição vítrea (T_g) [5].

Segundo Alves et. Al., (2001), a temperatura de transição vítrea, T_g é uma temperatura característica para os vidros, definindo a passagem do estado vítreo para o estado viscoelástico, através da chamada relaxação estrutural (rearranjo intermolecular para um estado de menor energia). Os conceitos de estado vítreo e viscoelástico são emprestados da Reologia (estudos das propriedades associadas à fluidez) [37,38].

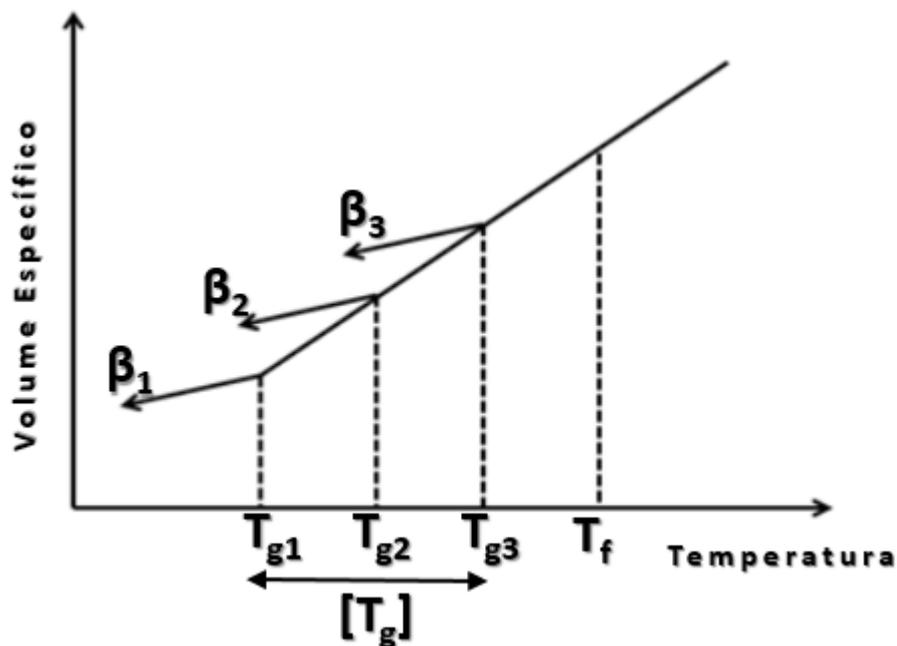
Abaixo de T_g não temos mais um líquido, mas sim um vidro. Pelo gráfico 01 acima verificamos que o volume do vidro, a uma certa temperatura, é maior que o volume do cristal que o originou nessa mesma temperatura, indicando que no vidro a estrutura é mais aberta que no cristal, onde esta é mais compacta. Abaixo de T_g , a curva não é mais uma curva de equilíbrio, porém se o esfriamento for interrompido e a temperatura mantida em T_e , por exemplo, o vidro vai se contrair lentamente (como indicado pela seta) até seu volume corresponder a um ponto da curva de equilíbrio [5].

Esse processo é conhecido como “estabilização”. Na prática não se consegue esse efeito porque isso demandaria um tempo muito grande. Sempre é observado esse desvio quando a temperatura é baixada suficientemente [5].

Nesse caso, o líquido super-resfriado mantém a mesma taxa de contração volumétrica do líquido inicial. À medida que a temperatura decresce, há um aumento contínuo da viscosidade e a uma determinada temperatura T_g (que corresponde a uma viscosidade de 1013 Pa.s) ocorre uma mudança de fase. O líquido superresfriado passa ao estado vítreo e, em virtude disso, T_g é definida como temperatura de transição vítrea [39].

A temperatura T_g varia de acordo com a taxa de resfriamento, ou seja, aumentando a taxa de resfriamento, T_g vai se deslocar para temperaturas mais elevadas. Conseqüentemente, diminuindo a taxa de resfriamento, T_g se deslocará para temperaturas menores. Conforme Yamaki (2001) esta faixa de temperatura que indica a transição vítrea deveria ser chamada de intervalo de temperatura de transformação vítrea [40].

Figura 04: Intervalo da transição vítrea em que β é a taxa de resfriamento onde $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$. [39]



Há uma contradição no que se refere à complexidade da ocorrência da transição vítrea, mesmo sendo largamente estudado e conhecido, principalmente na tecnologia de polímeros. Segundo Yamaki (2001), existem casos em que alguns autores afirmam que a transição vítrea se trata de um fenômeno puramente cinético; outros autores afirmam ser um fenômeno puramente termodinâmico, versões antagônicas para um mesmo fenômeno [40].

3.5 Estrutura do Vidro:

O vidro é uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea, obtida a partir do resfriamento de uma massa em fusão de óxidos ou de seus derivados e misturas, sendo o dióxido de silício seu principal constituinte. [41]

Dos estudos de Willian e William Henry Bragg em 1913, sobre as estruturas dos silicatos, usando a técnica de difração dos raios-X, várias regras foram estabelecidas [5].

O fenômeno de difração de raios X por cristais resulta de um processo de espalhamento no qual os raios X são dispersos pelos elétrons dos átomos, sem alteração no comprimento de onda. Um feixe difratado é produzido por tal dispersão somente quando certas condições geométricas são satisfeitas, o que pode ser expresso em qualquer uma de duas formas, a equação de Bragg, ou a de Laue [42].

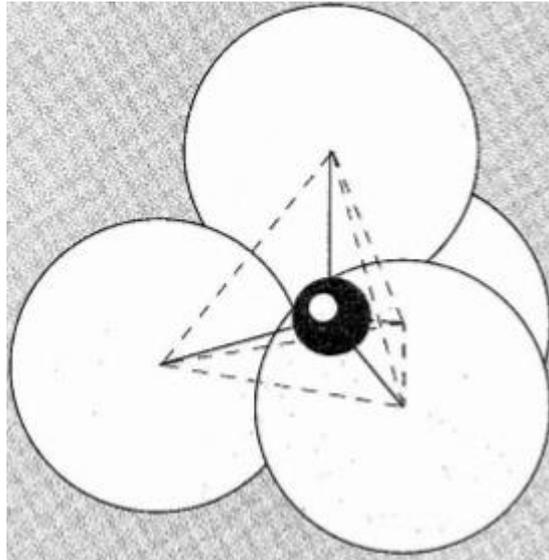
O padrão de difração resultante de um cristal, que compreende tanto as posições como as intensidades dos efeitos de difração, é uma propriedade física fundamental da substância, servindo não apenas para sua rápida identificação, mas também para a elucidação completa de sua estrutura. A análise das posições do efeito de difração leva imediatamente a um conhecimento do tamanho, forma e orientação da célula unitária. Para localizar as posições dos átomos individuais na célula, as intensidades devem ser medidas e analisadas. O mais importante para relacionar as posições dos átomos com as intensidades de difração é a equação do fator de estrutura [42].

O raio X é uma forma de radiação eletromagnética que possui elevada energia e curto comprimento de onda. Quando um feixe de raio X incide sobre um material sólido, uma fração deste feixe se dispersa, ou se espalha em todas as direções, pelos elétrons associados a cada átomo ou íon que se encontra na trajetória do feixe [44].

Acerca das estruturas dos silicatos utilizando a técnica de difração de dos raios-X, algumas regras foram instituídas.

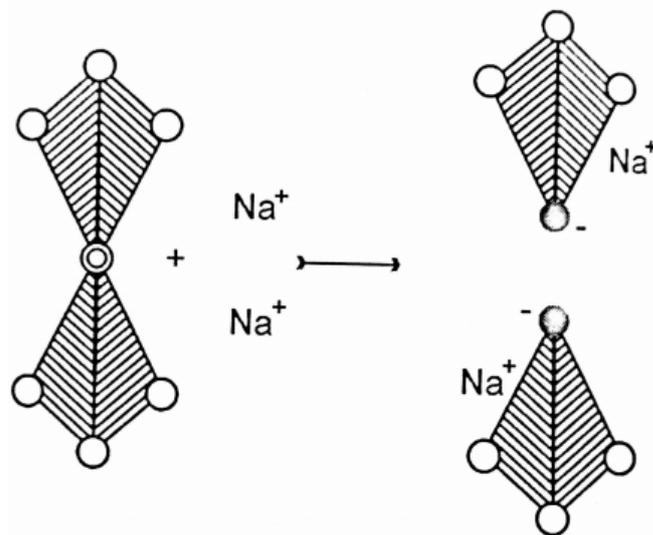
A primeira regra é que a unidade estrutural dos silicatos é o tetraedro regular de SiO_4 , no qual um átomo de silício está ligado a quatro átomos de oxigênio maiores (figura 05). Os átomos de oxigênio se dispõem espacialmente, formando um tetraedro [6].

Figura 05: Unidade básica da rede de sílica [44].



A segunda regra é que os óxidos dos elementos eletropositivos, tais como: sódio, potássio e cálcio, entram na estrutura dos silicatos como íons, os íons oxigênio negativos fazem parte do tetraedro e os íons positivos sódio, potássio e outros se situando no espaço entre os tetraedros, vide figura 6 [5].

Figura 06: Íons sódio na estrutura dos silicatos [5].

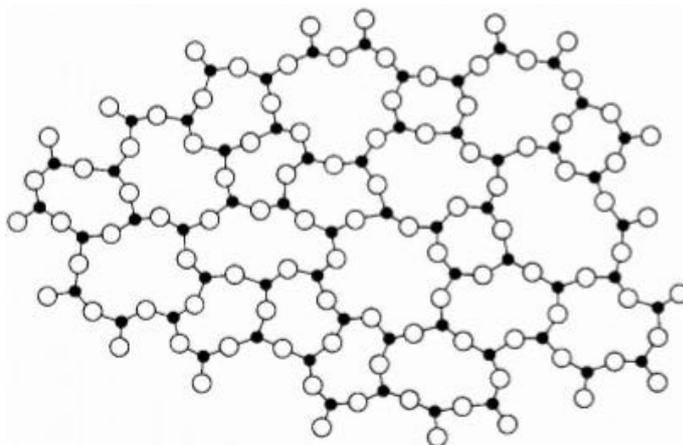


A terceira regra é que o modo pelo qual essas unidades tetraédricas se juntam, dependem do número relativo de silícios e oxigênios. No quartzo e em outras formas de sílica de fórmula SiO_2 , como só existem dois oxigênios por silício, cada oxigênio deve se ligar a dois tetraedros, formando uma estrutura não-cristalina, conforme figura 07 [5].

A estrutura da sílica não cristalina apresenta-se de forma desordenada e não repetitiva e varia de acordo com a história térmica do vidro, ou seja, depende da taxa de resfriamento vidro quando passou de líquido para sólido [45].

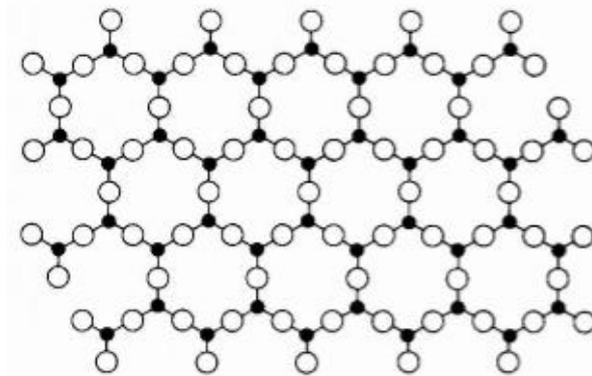
Segundo Callister, o resfriamento rápido, até temperaturas inferiores à temperatura de congelamento, favorece a formação de um sólido não-cristalino, uma vez que pouco tempo fica disponível para o processo de ordenação [43].

Figura 07: Representação da distribuição dos átomos de silício e oxigênio, no caso da sílica vítrea ou não cristalina [44].



Quando mais oxigênios de outros óxidos estão presentes, alguns dos oxigênios fazem parte de um só tetraedro, vide fig 08.

Figura 08: Representação da distribuição dos átomos de silício e oxigênio, no caso da sílica cristalina [44].



A quarta regra é que dois tetraedros nunca compartilham mais do que um simples átomo de oxigênio, isto é, os tetraedros se ligam pelos vértices e nunca por uma aresta ou face [5].

Devido a grande semelhança entre os cristais e o vidro no que se refere à dureza, transparência, condutividade térmica e outras propriedades, e mais, que é necessário relativamente pouca energia para converter um cristal em vidro, é possível concluir que as ligações que existem no vidro são iguais às ligações das estruturas cristalinas dos silicatos. A diferença é que na estrutura cristalina, cada tetraedro tem uma posição determinada, repetitiva e simétrica, e no caso do vidro essa estrutura é desordenada e não repetitiva varia de acordo com a história térmica do vidro, ou seja, da velocidade com que se deu o resfriamento do vidro quando passou de líquido para sólido [5].

3.6 Composição do Vidro:

De acordo com MAGELLA, na formulação de um vidro, deve ser considerada a ação de determinados componentes no resultado final de suas propriedades físico-químicas. Os principais constituintes dos vidros podem ser agrupados de acordo com seu mecanismo de ação, a saber [47]:

- Vitrificantes: São aquelas possíveis de se transformar em vidro, isto é, responsáveis pelo suporte vítreo. A principal é a sílica (SiO_2) fornecida principalmente pela areia. Exemplo: SiO_2 ; B_2O_3 , P_2O_5 [47]. Uma característica desse grupo de óxidos chamados de formadores de rede vítrea é que estes possuem baixa entropia de fusão. Para a sílica (SiO_2) a entropia de fusão é $4,6 \text{ J/mol.K}$. Isto significa que à temperatura de fusão, o sólido e o líquido apresentam estruturas similares [48].
- Fundentes: O suporte vítreo, por si só necessita de temperaturas extremamente altas para fundir, o que torna o processo de produção extremamente caro. Para contornar este problema se adicionam matérias primas fundentes, que apresentam a características de se fundirem a temperaturas muito inferiores ao suporte vítreo, gerando um líquido que dissolve os grãos de areia, produzindo vidro a temperaturas tecnologicamente compatíveis. Exemplo: Na_2O , CaO , K_2O , PbO , B_2O_3 , Li_2O [47].
- Estabilizantes: Alguns componentes, formadores de rede vítrea, são solúveis em água, porém a sua integração na formulação de vidro, poderá resultar num vidro solúvel em água. Portanto, para o contorno desta situação são adicionados óxidos estabilizantes. Na composição dos vidros industriais intervêm como principais estabilizantes: Al_2O_3 , PbO e ZnO [47].
- Componentes Secundários ou acessórios: Os componentes secundários intervêm, minoritariamente, com funções muito específicas nomeadamente: corantes, descorantes, afinantes, etc. São exemplos de corantes os óxidos de alguns metais como o ferro, cobalto, níquel, crômio, cobre, vanádio, cério e também elementos na sua forma metálica como o ouro, a prata e o cobre. Entre opacificantes os fluoretos são mais conhecidos e desempenham ainda um importante papel como afinantes, baixando a viscosidade do vidro [30].

Segundo Maia [5], basicamente todo vidro deve preencher os seguintes requisitos:

- Deve satisfazer a finalidade para qual foi destinado;
- Deve ser capaz de ser preparado em condições adequadas para as operações de trabalho;
- Deve possuir propriedades que o tornem apto às necessárias operações de trabalho;
- Deve ser de custo baixo para permitir ser comercializado.

3.7 Principais Tipos de Vidros:

Dentre as inúmeras formulações de vidros para aplicações especiais, de acordo com a matéria-prima existente, trataremos dos três tipos de vidro mais utilizado – Vidro alcalino, Vidro chumbo e Vidro boro-silicato.

- Vidro Alcalino ou Sodo-cálcico: Também chamado de vidro cal (em inglês – *lime glass*) é o vidro mais usado, e com ele são feitas as garrafas, frascarias de modo geral e baixelas, vidro plano da construção civil e da indústria automobilística e uma enorme quantidade de outros produtos. Mais de 95% de todo o vidro fabricado no mundo é alcalino [5].

Tabela 01: Porcentagens das composições típicas dos vidros mais comuns [5].

Óxidos	Vidro para bulbo de lâmpada incandescente	Vidro de garrafa	Vidro plano
SiO ₂	72%	70%	71%
Na ₂ O	16%	15%	17%
Al ₂ O ₃	2%	2%	1%
CaO	6%	11%	11%
MgO	4%	-	-

- Vidro Chumbo: Este vidro possui mais de 20% de óxido de chumbo. Sua presença faz com que o índice de refração do vidro seja maior, conferindo-lhe um brilho maior que os vidros comuns, mas diminuindo, porém, sua dureza. Possui alta densidade e uma longa faixa de trabalho devido à pequena alteração da viscosidade com a diminuição da temperatura. Ao contrário dos óxidos alcalinos, o óxido de chumbo não diminui a resistividade elétrica do vidro, o que lhe confere excelentes propriedades elétricas isolantes, além de aumentar o efeito de blindagem do vidro aos raios X, podendo, assim, ser largamente utilizado em aplicações eletrônicas tais como funil de tubo de televisor a cores, além de tubos de termômetros, bulbos de lâmpadas e selantes. Com relação à toxicidade do chumbo ao organismo humano, este tipo de vidro não proporciona riscos para a saúde, uma vez que o elemento químico fica retido na estrutura do vidro [6,49].
- Vidro Borossilicato: Caracterizado pela presença de quantidade significativa de B_2O_3 , tem grande resistência ao choque térmico e ao ataque dos agentes químicos. Usado na fabricação de ampolas de injetáveis, frascos de fármacos e de vacinas, aparelhagem de laboratório e utensílios domésticos como travessas e tigelas [5].

Tabela 02: Porcentagens das composições típicas dos vidros especiais [5].

Óxidos	Vidro para vidraçaria de laboratório	Fabricação de ampolas e injetáveis	Fabricação de ampolas e injetáveis
SiO_2	81%	74%	70%
B_2O_3	13%	10%	7%
Al_2O_3	2%	5%	6%
Na_2O	4%	6%	6%
BaO	-	1%	3%
CaO	-	2%	-

3.8 Resíduo do Pó de Vidro Blindex:

A reciclagem de resíduos, assim como qualquer atividade humana, também pode causar impactos ao meio ambiente. Variáveis como o tipo de resíduo, a tecnologia empregada e a utilização proposta para o material reciclado podem tornar o processo de reciclagem ainda mais impactante do que o próprio resíduo, o que era antes de ser reciclado. Dessa forma, o processo de reciclagem acarreta riscos ambientais que precisam ser adequadamente gerenciados [51].

O resíduo de vidro é um material que possui infinitas possibilidades de reaproveitamento e reutilização. Diferente de outros materiais, o resíduo de vidro possui um aproveitamento de 100% em sua reciclagem, ou seja, a quantidade de vidro descartado pelo homem pode ser totalmente reciclável simplesmente pelo processo de fusão [29].

O processo de beneficiamento de chapas por lapidação de vidro na indústria vidreira gera, por si só, um resíduo de aproveitamento inviável (rejeito). Este resíduo é transportado juntamente com grande quantidade de água (usado para lavagem do vidro lapidado) para uma estação de tratamento de efluentes, onde a água é tratada e reutilizada e o rejeito do vidro é encaminhado para aterros sanitários [52].

A LM é a única empresa no estado do Mato Grosso do Sul que trabalha com um processo inovador de reuso da água deixando de retirar e devolver ao solo milhões de litros de água por ano, na faixa de 30000 litros/h, sendo assim um ciclo fechado de consumo de água, trata-se de uma ERA (estação de reuso de água) [50].

O processo inicia-se pela captação da água por um poço, onde começa a receber tratamentos com produtos químicos, depois é bombeada para um agitador para fazer a mistura dos produtos, e desse agitador é transferido para os tanques de decantação, que ao total são quatro. No fim vai para outra caixa já com a água limpa que são bombeadas novamente para as máquinas que formam então esse circuito fechado, ou seja, usando sempre a mesma água. No processo de decantação é possível separar a água dos resíduos de vidro provenientes da lapidação das

grandes placas, sendo esse a matéria base desse estudo, que até então não há nenhum uso [50].

A reutilização do pó de vidro no processo produtivo acarreta numa vantajosa diminuição da energia necessária para sua fundição, pois os resíduos de vidro podem ser reciclados como agregado para cimento Portland, concreto asfáltico, etc., com a economia de agregados naturais comumente utilizados para este fim. Ainda, a sucata de vidro é empregada como agregados para leitos de estradas, como materiais abrasivos, blocos de pavimentação, tanques sépticos de sistemas de tratamento de esgoto, filtros, janelas, claraboias e telhas. Nestas aplicações utiliza-se a sucata de vidro moída e/ou em cacos (cujo tamanho varia com a aplicação) adicionada em porcentagens adequadas aos elementos já constituintes [53].

3.9 Revestimento Cerâmico Ecológico:

Na definição de Zandonadi, revestimento cerâmico engloba azulejos, ladrilhos e pastilhas, produtos de formato retangular, que permitem o maior nível de automação. [70]



Figura 09: Ilustração Revestimento Ecológico Rivesti [71].

Seja industrial ou artesanal, o que define um revestimento sustentável é o seu método de fabricação. Quando elaborado com técnicas que reduzem o consumo de energia e/ou água, oferece baixo índice de emissão de gases poluentes, fazem uso de materiais que não contaminam o solo e, principalmente, não emitem os chamados compostos orgânicos voláteis (VOCs, em inglês), pode ser classificado como um legítimo revestimento ecológico [54].

Ecoprodutos, produtos ecológicos ou produtos verdes, segundo Araújo (2004), é todo o produto que, artesanal, manufaturado ou industrializado, de uso pessoal, alimentar, residencial, comercial, agrícola e industrial, seja não-polvente, não-tóxico, benéfico ao meio ambiente e à saúde dos seres vivos, contribuindo para o desenvolvimento de um modelo econômico e social sustentável. [72]

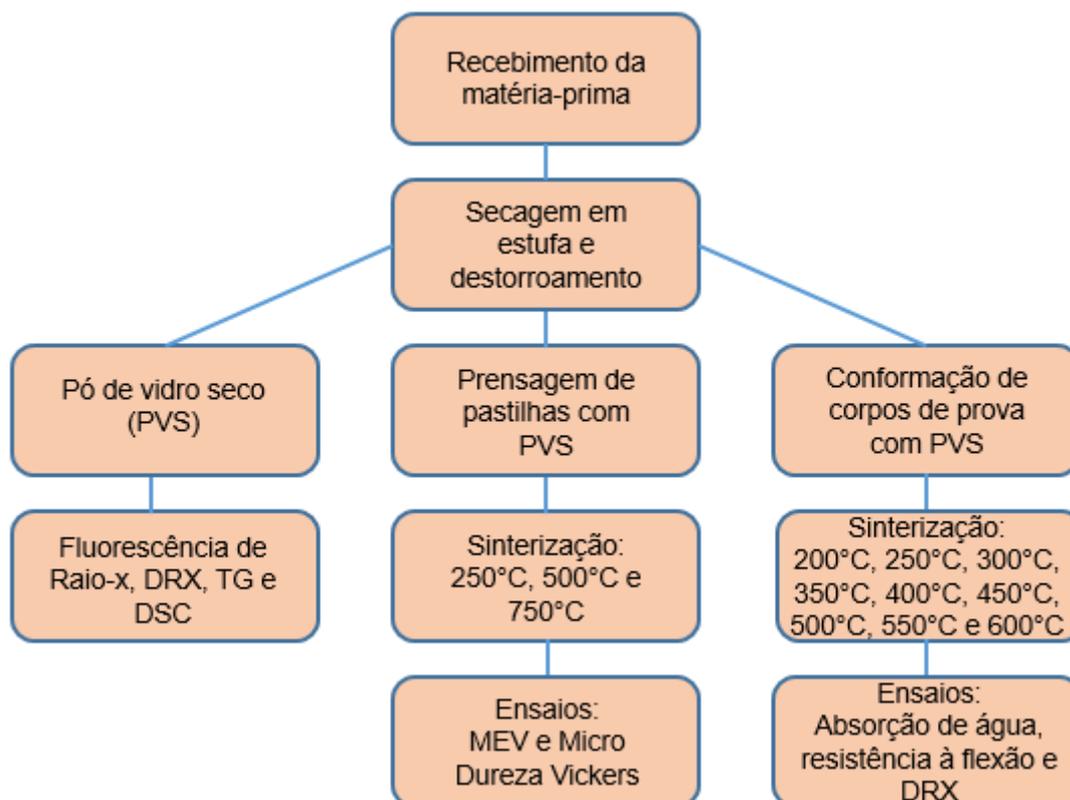
Para que um produto seja classificado como produto ecológico, ele deve atender a determinados critérios pertinentes ao seu ciclo de vida, como a natureza e a obtenção de suas matérias-primas, insumos, processo de produção – gastos com energia, água, emissão de poluentes – seu uso e descarte. [72]

4 MATERIAIS E MÉTODOS:

Por se tratar de um estudo inovador, os ensaios (explicados no fluxograma abaixo) foram realizados em três etapas distintas: primeiramente no pó de vidro seco (PVS) onde foi realizado testes para verificar se houve contaminação por líquidos refrigerantes, utilizados durante o processo de lapidação. Posteriormente foram prensadas pastilhas de PVS (Pó de Vidro Seco), com o intuito de definir parâmetros como melhor temperatura de trabalho e maior resistência, adquirida após os procedimentos térmicos. Por último foram conformados corpos de prova em dimensões maiores com propósito de verificar se suas propriedades obtidas pelo tratamento são capazes de torná-lo um revestimento ecológico viável para o mercado da construção civil.

Para uma melhor compreensão do passo a passo dessa pesquisa, na figura 10 a seguir tem-se um fluxograma que descreve a metodologia utilizada.

Figura 10: Fluxograma da metodologia utilizada.



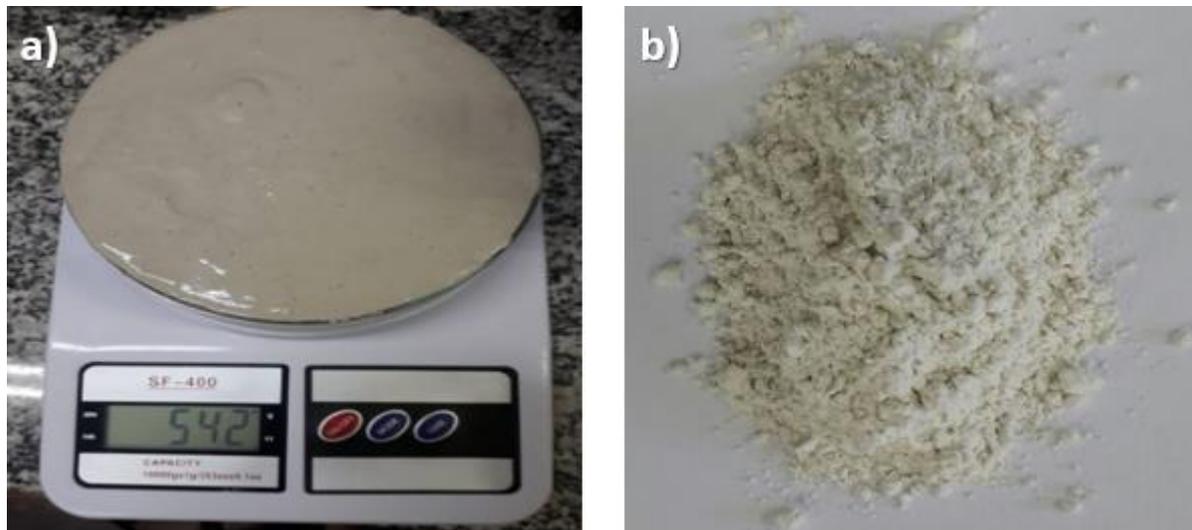
4.1 1ª etapa: Pó de Vidro Seco (PVS):

A matéria-prima gerada na forma de lama, proveniente da etapa de lapidação da fabricação de vidros planos, e descartada como rejeito, foi oferecida pela LM Vidros para esse trabalho, conforme a figura 10 (a), após ser retirado dos tanques decantadores da indústria. A lama possui aspecto de um líquido pastoso, de coloração acinzentada e com forte odor.

Após o recolhimento da lama de vidro, foi feito a desidratação do material à 100 °C por 24 horas na estufa de secagem e esterilização TE – 393/1 da Tecnal, que pertence ao Laboratório de Nanomateriais e Nanotecnologia Aplicada (LNNA), do Instituto de Física da UFMS.

Finalizado o processo de secagem, das 4986 gramas de material recolhido, restaram 2631 gramas do pó de vidro seco (PVS), conforme figura 11 (b), de coloração branca, levemente aglomerado, formando pequenos torrões.

Figura 11: Matéria-prima antes (a) e depois (b) da secagem.



Com o objetivo de destorroar e diminuir o tamanho dos grãos, o PVS foi levado ao moinho de bolas MA 701/21, LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil, por 30 minutos até chegar em uma textura extremamente fina, com grãos menores que 0,3 mm.

Figura 12: PVS e destorroado.



4.2 Fluorescência de raios-X

O PVS foi submetido a análise de fluorescência de raios-X, uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada óxido se encontra presente na amostra [55].

Na espectrometria de fluorescência de raios-X uma fonte de radiação de alta energia (radiação gama ou radiação X) provoca a excitação dos átomos da substância que pretendemos analisar [55].

Quando um átomo no estado fundamental fica sob a ação de uma fonte externa de energia (e.g.: raios-X), ele absorve esta energia, promovendo elétrons a níveis mais energéticos. Neste estado o átomo estará numa situação instável, chamada “Estado Excitado” [55].

Na natureza tudo tende a buscar o estado de estabilidade, desta forma o elétron excitado tende naturalmente a retornar ao seu estado fundamental, ocorrendo uma emissão de energia. Esta energia absorvida é quantizada e é característica de cada elemento químico, permitindo a sua identificação e correspondente quantificação [56].

4.3 Difração de raios-X

A difratometria de raios X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais, engenharias metalúrgica, química e de minas, além de geociências, dentre outros [57,58].

Os raios X ao atingirem um material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios X após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida; cada elétron atua, portanto, como centro de emissão de raios X [57,58].

Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos de difração dos raios X podem ser observados em vários ângulos [57,58].

Os difratogramas resultantes foram obtidos usando step de 0,02, velocidade de 2 graus/min e intervalo de 3 até 90 graus, os espectros foram analisados com auxílio do banco de dados de minerais por software, através de consulta literária nos métodos Hanawalt e Fink, comparação de resultados com os padrões produzidos pelo *Joint Committee for Powder Diffraction System* (JCPDS) do *Internacional Center for Diffraction Data* (ICDD) e por refinamentos pelo método de Rietveld.

4.4 Análises Termogravimétricas (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA - do inglês Thermogravimetric analysis) é uma técnica destrutiva no ramo de análises térmicas, na qual se monitora a variação da massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo em um

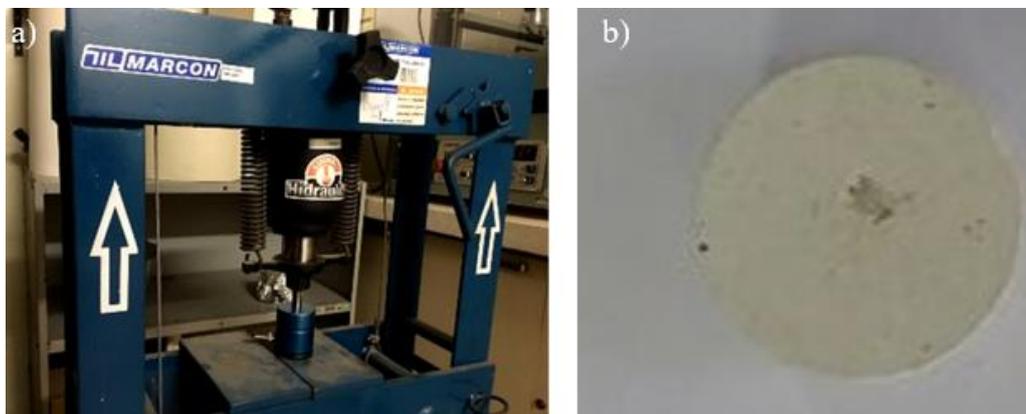
ambiente de temperatura e atmosfera controladas. Seu princípio de funcionamento é simples: analisar a perda ou a agregação de massa à amostra em temperaturas variadas [59]. Em geral os métodos térmicos encontram ampla aplicação tanto no controle de qualidade quanto na pesquisa de produtos industriais (a exemplo de polímeros, fármacos, argilas, minerais e ligas metálicas [60]).

O gráfico da variação de massa ou do percentual da massa em função do tempo é chamado de termograma ou curva de decomposição térmica [60].

4.5 2ª etapa: Preparação das pastilhas de PVS:

Com o material seco e destorroado, o PVS foi prensado sob uma carga de 5 ton/cm², mantendo-a por 60 segundos, obtendo pastilhas com dimensões na ordem de 1,2 cm de diâmetro e espessura 0,8 cm, na prensa Marcon que se encontra no LNNA, conforme figura 13.

Figura 13: a) Prensa Marcon e b) Pastilha prensada (PP).



O processo de sinterização representado na figura 14 foi aplicado nas PP nas seguintes temperaturas: 250 °C, 500 °C e 750 °C, com rampa de aquecimento de 10°C/min, patamares de minutos e resfriamento não controlado até temperatura ambiente, em fornos mufla EDG10P-S, conforme figura 15.

Figura 14: Representação do processo de sinterização [61].

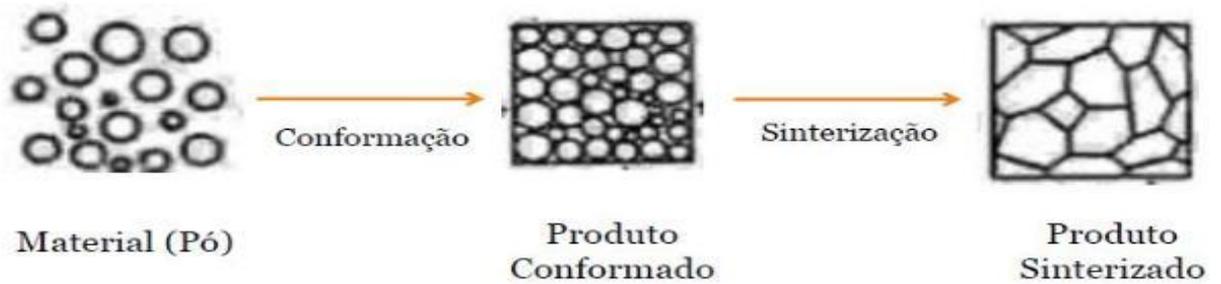


Figura 15: Forno mufla EDG10P-S para sinterização.



4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é um instrumento muito versátil e utilizada na caracterização e no estudo da evolução microestrutural em diferentes materiais. Apesar da complexidade dos mecanismos para a obtenção da imagem, o resultado é uma imagem que nos permite analisar a morfologia da amostra, tamanho e contornos de grão, e possível formação de fases e precipitados, além do grau de porosidade.

O primeiro trabalho, reconhecido, descrevendo o conceito de um MEV é o de Knoll [63]. Mais adiante, Von Ardenne em 1938 construiu um microscópio

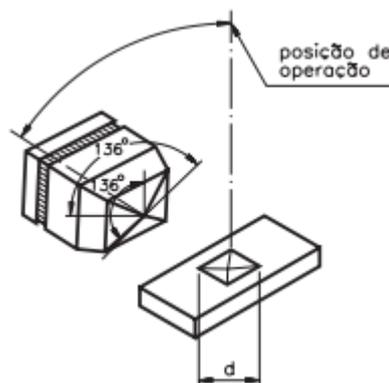
eletrônico de varredura e transmissão (STEM) adaptando bobinas de varredura a um microscópio eletrônico de transmissão [64].

4.7 Análise de Microdureza Vickers:

O ensaio de Microdureza Vickers é um método desenvolvido por Smith e Sandland que ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers, onde o nome é devido a empresa que fabricava as máquinas para operar com este método chamava-se Vickers-Armstrong [65].

A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, sob uma determinada carga, conforme figura 16 [65].

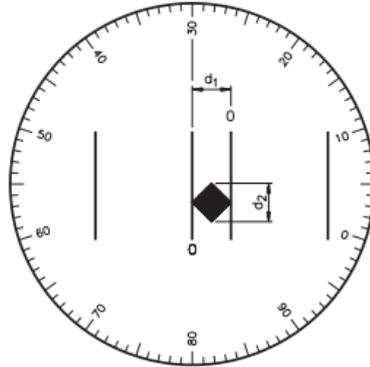
Figura 16: Representação do penetrador do método Vickers [65].



O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado. Essa relação, expressa em linguagem matemática é a seguinte: A máquina que faz o ensaio Vickers não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais (d_1 e d_2) formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide, representado na figura 17 [65].

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

Figura 17: Representação da impressão do método Vickers [65].



4.8 3ª etapa: Conformação dos corpos de prova (CP):

A conformação dos CP iniciaram após o processamento do pó. O PVS foi moldado na prensa semiautomática, marca Gabbrielli, que se encontra na oficina mecânica do INFI-UFMS, sendo submetidos a duas pressões seguidas e automáticas, respectivamente, uma mínima e a outra máxima de aproximadamente 60 Ton/cm².

Foram prensados no total trinta e seis corpos de prova com aproximadamente 70g de PVS, os quais foram dispostos manualmente na matriz da própria prensa, conforme figura 18 (a).

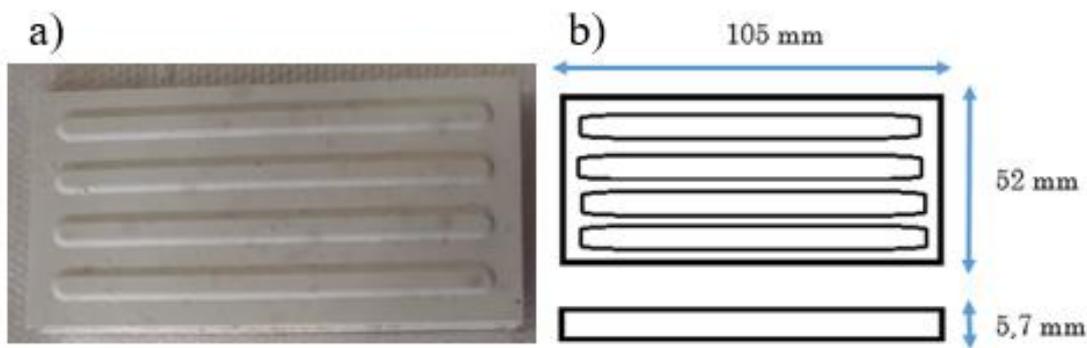
Figura 18: (a) Representação da matriz e (b) prensa.



Após a prensagem foram obtidos os CP com dimensões de 105 mm de comprimento, 52 mm de largura e 5,7 mm de espessura, conforme representada na

figura 19. Finalizada a prensagem dos corpos de prova, foi dado o acabamento nas peças por meio de um pincel de cerdas largas e macias. Em seguida pesadas em uma balança digital SF-400 Alta Precisão Eletrônica 1g a 10 kg.

Figura 19: (a) CP e (b) representação do CP de PVS com suas dimensões aproximadas.



Após a conformação das amostras dos CP, as mesmas foram submetidas a sinterização nas seguintes temperaturas: 200°C, 250 °C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550 °C e 600°C, com rampa de aquecimento de 10°C/min, patamar de 60 min e resfriamento não controlado até temperatura ambiente.

4.9 Absorção de Água - AA(%):

Para obtenção do AA(%), as amostras foram pesadas após o processo de sinterização, para determinação das massas secas (m_s), em uma balança eletrônica de precisão. Na sequência, foram colocadas em um recipiente com água durante 24h e secada com um pano após a retirada da imersão. Novas medidas de massa após esse procedimento foram feitas para determinar as massas saturadas (m_u), aplicando a seguinte equação para determinar o teor de absorção de água [6]:

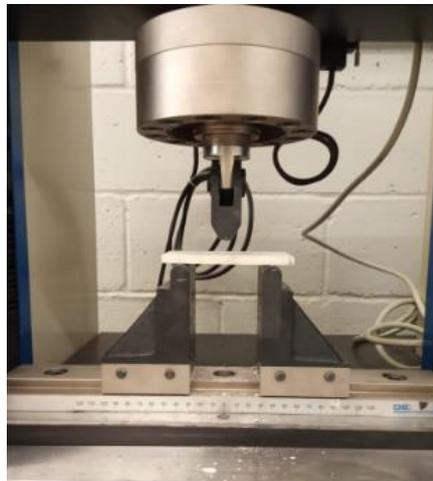
$$AA\% = \frac{m_u - m_s}{m_s}$$

4.10 Análises de Resistência a Flexão:

Devido à ductilidade extremamente baixa, os corpos de prova cerâmicos não permitem a medição de suas propriedades mecânicas pelo teste de tração convencional, que é amplamente utilizado para metais [43], portanto para obter informações relativas à resistência mecânica dos CP foram obtidas através do módulo de ruptura à flexão.

O módulo de ruptura à flexão (MRF) consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra geometricamente padronizada. A carga aplicada parte de um valor inicial igual à zero e aumenta lentamente até a ruptura do corpo de prova. É um ensaio bastante aplicado em materiais frágeis como cerâmicos e metais duros, ferro fundido, aço ferramenta e aço rápido, pois fornece dados quantitativos da deformação desses materiais [66].

Figura 20: Detalhe do posicionamento do corpo de prova no ensaio de flexão por 3 pontos.



Para este ensaio, foram submetidos os corpos de prova antes e após a sinterização, posicionados sobre dois apoios distantes de 60 mm entre si e uma carga crescente aplicada no centro dos corpos de prova com velocidade de ensaio de 5 mm/min (avanço da célula de carga).

Foi utilizada a máquina universal de ensaios da marca Emic modelo DL10000 com uma célula de carga TRD 28 (1000 kN), como mostrado na Figura

21, no laboratório de Materiais do Centro Universitário Anhanguera de Campo Grande.

Figura 21: Prensa Emic modelo DL10000.



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES:

5.1 Fluorescência de Raios X:

Os resultados de fluorescência de raios-x enviados pela LM Vidros, mostraram que o pó de vidro precursor possui em sua composição o dióxido de silício (SiO_2), representando 70,19% da composição total, seguido pelo óxido de cálcio (CaO) com 19,29% e óxido de sódio (Na_2O) com 4,66%, sendo estes os mais representativos nos resultados. Portanto podemos atribuir a maior concentração do óxido de silício no pó, devido ser o elemento químico mais abundante da crosta terrestre e o principal componente da areia o qual é o material usado na fabricação do vidro. O óxido de cálcio (CaO) é um óxido modificador e atua como fundente, ou como estabilizador da estrutura dependendo da temperatura de trabalho [5]. Além de favorecer a devitrificação (cristalização) [6], que visa o controle da separação das fases cristalinas, ou seja, a estabilização da fase vítrea. O óxido de sódio (Na_2O) é um óxido modificador e é o principal fundente usado na indústria do vidro[5]. Em menores quantidades encontra-se o MgO com função parecida do CaO de estabilizar, o Al_2O_3 com o intuito de aumentar a estabilidade química.

Com esses dados é possível concluir que a amostra se trata de um vidro sodo-cálcico (figura 22 representa essa estrutura molecular), e sua composição está representada na tabela 03. As composições da maioria dos vidros sodo-cálcico estão dentro de uma faixa estreita de composição. Eles contêm, normalmente, entre 8 e 12% em peso de óxido de cálcio e de 12 a 17% de óxido alcalino (principalmente óxido de sódio). Isso porque, muito cálcio faz com que o vidro tenha tendência a devitrificar (cristalizar) durante o processo de produção e pouco cálcio ou alto teor de alcalinos resulta um vidro com baixa durabilidade química (propriedade que permite que o vidro não se deteriore em contato com reagentes químicos, produtos farmacêuticos ou até mesmo com resíduos radioativos). Usualmente, uma pequena quantidade de alumina (0,6 a 2,5%) é incluída na formulação para incrementar a durabilidade química [6].

Figura 22: Estrutura molecular do vidro sodo-cálcico [44].

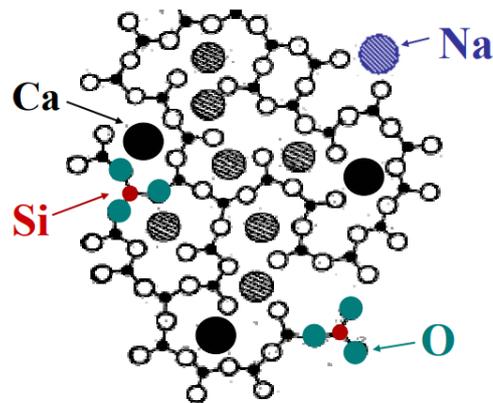


Tabela 03: Composição química do PSV direto da indústria LM (% em porcentagem).

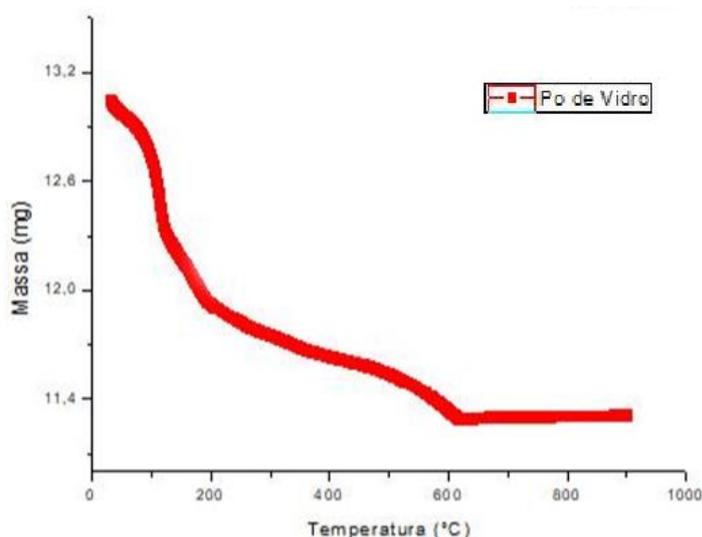
Composição do Vidro	
Óxido	Massa %
SiO ₂	70,19
CaO	19,28
Na ₂ O	4,66
MgO	2,34
Al ₂ O ₃	1,12
Fe ₂ O ₃	1,12
K ₂ O	0,52
P ₂ O ₅	0,39
SO ₃	0,21
SrO	0,0708
Cl	0,065

5.2 Análise Termogravimétrica TG:

O gráfico 01 representa o TG do pó de vidro precursor. A curva foi obtida usando uma rampa de aquecimento de 10 °C/min até 900 °C. Observa-se que até 100°C a perda de massa é bem acentuada, essa degradação térmica é

atribuída a evaporação da água na superfície da amostra e em seguida essa degradação térmica é menos acentuada quando comparada a etapa anterior até 200 °C, nesse intervalo podemos ainda atribuir a perda de água intersticiais na amostra. Acima de 200 °C pode se observar a decomposição térmica em duas etapas, sendo a primeira degradação dos óxidos entre 200 e 400 °C atribuída a formação da Calcita e entre 400 e 600 °C a formação do baixo Quartz. A estabilidade térmica das amostras do PV é atingida a partir de 600 °C.

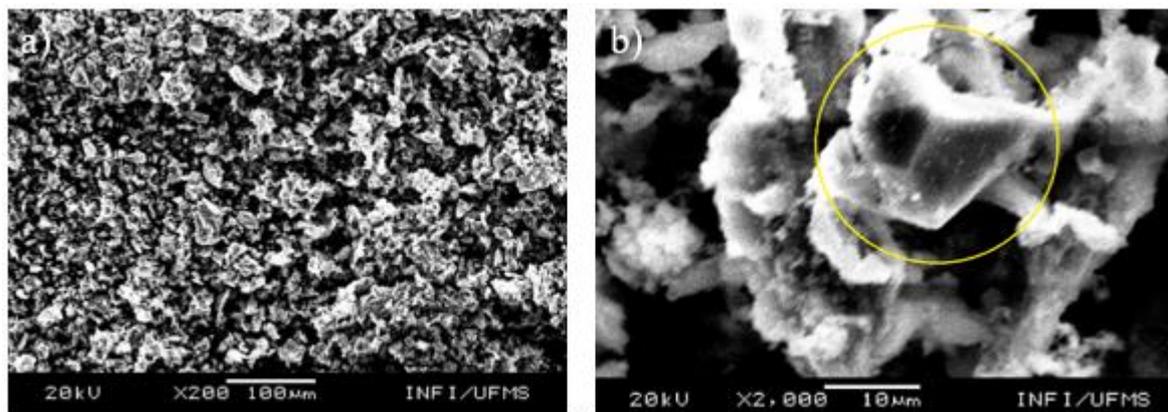
Gráfico 01: TG do pó de vidro.



5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

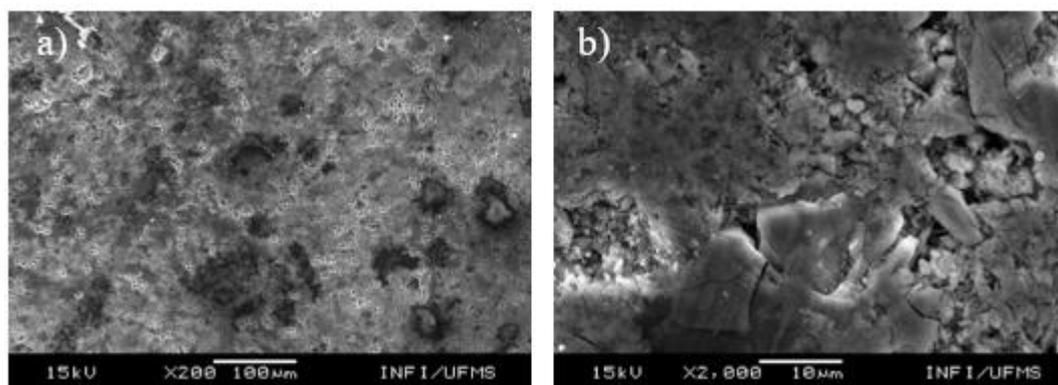
A figura 23 apresenta as micrografias das superfícies a) pó de vidro desidratado ampliado em 200x e b) ampliada em 2000x. Na micrografia a) podemos observar uma homogeneidade na distribuição das partículas e tamanho na ordem de 10 µm, com morfologia irregulares. Na micrografia b) observamos a geometria das partículas na forma poliédrica e a concentração de poros distribuído na superfície.

Figura 23: (a) Imagem do MEV do PVS com ampliação de 200X.
(b) PVS com ampliação de 2000X.



A Figura 24 representa as micrografias das pastilhas de PVS prensadas, sendo a) com ampliação de 200x e b) 2000x. Podemos observar na micrografia a) um alto grau de porosidade, com poros na ordem de 100 µm, já em b) podemos observar um superfície não homogênea, onde durante a prensagem ocorreu a formação de aglomerados em algumas regiões e em outras as partículas não se aglutinaram, podendo ser atribuído a diferença de tamanhos das partículas dos precursores, influenciando na dissipação de energia.

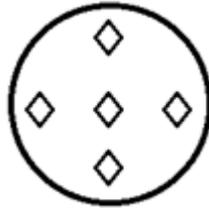
Figura 24: (a) Imagem do MEV da pastilha de PVS com ampliação de 200X.
(b) Imagem do MEV da pastilha de PVS com ampliação de 2000X.



5.4 Microdureza Vickers:

As medidas de microdureza Vickers foram realizadas fazendo cinco impressões em cada pastilha, para obter uma média geral dos valores, na superfície conforme a figura abaixo.

Figura 25: Representação da localização das impressões nas pastilhas.



Os resultados das medidas da microdureza Vickers foram obtidos para 3 diferentes amostras, a primeira sem o processo de sinterização a qual apresentou a menor resistência, atribuído a falta de entalpia de reação; a segunda amostra foi submetida a sinterização em temperatura de 250 °C, mostrando o maior valor de resistência 107,1 HV, atribuído ao processo de entalpia de reação de formação e ligação ocorrido durante o aumento da temperatura, aumentando as ligações químicas entre os elementos e consequentemente sua dureza; a terceira amostra foi submetida a sinterização em temperatura de 500 °C e o resultado encontrado foi uma resistência 46,86 HV, ou seja, menor quando comparado a de 250 °C e isso podemos atribuir a maior quantidade de energia absorvida durante o processo da reação química, que levou à formação do óxido e a perda de resistência. Os resultados estão representados na tabela 04.

Tabela 04: Resultados dos ensaios de microdureza Vickers.

Pastilhas PVS	Média do valor da dureza Vickers HV	Carga Aplicada (kgf)	Tempo (s)
Sem sinterizar	40,8	1	15
Sinterizado à 250 °C	107,1	2	45
Sinterizado à 500 °C	46,86	2	45

Os resultados obtidos nas caracterizações das amostras foram considerados satisfatórios, as amostras apresentaram homogeneidade morfológica e geométrica, com propriedades de resistência mecânica consideráveis para que fossem submetidas ao processo de sinterização.

A figura 26 representa as imagens dos CP sinterizados nas seguintes temperaturas: CP 01 200 °C, CP 02 250 °C, CP 03 300 °C, CP 04 350 °C, CP 05 400 °C, CP 06 450 °C, CP 07 500 °C, CP 08 550 °C e CP 09 600 °C. Podemos observar que os CPs sem sinterizar e sinterizado à 200°C (CP 01), apresentaram coloração branca com diferença quase imperceptível entre eles. A partir da temperatura de 250°C houve leve escurecimento gradativo até atingir os 400°C, sendo a partir do CP 06 acentuado escurecimento atribuído ao processo de oxidação. Os resultados após os processos de sinterização mostraram que o intervalo de temperatura ideal fica abaixo de 450 °C, onde temos melhor homogeneidade de coloração e ausência de oxidação. Na Tabela 05 abaixo temos os dados de perda de massa em função temperatura de sinterização das amostras.

Figura 26: Imagens dos CPs em diferentes temperaturas de sinterização.

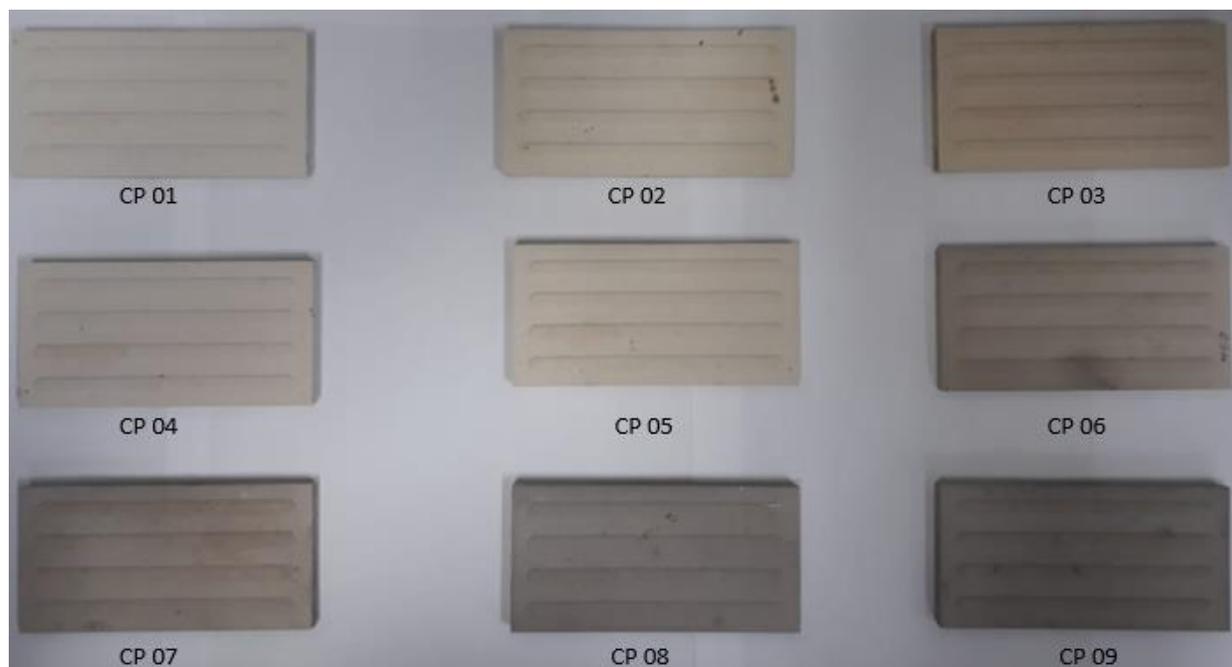


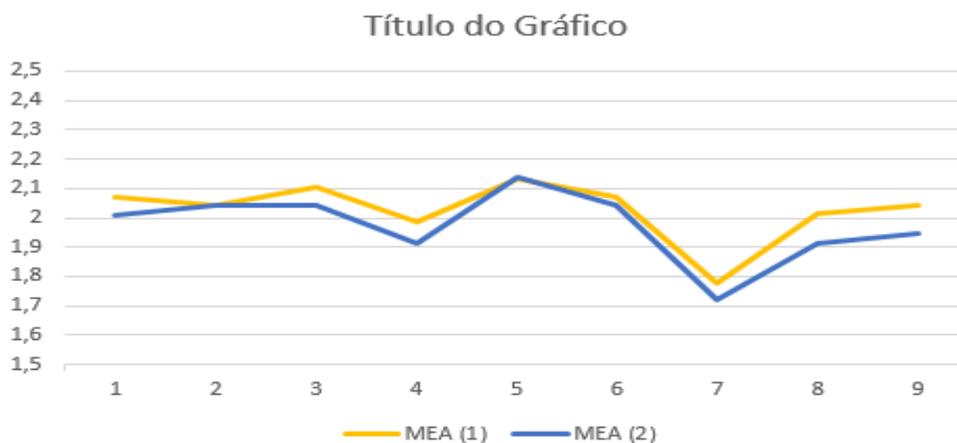
Tabela 05: Identificação dos corpos de prova com suas respectivas temperaturas de sinterização, massa inicial e final, onde: MEA (1) é Massa Específica Aparente Inicial, MEA (2) é Massa Específica Aparente Final e PF: Perda de Massa Final.

Corpos de Prova	Temperatura °C	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	MEA (1)	MEA (2)	PF %
CP 01	200	70	62	2,07	2,01	11,43
CP 02	250	69	63	2,04	2,04	8,70
CP 03	300	71	63	2,10	2,04	11,27
CP 04	350	67	59	1,98	1,91	11,94
CP 05	400	72	66	2,13	2,14	8,33
CP 06	450	70	63	2,07	2,04	10,00
CP 07	500	60	53	1,78	1,72	11,67
CP 08	550	68	59	2,01	1,91	13,24
CP 09	600	69	60	2,04	1,95	13,04

A tabela 05 mostra que os corpos de prova tiveram uma perda de massa após sinterização entre 8 e 13%.

O gráfico 02 representa os dados de massa específica aparente e perda de massa em função da temperatura de sinterização dos corpos de prova, obtidos a partir dos dados da tabela acima. Podemos observar que a maior massa específica (2,14 g) é obtida em uma temperatura próxima de 400 °C e a menor (1,7 g) próximo de 500 °C.

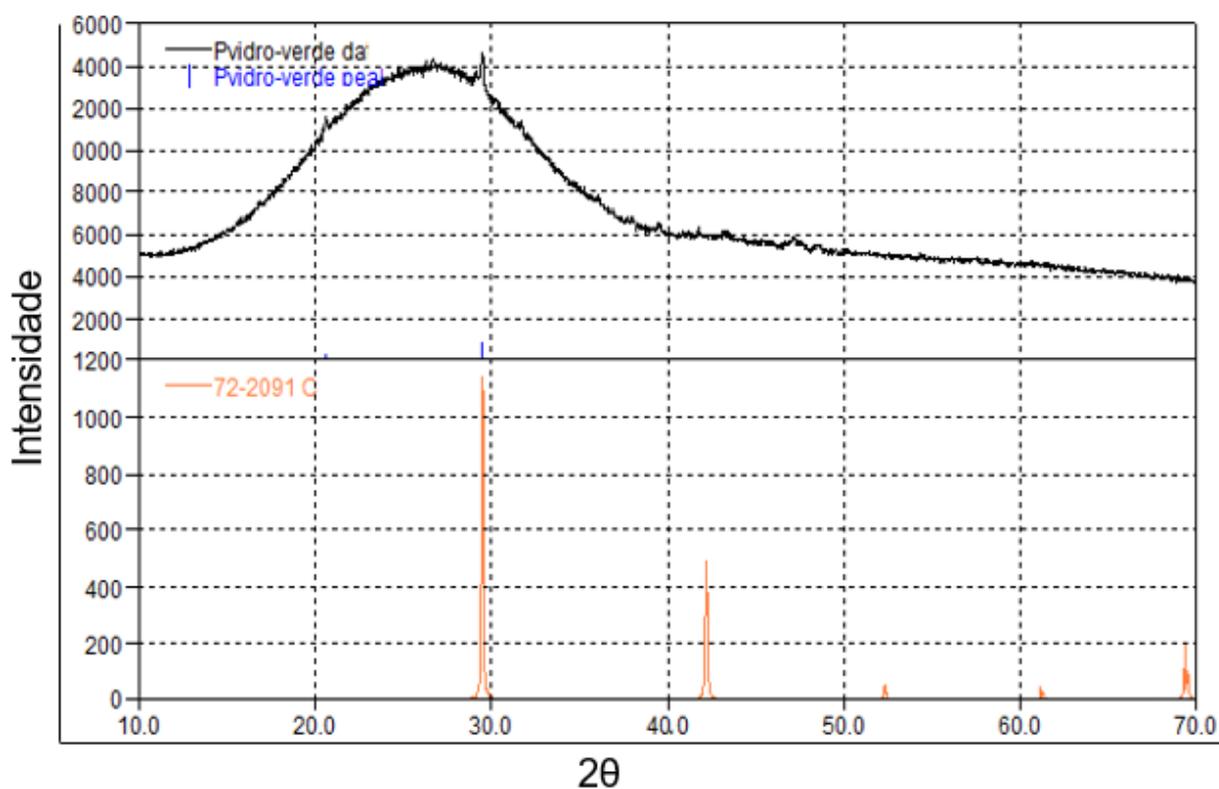
Gráfico 02: MEA e perda de massa em função da temperatura de sinterização, dos corpos de prova.



5.5 Difração de raios X:

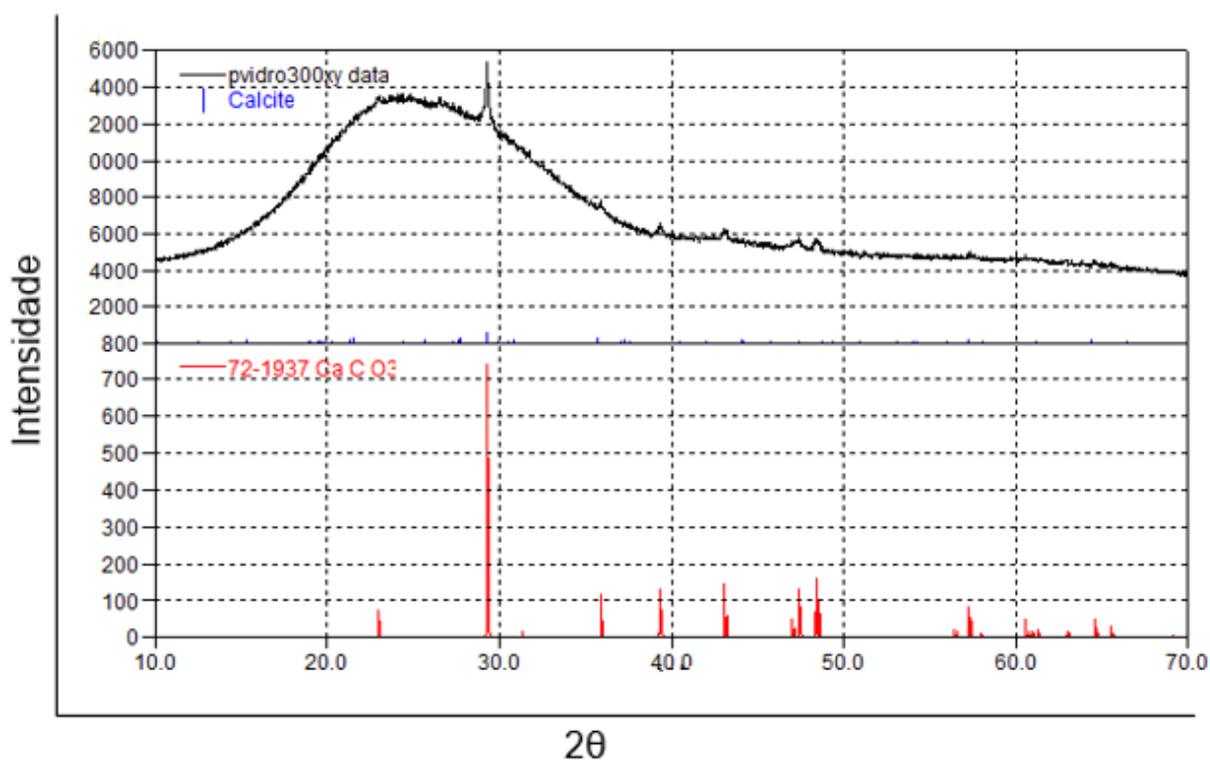
O gráfico 03 representa o difratograma da amostra PV sem sinterizar, onde podemos observar um comportamento predominante amorfo, mas com a presença de alguns picos característicos do carbono (C_8), o quais podemos atribuir as reações químicas de ligação durante o processo de fabricação [67].

Gráfico 03: Raio-X do Pó de vidro sem sinterizar.



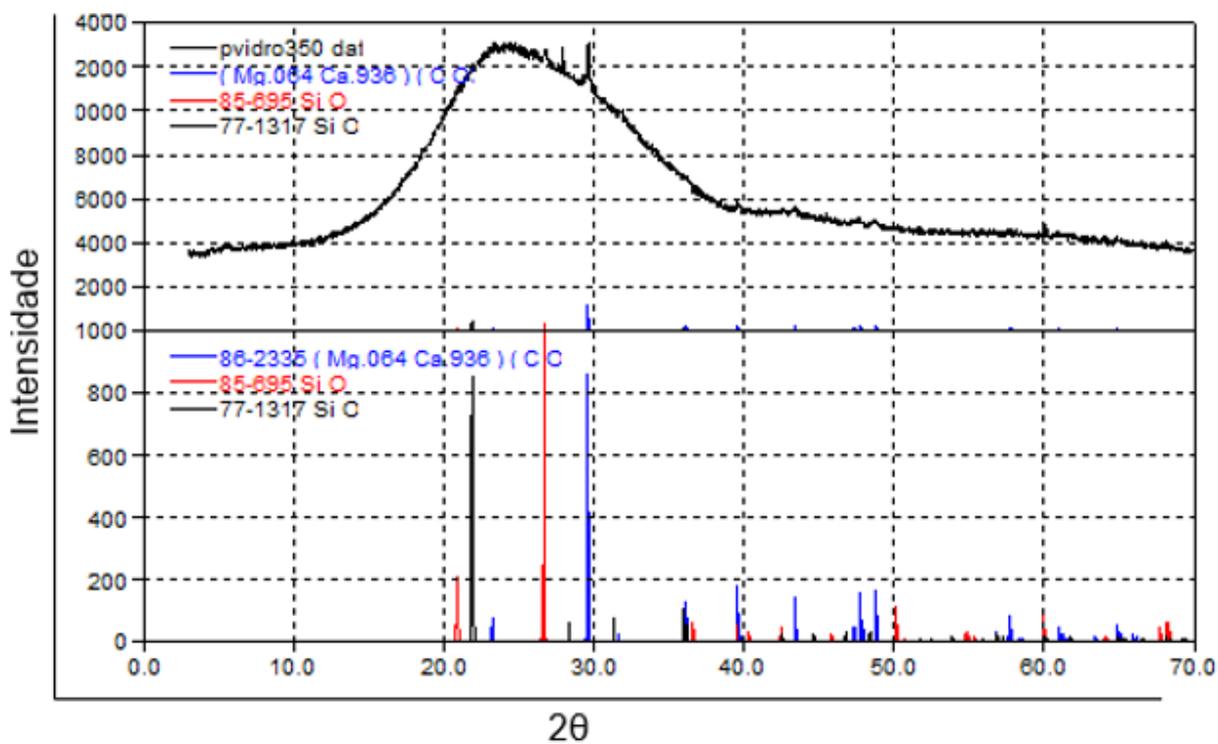
O gráfico 04 representa o difratograma da amostra PV sinterizada em 300 °C. O espectro representa um comportamento predominante de material amorfo, mas devido ao processo de sinterização pode se observar a formação de pequena quantidade de cristais, ou seja, a presença de picos característicos da Calcita (CaCO_3), com a possibilidade de formação a partir da entalpia de reação química de ligação durante o processo de sinterização.

Gráfico 04: Difratograma do Pó de vidro sinterizada em 300 °C.



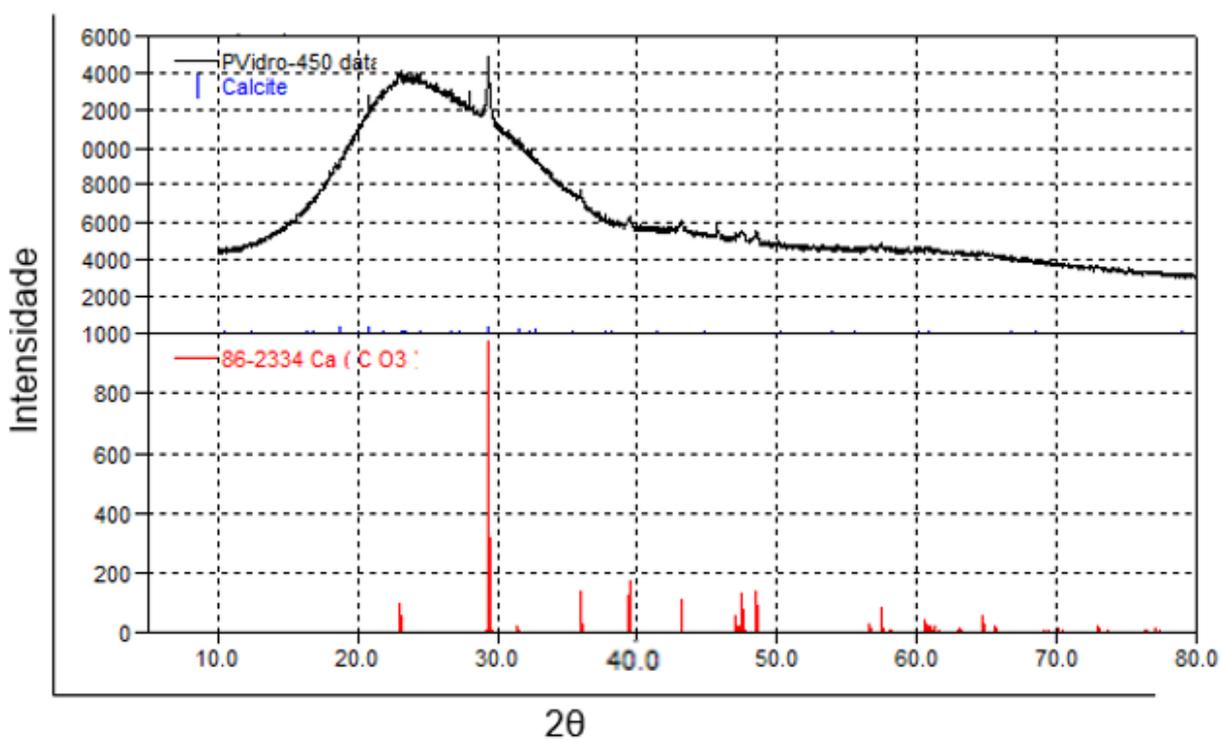
O gráfico 05 representa o difratograma da amostra PV sinterizada em 350 °C. O espectro apresenta a presença de formação de cristais em função da temperatura de sinterização. Observa-se os picos característicos de três fases cristalinas presentes, baixa Cristobalita (SiO_2), Oxido de Silício (SiO_2) e Calcita Magnésiana ($\text{Mg}_{0.064} \text{Ca}_{0.936}$) (CO_3), onde pode-se atribuir a formação destas fases ao processo de entalpia de reação química de ligação durante o processo de sinterização.

Gráfico 05: Difratograma do Pó de vidro sinterizado em 350 °C.



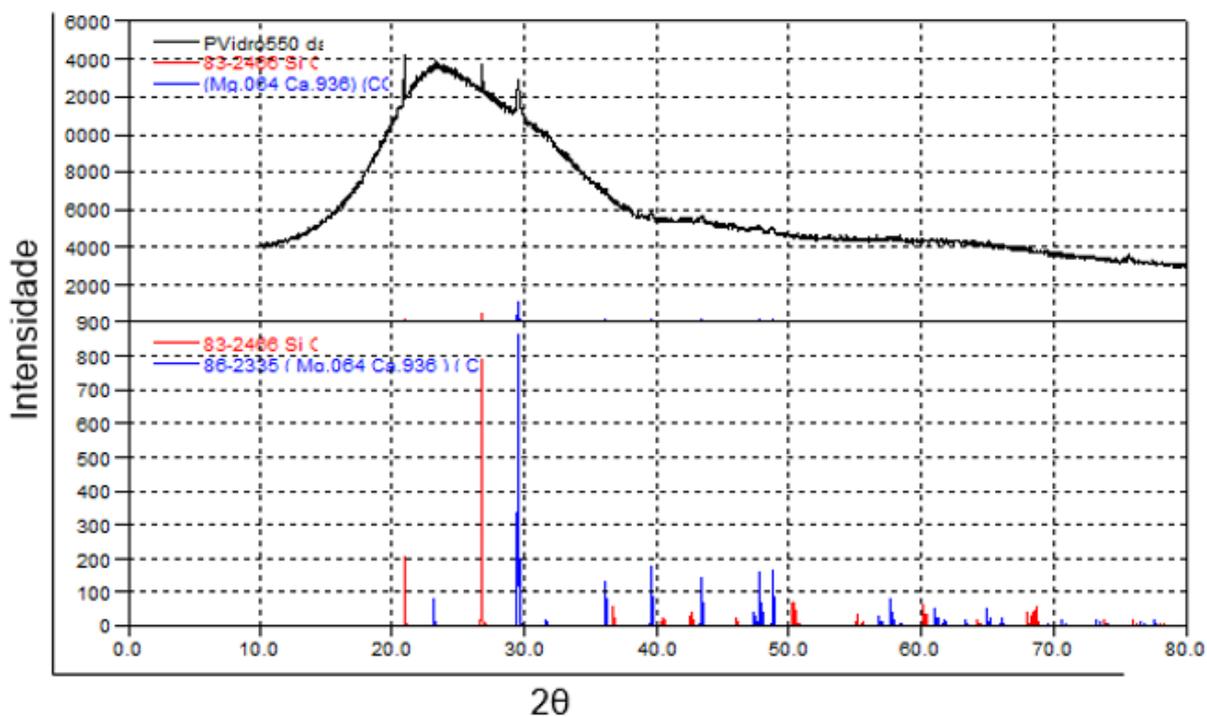
O gráfico 06 representa o difratograma da amostra PV sinterizada em 450 °C. O espectro apresenta a presença de formação de cristais em função da temperatura de sinterização. Observa-se no espectro os picos característicos da fase cristalina presente Calcita (CaCO_3), onde sua formação é atribuída ao processo de entalpia de reação química de ligação durante o processo de sinterização entre os diferentes elementos químicos presentes no pó de vidro.

Gráfico 06: Difratograma do Pó de vidro sinterizado em 450 °C.



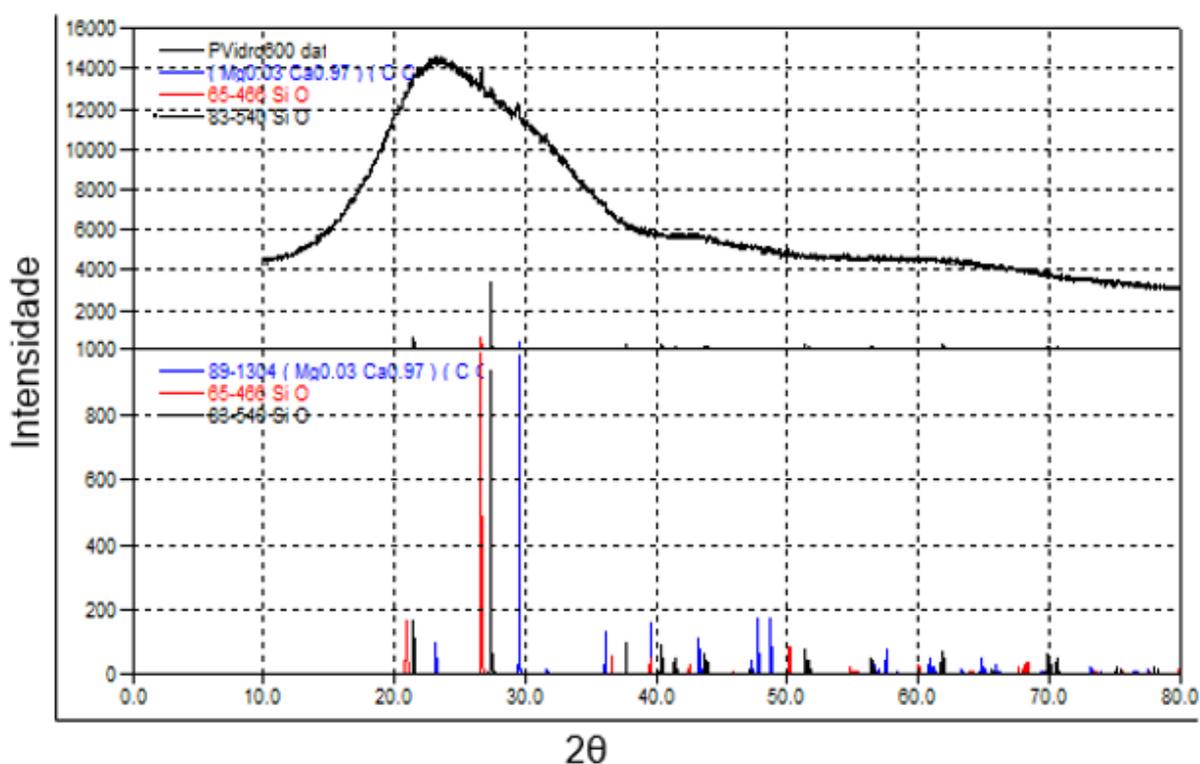
O gráfico 07 representa o difratograma da amostra PV sinterizada em 550 °C. O espectro apresenta a presença de formação de cristais em função da temperatura de sinterização. Observa-se no espectro os picos característicos das fases cristalinas presentes, Calcita Magnésiana ($Mg_{.064} Ca_{.936}$) (CO_3) e baixo Quartz (SiO_2). A formação dessas fases cristalinas pode ser atribuída ao processo de entalpia de reação química de ligação durante o processo de sinterização entre os diferentes elementos químicos presentes no pó de vidro.

Gráfico 07: Difratograma do Pó de vidro sinterizado em 550 °C.



O gráfico 08 representa o difratograma da amostra PV sinterizada em 600 °C. O espectro apresenta a presença de formação de cristais em função da temperatura de sinterização. Observa-se no espectro os picos característicos das fases cristalinas presentes, Calcita Magnésiana ($Mg_{0.064}Ca_{0.936}$) (CO_3), baixo Quartz (SiO_2) e Quartz (SiO_2). A formação dessas fases cristalinas pode ser atribuída ao processo de entalpia de reação química de ligação durante o processo de sinterização entre os diferentes elementos químicos presentes no pó de vidro.

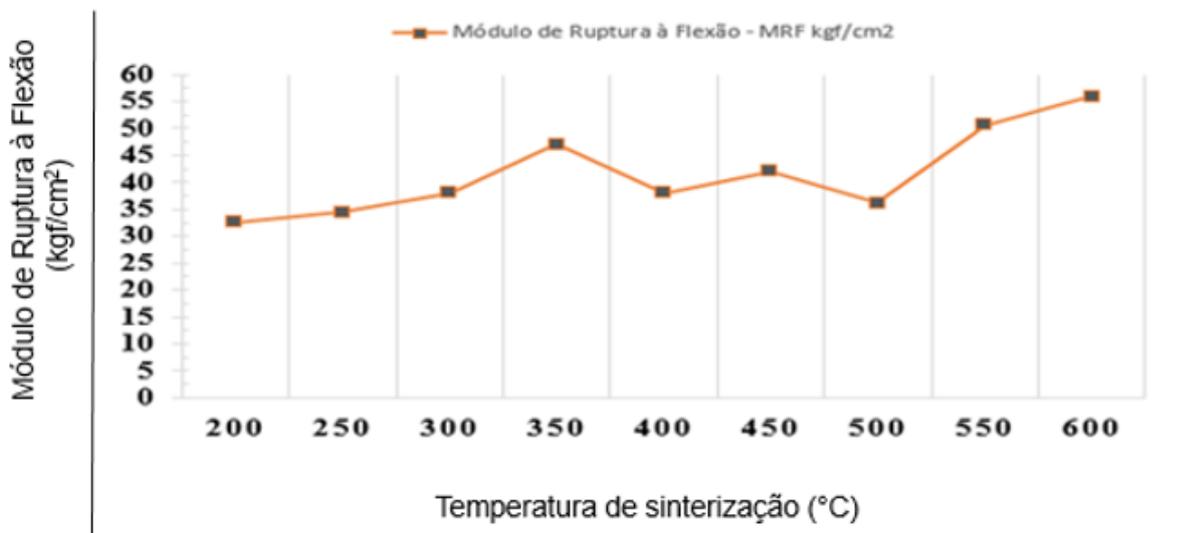
Gráfico 08: Difratograma do Pó de vidro sinterizado em 600 °C.



5.6 Análises de Resistência a Flexão:

O gráfico 09 aponta os dados obtidos para o módulo de ruptura à flexão após a sinterização dos corpos de prova obtidos para 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C e 600 °C.

Gráfico 09: Módulo de Ruptura à Flexão (MRF) em função da temperatura de sinterização dos CP.



5.7 Absorção de Água:

De acordo com a NBR 8492/2012 [68], a amostra ensaiada de um revestimento ecológico não deve apresentar valores superiores a 22%. É possível observar na tabela 06 abaixo que os corpos de prova CP-Verde, CP-1, CP-3 e CP-8 atenderam os requisitos da norma.

De maneira geral todas as amostras apresentaram um bom resultado de absorção de água, tendo em vista que para um revestimento cerâmico de qualidade não pode apresentar absorção excessivamente baixa, pois não terá aderência necessária no substrato (parede), e nem em excesso, pois irá fragilizar o revestimento.

Tabela 06: Índice de Absorção de Água

Corpo de Prova (CP)	AA %
CP sem sinterizar	17,2%
CP 01	19,4%
CP 02	22,6%
CP 03	17,6%
CP 04	23,5%
CP 05	23,3%
CP 06	22,9%
CP 07	27,6%
CP 08	17,1%
CP 09	23,5%

6 Conclusões:

Nesta pesquisa foi dirigido o estudo e caracterização de propriedades físicas em função da temperatura de sinterização do pó de vidro proveniente da lapidação de vidros planos. A partir dos resultados obtidos, as seguintes considerações podem ser mencionadas:

Após a desidratação foi possível obter pastilhas e estudar os parâmetros de sinterização aplicados nos corpos de prova.

Os resultados de fluorescência mostraram através dos elementos que os pós de vidro é característico de vidros sodo-cálcico.

As análises de MEV mostraram a granulometria homogênea e minimização do nível de porosidade após cada processo de sinterização.

Foi possível obter os corpos de provas e submeter aos testes mecânicos.

As análises de microdureza mostraram que as propriedades dos corpos de prova aumentam em função da temperatura.

As medidas de flexão mostraram que os corpos de prova sinterizados em 350°C, 550°C e 600°C tiveram melhores módulos de ruptura em relação às outras temperaturas.

As caracterizações foram realizadas com amostras de pós de vidro de resíduo sem a adição de adesivos ou ligantes, o que demonstra que é possível melhorar as propriedades de novo material de forma obter um revestimento dentro das normas e aplicar no setor da construção civil.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. PEREIRA, F. R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composição cerâmicas e cimentíceas.** Departamento de Engenharia Cerâmica e do vidro, 2006.pg.15-27.
2. PEREIRA FILHO, L. I.; COSIN, S.; VALERA, T. S.; TOFFOLI, S.M. (2002). **Utilização de vidro em pó em cerâmica vermelha.** Anais do 46º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, SP, p. 1187-1196.
3. PEREIRA FILHO, F. I.; COSIN, S.; TOFFOLI, S.M. (2002). **Utilização de vidro em pó em cerâmica vermelha. Parte 2: Influência da Granulometria.** Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – RN.
4. ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. (2002) **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206_CT206_2001.pdf Acesso: 25/05/2019.
5. MAIA, S. B. (2003) **O vidro e sua fabricação.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003. – (Interdisciplinar; 1).
6. AKERMAN, M. (2000). **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro,** CETEV (Centro Técnico de Elaboração do Vidro).
7. GWERCMAN, S. (2011). **Quem inventou o vidro?.** Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/quem-inventou-o-vidro/> Acesso: 12/03/2019.
8. CEBRACE – **Empresa Cebrace Cristal Plano.** São Paulo, 1974. Disponível em: <http://www.cebrace.com.br> Acesso: 01/03/2019.
9. CEBRACE – **Composição química.** Disponível em: <http://www.cebrace.com.br/v2/vidro/composicao-quimica> Acesso: 24/04/2019.

10. PILKINGTON (2010). **Pilkington and the flat glass industry**. Disponível em: <http://www.pilkington.com/resources/pfgi2009final.pdf> Acesso: 01/03/2019.
11. COMLURB (2009). **Caracterização Gravimétrica e Microbiológica dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município do Rio de Janeiro**. Centro de Informações Técnicas – CITE.
12. ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos. Disponível em: http://www.andiv.com.br/vidro_comum.asp Acesso: 22/07/2019.
13. ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (2011). Disponível em: http://www.andiv.com.br/fiquepordentro_vbrasilhoje.asp Acesso em: 22/07/2019.
14. CNQ – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO RAMO QUÍMICO DA CUT. **Panorama Setor de Vidro**. Janeiro 2015. Disponível em: <http://cnq.org.br/system/uploads/publication/b2a03b701c902f59b717ce1e7396502e/file/panorama-vidros-pdf> Acesso: 02/05/2019.
15. FREIRE, L. L. R. **A indústria de vidros planos**. Caderno Setorial ETENE. Banco do Nordeste, ano1, n.3, 2016.
16. VEIGA, V. V. da. **Análise de Indicadores Relacionados à Reciclagem de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Florianópolis**. 2004. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.
17. COELHO, R. M. P. **Produção, Consumo e Reciclagem de Vidro no Brasil**. Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Cap. 06.
18. PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos – Ministério do Meio Ambiente Lei nº 12.305/10, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes

- relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Brasília, 2010.
19. MMA – Ministério do Meio Ambiente – Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/politica-de-residuos-solidos> Acesso: 02/03/2019.
 20. GUIMARÃES, G.B. **Avaliação do uso de resíduo de vidro na produção de pisos polidos**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
 21. CONAMA - **Conselho Nacional do Meio Ambiente** - Ministério do Meio Ambiente Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelecem diretrizes, critérios, procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Brasília, 2002.
 22. JOHN, V. M. J. **Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil**. Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. 41º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. Salvador, 1999.
 23. JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário – Reciclagem de resíduos domiciliares. São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2000. Disponível em: https://globalconstroi.com/images/stories/Manaus_tecnicos/2010reciclagem_residuos/CETESB.pdf Acessado: 15/04/2019.
 24. PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1999.
 25. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

26. MORALES; G. **Técnicas de Manejo e Gestão Adequadas de Usinas de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil.** II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Londrina, 2011.
27. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br> Acesso: 12/04/2019.
28. SOLURB – CG Soluções Ambientais – SPE Ltda., Concessionária responsável pela gestão da limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos do município de Campo Grande – MS. Disponível em: <https://www.solurb.eco.br/serviço/coleta-seletiva/18> Acesso: 07/05/2019.
29. OLIVEIRA, M. C. R.; SILVA, A. L. B.; PEREIRA, F. F.; COSTA, G. L. S.; MARQUES, S. A. **Argamassa produzida com resíduo de vidro substituindo o agregado miúdo.** VII Congresso Norte Nordeste de pesquisa e inovação. Anais. Palmas: CONNEPI, 2012.
30. FERNANDES, M. H. F. V. **Introdução à ciência e tecnologia do vidro** Universidade Aberta (Lisboa) Portugal 1999.
31. MOREY, G. W. **The Properties of Glass.** New York: Reinhold Publishing Corp., 1938.
32. ASTM. **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride.** 2012. 8p
33. ROMANO, A. S. **Vidro.** Iniciação Científica (Graduação em engenharia civil). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1998.
34. ELLIOTT, S. R. (1994) Amorphous Solids: An Introduction. In: Catlow, C. R. A. “Defects and Disorder in Crystalline and Amorphous Solids” NATO Advanced Studies Institutes Series; Series C, Mathematical and Physical Sciences, 418, Kluwer Academic Publishers.

35. SHELBY, J. E. (1997). *Introduction to Glass Science and Technology*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
36. NAVARRO, J. M. F. (1985). **El Vidro**. CSIC – Consejo superior de Investigaciones Científicas – Madrid, Spain.
37. ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F. E MAZALI, I. O. Em: De PAOLI, M. A. e MALDANER, O. A. (Eds) *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola (Novos Materiais)* n. 2, p. 13-24, 2001. Disponível em: https:spqensino.foco.fae.ufmg.br/caderno_novos_materiais). Acesso: 28/07/2019.
38. MOYNIHAN, C. et al. in *The Glass Transition and the Nature of the Glassy State*, Eds. M. Goldstein and R. Simha, Ann. N.Y. Acad. Sci., Vol. 279 (1976)
39. ARAUJO, E. B. de. **Vidro: Uma Breve História, Técnicas de Caracterização e Aplicações na Tecnologia**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 19, nº 3, p. 325-329, 1997.
40. YAMAKI, S. B.; PEDROSO. A. G.; ATVARIS, T. D. Z. **O Estado Vítreo Dentro da Perspectiva do Curso de Graduação em Química (físico-químico)**. Quim. Nova, vol. 25, nº 2, p330-334, 2002.
41. SANTOS, A. R. F. **Ficha Técnica de Iniciação de Pesquisa**. Escola politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2009, pg. 05.
42. KLUG, H.; ALEXANDER, L. (1974). *X-Ray Diffraction Procedures*. New-York: JOHN WILEY & SONS. pp. 120–187.
43. CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7ª ed. New York, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
44. ZACHARIASEN, W. H. **The Atomic Arrangement in Glass**. Journal of the American Chemical Society, vol. 54, p. 3841-3851, 1932.

45. DELBIANCO, F. S. **Caracterização de vidros preparados com resíduo da indústria de galvanostegia**. 2003. p. 90 (Dissertação Mestrado em Física – universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP)
46. POKORNY, A. **Obtenção e caracterização de espumas vítreas a partir de resíduos de vidro sodo-cálcicos e calcário dolomítico como agente espumante**. (Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006).
47. MAGELLA, M. A. **Desenvolvimento de materiais vítreos e vitrocerâmicos a partir de escórias da produção de aços inoxidáveis**. Florianópolis, SC, Jun, 1999. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. p.65).
48. BARSOUM, M. W. *Fundamentals of Ceramics*. 1 ed. New York, McGraw-Hill, 1997.
49. FUGITA, L. **Utilização de selênio como colorante / descolorante em vidros sodo-cálcicos**. São Paulo; EPUSP, 2004, p. 66.
50. LM VIDROS. Vidros LM Temperados – Disponível em: <http://lmvidros.com.br/>
Acesso: 28/07/2019.
51. ÂNGULO, S. C., ZORDAN, S. E., JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil – materiais reciclados e suas aplicações. CT206 – IBRACON. São Paulo – SP, 2001. Disponível em: https://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206.pdf Acesso: 16/05/2019.
52. ANTÔNIO, A. P. Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos. (Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Centro Tecnológico. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória – ES, 2012, p. 155).

53. RECICLAR PARA CONSTRUIR. Disponível em:
<https://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos.htm> Acesso: 22/03/2019.
54. LOPES, M. TEM SUSTENTAVEL. Disponível em:
<https://www.temsustentavel.com.br/escolha-o-melhor-tipo-de-revestimento-ecologico-para-sua-construcao/> Acesso: 30/07/2019.
55. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA TÉCNICA DE ANÁLISE ESPECTROMÉTRICA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS – X. PUC-Rio de Janeiro.
56. BECKHOFF, B.; KANNGIEBER, B.; LANGHOFF, N.; WEDELL, R.; WOLFF, H. *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. 1ª ed. Berlim, Springer, 2006.
57. BISH, D. L.; Reynolds, R. C. *Sample Preparation for X-ray Diffraction*. In *Modern Powder Diffraction*. Mineralogical Society of America, Washington, D. C., 1989, Cap. 4, p. 73-97. (Reviews in Mineralogy, V. 20).
58. CULLITY, B. D. *Elements of X-Ray Diffraction*. 2ª ed. Addison-Wesley Publishing Company, INC., 1978. P. 555.
59. PERKINELMER, "Thermogravimetric Analysis (TGA): A Beginner's Guide", perkinelmer.com - TGABeginnersGuide.pdf.
60. SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; NIEMAN, Timothy A. (2002). *Princípios de Análise Instrumental*. [S.l.]: Bookman.
61. BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó**. IFRN – Departamento de Tecnologia Industrial – CEFET-RN.
62. NAGATANI, T.; SAITO, S.; SATO, M.; YAMADA, M. *Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system*. Scanning Microscopy. V. 11, 901-909, 1987.

63. KNOLL, M. *Aufladepotential und Sekundaremission elektrinenbestrahlter Korper*. Z Tech. Phys. V. 16, 467-475, 1935.
64. VON ARDENNE M. *Das Elektronen-Rastermikroskop. Theoretische Grundlagen*. Z Tech. Phys. V. 109, 553-572, 1938.
65. RODRIGUES, L. E. M. Ensaio Mecânicos de Materiais. IFECT – SP (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia).
66. GARCIA, A. (2000) Ensaio Mecânicos. Livros técnicos e científicos Editora.
67. GALVÃO, A. C. P.; FARIAS, A. C. M.; MENDES, J. U. L. **Caracterização do rejeito de vidro sodo-cálcico proveniente do processo de lapidação**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – 21º CBECIMAT (Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais) (2014).
68. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8492/2012: Tijolo de solo – cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
69. ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. **The glassy state of matter: its definition and ultimate fate**. University of Sheffield, Reino Unido – Journal of Non-Crystalline Solids, 2017.
70. ZANDONADA, A. R. **Fundamentos da Tecnologia Cerâmica: Programa de Treinamentos para Terceiros Países**, São Paulo: IPT/JICA, 1988.
71. Rivesti Revestimentos Ecológicos. Disponível em: <https://rivesti.com.br/>. Acesso em 12/03/2019.
72. ARAÚJO, A. F. **A aplicação da metodologia de produção mais limpa: estudo em uma empresa do setor de construção civil**. Dissertação (mestrado em engenharia de produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, ano 2002.