



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

KLICHIA KELEN BONI ROSA

**AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CONSTITUÍDOS
DE FINOS RESIDUAIS TERMOPLÁSTICOS E VÍTREOS PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Palmas/TO
2023

KLICHIA KELEN BONI ROSA

**AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CONSTITUÍDOS
DE FINOS RESIDUAIS TERMOPLÁSTICOS E VÍTREOS PARA A
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental da Fundação Universidade Federal do Tocantins como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra

Palmas/TO
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

R738a Rosa, Klichá Kelen Boni.

Avaliação e caracterização de compósitos constituídos de finos residuais termoplásticos e vítreos para a Construção Civil. / Klichá Kelen Boni Rosa. – Palmas, TO, 2023.

115 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2023.

Orientador: Juan Carlos Valdés Serra

1. Materiais sustentáveis. 2. Material compósito com matriz gesso. 3. Resíduos de vidro e policarbonato. 4. Construção Civil. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

KLICHA KELEN BONI ROSA

AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS CONSTITUÍDOS DE FINOS RESIDUAIS TERMOPLÁSTICOS E VÍTREOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA

Dr. Juan Carlos Valdés Serra (Presidente e Orientador)
Universidade Federal do Tocantins

Dr. Joel Carlos Zukowski Junior (Membro Titular Interno)
Universidade Federal do Tocantins

Dra. Indara Soto Izquierdo (Membro Titular Externo)
Universidade Federal do Tocantins

Aprovada em: 13 de março de 2023.

Dedico esse trabalho ao meu filho Newton Leonel (que nasceu junto com essa dissertação), aos meus avós Maria e Dormelindo Leonel, à minha mãe Ivanete, ao meu esposo Newton Neto, tias Marisete, Valdete e Neiva, pessoas pelas quais eu não desisti da escrita dessa dissertação e que possuem todo o meu amor e admiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, porque d’Ele e para Ele são todas as coisas, e a Nossa Senhora, pelo dom da minha vida, pela proteção e por me iluminar durante todos os obstáculos enfrentados durante a árdua caminhada que foi o mestrado. E como foi complexa essa caminhada, com aulas remotas devido a pandemia global de COVID-19, descoberta do câncer e tratamento do meu avô/ pai de criação, episódio de choque anafilático por alergia alimentar com internação em UTI, gestação com diversas intercorrências que me limitaram, nascimento do meu filho e descoberta do câncer da minha avó.

Agradeço também a minha família e, em especial ao meu filho amado Newton Leonel Boni Miranda que foi gestado e nasceu durante a realização desta dissertação, ao meu esposo Newton Gomes de Miranda Neto, à minha mãe Ivanete Boni, aos meus avós Maria Versa Boni e Dormelindo Leonel Boni, às minhas madrinhas Marisete Boni e Neiva Boni, às minhas tias Valdete Boni e Marinês Parizotto Boni, à minha prima Jaqueline Boni Ribeiro e seu esposo Vinicius Ribeiro, à minha sogra Alessandra de Souza Gouvêa Miranda e ao meu sogro Newton Gomes Miranda Junior, pois sem todo o apoio, carinho, conselhos e compreensão, eu nada seria e não teria chegado até aqui.

Agradeço a cada oração que os meus avós fizeram por mim, por todo o amor incondicional, por cada conselho, abraço e acalento. Eles são a minha base de sustentação e a eles todo meu amor eterno e incondicional e gratidão.

Agradeço ao meu esposo Neto, companheiro de todas as horas e meu auxiliar em todo o programa experimental do mestrado, além de grande entusiasta e motivador da minha escrita da dissertação e do meu sucesso profissional, a ele todo o meu amor incondicional e admiração. Serei eternamente grata ao meu orientador Juan Carlos Valdés Serra, pois sem o apoio, paciência, compreensão, conselhos que me foram dados e pela não desistência da minha orientação (sei que dei um certo trabalho para “pegar no tranco” e realizar a pesquisa), eu não conseguiria obter o êxito na conclusão deste trabalho.

Agradeço também aos professores Joel Carlos Zukowski Junior e Indara Soto Izquierdo que participaram das bancas de qualificação e defesa pelas valorosas considerações a pesquisa.

Sou grata à UFT pela oportunidade de realizar meu mestrado em Engenharia Ambiental, por todo o conhecimento adquirido e, nominalmente aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – MPEA/ UFT por todo o conhecimento adquirido nesse caminho que foi o mestrado, em especial aos professores Marcelo Mendes Pedroza, Aurélio Pessoa Picanço, Joel Carlos Zukowski Junior e Cláudia da Silva Aguiar Rezende e ao secretário

do MPEA, Cristiano. Agradeço ainda aos professores do PPGCOMS/ UFT, Liliam Deisy Ghizoni e Eder Ahmad Charaf Eddine por todos os saberes assimilados na disciplina de Docência do Ensino Superior. Viva a ciência e viva as universidades públicas no Brasil!

Agradeço ao Alexandre, técnico do Laboratório de Materiais Compósitos da UFT pelo auxílio prestado na realização dos ensaios de EDX.

Agradeço ao Jesiel e Álvaro, técnico e coordenador, respectivamente, dos laboratórios do Centro Universitário Católica do Tocantins por todo o suporte laboratorial na utilização do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas para realização de parte do programa experimental da pesquisa.

Agradeço ao Miller, coordenador dos laboratórios de Engenharia do CEULP/ULBRA, por todo o suporte e prestatividade para realização dos ensaios de resistência das peças do material compósito no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da IES.

Sou grata ao meu amigo Jônatas Macêdo de Souza e aos colegas de mestrado Cassius e Cleydiane por toda a amizade e apoio.

Agradeço aos professores da minha graduação, Alexon Braga Dantas e Leonardo Furtado pelas valorosas conversas e incentivo à pesquisa e ao mestrado.

Agradeço à Carla enquanto minha gestora no UniCatólica, que possibilitou o meu regime de compensação de horas de trabalho para que eu conseguisse conciliá-lo com o meu mestrado.

Sou grata ao apoio prestado gentilmente pela KENERSON - Go Eyewear Palmas-TO na doação do resíduo de policarbonato em forma de aparas utilizado no experimento e, por toda a cordialidade e recepção em sua indústria, além de sanar todas as minhas dúvidas a respeito do resíduo.

Sou grata ao apoio prestado gentilmente pela Gesso São Francisco de Grajaú-MA pelo envio do laudo acerca do gesso de construção civil do tipo lento utilizado na pesquisa.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Martin Luther King)

RESUMO

O setor da construção civil é um dos setores que mais impactam o meio ambiente. Em contrapartida, é a área que também pode se adequar para a reciclagem de resíduos industriais e transformá-los em materiais de construção. Esta pesquisa objetiva-se a desenvolver e caracterizar um material compósito inovador constituído de uma matriz de gesso e reforço polimérico e cerâmico, por meio do emprego de resíduos de policarbonato em forma de aparas do processo de fabricação de lentes ópticas e óculos e de vidro sodocálcico verde cominuído proveniente de garrafas de bebidas descartadas. A finalidade foi substituir as placas e blocos de gesso de revestimento e acabamento pelo material compósito. A metodologia executada nesta pesquisa consistiu essencialmente em três etapas principais: Tratamento e determinação das propriedades dos resíduos; Produção das amostras e; Avaliação das amostras do material compósito em forma de blocos de gesso. Verificando a aplicação do compósito na Construção Civil e realizando análises no material no estado fresco e endurecido por meio de ensaios físicos, mecânicos e químico. Foram executados dez proporcionamentos, em que o P1 contém apenas gesso considerado como parâmetro para os demais que diferenciavam de forma crescente os percentuais de substituição do gesso por vidro (de 5% a 15%) e policarbonato (de 1% a 5%). Aos 28 dias de cura seca em ambiente laboratorial foram realizados os ensaios físicos de densidade no estado seco (relação entre a massa seca do corpo de prova e seu volume) e, análise microestrutural por meio de microscopia óptica com aplicação de estereomicroscópio para visualização das fases do material compósito, vazios e falhas nas peças e, absorção de água por capilaridade com duração de 24 horas. Os ensaios de resistência mecânica à compressão axial, resistência mecânica à flexão com três apoios, de dureza e o ensaio químico de EDX também foram realizados aos 28 dias. Avaliando a composição química das amostras de gesso, que revelou a presença de impurezas e aditivos, vidro e policarbonato. As amostras apresentaram não conformidade quanto à resistência à compressão axial para P0V0 (parâmetro) e P5V15 e de dureza mínimas em relação à todas as misturas, definidas em normativa sendo 8,4 MPa e 20 N/mm², respectivamente. Para o ensaio de resistência à flexão por três pontos, todas as amostras obtiveram resultados superiores ao prescrito em normativa como 1 MPa. Conclui-se que os melhores desempenhos para o material compósito, aos 28 dias de cura seca em ambiente laboratorial frente os ensaios físicos e mecânicos foram alcançados pelos proporcionamentos P3V5 (substituição de 3% do gesso por policarbonato e substituição de 5% do gesso por vidro), P3V10 (substituição de 3% do gesso por policarbonato e substituição de 10% do gesso por vidro) e P5V5 (substituição de 5% do gesso por policarbonato e substituição de 5% do gesso por vidro). Destes, a melhor mistura para fins de emprego na Construção Civil pertence a P3V5, que confere maiores resistências mecânicas e menores índices de absorção de água por capilaridade e menor densidade média aos 28 dias.

Palavras-chaves: resíduo de vidro, resíduo de policarbonato, gesso, compósito, materiais sustentáveis.

ABSTRACT

The civil construction sector is one of the sectors that most impact the environment. On the other hand, it is the area that can also be suitable for recycling industrial waste and transforming them into construction materials. This research aims to develop and characterize an innovative composite material consisting of a plaster matrix and polymeric and ceramic reinforcement, through the use of polycarbonate waste in the form of shavings from the manufacturing process of optical lenses and glasses and soda lime glass. comminuted green from discarded beverage bottles. The purpose was to replace the coating and finishing plasterboards and blocks with the composite material. The methodology carried out in this research essentially consisted of three main stages: Treatment and determination of waste properties; Production of samples and; Evaluation of composite material samples in the form of plaster blocks. Verifying the application of the composite in Civil Construction and performing analyzes on the material in the fresh and hardened state through physical, mechanical and chemical tests. Ten proportions were performed, in which P1 contains only plaster considered as a parameter for the others that increasingly differentiated the percentages of plaster replacement by glass (from 5% to 15%) and polycarbonate (from 1% to 5%). After 28 days of dry curing in a laboratory environment, physical density tests were carried out in the dry state (ratio between the dry mass of the specimen and its volume) and microstructural analysis by means of optical microscopy with the application of a stereomicroscope to visualize the phases of the composite material, voids and failures in the parts, and water absorption by capillarity lasting 24 hours. The tests of mechanical resistance to axial compression, mechanical resistance to flexion with three supports, hardness and the chemical test of EDX were also carried out at 28 days. Evaluating the chemical composition of the plaster samples, it revealed the presence of impurities and additives, glass and polycarbonate. The samples showed non-compliance regarding axial compression strength for P0V0 (parameter) and P5V15 and minimum hardness in relation to all mixtures, defined in regulations as 8.4 MPa and 20 N/mm², respectively. For the three-point flexural strength test, all samples obtained results superior to those prescribed in regulations such as 1 MPa. It is concluded that the best performances for the composite material, after 28 days of dry curing in a laboratory environment, in view of the physical and mechanical tests, were achieved by the P3V5 proportions (replacement of 3% of plaster with polycarbonate and replacement of 5% of plaster with glass), P3V10 (replacing 3% of the plaster with polycarbonate and replacing 10% of the plaster with glass) and P5V5 (replacing 5% of the plaster with polycarbonate and replacing 5% of the plaster with glass). Of these, the best mixture for use in Civil Construction belongs to P3V5, which provides greater mechanical resistance and lower rates of water absorption by capillarity and lower average density at 28 days.

Keywords: glass waste, polycarbonate waste, plaster, composite, sustainable materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do Programa Experimental.....	40
Figura 2 – Ensaio de Pega do Gesso	44
Figura 3 – Processo de Obtenção do Vidro Cominuído.....	45
Figura 4 – Ensaio de Composição Granulométrica do Policarbonato (esq.) e do Vidro (dir.)	46
Figura 5 – Ensaio da Massa Unitária e Específica do Vidro Cominuído.....	47
Figura 6 – Ensaio da Massa Unitária e Específica das Aparas de Policarbonato.....	48
Figura 7 – Aparas de Policarbonato e Vidro Cominuído	49
Figura 8 – Moldes e Óleo Mineral para Confeção dos Blocos do Material Compósito.....	51
Figura 9 – Execução dos Proporcionamentos do Material Compósito	52
Figura 10 – Execução das Moldagens dos Espécimes dos Proporcionamentos do Material Compósito.....	53
Figura 11 – Desmoldagem e Acondicionamento dos Espécimes dos Proporcionamentos do Material Compósito	54
Figura 12 – Aferição das massas dos prismas P0V0 (esq.) e P1V5 (dir.) aos 1, 7 e 28 dias ..	55
Figura 13 – Ensaio de Microscopia Óptica em Estereomicroscópio.....	56
Figura 14 – Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade dos Espécimes do Material Compósito.....	57
Figura 15 – Execução dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial dos Proporcionamentos do Material Compósito	59
Figura 16 – Execução do Ensaio de Resistência à Flexão Por Três Pontos	60
Figura 17 – Execução do Ensaio de Dureza nos Proporcionamentos do Material Compósito.	62
Figura 18 – Execução do Ensaio de EDX	63
Figura 19 – Conferência Dimensional dos Espécimes dos Proporcionamentos do Material Compósito.....	67
Figura 20 – Aferição das Massas dos Espécimes dos Proporcionamentos P0V0 e P1V5 do Material Compósito	68
Figura 21 – Gráfico da Composição Química do Gesso	87
Figura 22 – Gráfico da Composição Química do Vidro.....	89
Figura 23 – Gráfico da Composição Química do Policarbonato.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio de Caracterização e Metodologia (continua).....	42
Tabela 1 – Ensaio de Caracterização e Metodologia (conclusão)	43
Tabela 2 - Consumo de Materiais vs Proporcionamentos	49
Tabela 3 - Relação Número de Peças Produzidas vs Dimensões das Peças vs Proporções vs Ensaio Realizados	50
Tabela 4 – Proporcionamentos para Produção das Peças do Compósito	50
Tabela 5 – Condições de Análises do Ensaio EDX.....	63
Tabela 6 – Análise das Massas das Peças dos Proporcionamentos do Material Compósito e Referência.....	69
Tabela 7 – Ensaio de Densidade no Estado Seco	70
Tabela 8 – Imagens dos Espécimes em Corte Transversal (continua)	73
Tabela 8 – Imagens dos Espécimes em Corte Transversal (continuação).....	74
Tabela 8 – Imagens dos Espécimes em Corte Transversal (conclusão).....	75
Tabela 9 – Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	76
Tabela 10 – Análise Estatística dos Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	77
Tabela 11 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial.....	80
Tabela 12 – Resultados do Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos	82
Tabela 13 – Resultados do Ensaio de Dureza.....	84
Tabela 14 – Análise do Gesso Através do EDX.....	87
Tabela 15 – Análise do Vidro Através do EDX	88
Tabela 16 – Análise do Policarbonato Através do EDX	90
Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento (continua)	102
Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento (continuação)	103
Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento (continuação)	104
Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento (conclusão) ...	105
Tabela 18 – Resultados Individuais do Ensaio de Densidade no Estado Seco.....	106
Tabela 19 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Densidade no Estado Seco.....	107
Tabela 20 – Resultados Individuais do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	108
Tabela 21 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	109

Tabela 22 – Resultados Individuais do Ensaio de Resistência à Compressão Axial.....	110
Tabela 23 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial.....	111
Tabela 24 – Resultados Individuais do Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos	112
Tabela 25 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos	113
Tabela 26 – Resultados Individuais do Ensaio de Dureza.....	114
Tabela 27 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Dureza.....	115

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica do Vidro Cominuído.....	65
Gráfico 2 – Curva Granulométrica das Aparas de Policarbonato.....	66
Gráfico 3 – Densidade no Estado Seco	71
Gráfico 4 – Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade: Massa (g) vs Tempo Submerso (min)	78
Gráfico 5 – Análise dos Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial	81
Gráfico 6 – Análise dos Resultados do Ensaio de Resistência à Flexão	83
Gráfico 7 – Análise dos Resultados do Ensaio de Dureza.....	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA	19
3	OBJETIVOS	21
3.1	OBJETIVO GERAL	21
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4	REVISÃO DA LITERATURA	22
4.1	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	22
4.2	GESSO.....	22
4.3	RESÍDUOS SÓLIDOS	25
4.3.1	Resíduos de Vidro	27
4.3.2	Resíduos Termoplásticos	30
4.4	MATERIAIS COMPÓSITOS	33
4.4.1	Emprego de Resíduos em Materiais Compósitos Cerâmicos.....	34
4.4.2	Desenvolvimento de Placas de Gesso para Revestimento e Acabamento para Construção Civil com Resíduos	36
5	METODOLOGIA.....	39
5.1	METODOLOGIA DA PESQUISA	39
5.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	39
5.3	MÉTODOS DE COLETA E BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS.....	41
5.3.1	Caracterização dos Materiais Constituintes da Mistura	41
5.3.1.1	Gesso.....	43
5.3.1.2	Resíduo de Vidro Cominuído e Resíduo de Policarbonato	45
5.3.2	Proporções das Misturas para a Produção do Compósito Cerâmico Reforçado com Resíduos.....	48
5.3.3	Ensaio Físicos	54
5.3.3.1	Ensaio de Densidade no Estado Seco	54
5.3.3.2	Ensaio de Análise Microestrutural (MO).....	56
5.3.3.3	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade	57
5.3.4	Ensaio Mecânicos	58
5.3.4.1	Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão Axial	58
5.3.4.2	Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão por Três Pontos.....	59
5.3.4.3	Ensaio de Dureza	60
5.3.5	Ensaio Químico	62
5.3.5.1	Ensaio de Composição Química (EDX)	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65

6.1	PREPARO DOS MATERIAIS E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	65
6.2	ENSAIOS FÍSICOS.....	68
6.2.1	Ensaio de Densidade no Estado Seco.....	70
6.2.2	Ensaio de Análise Microestrutural (MO).....	72
6.2.3	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....	76
6.3	ENSAIOS MECÂNICOS.....	79
6.3.1	Ensaio de Resistência à Compressão Axial.....	79
6.3.2	Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos.....	82
6.3.3	Ensaio de Dureza.....	84
6.4	ENSAIO QUÍMICO.....	86
6.4.1	Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio X (EDX).....	86
7	CONCLUSÃO.....	92
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	95
	APÊNDICES.....	101
	APÊNDICE A – ANÁLISE DAS MASSAS DOS CORPOS DE PROVA DOS PROPORCIONAMENTOS.....	102
	APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO SECO.....	106
	APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO SECO.....	107
	APÊNDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	108
	APÊNDICE E – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	109
	APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	110
	APÊNDICE G – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	111
	APÊNDICE H – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO POR TRÊS PONTOS.....	112
	APÊNDICE I – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR TRÊS PONTOS.....	113
	APÊNDICE J – RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA.....	114
	APÊNDICE K – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA.....	115

1 INTRODUÇÃO

Estudos sobre as questões ambientais ganham um destaque cada vez maior na sociedade atual, em que, as decisões tomadas hoje pelo homem podem impactar diretamente no futuro da humanidade. Portanto, a busca por soluções aos problemas ambientais no setor da Construção Civil – um dos setores que mais impactam o meio ambiente – como a utilização de materiais mais sustentáveis, a reciclagem e logística reversa de resíduos industriais, tornaram-se indispensáveis.

A indústria da Construção Civil demorou para começar a discutir e enfrentar os problemas da sustentabilidade, apesar de, segundo Agopyan *et al.* (2016), ser a indústria que mais consome recursos naturais e gera resíduos. Como impactos ambientais gerados pelo Setor, podem-se citar a poluição do ar, dos solos, da água, da camada de ozônio, destruição de biomas e grande consumo de energia. Em contrapartida, o Setor também pode se adequar para a reciclagem de resíduos industriais e transformá-los em materiais de construção, impactando positivamente na redução da toxicidade e impacto ambiental, além de conferir e otimizar as propriedades dos novos compósitos gerados com o emprego dos resíduos.

Resíduo sólido, segundo a Lei número 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pode ser considerado todo e qualquer material ou substância resultante de atividade humana e que, quando descartado, sua natureza o impeça de ser destinado diretamente para a rede pública de esgotos ou em corpos d'água, seja no estado sólido, semissólido, gasoso ou líquido particulado.

Em seus princípios e objetivos, a PNRS assinala a busca pelo desenvolvimento sustentável, ecoeficiência, reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, com potencial gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania, incentivo à reciclagem e gestão integrada dos resíduos sólidos.

Devido grandes montantes de resíduos serem gerados pelas atividades humanas oriundas majoritariamente do setor industrial, agrícola, construção civil e domésticos, a preocupação ambiental relacionada ao tema, em razão do crescente consumo de recursos naturais e à emissão de gás carbônico consequente destes, tem corroborado para um número cada vez maior de pesquisas com enfoque na gestão, redução, reutilização, reciclagem e aplicação de resíduos sólidos em materiais compósitos, sejam estes provenientes da construção civil, agrícola, mineração e indústria, principalmente para aplicação no setor da Construção Civil, além da criação de políticas de análise e gerenciamento de resíduos sólidos.

O montante de resíduos gerados no Brasil, por dia, no ano de 2020, grande parte devido à pandemia global de COVID-19, de acordo com dados da ABRELPE (2021), foi de 225.965,21 toneladas e, desses, cerca de 319 mil toneladas foram coletadas no ano, sendo em sua maioria papel, plástico e vidro. Tendo em vista o crescente interesse na incorporação de resíduos ou subprodutos industriais em matrizes de compósitos cerâmicos e poliméricos, preocupa-se, além do desenvolvimento de produtos com melhores propriedades para emprego no mercado, em evitar ou minimizar a liberação de contaminantes do resíduo bruto para o meio ambiente através da sua deposição em aterros sanitários, áreas de bota-fora ou lixões a céu aberto.

Segundo Agopyan *et al.* (2016), estima-se que metade dos materiais extraídos da natureza e processados, venham a se tornar resíduos, gerando escassez de matéria prima e impactos ambientais e sociais associados à sua cadeia produtiva. A magnitude do impacto gerado por cada insumo é dependente de condições como os detalhes do processo produtivo, natureza do combustível utilizado, distâncias e modalidade do transporte do material, condições de exposição do produto quanto ao seu uso e manutenção durante sua vida útil.

Vidro, segundo Callister (2012) é um grupo familiar das cerâmicas, sendo composto por silicatos não cristalinos que contém outros óxidos, como CaO, Na₂O, K₂O e Al₂O₃, que influenciam diretamente em suas propriedades.

O gesso, matriz empregada para a fabricação do compósito, é um insumo com largo emprego na Construção Civil e oriundo da calcinação do minério natural gipso, de sulfato de cálcio hidratado residual, constituído de sulfatos de cálcio hemidrato, anidritas solúvel e insolúvel, e a gipsita derivada da matéria prima. O material é proveniente predominantemente da calcinação de óxido de anidrido sulfúrico e óxido de cálcio, podendo conter percentuais de cerca de 79% a 100% desses óxidos e proporção dessas diferentes fases controlada por condições de processamento que visa determinar as propriedades do gesso no estado fresco e endurecido, incluindo tempo de pega e resistência mecânica de acordo com a aplicação do insumo (revestimento de paredes e tetos, revestimento para decoração de interiores, peças de artesanato, forros de placas, matéria prima para painéis termoacústicos, fechamento com blocos leves e uso na agricultura).

Polímero, por definição, é um material orgânico ou inorgânico de alta massa molar e cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades, ou seja, uma macromolécula formada pela união de monômeros (pequenas moléculas simples) através de ligações covalentes (CANEVAROLO JR., 2006; YOUNG e LOVELL, 2011).

Os termoplásticos, material polimérico, para Canevarolo Jr. (2006), Callister (2012) e Biron (2020), são materiais que garantem alta resistência, resistência ao encolhimento e fácil dobrabilidade, que de acordo com a resina aplicada, podem ser aplicados para produção de insumos de baixa tensão, como as sacolas plásticas ou para insumos de alta tensão, como as peças mecânicas. Materiais termoplásticos como o policarbonato, PEAD, PEBD, PP, PET e PVC, podem ser transformados, moldados e reciclados através de injeção, extrusão, usinagem, entre outros.

Callister (2012) considera como compósitos todo e qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, obtendo, portanto, uma melhor combinação de propriedades, como por exemplo, no comportamento reológico no estado plástico ou mecânico no estado endurecido.

Por essas razões, e somando-se o fato do grande montante de resíduos sólidos urbanos passíveis de aproveitamento, menor consumo energético para transformação desses em novos materiais compósitos sustentáveis e alta durabilidade, autores como John (2000), Wassermann (2006), Moura (2011), Vieira (2014), Pennafort Junior (2015), Ferreira (2017), Zhu *et al.* (2017), Poulidakos *et al.* (2017), Ragaert *et al.* (2017), Heriyanto *et al.* (2018), Pedreño-Rojas *et al.* (2019), Ramos (2020), Wu e Montalvo (2020), Batista (2021), Singh *et al.* (2021), Zulkernain *et al.* (2021) e Zhao *et al.* (2021) investigaram o desempenho e ciclo de vida de materiais compósitos com aplicação de resíduos de vidro sodocálcico, gesso e policarbonato para suprir nichos do mercado e demandas do setor da Construção Civil.

Dentro deste contexto, este trabalho procura fazer uma contribuição na área de gestão e tratamento de resíduos sólidos urbanos classe B (polímero policarbonato e vidro sodocálcico verde) por meio do desenvolvimento de um novo material compósito com o gesso como matriz para aplicação no setor da Construção Civil. O policarbonato utilizado na pesquisa foi oriundo do processo de aparas na produção de armações e lentes para óculos em indústria presente em Palmas e o vidro sodocálcico verde é proveniente do descarte de garrafas de bebida alcoólica (cerveja), sendo dois materiais com passivo para reciclagem e emprego em compósitos.

2 JUSTIFICATIVA

O setor da construção civil é um dos setores que mais impactam o meio ambiente e, a aplicação de resíduos de diferentes origens para gerar um material compósito com a finalidade de substituir as placas e blocos de gesso de revestimento e acabamento, contribuem com a tecnologia dos materiais de construção, tornando os materiais mais sustentáveis e com maior durabilidade, favorecem pequenas comunidades e cooperativas de gestão e reciclagem de resíduos sólidos, destinam corretamente e valorizam resíduos industriais, e também o desenvolvimento e economia sustentáveis, além de minimizar os impactos ambientais gerados por este ramo.

Observa-se atualmente um crescente esforço de desenvolvimento de novas tecnologias para aplicações em materiais existentes, como formas de melhoria, tornando-os compósitos. Esses avanços podem ser no tocante ao reforço estrutural, redução do índice de vazios, redução da permeabilidade, redução da densidade e massa específica, maior resistência mecânica e durabilidade, além da otimização de processos com a finalidade de redução de consumo energético para produção dos materiais compósitos.

A reciclagem e o reemprego de resíduos reduz a deposição dos mesmos em aterros sanitários, abrandando o emprego de recursos naturais para produção de materiais compósitos. Ressaltando, assim, o impacto da cadeia de logística reversa na geração de renda e redução do impacto ambiental e social (AGOPYAN *et al.*, 2016).

Apesar do vidro ser passível para reciclagem com 100% de reaproveitamento, no Brasil, segundo dados da ABRELPE (2019) e Silva (2017), 10% do volume de resíduos sólidos coletados em 2018 são vidros, principalmente o vidro típico sodocálcico, correspondendo a 6.738 toneladas, e aproximadamente, apenas 47% do volume coletado passa pelo processo de reciclagem. ABRELPE (2019) e IPEA (2017) indicam que cerca de 16,9% ou 11.308 toneladas dos resíduos descartados no Brasil e coletadas por cooperativas e associações de catadores no ano de 2018 são plásticos e passíveis de reciclagem.

Em Palmas-TO, de janeiro a abril de 2022, segundo dados da Fundação Municipal de Meio Ambiente, foram coletados mais de 113 mil quilos de resíduos sólidos para reciclagem, sendo papéis, plásticos, metal e vidro. Ainda em Palmas-TO, no ano de 2021, por meio do projeto Renova Palmas, 28.863 quilos de resíduos sólidos deixaram de ser depositados no aterro sanitário do Município. Em 2021 foi gerado um montante de 10.748 quilos de resíduos de policarbonato pela indústria KENERSON - *Go Eyewear*, e considera-se como um elevado quantitativo de resíduo. Demonstrando, portanto, a viabilidade de uma destinação

ambientalmente responsável e economicamente viável para esse material, transformando o mesmo, juntamente com o vidro e gesso, em um compósito para aplicação na indústria da construção civil.

O emprego de termoplásticos de policarbonato juntamente com resíduos de vidro cominuído como reforço em matriz de gesso para produção de materiais compósitos busca prover uma destinação mais nobre e ambientalmente responsável a esses resíduos. Objetiva-se, portanto, gerar um produto de baixo impacto ambiental, economicamente viável, com valor social, baixo consumo energético e redução do consumo de gesso, contendo propriedades mecânicas, químicas e físicas que possibilitem sua plena substituição às placas de gesso convencionais de revestimento e acabamento, possuindo acréscimo de resistência mecânica e maior leveza à estrutura quando comparado ao convencional.

A produção de gesso no Brasil, de acordo com o levantamento Prodlis 2016 e Prodlis 2019 realizado pelo IBGE (2020), foi de 3.965.478 toneladas e dessas, 3.771.601 foram vendidas. Em Palmas-TO, em levantamento realizado acerca do consumo médio mensal de gesso pelo setor da Construção Civil em janeiro de 2023, por lojas de materiais de construção e distribuidoras de gesso, o montante foi de 55 toneladas e refere-se ao emprego do material como argamassa de revestimento de paredes de áreas não molhadas em edificações residenciais, comerciais e mistas, como artefatos, blocos e placas para forros e divisórias de ambientes.

O emprego de resíduos com aglomerante aéreo (gesso) para desenvolvimento de um material compósito justifica-se devido a busca por um material atóxico, não combustível, que possibilite moldagem e conformação se adequando às necessidades de projeto, conforto térmico elevado, menor peso específico quando comparado a peças cimentícias e que gerem menor emissão de gás carbônico no seu processo produtivo.

Devido ao menor peso específico, as peças tornam-se mais leves, gerando maior facilidade e agilidade no processo de utilização das peças na construção civil para a mão de obra, maior ergonomia, maior facilidade de criação de ambientes modulares e móveis, podendo ser facilmente adequados para novas necessidades, além de redução da carga aplicada na estrutura da edificação, o que tornaria a estrutura mais leve e reduziria o consumo de cimento e aço em pilares e fundações, por exemplo, reduzindo assim o custo de execução do imóvel.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa objetiva-se a desenvolver e caracterizar um material compósito inovador constituído de uma matriz de gesso e reforçado com resíduos de policarbonato e vidros descartados. A proposta destina-se à substituição de materiais utilizados no setor da Construção Civil.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar os resíduos de policarbonato e vidros descartados quanto à sua composição química, densidade e granulometria;
- b) Projetar as proporções do material compósito reforçado com resíduos e produzi-los em formato e condições de cura e temperatura selecionada;
- c) Avaliar e caracterizar o comportamento dos materiais compósitos no tocante à trabalhabilidade no estado fresco, densidade no estado seco, resistência mecânica à compressão e à flexão, caracterização física e durabilidade quanto à absorção de água no estado endurecido.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da Construção Civil, um dos maiores poluidores devido o consumo de recursos naturais para a produção de insumos para obras, mudanças no solo, água, ar e vegetação e também o consumo energético, também é uma das áreas com maior passivo para empregar materiais sustentáveis e produzir, portanto, compósitos verdes. A exemplo, gesso, materiais cerâmicos, concretos e argamassas com resíduos de policarbonato, resíduo de vidro cominuído, RCD, fibras vegetais, cinzas oriundas da agroindústria, pozolanas, resíduos sólidos de ETA, de ETE e da indústria, bem como, lama dos processos de fabricação de papel, vidro e de rochas ornamentais) (ISAIA, 2017; JOHN, 2017; AGOPYAN *et al.*, 2016).

Devido ao grande volume de resíduos sólidos gerado pela população seja devido ao consumo doméstico ou rejeito de atividades industriais, e às dificuldades enfrentadas para destinação final, esses se tornaram uma preocupação mundial. O tratamento ou deposição incorretos possibilita, ainda, a geração de custos adicionais, além de problemas ambientais, quando depositados em lixões ou aterros sanitários, ocasionando degradação do solo, contaminação do lençol freático, dos mananciais e inclusive do ar e também encurtamento da vida útil de aterros. A não separação dos resíduos ou contaminação cruzada é outro fator que impacta na elevação dos custos para tratamento e processo de reciclagem ou reutilização dos resíduos em processos industriais, bem como a concepção de novos materiais (AGOPYAN *et al.*, 2016).

O emprego e valorização dos processos de reciclagem minimizam a exploração de recursos naturais, reduz a poluição do solo, ar e água, mitiga as emissões de gases do efeito estufa, reduz os custos de produção dos novos insumos e possibilita a geração de emprego e renda. Além de dar uma destinação mais nobre e ambientalmente responsável para a diversa gama de resíduos passíveis de reemprego e reciclagem, além de possibilitarem a extensão da vida útil de aterros sanitários e lixões a céu aberto (JOHN e GLEIZE, 2017; BRASIL, 2010; ALVAREZ, 2010; AGOPYAN *et al.*, 2016).

4.2 GESSO

Gesso é compreendido como um material cerâmico, sendo o aglomerante inorgânico mais antigo e utilizado na Construção Civil. É constituído por sulfato de cálcio diidratado

($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidros solúveis e insolúveis, obtido através da calcinação da gipsita natural (minério natural gipso), contendo teores de 79% a 100% de óxido de anidrido sulfúrico e óxido de cálcio, calcinação essa em uma faixa de temperatura de 140°C a 160°C, para que 75 % da água de cristalização seja retirada da estrutura para obter o produto final, controlando-se os teores de impureza (pirita e anidrita). O gesso em pó possui como uma de suas principais características, o endurecimento rápido quando em contato com a água, plasticidade da pasta fresca, lisura da superfície endurecida e aplicação em sistemas de proteção ao fogo em estruturas metálicas (BAUER, 2008; JOHN e CINCOTTO, 2017; FERREIRA, 2017).

O gesso é um aglomerante aéreo, ou seja, depois de endurecido, não resiste à ação da água e, apresenta amplo uso no setor da construção civil devido suas propriedades físicas e mecânicas, além de baixo custo energético de produção. Porém, sua extração pode causar riscos à saúde humana quando não realizada com os devidos equipamentos de proteção individual, devido a exposição à poeira do gesso, ou seja, à sílica e silicose. Essa exposição pode ocasionar casos de reações alérgicas, reações de irritação nos brônquios e traqueia, sangramentos nasais e doenças pulmonares crônicas, como a fibrose pulmonar. Além dos riscos à saúde humana, a extração irregular da gipsita pode ocasionar poluição do solo, das águas e do ar (MEDEIROS, 2010; FERREIRA, 2017).

Para Ferreira (2017), o gesso brasileiro é produzido quase em sua totalidade no Polo Gesseiro do Araripe, no Estado de Pernambuco, em uma bacia sedimentar com área aproximada de 8 mil quilômetros quadrados, próximo à divisa com os Estados do Ceará e Piauí. A gipsita que origina o produto gesso é extraída e beneficiada por meio de lavra comumente a céu aberto, empregando métodos e equipamentos convencionais.

As principais propriedades que permitem a ampliação do emprego do gesso na Construção Civil são: atóxico, não combustível permitindo aplicação em sistemas de proteção contra incêndios, absorção hidrotérmica e liberação de ar úmido, moldagem e conformação, fácil uso e instalação e, produtos e sistemas de baixo custo e de fácil aplicação. Comercialmente, o gesso é vendido de acordo com o seu emprego, podendo ser para fins médicos, uso na agricultura, gesso de fundição e artesanato, gesso de revestimento, gesso cola ou ainda de pega rápida, lenta ou com aditivos. Possuindo, assim, propriedades no estado fresco e endurecido, incluindo tempo de pega e resistência mecânica à compressão axial, dureza e de aderência à tração, de acordo com o seu emprego (FERREIRA, 2017).

John e Cincotto (2017) indicaram a densidade do gesso como sendo de 2,31 g/cm³, resistência à compressão devendo ser acima de 8,4 MPa, dureza acima de 30 MPa e massa

unitária acima de 700 kg/m³. O gesso brasileiro possui matérias primas muito puras, apresentando um teor de impurezas referentes ao resíduo insolúvel (RI), anidrido silícico (SiO₂), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de alumínio (Al₂O₃), inferior a 2,0%. Podendo, ainda, o produto final conter traços de minerais calcita ou dolomita, além conter de elevada finura aparente de 0,70 a 1,0 e densidade absoluta de cerca de 2,7. Quanto ao montante de resíduo de gesso gerado, o volume pode chegar a 30% do total empregado em edificações (JOHN e CINCOTTO, 2017; BAUER, 2008).

O Brasil, segundo dados do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2021) e (BRASIL, 2022), é o maior produtor da América do Sul e o 13º maior produtor mundial de gesso, representando cerca de 2% da produção (3,2 milhões de toneladas do insumo). O gesso é extraído de jazidas de gipsita presentes nos estados de Pernambuco (com mais de 80% da produção nacional), Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte, Amazonas e Pará.

O consumo aparente de gipsita pelo mercado brasileiro no ano de 2017 (último levantamento realizado) foi de aproximadamente 2,3 megatoneladas. Estima-se que cerca de 96% do gesso natural obtido através da calcinação da gipsita produzido no Brasil seja destinado para utilização na construção civil, como gesso de fundição e gesso de revestimento e, apenas um percentual pequeno do gesso é utilizado como corretivo agrícola em lavouras no Brasil. Acerca dos principais usos comerciais do gesso no Brasil pela Indústria da Construção Civil, 61% referem-se às peças de gesso pré-moldado, 35% para revestimento, 3% para moldes e 1% para outras atividades. No entanto, o consumo per capita anual de gesso no Brasil é de apenas aproximadamente 11 kg (BRASIL, 2018 e BARBOSA *et al.*, 2014).

O gesso permite, ainda, o emprego de diferentes tipos de resíduos como termoplásticos e fibras para criar novos compostos leves de gesso. De acordo com a pesquisa desenvolvida por Pedreño-Rojas *et al.* (2019), o emprego de resíduos de policarbonato em matriz de gesso possibilitou a criação de um material compósito cerâmico com redução da densidade do novo material, redução do índice de absorção de água, leve incremento na resistência mecânica à compressão axial, dureza e flexão, além da redução de impactos ambientais devido uma destinação mais nobre e ambientalmente responsável aos resíduos de policarbonato provenientes de eletrônicos (CDs e DVDs).

4.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), transformou a problemática dos resíduos sólidos no Brasil. Indicando a seguinte ordem de prioridade para gestão desses resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, como última alternativa, disposição final ambientalmente adequada. Acerca da atuação de cooperativas e associações de catadores de materiais recicláveis, a PNRS incentiva a criação e desenvolvimento dessas, além de definir que as participações desses nos sistemas de coleta seletiva e de logística reversa – na coleta, transporte, triagem, pré-beneficiamento e destinação final adequada para os materiais, principalmente à reciclagem – deverão ser priorizadas.

Resíduos Sólidos, segundo definição presente na Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), é todo e qualquer material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, em que a destinação final se dará nos estados sólido e semissólido, bem como dos gases contidos em reservatórios e dos líquidos com propriedades e/ou características impeditivas para lançamento em sistema de tratamento de efluentes ou em corpos hídricos, ou que necessitam de artifícios técnicos e economicamente inviáveis perante a melhor tecnologia disponível para sua devida destinação final. Para essa última, deve-se considerar alguns fatores, como o ciclo de vida do resíduo, sua periculosidade e toxicidade, disponibilidade da matéria prima constitutiva do material no meio ambiente, energia necessária, método e disponibilidade para tratamento do resíduo e destinação final correta, além da possibilidade de reutilização, reciclagem e emprego do restolho na cadeia produtiva de outro material.

Os resíduos da construção civil são provenientes de atividades de construção, reforma ou demolição e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos e podem ser classificados de forma tipológica de acordo com a Resolução nº 307 do CONAMA (2002) em:

- Classe A: São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

- Classe B: São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- Classe C: São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- Classe D: São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Acerca das legislações ambientais em Tocantins, a Lei número 261/1991 (TOCANTINS, 1991), dispõe sobre a política ambiental de Estado do Tocantins, sua elaboração, implementação e acompanhamento, instituindo princípios, fixando objetivos e normas básicas para proteção do meio ambiente e melhorias da qualidade de vida da população.

A Lei número 3614/2019 que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos - PERS (TOCANTINS, 2019), define entre outros fatores acerca da política de resíduos sólidos e responsabilidade compartilhada, que os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores entre outros bem como os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos são responsáveis pelo ciclo de vida dos produtos. Portanto, observa-se a existência de políticas públicas para gerenciamento e gestão de resíduos sólidos urbanos a nível nacional e estadual.

A nível nacional, de acordo com levantamento realizado pela ABRELPE (2020), de 2010 a 2019, a geração total de resíduos sólidos urbanos (RSU) aumentou cerca de 19% no país, com um crescimento de 9% no índice de geração per capita.

Estima-se que apenas cerca de 60% dos RSU sejam destinados devidamente para aterros sanitários no Brasil. Dados levantados pela ABRELPE (2020) ainda indicam que na última década houve um acréscimo de 19% na geração de RSU e de 30% na disposição inadequada de RSU no Brasil, sendo responsáveis pelo impacto direto na saúde de 77,65 milhões de brasileiros e tendo um custo ambiental e para tratamento de saúde de cerca de um bilhão de dólares por ano.

Apenas em 2020 foram geradas 79,6 milhões de toneladas de RSU no Brasil, segundo dados coletados pela ABRELPE (2020). Desses, 45,3% correspondem a matéria orgânica 5,6% a têxteis, couros e borracha, 2,3% a metais, 2,7% vidro, 16,8% plástico, 10,4% papel e papelão, 1,4% embalagens multicamadas, 14,1% rejeitos e 1,4% outros (RSS, eletroeletrônicos, pilhas e

baterias, resíduos perigosos, RCD, pneus, óleos e graxas, embalagens de agrotóxico e outros resíduos perigosos).

4.3.1 Resíduos de Vidro

Vidro, por definição, de acordo com Callister (2012), é um composto amorfo, fisicamente homogêneo, obtido através do resfriamento de uma massa inorgânica em fusão, que se solidifica sem cristalizar através de um aumento contínuo de viscosidade e pertencem ao grupo familiar dos materiais cerâmicos. São compostos por silicatos não cristalinos e apresentam o fenômeno de transição vítrea, ou seja, o efeito em que, na propriedade do material pode-se obter a temperatura da passagem do estado vítreo para um estado elástico sem ocorrência de uma mudança estrutural. Os vidros podem, ainda, conter outros óxidos em sua composição, bem como o Óxido de Cálcio (CaO), Dióxido de Sódio (Na₂O), Óxido de Potássio (K₂O) e Óxido de Alumínio (Al₂O₃), os quais influenciam diretamente nas suas propriedades físico-químicas e térmicas. O vidro possui densidade de 2,5 g/cm³, resistência mecânica da ordem de 0,01 a 0,1 GPa e a cor verde do vidro sodocálcico utilizado em embalagens de bebidas alcoólicas, bem como a cerveja, é oriundo da adição de óxidos de ferro na composição do material.

Para Carter e Norton (2007) e Callister (2012), um vidro sodocálcico convencional é composto, aproximadamente, por 70% de SiO₂ e aproximadamente 30% por Na₂O e CaO. Vidros sodocálcico possuem elevada transparência óptica, relativa facilidade em seu processo produtivo e passível de reciclagem de até 100% do seu material, haja vista que é produzido pelo aquecimento das matérias-primas até uma temperatura elevada, acima daquela na qual ocorre a fusão.

Os principais tipos de vidros, de acordo com Callister (2012) são: sílica fundida, 96% de sílica, borossilicato, recipientes (sodocálcico), fibra de vidro, sílex óptico e vitrocerâmica. Os materiais vidro cerâmicos foram projetados para possuir as seguintes características: resistências mecânicas relativamente elevadas; baixos coeficientes de expansão térmica; capacidade de utilização em temperaturas relativamente elevadas; boas propriedades dielétricas; e boa compatibilidade biológica.

Dentre os resíduos gerados pela indústria, bem como indústria de bebidas, indústria da construção civil e produção doméstica, encontra-se o vidro. Material esse totalmente reciclável, porém, para Callister (2012), Bauer (2008) e ANCAT (2019), quando descartado em lugares

inadequados, o material não se incorpora ao meio ambiente, possuindo tempo de decomposição estimado em 1 (um) milhão de anos. Os resíduos de vidro, apesar de ser um material inerte, são passíveis de acarretar problemas ambientais, gerando, por exemplo, focos de queimada, e custos adicionais quando depositados em lixões a céu aberto ou em aterros sanitários ou, ainda, acidentes por parte dos catadores de recicláveis durante manuseio.

O vidro quando reutilizado para a produção de novas embalagens, consome menor quantidade de energia e gera menor emissão de particulados de CO₂ no meio ambiente, contribuindo, assim, para a sua preservação, além de um menor descarte de lixo, reduzindo os custos de coleta urbana, e aumentando a vida útil dos aterros sanitários. Outra possibilidade é o emprego na indústria da Construção Civil, em forma de resíduo de vidro cominuído em blocos cerâmicos estruturais ou para confecção de materiais compósitos para utilização enquanto blocos de vedação sem fins estruturais e em placas de revestimento para habitações (ALVAREZ, 2010; ANCAT, 2019).

Para Carter e Norton (2013), uma dificuldade associada ao uso de vidro reciclado, principalmente da reciclagem do consumidor, é a necessidade de separar as garrafas descartadas de acordo com a cor. O vidro transparente é o vidro que no processo de reciclagem indica melhores resultados, porém o mesmo e o vidro âmbar são muito sensíveis às impurezas, não podendo ser misturados entre si ou com outros tipos de vidro. O vidro verde, no entanto, pode aceitar outros tipos de vidro sem influência perceptível na cor, mas o fornecimento de vidro verde reciclado muitas vezes excede a demanda dos fabricantes para a reciclagem, gerando um montante sem destinação. No tocante à aplicação do vidro reciclado que não seja influenciada pela cor do material é no uso como isolamento de fibra de vidro. Observando-se, que o vidro do recipiente não deve ser misturado com outros tipos de vidro, como vidros de janelas, lâmpadas, espelhos utensílios domésticos, pois suas composições químicas e propriedades térmicas são distintas.

Estima-se que, segundo a ABRELPE (2020), no Brasil cerca de 1,4% dos resíduos sólidos urbanos, coletados por catadores de recicláveis e empresas no ano de 2019, são vidro. Para a ANCAT (2019) e ANCAT (2021), no ano de 2018 foram coletados no Brasil cerca de 6.738 toneladas de vidro, representando 10% em relação ao total coletado, em volume e, em 2020 o volume foi de 12,6 mil toneladas de vidro reciclado. Observando-se, ainda em relação às toneladas de vidro coletado no ano de 2018, 45,8% estavam sob forma de resíduo cominuído, ou seja, em cacos.

Em Palmas-TO, através do projeto Renova Palmas de coleta seletiva em parceria com a empresa ECOVIP Soluções Ambientais Ltda., há a coleta de 8 a 10 toneladas de vidro por mês, sendo colorido (verde, âmbar e transparente) e proveniente de garrafas de bebidas, potes de alimentos e vidros de cosméticos. A maior quantidade de vidro coletado é pertencente ao vidro de cor verde oriundo de garrafas de bebida alcoólica (cerveja) e corresponde a aproximadamente 70% do montante recolhido mensalmente, porém não há separação por cor e a destinação final é o envio para centros de reciclagem no estado de São Paulo. Nos dois anos de funcionamento da ECOVIP em Palmas foi coletado cerca de 150 toneladas de vidro e há possibilidade de coleta de 60 toneladas por mês, havendo mais de 100 pontos de coleta na cidade (bares, restaurantes, shopping center, condomínios residenciais, escolas e nos ecopontos do Renova Palmas).

Heriyanto *et al.* (2018) demonstra a viabilidade da aplicação do resíduo de vidro em materiais compósitos para uso na Construção Civil. Para Busch (2016), ao incorporar resíduos de vidro em materiais cerâmicos, obtém-se um material compósito com melhora nas propriedades físicas e mecânicas, sendo que, o efeito do resíduo na microestrutura sinterizada é de grande importância para o controle das propriedades mecânicas e físicas dos corpos cerâmicos.

Zhu *et al.* (2017) indicam a viabilidade na aplicação de fibra de vidro reciclada, oriunda de placas de circuito impresso de eletrônicos que pode ser utilizada como reforço em matriz de policarbonato reciclado de origem de CDs para a fabricação de compósitos à base de resíduos. Os autores utilizaram resinas na produção do material compósito e analisaram a viabilidade do produto através dos ensaios de FTIR, MEV, avaliação do ciclo de vida, resistência mecânica à tração, flexão e impacto. As amostras foram produzidas com percentuais de fibra de vidro (contendo resinas das placas), em 10%, 20%, 30% e 40% com o policarbonato, sendo misturadas, extrudadas e injetadas com moldes. Como resultado, houve um decréscimo na resistência mecânica do compósito com presença de resina, já a resistência à tração aumentou e ao impacto gerou leve acréscimo. Os compósitos apresentaram melhor desempenho ao aumentar o tamanho das partículas e o teor de fibra de vidro, sendo os melhores resultados para o teor de fibra de vidro de 40% com o tamanho de partícula de 0,15-0,3 mm.

Poulikakos *et al.* (2017) cita que o vidro reciclado de tamanho médio (<9,5 mm) e fino (<4,75 mm) são indicados para aplicação como finos em construção de estradas pois apresentam comportamento geotécnico semelhante aos agregados naturais. Enquanto Shing (2021) indica

a viabilidade no emprego de PET reciclado para criação de compósitos com fibra de vidro, fibras vegetais, fílers e nano materiais, sendo que, compósitos reforçados com fibra de vidro fabricados com matriz de PET reciclado geralmente têm propriedades mecânicas inferiores em comparação aos de PET virgem e, a perda de propriedades devido ao uso da matriz de PET reciclado pode ser superada em grande parte pelo emprego da fibra de vidro durante a fabricação do compósito para processamento via extrusão.

Moura (2011), em sua pesquisa, caracterizou mecânica, térmico, termomecânica, termodinâmica-mecânica e morfológica do PET reciclado processado e dos compósitos de PET reciclado com flocos de vidro, desenvolvendo, assim, um material compósito polimérico de PET reciclado com os flocos de vidro na fração em peso de 5%, 10% e 20% processados em uma extrusora rosca simples. Demonstrando resultados frente a resistência à tração indicando que os melhores desempenhos são para o PET reciclado e processado e para proporções maiores de PET reciclado com flocos de vidro, tornando, portanto, viável o emprego conjunto de vidro e termoplásticos no desenvolvimento de novos materiais compósitos.

4.3.2 Resíduos Termoplásticos

Polímeros, segundo Figueiredo e Rêgo (2017) e Callister (2012), são estruturas moleculares que se originam através de ligações covalentes de unidades de moléculas que repetem sim, ou seja, monômeros. Podendo ser naturais ou sintéticos. Alguns dos polímeros naturais são: borracha (látex), polissacarídeos, amido, glicogênio e proteínas. Como exemplo de polímeros artificiais ou sintéticos (subdivididos em polimerização por adição ou polimerização por condensação), tem-se: nitrato de celulose, polietileno, polipropileno, policloreto de vinila, poliestireno, borrachas sintéticas, baquelite, poliamida, quevlar, poliéster, poliuretano e politereftalato de etileno.

A maioria dos polímeros são compostos orgânicos à base de carbono, hidrogênio e outros não-metais, como enxofre e cloro. Plástico, segundo Canevarolo Jr. (2006), é um material polimérico de alta massa molar, sólido como produto acabado, que pode ser subdividido em termoplásticos e termofixos.

Os termoplásticos, para Canevarolo Jr. (2006), Bauer (2008) e Callister (2012), possuem como característica fundamental a capacidade de amolecerem e eventualmente se liquefazerem quando sujeitos a um aumento elevado de temperatura e pressão, quando retirados e resfriando-se, solidificam-se em um produto com formas definidas. Processo esse caracterizado como uma

transformação física reversível e cíclica quando observada dentro do ciclo de vida de um material. Quando o polímero é semicristalino, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. Ou seja, termoplásticos semicristalinos podem ser caracterizados como fusíveis, solúveis, recicláveis, bem como o polietileno (PE), poliestireno (PS) e poliamida (Náilon).

Os polímeros termofixos, de acordo com Canevarolo Jr. (2006), são polímeros em rede e que ao tornarem-se rígidos durante sua formação, não amolecem quando aquecidos e devido presença de ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes, possibilitando que, durante tratamentos térmicos, essas ligações impeçam os movimentos de rotação e vibração das cadeias em temperaturas elevadas, impedindo, portanto, o amolecimento do material quando exposto a temperaturas elevadas.

Para Callister (2012), a resposta de um polímero a aplicação de forças mecânicas em temperaturas elevadas está relacionada à sua estrutura molecular dominante. Em suma, na escala molecular e com o movimento dessas moléculas dos monômeros que compõem um determinado polímero, a classificação desses elementos é realizada frente o comportamento dos mesmos em relação aplicação da tensão e a elevação de temperatura em determinadas taxas.

Plásticos compõem a maior gama dos materiais poliméricos. Segundo Canevarolo Jr. (2006) e Callister (2012), são materiais que possuem determinada rigidez estrutural quando aplicada carga/ tensão sob os mesmos, além de serem passíveis para aplicações de uso geral na indústria, bem como em embalagens para a indústria alimentícia, agrícola, têxtil, além de usos nas indústrias mecânica, química e da construção civil. Esses insumos apresentam uma elevada gama de combinações de propriedades, como por exemplo, alguns plásticos serem muito rígidos e frágeis e, outros flexíveis apresentando deformações elásticas e plásticas quando submetidos a tensão, por vezes apresentando certa tenacidade e deformação nas zonas elástica e plástica até ruptura. De acordo com dados da ABRELPE (2021), no ano de 2020 foram coletadas 25,3 mil toneladas de plástico reciclados.

Para Ragaert (2017), o método mais comum para a reciclagem de resíduos plásticos é a reciclagem mecânica, que inclui coleta, triagem, lavagem e moagem do material. As etapas podem ocorrer seguindo outra ordem ou uma ou mais etapas serem realizadas mais de uma vez, de acordo com a origem e composição do resíduo. Observando, ainda, que no processo de moldagem por injeção, os resíduos do processo pós-industrial devem estar limpos e terem sua composição conhecida, evitando intercorrências durante a execução da moldagem, como entupimento do bico injetor. Sendo, ainda, resíduos pós-industrial, como no caso do presente

estudo, os mesmos não requerem coleta se utilizados dentro da empresa, também não necessitam de triagem pois é monofluxo ou de lavagem pois o material é limpo e não há contaminação cruzada.

O processo de reciclagem de compostos plásticos, para Canevarolo Jr. (2006), pode ser realizado via reciclagem primária (ou mecânica) com resíduos poliméricos industriais, reciclagem secundária (ou mecânica) oriundos de resíduos plásticos pós-consumo, reciclagem terciária (ou química) através de processos de despolimerização (solvólise, métodos térmicos ou catalíticos), ou reciclagem quaternária (ou energética) através da recuperação do conteúdo energético presente no resíduo através da incineração controlada.

Policarbonato, para Young e Lovell (2011), Pedreño-Rojas *et al.* (2019) e Batista (2021), é um polímero amorfo, termoplástico, muito resistente quando comparado a outros polímeros, como o poliestireno e o polimetilmetacrilato de metila (PMMA ou acrílico), e o escoamento por cisalhamento, bem como a fissuração, geralmente ocorrem na ponta da trinca. O que justifica a sua incorporação como matéria-prima de alto desempenho para o desenvolvimento de novos materiais de construção e aplicação nas indústrias automotiva, aeronáutica e elétrica, além do armazenamento de dados e nas telecomunicações.

Canevarolo Jr. (2006), Vieira (2014) e Batista (2021) indicaram algumas das principais propriedades do policarbonato como a densidade sendo de 1,2 g/cm³, sua elevada cristalinidade e possibilidade de coloração, alto índice de refração, excelente estabilidade dimensional, alta resistência ao choque, alta resistência térmica (podendo ser utilizado até 120 °C, com temperatura de fusão em 267 °C e resistência à chama), porém possui baixa resistência a agentes químicos, baixa resistência à abrasão e possui necessidade de secagem para aplicação como material final. O policarbonato é obtido através da policondensação do fosgênio e do bisfenol-A e seu solvente típico é o cloreto de metileno.

De acordo com Batista (2021) e Veira (2014), a indústria e o comércio de lentes e armações oftálmicas de policarbonato caracterizam-se pela geração de peças e processamento das lentes para encaixe em armações, aparas na fabricação e beneficiamento de armações e na fase de surfacagem (trabalhar a superfície da lente esmerilhando ou lixando para gerar a curva necessária para a dioptria da lente). Gerando, assim, produção de resíduos, desde a fase de injeção, aparas de rebarbas de armações e lentes, surfacagem e também no processo final de montagem das lentes nas armações para venda ao consumidor, em que as mesmas são cortadas de acordo com a medida e forma dos óculos do cliente em óticas.

Lacerda *et al.* (2019) realizaram a avaliação do ciclo de vida (ACV) e estudaram os cenários de impacto ambiental na produção de hastes de óculos de segurança em uma indústria, traçando um comparativo entre o cenário de produção com apenas policarbonato virgem e o cenário em que utilizaram 20% de policarbonato virgem e 80% de policarbonato reciclado da própria empresa. Como resultados encontrados pelos autores na ACV, as reduções de impacto para mudança climática, toxicidade humana, degradação dos recursos hídricos, degradação dos recursos minerais, fósseis e renováveis e no consumo de energia elétrica total foram satisfatórios, gerando, assim, saldos vantajosos para a empresa, financeiro e para o meio ambiente. Indicando, assim, a viabilidade ambiental no processo de reciclagem dos resíduos de policarbonato gerados pela indústria óptica.

Em Palmas/TO, a indústria produtora de lentes e armações de policarbonato, KENERSON - *GO Eyewear*, de acordo com dados da mesma, gerou no ano de 2021, aproximadamente 9.012 quilos de resíduos de aparas para beneficiamento de lentes e armações, cerca de 1 quilo de resíduo é gerado pela injetora, no processo de aquecimento do policarbonato para moldagem e saída pelo bico da injetora e o montante total no ano de 2021 de resíduo de policarbonato gerado em todas as etapas do processo de fabricação das lentes e armações pela fábrica é de 10.748 quilos. Portanto, considera-se como um elevado quantitativo de resíduo de policarbonato passível de aproveitamento e reciclagem, transformando o mesmo, juntamente com outros materiais, em um compósito para aplicação na indústria da construção civil.

4.4 MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são todo e qualquer material multifásico que assume uma proporção significativa das propriedades de ambas as suas fases constituintes, obtendo-se assim, uma melhor combinação e otimização de propriedades sejam térmicas, químicas, físicas ou mecânicas (CALLISTER, 2012; PENNAFORT JUNIOR, 2015).

Seguindo o princípio da ação combinada, em que, para Callister (2012), melhores combinações de propriedades são criadas por uma combinação de dois ou mais componentes distintos. Sendo assim, compósito é um material multifásico produzido artificialmente e as suas fases constituintes devem ser quimicamente diferentes das fases do material que ocorre de forma natural e que serviu de base para a sua concepção, além de possuir fases quimicamente distintas e separadas por *layers* de interface também distintos.

Muitos dos materiais compostos, de acordo com Callister (2012), são constituídos por apenas duas fases, uma denominada matriz sendo contínua, e em volta a outra fase, denominada

fase dispersa. As propriedades dos compostos são função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas, da geometria da fase dispersa, compreendendo essa última a forma, o tamanho, a distribuição e a orientação das partículas que compõem as fases do material.

Para Carter e Norton (2013), nos materiais compósitos com matriz cerâmica, a tenacidade a fratura das cerâmicas é melhorada de forma significativa através do desenvolvimento e aplicação dos CMCs (compósitos com matriz cerâmica). Sendo, ainda, a cerâmica amplamente utilizada também na confecção de materiais compósitos para atuar como reforço na peça. Os compostos podem aplicar a cerâmica como a fase de matriz e/ou a fase de reforço do novo material. O desenvolvimento de um material composto busca a melhor combinação das propriedades de cada um dos componentes tornando, portanto, o composto como um produto superior frente aos materiais que o compõe de forma isolada. Nos CMCs, um dos principais objetivos tem sido aumentar a resistência à fratura da matriz por meio de reforço fibras ou partículas. Os autores citam ainda uma necessidade de solucionar alguns obstáculos para maior difusão e aplicação dos CMCs na indústria em geral, como a redução dos custos de processamento, criação de novas combinações compatíveis de materiais, bem como os coeficientes correspondentes da expansão térmica e uma melhor compreensão das interfaces do material compósito gerado.

Para Rocha e John (2003), a durabilidade é um aspecto fundamental no desempenho do produto, afetando o custo global da solução e o impacto ambiental do sistema. Adicionalmente, no caso de produtos contendo resíduos, as transformações que o produto irá sofrer ao ser exposto às condições ambientais (clima e microclima) e a ações de uso poderão facilitar a liberação de fases contaminantes através da lixiviação, por exemplo.

4.4.1 Emprego de Resíduos em Materiais Compósitos Cerâmicos

Cerâmica, de acordo com Carter e Norton (2013), é um sólido não metálico e inorgânico. Em alguns compostos a cerâmica atua como matriz, sendo chamado o material de compósitos de matriz cerâmica ou CMCs. Em que, um exemplo de um CMC que remonta a mais de 9000 anos é o tijolo, pois consistiam em uma matriz de argila com reforço de palha.

Materiais compósitos são compósitos multifásicos com uma melhor combinação de propriedades envolvendo seus componentes (matriz e reforço) (CALLISTER, 2012). Os materiais compósitos cerâmicos de matriz gesso e reforço misto de cerâmica (vidro) e termoplástico (policarbonato), buscam aperfeiçoar o desempenho de peças de gesso para

aplicação em revestimento e acabamento na Construção Civil frente as propriedades mecânicas devido o emprego de reforços, combinando, assim que as características desejáveis sejam enfatizadas, enquanto as indesejáveis sejam minimizadas.

A escolha do método de fabricação dos compósitos depende de vários fatores, bem como, o custo do processo, escala de produção, dimensão física das estruturas e a reprodução em escala. Além do diâmetro e forma de emprego dos reforços nas matrizes (BATISTA, 2021).

Resíduos podem ser aplicados como reforço em matrizes cerâmicas, polimérica ou metálicos. Compósitos cerâmicos possuem matriz cerâmica, como no caso do gesso, permitem reforço de materiais de diversas naturezas, bem como: vidros, termoplásticos, materiais cimentícios, materiais cerâmicos, papeis e materiais metálicos.

Heriyanto *et al.* (2018) estudaram e detalharam um novo processo econômico para transformar resíduo de vidro misto em vidros com alto potencial de valorização como material de construção, sem voltar à etapa de fusão do vidro. Ou seja, desenvolveram painéis compostos de vidro polimérico semelhantes em aparência e desempenho mecânico a vários produtos de pedra natural disponíveis atualmente no mercado. Criando, portanto, um material compósito de matriz polimérica com reforço de resíduo de vidro. Os autores indicaram através do ensaio de absorção de água que os corpos de prova imersos apresentaram menor absorção que as peças naturais e quando testados sob flexão e compressão não apresentaram diferenças significativas devido a uma desprezível quantidade de água absorvida pelos corpos de prova.

Wu e Montalvo (2020) analisaram de forma abrangente e aprofundada a literatura sobre a viabilidade e o estado da arte do reaproveitamento de resíduos plásticos em materiais de pavimento asfáltico. Avaliando, assim, a dosagem ideal de resíduos plásticos (PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS, ABS, EVA, PC e PU) em aglutinantes asfálticos, com base em parâmetros de desempenho (viscosidade do asfalto e sulcos, rachaduras por fadiga, rachaduras térmicas e resistência à umidade das misturas asfálticas). Como resultado, indicaram que a incorporação de resíduos plásticos em misturas asfálticas apresentou melhorias nos parâmetros de desempenho, como rigidez e resistência à corrosão e fadiga, sendo que, concentrações mais baixas de polímero resultam em subutilização da modificação do polímero, enquanto uma concentração mais alta pode causar a separação da fase do polímero e do asfalto e, do ponto de vista econômico, a aplicação de resíduos termoplásticos na construção de estradas e pavimentação é benéfico frente às melhorias no desempenho da estrutura e redução do volume de resíduos passíveis de reciclagem em aterros sanitários, reduzindo a poluição ambiental.

O emprego de resíduos cerâmicos e poliméricos em conjunto como reforço em materiais compósitos cerâmicos torna-se viável econômica e ambientalmente, além de proporcionar o desenvolvimento de materiais cada vez mais característico de acordo com as propriedades escolhidas e aplicações específicas dentro do setor da Construção Civil.

4.4.2 Desenvolvimento de Placas de Gesso para Revestimento e Acabamento para Construção Civil com Resíduos

O desenvolvimento de novos materiais para emprego na Construção Civil possibilita a aplicação de materiais cada vez mais tecnológicos, sustentáveis, duráveis e com melhores propriedades físicas, químicas, térmicas e de resistência. Bem como, na formulação de materiais compósitos cerâmicos com matriz de gesso com reforço cerâmico (vidro) e polimérico (termoplástico policarbonato), que visam ser empregados em blocos de gesso para divisórias, placas de revestimento e acabamento com fins decorativos e estéticos, possuindo propriedades superiores frente ao material original, gesso, enquanto usado individualmente. No entanto, há um número limitado de estudos com a aplicação de resíduos de vidro e policarbonato em aglomerantes aéreos como o gesso para emprego na construção civil.

Pedreño-Rojas *et al.* (2019) desenvolveram um compósito de gesso como matriz cerâmica e reforço de termoplástico policarbonato de origem de resíduos eletrônicos. Os autores analisaram a influência do resíduo plástico de policarbonato proveniente de CDs e DVDs reciclados nas propriedades mecânicas e ambientais de compósitos com matriz de gesso. Como resultado, indicaram que as partículas de plástico estavam distribuídas de forma bastante homogênea na matriz, enquanto suas orientações eram bastante aleatórias. Em todas as proporções de adições dos resíduos (de 5% a 60% e com partículas de até 10 mm e de até 4mm), o aumento do percentual de resíduo plástico adicionado ao compósito levou a uma diminuição da densidade em relação ao material de referência, as misturas com partículas menores que 4 mm apresentaram melhor comportamento mecânico à compressão e flexão e quanto maior o percentual de resíduo de policarbonato, menor será a resistência mecânica, além do módulo de elasticidade dos novos compósitos ter sido reduzido com o aumento da porcentagem de resíduo adicionado à mistura.

Batista (2021), por sua vez, demonstrou as viabilidades de obtenção, fabricação e aplicação dos compósitos com emprego de resíduo de policarbonato oriundo de pós de lentes e resíduo de bambu em forma de pó. Em que, como resultado promissor no desenvolvimento do material, todos os compósitos apresentaram densidades inferiores à da resina matriz e também

apresentaram índices de energia de absorção de impacto superiores à resina matriz de poliéster, ou seja, aumentou a tenacidade ao impacto dos novos materiais obtidos.

Vieira (2014) estudou da viabilidade da reciclagem de policarbonato proveniente de apreensão, sendo que, o processo de reciclagem foi mecânico e em forma de reprocessamento do policarbonato de apreensão e emprego como substituição de 50% ao policarbonato virgem na produção de novas peças através do processo de injeção em injetora (começando com baixas temperaturas e aumentando durante o processo). Porém, no material reciclado o módulo de Young aumentou (material mais rígido que o policarbonato virgem), sendo considerada como uma desvantagem.

Zhu *et al.* (2017), produziram um compósito contendo resíduos de placas de circuitos impressos (fibras de vidro) e CDs (policarbonato), juntamente com a associação de resinas. Como resultado, os autores indicaram que houve um decréscimo na resistência mecânica do compósito com presença de resina, já a resistência à tração aumentou e a resistência ao impacto gerou leve acréscimo.

Zulkernain *et al.* (2021), realizaram um levantamento acerca do estudo da arte sobre emprego de resíduos plásticos como agregados em materiais de construção cimentícios. Concluindo que o peso unitário e a densidade com o emprego de termoplásticos como agregado em concreto tornam o material mais leve. O uso de plástico reduz a resistência à compressão e à flexão de concretos, argamassas, blocos cerâmicos e blocos de pavimentação e indica baixa resistência adesiva do plástico à pasta de cimento. No entanto, baixos teores de adição de plásticos (até 15%) sugerem resistência à flexão igual ou superior ao concreto convencional. No tocante à resistência ao fogo, houve redução do peso da argamassa preparada com plástico leve após exposição à alta temperatura e, com grandes adições de EPS apresenta baixa estabilidade térmica. Em relação à absorção de água, compósitos com adição de plásticos obtiveram redução no índice quando comparados ao material convencional (sem adição) e em relação ao custo, as adições podem reduzir o custo global do compósito quando comparado à peças cimentícias convencionais.

Wu e Montalvo (2020) avaliaram o emprego de plásticos, como o policarbonato, PET e PEAD, em aglutinantes asfálticos. Como resultado, a incorporação destes resíduos em misturas asfálticas apresentou melhorias nos parâmetros de desempenho, como rigidez e resistência à corrosão e fadiga.

Para Zhao *et al.* (2020), no estudo acerca da aplicação de resíduos sólidos (resíduos da construção civil, cinza pesada e volante e resíduos plásticos de policarbonato, PET, ABS e

PEAD) para confecção de materiais para pavimentos de concreto. Os autores concluíram que o asfalto modificado com resíduo plástico proveniente de eletrônicos (ABS e policarbonato) apresentaram melhor rigidez e comportamento mais elástico do que os aglutinantes virgens em pavimentos.

O emprego de materiais compósitos desenvolvidos a partir de resíduos de policarbonato oriundo do processo de beneficiamento de lentes e óculos em forma de aparas e de garrafas de vidro sodocálcico verde de bebida alcoólica favorece, de acordo com as pesquisas anteriores aqui citadas, a mitigação de impacto ambiental gerado pelas indústrias, além de uma destinação mais nobre e ambientalmente responsável dentro do setor da construção civil e indústria do terceiro setor. Podendo os resíduos de aparas de policarbonato e o vidro cominuído serem aplicados em matrizes cerâmicas, de gesso, para a produção de placas e blocos compósitos e emprego na Construção Civil como um novo material. Além do referido, há a possibilidade de emprego dos resíduos de policarbonato e vidro em asfaltos, novas lentes e armações de policarbonato, agregados para concretos, blocos cerâmicos e em compósitos com matrizes cerâmicas e poliméricas.

5 METODOLOGIA

5.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

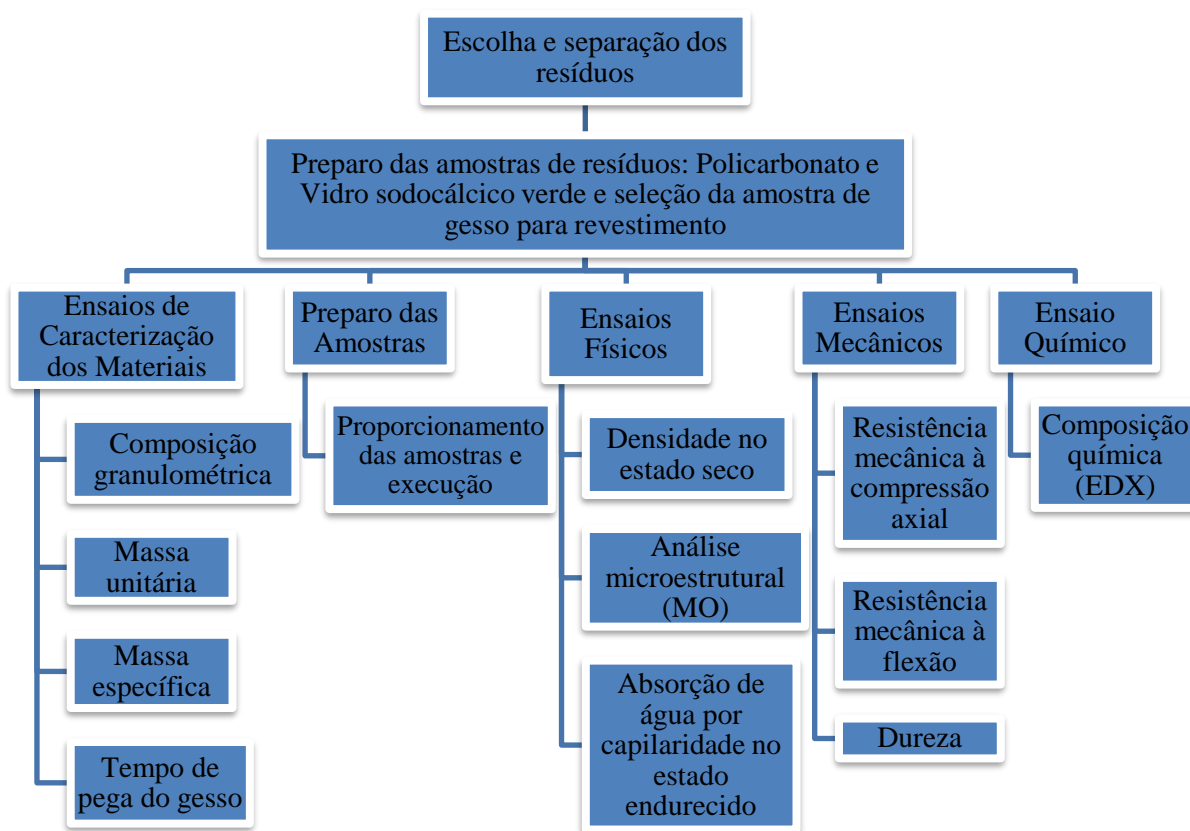
A pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, exploratória, de caráter quali-quantitativa e com procedimento técnico experimental através de pesquisa bibliográfica e estudo de caso. Aplicou-se a revisão sistemática de literatura secundária (RSL) como método para pesquisa do estado da arte acerca do tema.

Em relação aos métodos empregados no programa para definição dos proporcionamentos das misturas de resíduos para produção do material compósito, empregou-se a análise das propriedades dos resíduos e resultados atingidos nas pesquisas de Ferreira (2017), Zhu *et al.* (2017), Pedreño-Rojas *et al.* (2019) e Batista (2021) para obtenção de processos experimentais mais eficientes, econômicos e com menor consumo de matérias-primas, conferindo maior rigor à pesquisa, possibilitando, assim, o emprego de uma quantidade reduzida de experimentos laboratoriais.

5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A metodologia executada nesta pesquisa consistiu essencialmente em três etapas principais: 1) Determinação das propriedades dos resíduos; 2) Produção das amostras; 3) Avaliação das amostras do material compósito em forma de blocos de gesso para aplicação na Construção Civil, no estado fresco e endurecido em ensaios físicos, mecânicos e químico. A Figura 1 ilustra o fluxograma do procedimento experimental.

Figura 1 - Fluxograma do Programa Experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Acerca da metodologia empregada para aplicabilidade de resíduos na confecção de materiais compósitos, seguiu-se os dispostos nas normativas ABNT NBR referentes a gesso, vidro e policarbonato e nas pesquisas dos autores Ferreira (2017), Zhu *et al.* (2017), Pedreño-Rojas *et al.* (2019) e Batista (2021). O programa experimental seguiu as seguintes etapas:

- Coleta dos resíduos de vidro e termoplástico policarbonato (PC), sendo o vidro sodocálcico verde proveniente de garrafas de bebida alcoólica (verde) de descarte de origem familiar e processamento do mesmo em laboratório para utilização e, os resíduos heterogêneos de policarbonato foram provenientes do processo de torneamento de lentes de origem da indústria óptica Kenerson - GO Eyewear situada em Palmas/TO.
- Seleção do gesso em pó para construção civil, de secagem lenta, do tipo para fundição e revestimento, comprado em uma loja de materiais de construção em Palmas-TO, da marca Gesso São Francisco de Grajaú-MA.
- Realização dos ensaios de caracterização das amostras de resíduo de vidro cominuído, policarbonato e gesso.

- Utilização da relação água/ gesso (W/G) seguindo os critérios definidos pelos autores Pedreño-Rojas *et al.* (2019).
- Concepção das proporções do material compósito confeccionados a partir dos resíduos de vidro e de polímero termoplástico (policarbonato) previamente caracterizados, incorporados ao gesso, realizando o planejamento de misturas.
- Produção das misturas em laboratório e realização dos ensaios para avaliação do comportamento dos materiais compósitos no tocante a densidade no estado seco, resistência mecânica à compressão axial, resistência mecânica à flexão por 3 pontos, dureza e durabilidade frente a absorção de água no estado endurecido.
- Avaliação da morfologia do material compósito, buscando identificar a porosidade, microestrutura e identificação de zonas de transição e falhas do material compósito através da visualização da imagem virtual aumentada da imagem real de cada proporcionamento, sendo realizado em microscópio óptico (MO).
- Determinação da composição química do material compósito em todos os seus proporcionamentos quanto às suas composições químicas através do ensaio de espectrometria de fluorescência de Raio-X por energia dispersiva (EDX).

5.3 MÉTODOS DE COLETA E BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS

5.3.1 Caracterização dos Materiais Constituintes da Mistura

Os reforços do material compósito, constituído de resíduos de vidro e de policarbonato, juntamente com o gesso em pó para revestimento e aplicação na construção civil, esse último obtido comercialmente, foram caracterizados em ensaios físico-químicos, visando identificar características importantes dos materiais que possam influenciar na resistência, dureza e durabilidade do produto final.

Pode-se visualizar através da Tabela 1, os ensaios de caracterização e a metodologia que fora aplicada nos mesmos.

Tabela 1 – Ensaios de Caracterização e Metodologia

(continua)

Material	Ensaio de Caracterização	Metodologia Aplicada	
Gesso	Composição granulométrica Massa unitária	ABNT NBR 12127:2019 (Cancelada sem substituição)	Gesso para construção civil — Determinação das propriedades físicas do pó
	Tempo de pega da pasta de gesso	ABNT NBR 12128:2019	Gesso para construção civil — Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso
	Relação água/gesso	Relação proposta por Pedreño-Rojas <i>et al.</i> (2019). Ferreira (2017) indica que a relação A/G usual varia de 0,55 a 0,8.	
	Requisitos gesso	ABNT NBR 13207:2017	Gesso para construção civil - Requisitos
Vidro Sodocálcico de Garrafas Verdes	Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003	Agregados - Determinação da composição granulométrica
	Massa específica	ABNT NBR 7211:2019	Agregados para concreto - Especificação
	Requisitos vidro	ABNT NBR 14910:2002 Versão Corrigida:2003 ABNT NBR 7199:2016	Embalagens de vidro para produtos alimentícios - Requisitos e métodos de ensaio Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações
Termoplástico Policarbonato	Composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003	Agregados - Determinação da composição granulométrica
	Massa específica	ABNT NBR 7211:2019	Agregados para concreto - Especificação
	Requisitos termoplásticos	ABNT NBR 13230:2008	Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - Identificação e simbologia

Tabela 1 – Ensaios de Caracterização e Metodologia

(conclusão)

Material	Ensaio de Caracterização	Metodologia Aplicada
	Composição química - EDX (Espectrometria de Raio-X por Dispersão de Energia) em Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva	ASTM E 1621-21 Guia padrão para análise elementar por espectrometria de fluorescência de raio-X dispersiva de comprimento de onda
Material Compósito	Densidade no estado seco	Ensaio realizado conforme metodologia empregada por Pedreño-Rojas <i>et al.</i> (2019)
	Absorção de água por capilaridade	ABNT NBR 9779:2012 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade
	Dureza Resistência à compressão axial Resistência à flexão	ABNT NBR 12129:2019 Gesso para construção civil - Determinação das propriedades mecânicas

Fonte: elaborado pela autora (2021).

A caracterização dos resíduos de vidro cominuído, do gesso para construção civil e do policarbonato seguiram as normativas usuais e vigentes e instruções para realização dos ensaios nos equipamentos. Como resultado para a mesma, buscou-se obter uma visão sistêmica e analítica da composição de cada resíduo e a influência que os mesmos acarretaram na obtenção dos compósitos em forma de placas para revestimento e acabamento com aplicação na construção civil, oriundas dos resíduos.

5.3.1.1 Gesso

O gesso para revestimento foi inicialmente caracterizado quanto aos tempos de início e fim de pega. Foram ainda coletados os dados do gesso utilizado cedidos pela fabricante, Gesso São Francisco, de Grajaú-MA, quanto às propriedades físicas. Sendo caracterizado como gesso para construção civil de pega lenta, com pH da pasta de 7,0 em 50 g/L a 20°C, temperatura de decomposição acima de 140°C, densidade relativa do produto em pó de 0,70 a 0,82 kg/dm³, solubilidade a 20°C de cerca de 7,5 g de CaSO₄ por 1000g H₂O e a 40°C de cerca de 5,5 g de CaSO₄ por 1000 g H₂O, massa específica de 2,57 g/cm³ e indicação de preparo de 1200g de gesso para cada 1000g de água.

A relação água/ gesso foi definida de acordo com o usual para aplicações em obras de construção civil, variando de 0,55 a 0,8. Para a pesquisa, optou-se pela relação 0,55, conforme Pedreño-Rojas *et al.* (2019) para que houvesse um parâmetro de comparação acerca dos resultados obtidos nesta pesquisa com os resultados do autor que empregou resíduos de policarbonato em matriz gesso.

O ensaio de tempo de pega foi realizado seguindo o que preconiza a NBR 12128 (ABNT, 2019) utilizando um aparelho de Vicat, em que, o início de tempo de pega é dado pelo tempo decorrido a partir do momento que o gesso entrou em contato com a água até aquele em que a agulha do aparelho não penetrar mais no fundo da pasta, ficando a 1 mm acima da base. O fim da pega é caracterizado pelo momento em que a agulha deixa apenas uma leve impressão na superfície da pasta, não penetrando na mesma. Os resultados devem expressar a média de, pelo menos, duas determinações, que não apresentem variação superior a 5 %.

Pode-se visualizar nas imagens presentes na Figura 2, as etapas de realização do ensaio de pega do gesso, caracterizado pela separação e pesagem de uma amostra de gesso e de água de acordo com a relação água/ gesso já definida como 0,55, hidratação do gesso em água destilada por dois minutos, homogeneização em batedeira com 400W de potência, em velocidade lenta por um minuto, seguido de moldagem do cone de ensaio de Vicat com a pasta de gesso, em que, o cone e a placa de vidro foram previamente impermeabilizados com óleo mineral. Foi utilizado o cronômetro para marcar as descidas da agulha do equipamento, aferindo, assim, os pontos de início e fim de pega.

Figura 2 – Ensaio de Pega do Gesso



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O ensaio de tempa de pega do gesso da mistura de referência (P1) foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Católica do Tocantins – UniCatólica.

5.3.1.2 Resíduo de Vidro Cominuído e Resíduo de Policarbonato

As garrafas de vidro sodocálcico verde, de cerveja da marca Heineken e com capacidade de 600 ml, passaram pelos processos de lavagem com água e detergente neutro para retirada de impurezas, secagem em temperatura ambiente por 48 horas, após passaram pelo britador de mandíbulas Modelo I-4198, marca Pavitest, e os cacos foram transferidos para o abrasão Los Angeles com potência de 1100 W e rotação do tambor de 30 a 33 rpm para trituração durante 30 minutos, após essa etapa, o vidro cominuído passou pelo processo de secagem para perca de umidade na estufa em temperatura de 105°C por 24h e esfriamento em ambiente de laboratório, sendo ensacado na sequência, podendo ser visualizado o preparo através da Figura 3.

Figura 3 – Processo de Obtenção do Vidro Cominuído



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O ensaio para determinação da composição granulométrica e do módulo de finura (MF) do resíduo de vidro sodocálcico verde oriundo de garrafas de bebida alcoólica (cerveja) e do termoplástico policarbonato oriundo das aparas do processo de fabricação de óculos, conforme evidenciado na Figura 4, deu-se com o uso de peneiras ABNT com malhas de: 6,3 mm, 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m e fundo, sendo pesadas as massas retidas em cada peneira e o agitador de peneiras circular eletromecânico com controlador de tempo da marca ROTAP.

Foram realizados os ensaios para o resíduo de vidro seguindo o que preconiza a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com duas amostras de 1 kg para o resíduo de vidro e duas amostras de 0,1 kg para o resíduo de policarbonato (Figura 4). Sendo esse um método de análise do material que se objetiva a classificar as partículas de determinada amostra de acordo com suas respectivas dimensões e frações correspondentes a cada faixa granulométrica. Servindo, assim, para avaliar a curva granulométrica, definir o melhor proporcionamento e granulometria dos insumos, controlar a homogeneidade do material entre lotes de produção, além de ser fator fundamental para otimizar o empacotamento dos grãos (ABNT, 2003).

Figura 4 – Ensaio de Composição Granulométrica do Policarbonato (esq.) e do Vidro (dir.)



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Posteriormente, foram realizados os ensaios de caracterização das amostras de resíduo de vidro sodocálcico verde cominuído e as aparas de policarbonato (termoplástico) quanto a massa unitária e massa específica, aferindo-se através do volume com o emprego de um recipiente proveta de plástico (tubo) graduado com capacidade para 500 ml, seguindo a metodologia de ensaio que é empregada para a areia como agregado miúdo. Para o vidro, adicionou-se 200 g de vidro cominuído nas porcentagens de cada granulometria definidas para

o empacotamento dos grãos e realizou-se a leitura. A Equação 1, utilizada para cálculo da massa unitária (Mu), pode ser descrita como:

$$Mu = \frac{m}{V} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

Mu → massa unitária (g/cm³)

m → massa do material (g)

V → volume aferido na proveta (cm³)

Para realização do cálculo da massa específica, após descoberta do volume do vidro na proveta, adicionou-se 100 ml de água e aferiu-se o novo volume. O cálculo da massa específica (Me) pode ser definido através da Equação 2 e Equação 3:

$$V_{\text{vidro}} = V_{\text{total}} - V_{\text{água}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

V_{vidro} → volume do vidro (mL)

V_{total} → volume total (mL)

V_{água} → volume da água (mL)

Após os cálculos da Equação 2, pode-se calcular a massa específica (Me) empregando-se a Equação 3:

$$Me = \frac{m}{V_{\text{vidro}}} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

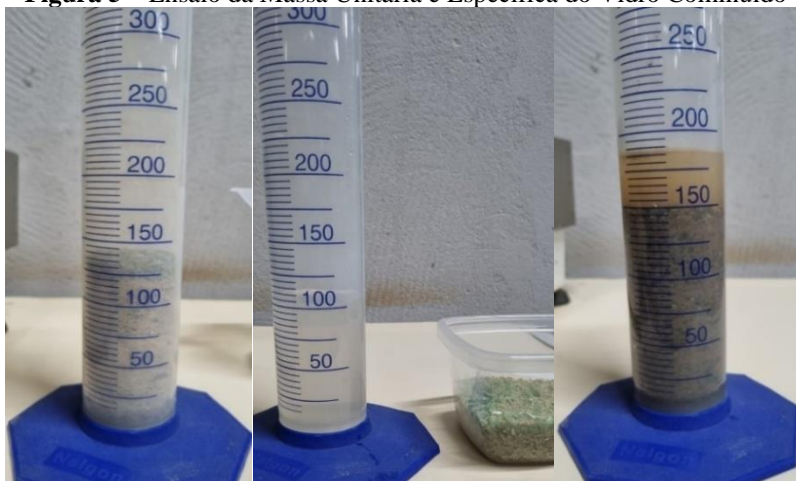
Me → massa específica (g/cm³)

m → massa (g)

V_{vidro} → volume do vidro (cm³)

Possibilitando, assim, a obtenção dos dados de massa unitária e massa específica. Pode-se visualizar a realização do ensaio através da Figura 5.

Figura 5 – Ensaio da Massa Unitária e Específica do Vidro Cominuído



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para o policarbonato a metodologia empregada para o vidro, manteve-se, porém utilizou-se 20 g de policarbonato e 300 ml de água na determinação das massas unitária e específica do resíduo, conforme Figura 6.

Figura 6 – Ensaio da Massa Unitária e Específica das Aparas de Policarbonato



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O processamento do vidro e os ensaios de caracterização do vidro e do policarbonato quanto às composições granulométricas, massas específicas e massas unitárias foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Católica do Tocantins – UniCatólica, possibilitando o estudo das principais propriedades do material e a influência dessas na consistência das misturas e na resistência mecânica das peças do material compósito.

5.3.2 Proporções das Misturas para a Produção do Compósito Cerâmico Reforçado com Resíduos

Uma vez realizados os ensaios de composição granulométrica e a determinação do módulo de finura (MF), além da determinação da massa unitária para o gesso e massa específica para o policarbonato e para o vidro, foram definidas as granulometrias, empacotamento dos grãos e proporções de substituição dos resíduos nas pastas de gesso para confecção dos compósitos.

Para a execução dos proporcionamentos, foi-se utilizada a combinação de granulometrias do vidro cominuído das peneiras 2,36 mm a 1,15 μ m e para o policarbonato foi descartado apenas o retido na peneira 4,75 mm. O empacotamento de grãos de vidro cominuído aplicado na pesquisa em relação a cada proporcionamento seguiu os seguintes percentuais: de

18% para o vidro retido na peneira com abertura 2,36 mm, 30% para o retido na peneira 1,18 mm, 24% para o retido na 600 μm , 22% para o retido na 300 μm e, por fim, 6% para o vidro retido na peneira 150 μm , totalizando assim 100% da massa de areia presente em cada mistura. Para a utilização do policarbonato em forma de aparas foi descartado apenas o material retido na peneira 4,75 mm, com o intuito de retirar apenas possíveis fragmentos de policarbonato com maiores dimensões, utilizando o resíduo conforme gerado pela indústria para viabilizar seu emprego com menor demanda energética e financeira. Pode-se observar os materiais já preparados nas imagens da Figura 7.

Figura 7 – Aparas de Policarbonato e Vidro Cominuído



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Acerca das quantidades de substituição do gesso pelos resíduos em cada proporcionamento, os teores seguem-se descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo de Materiais vs Proporcionamentos

		Vidro			
		P0V0 = 0%	5%	10%	15%
Policarbonato	1%		P1V5	P1V10	P1V15
	3%		P3V5	P3V10	P3V15
	5%		P5V5	P5V10	P5V15

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Pode-se visualizar na Tabela 3 o número de peças produzidas em cada idade, de acordo com o ensaio e, na Tabela 4, o consumo de material em cada proporcionamento.

Tabela 3 - Relação Número de Peças Produzidas vs Dimensões das Peças vs Proporções vs Ensaios Realizados
Idade do Ensaio aos 28 dias vs Dimensão das peças vs Ensaio vs Número de Peças

Propor- -ciona -mento	Dureza e Densidade no Estado Seco		Resistência Mecânica à Compressão Axial		Resistência Mecânica à Flexão e MO		Absorção de Água por Capilaridade	
	(50x50x50)	(40x40x160)	(50x50x50)	(40x40x160)	(50x50x50)	(40x40x160)	(50x50x50)	(40x40x160)
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
P0V0	3	-	3	-	-	3	-	3
P1V5	3	-	3	-	-	3	-	3
P1V10	3	-	3	-	-	3	-	3
P1V15	3	-	3	-	-	3	-	3
P3V5	3	-	3	-	-	3	-	3
P3V10	3	-	3	-	-	3	-	3
P3V15	3	-	3	-	-	3	-	3
P5V5	3	-	3	-	-	3	-	3
P5V10	3	-	3	-	-	3	-	3
P5V15	3	-	3	-	-	3	-	3

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Indicando, portanto, a realização de 6 peças de (50x50x50) mm e 6 peças de (40x40x160) mm para cada proporcionamento, em que, foram confeccionadas 3 peças para cada ensaio aos 28 dias. O percentual de substituição nos proporcionamentos para produção das peças do material compósito cerâmico e consumo de materiais foi executado de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Proporcionamentos para Produção das Peças do Compósito

Proporcio- -namento	Relação A/G	Massa do Gesso (Kg)	Massa da água (Kg)	Massa do RPC (Kg)	Massa do RV (Kg)	Massa da pasta (Kg)
P0V0	0,55	3,234	1,779	0	0	5,013
P1V5	0,55	3,03996	1,779	0,03234	0,1617	5,013
P1V10	0,55	2,87826	1,779	0,03234	0,3234	5,013
P1V15	0,55	2,71656	1,779	0,03234	0,4851	5,013
P3V5	0,55	2,97528	1,779	0,09702	0,1617	5,013
P3V10	0,55	2,81358	1,779	0,09702	0,3234	5,013
P3V15	0,55	2,65188	1,779	0,09702	0,4851	5,013
P5V5	0,55	2,9106	1,779	0,1617	0,1617	5,013
P5V10	0,55	2,7489	1,779	0,1617	0,3234	5,013
P5V15	0,55	2,5872	1,779	0,1617	0,4851	5,013
Massa Total	-	28,55622	17,79	0,87318	2,9106	50,13

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Posterior proporcionamento e definição da relação água/ gesso (A/G) como 0,55 seguindo o definido por Pedreño-Rojas *et al.* (2019), foram realizadas as misturas e executadas

as peças através da homogeneização da mistura da pasta de gesso com os resíduos de policarbonato (RPC) e resíduo de vidro cominuído (RV), em proporções de substituição em relação à massa de gesso (Mg).

O gesso lento para construção civil foi adquirido em loja de materiais de construção em Palmas e não passou por nenhum beneficiamento posterior para utilização, e a utilização de água para desenvolvimento dos experimentos foi filtrada e proveniente da rede de abastecimento de água em Palmas-TO, a BRK Ambiental.

A moldagem e cálculos de massa de gesso e água deu-se em dois tipos de moldes padronizados, com dimensões de (50x50x50) mm e (40x40x160) mm, de acordo com a NBR 12129 (ABNT, 2019) e metodologia proposta por Pedreño-Rojas *et al.* (2019). Para moldagem, inicialmente, aplicou-se uma fina camada de óleo lubrificante mineral nas partes do molde para evitar vazamentos, impermeabilizando o mesmo (Figura 8).

Figura 8 – Moldes e Óleo Mineral para Confecção dos Blocos do Material Compósito

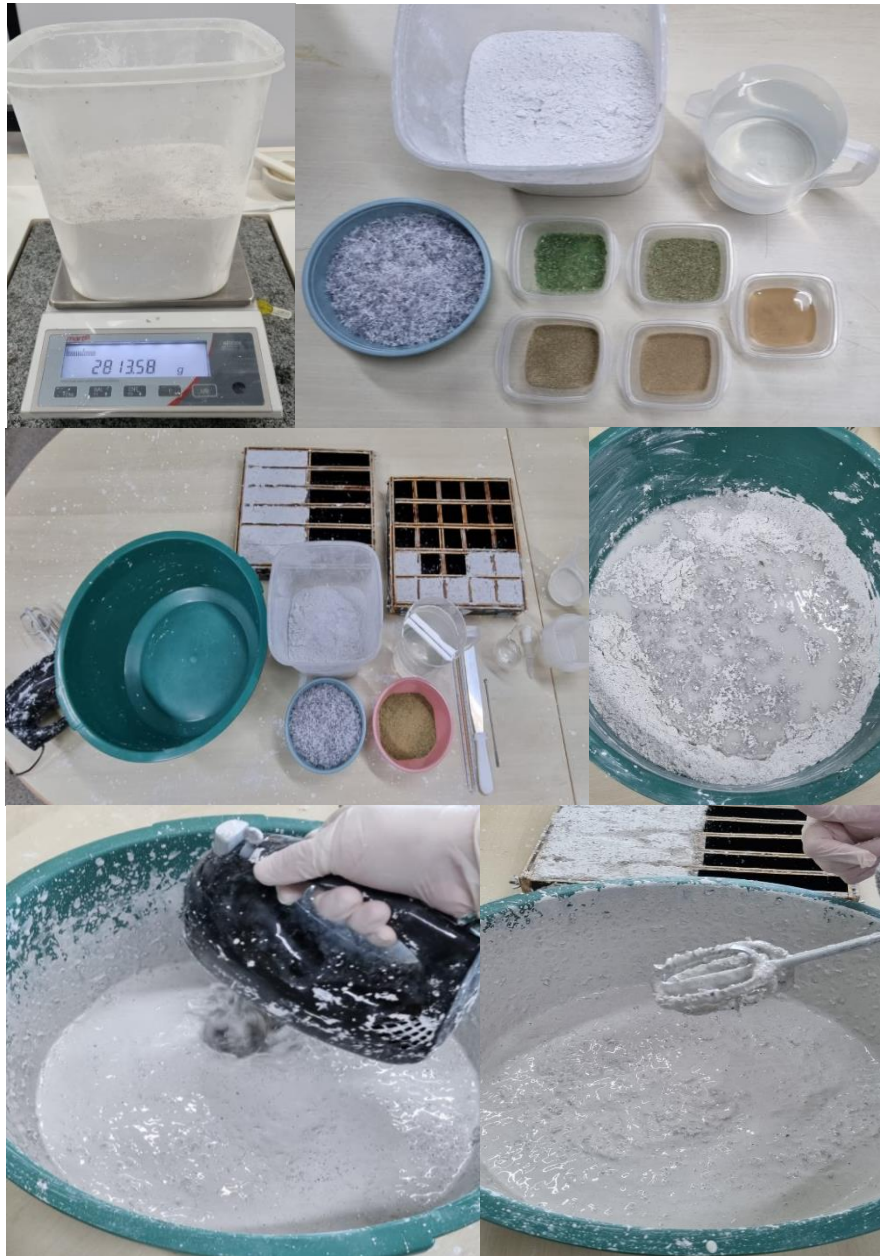


Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O processo de execução da pasta, de acordo com a NBR 12129 (ABNT, 2019), foi realizado polvilhando a massa de gesso sobre a massa de água calculados, deixar em repouso por 2 minutos, procedendo a mistura de forma contínua desfazendo os grumos de gesso e bolhas de ar por 1 minuto através da homogeneização em batedeira com potência de 400W em velocidade baixa durante 1 minuto. Posteriormente, transferiu-se rapidamente a mistura da pasta para os moldes padronizados (impermeáveis e não reativos ao sulfato de cálcio) com dimensões (50x50x50) mm e (40x40x160) mm, confeccionados em madeirite plastificado e aplicada uma camada de óleo mineral como desmoldante, sendo aplicado cada proporcionamento em duas camadas e batendo-se nas laterais para evitar o aprisionamento de bolhas de ar (Figura 9). Após o início da pega do gesso, a superfície dos corpos de prova foi

rasada e nivelada com uma espátula, sem alisá-la. A moldagem dos corpos de prova deu-se no Laboratório de Materiais Compósitos da UFT.

Figura 9 – Execução dos Proporcionamentos do Material Compósito



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Foram realizados dois proporcionamentos em cada etapa de moldagem, aguardando o período de uma hora do final da moldagem do último a ser realizado para a desmoldagem, limpeza das fôrmas e realização dos novos proporcionamentos (Figura 10).

Figura 10 – Execução das Moldagens dos Espécimes dos Proporcionamentos do Material Compósito



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O processo de desmoldagem (Figura 11) transcorreu após completo endurecimento da pasta, em uma hora, identificado pelo fim da fase exotérmica, sendo a cura seca e os espécimes acondicionados em ambiente laboratorial com temperatura média controlada de 28°C e identificados cada espécime após 24h, mantendo as peças em sala do Laboratório de Materiais Compósitos da UFT para cura seca até a realização dos ensaios. Aos 28 dias ocorreu a realização dos ensaios de caracterização física, mecânica e química das peças produzidas.

Figura 11 – Desmoldagem e Acondicionamento dos Espécimes dos Proporcionamentos do Material Compósito



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

5.3.3 Ensaio Físicos

Os ensaios físicos realizados no material compósito foram no estado endurecido, de densidade no estado seco, análise microestrutural através de microscópio óptico (MO) e absorção de água por capilaridade. Sendo realizado cada ensaio em 3 espécimes em idade de 28 dias. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais Compósitos da Universidade Federal do Tocantins – UFT, exceto a análise microestrutural que fora realizada no Laboratório de Microbiologia dos cursos de Engenharia do Centro Universitário Católica do Tocantins – UniCatólica.

5.3.3.1 Ensaio de Densidade no Estado Seco

O ensaio de densidade no estado seco para cada um dos dez proporcionamentos foi realizado conforme exposto por Pedreño-Rojas *et al.* (2019), sendo a densidade definida como a razão entre a massa seca do corpo de prova e seu volume. A densidade de cada composto é o

valor médio das três aferições realizadas por proporcionamento aos 1, 7 e 28 dias, sendo executado o ensaio no Laboratório de Materiais Compósitos da UFT.

Pode-se visualizar através das imagens presentes na Figura 12, as aferições das massas dos corpos de prova com dimensões de (50x50x50) mm dos compósitos em cada uma das idades predefinidas para posterior cálculo da densidade no estado seco.

Figura 12 – Aferição das massas dos prismas P0V0 (esq.) e P1V5 (dir.) aos 1, 7 e 28 dias



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As análises das densidades secas dos compósitos de gesso produzidos viabilizam a indicação da variabilidade dos valores das densidades para cada proporcionamento em relação à idade e às porcentagens em massa de substituição do gesso (matriz) pelas partículas de resíduos de termoplástico (policarbonato) e vidro que são os reforços das peças.

5.3.3.2 Ensaio de Análise Microestrutural (MO)

Imagens através do uso de microscópio óptico foram obtidas para fins de visualização das fases do material compósito e identificação de possíveis falhas, bem como vazios, na estrutura das referidas peças.

Os fragmentos das amostras resultantes dos ensaios de resistência à flexão por três pontos aos 28 dias de cura e para os dez proporcionamentos foram submetidos à análise por microscopia óptica a fim de obter qualitativamente as características superficiais da microestrutura e para conhecer as ligações existentes entre os agregados de resíduos de policarbonato em aparas e resíduos de vidro cominuído na matriz de gesso.

A realização do ensaio pode ser visualizada na Figura 13 e deu-se através de um estereomicroscópio, que é um microscópio óptico que fornece uma visão tridimensional de um espécime. O equipamento microscópico utilizado foi o Estereomicroscópio da marca OPTICAM e modelo OPZTS, com feixe de led para luz transmitida e refletida, sistema de zoom óptico, aumentos contínuos de 8x à 35x, utilização de disco preto fosco para apoio das peças de estudo e câmera com lente 5,4 mm acoplada para captura das imagens observadas através do software próprio, o OPTHD.

Figura 13 – Ensaio de Microscopia Óptica em Estereomicroscópio



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

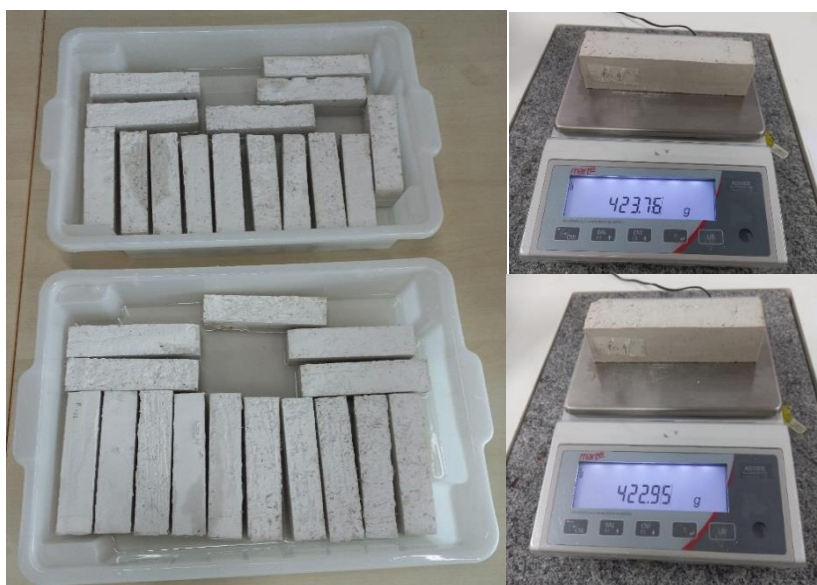
Os corpos de prova, referentes a cada um dos dez proporcionamentos e utilizados no ensaio são oriundos das peças rompidas no ensaio de resistência à flexão por três pontos. A face observada em lente fora a que sofrera ruptura, apenas reduzindo-se a altura da peça referente à face oposta à aquela observada para que fosse possível obter uma melhor visualização do material devido as limitações do equipamento para peças com alturas mais elevadas.

5.3.3.3 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade simula a forma de ascensão capilar da água em placas e blocos de gesso para revestimento aplicados na Construção Civil. A realização do ensaio seguiu o predisposto na NBR 9779 (ABNT, 2012) e aplicado em 3 corpos de prova de (40x40x160) mm de cada proporção, para a idade de 28 dias, sendo realizado no Laboratório de Materiais Compósitos da UFT.

Antes do ensaio, as amostras dispuseram de suas laterais impermeabilizadas com óleo mineral e foram pesados para a determinação da massa seca. Os tempos de verificação da absorção de água por capilaridade através da aferição das massas das peças de gesso e dos compósitos em uma lâmina d'água de 5 mm, para 3 espécimes de cada proporção aos 28 dias idade foram de: 5, 30, 60, 360 e 1440 minutos, retornando imediatamente ao recipiente com água após a pesagem, conforme a Figura 14 ilustra.

Figura 14 – Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade dos Espécimes do Material Compósito



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Através do ensaio pode-se observar as taxas de absorção de água por capilaridade para cada um dos dez proporcionamentos e os possíveis impactos em patologia das estruturas e resistência mecânica que essa ação de absorção de água acarretaria nas peças de gesso para revestimento e acabamento.

5.3.4 Ensaaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados no material compósito para os dez proporcionamentos, no estado endurecido aos 28 dias de idade, foram de resistência mecânica à compressão axial, resistência mecânica à flexão por três pontos e dureza.

5.3.4.1 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão seguiu as instruções dispostas na NBR 12129 (ABNT, 2019), aos 28 dias, em que, selecionou-se 3 corpos de prova de cada proporcionamento e, nesses, optou-se por uma das 3 faces, excetuando-se a face superior do bloco. Posteriormente, colocou-se o bloco no centro da placa de ensaio e fora aplicada uma carga contínua de 250 N/s a 750 N/s até a ruptura do bloco e repetido o ensaio para as outras duas peças, podendo-se aferir a média de resistência à compressão axial de cada proporcionamento.

O valor da resistência à compressão, segundo a NBR 12129 (ABNT, 2019), pode ser calculado de acordo com a Equação 4:

$$R = \frac{P}{S} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

R → resistência à compressão (MPa)

P → carga de ruptura do corpo de prova em Newtons (N)

S → área de seção transversal de aplicação da carga em milímetros quadrados (mm²)

A resistência à compressão média dos 3 corpos de prova é considerada da série, se cada uma destas não diferir mais de 15% da média global. Se uma das médias dos corpos de prova diferir mais de 15% da média global esta não pode ser incluída no cálculo da resistência à compressão e se mais de uma das médias dos corpos de prova diferir mais de 15% da média global, o ensaio deve ser repetido em outra série.

Utilizou-se a máquina universal de ensaios marca EMIC modelo DL30000 com célula de carga Trd28 e software para execução do ensaio e realização das leituras Tesc versão 1.13

para realização do ensaio de resistência à compressão axial, conforme método de ensaio de argamassa. O ensaio foi executado no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Luterano de Palmas, CEULP/ULBRA, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Execução dos Ensaio de Resistência à Compressão Axial dos Proporcionamentos do Material Compósito



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

5.3.4.2 Ensaio Mecânico de Resistência à Flexão por Três Pontos

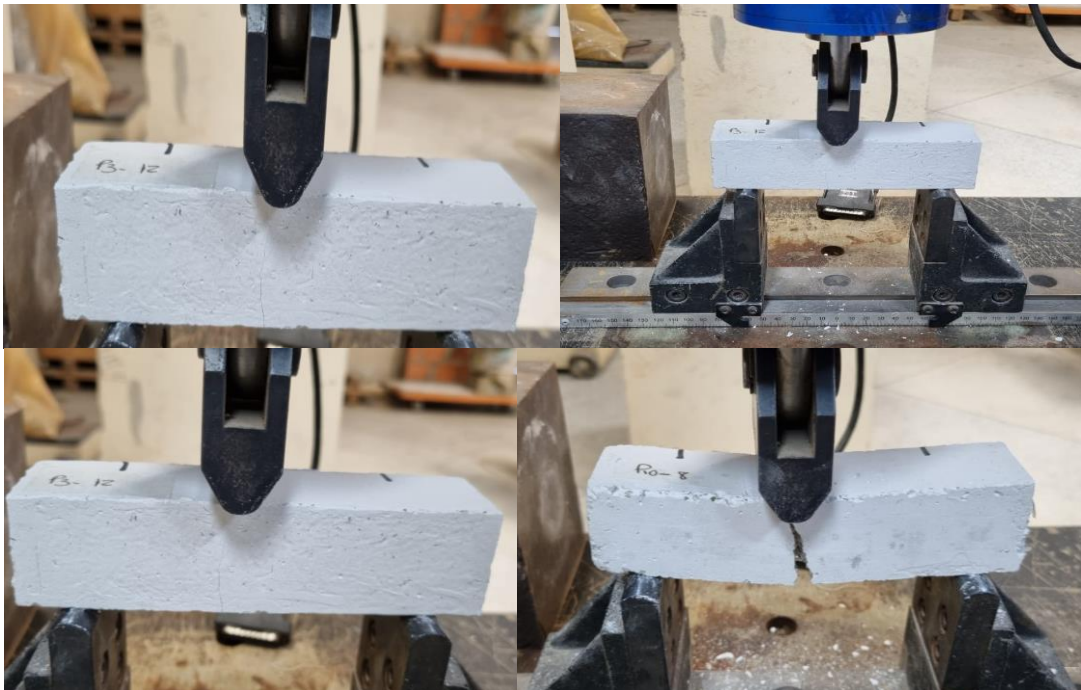
O ensaio de resistência mecânica à flexão principalmente aplicado em materiais de alta dureza, traz a capacidade de carga e deformação máxima que um material pode absorver, sendo efetuado com três pontos de tensão. Indicando, assim, a resistência à flexão das placas do compósito para aplicação em revestimento na construção civil.

O ensaio de resistência à flexão dos compósitos foi realizado em 3 corpos de prova de cada um dos dez proporcionamentos aos 28 dias de idade, seguindo a metodologia empregada por Pedreño-Rojas *et al.* (2019), em que, para cada proporcionamento, as peças foram colocadas no equipamento máquina universal de ensaios marca EMIC modelo DL30000 com célula de carga Trd28 e software para execução do ensaio e realização das leituras Tesc versão 1.13 e centralizadas em dois rolos de suporte afastados 100 mm. Posteriormente, uma carga centralizada foi aplicada até a ruptura da amostra, seguindo-se o modelo de ensaio de flexão

por 3 pontos, como o modelo de ensaio de Stuttgart em vigas. A resistência à flexão (tensão de ruptura, expressa em MPa) do compósito para cada um dos 10 proporcionamentos é definida como o valor médio das 3 medidas realizadas em cada série.

O ensaio de resistência à flexão por três pontos (Figura 16), conforme método de ensaio de argamassa, foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Luterano de Palmas, CEULP/ULBRA.

Figura 16 – Execução do Ensaio de Resistência à Flexão Por Três Pontos



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

5.3.4.3 Ensaio de Dureza

Posterior cura dos corpos de prova, de acordo com NBR 12129 (ABNT 2019), o ensaio de dureza foi realizado aos 28 dias de cura seca em ambiente de laboratório e foi selecionada uma face de três blocos por proporcionamento, não sendo a face superior de moldagem para o ensaio de penetração. Posteriormente, ajustou-se o corpo de prova no centro de aplicação da carga com uma das superfícies selecionadas para cima. Posicionou-se a semiesfera de aço com área diametral de 1 cm^2 para aplicação de carga na parte central desta superfície e a 20 mm das bordas, evitando-se eventuais bolhas ou falhas na superfície do corpo de prova. A aplicação de carga foi contínua e crescente até a peça atingir a ruptura.

O método empregado na realização da análise de dureza deu-se através do ensaio de dureza da madeira de Janka com 10 tf, devido a disponibilidade das peças existentes para a máquina universal de ensaios EMIC modelo DL30000 com célula de carga Trd28 e software para execução do ensaio e realização das leituras Tesc versão 1.13 que possibilitasse a concretização do ensaio nos corpos de prova com dimensões de (50x50x50) mm aos 28 dias de cura seca para os dez proporcionamentos.

A dureza pelo método de Janka é determinada convencionalmente pela tensão que, atuando em uma das faces de um corpo de prova prismático de madeira, produz a penetração de uma semiesfera de aço com área diametral de 1 cm², de acordo com a NBR 7190-3 (ABNT, 2022). Devido a semiesfera possuir o mesmo diâmetro e o sistema de aplicação de cargas ser contínuo até a ruptura do espécime, foi possível a execução do ensaio.

A leitura da tensão de ruptura dos espécimes realizada pelo software da máquina foi em quilograma-força (kgf), sendo convertido para Newton (N) multiplicando-se o resultado em kgf por 9,8066. Observando-se que o diâmetro da esfera foi 10 mm e a média da profundidade no valor de 10 mm.

O cálculo da dureza, expresso em Newton por milímetro quadrado (N/mm²), seguiu as prerrogativas da normativa NBR 12129 (ABNT, 2019) para espécimes de gesso, através da Equação 5:

$$D = \frac{F}{\pi * \emptyset * t} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

D → dureza (N/mm²)

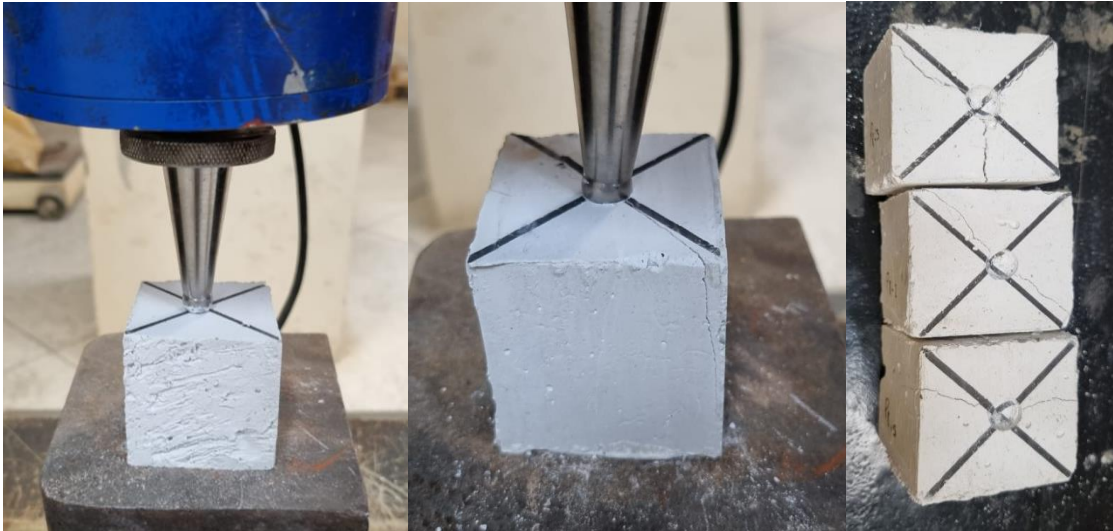
F → carga expressa em Newton (N)

∅ → diâmetro da esfera expresso em milímetros (mm)

t → média da profundidade expressa em milímetros (mm)

O ensaio de dureza por Janka, conforme método de ensaio de madeira e sendo finalizado com a força de ruptura, foi executado no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Luterano de Palmas, CEULP/ULBRA, conforme apresentado nas imagens da Figura 17.

Figura 17 – Execução do Ensaio de Dureza nos Proporcionamentos do Material Compósito.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Devido a semiesfera de aço para aplicação de carga nos corpos de prova ser similar para a realização dos ensaios de dureza em madeira e gesso, com 1 cm² de diâmetro e penetração de 1 cm no espécime ensaiado, e o resultado obtido na máquina ser referente a força de ruptura, possibilitou-se a adaptação do ensaio e cálculo da dureza do gesso.

5.3.5 Ensaio Químico

O ensaio de espectroscopia por dispersão de energia de Raios-X (EDX) foi realizado para avaliar a composição química de cada material constituinte do compósito nos proporcionamentos.

5.3.5.1 Ensaio de Composição Química (EDX)

Os teores CaO e SO₃ dos gessos devem atender valores mínimos impostos pela NBR 13207 (ABNT, 2017), que deve ser, no mínimo, de 38 % de CaO e de 53 % de SO₃. Portanto, o ensaio de composição química para determinação desses valores ocorreu através da técnica de EDX. Método esse qualitativo e semiquantitativo, pois alguns elementos são identificados e outros não, da composição química do compósito em que, foram utilizadas uma amostra de cada material (gesso, resíduo de vidro e resíduo de policarbonato) em forma de pó, em equipamento para EDX modelo Espectrômetro de Fluorescência de Raio-x 720 Shimatzu, realizado no Laboratório de Materiais Compósitos da UFT, conforme as imagens da Figura 18.

As condições de análises elementares na realização dos ensaios nas amostras podem ser observadas na Tabela 5.

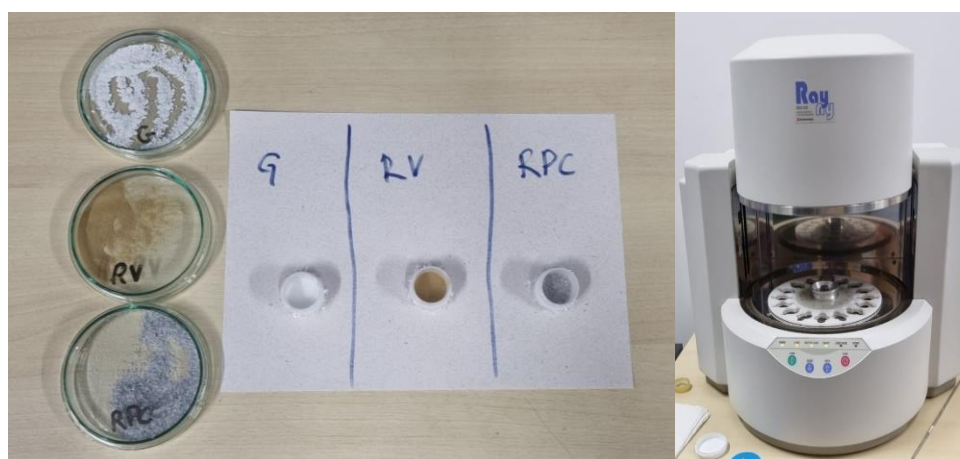
Tabela 5 – Condições de Análises do Ensaio EDX

Condições de Análises	
Método	Qualitativo-Quantitativo
Atmosfera	Vácuo
Canais	Ti-U, Na-Sc
Amostra	Pó
Forma do Resultado	Elemento

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Ademais, com o auxílio da espectroscopia por dispersão de energia de Raio-X (EDX) possibilitou-se a obtenção da composição química das amostras em pó de gesso, vidro e policarbonato.

Figura 18 – Execução do Ensaio de EDX



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para a realização do ensaio foram preparadas uma amostra de cada material, sendo: gesso em pó, resíduo de vidro sodocálcico verde cominuído passante na peneira 150 μ m e retido no fundo da peneira ABNT e, transformação das aparas de policarbonato provenientes do processo de fabricação de armações de óculos sob forma de pó com o uso de liquidificador e peneiramento para utilização do resíduo passante na peneira 300 μ m.

O equipamento EDX realiza a leitura de forma sequenciada de múltiplas análises colocadas no carrossel de acordo com a identificação, para que se possa obter a composição química dos materiais no estado pulverulento. As amostras em pós dos materiais foram

aconditionadas individualmente em porta amostras preenchendo o fundo do cilindro, vedadas com filmes de polipropileno e com apenas um furo de agulha nos filmes das partes superiores das porta amostras.

Como resultado das análises em EDX, são obtidas as composições químicas qualitativa e quantitativa das amostras. Além de gráficos gerados pelo equipamento que expressam a relação do número de raios X detectados (intensidade) em função de suas energias, em que, os raios X característicos formam picos sobrepostos aos raios X *Bremsstrahlung* (radiação produzida quando cargas elétricas sofrem desaceleração) e, é através desses picos de raios X característicos baseado em seu átomo de origem que faz-se possível realizar a identificação dos elementos presentes na amostra do material que fora excitada pela fonte de energia. A posição dos picos no espectro identifica o elemento e a intensidade do sinal corresponde à concentração do elemento no compósito.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

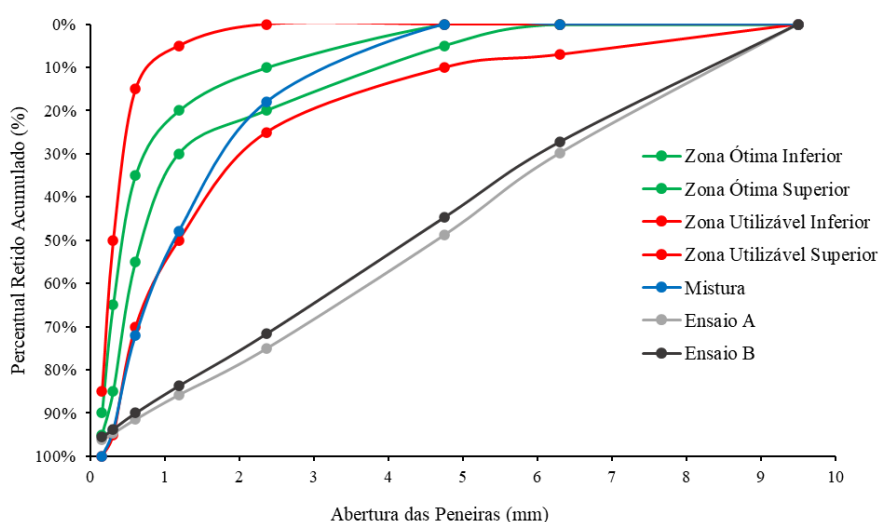
A pesquisa aqui executada explorou o desenvolvimento de um novo material para aplicação no setor da Construção Civil. Produto esse composto por matriz de gesso e reforço como materiais residuais oriundos da indústria (termoplástico policarbonato) e vidro sodocálcico verde (embalagem de cervejas). Produzindo, assim, um novo e inovador compósito cerâmico com reforço cerâmico e polimérico para a construção civil e aplicação em blocos, revestimentos e acabamentos em edificações.

6.1 PREPARO DOS MATERIAIS E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

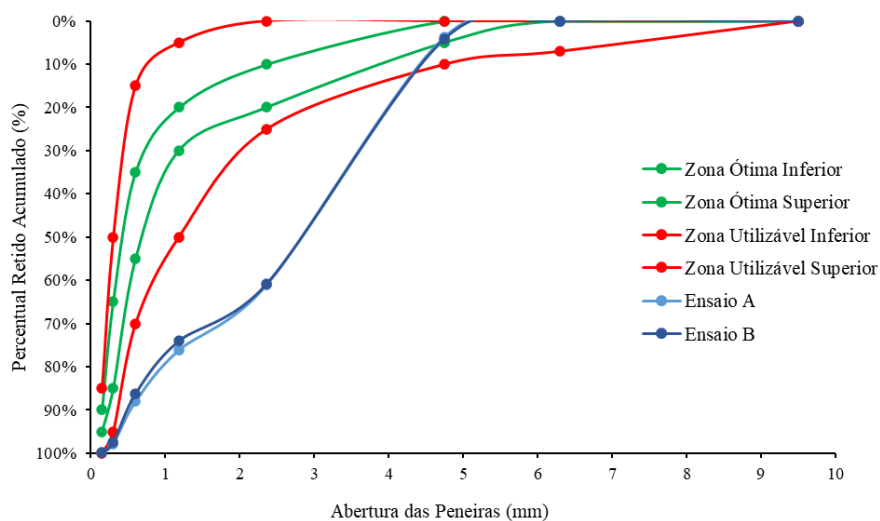
Os ensaios de caracterização do gesso, vidro cominuído e aparas de policarbonato foram de composição granulométrica, massa unitária, massa específica e tempo de pega do gesso, sendo realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Centro Universitário Católica do Tocantins – UniCatólica.

Foram realizadas as curvas granulométricas do vidro cominuído e das aparas de policarbonato, conforme visualizado nos Gráficos 1 e 2. Os módulos de finura obtidos foram de 0,061 para o vidro e de 0,052 para o policarbonato.

Gráfico 1 – Curva Granulométrica do Vidro Cominuído



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Gráfico 2 – Curva Granulométrica das Aparas de Policarbonato

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Por meio dos ensaios de massa unitária e massa específica do vidro e policarbonato, sendo realizado pelo volume e empregando o tubo graduado, obteve-se a massa unitária do vidro, utilizando 200 g de resíduo de vidro cominuído e 100 ml de água, como 1,667 g/cm³ ou 166 kg/m³ e a massa específica do vidro como 2,667 g/cm³. Para o ensaio do policarbonato, utilizou-se 20 g de resíduo de policarbonato em aparas e 300 ml de água, obtendo a massa unitária como 0,1 g/cm³ ou 100 kg/m³ e massa específica de 1,333 g/cm³.

Observando-se que, quanto maior a quantidade de água utilizada na hidratação do gesso em pó, maior será a quantidade de poros presentes na peça após cura do espécime e maior será o tempo necessário para a formação dos cristais de di-hidrato e para a precipitação (início de pega), essa última pode ainda ser influenciada pela presença de impurezas ou outros compostos na mistura. Para a execução das misturas foi fixada a relação água/gesso como baixa, em 0,55.

O gesso utilizado, de acordo com o fabricante Gesso São Francisco, de Grajaú-MA, possui pH da pasta de 7,0 em 50 g/L a 20°C, temperatura de decomposição acima de 140°C, densidade relativa do produto em pó de 0,70 a 0,82 kg/dm³, solubilidade a 20°C de cerca de 7,5 g de CaSO₄ por 1000g H₂O e a 40°C de cerca de 5,5 g de CaSO₄ por 1000 g H₂O e massa específica de 2,57 g/cm³.

O ensaio de tempo de pega foi realizado com a amostra referente ao proporcionamento 1, ou seja, sem as substituições parciais do gesso pelo policarbonato e pelo vidro, sendo caracterizado pelo início de pega aos 7 minutos e 50 segundos e fim de pega aos 11 minutos e 15 segundos. Segundo o disposto na NBR 13207 (2017), uma pasta de gesso para revestimento

sem presença de aditivos e em consistência normal deve apresentar, no mínimo 10 minutos como tempo de início de pega e 35 minutos como tempo de fim de pega. Indicando, assim, que o gesso aqui estudado não atende esse requisito da normativa, divergindo, ainda, daqueles presentes na literatura, como John e Cincotto (2017) e Ferreira (2017), de 10 a 45 minutos.

Posterior desmoldagem dos blocos referentes aos dez proporcionamentos, realizou-se a aferição das dimensões dos mesmos referentes ao comprimento, largura e altura com 24h de cura, indicando, conforme Figura 19, conformidade com as dimensões exigidas de (50x50x50) mm e (40x40x160) mm.

Figura 19 – Conferência Dimensional dos Espécimes dos Proporcionamentos do Material Compósito



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Após desmoldagem, as peças referentes ao material compósito se mantiveram em ambiente laboratorial para realização do processo de cura seca até a idade de 28 dias (data em que atingem resistência final) e foram executados os ensaios físicos, mecânicos e químicos.

6.2 ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos realizados nos corpos de prova dos compósitos nos dez proporcionamentos foram de densidade no estado seco, análise microestrutural com microscópio óptico (MO), possibilitando a captação de imagens ampliadas das peças, e a absorção de água por capilaridade, todos aos 28 dias de cura seca.

Acerca das aferições de massa dos blocos, foi realizada com 24 horas, 7 dias e 28 dias, conforme pode-se visualizar na Figura 20.

Figura 20 – Aferição das Massas dos Espécimes dos Proporcionamentos P0V0 e P1V5 do Material Compósito



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Todos os espécimes tiveram suas massas aferidas e computas, conforme a Tabela 17 (Apêndice A), aos 1, 7 e 28 dias de cura (após desmoldagem). Evidenciando através da Tabela 6 a média de variação de massa nos 7 primeiros dias de cura, dos 7 aos 28 dias de cura e dentro de todo o período de cura seca.

Tabela 6 – Análise das Massas das Peças dos Proporcionamentos do Material Compósito e Referência

Análise das Massas das Peças: Dimensão (50x50x50) mm						
Proporcio- namento	Massa média no estado úmido (24h após desforma) (g)	Massa média no estado seco (7 dias) (g)	Massa média no estado seco (28 dias) (g)	Varição de Massa: desforma aos 7 dias	Varição de Massa: 7 aos 28 dias	Varição de Massa: desforma aos 28 dias
P0V0	218,452	179,848	179,180	38,603	0,668	39,272
P1V5	202,212	171,322	169,417	30,890	1,905	32,795
P1V10	216,543	181,753	174,297	34,790	7,457	42,247
P1V15	219,650	180,183	174,183	39,467	6,000	45,467
P3V5	214,728	182,307	172,670	32,422	9,637	42,058
P3V10	213,605	182,605	168,020	31,000	14,585	45,585
P3V15	213,625	181,822	167,288	31,803	14,533	46,337
P5V5	209,630	173,793	171,017	35,837	2,777	38,613
P5V10	200,823	157,862	157,217	42,962	0,645	43,607
P5V15	194,977	158,433	157,115	36,543	1,318	37,862

Análise das Massas das Peças: Dimensão (40x40x160) mm						
Proporcio- namento	Massa média no estado úmido (24h após desforma) (g)	Massa média no estado seco (7 dias) (g)	Massa média no estado seco (28 dias) (g)	Varição de Massa: desforma aos 7 dias	Varição de Massa: 7 aos 28 dias	Varição de Massa: desforma aos 28 dias
P0V0	404,665	343,848	343,432	60,817	0,417	61,233
P1V5	404,732	341,658	335,013	63,073	6,645	69,718
P1V10	409,543	348,855	327,693	60,688	21,162	81,850
P1V15	401,525	339,393	319,832	62,132	19,562	81,693
P3V5	403,530	338,785	322,127	64,745	16,658	81,403
P3V10	414,322	351,287	327,970	63,035	23,317	86,352
P3V15	409,955	343,338	320,765	66,617	22,573	89,190
P5V5	390,543	316,615	315,327	73,928	1,288	75,217
P5V10	413,275	344,827	320,973	68,448	23,853	92,302
P5V15	393,453	324,082	310,607	69,372	13,475	82,847

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Pode-se aferir que a massa em idades iniciais (até os 7 dias de cura seca) está associada às reações de hidratação da pasta de gesso, evaporação da água adsorvida e endurecimento da peça com ganho de resistência. Indicando, assim, que as peças do material compósito de matriz gesso com reforço cerâmico (vidro) e polimérico (policarbonato) para empregado na construção civil como blocos ou placas de revestimento e acabamento em substituição aos convencionalmente de gesso, possuem similaridade no tempo de conformação, endurecimento e variação de massa após secagem.

A redução de massa após 24 horas de desforma até os 7 dias de cura em relação ao tempo total de 28 dias de cura, para as peças de (50x50x50) mm, corresponde no mínimo, a 77,09% e, para as peças de (40x40x160) mm a 74,15%. As menores e maiores variações de massa após os 28 dias de cura seca em ambiente laboratorial para as peças de (50x50x50) mm correspondem aos proporcionamentos P1V5 e P3V15, respectivamente. Para as peças cujas dimensões são de (40x40x160) mm, após os 28 dias de cura, a menor variação corresponde a mistura P0V0 e a maior a P5V10.

6.2.1 Ensaio de Densidade no Estado Seco

O ensaio de densidade no estado seco do material compósito para cada um dos dez proporcionamentos, sendo o primeiro para fins de parâmetro e contendo apenas gesso e os demais contendo as variações dos resíduos de policarbonato e vidro, foi realizado aos 1, 7 e 28 dias de cura seca após desforma. A densidade foi calculada através da razão da massa em gramas de cada corpo de prova pelo seu volume em centímetros cúbicos, sendo esse no valor de 125 cm³ pois as peças são de (50x50x50) mm. Os resultados da análise de densidade no estado seco podem ser observados na Tabela 7 e os resultados individuais constam na Tabela 18 (Apêndice B).

Tabela 7 – Ensaio de Densidade no Estado Seco

Proporcio- namento	Densidade no Estado Seco								
	Densidade Média (g/cm ³)			Desvio Padrão			Coeficiente de Variação (%)		
	1 dia	7 dias	28 dias	1 dia	7 dias	28 dias	1 dia	7 dias	28 dias
P0V0	1,804	1,471	1,462	0,037	0,023	0,020	2,035	1,546	1,365
P1V5	1,639	1,361	1,347	0,069	0,076	0,067	4,200	5,557	4,983
P1V10	1,772	1,478	1,408	0,125	0,108	0,088	7,043	7,338	6,238
P1V15	1,669	1,360	1,326	0,070	0,042	0,075	4,184	3,080	5,630
P3V5	1,694	1,459	1,365	0,191	0,205	0,112	11,251	14,029	8,179
P3V10	1,692	1,446	1,322	0,018	0,095	0,019	1,050	6,581	1,425
P3V15	1,692	1,433	1,317	0,138	0,074	0,106	8,137	5,190	8,018
P5V5	1,728	1,435	1,425	0,045	0,058	0,072	2,618	4,070	5,036
P5V10	1,609	1,270	1,264	0,047	0,037	0,035	2,929	2,898	2,767
P5V15	1,508	1,221	1,216	0,105	0,073	0,072	6,990	5,980	5,918

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

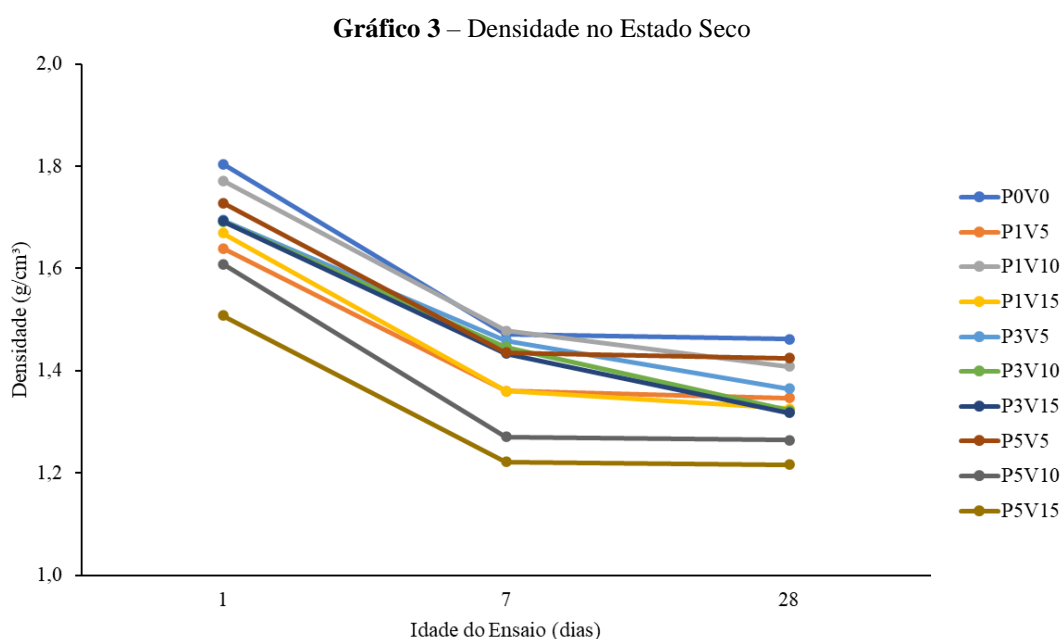
A partir da análise dos coeficientes de variabilidade das amostras contidos na Tabela 6 é possível observar que os proporcionamentos P0V0 e P5V10 mantiveram o Coeficiente de Variação (CV) abaixo de 5%, P3V5 possui o maior CV e os demais possuem média dispersão.

Por meio da análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% presente na Tabela 19 (Apêndice C) e o valor P sendo a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado. Os valores P encontrados para as linhas (proporcionamento) e para as colunas (número de dias) são menores que 5% e no teste de significância F usado para comparar variâncias, o valor de F calculado é maior que o valor de F crítico (tabelado), logo, o proporcionamento e o número de dias influenciam o resultado do ensaio.

Analisando-se as médias dos proporcionamentos contendo as variações de resíduo de vidro como V5, V10 e V15, de forma isolada, a média decresce ao passo que se aumenta o percentual de substituição do gesso pelo vidro. Acerca das médias das misturas com as variações do policarbonato como P1, P3 e P5, de forma isolada, a média de P5 é menor e não houve variação significativa entre as médias de P1 e P3, como substituição parcial do gesso por 1%, 3% e 5% de policarbonato, respectivamente.

A maior média de densidade das misturas pertence ao P0V0 e a menor média pertence a P5V15, sendo associada às massas específicas dos materiais gesso, vidro e policarbonato. O primeiro dia de cura tem maior influência no resultado da densidade média do material nas misturas e a variação aos 7 e 28 dias de cura é mínima.

Através do Gráfico 3, pode-se visualizar a variação das densidades no estado seco dos três prismas ensaiados de cada mistura com um dia de cura aos 28 dias de cura (idade considerada em que as peças atingem a resistência final).



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Conforme apreciado, os valores de densidade das misturas variaram entre 1,148 g/cm³ correspondente ao P5V15 (5% de substituição por policarbonato e 15% de substituição por vidro) a 1,479 correspondente ao P0V0 (proporcionamento de referência que contém apenas gesso) a depender dos teores de substituição do gesso pelos resíduos de vidro e policarbonato.

Através da análise de variância com nível de significância de 5%, analisando-se as médias da densidade no estado seco dos proporcionamentos, quanto maior o percentual de substituição do gesso por resíduo de policarbonato e por resíduo de vidro, menor será a densidade da peça da referida mistura e, quanto maior o percentual de substituição do gesso por resíduo de policarbonato e por resíduo de vidro, menor será a densidade da peça da referida mistura. Conforme também evidenciado na pesquisa de Pedreño-Rojas *et al.* (2019) que desenvolveu compósito de matriz gesso e reforço resíduo de policarbonato granulado. No estudo dos referidos autores, a densidade no estado seco aos 28 dias decrescia ao passo em que eram elevados os teores de policarbonato na mistura e observou ainda, que grãos de policarbonato em menores dimensões (0,063 a 4 mm) indicaram menores densidades nas peças frente grãos com maiores dimensões (0,063 a 10 mm) quando analisados de forma comparativa entre misturas com o mesmo teor do resíduo de policarbonato (variações de 5 a 60% com base no peso do gesso utilizado).

Os resultados obtidos para as densidades dos prismas nos dez proporcionamentos justifica-se devido a massa específica do policarbonato ser de 1,333 g/cm³, a do vidro ser de 2,667 g/cm³ e a do gesso ser de 2,57 g/cm³ e não divergindo dos valores de densidade das misturas do estudo de Pedreño-Rojas *et al.* (2019) que variaram entre 1,336 e 1,138 g/cm³ e estando vinculada ao percentual e dimensões das partículas de resíduos de plástico.

6.2.2 Ensaio de Análise Microestrutural (MO)

O ensaio de análise microestrutural através de microscopia óptica (MO) com o emprego de um estereomicroscópio com câmera acoplada possibilitou uma observação a nível microestrutural do material compósito nas variações de misturas aqui estudadas para o vidro e o policarbonato em matriz gesso e para o traço de referência (apenas gesso). As imagens obtidas possibilitaram uma análise morfológica do material e a observação das zonas de transição gesso-vidro e gesso-policarbonato, vazios e falhas nas peças.

Na Tabela 8, pode-se observar as imagens em corte transversal dos corpos de prova prismáticos submetidos ao ensaio mecânico de resistência à flexão por três pontos para cada um dos proporcionamentos executados, tendo a face analisada dimensões de (40x40) mm.

Tabela 8 – Imagens dos Espécimes em Corte Transversal

(continua)


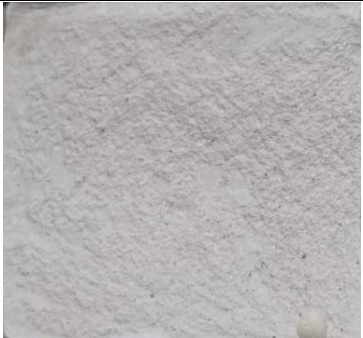




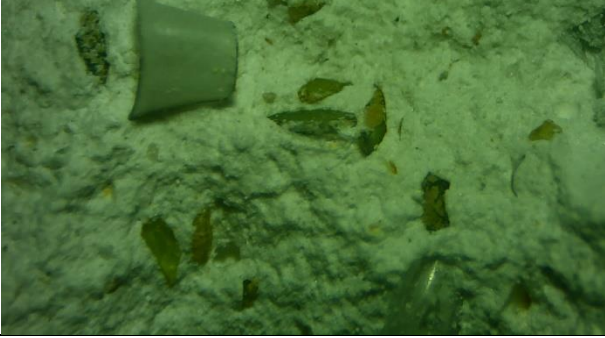

Misturas (teores de substituição do gesso)	Imagem obtida através de Estereomicroscópio (aumento 30x)	Imagem obtida através de câmera convencional (aumento 3x)
P0V0		
P1V5		
P1V10		
P1V15		

Tabela 8 – Imagens dos Espécimes em Corte Transversal

(continuação)













Misturas (teores de substituição do gesso)	Imagem obtida através de Estereomicroscópio (aumento 30x)	Imagem obtida através de câmera convencional (aumento 3x)
P3V5		
P3V10		
P3V15		
P5V5		

Tabela 8 – Imagens dos Espécimes em Corte Transversal

(conclusão)

Misturas (teores de substituição do gesso)	Imagem obtida através de Estereomicroscópio (aumento 30x)	Imagem obtida através de câmera convencional (aumento 3x)
P5V10		
P5V15		

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Através das imagens acima pode-se observar as disposições e orientações dos resíduos de policarbonato e dos resíduos de vidro nas amostras. Aferindo-se, então, que as partículas dos reforços de plástico sob forma de aparas e do vidro sob forma de grânulos estão distribuídas de forma homogênea na matriz gesso, enquanto suas orientações são aleatórias, sendo a identificação facilitada nos proporcionamentos P5V10 e P5V15 que contém maiores teores desses resíduos.

Visualiza-se, ainda, que houve aderência dos resíduos na pasta de gesso e a formação de alguns pontos pasta de gesso visíveis nos flocos do policarbonato, como cristais de gipsita. Há também alguns poucos pontos de vazios nas peças, observados como meia-esfera, provenientes de microbolhas de ar e água aprisionada evaporada que foram aprisionadas nas pastas durante as execuções das misturas, podendo aumentar a porosidade do material e reduzir a resistência mecânica. A identificação dos vazios com maior facilidade foi possível para as misturas com menores teores de resíduos, ou seja, P1V5, P1V10, P1V15 e P3V5.

6.2.3 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado aos 28 dias de cura seca das peças em laboratório, em que, os tempos de checagem da absorção de água por capilaridade, em lâmina d'água de 5 mm, para os dez proporcionamentos foram de 5, 30, 60, 360 e 1440 minutos, além da aferição da massa seca antes da imersão das peças em água. Os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade podem ser visualizados através da Tabela 9 e a análise estatística contendo o desvio padrão e análise de variância encontra-se na Tabela 10.

Tabela 9 – Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Proporcio- namento	Massa Média (g) vs Tempo Médio Submerso (min)						Absorção Média (0 a 1440 min) (g)	Grau de Absorção
	0 min (massa seca)	5 min	30 min	60 min	360 min	1440 min		
P0V0	344,620	423,447	434,233	434,297	435,213	436,127	91,507	1,266
P1V5	339,790	416,910	432,717	432,867	433,763	435,007	95,217	1,280
P1V10	327,437	413,860	418,347	418,510	419,017	420,143	92,707	1,283
P1V15	324,720	401,297	416,117	416,417	417,453	418,887	94,167	1,290
P3V5	322,917	388,117	408,467	409,497	410,850	412,340	89,423	1,277
P3V10	329,473	406,253	422,473	422,700	423,513	424,777	95,303	1,289
P3V15	322,993	405,483	416,317	416,697	417,457	418,710	95,717	1,296
P5V5	308,913	372,060	393,820	394,640	396,287	397,760	88,847	1,288
P5V10	320,157	409,887	414,377	414,793	415,500	416,907	96,750	1,302
P5V15	303,330	381,370	390,590	391,100	392,060	393,770	90,440	1,298

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Tabela 10 – Análise Estatística dos Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Propor- ciona- mento	Absorção de Água por Capilaridade: Análise Estatística											
	Desvio Padrão						Coeficiente de Variação (%)					
	0 min (massa seca)	5 min	30 min	60 min	360 min	1440 min	0 min (massa seca)	5 min	30 min	60 min	360 min	1440 min
P0V0	5,437	3,899	7,219	7,313	7,332	7,272	0,016	0,009	0,017	0,017	0,017	0,017
P1V5	7,072	9,220	9,144	9,089	9,203	9,257	0,021	0,022	0,021	0,021	0,021	0,021
P1V10	9,030	17,251	13,088	13,003	13,115	12,987	0,028	0,042	0,031	0,031	0,031	0,031
P1V15	15,281	4,522	18,321	18,826	19,182	19,343	0,047	0,011	0,044	0,045	0,046	0,046
P3V5	10,120	22,858	13,675	13,242	13,283	13,275	0,031	0,059	0,033	0,032	0,032	0,032
P3V10	17,296	29,329	22,420	22,330	22,210	22,060	0,052	0,072	0,053	0,053	0,052	0,052
P3V15	15,022	31,906	19,323	19,329	19,142	19,232	0,047	0,079	0,046	0,046	0,046	0,046
P5V5	18,575	23,212	23,547	23,658	23,590	23,675	0,060	0,062	0,060	0,060	0,060	0,060
P5V10	12,977	20,049	13,805	13,576	13,308	13,235	0,041	0,049	0,033	0,033	0,032	0,032
P5V15	27,763	33,311	35,390	35,544	35,475	35,525	0,092	0,087	0,091	0,091	0,090	0,090

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

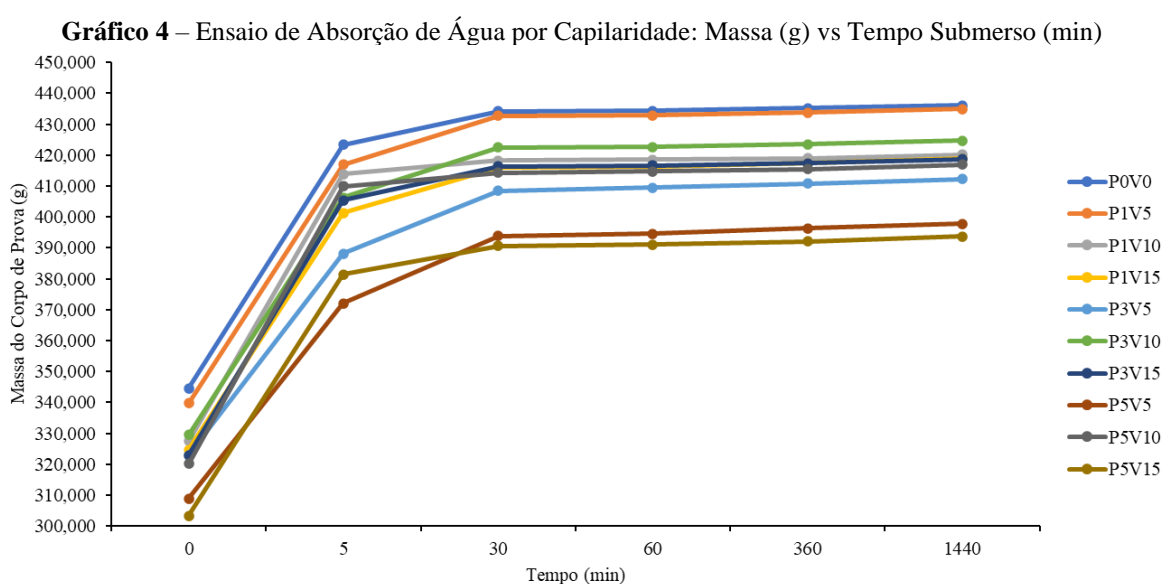
Através das análises dos resultados obtidos na Tabela 9, Tabela 10 e no Gráfico 4, pode-se observar que a absorção de água por capilaridade média nos espécimes P0V0 a P5V15 no intervalo de tempo zero a cinco minutos possuiu amplitude de variação de 63,147 g (correspondente ao P5V5) a 89,730 g (P5V10). Para o segundo intervalo de tempo, de cinco a trinta minutos, a variação foi de 4,487 g (P1V10) a 21,760 g (P5V5). No período de trinta minutos a uma hora, foi de 0,063 g (P0V0) a 1,030 g (P3V5). Para o período de uma hora a seis horas de absorção, a menor leitura registrada foi de 0,507 g (P1V10) e a maior de 1,647 g (P5V5). Para o último intervalo de tempo do ensaio, de seis a vinte e quatro horas, a variação de absorção de água foi de 0,913 g (P0V0) a 1,710 g (P5V15).

Inferindo, portanto, que a mistura P5V5 possui o menor índice médio de absorção de água por capilaridade em 24 horas de análise, absorvendo apenas 88,847 g e o maior índice corresponde ao traço P5V10, com absorção de 96,750 g. O traço P0V0 (de referência) possuiu absorção média de água em relação ao tempo total do ensaio de 91,507 g, sendo similar à absorção média de P5V15 (mistura com teores mais elevados de resíduos de vidro e policarbonato), de 90,440 g.

Por meio da análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% presente na Tabela 21 (Apêndice E) e o valor P como a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado. Os valores P encontrados para as linhas (proporcionamento) e para as colunas (tempo de absorção de água pelas peças) são menores

que 5% e no teste de significância F usado para comparar variâncias, o valor de F calculado é maior que o valor de F crítico (tabelado), logo, o proporcionamento e o tempo em que as peças são mantidas em uma lâmina d'água influenciam o resultado do ensaio.

A maior média de absorção de água pertence a mistura P5V10 e a menor média pertence a mistura P5V5. O tempo de 5 minutos possui maior variância quando comparado com os demais intervalos de execução do ensaio. O tempo de 1440 minutos confere maior influência no resultado da absorção de água, evidenciado por sua média superior aos demais tempos, indicando maiores índices de absorção de água quando comparado com os resultados atingidos em tempos menores.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O proporcionamento P5V15 possui a menor massa após a realização do ensaio, seguido por P5V5, possuindo os menores índices de absorção de água por capilaridade e, consequentemente, menores índices de porosidade do material. Constatando, assim, a influência da substituição parcial do gesso por resíduos de vidro e de policarbonato nas dez misturas executadas nos resultados atingidos no tocante à absorção de água por capilaridade. O resultado pode ser associado à porosidade e permeabilidade de cada material empregado nas misturas do compósito e devido ao gesso ser um aglomerante aéreo, em que, após execução da pasta e endurecimento, não possui resistência à ação da água sem o emprego de aditivos hidrofugantes.

6.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos realizados foram de dureza, resistência mecânica à compressão axial e resistência mecânica à flexão por três pontos, sendo realizados aos 28 dias de cura, na máquina universal de ensaios marca EMIC modelo DL30000 com célula de carga Trd28 e software para execução do ensaio e realização das leituras Tesc versão 1.13 no Laboratório de Materiais e Estruturas do Centro Universitário Luterano de Palmas, CEULP/ULBRA.

6.3.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

O ensaio da resistência à compressão axial possui como finalidade demonstrar a viabilidade no emprego e durabilidade do material para fins de revestimento no setor da Construção Civil.

A resistência é resultado de alguns fatores, bem como: qualidade e conformidade do material, relação água/gesso, idade da peça no momento do ensaio, condições de cura e armazenamento dos espécimes, porosidade oriunda da evaporação da massa de água não consumida pela reação de hidratação, vazios da peça durante a compactação do material no processo de moldagem e adições de outros materiais como substitutos parciais ao gesso.

A execução do ensaio de resistência à compressão axial das peças aos 28 dias dos proporcionamentos 1 ao 10 dos compósitos deu-se em máquina universal de ensaios, marca EMIC modelo DL30000 com célula de carga Trd28 e software para execução do ensaio e realização das leituras Tesc versão 1.13 pelo método de compressão de argamassas 10 tf, podendo os resultados serem visualizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial

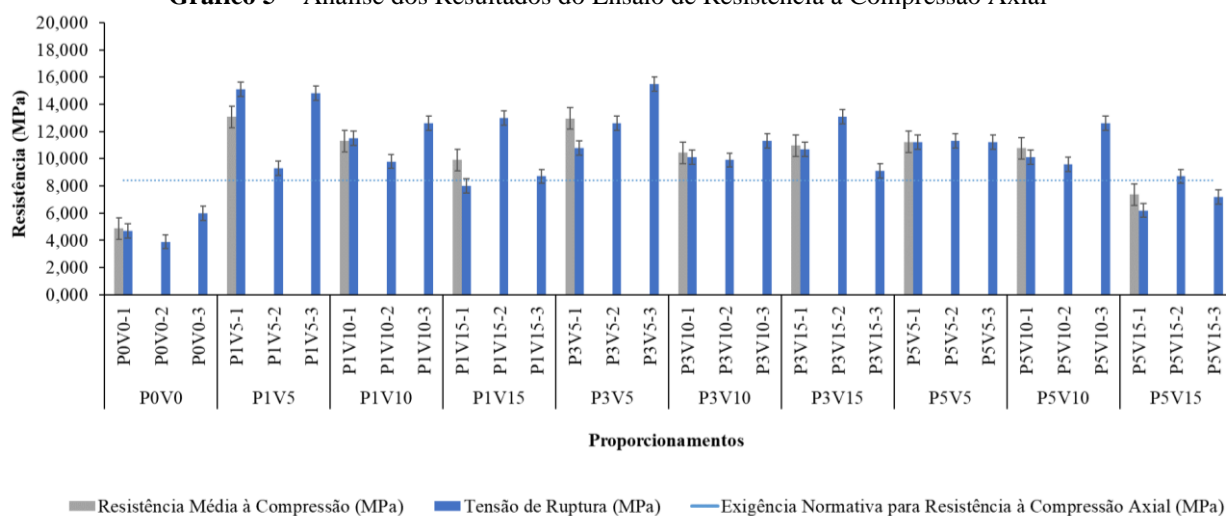
Resistência à Compressão Axial				
Proporcio- namento	Resistência Média à Compressão (MPa)	Exigência Normativa para Resistência à Compressão Axial (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
P0V0	4,867	8,400	1,060	21,778
P1V5	13,067	8,400	3,265	24,991
P1V10	11,300	8,400	1,411	12,484
P1V15	9,900	8,400	2,707	27,347
P3V5	12,967	8,400	2,371	18,288
P3V10	10,433	8,400	0,757	7,257
P3V15	10,967	8,400	2,013	18,358
P5V5	11,233	8,400	0,058	0,514
P5V10	10,767	8,400	1,607	14,928
P5V15	7,367	8,400	1,258	17,081

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando-se os resultados (Gráfico 5), de acordo com a versão anterior da NBR 13207 (ABNT, 2017) que fora do ano de 1994, a exigência mecânica à compressão axial para gesso de revestimento de consistência normal é de 8,4 MPa, pois a nova edição não aborda o requisito e a NBR 12129 (ABNT, 2017) orienta acerca do método de ensaio para sua determinação.

Pode-se inferir, que os proporcionamentos P0V0 e P5V15 não alcançaram o requisito normativo e os valores médios de resistência à compressão axial para as misturas estudadas variam 4,867 MPa (P0V0) a 13,067 MPa (P1V5). Assim como para Pedreño-Rojas *et al.* (2019), os proporcionamentos com as menores resistências foram aqueles com maior teor de policarbonato e o traço de referência.

Segundo Heriyanto *et al.* (2018), em todas as amostras testadas do compósito de resina e vidro, quanto maior a proporção dos resíduos de vidros nas misturas e menor porosidade e presença de bolhas, tornava-se mais difícil a propagação de uma trinca, resultando em uma maior resistência à compressão das peças.

Gráfico 5 – Análise dos Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Analisando os resultados presentes na Tabela 11, Tabela 23 (Apêndice G) e Gráfico 5, os proporcionamentos com maiores resistência à compressão axial são os mesmos que possuem menor absorção de água média, contendo 5% de substituição do gesso pelo resíduo de vidro cominuído, ou seja, são as misturas P1V5 (13,067 MPa), P3V5 (12,967 MPa) e P5V5 (11,233 MPa), com exceção à P1V10 (11,3 MPa) que também possui elevada resistência.

Através da ANOVA com nível de significância de 5% presente na Tabela 23 (Apêndice G), observa-se que os valores P encontrados para as linhas (proporcionamento) e para as colunas (resistência à compressão média e resistência em exigência normativa das peças) são menores que 5%. No teste de significância F usado para comparar variâncias, o valor de F calculado é maior que o valor de F crítico (tabelado), logo, as resistências (colunas) influenciam no resultado do ensaio e para as linhas (proporcionamentos) o valor de F é menor que o F crítico. Portanto, evidencia-se uma maior influência nos resultados do ensaio referente às resistências à compressão das peças.

Pedreño-Rojas *et al.* (2019) analisaram no estudo a resistência mecânica à compressão dos compósitos de gesso e policarbonato com relação água-gesso de 0,55, aferindo que aumentando a porcentagem de resíduos de policarbonato oriundos de CD e DVD e maior sua granulometria, adicionados nas misturas, resulta em uma diminuição nas resistências à compressão e à flexão dos materiais, com valores entre 5,48 MPa (60% de substituição do gesso por policarbonato) a 9,15 MPa (5% de substituição do gesso por policarbonato) em relação a resistência de 6,48 MPa do traço de referência contendo apenas gesso.

Ferreira (2017) através das análises de resistência à compressão para as dez amostras de gesso, confeccionadas com relação água-gesso de 0,8, obteve resistências médias de 5,38 MPa a 6,89 MPa, porém, não indicou a idade das peças para o ensaio. Indicando, assim, que o seu material também não atingiu a resistência mínima de 8,4 MPa.

6.3.2 Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos

O ensaio de resistência à flexão por três pontos se assemelha ao ensaio de Stuttgart realizado em vigas de concreto armado e foi realizado em peças com dimensões de (40x40X160) mm para os dez proporcionamentos. Os resultados do ensaio realizado aos 28 dias de cura seca em máquina universal de ensaios, marca EMIC modelo DL30000 com célula de carga Trd28 e software para execução do ensaio e realização das leituras Tesc versão 1.13, com apoios e aplicação de carga através do método de flexão em argamassas podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos

Resistência à Flexão por Três Pontos				
Proporcio- namento	Resistência Média à Flexão (MPa)	Exigência Normativa para Resistência à Flexão (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
P0V0	4,400	1,000	0,500	0,114
P1V5	3,033	1,000	0,306	0,101
P1V10	3,333	1,000	0,208	0,062
P1V15	2,500	1,000	0,265	0,106
P3V5	2,700	1,000	0,200	0,074
P3V10	2,633	1,000	0,451	0,171
P3V15	2,233	1,000	0,058	0,026
P5V5	2,233	1,000	0,153	0,068
P5V10	2,267	1,000	0,115	0,051
P5V15	2,067	1,000	0,252	0,122

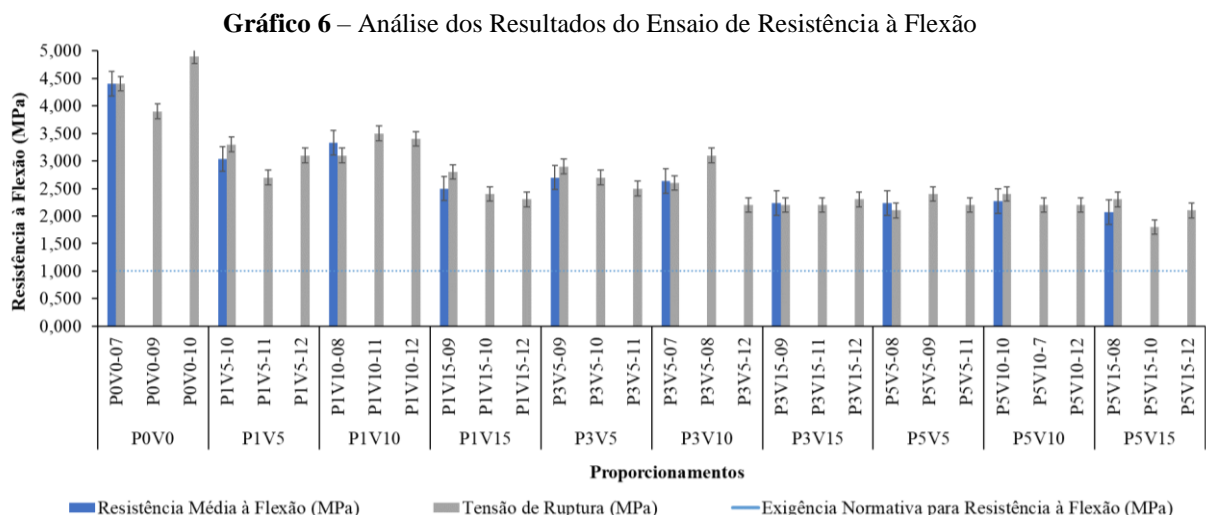
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Por meio do ensaio de resistência à flexão por três pontos (Tabela 12 e Gráfico 6) pode-se inferir que assim como no ensaio de resistência à compressão axial, o menor valor médio de resistência à flexão é indicado no proporcionamento com maiores teores de resíduos (P5V15) sendo de 2,067 MPa e o mais elevado para aquele de referência (P0V0) de 4,4 MPa.

As misturas contendo menores percentuais de substituição do gesso por resíduo de policarbonato em forma de aparas do processo de fabricação de lentes e armações ópticas possuem maiores índices de resistência à flexão por três pontos, sendo elas P0V0 (4,4 MPa), P1V5 (3,033 MPa) e P1V10 (3,333 MPa). Evidenciando, assim, a influência das zonas frágeis das peças como a aderência gesso-policarbonato e porosidade do compósito na resistência à flexão das peças.

Os proporcionamentos P1V5, P1V10 e P3V5 atingiram maiores resistências tanto à flexão quanto à compressão. E a mistura P3V5 atingiu também menores índices de absorção de água por capilaridade.

Por meio da análise de variância de fator duplo e sem repetição e nível de significância de 5% presente na Tabela 24 (Apêndice H), pode-se concluir que os valores P relacionados as linhas (proporcionamento) e as colunas (resistência à flexão média e resistência à flexão mínima por exigência normativa) são menores que 5%. Para o teste de significância F, empregado como comparativo de variâncias, o valor de F calculado é maior que o valor de F crítico (tabelado), sendo assim, as resistências (colunas) influenciam no resultado do ensaio, no entanto, para as linhas (proporcionamentos) o valor de F é menor que o F crítico. Portanto, evidencia-se uma maior influência nos resultados do ensaio referente às resistências à flexão das peças.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Resultado esse atingido também por Pedreño-Rojas *et al.* (2019) que aferiram através da pesquisa um decréscimo na resistência à flexão à medida que os teores de substituição do gesso pelo policarbonato aumentavam, variando de 2,33 MPa (mistura com 60% de

poli-carbonato) a 3,83 MPa (mistura com 5% de poli-carbonato) e valor do traço de referência como 3,42 MPa. Valores esses sendo superiores ao mínimo para a resistência à flexão é de 1 MPa, requisito esse da norma europeia EN 13279-1 (UNE, 2008) para materiais gesso, como parâmetro utilizado pelos autores. No entanto, não indicaram idade das peças para realização do ensaio.

Os resultados alcançados nesta pesquisa para os dez tipos de mistura também superam a resistência mínima de 1 MPa e possuem similaridade com os resultados atingidos por Pedreño-Rojas *et al.* (2019), viabilizando a utilização de qualquer uma das misturas analisadas como material sob forma de peças de revestimento, acabamento ou divisórias para edificações no tocante apenas ao critério de resistência à flexão.

6.3.3 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza de peças em gesso objetivou-se a avaliar as resistências às deformações das peças, no tocante à resistência mecânica do material para emprego como revestimento e a sua capacidade de receber acabamentos como pinturas ou componentes fixados/colados neste. Os resultados da dureza dos espécimes dos dez proporcionamentos aos 28 dias pode ser visualizado na Tabela 12.

Tabela 13 – Resultados do Ensaio de Dureza

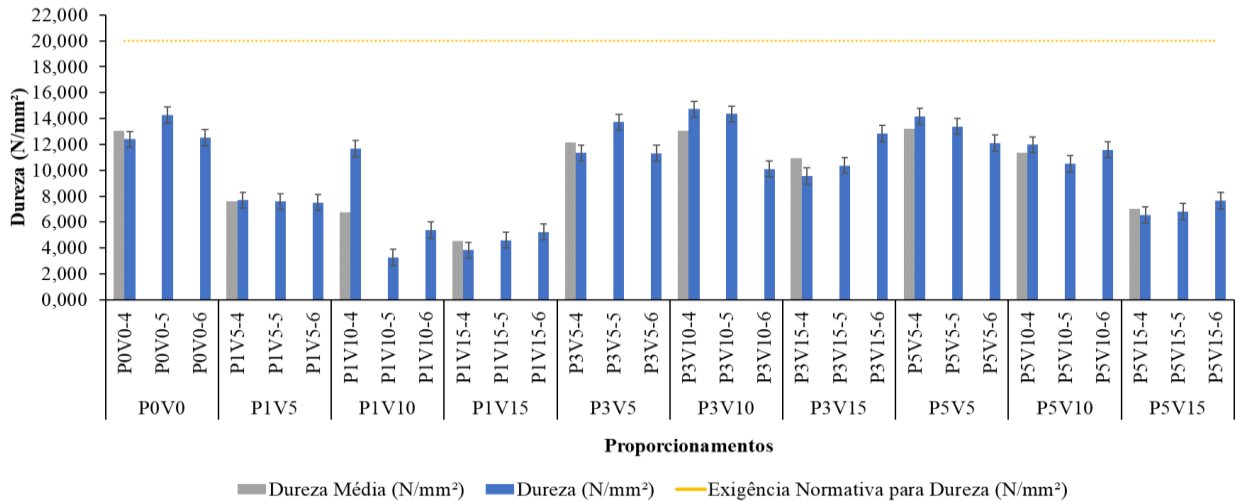
Proporcio- namento	Dureza			
	Dureza Média (N/mm ²)	Exigência Normativa para Dureza (N/mm ²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
P0V0	13,063	20,000	1,049	0,080
P1V5	7,597	20,000	0,087	0,011
P1V10	6,781	20,000	4,366	0,644
P1V15	4,561	20,000	0,708	0,155
P3V5	12,129	20,000	1,374	0,113
P3V10	13,062	20,000	2,565	0,196
P3V15	10,925	20,000	1,695	0,155
P5V5	13,220	20,000	1,036	0,078
P5V10	11,357	20,000	0,757	0,067
P5V15	7,005	20,000	0,568	0,081

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As propriedades mecânicas de um material, bem como sua dureza, são influenciadas diretamente, segundo Ferreira (2017), pela relação água/gesso, pois, a quantidade de água

excedente na mistura evapora e confere aumento na porosidade resultante do gesso, o que eleva a capacidade de deformação da peça. No Gráfico 7, pode-se visualizar os resultados pra o ensaio de dureza realizado em três espécimes para cada mistura do material compósito.

Gráfico 7 – Análise dos Resultados do Ensaio de Dureza



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

De acordo com a NBR 13207 (ABNT, 2017), como requisito mecânico para dureza, as peças de gesso devem apresentar valores iguais ou superiores a 20 N/mm² para que o material esteja em conformidade. Indicando, portanto, que os resultados obtidos para os espécimes dos proporcionamentos P0V0 a P5V15 executados não estariam em conformidade.

O menor índice de dureza média foi constatado para a mistura P1V15 (com substituição do gesso por 1% de policarbonato e 15% de vidro em massa) de 4,561 N/mm² e o maior para P5V5 (com substituição do gesso por 5% de policarbonato e 5% de vidro em massa) de 13,220 N/mm². Resultados esses evidenciados na ANOVA, em que, o maior coeficiente de variabilidade para a dureza média pertence ao traço P1V15 e o menor para P5V5.

Porém, nas análises de Ferreira (2017), os espécimes das dez amostras de gesso provenientes de dez marcas do Polo Gesseiro do Araripe em Pernambuco, também não atingiram no ensaio de dureza a determinação normativa de 20 N/mm², variando de 12,72 N/mm² a 15,25 N/mm².

A partir dos resultados obtidos por meio da ANOVA de fator duplo sem repetição e nível de significância de 5%, Tabela 27 (Apêndice K), observa-se que os valores P encontrados para as linhas (proporcionamento) e para as colunas (dureza média e dureza mínima por exigência normativa) são menores que 5%. Em relação ao teste de significância F, comparando-

se as variâncias, o valor de F calculado é maior que o valor de F crítico (tabelado) para a dureza (colunas) e menor para os proporcionamentos (linhas). Sendo assim, evidencia-se uma maior influência nos resultados do ensaio referente ao critério dureza das peças frente às misturas executadas.

Comparando-se os resultados de dureza média, resistência à compressão axial média, resistência à flexão por três pontos média e absorção de água por capilaridade média (0 a 1440 min) para os dez proporcionamentos, verifica-se que os proporcionamentos com menor teor de vidro (5% de substituição em massa do gesso) atingem melhores índices e em relação aos teores de policarbonato não se pode notar tamanha influência.

Os proporcionamentos P3V5, P0V0 (referência), P3V10 e P3V5 apresentaram dureza média elevada, porém não atingiram o mínimo indicado pela norma de 20 N/mm². Destas misturas, apenas P5V5 e P3V5 dispõem também resultados satisfatórios para os ensaios de resistência à compressão, à flexão e absorção de água.

6.4 ENSAIO QUÍMICO

O ensaio para composição química dos materiais compósitos aqui estudado, aos 28 dias de cura, deu-se com o auxílio da espectroscopia por dispersão de energia de Raio-X (EDX) em equipamento modelo Espectrômetro de Fluorescência de Raio-x 720 Shimatzu no Laboratório de Materiais Compósitos da Universidade Federal do Tocantins – UFT.

6.4.1 Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raio X (EDX)

O ensaio de espectroscopia por dispersão de energia de raio X (EDX) gerou as composições químicas qualitativas e quantitativas do gesso em pó, resíduo de policarbonato em aparas transformado em pó e resíduo de vidro cominuído transformado em pó para realização das análises.

Como resultado experimental, a composição química qualitativa do gesso indica os seguintes elementos: Si (silício), Ca (cálcio), S (enxofre), Rh (ródio), K (potássio), Fe (ferro), Co (cobalto), Sr (estrôncio), Zr (zircônio) e P (fósforo).

A composição química quantitativa do material gesso pode ser visualizada na Tabela 14 e através dos gráficos na Figura 21.

Nota-se, em gráfico, a presença dos picos de raios X característicos, utilizando um tubo de raios X com alvo de ródio (Rh) e plotagem em gráfico com relação espectros de contagens

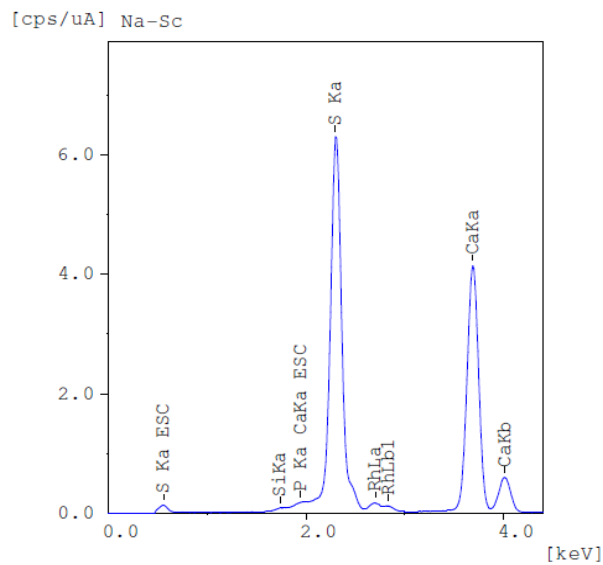
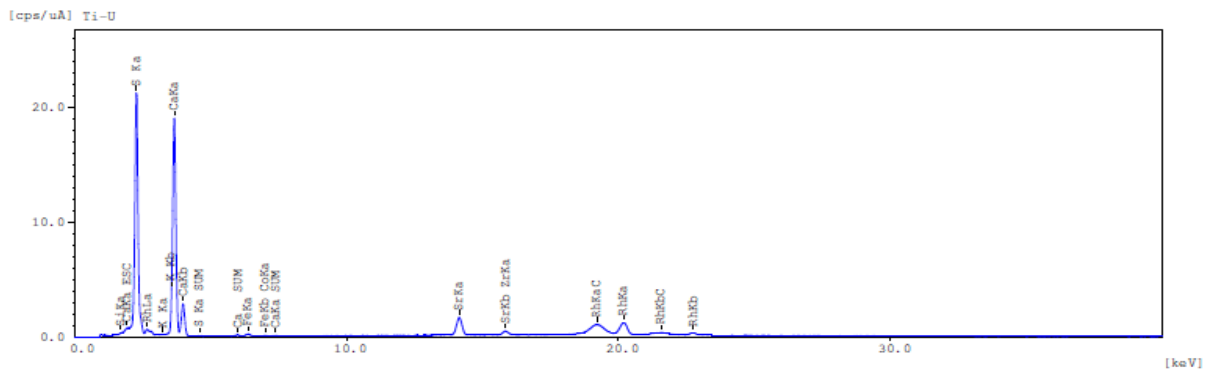
versus energia, para as faixas Ti-U e Na-SC, em atmosfera vácuo, ou seja, sem a presença de oxigênio (O).

Tabela 14 – Análise do Gesso Através do EDX
Análise Quantitativa do Gesso - EDX

Elemento	Percentual presente na amostra (%)
Ca	61,240
S	36,204
P	0,829
Si	0,751
K	0,401
Sr	0,339
Fe	0,213
Zr	0,015
Co	0,009

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 21 – Gráfico da Composição Química do Gesso



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O gesso, de acordo com a normativa NBR 13207 (ABNT, 2017), deve possuir teores mínimos de 38 % para CaO e de 53 % para SO₃. A composição química da superfície da amostra de gesso analisada em EDX demonstrou a presença dos elementos cálcio (Ca), em maior teor (61,240%), enxofre (S) em 36,204%, silício (Si) de 0,751% e potássio (K) de 0,401% referentes à composição química da gipsita (CaSO₄.2H₂O), ressaltando que a análise é executada no vácuo, ou seja, sem a presença do oxigênio (O).

No ensaio do resíduo de vidro em EDX sob forma de pó, como resultado, a composição química qualitativa indica os seguintes elementos: Rb (rubídio), Si (silício), S (enxofre), Rh (ródio), K (potássio), Ca (cálcio), Ti (titânio), Cr (cromo), Mn (manganês), Fe (ferro), Zn (zinco), Pb (chumbo), Sr (estrôncio), Y (ítrio), Zr (zircônio), Mg (magnésio) e Al (alumínio).

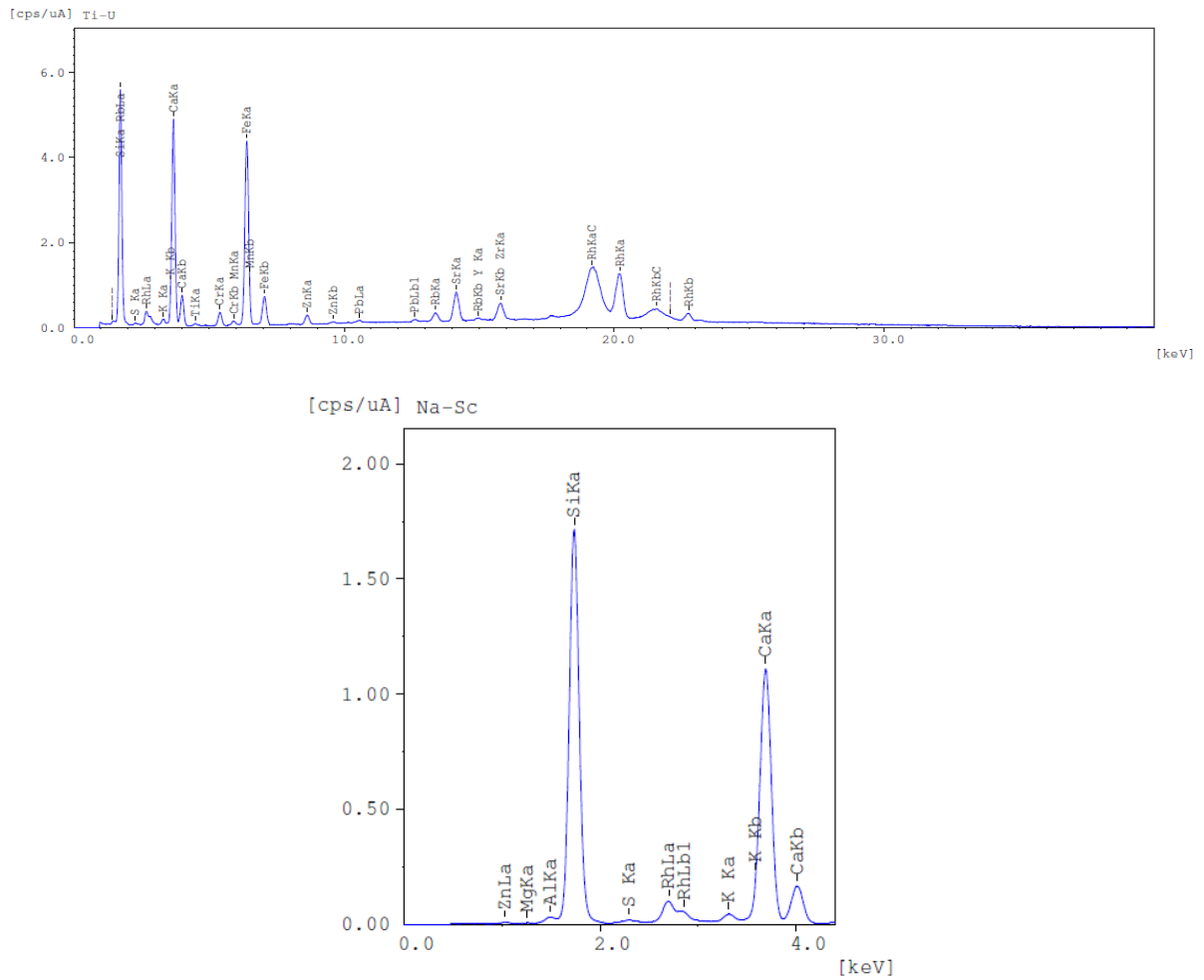
A composição química quantitativa do material vidro pode ser visualizada na Tabela 15 e através dos gráficos na Figura 22, para as faixas Ti-U e Na-SC, em atmosfera vácuo e relação intensidade (eixo vertical) versus energia (eixo horizontal).

Tabela 15 – Análise do Vidro Através do EDX

Análise Quantitativa do Resíduo de Vidro - EDX	
Elemento	Percentual presente na amostra (%)
Si	59,897
Ca	25,681
Fe	5,665
Al	4,910
Mg	1,209
K	0,942
Cr	0,666
S	0,240
Ti	0,199
Sr	0,193
Zn	0,121
Zr	0,081
Mn	0,077
Rb	0,062
Pb	0,052
Y	0,006

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 22 – Gráfico da Composição Química do Vidro



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A composição química qualitativa do resíduo de policarbonato, sob forma de pó, no ensaio de EDX, como resultado, indica os seguintes elementos: Si (silício), S (enxofre), Rh (ródio), Ca (cálcio), Fe (ferro), Cu (cobre), Na (sódio), Al (alumínio) e P (fósforo).

Na Tabela 16 e através dos gráficos na Figura 23, é possível identificar a composição química quantitativa do material policarbonato.

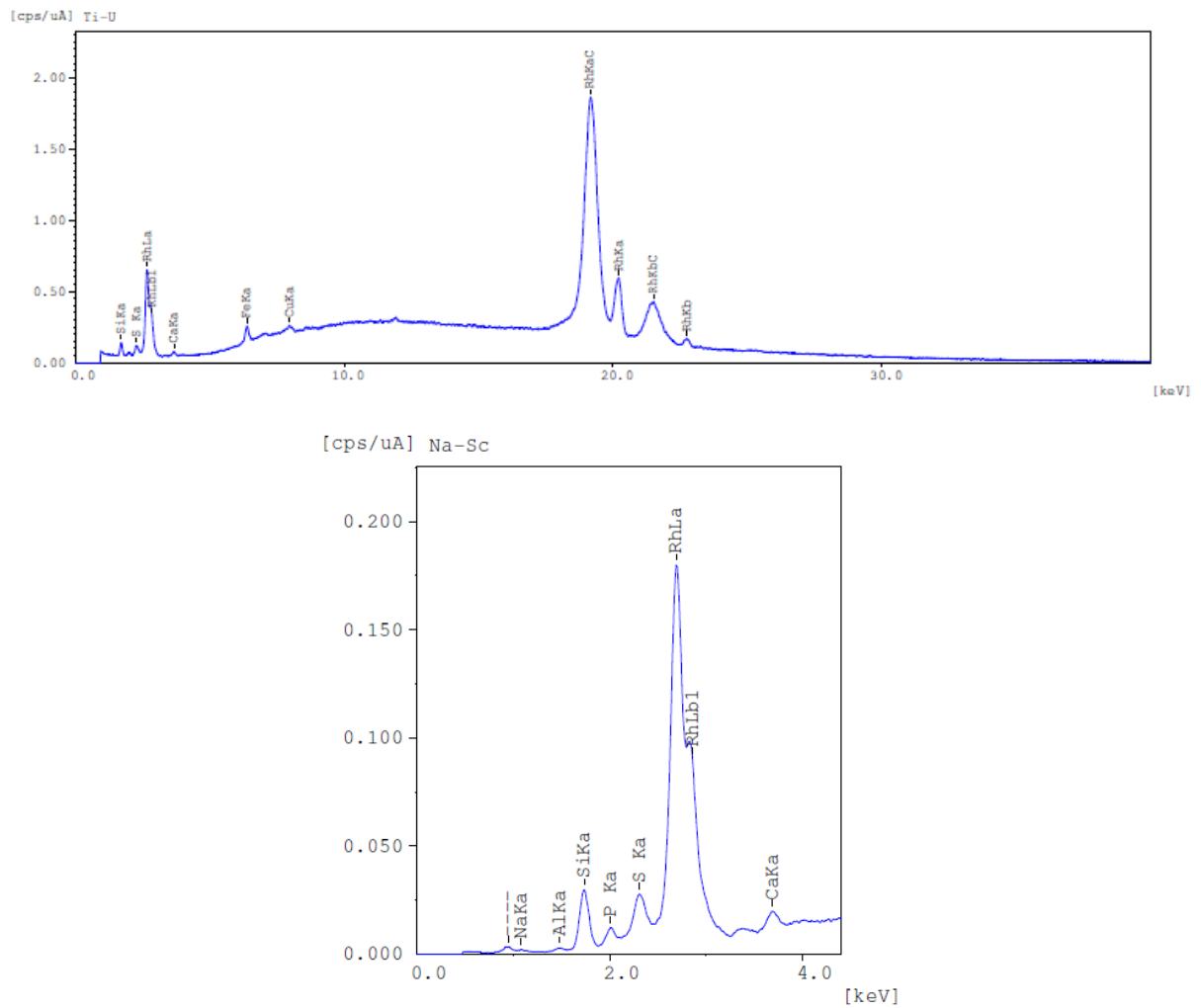
Tabela 16 – Análise do Policarbonato Através do EDX

Análise Quantitativa do Resíduo de Policarbonato - EDX

Elemento	Percentual presente na amostra (%)
Na	42,471
Si	28,615
S	9,030
Al	6,620
P	5,943
Ca	4,264
Fe	2,444
Cu	0,613

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 23 – Gráfico da Composição Química do Policarbonato



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Através dos gráficos gerados nas análises do gesso, vidro e policarbonato em EDX, que expressam a relação do número de raios X detectados (intensidade), ou seja, espectros de contagens, em função de suas energias, os picos de raios X característicos em cada uma das amostras, possibilitam a identificação dos elementos presentes em um material.

Na análise química e pontual em EDX, o cálcio e o enxofre compõem majoritariamente o gesso, o silício, o cálcio e o ferro constituem predominantemente o vidro e, o sódio, o silício e o enxofre constituem hegemonicamente o policarbonato. Permitindo, portanto, um mapeamento dos elementos químicos presentes nos materiais dos proporcionamentos e auxiliando na identificação do compósito de matriz cerâmica e reforço cerâmico e polimérico.

Evidencia-se, através do EDX do gesso (Tabela 14), material constituído por sulfato de cálcio diidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidros solúveis e insolúveis, a presença destes elementos constituintes, sendo majoritariamente do Ca (cálcio) e do S (enxofre). O vidro sodocálcico é composto essencialmente por SiO_2 , Na_2O e CaO , sendo comprovados seus elementos constituintes através da Tabela 15, com a presença predominantemente de Si (silício), Ca (cálcio), Fe (ferro) e Al (alumínio). Acerca do policarbonato $(\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3)_n$ e geralmente empregando-se p-isopropilenodifenol (bisfenol A), os elementos constituintes da amostra analisada, de acordo com a Tabela 16, foram o Na (sódio), Si (silício) e S (enxofre), no entanto, no gráfico presente na Figura 23 pode-se observar que o maior pico para a faixa Ti-U é para o elemento C (carbono). Podendo-se sugerir a presença de impurezas e aditivos na amostra de gesso e a presença de tratamentos nas lentes e armações de policarbonato que geraram resíduos em forma de aparas aqui estudado.

A composição química de um material possibilita a compreensão das propriedades físicas de um material compósito, bem como sua densidade, solubilidade, ponto de fusão e à estrutura química do material, influenciando na resistência mecânica, tenacidade (resistência ao impacto), propriedades ópticas e zonas de fragilidade da peça. Influenciando, ainda, na forma de processamento do elemento químico, para obtenção de materiais com formas e propriedades específicas.

7 CONCLUSÃO

No presente trabalho fora realizado um estudo de avaliação e caracterização de um novo compósito cerâmico constituído de uma matriz de gesso e reforço cerâmico (resíduo de vidro) e polimérico termoplástico (policarbonato) destinado à substituição de materiais compostos por gesso utilizados no setor da Construção Civil em forma de placas para revestimento e acabamento.

A partir das análises aqui desenvolvidas pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- Por meio da caracterização física dos materiais, realizou-se o empacotamento dos grãos nas misturas, estando o resíduo de vidro cominuído entre as zonas ótima e utilizável da curva granulométrica, já o resíduo de aparas de policarbonato devido ter-se optado pela utilização o mais próximo possível da forma em que fora coletado para redução de consumo energético, manteve-se fora da curva. Acerca das massas específicas do gesso, vidro e policarbonato, os resultados obtidos são similares aos resultados encontrados na literatura e também nas pesquisas de Pedreño-Rojas et al. (2019) e Ferreira (2017), indicando conformidade do material empregado nos experimentos.
- A densidade no estado seco é resultante da razão entre a massa de cada corpo de prova pelo seu respectivo volume e, os proporcionamentos com maiores teores de policarbonato (P5V10 e P5V15) possuem menor densidade no estado seco aos 28 dias de cura seca. Em relação à variação da massa das peças no intervalo de 24 horas após desforma até os 28 dias de cura seca em ambiente laboratorial para as peças cujo ensaio de densidade foi aplicado, P1V5 e P3V15 apresentam o menor e o maior índice de variação, respectivamente.
- Verifica-se na análise microestrutural por microscopia óptica, com o emprego de estereomicroscópio, a presença de vazios nas peças de todas as misturas, provenientes de microbolhas de ar e água aprisionada evaporada que foram aprisionadas nas pastas durante as misturas do compósito. A identificação dos vazios com maior facilidade foi possível para as peças P1V5, P1V10, P1V15 e P3V5, conseqüentemente são as misturas com menores teores de resíduos. Foi possível identificar também a distribuição homogênea dos reforços de resíduos na matriz gesso, sobretudo para os espécimes dos proporcionamentos P5V10 e P5V15. No entanto, a presença de vazios nos corpos de prova analisados pode influenciar a resistência mecânica e durabilidade do material, para ataques de cloretos e absorção de água. A mistura com melhor desempenho nos ensaios mecânicos foi P3V5 com densidade média aos 28 dias de cura de 1,365 g/cm³.

- A resistência à compressão axial sofre influência da relação água/gesso, conformidade do material no processo de moldagem (homogeneização e adensamento da mistura), condições de cura, porosidade (por evaporação da água não consumida na reação de hidratação do gesso e/ou vazios na peça) e emprego de elementos como substituintes parciais ao gesso.
- A menor taxa de absorção média (diferença entre as médias de leituras finais e iniciais de cada traço) no intervalo de 24 horas, remete-se a P5V5, seguido por P3V5 e a maior para a mistura P5V10.
- Em relação ao desempenho mecânico dos proporcionamentos P0V0 a P5V15, através dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à flexão e dureza, os resultados atingidos viabilizam o emprego e indicam durabilidade do material compósito para fins de acabamento ou divisórias para a Construção Civil, excetuando-se para a resistência à flexão em que nenhum proporcionamento atingiu o mínimo definido em normativa (20 N/mm²) e para a resistência à compressão, pois P0V0 e P5V15 não alcançaram a resistência mínima definida em normativa de 8,4 MPa. Todas as misturas obtiveram resistências à flexão superiores a resistência mínima de 1 MPa e possuem similaridade com os resultados atingidos por Pedreño-Rojas et al. (2019).
- Os proporcionamentos P3V5, P0V0 (referência), P3V10 e P3V5 apresentaram dureza média elevada, porém não atingiram o mínimo indicado pela norma de 20 N/mm². Enquanto para a resistência média à compressão axial as melhores misturas foram P1V5, P3V5, P1V10 e P5V5. Em relação à resistência média à flexão, todos os proporcionamentos atingiram o mínimo indicado pela norma de 1 MPa, e evidencia-se, além da mistura de referência, P1V10, P1V5, P3V5 e P3V10.
- Para a composição química, através do ensaio de EDX, cálcio e o enxofre compõem majoritariamente o gesso, o silício, o cálcio e o ferro constituem predominantemente o vidro e, o sódio, o silício e o enxofre constituem hegemonicamente o policarbonato. Pode-se observar também a presença de impurezas e aditivos na amostra de gesso analisada.

Por fim, conclui-se que os melhores desempenhos para o material compósito, aos 28 dias de cura seca em ambiente laboratorial, frente os ensaios físicos de densidade no estado seco, análise microestrutural e absorção de água por capilaridade, ensaios de resistência mecânica à compressão axial, resistência mecânica à flexão com três apoios e de dureza, foram alcançados pelos proporcionamentos P3V5, P3V10 e P5V5. Destes, a melhor mistura para fins de emprego na Construção Civil pertence a P3V5, que confere maiores resistências mecânicas e menores índices de absorção de água por capilaridade e menor densidade média aos 28 dias.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos aqui realizados e descritos, sugere-se a continuidade da pesquisa através dos tópicos destacados a seguir:

- Realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do material compósito para cada proporcionamento;
- Ampliação das proporções de substituição do gesso pelos resíduos de vidro cominuído e de policarbonato, analisando os efeitos da substituição em teores elevados;
- Estudo de novas relações água-gesso e o emprego de aditivos retardadores de pega para o gesso;
- Avaliação do emprego de resíduo de policarbonato proveniente de injetoras de fabricação de óculos e lentes em forma de rebarbas e material endurecido ou com presença de bolhas, triturado e empregado como agregado, traçando um comparativo com o policarbonato em forma de aparas do processo de fabricação de óculos e lentes (flocado) frente as análises dos ensaios físicos e mecânicos;
- Análise de ciclo de vida do material compósito;
- Análise econômica e ambiental acerca da viabilidade para emprego de peças de revestimento compósito com matriz gesso confeccionadas com resíduos de policarbonato e vidro em substituição às peças de gesso de revestimento e acabamento para o setor da Construção Civil;
- Estudo de descarte e reciclagem de gesso de demolição com foco na sustentabilidade, valoração do material e preservação ambiental como matriz para o material compósito com reforço de resíduos de policarbonato e vidro.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE (Brasil). **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL: 2018/2019**. São Paulo: Abrelpe, 2019. 68 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- ABRELPE (Brasil). **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL: 2020**. São Paulo: Abrelpe, 2020. 52 p. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley M.; GOLDEMBERG, José (Coordenador). **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Volume 5 (Série Sustentabilidade). 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 141 p.
- ALVAREZ, Albino Rodrigues, *et al.*, organizadores. **Sustentabilidade ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem-estar humano**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, Ipea, 2010. 640 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry: **E 1621-21**. Philadelphia, 2021. 9 p.
- ANCAT. 2019. **ANUÁRIO DA RECICLAGEM 2017-2018**, São Paulo: Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis - ANCAT, 2019. 53 p.
- ANCAT. 2021. **ANUÁRIO DA RECICLAGEM 2020**, São Paulo: Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis - ANCAT, 2021. 55 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**: Gesso para construção civil - Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2019. 6 p.
- _____. **NBR 12128**: Gesso para construção civil - Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso. Rio de Janeiro, 2019. 5 p.
- _____. **NBR 12129**: Gesso para construção civil - Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2019. 6 p.
- _____. **NBR 13207**: Gesso para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017. 3 p.
- _____. **NBR 13230**: Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - Identificação e simbologia. Rio de Janeiro, 2008. 8 p.
- _____. **NBR 14910**: Embalagens de vidro para produtos alimentícios - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2003. 24 p.
- _____. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 7 p.
- _____. **7190-3**: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro, 2022. 36p.

_____. **7199**: Vidros na construção civil - Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro, 2016. 57 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019. 9 p.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**: Associação Brasileira de Cerâmica, [s. l], v. 60, n. 356, p. 501-508, set. 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/sBfG5vkZscNKqDcQmJLpWTv/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 19 dez. 2022.

BATISTA, Salomão Sávio. **UTILIZAÇÃO DE PÓS DE BAMBU E DE REJEITOS DE LENTES OFTÁLMICAS NA OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS**. 2021. 77 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2021.

BAUER, L. A. F. *et al.* **Materiais de Construção**. 5ª edição revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008. V. 1 e 2. 960 p.

BIRON, Michel. Recycling Plastics: Advantages and Limitations of Use. **A Practical Guide to Plastics Sustainability**, Elsevier, 2020, p. 411–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821539-5.00009-4>.

BRASIL. **Sumário Mineral Brasileiro 2018: Gipsita**. Brasília, DF: Agência Nacional de Mineração, 2018. 3 p. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/gipsita_sm_2018>. Acesso em: 19 dez. 2022.

_____. **Anuário Estatístico 2020: Setor de Transformação de Não Metálicos**, Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral, 2021. 101 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-2020-ano-base-2019.pdf>>. Acesso em 23 jan. 2022.

_____. **ANUÁRIO ESTATÍSTICO 2021: Setor de Transformação de Não Metálicos**, Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2022. 152 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatistico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf/view>>. Acesso em 23 jan. 2022.

_____. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: Presidência da República, 02 ago. 2010. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 04 jan. 2021.

_____. **Resolução Número 307**. DOU nº 136. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 17 jul. 2002. p. 95-96. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

_____. **Resolução Número 316**. DOU nº 224. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 20 nov. 2002. p. 92-95. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, V. 8 ed., 2012. 845 p.

CANEVAROLO, Sebastião V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2 ed., Artliber Editora, 2006. 280 p.

CARTER, C. Barry, NORTON, M. Grant. **Ceramic Materials: Science and Engineering**. 2 ed., Springer, 2007. 716 p.

FERREIRA, Fernanda Cavalcanti. **ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DO GESSO PARA REVESTIMENTO PRODUZIDO NO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**. 2017. 204 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2017.

FIGUEIREDO, Ênio Pazini; RÊGO, João Henrique da Silva. Materiais e Produtos Poliméricos. In: **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. rev. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 2, cap. 40, p. 1329-1354. ISBN 978-85-98576-19-0.

HERIYANTO; PAHLEVANI, Farshid; SAHAJWALLA, Veena. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 191, p. 192-206, ago. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual – Produto**. Tabela 7752 – Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos – Prodlists Indústria 2016 e 2019. Produto gesso ou gipsita. 2020. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7752#resultado>>. Acesso em: 23 jan. 2022.

ISAIA, Geraldo Cechylla. A Ciência e a Engenharia de Materiais de Construção Civil. In: ISAIA, Geraldo Cechylla. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. rev. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 1, cap. 1, p. 1-36. ISBN 978-85-98576-18-3.

JOHN, Vanderley M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, SP, 2000.

JOHN, Vanderley M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. rev. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 1, cap. 4, p. 95-118. ISBN 978-85-98576-27-5.

JOHN, Vanderley M.; CINCOTTO, Maria Alba. Gesso de Construção Civil. In: **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. rev. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 1, cap. 23, p. 727-760. ISBN 978-85-98576-27-5.

JOHN, Vanderley M.; GLEIZE, Philippe J. P. Materiais de Construção: Perspectivas e desafios futuros. In: **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. rev. São Paulo: IBRACON, 2017. v. 1, cap. 52, p. 1685-1695. ISBN 978-85-98576-27-5.

LACERDA, Leonardo de Moura; NUNES, Andréa Oliveira; PAIVA, Jane Maria Faulstich de; MORIS, Virgínia Aparecida da Silva. Avaliação dos impactos ambientais de um processo industrial utilizando como matéria-prima policarbonatos virgem e reciclado. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 1103-1113, dez. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019177627>.

MEDEIROS, Marcilio Sandro de, *et al.* A saúde no contexto do polo gesso de Araripina-Pernambuco, Brasil. **Saúde e Sociedade**, V. 19, N 2, São Paulo, junho de 2010, p. 358-70. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-12902010000200012>.

MOURA, Márcio Cleto Soares de. **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) RECICLADO (PET reciclado) COM FLOCOS DE VIDRO**. 2011. 140 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2011.

PEDREÑO-ROJAS, M.A.; MORALES-CONDE, M.J.; PÉREZ-GÁLVEZ, F.; RUBIO-DE-HITA, P.. Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: mechanical and environmental study. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 218, p. 21-37, maio 2019. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.200>.

PENNAFORT JUNIOR, Luiz Carlos Gonçalves. **APLICAÇÃO DA MECÂNICA DA DANIFICAÇÃO NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS RECICLADOS REFORÇADOS POR FIBRAS DE COCO**. 2015. 130 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2015.

POULIKAKOS, L.D.; PAPADASKALOPOULOU, C.; HOFKO, B.; GSCHÖSSER, F.; FALCHETTO, A. Cannone; BUENO, M.; ARRAIGADA, M.; SOUSA, J.; RUIZ, R.; PETIT, C.. Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 116, p. 32-44, jan. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>.

RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens; VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, [S.L.], v. 69, p. 24-58, nov. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.

RAMOS, Flávio James Humberto Tommasini Vieira; REIS, Raphael Henrique Morais; GRAFOVA, Iryna; GRAFOV, Andriy; MONTEIRO, Sergio Neves. Eco-friendly recycled polypropylene matrix composites incorporated with geopolymer concrete waste particles. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 3084-3090, maio 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.054>.

ROCHA, Janaíde Cavalcante; JOHN, Vanderley Moacyr. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Coleção Habitare, V. 4. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, ANTAC, 2003. 272 p.

SILVA, Sandro Pereira. **A ORGANIZAÇÃO COLETIVA DE CATADORES DE MATERIAL RECICLÁVEL NO BRASIL: DILEMAS E POTENCIALIDADES SOB A ÓTICA DA ECONOMIA SOLIDÁRIA**. Brasília: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017. 56 p. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2268.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2021.

SINGH, Ashwani Kumar; BEDI, Raman; KAITH, Balbir Singh. Composite materials based on recycled polyethylene terephthalate and their properties – A comprehensive review. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 219, p. 108928, ago. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108928>.

TOCANTINS. Lei nº 261, de 20 de fevereiro de 1991. **Da Política Ambiental do Estado do Tocantins**. Palmas, TO: Governo do Estado, 20 fev. 1991. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/225856/>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

TOCANTINS. Lei nº 3614, de 18 de dezembro de 2019. **Política Estadual de Resíduos Sólidos**. Palmas, TO: Governo do Estado, 18 dez. 2019. Disponível em: <https://www.al.to.leg.br/arquivos/lei_3614-2019_51046.PDF>. Acesso em: 04 jan. 2021.

UNE. **EN 13279-1: Gypsum binders and gypsum plasters - Part 1: Definitions and requirements**. Norma Europeia. Londres, 2008. 20 p.

VIEIRA, Natália Isabel Malüe. **Contribuição ao Estudo de Reciclagem de Policarbonato Advindo de Apreensão de Óculos pela Polícia Federal**. 2014. 61 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

WASSERMANN, Adriana Inés. **Processamento e Características Mecânicas de Resíduos Plásticos Misturados**. 2006. 85 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2006.

WU, Shenghua; MONTALVO, Luke. Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: a critical literature review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 280, p. 124355, jan. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124355>.

YOUNG, Robert J., LOVELL, Peter A. **Introduction to polymers**. 3 ed., CRC Press, 2011. 652 p.

ZHAO, Zifeng; XIAO, Feipeng; AMIRKHANIAN, Serji. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. **Waste Management**, [S.L.], v. 108, p. 78-105, maio 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>.

ZHU, Ping; LIU, Xiankai; WANG, Yangjun; GUAN, Chuanjin; YANG, Yazheng; ZHU, Jiahao; LI, Xuheng; QIAN, Guangren; FROST, Ray L.. Production and characterization of recycled polycarbonate based composite material containing recycled glass fibers. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 3439-3446, ago. 2017. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.06.050>.

ZULKERNAIN, Nur Hanis; GANI, Paran; CHUAN, Ng Chuck; UVARAJAN, Turkeswari. Utilisation of plastic waste as aggregate in construction materials: a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 296, p. 123669, ago. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123669>.

APÊNDICES

Na presente etapa do trabalho, são apresentados os seguintes apêndices:

- Apêndice A – Análise das Massas dos Corpos de Prova dos Proporcionamentos
- Apêndice B – Resultados do Ensaio de Densidade no Estado Seco
- Apêndice C – Análise de Variância dos Resultados do Ensaio de Densidade no Estado Seco
- Apêndice D – Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade
- Apêndice E – Análise de Variância dos Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade
- Apêndice F – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial
- Apêndice G – Análise de Variância dos Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial
- Apêndice H – Resultados do Ensaio de Flexão por Três Pontos
- Apêndice I – Análise de Variância dos Resultados do Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos
- Apêndice J – Resultados do Ensaio de Dureza
- Apêndice K – Análise de Variância dos Resultados do Ensaio de Dureza

**APÊNDICE A – ANÁLISE DAS MASSAS DOS CORPOS DE PROVA DOS
PROPORCIONAMENTOS**

Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento

(continua)

ANÁLISE DAS MASSAS DOS PROPORCIONAMENTOS						
Proporcio- namento	Substi- tuição RPC	Substi- tuição RV	Espécime	Massa no estado úmido (24h após desforma) (g)	Massa no estado seco (7 dias) (g)	Massa no estado seco (28 dias) (g)
P0V0	0	0	P0V0-1	208,74	175,85	175,76
			P0V0-2	210,72	175,86	175,67
			P0V0-3	214,63	175,67	175,47
			P0V0-4	221,08	183,41	183,23
			P0V0-5	230,25	186,96	184,93
			P0V0-6	225,29	181,34	180,02
			P0V0-7	417,36	354,45	353,72
			P0V0-8	410,35	343,12	342,54
			P0V0-9	394,78	331,29	330,94
			P0V0-10	410,28	342,4	342,07
			P0V0-11	382,26	340,79	340,53
			P0V0-12	412,96	351,04	350,79
P1V5	1%	5%	P1V5-1	188,76	168,89	168,7
			P1V5-2	203,97	174,31	170,59
			P1V5-3	205,97	174,52	172,14
			P1V5-4	195,69	160,58	160,36
			P1V5-5	212,76	179,48	177,09
			P1V5-6	206,12	170,15	167,62
			P1V5-7	424,88	364,14	346,16
			P1V5-8	420,61	354,77	341,03
			P1V5-9	409,65	339,17	332,18
			P1V5-10	366,95	322,15	321,59
			P1V5-11	389,95	326,12	325,82
			P1V5-12	416,35	343,6	343,3

Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento

				(continuação)		
Proporcio- namento	Substi- tuição RPC	Substi- tuição RV	Espécime	Massa no estado úmido (24h após desforma) (g)	Massa no estado seco (7 dias) (g)	Massa no estado seco (28 dias) (g)
P1V10	1%	10%	P1V10-1	196,18	168,28	168,05
			P1V10-2	222,91	186,55	178,86
			P1V10-3	215,79	181,5	170,88
			P1V10-4	224,43	180,16	179,85
			P1V10-5	204,59	174,05	163,61
			P1V10-6	235,36	199,98	184,53
			P1V10-7	405,68	356,63	318,36
			P1V10-8	414,15	363,25	326,56
			P1V10-9	412,39	357,06	327,53
			P1V10-10	423,64	355,17	336,42
			P1V10-11	408,72	332,42	329,03
			P1V10-12	392,68	328,6	328,26
P1V15	1%	15%	P1V15-1	253,08	201,72	200,82
			P1V15-2	216,12	181,28	174,76
			P1V15-3	222,94	188,11	172,34
			P1V15-4	213,23	171,83	171,46
			P1V15-5	214,01	174,07	170,76
			P1V15-6	198,52	164,09	154,96
			P1V15-7	437,48	382,83	342,1
			P1V15-8	397,94	346,83	313,39
			P1V15-9	399,43	342,09	316,61
			P1V15-10	397,69	330,32	317,52
			P1V15-11	400,7	323,21	318,67
			P1V15-12	375,91	311,08	310,7
P3V5	3%	5%	P3V5-1	226,65	186,61	186,35
			P3V5-2	210,8	174,93	166,88
			P3V5-3	215,6	185,29	170,9
			P3V5-4	187,13	156,66	156,44
			P3V5-5	213,5	182,53	171,11
			P3V5-6	234,69	207,82	184,34
			P3V5-7	401,25	350,57	316,89
			P3V5-8	403,34	349,62	317,26
			P3V5-9	432,83	368,46	341,83
			P3V5-10	385,38	312,31	306,25
			P3V5-11	393,55	316,81	315,93
			P3V5-12	404,83	334,94	334,6

Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento

(continuação)

Proporcionamento	Substituição RPC	Substituição RV	Espécime	Massa no estado úmido (24h após desforma) (g)	Massa no estado seco (7 dias) (g)	Massa no estado seco (28 dias) (g)
P3V10	3%	10%	P3V10-1	210,08	172,14	171,63
			P3V10-2	213,92	185,48	168,24
			P3V10-3	223,27	195,6	172,61
			P3V10-4	212,75	168,24	167,81
			P3V10-5	208,89	182,27	163,22
			P3V10-6	212,72	191,9	164,61
			P3V10-7	401,34	360,2	315,08
			P3V10-8	435,86	386,52	341,82
			P3V10-9	398,2	340,83	312,07
			P3V10-10	419,95	345,9	329,69
			P3V10-11	437,53	351,43	346,66
			P3V10-12	393,05	322,84	322,5
P3V15	3%	15%	P3V15-1	201,07	163,58	161,56
			P3V15-2	230,73	202,67	180,68
			P3V15-3	215,3	187,27	167,49
			P3V15-4	229,53	183,82	178,9
			P3V15-5	195,22	168,43	152,82
			P3V15-6	209,9	185,16	162,28
			P3V15-7	408,14	361,46	316,5
			P3V15-8	403,42	349,13	312,31
			P3V15-9	396,91	337,96	307,04
			P3V15-10	436,45	358,14	340,17
			P3V15-11	426,19	339,44	335,01
			P3V15-12	388,62	313,9	313,56
P5V5	5%	5%	P5V5-1	184,28	155,01	154,81
			P5V5-2	206,92	167,9	164,9
			P5V5-3	218,49	181,75	172,07
			P5V5-4	212,87	181,76	181,53
			P5V5-5	222,56	185,17	184,86
			P5V5-6	212,66	171,17	167,93
			P5V5-7	360,49	290,56	287,49
			P5V5-8	384,08	311,03	309,21
			P5V5-9	395,54	327,67	326,71
			P5V5-10	396,21	319,76	318,73
			P5V5-11	407,65	329,85	329,3
			P5V5-12	399,29	320,82	320,52

Tabela 17 – Análise das Massas dos Espécimes de Cada Proporcionamento

Proporcio- namento	Substi- tuição RPC	Substi- tuição RV	Espécime	(conclusão)		
				Massa no estado úmido (24h após desforma) (g)	Massa no estado seco (7 dias) (g)	Massa no estado seco (28 dias) (g)
P5V10	5%	10%	P5V10-1	198,7	156,33	156,14
			P5V10-2	195,86	152,65	151,67
			P5V10-3	207,19	161,87	161,54
			P5V10-4	205,96	161,47	161,3
			P5V10-5	202,7	161,39	159,62
			P5V10-6	194,53	153,46	153,03
			P5V10-7	396,5	313,28	311,38
			P5V10-8	419,34	352,08	328,85
			P5V10-9	422,7	361,96	326,38
			P5V10-10	399,68	345,44	305,24
			P5V10-11	427,91	369,49	331,51
			P5V10-12	413,52	326,71	322,48
P5V15	5%	15%	P5V15-1	209,91	171,65	171,45
			P5V15-2	204,44	164,97	160,53
			P5V15-3	189,94	155,92	154,78
			P5V15-4	180,27	151,2	151,02
			P5V15-5	181,58	144,39	143,5
			P5V15-6	203,72	162,47	161,41
			P5V15-7	377,56	304,44	302,16
			P5V15-8	414,6	352,76	328,63
			P5V15-9	425,69	360,38	331,66
			P5V15-10	391,97	325,15	307,44
			P5V15-11	353,43	283,75	276,17
			P5V15-12	397,47	318,01	317,58

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO SECO

Tabela 18 – Resultados Individuais do Ensaio de Densidade no Estado Seco

		Densidade no Estado Seco		
Proporcionamento	Espécime	Densidade (g/cm³)		
		1 dia	7 dias	28 dias
P0V0	P0V0-4	1,769	1,467	1,466
	P0V0-5	1,842	1,496	1,479
	P0V0-6	1,802	1,451	1,440
P1V5	P1V5-4	1,566	1,285	1,283
	P1V5-5	1,702	1,436	1,417
	P1V5-6	1,649	1,361	1,341
P1V10	P1V10-4	1,795	1,441	1,439
	P1V10-5	1,637	1,392	1,309
	P1V10-6	1,883	1,600	1,476
P1V15	P1V15-4	1,706	1,375	1,372
	P1V15-5	1,712	1,393	1,366
	P1V15-6	1,588	1,313	1,240
P3V5	P3V5-4	1,497	1,253	1,252
	P3V5-5	1,708	1,460	1,369
	P3V5-6	1,878	1,663	1,475
P3V10	P3V10-4	1,702	1,346	1,342
	P3V10-5	1,671	1,458	1,306
	P3V10-6	1,702	1,535	1,317
P3V15	P3V15-4	1,836	1,471	1,431
	P3V15-5	1,562	1,347	1,223
	P3V15-6	1,679	1,481	1,298
P5V5	P5V5-4	1,703	1,454	1,452
	P5V5-5	1,780	1,481	1,479
	P5V5-6	1,701	1,369	1,343
P5V10	P5V10-4	1,648	1,292	1,290
	P5V10-5	1,622	1,291	1,277
	P5V10-6	1,556	1,228	1,224
P5V15	P5V15-4	1,442	1,210	1,208
	P5V15-5	1,453	1,155	1,148
	P5V15-6	1,630	1,300	1,291

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE C – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE DENSIDADE NO ESTADO SECO

Tabela 19 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Densidade no Estado Seco

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
P0V0	3	4,737	1,579	0,038
P1V5	3	4,346	1,449	0,027
P1V10	3	4,657	1,552	0,037
P1V15	3	4,354	1,451	0,036
P3V5	3	4,518	1,506	0,029
P3V10	3	4,460	1,487	0,035
P3V15	3	4,443	1,481	0,037
P5V5	3	4,588	1,529	0,030
P5V10	3	4,143	1,381	0,039
P5V15	3	3,945	1,315	0,028
1 dia	10	16,807	1,681	0,007
7 dias	10	13,934	1,393	0,008
28 dias	10	13,451	1,345	0,005

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas (Proporcionamento)	0,169632	9	0,019	25,459	1,84424E-08	2,456
Colunas (Dias)	0,658126	2	0,329	444,489	4,77616E-16	3,555
Erro	0,013326	18	0,001			
Total	0,841084	29				

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE D – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Tabela 20 – Resultados Individuais do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Proporcio- namento	Espécime	Absorção de Água por Capilaridade					
		Massa (g) vs Tempo Médio Submerso (min)					
		0 min (massa seca)	5 min	30 min	60 min	360 min	1440 min
P0V0	P0V0-8	342,54	427,24	431,34	431,31	432,02	433,12
	P0V0-11	340,53	419,45	428,91	428,95	430,02	430,84
	P0V0-12	350,79	423,65	442,45	442,63	443,6	444,42
P1V5	P1V5-7	346,16	421,26	440,7	440,8	441,87	443,21
	P1V5-8	341,03	423,15	434,71	434,85	435,66	436,84
	P1V5-9	332,18	406,32	422,74	422,95	423,76	424,97
P1V10	P1V10-7	318,36	396,27	405,43	405,92	406,28	407,56
	P1V10-9	327,53	414,56	418,01	417,72	418,29	419,37
	P1V10-10	336,42	430,75	431,6	431,89	432,48	433,5
P1V15	P1V15-7	342,1	400,34	436,67	437,5	439,03	440,63
	P1V15-8	313,39	397,33	401,5	401,29	402,33	403,59
	P1V15-11	318,67	406,22	410,18	410,46	411	412,44
P3V5	P3V5-7	316,89	374,27	399,94	401,44	402,76	404,23
	P3V5-8	317,26	375,58	401,22	402,27	403,61	405,13
	P3V5-12	334,6	414,5	424,24	424,78	426,18	427,66
P3V10	P3V10-9	312,07	379,97	400,09	400,44	401,29	402,75
	P3V10-10	329,69	400,9	422,4	422,56	423,54	424,71
	P3V10-11	346,66	437,89	444,93	445,1	445,71	446,87
P3V15	P3V15-7	316,5	406,65	407,69	408,12	408,78	409,89
	P3V15-8	312,31	373,01	402,81	403,14	404,19	405,47
	P3V15-10	340,17	436,79	438,45	438,83	439,4	440,77
P5V5	P5V5-7	287,49	345,28	366,7	367,4	369,11	370,47
	P5V5-10	318,73	384,5	405,69	406,48	408,28	410,01
	P5V5-12	320,52	386,4	409,07	410,04	411,47	412,8
P5V10	P5V10-8	328,85	423,02	424,4	424,89	425,35	426,83
	P5V10-9	326,38	419,83	420,1	420,13	420,79	422,01
	P5V10-11	305,24	386,81	398,63	399,36	400,36	401,88
P5V15	P5V15-7	302,16	376,34	388,32	388,73	390	391,82
	P5V15-9	331,66	416,91	427,06	427,77	428,52	430,23
	P5V15-11	276,17	350,86	356,39	356,8	357,66	359,26

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

**APÊNDICE E – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE
ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE**

Tabela 21 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
P0V0	6	2507,937	417,989	1313,653
P1V5	6	2491,053	415,176	1409,087
P1V10	6	2417,313	402,886	1370,837
P1V15	6	2394,890	399,148	1370,997
P3V5	6	2352,187	392,031	1226,781
P3V10	6	2429,190	404,865	1411,641
P3V15	6	2397,657	399,609	1431,798
P5V5	6	2263,480	377,247	1211,374
P5V10	6	2391,620	398,603	1482,523
P5V15	6	2252,220	375,370	1264,392
Tempo 0 min (massa seca)	10	3244,350	324,435	154,080
Tempo 5 min	10	4018,683	401,868	270,047
Tempo 30 min	10	4147,457	414,746	204,522
Tempo 60 min	10	4151,517	415,152	198,213
Tempo 360 min	10	4161,113	416,111	193,651
Tempo 1440 min	10	4174,427	417,443	188,498

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas (Proporcionamento)	10484,626	9,000	1164,958	132,224	2,46233E-29	2,096
Colunas (Tempo)	67068,948	5,000	13413,790	1522,485	5,51498E-49	2,422
Erro	396,471	45,000	8,810			
Total	77950,044	59,000				

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE F – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Tabela 22 – Resultados Individuais do Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Resistência à Compressão Axial		
Proporcio- namento	Espécime	Tensão de Ruptura (MPa)
P0V0	P0V0-1	4,70
	P0V0-2	3,90
	P0V0-3	6,00
P1V5	P1V5-1	15,10
	P1V5-2	9,30
	P1V5-3	14,80
P1V10	P1V10-1	11,50
	P1V10-2	9,80
	P1V10-3	12,60
P1V15	P1V15-1	8,00
	P1V15-2	13,00
	P1V15-3	8,70
P3V5	P3V5-1	10,80
	P3V5-2	12,60
	P3V5-3	15,50
P3V10	P3V10-1	10,10
	P3V10-2	9,90
	P3V10-3	11,30
P3V15	P3V15-1	10,70
	P3V15-2	13,10
	P3V15-3	9,10
P5V5	P5V5-1	11,20
	P5V5-2	11,30
	P5V5-3	11,20
P5V10	P5V10-1	10,10
	P5V10-2	9,60
	P5V10-3	12,60
P5V15	P5V15-1	6,20
	P5V15-2	8,70
	P5V15-3	7,20

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE G – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Tabela 23 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
P0V0	2	13,267	6,633	6,242
P1V5	2	21,467	10,733	10,889
P1V10	2	19,700	9,850	4,205
P1V15	2	18,300	9,150	1,125
P3V5	2	21,367	10,683	10,427
P3V10	2	18,833	9,417	2,067
P3V15	2	19,367	9,683	3,294
P5V5	2	19,633	9,817	4,014
P5V10	2	19,167	9,583	2,801
P5V15	2	15,767	7,883	0,534
Resistência Média à Compressão (MPa)	10	102,867	10,287	6,178
Exigência Normativa para Resistência à Compressão Axial (MPa)	10	84,000	8,400	3,506E-30

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas (Proporcionamentos)	27,800	9,000	3,089	1,000	0,500	3,179
Colunas (Resistência à Compressão)	17,798	1,000	17,798	5,762	0,040	5,117
Erro	27,800	9,000	3,089			
Total	73,398	19,000				

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE H – RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO POR TRÊS PONTOS

Tabela 24 – Resultados Individuais do Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos

Resistência à Flexão por Três Pontos		
Proporcio- namento	Espécime	Tensão de Ruptura (MPa)
P0V0	P0V0-07	4,4
	P0V0-09	3,9
	P0V0-10	4,9
P1V5	P1V5-10	3,3
	P1V5-11	2,7
	P1V5-12	3,1
P1V10	P1V10-08	3,1
	P1V10-11	3,5
	P1V10-12	3,4
P1V15	P1V15-09	2,8
	P1V15-10	2,4
	P1V15-12	2,3
P3V5	P3V5-09	2,9
	P3V5-10	2,7
	P3V5-11	2,5
P3V10	P3V5-07	2,6
	P3V5-08	3,1
	P3V5-12	2,2
P3V15	P3V15-09	2,2
	P3V15-11	2,2
	P3V15-12	2,3
P5V5	P5V5-08	2,1
	P5V5-09	2,4
	P5V5-11	2,2
P5V10	P5V10-10	2,4
	P5V10-7	2,2
	P5V10-12	2,2
P5V15	P5V15-08	2,3
	P5V15-10	1,8
	P5V15-12	2,1

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE I – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR TRÊS PONTOS

Tabela 25 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Resistência à Flexão por Três Pontos

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
P0V0	2	5,400	2,700	5,780
P1V5	2	4,033	2,017	2,067
P1V10	2	4,333	2,167	2,722
P1V15	2	3,500	1,750	1,125
P3V5	2	3,700	1,850	1,445
P3V10	2	3,633	1,817	1,334
P3V15	2	3,233	1,617	0,761
P5V5	2	3,233	1,617	0,761
P5V10	2	3,267	1,633	0,802
P5V15	2	3,067	1,533	0,569
Resistência Média à Flexão (MPa)	10	27,400	2,740	0,495
Exigência Normativa para Resistência à Flexão (MPa)	10	10,000	1,000	0,000

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas (Proporcionalamentos)	2,228	9,000	0,248	1,000	0,500	3,179
Colunas (Resistência à Flexão)	15,138	1,000	15,138	61,162	2,652E-05	5,117
Erro	2,228	9,000	0,248			
Total	19,593	19,000				

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE J – RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA

Tabela 26 – Resultados Individuais do Ensaio de Dureza

Dureza				
Proporcio- namento	Espécime	Força de Ruptura (kgf)*	Força de Ruptura (N)	Dureza (N/mm²)
P0V0	P0V0-4	397	3893,240	12,393
	P0V0-5	457,2	4483,600	14,272
	P0V0-6	401,2	3934,428	12,524
P1V5	P1V5-4	246,4	2416,359	7,692
	P1V5-5	242,8	2381,055	7,579
	P1V5-6	240,9	2362,422	7,520
P1V10	P1V10-4	374	3667,687	11,675
	P1V10-5	105,2	1031,660	3,284
	P1V10-6	172,5	1691,647	5,385
P1V15	P1V15-4	122,7	1203,276	3,830
	P1V15-5	147,6	1447,462	4,607
	P1V15-6	168,0	1647,517	5,244
P3V5	P3V5-4	363,3	3562,756	11,341
	P3V5-5	439,4	4309,042	13,716
	P3V5-6	363,0	3559,814	11,331
P3V10	P3V10-4	471,7	4625,797	14,724
	P3V10-5	459,8	4509,098	14,353
	P3V10-6	323,8	3175,393	10,108
P3V15	P3V15-4	306,6	3006,719	9,571
	P3V15-5	332,5	3260,711	10,379
	P3V15-6	410,9	4029,552	12,826
P5V5	P5V5-4	453,6	4448,296	14,159
	P5V5-5	429,0	4207,053	13,391
	P5V5-6	387,9	3804,000	12,109
P5V10	P5V10-4	383,4	3759,870	11,968
	P5V10-5	336,7	3301,899	10,510
	P5V10-6	371,4	3642,190	11,593
P5V15	P5V15-4	209,8	2057,435	6,549
	P5V15-5	218,6	2143,734	6,824
	P5V15-6	244,8	2400,668	7,642

* Força de ruptura obtida no ensaio dos espécimes em máquina universal de ensaios EMIC através do método de ensaio para Madeira Dureza Janka 10tf em peças com dimensões (50x50x50) mm

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

APÊNDICE K – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA

Tabela 27 – Análise de Variância com Dois Fatores sem Repetição: Resultados do Ensaio de Dureza

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
P0V0	2	33,063	16,531	24,063
P1V5	2	27,597	13,798	76,919
P1V10	2	26,781	13,391	87,370
P1V15	2	24,561	12,280	119,188
P3V5	2	32,129	16,065	30,974
P3V10	2	33,062	16,531	24,071
P3V15	2	30,925	15,463	41,174
P5V5	2	33,220	16,610	22,986
P5V10	2	31,357	15,679	37,349
P5V15	2	27,005	13,502	84,438
Dureza Média (N/mm ²)	10	99,699	9,970	10,115
Exigência Normativa para Dureza (N/mm ²)	10	200	20	0

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas (Proporcionamentos)	45,520	9	5,058	1,000	0,5	3,179
Colunas (Dureza)	503,012	1	503,012	99,454	3,7E-06	5,117
Erro	45,520	9	5,058			
Total	594,051	19				

Fonte: Elaborado pela autora (2023).