

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**“CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO
BLINDEX® PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
NA MISTURA SOLO-CIMENTO”**

DUILIO RODRIGUES PORTO JUNIOR

***Orientador:** Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza*

Campo Grande – MS

Dezembro – 2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**“CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE PÓ DE VIDRO
BLINDEX® PARA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
NA MISTURA SOLO-CIMENTO”**

DUILIO RODRIGUES PORTO JUNIOR

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.

Campo Grande – MS

Dezembro – 2024

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por cada momento precioso.

Ao Instituto de Física, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Ao meu orientador Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza, por suas contribuições, pelos seus ensinamentos, por todo apoio prestado e principalmente por sua extraordinária dedicação ao me orientar na realização desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Daniel Anijar de Matos por me permitirem utilizar o LATRAN/UFMS juntamente com o auxílio dos técnicos de laboratório nos ensaios da minha pesquisa.

Ao Prof. Dr. Alberto Adriano Cavalheiro, por suas contribuições, pelos seus ensinamentos e todo apoio prestado.

Aos meus colegas de laboratório, Munique, Marco Antônio e Rafaela pelos auxílios no decorrer do meu estudo e também pelas atitudes de incentivo, motivação e companheirismo.

Ao corpo docente e técnicos do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (UFMS), e do curso de Engenharia Civil (UFMS), pelos ensinamentos e instruções concedidos a mim, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À minha esposa Thainan Paola Lima Porto e ao meu filho Benjamin Lima Porto, pela paciência, apoio e união familiar que me permitiram chegar até aqui.

À minha mãe e ao meu pai que me passaram os ensinamentos fundamentais para a vida.

“Ora, a fé é a certeza de
coisas que se esperam,
a convicção de fatos
que não se veem”

Hebreus 11:1

RESUMO

O vidro é um material que está presente em vários setores da economia, com isso, a industrialização do vidro gera muitos resíduos nos diferentes processos da sua utilização. Existem alguns projetos que utilizam este resíduo para a fabricação de cerâmica e concreto, visto que pode ser usado como matéria-prima para outros compósitos. Um composto muito utilizado nas camadas de pavimentação é o solo-cimento, visto que o cimento estabiliza quimicamente o solo aumentando a resistência da mistura. Diante desse material composto, buscamos inovar com uma nova composição de solo-cimento, utilizando resíduos de vidro industrial, com propósito de contribuir de forma econômica no setor de pavimentação e consequentemente com o meio ambiente, minimizando a quantidade de resíduos enviados aos aterros sanitários. O trabalho foi desenvolvido seguindo algumas etapas, ou seja, a primeira etapa foi obter o material precursor, onde as amostras obtidas foram retiradas como resíduo da indústria na forma de lama com alta viscosidade, durante a etapa de lapidação das placas de vidro, em seguida as amostras foram submetidas a um processo de desidratação e refinamento, resultando num pó com granulometria na ordem de 46 mesh, representando nosso precursor principal. Na segunda etapa as amostras precursoras de pó de vidro, foram submetidas aos processos de caracterização, utilizando as técnicas auxiliares de difração de raios-X, análises térmicas (TG e DSC), microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada ao EDS. Na terceira etapa as amostras foram submetidas aos ensaios mecânicos dos corpos de prova, para verificar a possibilidade da substituição parcial e/ou integral do cimento na mistura solo-cimento observando os parâmetros mínimos de aceitação da Norma do DNIT 143/2022 – 2,1 Mpa de resistência à compressão simples na cura de 7 dias. Os resultados encontrados nos ensaios de análise térmica de TG, mostraram uma perda de massa de 5,7% com gradiente de temperatura de 1.100 °C para a amostra de pó de vidro padrão; já o DSC, apresentou um pico endotérmico no intervalo de 700 °C a 820 °C, referente ao processo de transição vítrea, e, a partir de 870 °C o material apresentou uma inclinação ascendente de excelente estabilidade térmica. Os resultados do MEV, mostraram através das micrografias, uma granulometria com geometria poliédrica e ausência de precipitação de fase. Os resultados de EDS, confirmaram a presença de Si, Na e Ca em maiores concentrações. Os resultados da difração de raios-X, mostraram uma estrutura amorfa. Os resultados referentes aos ensaios mecânicos com os CPs de solo-cimento e solo-cimento-pó de vidro, demonstraram que o pó de vidro contribui em 35% e 42% de resistência à tração por compressão axial quando comparado ao solo-cimento com 5% e 7% de

cimento respectivamente. Portanto, os resultados apresentados pela composição utilizando pó de vidro, demonstra ser um novo material com propriedades físico-químico, muito promissor na aplicação de pavimentação dentro da Norma do DNIT 143/2022, podendo substituir significativamente uma determinada porcentagem de cimento, contribuindo economicamente com o setor de transporte.

ABSTRACT

Glass is a material that is present in several sectors of the economy, and as a result, the industrialization of glass generates a lot of waste in the different processes of its use. There are some projects that use this waste to manufacture ceramics and concrete, since it can be used as a raw material for other composites. A compound widely used in paving layers is soil-cement, since cement chemically stabilizes the soil, increasing the resistance of the mixture. Given this composite material, we sought to innovate with a new soil-cement composition, using industrial glass waste, with the purpose of contributing economically to the paving sector and consequently to the environment, minimizing the amount of waste sent to landfills. The work was developed following some steps, that is, the first step was to obtain the precursor material, where the samples obtained were taken as industrial waste in the form of high viscosity sludge, during the glass plate polishing stage, then the samples were subjected to a dehydration and refinement process, resulting in a powder with a particle size of around 46 mesh, representing our main precursor. In the second step, the precursor samples of glass powder were subjected to characterization processes, using the auxiliary techniques of X-ray diffraction, thermal analysis (TG and DSC), scanning electron microscopy (SEM) coupled to EDS. In the third step, the samples were subjected to mechanical tests of the specimens, to verify the possibility of partial and/or full replacement of cement in the soil-cement mixture observing the minimum acceptance parameters of DNIT Standard 143/2022 - 2.1 Mpa of simple compressive strength in 7-day curing. The results found in the TG thermal analysis tests showed a mass loss of 5.7% with a temperature gradient of 1,100 °C for the standard glass powder sample; the DSC presented an endothermic peak in the range of 700 °C to 820 °C, corresponding to the glass transition process, and, from 870 °C onwards, the material presented an ascending slope of excellent thermal stability. The SEM results showed, through the micrographs, a granulometry with polyhedral geometry and absence of phase precipitation. The EDS results confirmed the presence of Si, Na and Ca in higher concentrations. The X-ray diffraction results showed an amorphous structure. The results related to the mechanical tests with the soil-cement and soil-cement-glass powder CPs demonstrated that the glass powder contributes 35% and 42% of tensile strength by axial compression when compared to the soil-cement with 5% and 7% of cement, respectively. Therefore, the results presented by the composition using glass powder demonstrate that it is a new material with physical-chemical properties, very promising in the

application of paving within the DNIT 143/2022 Standard, being able to significantly replace a certain percentage of cement, contributing economically to the transportation sector.

SUMÁRIO

1. Introdução	12
2. Objetivo	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivo Específico	14
3. Revisão Bibliográfica	15
3.1. Vidro	15
3.1.1. O vidro da renascença à atualidade	15
3.1.2. História do vidro no Brasil	16
3.1.3. Definição de vidro	17
3.1.4. Transição vítrea	19
3.1.5. Estrutura do vidro	21
3.1.6. Propriedades do vidro	21
3.1.7. Vidro temperado	22
3.1.8. Resíduo e reaproveitamento do vidro	23
3.2. Física do estado sólido	24
3.2.1. Tipos de ligações	24
3.2.2. Materiais e os tipos de ligação	25
3.2.3. Estrutura dos sólidos cristalinos	25
3.2.3.1. Reticulados de Bravais	26
3.2.3.2. Estrutura cristalina da cerâmica	27
3.2.3.2.1. Cerâmicas (vidros) à base de sílica	27
3.2.4. Estrutura dos sólidos não cristalinos	28
3.2.5. Análise termogravimétrica (TG)	30
3.2.6. Difração de raios x	30
3.2.7. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	31
3.2.8. Análise da composição química do resíduo de vidro temperado	32
3.3. Solo-cimento	32
3.3.1. Norma geral de dosagem do solo-cimento	35
3.3.2. Tipos de cimento	35
3.3.3. Propriedades mecânicas	36
3.3.3.1. Resistência à compressão simples – RSC	37
3.3.3.2. Resistência à tração por comparação diametral	37

3.3.3.3. Ensaio de módulo de resiliência	38
4. Materiais e Métodos	39
4.1. 1º Etapa – Coleta da amostra de pó de vidro	41
4.2. Secagem da amostra e destorramento	43
4.3. Prensagem das pastilhas	44
4.4. Sinterização das amostras na forma de pastilha	45
4.5. Difração de raios-x	46
4.6. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)	46
4.7. Análise Termogravimétrica (TGA)	47
4.8. Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC)	48
4.9. Coleta, caracterização da amostra de solo e ensaios mecânicos	48
4.9.1. Limite de liquidez e limite de plasticidade	49
4.9.2. Granulometria da amostra de solo	50
4.9.3. Ensaio pelo método físico-químico – Estabilização do solo com o cimento – CPII	50
4.9.4. Ensaio de resistência à tração por compressão	51
4.9.5. Ensaio da resistência à compressão simples	53
4.9.6. Ensaio de módulo de resiliência	53
5. Resultados e Discussões	55
5.1. Análise Termogravimétrica (TG)	55
5.2. Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC)	56
5.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	58
5.4. Espectroscopia por energia dispersiva (EDS)	59
5.5. Difração de raios-x	61
5.6. Ensaio de caracterização geotécnica do solo	63
5.7. Ensaio pelo método físico-químico – Estabilização do solo com o cimento – CPII	64
5.8. Ensaio de resistência à compressão simples	65
5.9. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	67
5.10. Ensaio de determinação do módulo de resiliência	68

6. Conclusão	70
7. Referências Bibliográficas	71
8. Anexo	77

1 – INTRODUÇÃO

A construção civil, um dos setores de mais destaque na economia do Brasil, utiliza grandes quantidades de recursos naturais e de energia para execução de obras nos segmentos de infraestrutura e edificações, gerando muitos resíduos, sendo um exemplo o pó de vidro.

O vidro é um material que está presente em vários setores da economia – medicina, automobilística, alimentícia e construção civil - e suas etapas de modelagem são as seguintes: corte, lapidação, têmpera, laminação e serigrafia. É no processo de lapidação que surge a maior parte do resíduo de vidro na forma de pó, que não pode ser reciclado no próprio processo, porém, pode ser matéria prima de outros compósitos.

O pó de vidro é um resíduo industrial inerte, não é poroso nem absorvente, é ótimo isolador e possui baixo índice de dilatação. Na sua maioria, possuem composição química à base de Na_2O e CaO , que são óxidos fundentes.

Alguns estudos no setor da construção civil buscam inovações de materiais, compósitos e ligas para reaproveitar os resíduos de vidro, objetivando a diminuição dos impactos ambientais e econômico ocasionados pela retirada da matéria prima da natureza.

O pó de vidro já é reaproveitado em substituição parcial do cimento e da areia, que apresenta resultados positivos na melhora das propriedades mecânicas da matriz na qual este resíduo é inserido, visto que possui granulometria mais fina que os materiais comumente utilizados.

Associa-se à reutilização do pó de vidro o desenvolvimento de novos materiais e produtos, com capacidade de competir no mercado de igual para igual, e ainda, a sua contribuição para o desenvolvimento sustentável.

O crescimento populacional, econômico e, conseqüentemente, a construção civil provoca um grande consumismo dos recursos naturais no nosso planeta. A construção civil já observa a escassez de alguns materiais e/ou insumos e pesquisa constantemente novos métodos de produção de materiais preservando o meio ambiente.

O solo-cimento e/ou o solo estabilizado com o cimento ou cal é obtido pela mistura de solo, água e cimento, e ultimamente, está sendo pesquisado como nova alternativa aos tradicionais insumos já utilizados e padronizados na construção civil, visando o barateamento

do custo na construção civil em diversas áreas. Algumas destas pesquisas visam a fabricação de tijolos ou blocos por prensagem ou compactação deste compósito. [33]

Na pavimentação, o solo-cimento é utilizado nas camadas de base e sub-base de ruas e estradas. O solo-cimento é compactado no local com auxílio de formas, em uma única camada, de maneira que a placa maciça fica toda apoiada ao chão, e visa minimizar os impactos ambientais e consumo de energia, por ser uma alternativa aos padrões de matérias já utilizados na construção civil. [34]

Na construção civil, o solo-cimento pode ser utilizado em várias etapas. Pode ser utilizado para a execução da fundação (viga baldrame, sapata corrida ou parede maciça apoiada diretamente no solo), na execução de piso e/ou contrapiso, na execução de muro de arrimo e/ou dique de pequenas barragens – com solo-cimento ensacado.[34]

O resíduo de pó de vidro pode ser uma alternativa para baratear ainda mais o custo do solo-cimento um composto que já é barato quando comparado com outros materiais da construção civil. Talvez, o pó de vidro tenha um bom desempenho na composição solo, cimento e água quando em substituição ao cimento.

2 – OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO GERAL

Processamento e caracterização das amostras de resíduos industrial de pó de vidro Blindex[®], gerado durante a etapa de lapidação de vidros planos, visando utilizá-lo na composição do solo-cimento, substituindo parcialmente o cimento por resíduo de pó de vidro industrial.

2.2 – OBJETIVO ESPECÍFICO

- Processamento do pó de vidro precursor;
- Prensagem e obtenção de corpos de prova;
- Análise termogravimétrica (TG);
- Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC);
- Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS);
- Análises e caracterização de difratometria de raios-x;
- Ensaio de caracterização da amostra do solo;
- Análise e comparação da resistência à tração e a compressão do composto solo-cimento e solo-pó de vidro;
- Análise e comparação do módulo de resiliência do composto solo-cimento e solo-pó de vidro.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – VIDRO

3.1.1 – O VIDRO DA RENASCENÇA À ATUALIDADE

Importantes desenvolvimentos na fabricação e aplicação de vidros ocorreram através dos séculos XVIII, XIX e XX, conforme descreve a tabela 01 dos principais estudos e desenvolvimentos dos vidros nos últimos 300 anos [21].

Tabela 01. Desenvolvimentos dos vidros nos últimos 300 anos.

Data	Estudos e Desenvolvimentos
1765	Início da produção do vidro cristal
1787	Utilização de aparelhos de vidro para o estudo das propriedades físicas dos gases: Lei de Boyle e Charles
1800	Revolução industrial abre nova era na fabricação de vidros. Matérias-primas sintéticas são usadas pela primeira vez. Vidros com propriedades controladas são disponíveis
1840	Siemens desenvolve o forno do tipo tanque, para a produção de vidro em grande escala; produção de recipientes e vidro plano
1863	Processo "Solvay" reduz dramaticamente o preço da principal matéria-prima para fabricação de vidros: óxido de sódio
1875	Vidros especiais são desenvolvidos na Alemanha por Abbe, Schott e Carl Zeiss. A Universidade de Jena, na Alemanha, torna-se o maior centro de ciência e engenharia do vidro. A química do vidro está em sua infância
1876	Bauch & Lomb Optical Company é fundada em Rochester, Nova York. Tem início a fabricação de lentes e outros componentes ópticos
1881	Primeiros estudos sobre propriedade-composição de vidros para a construção de instrumentos ópticos, tais como o microscópio
1886	Desenvolvida por Ashley a primeira máquina para soprar vidro
1915	A Universidade de Sheffield, na Inglaterra, funda o Departamento de Tecnologia do Vidro, hoje chamado Centro para a Pesquisa do Vidro
1920	Griggith propõe a teoria que permite compreender a resistência dos bulbos de vidro, o que levou ao entendimento e aperfeiçoamento da resistência dos vidros
1926	Wood e Gray desenvolveram uma máquina que permitiu a fabricação de bulbos e invólucros de vidro em grande escala (1000 peças/minuto)
1932	Zachariasen publica seu famoso trabalho sobre a hipótese da rede aleatória e as regras para a formação de vidros no <i>Journal of American Chemical Society</i>
1950-1960	A companhia americana Ford Motor Co. funda o principal centro de pesquisa em vidro. A Ciência do Vidro torna-se sua maior área de pesquisa
1960	Turnbull e Cohen propõem modelo para a formação de vidros, baseado no controle da cristalização através da taxa de resfriamento
1970	A Corning Glass americana produz a primeira fibra óptica de sílica, usando técnicas de deposição de vapor químico para reduzir a atenuação e aumentar o sinal da transmissão
1984	Marcel e Michel Poulain e Jacques Lucas descobrem os primeiros vidros fluoretos em Rennes, na França

3.1.2 – HISTÓRIA DO VIDRO NO BRASIL

Em 1810, em Salvador, montada por Francisco Inácio de Siqueira Nobre, surgiu a primeira fábrica de vidros. O regente D. João VI recém chegado no Brasil autoriza a instalação e fabricação de vidros. Além dos vidros, D. João VI também autoriza a produção de tecidos, ferro, pólvora, ferramentas, corantes, óleos de iluminação, entre outros [19].

Em 1861, na 1ª Exposição Nacional de Produtos Naturais e Industriais, promovida pelo governo imperial no Rio de Janeiro com a finalidade de mostrar para os estrangeiros que o Brasil não produzia apenas açúcar, café, algodão, cacau, couros, e carnes salgadas, foi exibido grandes variedades de produtos manufaturados, sendo o vidro um deles. Os produtos de vidro expostos foram: garrafas, garrafões, frascos, e globos para lampião. Estes que eram fabricados por pequenas manufaturas de vidreiros portugueses, herdeiros da cultura e da formação técnica da fábrica da Marinha Grande, ou por artesões italianos que começavam a chegar com as primeiras levas de imigrantes europeus [19].

No Brasil, a fabricação de vidro só foi crescer após a Revolução de 30, liderada por Getúlio Vargas, intensificada pelos problemas deflagrados da 2ª Guerra Mundial [14].

O vidro era considerado como um artigo supérfluo, com taxa de importação de até 40%, visto que o Brasil não tinha uma produção interna suficiente. Na conjuntura da 2ª Guerra Mundial, a Europa, principal exportadora de vidro para o Brasil, não conseguia manter sua produção em grande escala, e logo, passou a importar vários produtos, entre eles o vidro [14].

Em 1942, em São Gonçalo, na época distrito de Niterói, no estado do Rio de Janeiro, foi fundada a Companhia Vidreira Nacional Covidra, com a finalidade de produzir vidro plano para a capital Federal que, na época, era a cidade do Rio de Janeiro [14].

Em tempos do fim da 2ª Guerra Mundial, em São Paulo, na Barra Funda, foi criada a Companhia Paulista de Vidro Plano – CPVP, pelos proprietários da Vidraria Santa Marina, com a finalidade de produzir garrafas para a capital paulista, regiões vizinhas e interior [19].

A fusão da Covidra e CPVP, aconteceu em 1953, que resultou na criação da Indústrias Reunidas Vidrobrás, visando o fornecimento de vidro para todo o país.

Os principais setores que ajudaram no consumo do vidro plano foram as indústrias automobilísticas e da construção civil, setores que estavam em grande expansão [19].

Em 1990, foi fundado a Abravidro que tem o objetivo de acompanhar a evolução e o desenvolvimento do vidro nos vários segmentos dos setores econômicos do país [19].

Em 2012, é criado pela Abravidro o “Panorama Abravidro”, que publica anualmente dados atualizados do mercado brasileiro contendo informações da produção de vidro no país. Os resultados são observados pela GPM Consultoria Econômica, empresa responsável pela apuração e declarações da indústria de base à revista *O Vidroplano*. [19].

3.1.3 – DEFINIÇÃO DE VIDRO

Michael Faraday, em 1830, fez os primeiros estudos sobre vidros, que o definiu como sendo um material mais aparentados a uma solução de diferentes substâncias do que um composto em si.

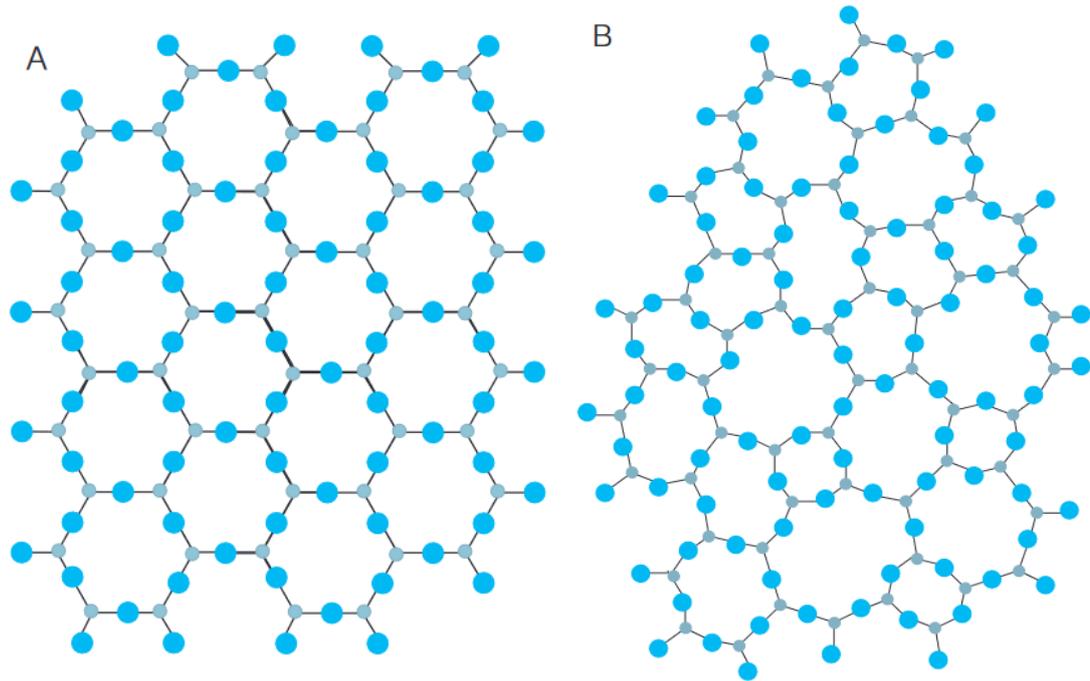
Em 1921, Lebedev na tentativa de explicar a estrutura do vidro, propôs a Hipótese do Cristalito, que definia o vidro como um fundido comum composto de cristais altamente dispersos. Esta teoria, considerava a inter-relação entre as propriedades e a estrutura interna do vidro. Hoje, esta hipótese não é mais considerada, porém, foi amplamente discutida.

Em 1932, Zachariasen em seu artigo *O arranjo atômico em vidro*, admitia que não tínhamos conhecimento sobre o arranjo atômico do vidro.

Ele propõe que o arranjo atômico do vidro era caracterizado por uma rede tridimensional estendida, que apresentava ausência de simetria e periodicidade. Segundo ele, a diferença entre um vidro e um cristal estava na presença ou ausência de periodicidade e simetria de uma rede tridimensional.

Na figura 01-A, um cristal de composição A_2O_3 na representação bidimensional apresenta o arranjo cristalino simétrico e periódico, já na figura 01-B mostra o mesmo composto para uma rede de vidro, onde demonstra a ausência de simetria e periodicidade [21].

Figura 01. Composição A_2O_3 para cristal e vidro.



A Hipótese da Rede Aleatória de Zachariasen, aceito na época da publicação do trabalho, define-se que o vidro é um produto inorgânico fundido, à base de sílica, resfriado sem cristalização, formado por uma rede tridimensional aleatória, sendo assimétrico e sem periodicidade.

Segundo Callister, o vidro pertence ao grupo de materiais cerâmicos amorfos, com divisão de tipologia.

A definição de Navarro é que o vidro é um produto inorgânico de fusão esfriado rigidamente sem cristalização.

Mais recente, o comitê do U.S.A Nacional Research Council definiu que “O vidro é, por difração de raio X, um material amorfo que exibe uma temperatura de transição vítrea. Esta é definida como o fenômeno pelo qual uma fase amorfa sólida exibe, devido à mudança de temperatura, uma variação repentina na derivada das propriedades termodinâmicas, tais como calor específico e coeficiente de expansão, em relação as suas respectivas fases cristalina e líquida”.

O estado vítreo foi criado na tentativa de enquadrar adequadamente os corpos vítreos, visto que havia dificuldade de enquadrá-lo nos três estados de agregação da matéria. Porém, não teve total aceitação [11].

Para uma melhor compreensão das características e propriedades que o vidro apresenta fica definido que o vidro é um sólido, não cristalino, com transição vítrea.

3.1.4 – TRANSIÇÃO VÍTREA

Segundo Callister, os vidros ou materiais não cristalinos apresentam algumas propriedades que dependem de alterações na temperatura, que é conhecida por transição vítrea (T_g), abaixo dessa temperatura encontramos o vidro, e acima dessa temperatura, o material é um líquido super-resfriado, e finalmente um líquido.

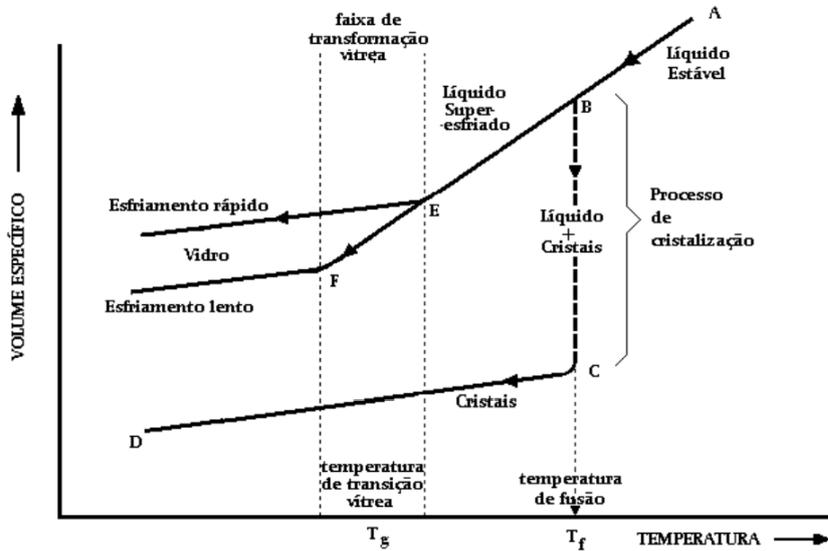
Pereira (2020), define que a temperatura de transição vítrea T_g é uma temperatura característica para os vidros, definindo a passagem do estado vítreo para o estado viscoelástico, através da chamada relaxação estrutural.

Callister acrescenta que a diferença entre um sólido cristalino e não-cristalino está na dependência do volume específico em função da temperatura. Conforme demonstra o gráfico 01, onde os materiais cristalinos se solidificam na temperatura de fusão (T_f) e a temperatura de transição vítrea (T_g) é característica dos materiais não cristalinos.

Caso ocorra um resfriamento lento, será favorecida a cristalização no ponto T_f , temperatura única de fusão características dos materiais cristalinos. Agora, se o resfriamento for rápido, o volume do líquido super-resfriado decresce, que aumenta continuamente a viscosidade até a temperatura T_g , transformando-se no estado vítreo.

A temperatura e a composição química estão diretamente relacionadas à viscosidade do vidro, que torna indispensável o estudo das características viscosidade-temperatura para a etapa de fabricação do vidro.

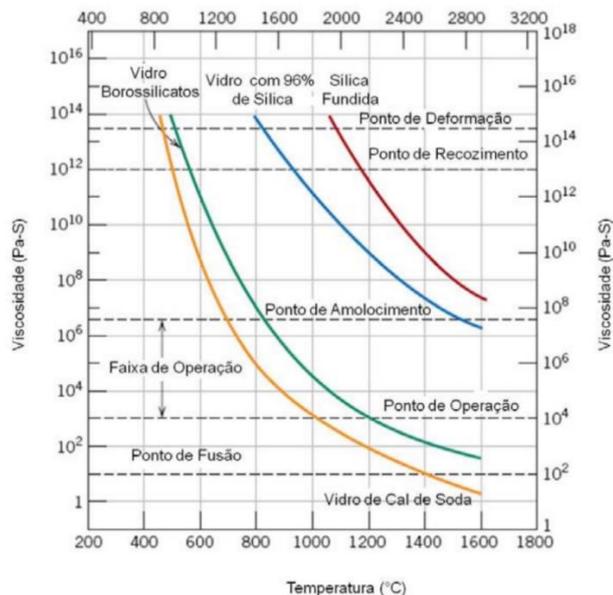
Gráfico 01. Diagrama demonstrando os estados vítreos, líquido e sólido cristalino.



O gráfico 02 demonstra as curvas do logaritmo da viscosidade em função da temperatura para vidros de sílica fundida, vidros de alto teor de sílica, vidro borossilicato e vidros sodo-cálcicos, definindo os pontos para o processamento de cada vidro.

Os vidros sodo-cálcicos, pode-se notar que a faixa de trabalho onde ocorre à maioria das operações de conformação dos vidros, se encontra entre as temperaturas de amolecimento e de operação, tendo como o ponto de amolecimento a variação de temperatura aproximadamente de 500 °C a 700 °C.

Gráfico 02. Logaritmo da viscosidade em função da temperatura para vidros [7].



3.1.5 – ESTRUTURA DO VIDRO

O vidro consiste numa substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea, obtida a partir do resfriamento de uma massa em fusão de óxidos ou de seus derivados e misturas, com o dióxido de silício sendo seu principal constituinte [21].

A taxa de resfriamento do vidro de líquido para sólido influencia na estrutura da sílica não cristalina que apresenta uma forma desordenada e não repetitiva [22].

A unidade básica do vidro é a estrutura tetraédrica SiO_4 , que pode formar outras estruturas vítreas pelos óxidos formadores de rede (B_2O_3 e GeO_2), óxidos modificadores de rede (CaO e Na_2O) e óxidos intermediários (TiO_2 e Al_2O_3) [7].

Vidros a base de sílica adicionados outros óxidos como os óxidos modificadores de rede CaO e Na_2O são utilizados para a fabricação de recipientes, janelas e outros.

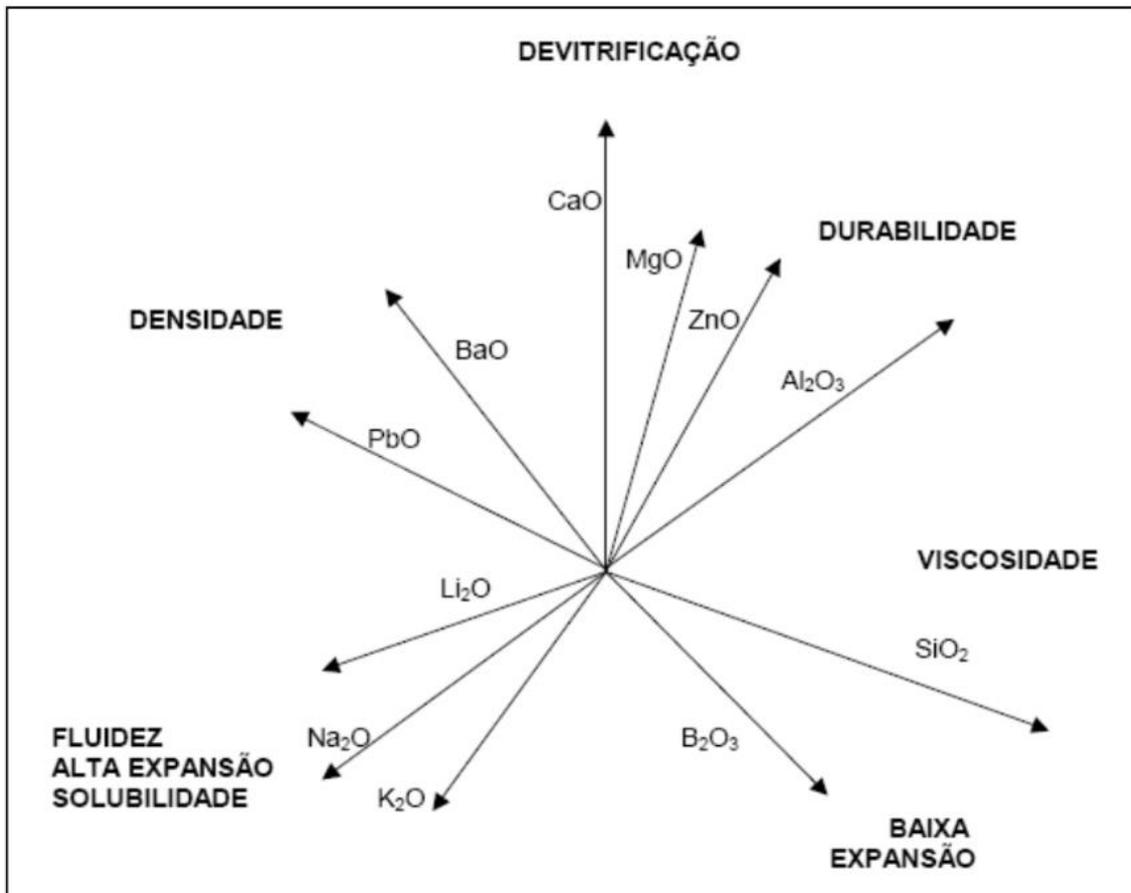
3.1.6 – PROPRIEDADES DO VIDRO

A soma dos óxidos presentes na composição dos vidros fecha em 100%, pois o aumento e a diminuição dos óxidos influenciam diretamente nas propriedades desejadas [23].

Segundo Callister, os materiais vítreos ou não-cristalinos apresentam algumas propriedades que dependem da variação na temperatura, que é conhecida por temperatura de transição vítrea (T_g).

O gráfico 03 mostra de forma quantitativa as propriedades dos vidros variando em relação a um aumento de óxidos constituintes, demonstrando que as propriedades dos vidros dependem de suas características estruturais.

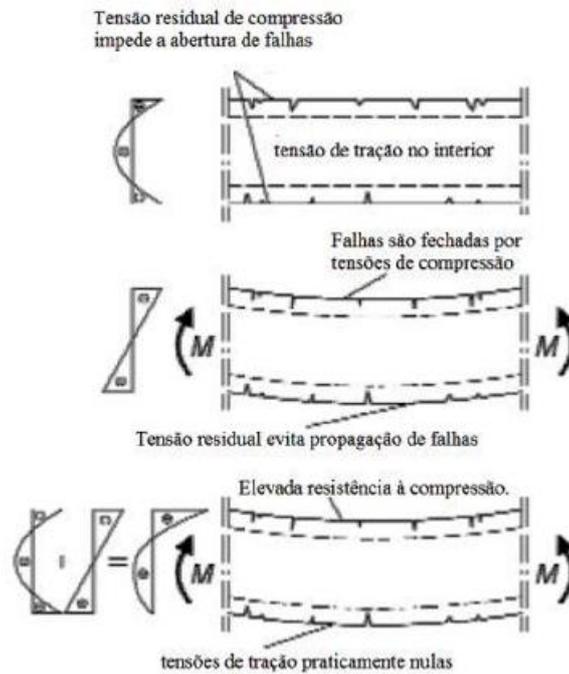
Gráfico 03. Propriedades dos vidros em relação ao aumento de óxidos constituintes [23].



3.1.7 – VIDRO TEMPERADO

O vidro temperado foi submetido a um tratamento térmico, um superaquecimento seguido de um rápido resfriamento, que aumenta sua resistência mecânica. O vidro temperado é 5 vezes mais resistente que o vidro comum. Este tipo de vidro é conhecido por ter boa resistência a compressão e pouca resistência à tração, conforme demonstra a figura 02. [28]

Figura 02. Efeito do processo de temperamento do vidro. [28]



3.1.8 – RESÍDUO E REAPROVEITAMENTO DO VIDRO

Com o avanço tecnocientífico houve um aumento nas indústrias em geral, as quais necessitam de matéria prima para produzirem seus produtos. Logo, aumentou também a geração de resíduos nos processos de produção de materiais. Mas, a preocupação com o descarte destes resíduos e o impacto ambiental que isso provoca também tem sido objetos de estudos [3].

Nos aterros sanitários, tem grande quantidade de resíduos proveniente do processo de fabricação de vidros, que causam grande impacto ambiental por possuir um tempo muito elevado para sua desintegração [4]. E, quando em contato com águas (rios), os resíduos de vidro podem aumentar o pH e a turbidez das mesmas [2].

Em alguns processos a reciclagem dos resíduos tem o custo muito elevado, que torna inviável sua reciclagem, diferentemente do vidro que se destacou na construção civil por sua viabilidade econômica no reaproveitamento, onde sua característica físico-química tem aumento a durabilidade e resistência de materiais cimentícios como argamassa e concretos [3].

A reutilização do vidro tem apresentado grandes resultados, visto que diminui o consumo da matéria-prima natural, como areia ou materiais sintéticos tendo o carbonato de sódio como exemplo. A redução do consumo de matéria-prima também reduz as emissões de

CO₂ em dois níveis: redução de energia no processo de fusão e redução do uso da matéria-prima cuja fusão emite dióxido de carbono [18].

3.2 – FÍSICA DO ESTADO SÓLIDO

O estado sólido é o estado da matéria condensada em que os átomos mantêm a posição de equilíbrio. E, é neste estado que podemos observar as propriedades físicas de um arranjo atômico como: a condutividade eléctrica, o ferromagnetismo, o calor específico e as transições de fase. [31]

Callister, afirma que o conhecimento das forças interatômicas que unem os átomos uns aos outros traz uma melhor compreensão das propriedades físicas dos materiais.

3.2.1 – TIPOS DE LIGAÇÕES

As ligações interatômicas podem ser classificadas quanto à suas intensidades em ligações primárias ou fortes e ligações secundárias ou fracas.

As ligações primárias são cerca de dez vezes mais fortes que as ligações secundárias, e sua energia é da ordem de 100 Kcal/mol, sendo divididas em três tipos: iônica, covalente e metálica. [30]

Já as ligações secundárias envolvem energia da ordem de 10 Kcal/mol. [30]

Em uma ligação iônica ideal ocorre a transferência completa da carga eletrônica de um átomo para outro, ou seja, um ou mais elétrons são transferidos de um átomo eletropositivo para outro mais eletronegativo. E, quanto maior a diferença de eletronegatividade entre dois elementos, maior será o caráter iônico da ligação entre eles. [30]

A ligação covalente é quanto ocorre que um ou mais átomos são compartilhados entre dois átomos, gerando uma força de atração entre os átomos que participam da ligação, ou seja, os elétrons de valência passam a orbitar indiferentemente nos átomos envolvidos. [30]

A ligação metálica apresenta elétrons não ligados a um único átomo, mas estão livres para se movimentar por todo o metal. Sendo que os elétrons que não são de valência juntamente com o núcleo formam um “caroço” eletricamente positivo, como uma “cola”, mantendo-os unidos. [30]

Também conhecida como ligação de van der Waals é utilizada para designação geral para todos os tipos de ligações secundárias (fracas). A principal causa para a ocorrência de uma ligação secundária é a polarização da molécula, que existe pelo menos quatro modalidades desse tipo de ligação: atração entre dipolos permanentes e dipolos induzidos, forças de dispersão e ligação ou “ponte” de hidrogênio. [30]

3.2.2 – MATERIAIS E OS TIPOS DE LIGAÇÃO

Destaca-se que um material geralmente possui mais de um tipo de ligação. De caráter iônico, apresentam os materiais cerâmicos, tais como óxido de alumínio, óxido de magnésio e óxido de zircônio. Também no mesmo grupo de materiais cerâmicos, o carboneto de silício, nitreto de silício e nitreto de boro, apresentam caráter covalente predominantemente. [30]

Outro exemplo de ocorrência de mais de um tipo de ligação é o caso da sílica, que é a base da maioria dos vidros, onde as ligações iônicas e covalente convivem em igualdade de participação. [30]

Já os polímeros apresentam ligação covalente entre os átomos na cadeia da macromolécula e ligação secundária intercadeia. E, os metais exibem um pequeno caráter covalente, porém o predominante é o caráter metálico. [30]

3.2.3 – ESTRUTURA DOS SÓLIDOS CRISTALINOS

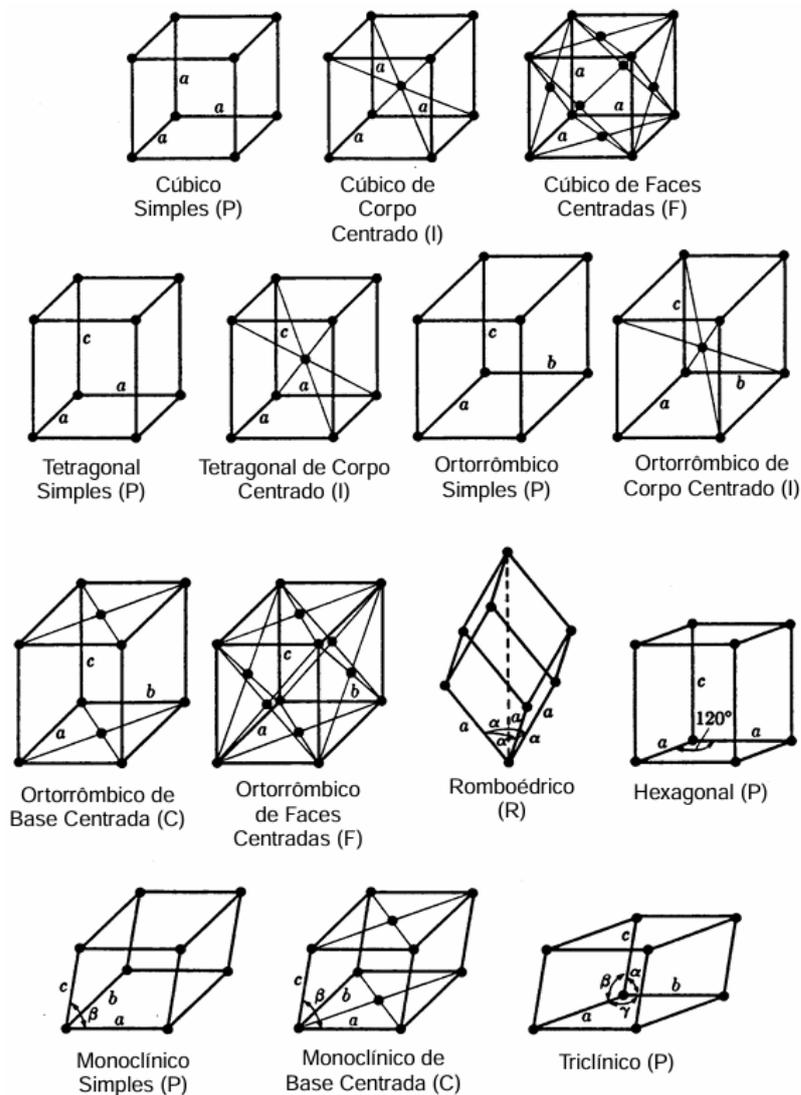
O material cristalino é aquele em que os átomos estão posicionados em um arranjo periódico, de maneira ordenada, tal que quando do processo de solidificação, os átomos se posicionarão em um padrão tridimensional repetitivo. Os metais, alguns materiais cerâmicos e certos polímeros formam estruturas cristalinas sob condições normais de solidificação. [7]

Existem muitas estruturas cristalinas diferentes, todas possuindo uma ordenação atômica de longo alcance, que variam de estruturas mais simples até as complexas.

3.2.3.1 – RETICULADOS DE BRAVAIS

O matemático e professor de física Auguste Bravais definiu que um reticulado espacial é um arranjo infinito de pontos em três dimensões. Cada ponto do reticulado pode estar associado a mais de um átomo, e são arranjados de 14 maneiras diferentes, denominadas reticulados de Bravais que envolvem 7 sistemas diferentes entre si, sendo chamados de sistemas de Bravais. [30]

Figura 03. Representação dos 14 reticulados de Bravais. [30]

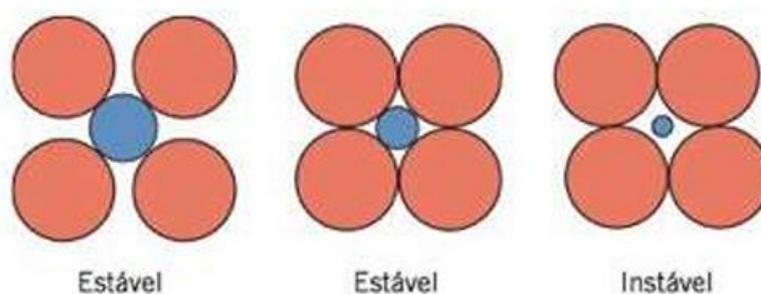


3.2.3.2 – ESTRUTURA CRISTALINA DA CERÂMICA

Os materiais cerâmicos que possuem ligação iônica, possuem estrutura cristalina composta por íons eletricamente carregados, em vez de átomos. Estes íons influenciam em duas características na estrutura do cristal, sendo: a carga elétrica de cada íons e o tamanho relativo dos cátions e dos ânions. [7]

Todas as cargas positivas dos cátions devem ser equilibradas por igual número de cargas negativas ânions, ou seja, o cristal tem que ser neutro. Para o segundo critério, os raios iônicos dos cátions e ânions, visto que os cátions são normalmente menores que os ânions, e como consequência a razão deles é menor que a unidade. Esta relação interfere na configuração ânion-cátion como estável e instável. [7]

Figura 04. Configuração de coordenação ânion-cátion estável e instável. [7]



Os materiais cerâmicos comuns apresentam números iguais de cátions e de ânions. Estes materiais são classificados como composto AX, que A é o cátion e X o ânion, sendo renomeado como sendo estruturas cristalinas do tipo AX.

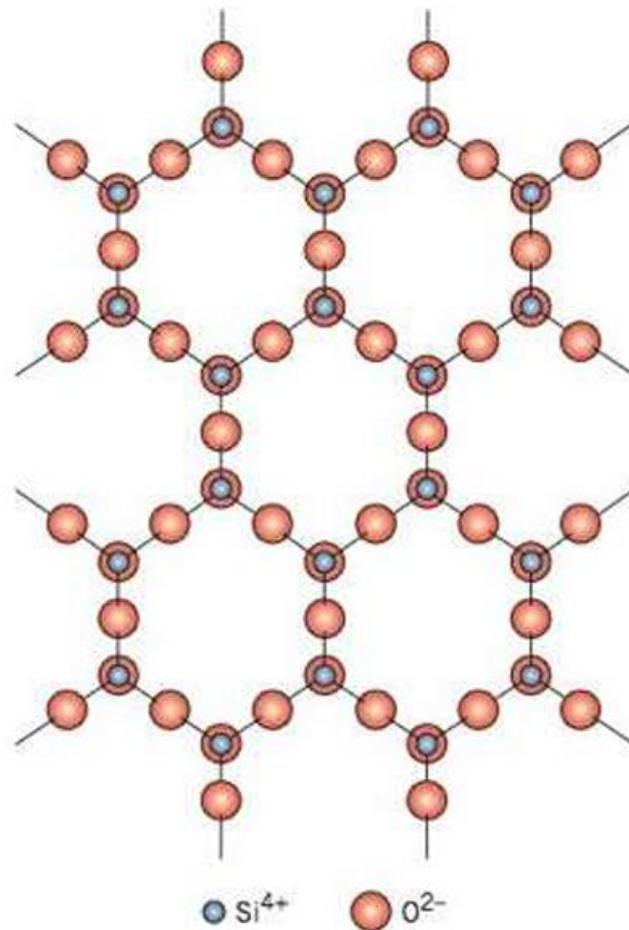
3.2.3.2.1 – CERÂMICAS (VIDROS) À BASE DE SÍLICA

A sílica é composta de dióxido de silício (SiO_2), que forma uma rede tridimensional pelos átomos de oxigênio localizados nos vértices quando compartilhados por tetraedros adjacentes, sendo um material eletricamente neutro com estrutura eletrônica estável. [7]

A sílica existe como sólido não cristalino, com alto grau de aleatoriedade atômica, característica dos líquidos, é o que ocorre na sílica fundida ou sílica vítrea, que existe em um grau considerável de desordem. [7]

Outros óxidos como CaO e Na₂O são incorporados no interior da rede de SiO₄ com intenção de modifica-las, que os tornam óxidos aditivos modificados de rede. A adição desses modificadores reduz o ponto de fusão e a viscosidade do vidro, sendo mais fácil a formação vítrea em baixas temperaturas. [7]

Figura 05. Representação da estrutura laminar bidimensional de silicatos. [7]



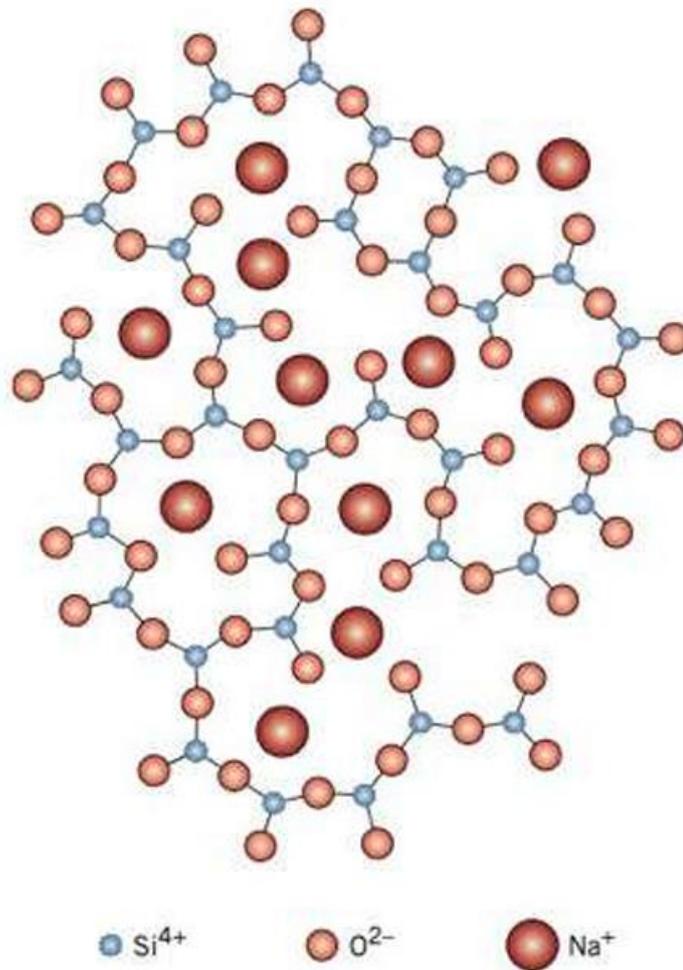
3.2.4 – ESTRUTURA DOS SÓLIDOS NÃO CRISTALINOS

Alguns materiais não apresentam estrutura cristalina, e pode ser encontrado nos três grupos de materiais (metálico, cerâmico e polimérico). Existem duas possibilidades para se obter um sólido não cristalino, evitando a cristalização durante a solidificação e/ou destruir por meios mecânicos a cristalinidade do material. [30]

Os sólidos não cristalinos também são chamados de amorfos, que podem ser definidos como uma estrutura atômica sem forma, e ou ainda, de líquidos super-resfriados, visto que suas estruturas atômicas lembram as de um líquido. [7]

Alguns materiais possuem estruturas cristalinas e não cristalina como é o caso do composto cerâmico dióxido de silício (SiO_2). O fato de o sólido formado possuir estrutura cristalino ou amorfo vai depender do ordenamento da estrutura atômica durante a solidificação. As estruturas amorfas são caracterizadas por moléculas relativamente complexas e só se ordenam com alguma dificuldade. O resfriamento super rápido a temperaturas inferiores à temperatura de congelamento favorece a formação de um sólido não cristalino, visto que nesta condição a estrutura atômica possui pouco tempo para o processo de ordenação. [7]

Figura 06. Representação das posições dos íons em um vidro de sódio-silicato. [7]

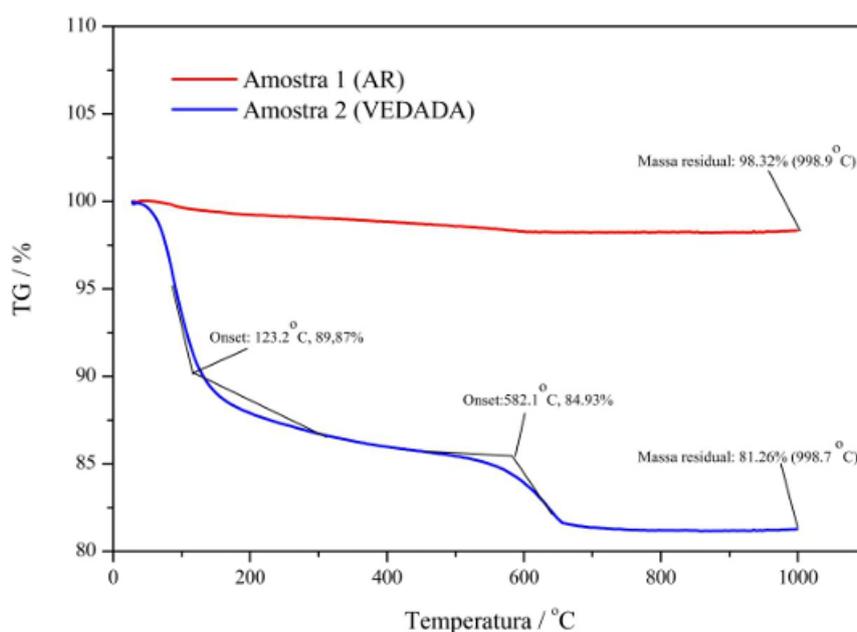


3.2.5 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

A técnica de análises térmicas é aplicada em diferentes materiais, como exemplo, podemos utilizar o resultado da análise termogravimétrica da amostra de resíduo de pó de vidro seca vedada, que próximo a temperatura 123,2 °C, ocorre uma perda de água absorvida pela amostra e da decomposição dos hidratos. Também observou que na temperatura próximo de 582,1 °C apresenta uma perda de massa significativa devido a decomposição do CaCO₃, visto que a decomposição térmica do CaCO₃ – na literatura – está próxima de 800 °C, e que pode ter sido antecipada pela baixa cristalinidade do CaCO₃ presente na amostra. [26]

O resultado da TG para a amostra de resíduo de pó de vidro seco ao ar não houve perda de massa significativa por não formarem Ca(OH)₂ e CaCO₃, conforme demonstra a figura 07.

Figura 07. Análise termogravimétrica (TG) da amostra de pó de vidro. [26]

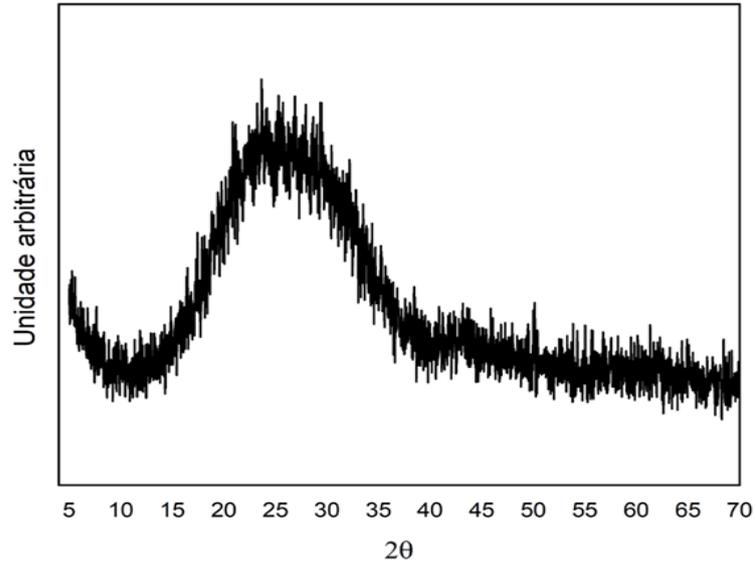


3.2.6 – DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A técnica de difração de raios-X é aplicada em diferentes materiais, como exemplo, podemos utilizar o ensaio da difração de raios X para a amostra de resíduo de lapidação de vidro para observar que o material é predominantemente no estado amorfo, sem picos difratados e com um grande halo entre 19,82° a 32,22°. Afirmando ser compatível com TRENTIN *et al.* e

PAIVA, que ao analisarem o mesmo material, constataram ser de natureza amorfa com um halo característico e largo de 18° a 35° , sem picos de difração definidos, conforme a figura 08. [27]

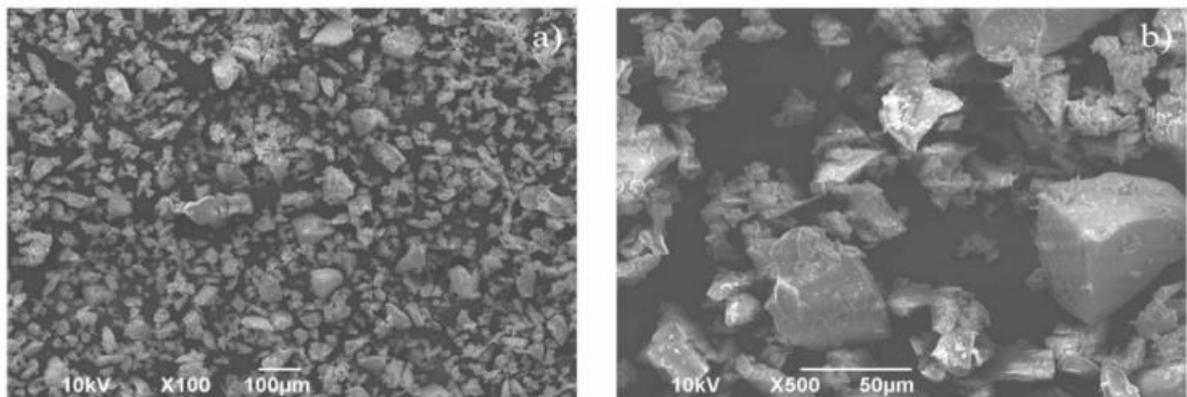
Figura 08. Difratoograma do resíduo de lapidação de vidro. [27]



3.2.7 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é aplicada em diferentes materiais, como exemplo, podemos observar a morfologia do resíduo de pó de vidro no MEV, onde foi identificada uma variação de tamanhos das partículas do material, apresentando um aspecto irregular e de formato prismático, conforme é possível ser observado pela figura 09 – a) aumento de 100 x e b) aumento de 500 x; [29]

Figura 09. MEV da amostra de resíduo de pó de vidro [29]



3.2.8 – ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO DE VIDRO TEMPERADO

A composição química do resíduo de vidro temperado é constituída de sílica (SiO_2), óxidos de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO), conforme a representação da figura 10, composição típica do vidro sodo-cálcico, perfazendo uma porcentagem total acumulada de 91,12% na amostra de RVT, ou seja, composto majoritariamente por sílica, soda e cal com adição dos óxidos de magnésio e alumina, outros óxidos aparecem em menor quantidade. [16] Os óxidos encontrados na amostra estão relacionados as propriedades do material, onde o SiO_2 interfere na viscosidade, o Na_2O interfere na fluidez, alta expansão e solubilidade e o CaO que interfere na desvitrificação, ou seja, quando a superfície do vidro se torna parcialmente cristalina, pelo processo natural dos materiais ou durante o aquecimento do vidro, quando ocorre um resfriamento mais lento. [25]

Figura 10. Composição química do resíduo de vidro temperado. [16]

Composição química do resíduo de vidro temperado (%)										
Elementos	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	P.F.
Teor (%)	68,87	0,03	0,65	0,76	3,93	8,93	13,32	0,14	0,23	≥ 0

3.3 – SOLO-CIMENTO

Na pavimentação, o solo-cimento surge como alternativa para conter os trechos de estradas que possuem atoleiros, lugares que o trânsito de veículos fica comprometido porque os veículos deslizam, que os passageiros tenham que empurrar seus veículos e que ainda tenham que esperar por ajuda para desatolarem os veículos. Em 1952, o professor Orlando Carneiro da USP, propunha o solo-cimento como alternativa nestas situações.

Figura 11. Solo-cimento utilizado na pavimentação – camada de base.



Em algumas situações, o solo-cimento é utilizado na fabricação de tijolos sendo uma alternativa de menor custo na construção civil, visto que o processo de fabricação deste material é relativamente simples e o sistema de prensa pode ser tanto manual como hidráulica. Geralmente, são fabricados próximos a área que serão aplicados, diminuindo ainda mais o custo. [36]

Figura 12. Solo-cimento utilizado na fabricação de tijolos.



O solo-cimento é um compósito, material resultante da mistura homogênea em proporções apropriadas e endurecidas de solo, cimento e água. A estabilização deste material, que é um processo físico-químico, está relacionada ao aumento de resistência mecânica e da durabilidade do composto. O estabilizador químico mais conhecido e utilizado neste tipo de composto é o cimento, cujas propriedades na estabilização de solos são consagradas a mais de 40 anos na construção de estradas. [35]

Figura 13. Pavimento de Solo-cimento.



A execução de solo-cimento necessita de alguns cuidados e de cumprimento de algumas Normas específicas a serem seguidas, para que se tenha um material resistente e durável para o fim que se projeta. Porém, alguns cuidados estão relacionados estreitamente as características do solo (granulometria e a uniformidade) que está trabalhando, onde poderá haver interferência na quantidade de cimento e de água a serem aplicadas no material. [35]

Barbosa; Ghavami (2010) relata a importância de conhecer os limites de liquidez e de plasticidade do solo. Para um solo com limite de liquidez (LL) maior que 55%, isso pode indicar que ele apresenta grande proporção de argila, não sendo apropriado para a produção de materiais de solo-cimento. O índice de plasticidade (IP), obtido pela diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade (LP) é um parâmetro de indicativo da adequação do solo para uso como matéria-prima na confecção de tijolos de solo-cimento. [36]

Em geral, considera-se que quando um solo apresenta índice de plasticidade superior a 45% indicam que o solo não é apropriado para uso com a finalidade de solo-cimento. Segantini;

Alcântara (2010) recomenda que os parâmetros aceitáveis é o limite de liquidez menor que 45% e o índice de plasticidade, inferior a 18%, para apresentarem características apropriadas para a manufatura de produtos, com boas propriedades físicas e químicas. [36]

3.3.1 – NORMA GERAL DE DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO

A correta determinação do teor de cimento, na mistura sol-cimento, baseia-se no fato da melhora significativa das características originais de resistência mecânica, quando misturado ao solo pequenas quantidades de cimento, depois de compactado e curado, tornando-o muito superiores às de outros materiais utilizados como camadas de pavimentos. [35]

A estabilização do solo baseia-se em Normas Técnicas já definidas. A Norma DNIT 414/2019 – Pavimentação – Solo-cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio - detalha os procedimentos de dosagem de cimento na mistura solo-cimento através de ensaio que observa a interação elétrica do cimento com as partículas argilosas do solo, visto que as partículas de cimento se comportam carregadas eletricamente na mistura e sua presença aumenta a condutividade elétrica do solo-cimento. Esta interação, juntamente com a hidratação do cimento produz mudanças físico-químicas rápidas no sistema com variações volumétricas que é suspensa em água. E, o resultado da maior variação volumétrica do teor de cimento é indicado de mistura estável que conduz a estabilização completa do solo. [39]

A Norma NBR 12253/2012 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento – sugere que o teor mínimo de cimento a ser utilizado na mistura é de 5 %, e ainda, descreve que o teor adotado de cimento na mistura tem que possuir a resistência média à compressão simples igual ou superior a 2,1 Mpa aos 7 dias de idade.

3.3.2 – TIPOS DE CIMENTO

O cimento Portland possui diferentes tipos cada um como uma característica diferente, os principais são: CPII, CPIII, CPIV e CPV, que podem apresentar adições de fíler carbonático, escória de alto-forno ou materiais pozolânicos, que são identificados pelas letras F, E ou Z, respectivamente, e ainda podem ser resistentes a sulfatos, representado pela sigla RS. A tabela 02 apresenta os principais tipos de cimento e suas características. [41]

Tabela 02. Tipos de cimentos e suas características. [41]

Tipos de cimento Portland (CP)		Principais características
Composto com escória	CP II-E	Apresenta baixo calor de hidratação; recomendado para estruturas que exijam desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos.
Composto com pozolana	CP II-Z	Maior impermeabilidade e maior durabilidade
CP composto com filer	CP II-F	Para aplicações gerais; recomendado para concreto massa.
Alto-forno	CP III	Possui maior impermeabilidade e durabilidade, apresenta baixo calor de hidratação, alta resistência à expansão e a sulfatos.
Pozolânico	CP IV	Indicado em obras sujeitas à ação de água corrente e ambientes agressivos. É mais impermeável, mais durável, apresenta resistência à compressão superior ao cimento Portland comum, a idades avançadas, e baixo calor de hidratação.
Alta resistência inicial	CP V - ARI	Adquire elevada resistência à compressão nos primeiros dias; recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento e em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida.

Para cada tipo de cimento sempre existe mais de uma marca fornecendo o material. Com isso, algumas empresas indicam ou restringe a utilização do cimento na produção do composto solo-cimento. Em uma pesquisa de mercado, observou-se que a recomendação do cimento CP II-32-Z é de 40 % das empresas que o fabricam. O CP II-32-F tem a indicação de 20 %. Já o CP II-32-E a indicação é de 14 %. E o CP IV-32-RS é indicado por 43 % de seus fabricantes. Algumas marcas não especificam a utilização do cimento no composto solo-cimento. Com isso, notamos que os cimentos indicados por alguns dos seus fornecedores para a utilização na produção de solo-cimento são o CP II-32-Z, CP II-32-F, CP II-32-E e CP 32-IV-RS. [41]

3.3.3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS

As Normas ABNT NBR 5751/2015 e ABNT NBR 5752/2014 detalham a atividade pozolânica através da evolução da resistência mecânica da mistura em proporções volumétricas definidas de areia normal, pozolana, cal ou cimento Portland e água. Os principais ensaios

mecânicos do solo-cimento são resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e ensaio de módulo de resiliência por tração indireta. [35]

3.3.3.1 – Resistência à compressão simples - RCS

A resistência à compressão simples tem influência não somente do esforço de compactação do material, mas também da dosagem da mistura. No caso, que uma mistura de solo-cimento composto por cimento Portland e areia de Osório – visando ser utilizada em fundações com carregamento horizontal – sendo a mistura composta por 7 % de cimento Portland CPV-ARI, areia de Osório e umidade de 10 %, adotando os critérios na ABNT/NBR 12025, e, adotando os índices de vazios como 0,60, 0,66 e 0,72 os resultados da compressão axial são conforme a tabela 03. [38]

Tabela 03. Média dos resultados a compressão simples. [38]

Índice de Vazios	Resistência à Compressão	Resistência à Compressão
	em 7 dias (MPa)	em 14 dias (MPa)
0,60	2,35	2,38
0,66	1,82	1,85
0,72	1,48	1,53

Observa-se o decréscimo quase exponencial da resistência do material em função do aumento do índice de vazios, fisicamente, este fato está relacionado que quanto menor o índice de vazios o material está mais compacto, conseqüentemente mais resistente. E, o ensaio realizado nos corpos de prova com 14 dias apresentaram um leve aumento na resistência do material, tornando-se quase desprezível. [38]

3.3.3.2 – Resistência à tração por compressão diametral

Consoli et al. (2010), apresentou um estudo mostrando a relação da resistência à compressão e da resistência à tração em solo estabilizados por cimento, utilizando areia de Osório (areia fina, uniforme e não plástica e cimento) uma mistura de solo-cimento. Foi observado que os resultados encontrados para q_t e q_u são funções exponenciais da porosidade e

do teor de cimento, diferenciadas apenas por um escalar. Mostraram que existe uma relação linear entre a resistência à compressão e a resistência à tração para a mistura solo-cimento com relação de q_t/q_u de 0,15. [43]

Deve ser observado também o critério adotado pela Norma NBR 12253/2012 para que os ensaios possam ser considerados, sendo aceito os resultados que não desviarem mais de 10 % da média dos três corpos-de-prova. [40]

3.3.3.3 – Ensaio de módulo de resiliência

Em um estudo comparativo dos ensaios mecânicos do composto de solo-cimento da mistura solo (areia fina siltosa) extraído às margens da rodovia estadual RS-240, na localidade de Vila Scharlau, município de São Leopoldo/RS com cimento Portland de alta resistência inicial (ARI), tipo CP-V e água destilada para as matrizes de cimento na dosagem de 3,5 % e 7,0 % o resultado do ensaio de módulo de resiliência segue conforme demonstra a tabela 04. [43]

Tabela 04. Resultado dos ensaios de módulo de resiliência (Mpa) por compressão diametral do solo-cimento [43]

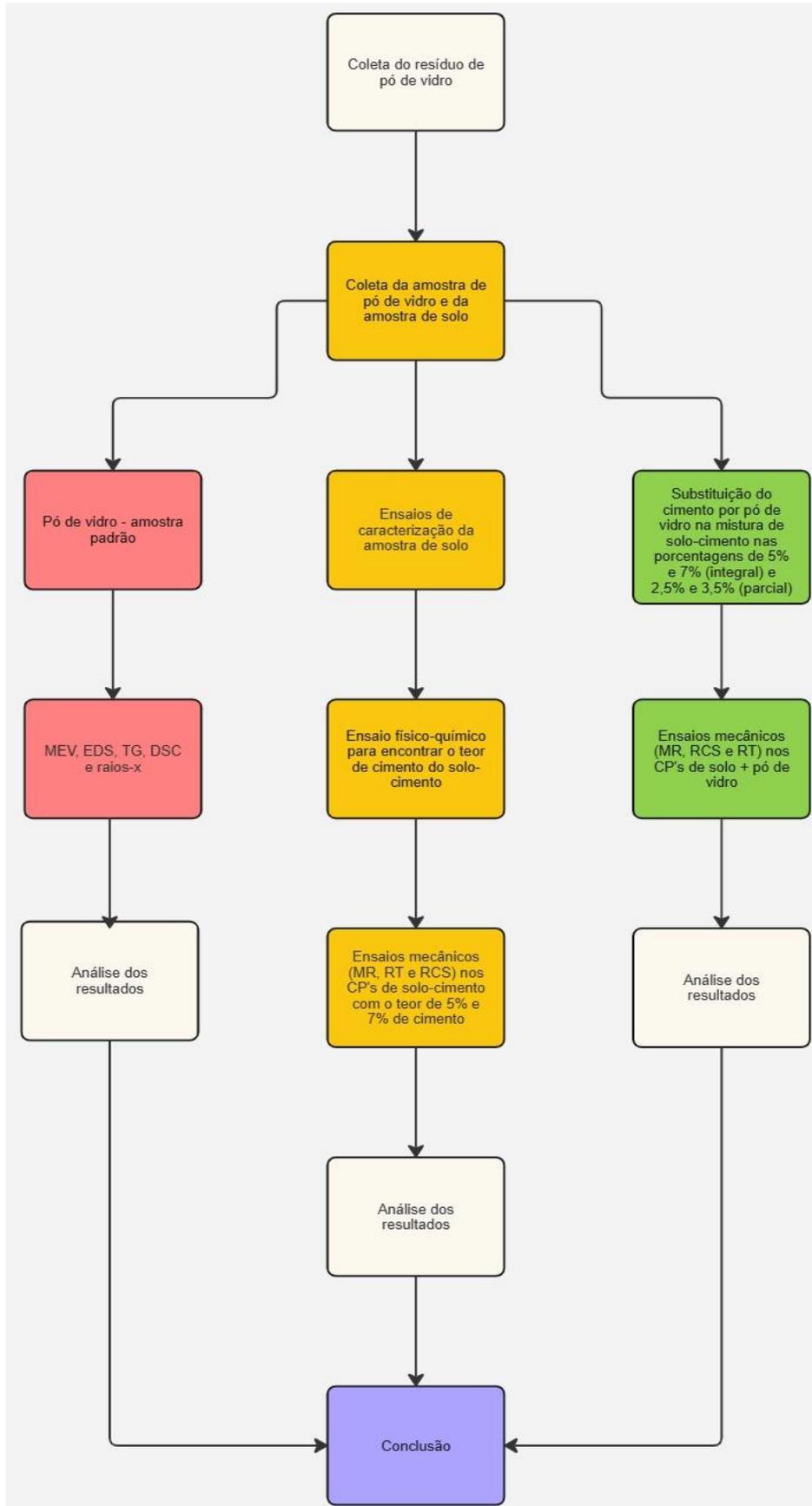
Porcentagem de cimento, PC (%)	
3,50%	7,00%
9437	11789
8525	11026
-	10270
Média: 8981	11028

Observa que existe uma relação linear dos resultados do ensaio, no critério comparativo das dosagens de cimento de 3,5 % e 7,0 %. Quanto maior a porcentagem de cimento na dosagem do material melhor o resultado do ensaio de módulo de resiliência. [43]

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme o fluxograma 01, esta pesquisa utilizou 3 (três) etapas de análise, sendo elas: ensaios na amostra de pó de vidro seco (PVS), ensaios na amostra de solo e ensaios mecânicos na amostra final do composto de solo-cimento e solo-pó de vidro em aspecto comparativo com os resultados. Foram realizadas análises das amostras dos pós, para verificação de possíveis contaminações por líquidos refrigerantes utilizados durante o processo de lapidação; Em seguida as amostras foram prensadas em forma de pastilhas de PVS, e submetidas as técnicas de caracterização para definir os parâmetros de temperatura e resistência. Foi executado os ensaios de caracterização geotécnica convencional da amostra de solo conforme a Norma Técnica respectiva para cada ensaio. Por fim, foram elaborados os CPs da amostra padrão de solo-cimento e da amostra de solo-pó de vidro em substituição do cimento para serem submetidos aos ensaios mecânicos e analisar os resultados em aspecto comparativo.

Fluxograma 01. Fluxograma da metodologia.



4.1 – 1º ETAPA – COLETA DA AMOSTRA DE PÓ DE VIDRO

A amostra de pó de vidro foi coletada no dia 01/02/2024 no período matutino na empresa LM Vidros e Cristais Temperados, localizada na Avenida Gury Marques, 7.300 – Santa Felicidade no município de Campo Grande – MS [20].

A empresa LM Vidros trabalha com a matéria prima das placas de vidro executando alguns processos de produção de vidros, entre eles destaca-se o corte, a lapidação, a serigrafia, a têmpera e o laminado. No processo de corte e de têmpera, são gerados os resíduos de grandes partículas, sendo estes devolvidos para a reciclagem do material na fábrica, procedimento já adotado pela empresa.

Figura 14. Vidro plano. Material chegando para modelagem.



No processo de lapidação, o resíduo gerado é no formato de pó de vidro, pois a lapidação é o desbaste das placas de vidro por atrito provocada por lixas mecânica e/ou manuais específicas para este fim, durante esse processo utiliza-se muita água e refrigerante, que ajuda a controlar a poeira de vidro e conseqüentemente a temperatura durante a lapidação, conforme figura 15.

Figura 15. Resíduos de vidro gerados no processo de lapidação.



Após, a contenção do pó de vidro pela água, faz-se necessário tratar esta água separando os grandes resíduos do pó de vidro, que por fim é destinada a tonéis metálicos para ocorrer o processo de decantação – separação da mistura heterogêneas do tipo líquido-sólido.

Por fim, faz-se a coleta da amostra de pó de vidro que é descartada em sacos plásticos, conforme figura 16.

Figura 16. Coleta da amostra de pó de vidro.



4.2 – SECAGEM DA AMOSTRA E DESTORROAMENTO

Após a coleta da amostra de pó de vidro na forma de 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, conforme figura 17.

Figura 17. Amostra inserida na estufa.



Após o processo de desidratação, as amostras se apresentam no formato de torrões. Com o objetivo de destorroar e diminuir o tamanho dos grãos, o PVS foi levado ao almofariz de cerâmica para maceração do LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil, pelo tempo necessário até chegar em uma textura capaz de passar pela peneira 45 Mesh, conforme figura 18.

Figura 18. Amostra sendo macerada no almofariz.



4.3 – PRENSAGEM DAS PASTILHA

A obtenção de amostras no formato de pastilhas para serem submetidas as técnicas auxiliares de caracterização, foram feitas utilizando os pós secos e destorroados, usando um pastilhador, as amostras foram prensadas sob uma carga na ordem de 5 ton/cm^2 , mantendo-se por 60 segundos, resultando em pastilhas com dimensões na ordem de 1,02 cm de diâmetro e espessura de 0,8 cm, na prensa MARCON que se encontra no LNNA, conforme figura 19.

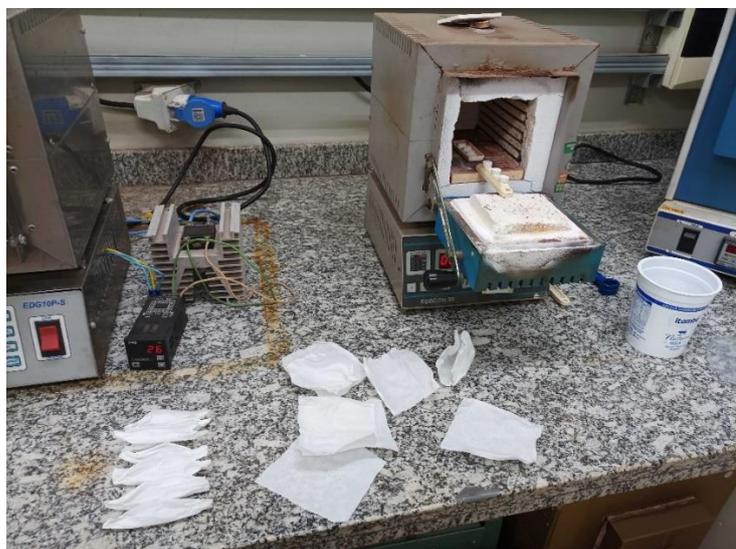
Figura 19. Amostra sendo preparada para ser prensada. Pastilha pronta.



4.4 – AQUECIMENTO DAS AMOSTRAS NA FORMA DE PASTILHA

O processo de aquecimento foi realizado nas amostras prensadas nas seguintes temperaturas: 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C, com rampa de aquecimento de 10°C/min, patamares de 60 minutos, atmosfera ambiente e resfriamento não controlado. A sinterização foi feita no Laboratório do Instituto de Física da UFMS, sendo utilizado o equipamento de mufla EDGCON 3P 1800, conforme figura 20.

Figura 20. Amostras sendo inseridas na mufla.



4.5 - DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A Difração de Raios-X é uma técnica de caracterização—utilizada para analisar e determinar os parâmetros cristalográficos de um material, foi aplicada nas amostras padrão e aquecida a 300 °C - em forma de pó. As medidas foram obtidas usando o método do pó, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), a varredura foi realizada na posição 2θ com frequência de 0,02°/s, no intervalo de 8° à 80°. O ensaio foi realizado no laboratório do Instituto de Química da UFMS, utilizando o equipamento analisador de raios – x em pó de mesa do modelo D2 PHASER – BRUKER.

4.6 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) e ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é um ensaio muito utilizado na caracterização microestrutural de um material, que gera uma imagem da superfície da amostra e permite analisar sua morfologia, tamanho e contornos de grãos, formação de fases e precipitados e grau de porosidade.

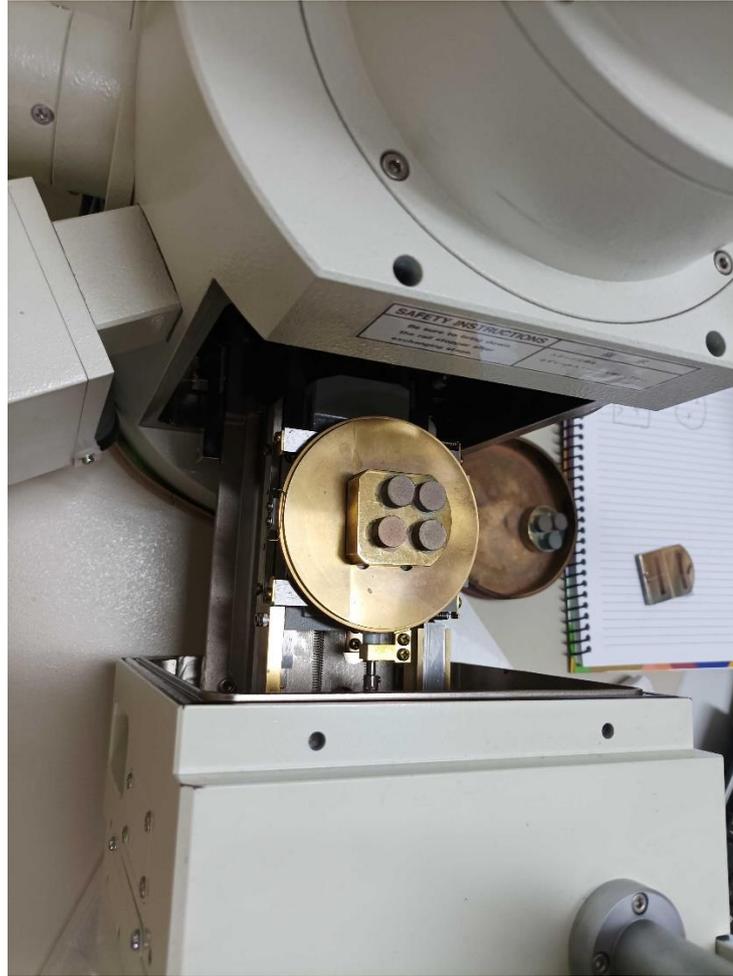
A Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) é um ensaio que está acoplado ao equipamento do microscópio de varredura eletrônica. Esta técnica é capaz de analisar as frequências de radiação liberada no espectro do raio x. São liberados fótons de frequência específica para cada elemento, que permite identificar e quantificar os elementos da amostra.

Os ensaios foram feitos no Laboratório do Instituto de Física da UFMS, sendo utilizado o equipamento de modelo JEOL JSM-6380LV – Scanning Electron Microscope.

Tanto o MEV quanto o EDS foram feitos em todas as amostras no formato de pastilhas, sendo elas: a padrão, a padrão lavada e aquecidas às temperaturas de 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C.

As amostras ficaram por 5 minutos próximas a uma luz infravermelho com intensidade de 150W, para secagem superficial das amostras. Após esta etapa, as pastilhas foram inseridas no vácuo para obtenção de plasma de argônio e revestimento de ouro. Por fim, foram incluídas no Scanning Electron Microscope para o ensaio do MEV, conforme figura 21.

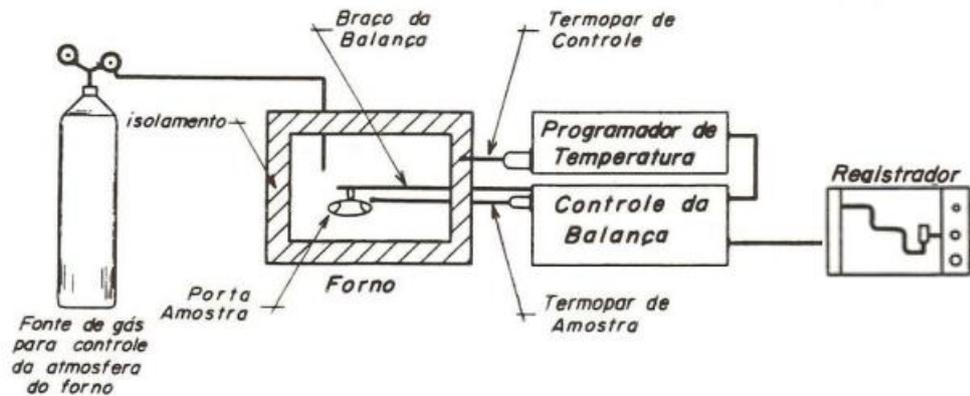
Figura 21. Amostras no Scanning Eletron Microscope.



4.7 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A Análise Termogravimétrica (TGA) é uma técnica termoanalítica que acompanha a perda e/ou ganho de massa da amostra em função do tempo e/ou da temperatura. O equipamento da análise termogravimétrica é composto de uma termobalança, que é um instrumento que permite a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura. A figura 22 representa um detalhamento de um modelo de equipamento de termogravimetria genérico.

Figura 22. Detalhamento de um equipamento de termogravimetria.



O ensaio de termogravimetria foi realizado no laboratório do INQUI da UFMS, com rampa de aquecimento de 10°C/min e intervalo de temperatura ambiente a 1.100°C, com patamar de 60 min e fluxo de atmosfera ar sintético.

4.8 – ANÁLISE DE CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é uma técnica termoanalítica na qual as variações de entalpia da amostra são monitoradas em relação a um material de referência termicamente inerte enquanto ambas são submetidas a uma programação controlada de temperatura.

O ensaio de DSC foi realizado no laboratório do INQUI da UFMS, com rampa de aquecimento de 10°C/min e intervalo de temperatura ambiente até 1.100°C.

4.9 – COLETA, CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO E ENSAIOS MECÂNICOS

A amostra do solo foi obtida na região de Aquidauana – MS, jazida São Manoel fornecida pela Construtora Caiapó, conforme figura 23.

Figura 23. Coleta do solo na região de Aquidauana – MS, jazida São Manoel.



Nesta etapa, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica convencional da amostra seguindo as especificações descritas nas Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, conforme detalhamento abaixo.

- Preparação da amostra – NBR 6457/2024;
- Ensaio de granulometria – NBR 7181/2016;
- Ensaio de Limite de Liquidez – NBR 6459/2016;
- Ensaio de Limite de Plasticidade – NBR 7180/2016;
- Ensaio utilizando a metodologia MCT – DNIT 258 ME.

4.9.1 – LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE PLASTICIDADE

Para o ensaio de limite de liquidez foi coletado aproximadamente 100,00g da amostra do solo, passante pela peneira 40 (0,425 mm). O material foi umidificado com água destilada e posteriormente, foi a massa plástica transferida para o aparelho Casagrande. Após, a uniam das bordas foi registrado o número de golpes e uma parte do material foi colocado na cápsula para determinação da umidade do material, conforme a recomendação da NBR 6459/2016. [46]

O material que sobrou do ensaio do limite de liquidez foi novamente umidificado com água destilada até obter uma massa plástica uniforme na forma de bola. Após isso, foi colocado sobre uma placa de vidro e aplicado uma pressão com o objetivo de formar um cilindro de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, conforme a recomendação da NBR 7180/2016. [47]

4.9.2 – GRANULOMETRIA DA AMOSTRA DE SOLO

O ensaio de granulometria do solo foi utilizado para determinação dos tamanhos das partículas do solo. Foi utilizado os métodos de peneiramento para determinação da granulometria do material grosso - areia e pedregulho - e sedimentação para determinação da granulometria do material fino - silte e argila - para compreender as propriedades do solo, conforme recomendação da NBR 7181/2016. Para a classificação do solo foi utilizado os parâmetros da NBR 6502/2022.

4.9.3 – ENSAIO PELO MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO – ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM O CIMENTO – CP II

Para a realização do ensaio com o método físico-químico foi separado 8 (oito) cápsulas da amostra do solo – material que passou pela peneira n° 10 (abertura de 2,00 mm). Os materiais das cápsulas foram colocados em provetas de 100 ml – fazendo um total de 7 (sete) provetas. E foi adicionado cimento nas provetas com intervalo de 2%. As amostras ficaram: amostra de solo com 0% de cimento, e as amostras com 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14% de cimento CP II junto com o solo, conforme a recomendação da Norma do DNIT 414/2019. [39]

Foi inserido água destilada nas provetas até 100 ml e agitadas até a mistura ficar homogênea. A leitura foi feita após 2h do agitação do material, observando que estes estavam em repouso por 24h. Foram repetidas as leituras por 7 (sete) dias.

Figura 24. Ensaio pelo método físico-químico – estabilização com solo com o cimento – CP II.



Para a realização dos ensaios mecânicos (módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão simples) na mistura solo + cimento (padrão) e solo + pó de vidro, foi utilizado as porcentagens de 2,5%, 3,5%, 5% e 7% como referência para análise de cimento e de pó de vidro no solo, sendo as misturas conforme descrito:

1. SOLO + 5% cimento;
2. SOLO + 7% cimento;
3. SOLO + 5% de pó de vidro;
4. SOLO + 7% de pó de vidro;
5. SOLO + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro;
6. SOLO + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro.

4.9.4 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado nas amostras: SOLO + 5% cimento, SOLO + 7% cimento, SOLO + 5% de pó de vidro, SOLO + 7% de pó de vidro, SOLO + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro e SOLO + 3,5% de cimento + 3,5% de

pó de vidro, observando a recomendação da Norma DNIT 136/2018 – ME, nos corpos de prova cilíndrico com medidas aproximadas: 10 cm de diâmetro e 5cm de altura. Utilizado uma cura de 7 (sete) dias para todas as amostras. Foi considerado a média aritmética dos resultados obtidos em 3 (três) corpos de prova, observando que os valores individuais estivessem dentro do intervalo de média mais ou menos 10%. Para cada amostra foi encontrado o teor de umidade ótima e a massa específica conforme descrito abaixo:

- SOLO + 5% cimento – umidade ótima - 7,3% com massa específica de 2,136 g/cm³;
- SOLO + 7% cimento – umidade ótima – 6,5% com massa específica de 2,088 g/cm³;
- SOLO + 5% de pó de vidro – umidade ótima – 6,7% com massa específica de 2,108 g/cm³;
- SOLO + 7% de pó de vidro – umidade ótima – 6,5% com massa específica de 2,088 g/cm³;
- SOLO + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro – umidade ótima – 6,6% com massa específica de g/cm³;
- SOLO + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro – umidade ótima – % com massa específica de g/cm³;

Figura 25. Corpos de prova na cura, para realização dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral – LATRAN.



4.9.5 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência à compressão simples aos 7 (sete) dias foi realizado nas amostras: SOLO + 5% cimento, SOLO + 7% cimento, SOLO + 5% de pó de vidro, SOLO + 7% de pó de vidro, SOLO + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro e SOLO + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro, observando a recomendação da Norma DNER – ME 201/94 e os parâmetros de atendimento da Norma DNIT 143/2022 – ES. Utilizado uma cura de 7 (sete) dias para todas as amostras. Foi considerado a média aritmética dos resultados obtidos em 3 (três) corpos de prova, observando que os valores individuais estivessem dentro do intervalo de média mais ou menos 10%. Para cada amostra foi encontrado o teor de umidade ótima e a massa específica conforme descrito abaixo:

- SOLO + 5% cimento – umidade ótima - 7,3% com massa específica de 1,847 g/cm³;
- SOLO + 7% cimento – umidade ótima – 6,3% com massa específica de 1,858 g/cm³;
- SOLO + 5% de pó de vidro – umidade ótima – 6,8% com massa específica de 1,818 g/cm³;
- SOLO + 7% de pó de vidro – umidade ótima – 6,6% com massa específica de 1,825 g/cm³;
- SOLO + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro – umidade ótima – 6,9% com massa específica de 1,824 g/cm³;
- SOLO + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro – umidade ótima – 6,5% com massa específica de 1,832 g/cm³;

Os corpos de prova foram compactados no cilindro tripartido de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com energia de 27,3 kgf.cm/cm³, com 10 (dez) camadas, altura da queda do peso de 45,7 cm, peso do soquete de 2,5 kgf e 38 golpes por camada, conforme parâmetros da Norma DNIT 134/2018 – ME.

4.9.6 – ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de módulo de resiliência com 7 (sete) dias de cura foi realizado nas amostras: SOLO + 5% cimento, SOLO + 7% cimento, SOLO + 5% de pó de vidro, SOLO + 7% de pó de vidro, SOLO + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro e SOLO + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro. Os corpos de prova foram compactados no cilindro tripartido de 10 cm de diâmetro

e 20 cm de altura, com energia de 27,3 kgf.cm/cm³, com 10 (dez) camadas, altura da queda do peso de 45,7 cm, peso do soquete de 2,5 kgf e 38 golpes por camada, conforme parâmetros da Norma DNIT 134/2018 – ME. Para cada amostra foi encontrado o teor de umidade ótima e a massa específica conforme descrito abaixo:

- SOLO + 5% cimento – umidade ótima – 5,6% com massa específica de 2,240 g/cm³;
- SOLO + 7% cimento – umidade ótima – 5,8% com massa específica de 2,252 g/cm³;
- SOLO + 5% de pó de vidro – umidade ótima – 5,3% com massa específica de 2,197 g/cm³;
- SOLO + 7% de pó de vidro – umidade ótima – 5,8% com massa específica de 2,160 g/cm³;
- SOLO + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro – umidade ótima – 6,1% com massa específica de 2,198 g/cm³;
- SOLO + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro – umidade ótima – 6,3% com massa específica de 2,202 g/cm³;

Figura 26. Compactação do corpo de prova no cilindro tripartido – LATRAN.



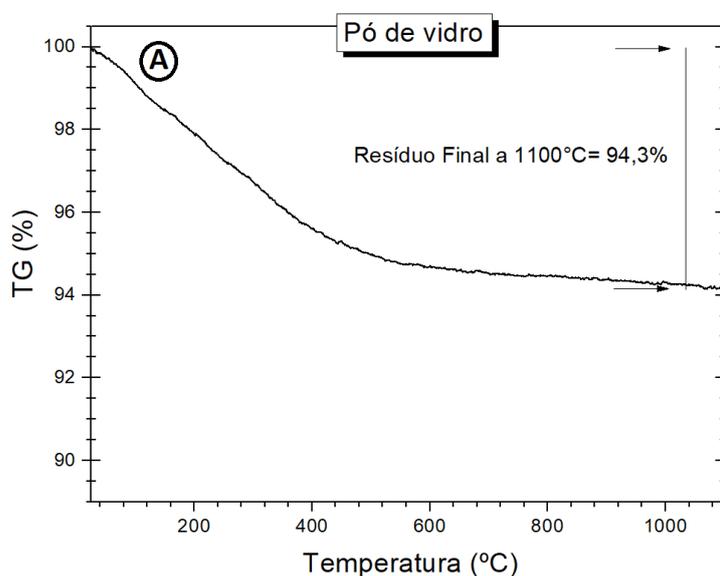
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

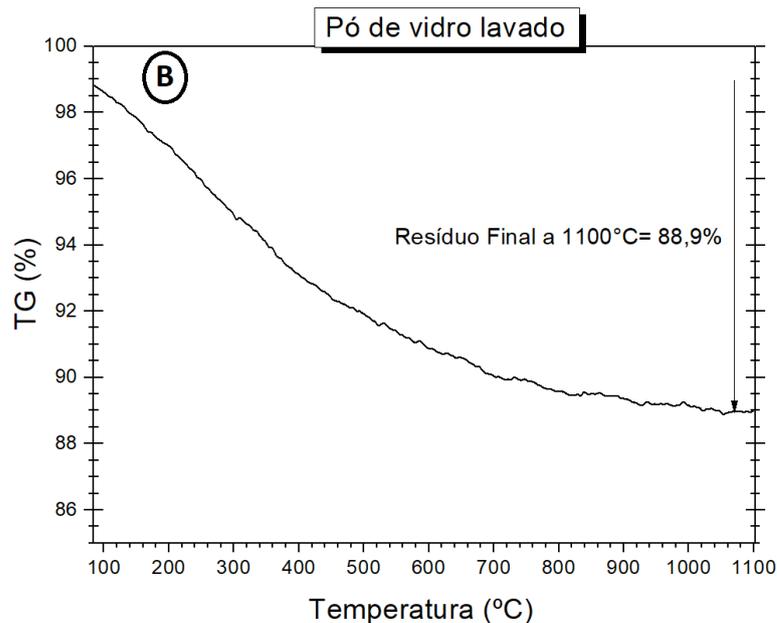
5.1 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

O resultado da análise termogravimétrica para a amostra de pó de vidro (padrão) e para a amostra de pó de vidro lavada está representado no gráfico 04. Observa-se que a amostra de pó de vidro padrão foi desidratado a uma temperatura de 100°C por um período de 24h antes de ser submetido à análise termogravimétrica. Em outra ocasião, este mesmo material foi lavado por 3 (três) vezes com água destilada, e, pelo processo de decantação foi coletado o material agora como sendo amostra de pó de vidro lavada.

A curva TG – A – amostra pó de vidro (padrão), demonstra uma perda de massa de 5% de forma linear, durante o gradiente de temperatura de 570 °C, provocada pela perda de água na temperatura de 130°C e pela desidroxilação dos silicatos hidratados por condensação de hidroxilas superficiais intrapartículas, que elimina a água, em outro aspecto demonstra uma estabilidade térmica da amostra, pela linearidade da perda de massa. Entre as temperaturas de 600°C a 1.100°C a amostra perde aproximadamente 1% de sua massa mantendo a linearidade, chegando ao resíduo final de 94,3%. Na curva TG – B – amostra de pó de vidro lavada, é possível observar uma perda de massa maior no gradiente de 570°C, chegando a perder 8,8% de sua massa, possivelmente, esta diferença entre as amostras é pelo fato da amostra lavada ter sido mais hidratada que a amostra (padrão) que foi ocasionada pela lavagem do material. O aspecto da perda linear da massa se mantém, até atingir o resíduo final de 88,9% de massa na temperatura de 1.100°C.

Gráfico 04. Resultado TG. A) Amostra de pó de vidro (padrão); B) Amostra de pó de vidro (lavada).

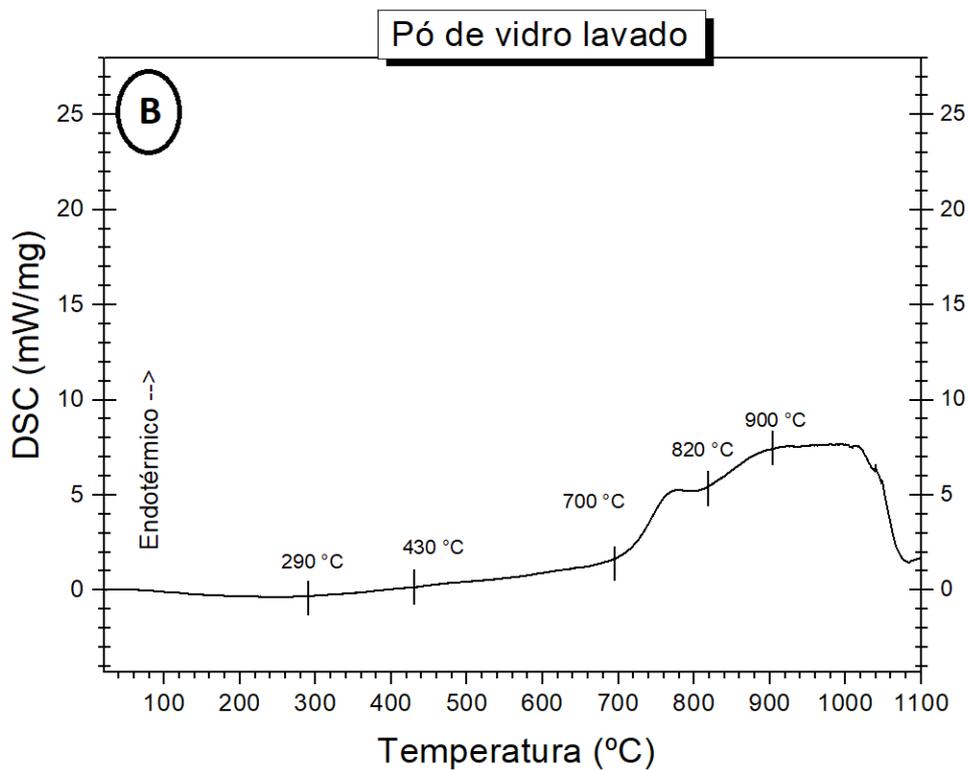
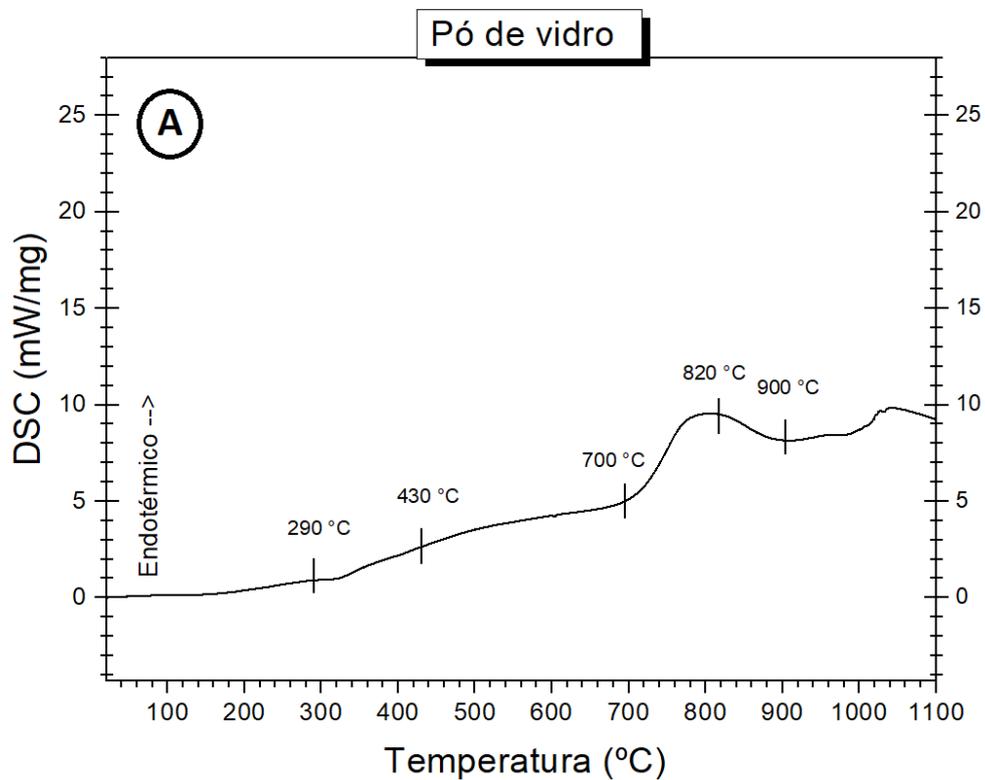




5.2 – ANÁLISE DE CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

O gráfico 05 representa o resultado da análise de calorimetria exploratória diferencial, para a amostra de pó de vidro padrão e lavada. É possível observar uma pequena volatilização de água até a temperatura de 290°C, para as duas amostras. Na faixa de 290°C a 430°C, a inclinação ascendente na amostra padrão é mais acentuada. Em ambas amostras, o material demonstra estar sujeito à sinterização próximo dos 430°C, onde ocorre a desidroxilação intrapartículas. O pico endotérmico registrado nas duas amostras na faixa de 700°C a 820°C é a transição vítrea, que na decomposição de carbonatos o material passa a ser uma mistura de óxidos e sofre reação de estado sólido com transição de fases.

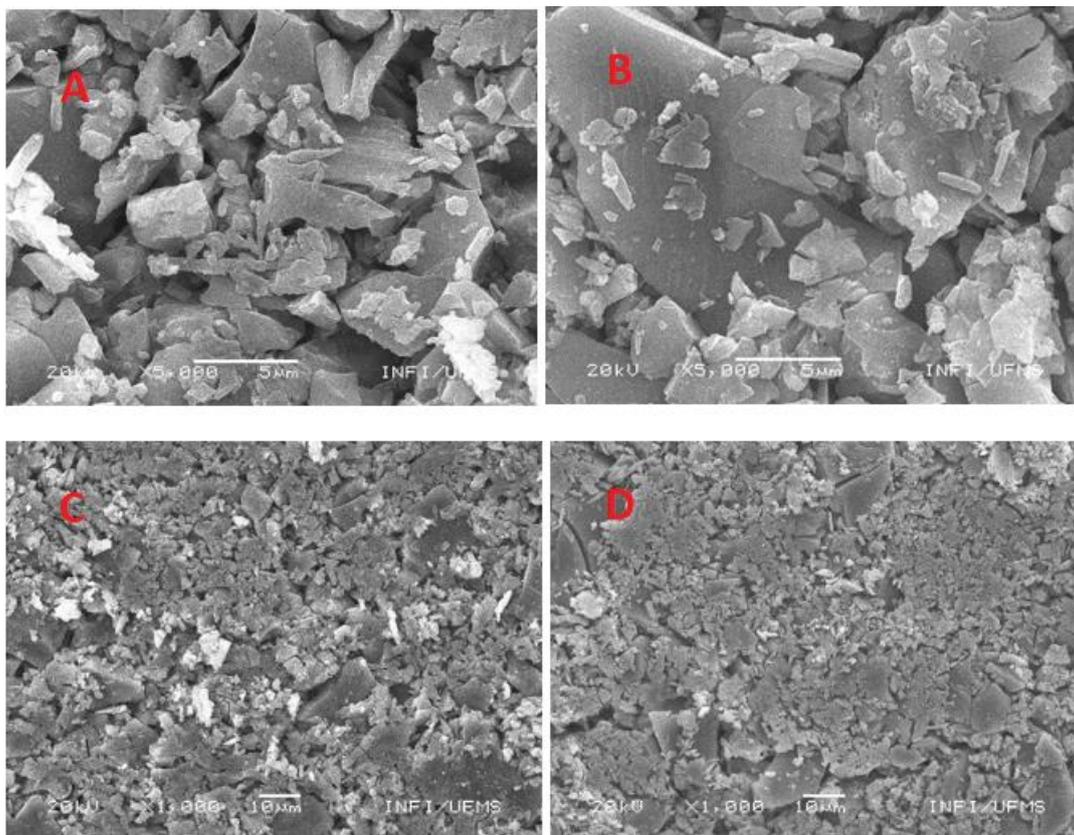
Gráfico 05. Resultado DSC. A) Amostra de pó de vidro (padrão); B) Amostra de pó de vidro (lavada).



5.3 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A figura 27 representa as micrografias comparativas, ou seja, a) amostra padrão, b) amostra aquecida à 300°C, na resolução de 5.000X, c) amostra padrão e a b) amostra aquecida à 300°C, na resolução de 1.000X, onde podemos observar nas micrografias com resolução de 5000X, a morfologia das partículas, as quais apresentam uma forma geométrica poliédricas, e consequentemente podemos observar pequena variação nos tamanhos das partículas, na ordem de 10 µm e 20 µm, que pode ser atribuída ao processo de lapidação do vidro na indústria. As micrografias com resolução de 1000X, apresentam ausência de fases precipitadas, e que a dimensão das partículas nessa escala, poderá ser considerada homogênea para o tipo de aplicação a qual será utilizada na pavimentação asfáltica.

Figura 27. Micrografia da amostra padrão e da amostra aquecida a 300°C. a) amostra padrão, b) amostra aquecida à 300°C, na resolução de 5.000X, c) amostra padrão e a d) amostra aquecida à 300°C, na resolução 1.000X.



5.4 - ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

A espectroscopia por energia dispersiva para as amostras de pó de vidro no formato de pastilha obteve os resultados conforme o gráfico 06 que observa os ensaios da amostra padrão de pó de vidro, da amostra lavada e das aquecidas à 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C.

Pode ser observado nos espectros, gráfico 06, três picos principais de maiores intensidades, característicos dos elementos Si, Ca e O. Esses resultados mostraram que todas as amostras tem base química do elemento Silício (Si) e Oxigênio (O), ou seja, possuem composição química a base do dióxido de silício (SiO₂). As variações da intensidade dos picos, podem ser atribuídas a dois processos físicos, sendo o primeiro processo termodinâmico, onde durante o aumento da temperatura alguns elementos com baixo ponto de fusão perdem massa, e o segundo podemos atribuir ao processo de entalpia de reação química, onde a quebra das ligações químicas no carbonato de sódio requer uma certa quantidade de absorção de energia – reação endotérmica, enquanto a formação dos produtos (óxido de sódio e dióxido de carbono) libera energia – reação exotérmica. A entalpia da reação, representada por ΔH , é a diferença entre a energia absorvida na quebra das ligações nos reagentes e a energia liberada na formação das ligações nos produtos. Portanto, nesse caso, podemos ter o carbonato de sódio (Na₂CO₃) se decompondo em óxido de sódio (Na₂O) e dióxido de carbono (CO₂).

Também é possível analisar a quantidade de óxidos constituintes da amostra para classificar a propriedade do material (Navarro, 1991). A amostra apresentou em pequena quantidade do elemento Mg, a diminuição de massa do C, e, em pequena proporção, um aumento da massa do Alumínio – Al, conforme demonstra a Tabela 05. Observando que o Mg e Al estão relacionados à durabilidade do material, e o Si está relacionado a viscosidade do material.

Essas etapas de decomposição térmica são importantes em várias aplicações industriais, como na produção de vidro, sabão, detergentes e em processos químicos diversos.

Gráfico 06. Resultado EDS para cada amostra

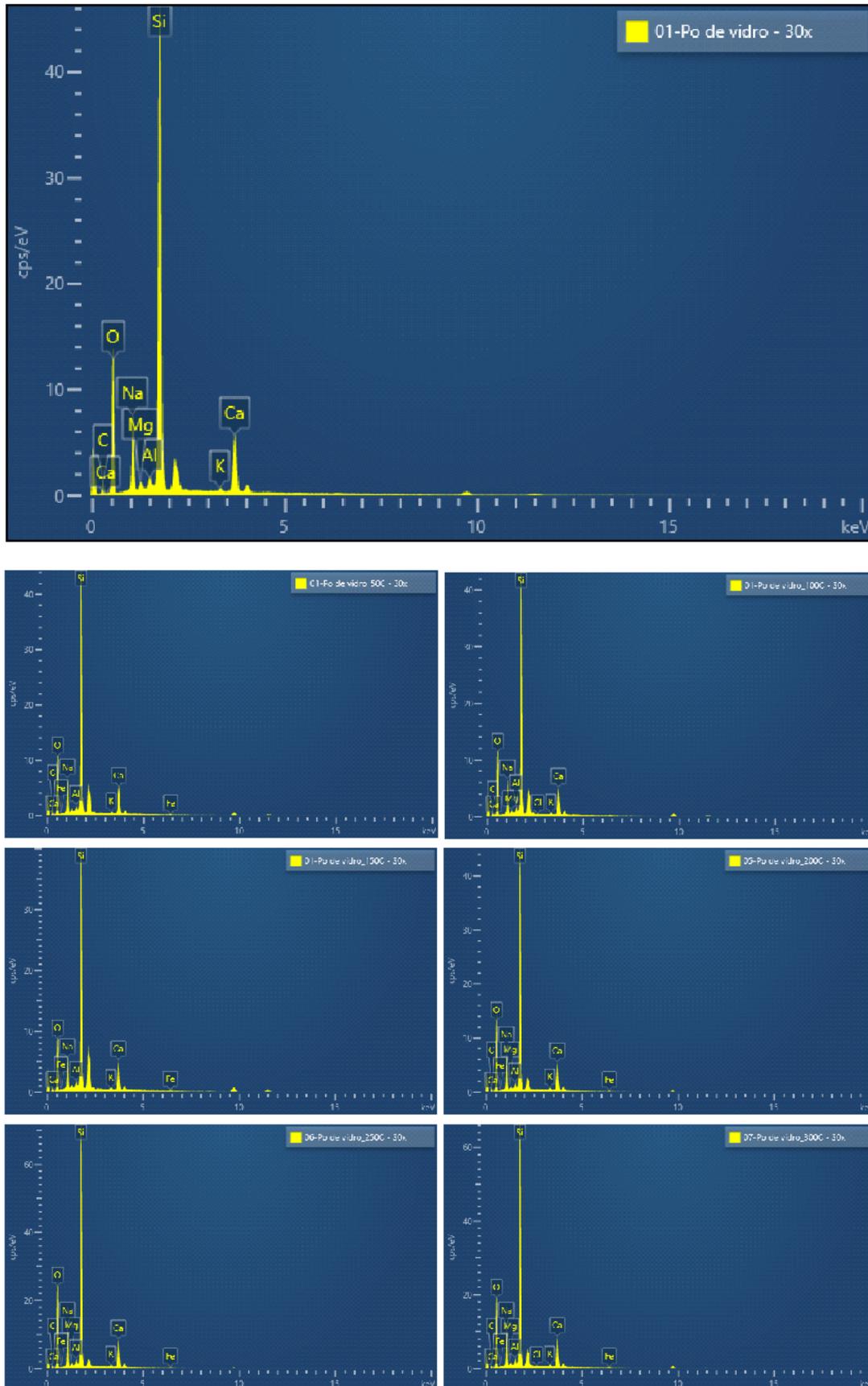


Tabela 05. Elementos químicos de cada amostra.

Massa dos elementos em cada amostra							
	Padrão	Sinterizada a 50°C	Sinterizada a 100°C	Sinterizada a 150°C	Sinterizada a 200°C	Sinterizada a 250°C	Sinterizada a 300°C
Elementos	Massa %	Massa %	Massa %	Massa %	Massa %	Massa %	Massa %
C	15,50	15,16	14,70		10,03	5,15	5,43
O	40,26	38,00	39,83	40,76	42,38	45,52	42,74
Na	7,02	7,01	6,65	7,97	7,30	8,16	8,18
Mg	0,55		0,51		0,53	0,58	0,55
Al	0,63	0,74	0,72	0,98	0,78	0,76	1,03
Si	29,25	31,77	30,30	40,12	31,25	32,13	33,57
K	0,32	0,30	0,33	0,41	0,45	0,33	0,39
Ca	6,48	6,65	6,81	9,32	7,04	7,09	7,72
Fe		0,36		0,44	0,23	0,28	0,25
Cl			0,15				0,13

A lavagem na amostra de pó de vidro não alterou significativamente o material, conforme pode ser observado na tabela 06. O foi identificado pelo MEV a presença de Cloro, e houve um aumento da massa do Oxigênio, pelo fato da amostra lavada ter sido mais hidratada que a amostra (padrão).

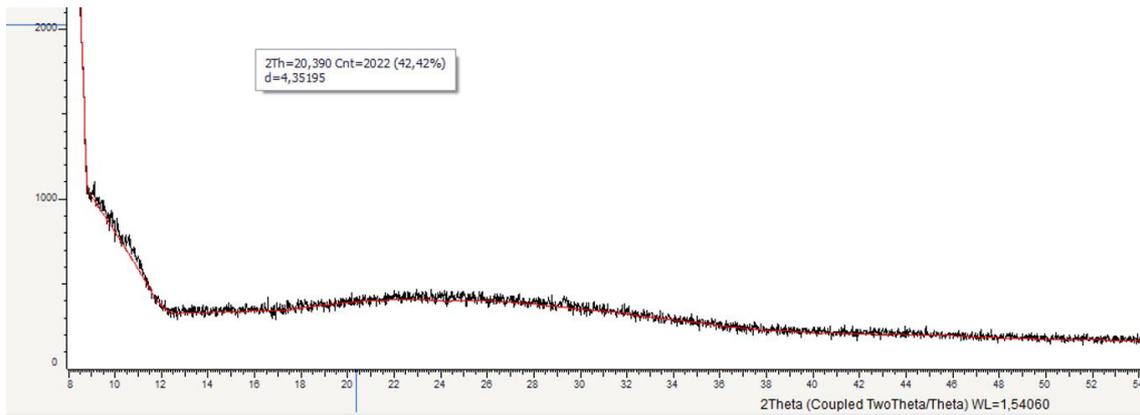
Tabela 06. Elementos químicos de amostra lavada de pó de vidro.

Massa dos elementos	
	Padrão Lavada
Elementos	Massa %
C	-
O	53,24
Na	9,24
Mg	0,68
Al	0,76
Si	29,25
K	0,36
Ca	6,32
Fe	0,15
Cl	-

5.5 – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

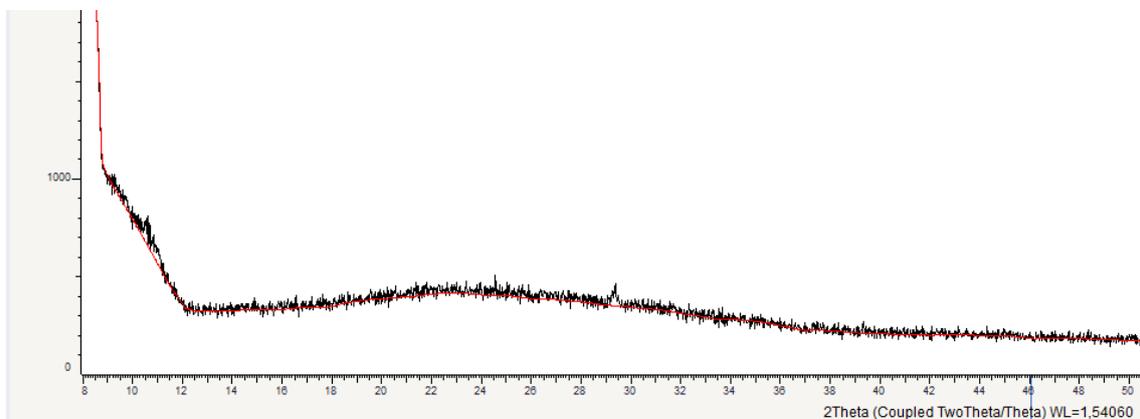
A figura 28 representa os espectros de difração de raios-X da amostra padrão, o resultado mostra que não temos nenhuma fase cristalina, portanto o espectro resultante, apresenta um pico alargado em toda sua extensão o que é característico de um material amorfo.

Figura 28. Difração de raios-x da amostra padrão.



A figura 29 representa os espectros de difração de raios-X da amostra aquecida à 300°C, que também apresentou falta de cristalinidade, ou seja, sem ordenamento estrutural, característico de um material amorfo.

Figura 29 Difração de raios-x da amostra sinterizada a 300°C.

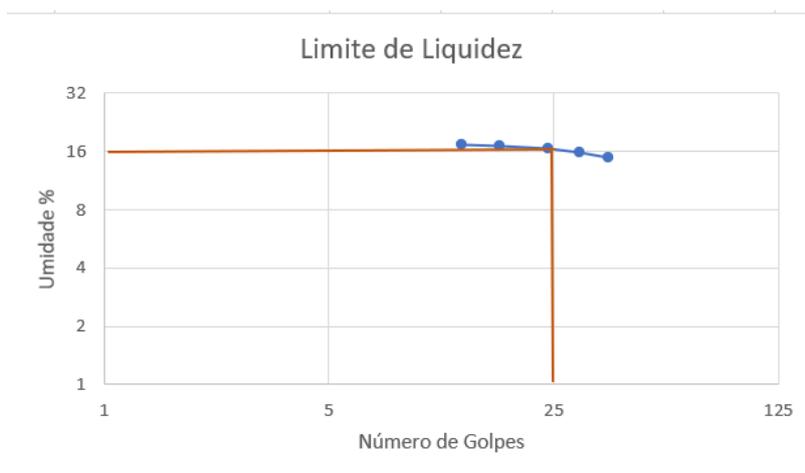


5.6 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez – tabela 07, limite de plasticidade e índice de plasticidade são apresentados a seguir, que demonstram um solo com baixo limite de liquidez e não plástico, sendo os resultados:

- Limite de Liquidez – para 25 golpes é 16,00%;
- Limite de Plasticidade – Não encontrado;
- Índice de Plasticidade – Não Plástico.

Tabela 07. Resultado do ensaio de limite de liquidez.



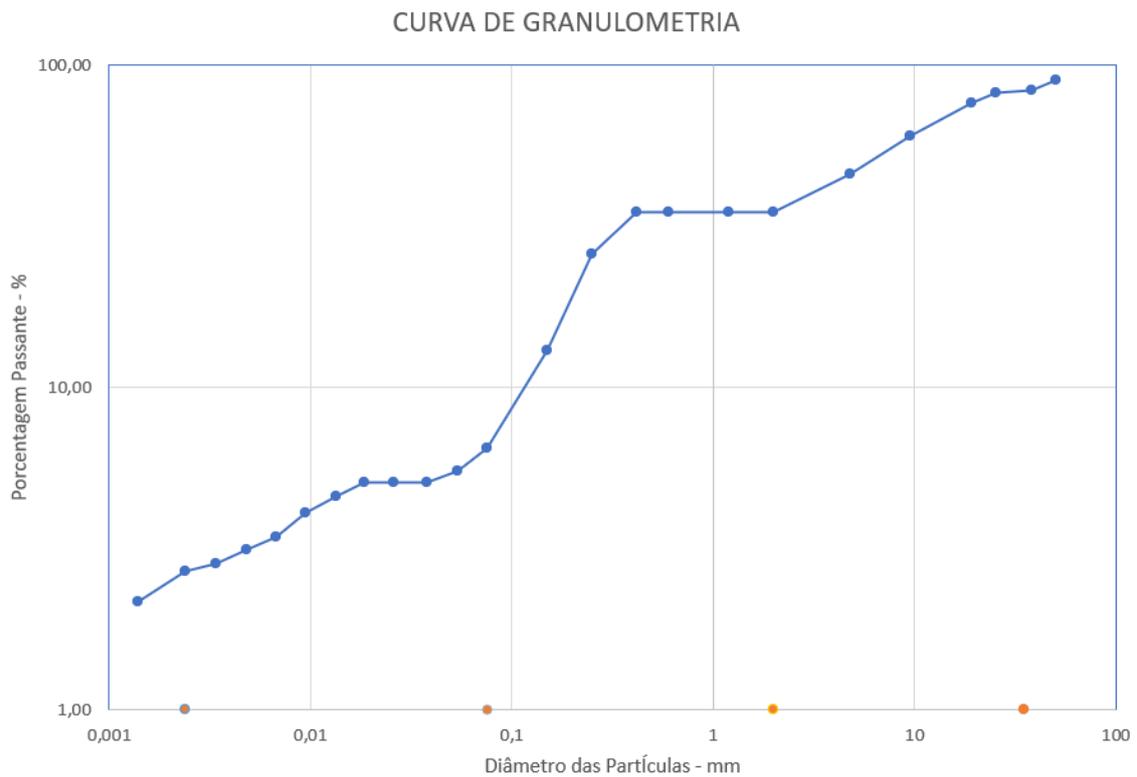
Os ensaios de caracterização do solo demonstram que o solo possui 2,69% de argila, e o limite de liquidez de 16%, conforme Barbosa; Ghavami (2010) é considerado um material apropriado para a produção de solo-cimento.

O solo apresentou um resultado de material não plástico, que conforme Segantini; Alcântara (2010) possui parâmetro aceitável para a finalidade de solo-cimento.

Para o ensaio da granulometria do solo o resultado apresentou grande porcentagem de pedregulho é de 64,80%, indicando que o solo é composto na sua maioria por partículas grossas, e baixo teor de material fino, conforme demonstra o gráfico 07 da curva granulométrica do solo, sendo classificado o material retirado da jazida São Manoel conforme embasamento da NBR 6502/2022:

- Argila – diâmetro < 0,002 mm – 2,69%;
- Silte – diâmetro de 0,002 mm a 0,06 mm – 2,85%;
- Areia – diâmetro de 0,06 mm a 2 mm – 29,66%;
- Pedregulho – diâmetro de 2 mm a 60 mm – 64,80%.

Gráfico 07. Curva granulométrica do solo amostra.

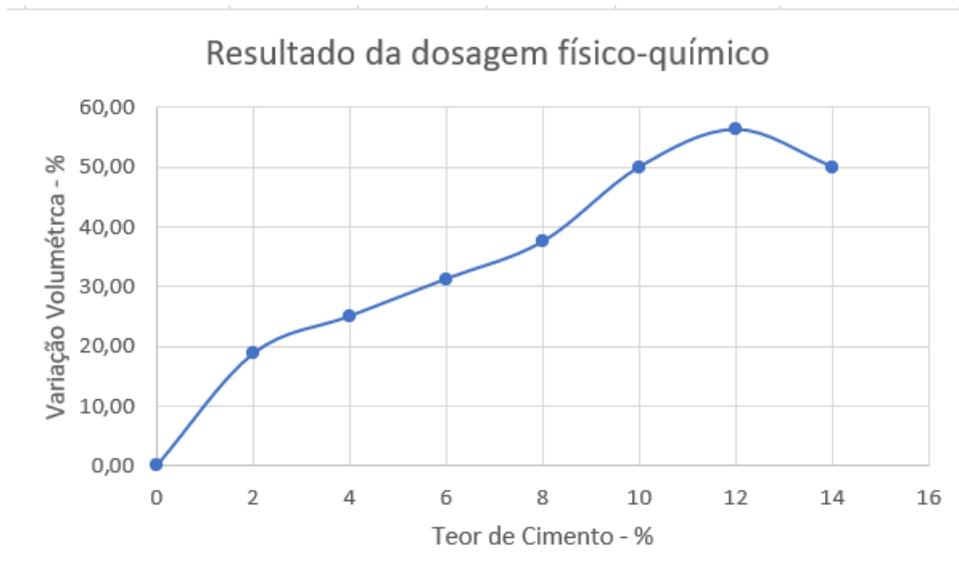


A amostra do solo analisado é do grupo dos solos granulares – pedregulho bem graduado - com mistura de pedregulhos, areias e argilas, sendo de boa permeabilidade e apresenta boas características para fornecer uma base de solo-cimento estável.

5.7 – ENSAIO PELO MÉTODO FÍSICO-QUÍMICO – ESTABILIZAÇÃO DO SOLO COM O CIMENTO – CP II

O resultado do ensaio físico-químico foi utilizado como estimativa para encontrar o teor mínimo de cimento CP II requerido para sua estabilização do solo-cimento. O resultado encontrado do ensaio realizado conforme a recomendação da Norma do DNIT 414/2019, foi de 12% de cimento, conforme demonstra o gráfico 08.

Gráfico 08. Resultado da dosagem físico-químico – teor de cimento.



Observando que o resultado do ensaio físico-químico apresentou um alto teor de cimento para a estabilização da mistura solo-cimento, então, foi adotado como parâmetro de estabilização do solo a faixa de 5% a 8% de cimento, conforme os parâmetros usualmente utilizados pela Norma DNIT 143/2022 – ES, e foi montado 4 (quatro) mistura de solo para a realização dos ensaios mecânicos. Sendo elas: solo + 5% de cimento, solo + 7% cimento, solo + 5% de pó de vidro, solo + 7% de pó de vidro, solo + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro e solo + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro.

5.8 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O resultado do ensaio de resistência à compressão simples para as amostras de: solo + 5% de cimento, solo + 7% de cimento, solo + 5% de pó de vidro, solo + 7% de pó de vidro, solo + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro e solo + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro, estão representados na tabela 08 abaixo:

Tabela 08. Resultado dos ensaios de resistência à compressão simples. Amostra x resistência média encontrada em Mpa.

Solo + 5% de cimento	2,825 Mpa
Solo + 7% de cimento	3,160 Mpa
Solo + 5% de pó de vidro	0,347 Mpa
Solo + 7% de pó de vidro	0,395 Mpa
Solo + 2,5% de cimento + 2,5% pó de vidro	0,997 Mpa
Solo + 3,5% de cimento + 3,5% pó de vidro	1,157 Mpa

Os resultados encontrados no ensaio de resistência à compressão simples para os 6 (seis) tipos de mistura quando analisados conforme a Norma do DNIT 143/2022, que adota como critério de parâmetro mínimo de 2,1 Mpa na cura de 7 dias para a mistura solo-cimento utilizada como camada de pavimento. Com isso, tem-se que as misturas de solo + cimento atenderam ao parâmetro mínimo de resistência a compressão. Para a mistura solo + 5% de cimento a resistência média atingida foi de 2,825 Mpa e para a mistura solo + 7% de cimento a resistência média atingida foi de 3,160 Mpa.

Já, as misturas de solo + pó de vidro e/ou solo + cimento e pó de vidro não atingiram o mínimo de resistência adotado pelas Normativas, ficando abaixo de 2,10 Mpa de resistência à compressão. Na mistura solo + 5% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 0,347 Mpa e na mistura solo + 7% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 0,395 Mpa, na mistura de solo + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 0,997 Mpa e na mistura de solo + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 1,157 Mpa.

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão também podem ser observados pelo anexo 8.1, que detalha individualmente cada CP considerado nas misturas do ensaio.

5.9 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados encontrados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas foram: solo + 5% de cimento a resistência média atingida foi de 0,392 Mpa; solo + 7% de cimento a resistência média atingida foi de 0,470 Mpa; solo + 5% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 0,049 Mpa; solo + 7% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 0,051 Mpa; solo + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 0,139 Mpa e solo + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro a resistência média atingida foi de 0,196 Mpa, conforme demonstra a tabela 09.

Tabela 09. Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Amostra x resistência média encontrada em Mpa.

Solo + 5% de cimento	0,392 Mpa
Solo + 7% de cimento	0,470 Mpa
Solo + 5% de pó de vidro	0,049 Mpa
Solo + 7% de pó de vidro	0,051 Mpa
Solo + 2,5% de cimento + 2,5% pó de vidro	0,139 Mpa
Solo + 3,5% de cimento + 3,5% pó de vidro	0,196 Mpa

As Normativas não detalham ou especificam algum parâmetro mínimo para a resistência à tração na mistura solo-cimento.

Um conceito analítico apresentado por Aliati Rosa no seu trabalho – “Relação entre resistência à tração e à compressão de um solo fino artificialmente cimentado” é que a resistência à tração e resistência à compressão média fica em torno de 0,12.

A relação linear entre a resistência à compressão e a resistência à tração encontrada nas amostras desta pesquisa, o resultado está representado na tabela 10.

Tabela 10. Resultado da relação linear entre a resistência à compressão e a resistência à tração.

Solo + 5% de cimento	$0,392/2,825 = 0,138$
Solo + 7% de cimento	$0,470/3,160 = 0,148$
Solo + 5% de pó de vidro	$0,049/0,347 = 0,141$
Solo + 7% de pó de vidro	$0,051/0,395 = 0,129$
Solo + 2,5% de cimento + 2,5% pó de vidro	$0,139/0,997 = 0,139$
Solo + 3,5% de cimento + 3,5% pó de vidro	$0,196/1,157 = 0,169$

Os resultados da relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração demonstram uma proximidade no resultado encontrado por Aliati Rosa. Sendo que para a mistura solo + 5% de cimento a relação encontrada foi de 0,138; para a mistura de solo + 5% de pó de vidro a relação encontrada foi de 0,141; para a mistura de solo + 7% de cimento a relação encontrada foi de 0,148, para a mistura de solo + 7% de pó de vidro a relação encontrada foi de 0,129, para a mistura de solo + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro a relação encontrada foi de 0,139 e para a mistura de solo + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro a relação encontrada foi de 0,169.

5.10 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados da determinação do módulo de resiliência para as amostras embasadas pela Norma do DNIT 181/2018 são conforme demonstra a tabela 11.

Tabela 11. Determinação do módulo de resiliência para as amostras embasadas na DNIT 181/2018.
Amostra x módulo de resiliência em Mpa.

Solo + 5% de cimento	4.789,90 Mpa
Solo + 7% de cimento	5.637,16 Mpa
Solo + 2,5% de cimento + 2,5% pó de vidro	2.744,56 Mpa
Solo + 3,5% de cimento + 3,5% pó de vidro	3.357,83 Mpa

Os resultados demonstraram que quanto maior o teor de cimento na mistura maior será a resistência quanto as tensões aplicadas sobre o material, visto que pra a mistura de solo + 5% de cimento o MR encontrado foi de 4.789,90 Mpa e para a mistura de solo + 7% de cimento o MR encontrado foi de 5.637,16 Mpa.

As misturas que substituíram em 50% o teor de cimento no composto, ocorreu uma diminuição no MR das amostras. Para a mistura solo + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro o MR encontrado foi de 2.744,56 Mpa e para a mistura de solo + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro o MR encontrado foi de 3,357,83 Mpa.

Já as amostras que foram montadas com apenas solo + pó de vidro em 5% e 7%, não conseguiram concluir o ciclo do ensaio de determinação do módulo de resiliência pela DNIT 181/2018, visto que as tensões aplicadas sobre os corpos de prova eram superiores a resistência do material, causando uma deformação permanente nas amostras.

Com isso, para as amostras de solo + 5% de pó de vidro e solo + 7% de pó de vidro foi utilizado a Norma do DNIT 134 para realização do ensaio do módulo de resiliência, os resultados obtidos foram menores em relação desta Norma.

Para a amostra de solo + 5% de pó de vidro o módulo de resiliência variou de 189,15 Mpa (menor MR encontrado entre os 3 corpos de prova analisados) a 846,83 Mpa (maior MR encontrado entre os 3 corpos de prova analisados). A amostra de solo + 7% de pó de vidro apresentou o módulo de resiliência na ordem de 123,89 Mpa (menor MR encontrado entre os 3 corpos de prova analisados) e 781,33 Mpa (maior MR encontrado entre os 3 corpos de prova analisados).

6 - CONCLUSÃO

Os resultados encontrados são promissores para a utilização do pó de vidro na mistura de solo-cimento da pavimentação, substituindo parcialmente o cimento por resíduo de vidro industrial, pelos ensaios realizados neste trabalho e pelos parâmetros adotados na preparação das misturas dos compósitos.

O ensaio de módulo de resiliência é um dos ensaios mais importantes para projetos de pavimentação, pois através dele é identificado o comportamento dos materiais nas camadas do pavimento, cujo ensaio obteve o melhor resultado comparativo entre as misturas, conforme descrição abaixo.

A amostra de solo + 3,5% de cimento + 3,5% de pó de vidro, que substituiu 50% do cimento por pó de vidro no teor de solo + 7% de cimento, atingiu 36,61% da resistência à compressão simples, 41,70% da resistência a resistência de tração por compressão diametral e 59,57% do módulo de resiliência da amostra padrão (solo + 7% de cimento).

E, a amostra de solo + 2,5% de cimento + 2,5% de pó de vidro, que substituiu 50% do cimento por pó de vidro no teor de solo + 5% de cimento, atingiu 35,29% da resistência à compressão simples, 35,46% da resistência a resistência de tração por compressão diametral e 57,30% do módulo de resiliência da amostra padrão (solo + 5% de cimento).

Logo, os resultados encontrados pela nova mistura homogênea utilizando pó de vidro, demonstra que a nova composição pode ser utilizada em camadas de base e/ou sub-base da pavimentação, amparado pela Norma do DNIT 143/2022, substituindo uma determinada porcentagem de cimento.

A contribuição da substituição do cimento por pó de vidro na mistura solo-cimento será econômica e ambiental para o setor de pavimentação e industrial. Novas pesquisas podem dimensionar o impacto econômico desta substituição e/ou adotar novos teores de pó de vidro para as misturas observando se as resistências dos ensaios mecânicos serão superiores aquelas já encontradas neste trabalho.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Oliveira H. A. de, Santos C. P. dos, Oliveira R. M. P. B., Jesus E. de, Macedo Z. S. **Produção de agregado sintético de argila com reaproveitamento de resíduo de vidro.** Matéria (Rio de Janeiro). 2019;24(1):e-12318.
- [2]. Luz AP, Ribeiro S. **Uso de pó de vidro como fundente para produção de grês porcelanato.** Matéria (Rio J) [Internet]. 2008Jan;13(1):96-103.
- [3]. Trentin P. O., Manica J., Vanzetto S. C., Marangoni B., Zaleski A. **Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa.** Matéria (Rio de Janeiro). 2020;25(1):e-12576.
- [4]. Zaccaron A., Frizzo R. G., Zanoni E. T., Montedo O. R. K., Bernardin A. M., Peterson M., et al.. **Efeito da adição de resíduo de vidro em massa de cerâmica de alvenaria.** Matéria (Rio de Janeiro). 2019;24(4):e12496.
- [5]. Alves, H. O.. **Avaliação de argilas industriais formuladas com resíduo de vidro na produção de agregado sintético.** Tese (São Cristóvão). 2017.
- [6]. Souza J. P.. **Estudo da Sinterização de Vidros Aluminossilicatos por Calorimetria Exploratória Diferencial.** Dissertação. (São Paulo). 2015.
- [7]. Callister W. D. Jr., Rethwisch D. G.. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução.** Livro. 8° ed. 2012.
- [8]. Denari G. B., Cavalheiro É. T. G., **Princípios e aplicações de análise térmica.** Material. (São Carlos). 2012.
- [9]. Gobbo L. A., **Aplicação da difração de raios-x e método de Rietveld no estudo de cimento Portland.** Tese. (São Paulo). 2009.
- [10]. Queiroz A., Kurosawa R., Barreto R., **Difração de raios-x.** Material.
- [11]. Akerman M., **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro.** Material. (CETEV). 2000.

- [12]. Marçal R. L. S. B., **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos da indústria de rochas ornamentais**. Dissertação. (Rio de Janeiro). 2011.
- [13]. Peixoto V. Z., **A utilização do vidro moído como agregado miúdo em revestimentos asfálticos: uma revisão sistemática**. Dissertação. (Campo Grande). 2023.
- [14]. Pereira M. F., **Processo e caracterização do resíduo de pó de vidro blindex para produção de um revestimento ecológico**. Dissertação. (Campo Grande). 2020.
- [15]. Trentin P. O., Manica J., Vanzetto S. C., Marangoni B., Zaleski A., **Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa**. Revista Matéria. ISSN 1517-7076 artigos e-12576, 2020.
- [16]. Oliveira K. S., Paula R. G., Wanderlind A., Eyng A. S., Henrique J. P., Guglieimi E. P. A., **Uso de Resíduo de Vidro Temperado (RVT) na composição de argamassas**. Revista Cerâmica Industrial. ISSN 1413-4608 artigos e042801, 2023.
- [17]. Rotta J. V. P., Radke I. B. G., Altoé S. P. S., Pereira A. A., **Aplicação de resíduo de vidro no concreto como substituto parcial à areia**. Brazilian Journal of Development. ISSN: 2525-8761. 2022.
- [18]. Barros C., **Apostila de vidros – Materiais de construção edificações**. Material. (IFRS). 2010.
- [19]. **Associação Brasileira de distribuidores e processadores de vidros planos – ABRAVIDRO**, <https://abravidro.org.br/vidro-no-brasil/>, acessado em 04 de fevereiro de 2024.
- [20]. LM VIDROS. **Vidros LM Temperados** - <http://lmvidros.com.br/>, acessado em 04 de fevereiro de 2024.
- [21]. Alves O. L., Gimenez I. F., Mazali I. O., **Vidros**. Cadernos Temáticos. Química Nova na Escola. Ed. Especial, 2001.
- [22]. Delbianco, F. S., **Caracterização de vidros preparados com resíduo da indústria de galvanostegia**. Dissertação. (Ria Claro). 2003.

- [23]. Navarro J. M. F., **El Vidro**. Consejo superior de investigaciones científicas – CSIS. (Madrid). 1985.
- [24]. Souza A. C., Pereira M. F., Mossin L. C., **Thermal and mechanical characterization of blindex glass powder residue® for the production of ecological coating**. journal of materials research and technology 2021; 12: 1794 e 1803.
- [25]. Thaís S. R. B., Rodrigues C. S. M., Heloísa M. A. S., Macêdo T. V., **O efeito do tratamento térmico sobre a microdureza e cristalinidade de uma vitrocerâmica obtida da reciclagem de resíduos vítreos**. Revista Principia. Pg. 51, 2020.
- [26]. Vitória B. E. S. F., **Caracterização de resíduo proveniente da estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação de vidro plano e avaliação do potencial para sua reutilização**. Dissertação. (São José dos Campos). 2021.
- [27]. Anchieta E. S., Victória G. N. A., Menezes G. F., Gentil V. O. A., Alves H. O., Melo L., Martins F. C. M., **Influência da incorporação de resíduo de lapidação de vidro nas propriedades da argamassa de cimento Portland**. Revista Matéria. ISSN 1517-7076 artigos e20230330, 2024.
- [28]. Londero G. A., **Caracterização mecânica, de condutividade térmica e dos custos dos vidros temperados comercializados na cidade de Alegretes/RS**. Dissertação. (Alegrete). 2022.
- [29]. Moraes A., Batista J. O. L. D., Karine É. A. L., Xavier C. R., Moreira G. P., Milton J. E. M., Bosco V. S., **Argamassa cimentícia: Uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial**. Revista Cerâmica Industrial. ISSN 1413-4608 artigos e102701, 2022.
- [30]. Fernando A. P., **Materiais de Engenharia – microestrutura e propriedades**. Livro. 2000.
- [31]. Alcácer L., **Física do estado sólido**. Livro. 4º ed. 2013.
- [32]. Bariani L. B., Goretti L. M. M., Pereira J. A. C., Barbosa J. S. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para engenheiros**. Livro (Rio de Janeiro). 2º ed. 2022.

- [33]. Simioni F. C., Callejas I. J. A., Durante L. C., Souza B. G., **Solo-cimento autoadensável com incorporação de areia de resíduos de construção civil para aplicação em sistema de vedação vertical**. Ambiente Construído. ISSN 1678-8621, v. 20, n. 4, p. 281-296, 2020.
- [34]. IBDA – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura. **Solo-cimento, solução para economia e sustentabilidade**. www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=23&Cod=124, acessado em 12 de junho de 2024.
- [35]. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). **Dosagem das misturas de solo-cimento; normas de dosagem e métodos de ensaios**. Trabalho. (São Paulo) 3º ed. 1986.
- [36]. Friedrich M., Alberto M. O. V., Mario J. D. S., **Solo-cimento: O uso da terra crua para construções mais sustentáveis**. 3º Congresso Internacional Sustentabilidade e Habitação de Interesse Social. (Porto Alegre) 2014.
- [37]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12025: Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012b.
- [38]. Thomé A., Forcelini M., Rigo G. G., Pereira V. F., XXV Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. **Ensaio de Resistência à compressão simples em solo cimentado composto por cimento Portland e areia de Osório**. Passo Fundo, 2013.
- [39]. DNIT. **NORMA DNIT 414/2019 – ME. Pavimentação – Solo-cimento – Dosagem físico-química de solo-cimento – Método de ensaio**.
- [40]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.
- [41]. IFSULDEMINAS. **Solo-cimento: determinação do tipo de cimento**. 15º Congresso Nacional de Meio Ambiente. Poços de Calda, 2018.

[42]. Consoli N. C., Cruz R. C., Floss M.F., Festugato L., **Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 136(5), p. 759-763, 2010.

[43]. Aliati D. R., **Relação entre resistência à tração e à compressão de um solo fino artificialmente cimentado**. Dissertação. Porto Alegre, 2013.

[44]. Pivoto L. S., **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamento estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. Dissertação. Porto Alegre, 2000.

[45]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181: Solo – Análise Granulometria**. Rio de Janeiro, 2016.

[46]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

[47]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

[48]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502: Solo e rochas - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2022.

[49]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457: Solo – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro, 2024.

[50]. Ricardo, M. de L., **Principais classes de solos do Brasil**. Manual. UFPR.

[51]. DNIT. **NORMA DNIT 134/2018 – ME. Pavimentação – Solo – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**.

[52]. DNER. **DNER-ME 228/1994**. Solos – compactação em equipamentos miniatura.

[53]. DNIT. **NORMA DNIT 258/2023** – ME. Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio.

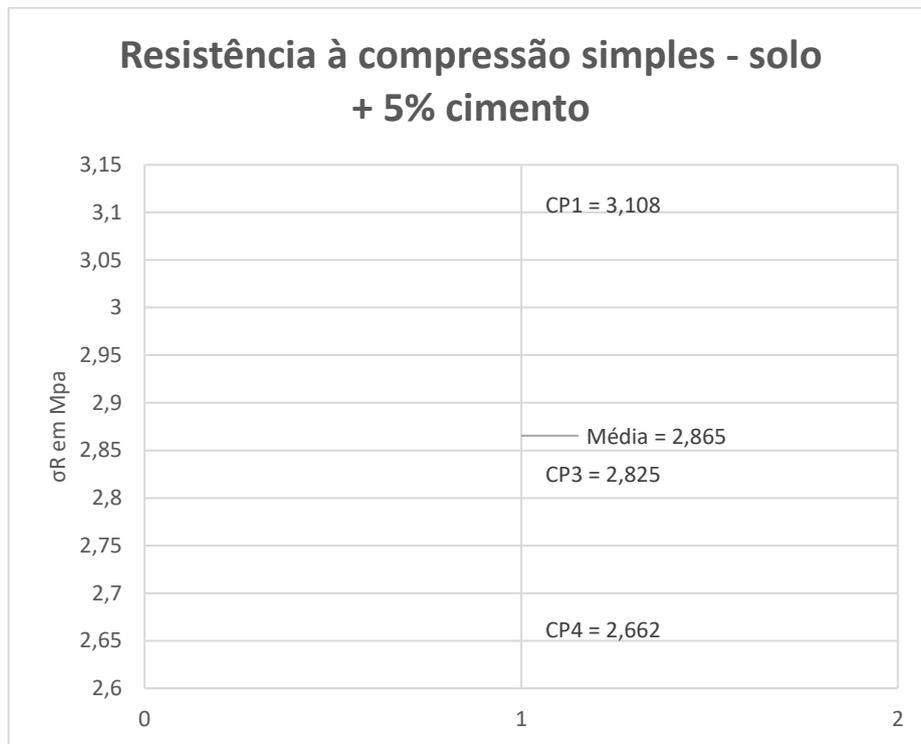
[54]. DNIT. **NORMA DNIT 259/2023** – CLA. Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação.

[55]. DNIT. **NORMA DNIT 143/2022** – ES. Pavimentação – Base de solo-cimento – Especificação de serviço – Classificação.

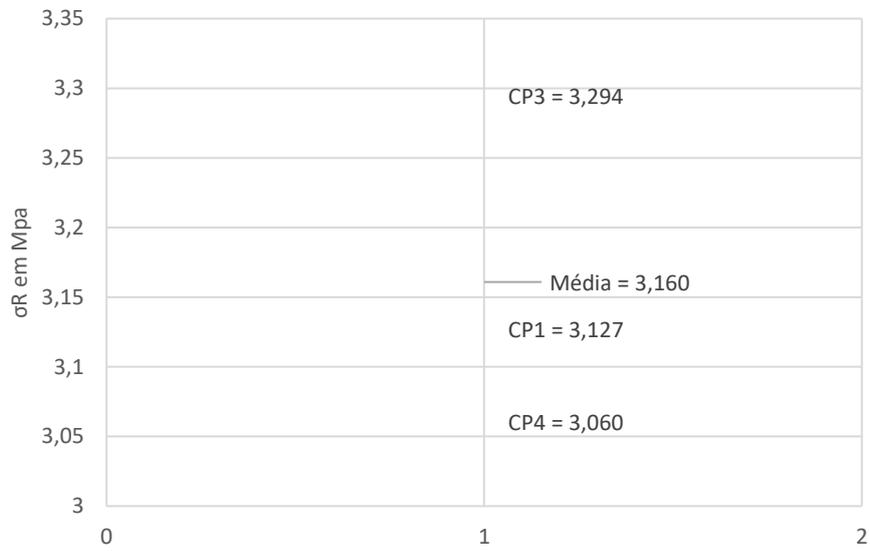
[56]. DNIT. **NORMA DNIT 181/2018** – ME. Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

8 – ANEXOS

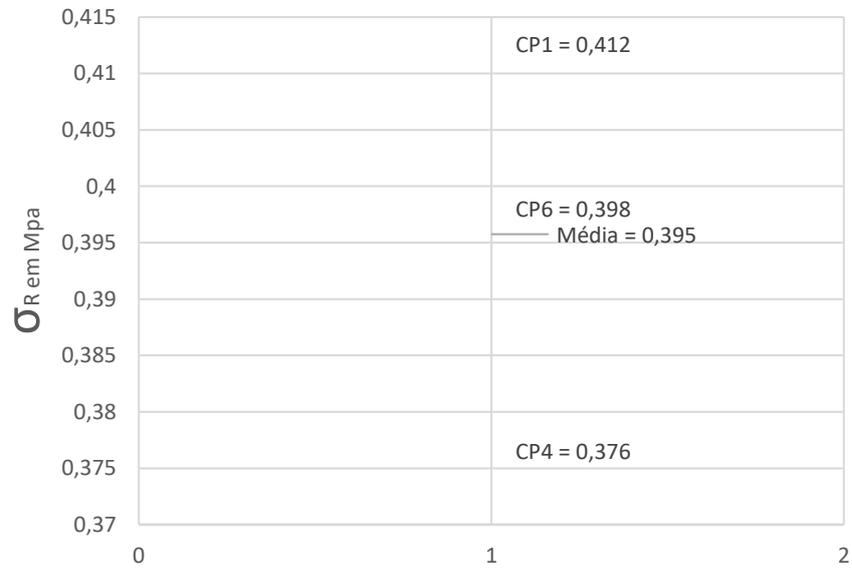
8.1 – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES PARA AS 4 (QUATRO) MISTURAS



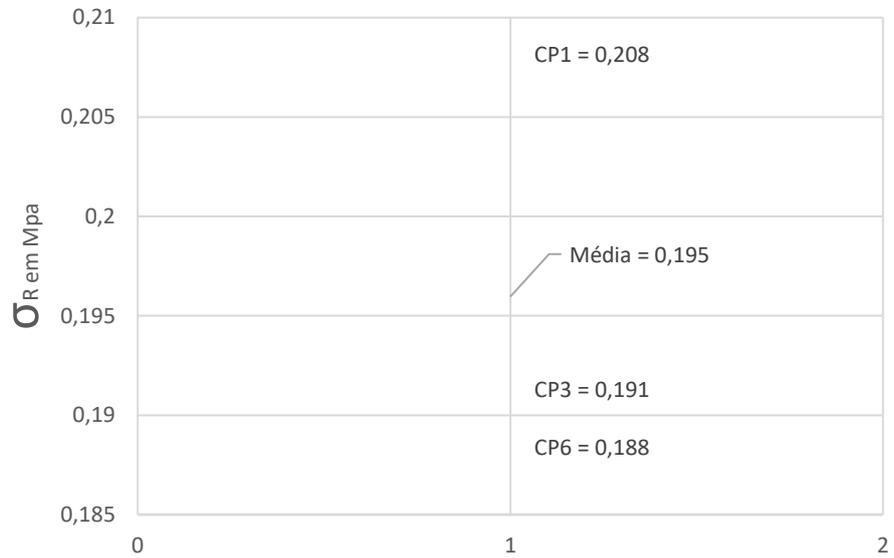
Resistência à compressão simples - solo + 7% cimento



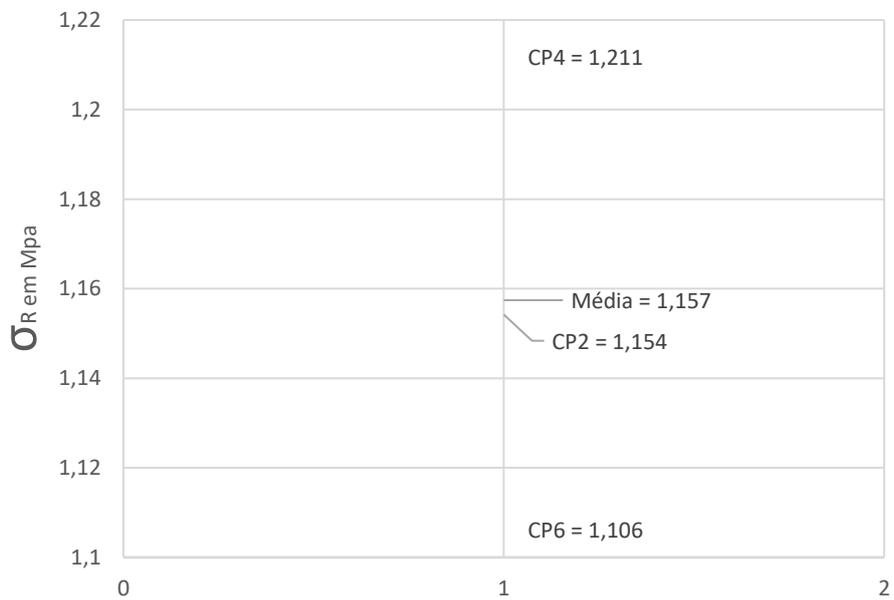
Resistência à compressão simples - solo + 7% de pó de vidro



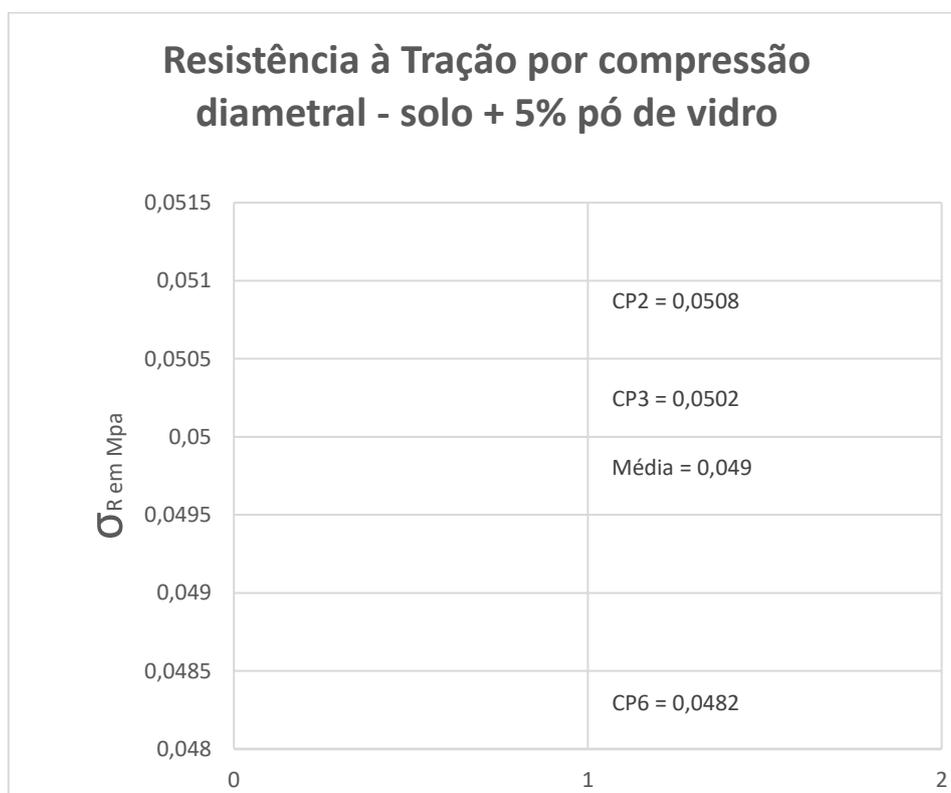
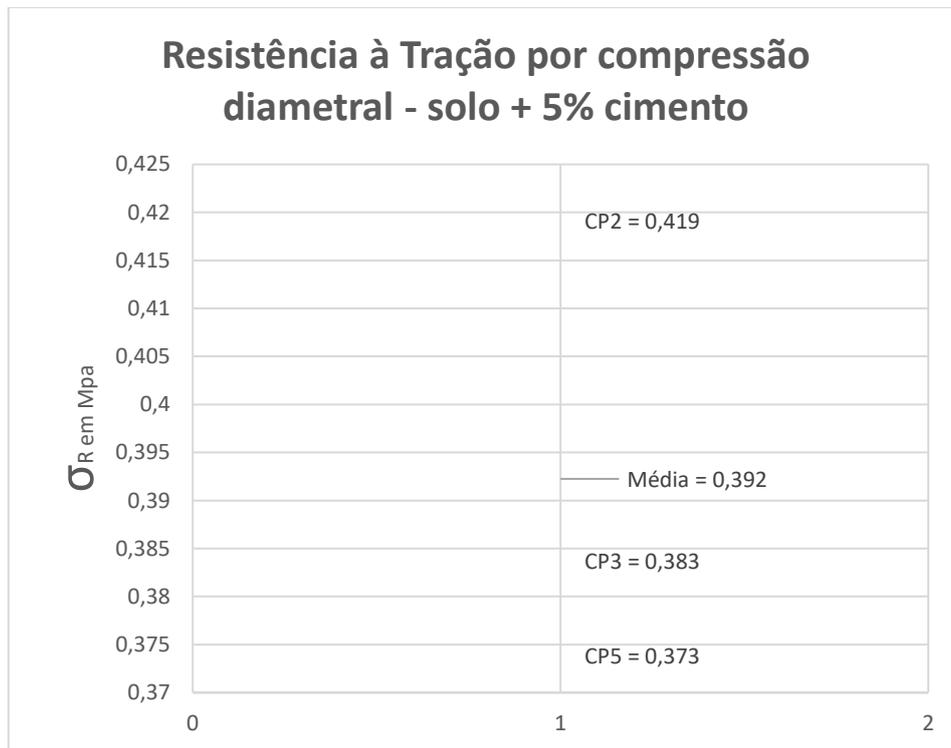
Resistência à Tração por compressão diametral - solo + 3,5% de pó de vidro + 3,5% cimento



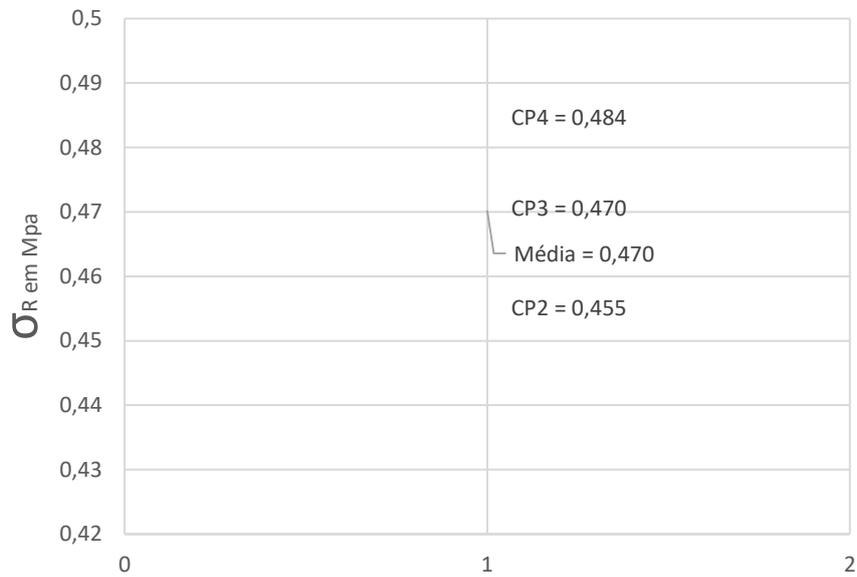
Resistência à compressão simples - solo + 3,5% de pó de vidro + 3,5% cimento



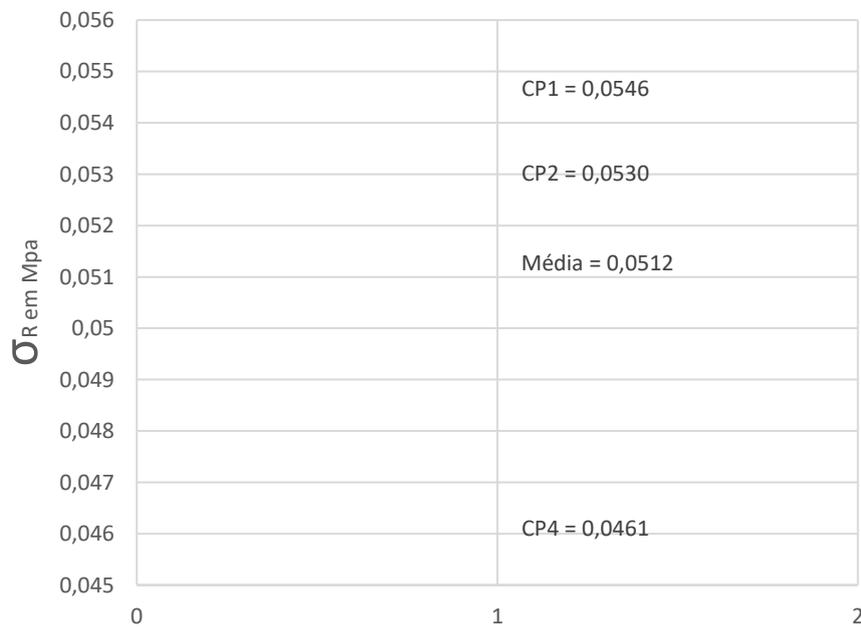
8.2 – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA AS 4 (QUATRO) MISTURAS



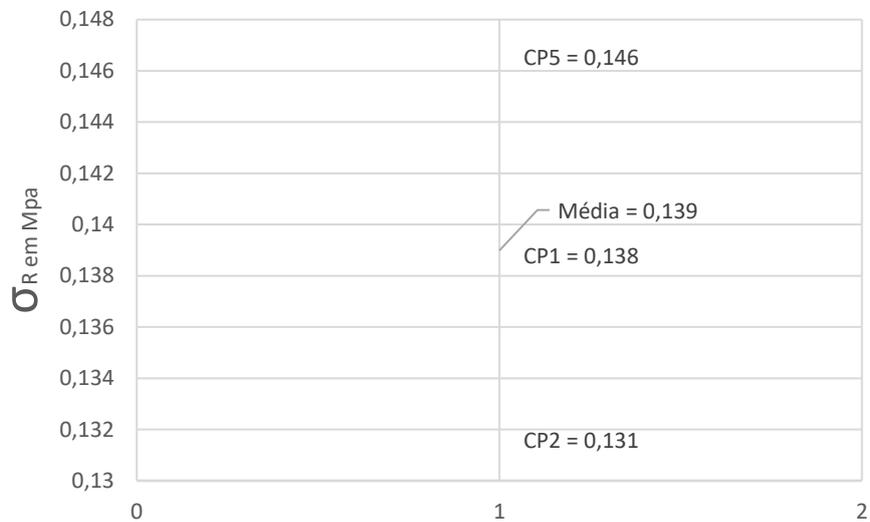
Resistência à Tração por compressão diametral - solo + 7% cimento



Resistência à Tração por compressão diametral - solo + 7% pó de vidro



**Resistência à Tração por compressão
diametral - solo + 2,5% de pó de vidro +
2,5% cimento**



**Resistência à Tração por compressão
diametral - solo + 3,5% de pó de vidro +
3,5% cimento**

