



UFRPE

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

JACKSON JOSÉ DOS SANTOS

Incorporação de resíduos de processamento de polímeros de REEE na produção de
concreto

Cabo de Santo Agostinho - PE

2021

JACKSON JOSÉ DOS SANTOS

Incorporação de resíduos de processamento de polímeros de REEE na produção de concreto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Rural de Pernambuco - UFRPE para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física

Área de concentração: Materiais
Orientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda
Coorientador: Profa. Dra. Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

Cabo de Santo Agostinho – PE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

J14i

Santos, Jackson José dos Santos
Incorporação de resíduos de processamento de polímeros de REEE na produção de concreto /
Jackson José dos Santos Santos. - 2021.
74 f. : il.

Orientador: Romildo Morant de Holanda.
Coorientadora: Fernanda Wanderley Correa de .
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física, Cabo de Santo Agostinho, 2021.

1. Compósito. 2. Compressão. 3. Tração na flexão. 4. Carcaça polimérica. I. Holanda, Romildo Morant de, orient. II. , Fernanda Wanderley Correa de, coorient. III. Título

CDD 621

JACKSON JOSÉ DOS SANTOS

Incorporação de resíduos de processamento de polímeros de REEE na produção de concreto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física

Aprovada em: 03/09/2021

Banca Examinadora

Orientador – Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda

Coorientadora – Profa. Dra. Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

Examinador externo – Prof. Dr. Francisco das Chagas da Costa Filho

Examinador interno – Profa. Dra. Verônica Cristhina de Souza Diniz

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida e por me dar a capacidade e a oportunidade de concluir esse trabalho.

Aos meus pais, José Antônio e Erica Ferreira, pelos ensinamentos e apoio em todos os momentos da minha vida. Aos meus filhos, Jackson Lindemberg, Davi Lucas e Lorena Sofia, que também foram minhas fontes de inspiração. À Brunileide Maria, minha esposa, que sempre esteve do meu lado me apoiando.

À minha sogra, Dege Maria, que nos deixou recentemente, mas que me ajudou bastante nessa trajetória.

Aos amigos, por todo apoio e companheirismos. Em especial: Felipe Bezerra e Bergson Nascimento; por me apoiarem na realização da seleção; Emanuel Joaquim, Jéssica Beatriz, Anderson Oliveira, Sebastião Pinto, Robson Vieira e Aline Melo, por sempre estarem próximos ao longo do programa; Leonardo Santiago; Dassaele Felix, Karoline Stefany, Leonardo Santiago e Alisson Torquato, por sempre estarem disponíveis para trocarmos conhecimentos.

Ao Centro de Reciclagem de Computadores de Pernambuco (CRC-PE), pelos resíduos fornecidos para os ensaios. Em especial a Sávio e Marcos pela troca de informações e paciência.

Ao PPPEngFis, por todo apoio e dedicação. Em especial: Prof^a Dra Martine Chevrollier, Prof^a Dra Verônica Diniz, Prof. Dr. Albert Ocas, Prof. Vinícius Dantas e ao Prof. Dr. Marcos Gomes, pelo conhecimento e pelo ótimo convívio; e aos demais docentes do programa, assim como todos que fazem parte do programa.

Aos amigos do CITAR, grupo de pesquisa, pela paciência, dedicação e disponibilidade. Em especial: José Henrique, Átyla Rego, Ana Luiza, e Paulo Ferraz.

À indústria de cimento Elizabeth Cimentos, pelo fornecimento do cimento para pesquisa. Em especial: Os Srs. Degmar Peixoto, Vilmar Manoel e José Ailton.

À UFRPE (sede) e UACSA, pela disponibilização dos laboratórios de Materiais de Construção e o Laboratório de Caracterização de Materiais.

RESUMO

Com desenvolvimento tecnológico e as relações humanas cada vez mais dependente das tecnologias, estabeleceu-se a obsolescência programada, aumentando a demanda por aparelhos eletrônicos mais modernos e o descarte dos aparelhos considerados ultrapassados ou danificados, gerando os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Com isso, o objetivo deste trabalho foi estudar a incorporação da carcaça polimérica triturada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) na produção de concreto para fins estruturais, em substituição parcial do agregado graúdo. Para a realização do trabalho, o polímero foi coletado na empresa Reecycle, Recife-PE, e foram realizadas as caracterizações químicas e físicas dos materiais naturais e do resíduo, para posterior dosagem dos traços, sendo um traço padrão (convencional) e três traços com a adição do resíduo polimérico em substituição volumétrica à brita, em três proporções: 5, 10 e 20%. Conforme os resultados da pesquisa, o resíduo polimérico se apresentou como um alto potencial agregado alternativo, sobretudo na proporção de 5%, verificando-se que os compósitos alcançaram os valores de resistência de 29,2 MPa, 22,7 MPa e 20,7 MPa, respectivamente para as proporções de 5, 10 e 20%, sendo compatíveis com as exigências mínimas da norma técnica brasileira vigente, justificando, assim, suas possíveis aplicações em elementos de estruturas. Contudo, a diminuição do teor de brita resultou em maior porosidade e redução da resistência mecânica do compósito.

Palavras-chave: Compósito; Compressão; Tração na flexão; Carcaça polimérica.

ABSTRACT

With technological development and human relations increasingly dependent on technologies, the programmed obsolescence was established, increasing the demand for current electronic devices and the disposal of devices considered outdated, generating the waste of electro-electronic equipment. With this, the objective of this work was to study the incorporation of crushed polymeric housing of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in the production of conventional concrete for structural purposes, as partial replacement of coarse aggregate. To carry out the work, the polymer was collected from the company Reecicle, Recife-PE, and the chemical and/or physical characterizations of the components of concrete (cement, sand, crushed stone and polymer) were performed, for subsequent dosage of the mixtures, being a standard (conventional) mix and three mixtures with the addition of polymeric residue in volumetric replacement to the crushed stone, in three proportions: 5, 10 and 20%. In the characterizations, scanning electron microscopy (SEM) with coupled EDS was used, in addition to compressive strength and flexural tensile tests. According to the research results, the polymer proved to be a potential alternative aggregate, verifying that the composites developed were compatible with the requirements of the Brazilian technical standard in force, thus justifying their possible applications in structural elements, however, the decrease in gravel content resulted in greater porosity and lower mechanical strength of the composite. It was also verified the occurrence of delayed ettringite in the material.

Keywords: Composite; Compression; Bending tensile; Polymeric housing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores que variam a resistência mecânica do concreto.	17
Figura 2 – Relação entre a resistência à compressão e o valor de a/c.	18
Figura 3 – Relação entre a resistência à compressão e tipo de agregado.....	20
Figura 4 – Ensaio de tronco cônico.	25
Figura 5 – Frasco + areia + água em banho.	26
Figura 6 – Pesagem hidrostática do agregado em água.....	28
Figura 7 – Placa de calibração sobre o balde.	30
Figura 8 – Recipiente com areia e brita.....	30
Figura 9 – Areia no frasco de Chapman.....	32
Figura 10 – Determinação da relação a/c pela curva de Abrams.....	33
Figura 11 – Modelo esquemático do ensaio de abatimento.	34
Figura 12 – Corpos de prova moldados.	35
Figura 13 – Representação dos ensaios de compressão (a) e tração na flexão (b). 37	
Figura 14 – Curva granulométrica da areia.	44
Figura 15 – Curva granulométrica da brita.	48
Figura 16 – Correlação entre a resistência à compressão e o índice de vazios.....	61
Figura 17 – Interação entre a pasta de cimento e o polímero.	62
Figura 18 – EDS da interface entre pasta de cimento e polímero no concreto com 5% de resíduo.	63
Figura 19 – Etringita tardia no concreto com 5% de polímero rompido aos 28 dias..	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de cimento Portland normatizados no Brasil.....	16
Tabela 2 – Características físicas do CP II-Z.	23
Tabela 3 – Quantitativo de corpos de prova moldados.	36
Tabela 4 – Composição granulométrica da areia.	43
Tabela 5 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	44
Tabela 6 – Composição granulométrica da brita.	47
Tabela 7 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.	48
Tabela 8 – Consumo de água aproximado (L/m ³).....	50
Tabela 9 – Volume compactado seco (V _c) do agregado graúdo por m ³ de concreto.	51
Tabela 10 – Dados da dosagem do concreto padrão.....	53
Tabela 11 – Volume real para um saco de cimento.	54
Tabela 12 – Volume real e massa de cada componente para moldagem de um corpo de prova.	54
Tabela 13 – Dosagem para a produção de 16 corpos de prova cilíndricos de concretos por traço.....	55
Tabela 14 – Dosagem para a produção de 8 corpos de prova prismáticos de concretos por traço.....	55
Tabela 15 – Resistência característica por corpo de prova (MPa).	56
Tabela 16 – Estatística descritiva dos traços.	57
Tabela 17 – Análise de Variância para a resistência à compressão.	58
Tabela 18 – Teste de Tukey para a resistência à compressão.	58
Tabela 19 – Resistência à tração na flexão por corpo de prova (MPa).....	59
Tabela 20 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão.....	59
Tabela 21 – Teste de Tukey para a resistência à tração na flexão.	60
Tabela 22 – Valores médios de absorção, índice de vazios e massa específica dos compósitos.	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01 – Massa específica do cimento.	24
Equação 02 – Massa unitária compactada do cimento.	24
Equação 03 – Massa específica do agregado seco (areia).....	26
Equação 04 – Volume de água adicionada ao frasco.	26
Equação 05 – Massa específica do agregado saturado superfície seca (areia).	27
Equação 06 – Massa específica (areia).	27
Equação 07 – Massa específica do agregado seco (brita).....	28
Equação 08 – Massa específica do agregado saturado superfície seca (brita).....	29
Equação 09 – Massa específica aparente (brita).	29
Equação 10 – Massa unitária dos agregados.	30
Equação 11 – Teor de umidade da areia.	32
Equação 12 – Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos.	37
Equação 13 – Controle estatístico do ensaio de resistência à compressão.....	38
Equação 14 – Absorção de água.	38
Equação 15 – Massa específica da amostra seca (corpo de prova).	39
Equação 16 – Massa específica da amostra saturada (corpo de prova).....	39
Equação 17 – Massa específica real (corpo de prova).	39
Equação 18 – Índice de vazios (corpo de prova).	39
Equação 19 – Consumo de cimento.	50
Equação 20 – Consumo de brita.	51
Equação 21 – Volume de areia para determinação do consumo.	52
Equação 22 – Consumo de areia.	52
Equação 23 – Determinação do traço do concreto.	53
Equação 24 – Volume do molde do corpo de prova.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 O CIMENTO PORTLAND	15
3.2 O CONCRETO	16
3.3 A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NO CONCRETO	19
3.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	20
4 METODOLOGIA	22
4.1 RESÍDUOS DE CARÇAÇAS POLIMÉRICAS	22
4.2 CIMENTO PORTLAND	23
4.3 AGREGADOS	24
4.3.1 Massa específica do agregado miúdo	25
4.3.2 Massa específica do agregado graúdo	27
4.3.3 Massa unitária dos agregados	29
4.3.4 Granulometria dos agregados	31
4.3.5 Teor de umidade do agregado miúdo	31
4.4 DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO	32
4.4.1 Definição da relação água cimento do concreto	33
4.4.2 Determinação da consistência do concreto	34
4.4.3 Moldagem dos corpos de prova	35
4.4.4 Ensaio de resistência à compressão e tração na flexão	36
4.4.5 Controle estatístico dos ensaios de resistência à compressão	38
4.4.6 Ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica	38
4.4.7 Microscopia do corpo de prova rompido	39
5 RESULTADOS	40
5.1 CARACTERIZAÇÕES DO CIMENTO PORTLAND	40
5.1.1 Determinação da massa específica do cimento	40
5.1.2 Determinação da massa unitária do cimento	40
5.2 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO MIÚDO	41
5.2.1 Massa específica da areia	41

5.2.2 Massa unitária da areia	42
5.2.3 Composição granulométrica da areia	43
5.2.4 Teor de umidade da areia	45
5.3 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO GRAÚDO	45
5.3.1 Massa específica da brita	45
5.3.2 Massa unitária da brita	46
5.3.3 Composição granulométrica da brita	46
5.3.4 Determinação da massa unitária do polímero	49
5.4 PARÂMETROS PARA A DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO DA ABCP	49
5.4.1 Consumo de água (C_a)	49
5.4.2 Consumo de cimento (C)	50
5.4.3 Consumo de agregado miúdo (C_m) e agregado graúdo (C_b)	51
5.4.4 Determinação do traço	53
5.4.5 Análise dos resultados de resistência à compressão	56
5.4.6 Análise dos resultados de resistência à tração na flexão	59
5.4.7 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos compósitos	60
5.4.8 Análise microestrutural do concreto com resíduos poliméricos	62
6. CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	72
APÊNDICE B – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T5 ...	73
APÊNDICE C – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T10 .	74
APÊNDICE D – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T20 .	75

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento tecnológico e a relação cada vez mais estreita entre os seres humanos e as tecnologias, o conceito de obsolescência programada se tornou mais palpável para a humanidade, diante da necessidade de se manter tecnologicamente atualizado.

Conforme Rossini e Napolini (2017), a obsolescência programada, também conhecida como obsolescência de qualidade, se dá quando um produto é fabricado e programado para uma menor vida útil, a fim de que o consumidor busque uma solução tecnológica mais atualizada. Assim, ao mesmo passo em que aumenta a demanda por aparelhos eletrônicos atuais, também aumenta o descarte dos aparelhos considerados ultrapassados, formando o denominado resíduo eletrônico.

Até 2016, cerca de 44,7 milhões de toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEEs) eram produzidos no mundo anualmente, sendo o Brasil responsável por 1,5 milhões de toneladas, ocupando o posto de maior produtor de REEEs da América Latina e o segundo em todo continente americano (BALDÉ *et al.*, 2017). Segundo Oliveira *et al.* (2021), a previsão de produção do resíduo para 2021 é de 52,2 milhões de toneladas.

São classificados como REEEs as baterias recarregáveis e não recarregáveis, placas de circuito impresso, gabinetes e dispositivos periféricos de computadores, aparelhos audiovisuais, aparelhos de telefonia, consoles e afins, que alcançaram o tempo máximo de vida útil, seja por prejuízo ao devido funcionamento ou por obsolescência tecnológica (KASPER *et al.*, 2010).

Os REEEs são constituídos sobretudo de polímeros, responsáveis pela estrutura e formato do produto primário, podendo também conter vidros, bem como alguns metais, dos quais pode-se destacar ferro, alumínio e cobre, frações de metais preciosos e metais altamente tóxicos como chumbo e mercúrio (MORF *et al.*, 2007).

Paralelamente, a indústria de materiais de construção busca substituir seus insumos por materiais alternativos, a fim de reduzir seus custos e minimizar os impactos ambientais decorrentes da extração de matéria-prima. Santos (2015) destaca que apesar da construção civil ser um dos setores que mais impactam o meio ambiente, ela também tem uma grande capacidade de absorver resíduos em seus processos.

Lucas e Benatti (2008) destacaram que a utilização dos resíduos sólidos por parte da construção civil reduz os custos ligados ao gerenciamento dos resíduos e possibilita uma alternativa de viabilidade técnica para a produção de blocos, tijolos, telhas, lajotas e tubos.

Diante do exposto, fazem-se necessários estudos que investiguem a viabilidade de incorporar resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em materiais de construção, visando uma melhor destinação, podendo gerar benefícios financeiros para a construção civil e conservação do meio ambiente.

2 OBJETIVOS

Foram definidos os seguintes objetivos para realização do presente trabalho:

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a incorporação da carcaça polimérica triturada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) na produção de concreto alternativo para fins estruturais, como substituição parcial do agregado graúdo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicamente os componentes para a produção do concreto;
- Obter os traços para os compósitos;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos concretos desenvolvidos, a partir das metodologias da NBR;
- Analisar estatisticamente os resultados do ensaio de resistência à compressão e à tração na flexão;
- Analisar a interação entre a pasta de cimento e o polímero no concreto rompido, utilizando a técnica da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland, também chamado de cimento hidráulico, é um material aglomerante de boa durabilidade, boa resistência à compressão, baixa resistência à tração, ruptura frágil e baixa capacidade de deformação, cujas reações químicas ocorrem a partir do contato com a água (RODRIGUES, 2015).

O material é obtido pela moagem e mistura de argila e calcário, submetidos a um forno rotativo, em aproximadamente 1400°C. Esse processo é denominado de calcinação, que resulta no clínquer, que posteriormente é finamente moído e misturado a uma pequena quantidade de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuja função é retardar o endurecimento do material (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

Segundo Bauer (2008), o cimento é constituído por óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de magnésio (MgO), pequenos teores de anidrido sulfúrico (SO_3) e menores proporções de: óxidos de potássio (K_2O), óxido de sódio (Na_2O), óxido de titânio (TiO_2), óxido de manganês (Mn_3O_4) e anidrido fosfórico (P_2O_5).

Segundo Kanning (2013), o processo de hidratação do cimento se dá pela hidrólise da pasta (cimento + água); primeiramente pelos aluminatos e posteriormente pelo aumento da resistência dos silicatos, conferindo o enrijecimento.

Pouco tempo após o início da reação, os silicatos mudam de fase, resultando em silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência da pasta a esforços mecânicos (JOHN; CINCOTTO; SILVA, 2003); e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), responsável por preencher os espaços ocupados pela água (KANNING, 2013).

Existem oito tipos de cimento Portland regulamentados no Brasil, que se diferem na composição e no objetivo da aplicação (BATTAGIN; BATTAGIN, 2011). Na tabela 1 é possível observar as composições dos diferentes tipos de cimento Portland existentes no país.

Tabela 1 – Tipos de cimento Portland normatizados no Brasil.

Tipo	Sigla	Classes	Clínquer + Gesso (%)	Escória (%)	Pozolana (%)	Pó Calcário (%)
Comum	CP I	25, 32, 40	95 - 100	0 - 5	0 - 5	0 - 5
Comum com adição	CP I-S	25, 32, 40	90 - 94	–	–	6 - 10
Composto com Escória	CP II-E	25, 32, 40	51 - 94	6 - 34	–	0 - 15
Composto com Pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	71 - 94	–	6 - 14	0 - 15
Composto com Carbonato	CP II-F	25, 32, 40	75 - 89	–	–	11 - 25
Alto-Forno	CP III	25, 32, 40	25 - 65	35 - 75	–	0 - 10
Pozolânico	CP IV	25, 32, 40	45 - 85	–	15 - 50	0 - 10
Alta Resistência Inicial	CP V	-	90 - 100	–	–	0 - 10
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	75 - 100	–	–	0 - 25
Branco Não Estrutural	CPB	–	50 - 74	–	–	26 - 50

Fonte: Adaptada de ABNT (2018).

3.2 O CONCRETO

Segundo Helene e Andrade (2010), o concreto é constituído pela mistura do cimento Portland com água e agregados (miúdo e graúdo), onde a pasta formada pela mistura do aglomerante com a água é fluida ao ponto de envolver os agregados, permitindo que o material seja moldado nas primeiras horas, porém, o material vai adquirindo resistência com o passar do tempo devido à hidratação do cimento.

Diante das suas propriedades, destacando-se o desempenho mecânico, a boa resistência à compressão, resistência à água, maleabilidade, capacidade de incorporação de reforços e baixo custo justificam as variadas aplicações do concreto na construção civil, sobretudo em estruturas (BASTOS, 2002).

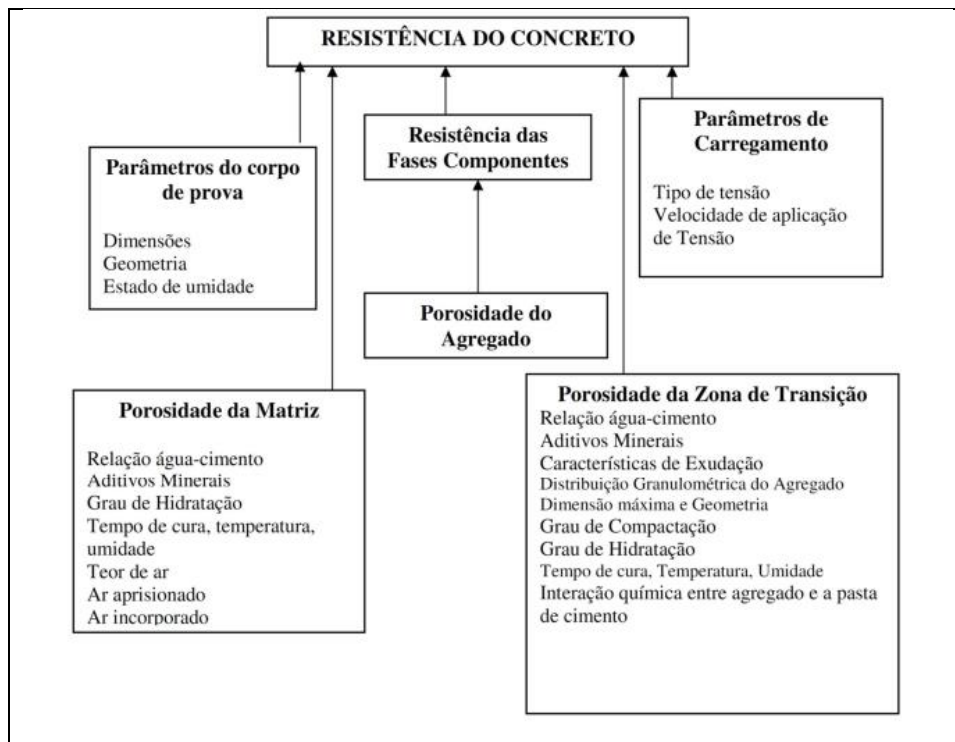
Sobre os estados físicos do compósito, o concreto fresco deve apresentar trabalhabilidade, homogeneidade e coesão; enquanto o concreto endurecido deve apresentar resistências à compressão, à tração e à abrasão, impermeabilidade, elasticidade e durabilidade (MARTINS, 2008).

As propriedades dos constituintes influenciam diretamente nas propriedades do concreto, com isso, a dosagem do concreto é a metodologia para obter a melhor proporção entre os materiais componentes, podendo ser definida pela massa ou pelo

volume dos constituintes. A dosagem deve ser norteadada pelo cálculo da resistência média de dosagem, da correlação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento (a/c) e da sustentabilidade do processo (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

A resistência à compressão do concreto é medida através da moldagem de corpos de prova com o material, e estes são submetidos a forças axiais em prensas, até o momento do seu rompimento. Os fatores que influenciam na resistência à compressão do material estão relacionados na figura 1 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 1 – Fatores que variam a resistência mecânica do concreto.

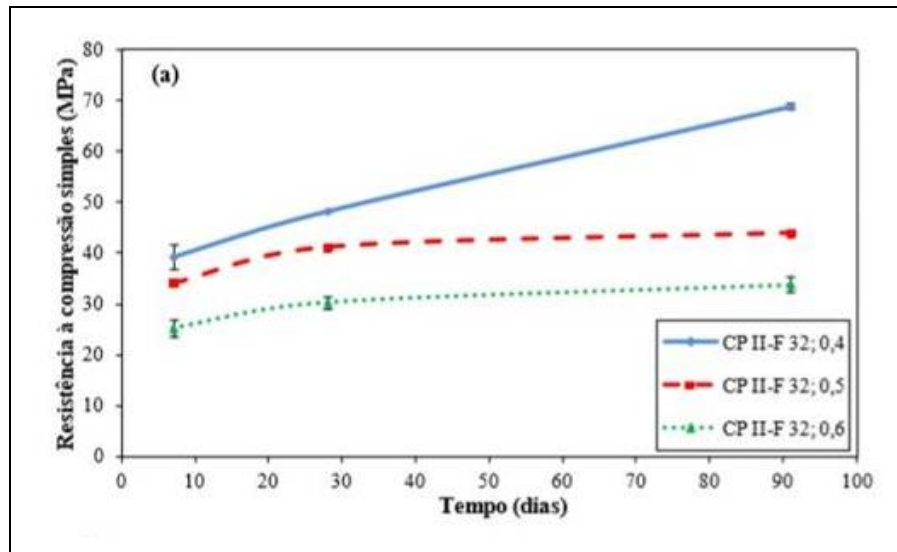


Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

A influência da relação água/cimento (a/c) nas propriedades mecânicas do concreto se dá a partir da fluidez, permeabilidade e porosidade da pasta de cimento hidratada, que tem efeito direto nos valores de resistência mecânica do material (LOPES, 1999).

Medeiros Júnior *et al.* (2014) desenvolveram concretos com diferentes relações água/cimento e observaram que o acréscimo de água provocou o aumento do valor da relação e conseqüentemente diminuiu a resistência à compressão, conforme a figura 2.

Figura 2 – Relação entre a resistência à compressão e o valor de a/c .



Fonte: Medeiros Júnior *et al.* (2014).

No caso do concreto de alta resistência (CAR), a relação a/c não é a grande influência na resistência mecânica do compósito, uma vez que, a resistência, a forma e a textura dos agregados são os fatores fundamentais para tal (HELENE; ANDRADE, 2010).

Já o concreto autoadensável (CAA) é um concreto fluido, rico em adições químicas, que são as grandes responsáveis por suas propriedades, normalmente moldado *in loco*, sem vibrações, de modo que o material tenha o mínimo de espaços vazios e falhas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme Bauer (2008), aditivos são materiais não essenciais ao concreto, que podem ser adicionados ao compósito imediatamente antes ou durante a mistura, em pequenas proporções, para reforçar ou fazer aparecer determinadas características especiais, sendo classificados em: modificadores da trabalhabilidade; modificadores da resistência mecânica; modificadores da resistência em condições especiais de exposição; modificadores do tempo de pega; impermeabilizantes; expansores; adesivos; anticorrosivos; e corantes.

Os aditivos químicos mais utilizados no país são os modificadores da trabalhabilidade, também chamados de plastificantes, que reduzem o consumo de cimento entre 6% e 15%, podendo não alterar a quantidade de água e modificando a consistência do material (CORRÊA, 2010).

A durabilidade do concreto depende de fatores extrínsecos (condições ambientais) e dos fatores intrínsecos. Essa propriedade está relacionada aos mecanismos de transporte ou penetração de agentes agressivos nos poros do material (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

3.3 A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NO CONCRETO

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os agregados desempenham funções importantes em concretos e argamassas, influenciando diretamente na trabalhabilidade e índice de vazios; enquanto, Giaccio *et al.* (2020) destacam que a diferença de dureza entre o aglomerante e os agregados provoca tensões na região de interface desses materiais, resultando no surgimento de fissuras.

Os agregados são materiais particulados, de diferentes formas e tamanhos e inertes, sendo classificados quanto à origem ou quanto ao tamanho dos grãos (BAUER, 2008).

Sbrighi Neto (2011) classifica os agregados quanto à origem em: naturais, quando encontrados na natureza sem nenhum beneficiamento; britados, quando submetidos ao processo de cominuição; artificiais, quando são derivados de processos industriais; e reciclados, quando são resíduos industriais granulares de outros materiais.

Para a classificação de Ambrozewicz (2012), o critério é o tamanho dos grãos: agregados miúdos são areias naturais ou derivadas de britagem, cujos grãos de maior tamanho passam pelo menos 85% na peneira ABNT de 4,8 mm; e agregados graúdos são pedregulhos ou britas que passam pela peneira nominal de 152 mm e ficam 85% retidos na peneira ABNT de 4,8 mm.

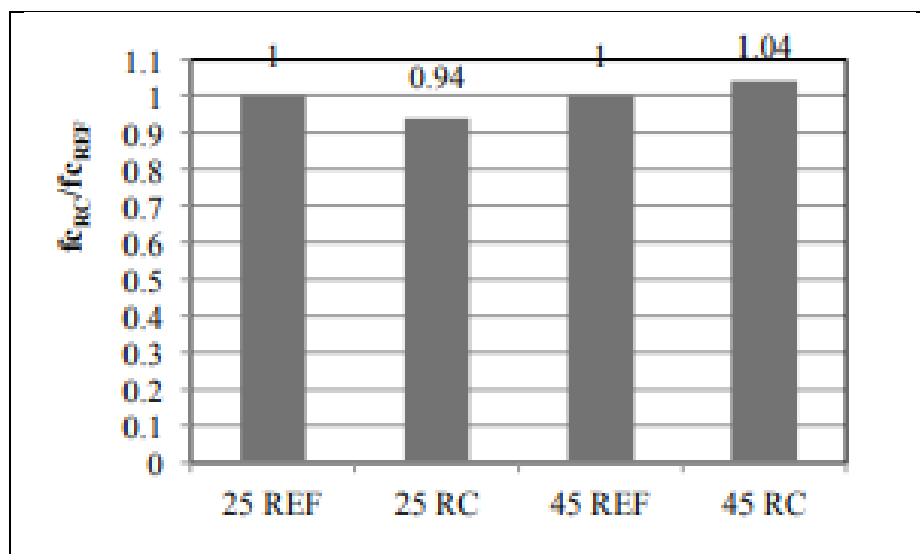
Segundo Fabro *et al.* (2011), os agregados influenciam nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, além de representarem cerca de 75% do volume do concreto, segundo e Ambrozewicz (2012).

Ainda conforme Fabro *et al.* (2011), o estado fresco do concreto sofre influência direta da porosidade, da massa específica, do teor de umidade, da composição granulométrica, da forma e textura superficial dos agregados, que ditam o consumo da pasta de cimento no compósito.

Não obstante, as propriedades do concreto dependem das propriedades dos seus constituintes, com isso, os agregados miúdos atuam na resistência à compressão, durabilidade e trabalhabilidade do compósito (CUNHA, 2020), e os agregados graúdos influenciam na resistência mecânica e no módulo de elasticidade (POMPEU NETO; OLIVEIRA; RAMOS, 2011).

Leite e Costa (2014) avaliaram a influência do tipo de agregado na resistência à compressão dos concretos, produzindo um concreto com brita e outro utilizando resíduos de construção civil. Os autores observaram que o concreto para 25 MPa, utilizando o resíduo como agregado, teve uma redução da resistência em relação ao concreto padrão, enquanto no concreto para 45 MPa apresentou um melhor resultado, conforme a figura 3.

Figura 3 – Relação entre a resistência à compressão e tipo de agregado.



Fonte: Leite e Costa (2014).

3.4 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Gabriel *et al.* (2013) observaram que os polímeros amplamente utilizados nas carcaças dos equipamentos eletroeletrônicos são ABS e HIPS (poliestireno de alto impacto), que possuem um bom desempenho mecânico e podem ser reutilizados em diferentes setores da indústria. Ainda segundo os autores, as condições de armazenamento e uso na vida útil no equipamento influenciam diretamente nos resultados dos ensaios mecânicos desses materiais.

Vrenna e Reis (2017) utilizaram ABS e HIPS triturados, provenientes de carcaças de equipamentos eletroeletrônicos, na produção de bloco cerâmico, em substituição parcial mássica da brita. Os autores obtiveram um compósito com resistência à compressão média de 4,5 MPa, impossibilitando o seu uso como um bloco para fins estruturais, porém, pode ser utilizado como um bloco de alvenaria de vedação.

Almeida (2017) identificou que as carcaças poliméricas dos equipamentos eletroeletrônicos descartados normalmente eram destinadas aos aterros, com isso, propôs valorizar o resíduo a partir da incorporação do polímero no concreto, como substituição do agregado graúdo. A autora substituiu a brita pelo polímero triturado, sendo este HIPS, nas proporções de 5%, 8%, 10%, 15% e 20% em massa, constatando uma redução gradual da consistência conforme aumentou o teor de polímero, o que acarretou a necessidade de um acréscimo de massa de água, porém, todos os concretos apresentaram resistência à compressão característica superior a 20 MPa, evidenciando a viabilidade da incorporação do resíduo no material, conforme a norma NBR 12655 (ABNT, 2015).

Patrício (2018) adicionou a carcaça polimérica de TVs de LED na produção de concretos. O autor utilizou o polímero triturado do tipo ABS, nas proporções de 5%, 10% e 15% em relação à densidade do concreto convencional.

No trabalho, notou-se que conforme aumentou o teor de polímero no traço, maior foi a consistência e menor foi a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, porém, a massa de água foi mantida constante em todos os traços.

Também foi destacada a redução na densidade do concreto, devido ao material ser mais leve. E sobre a resistência à compressão, o autor concluiu que a adição pouco interferiu nos resultados, viabilizando o uso desse resíduo na produção do concreto.

4 METODOLOGIA

Primeiramente, foram descritos os ensaios de caracterização dos componentes do compósito, para melhor descrever os procedimentos de processamento do concreto, visto que a dosagem do concreto depende das informações preliminares dos seus componentes.

4.1 RESÍDUOS DE CARÇAÇAS POLIMÉRICAS

O material polimérico utilizado no presente trabalho foi obtido na empresa Reecycle, localizada na cidade do Recife-PE. Foram coletadas carcaças poliméricas diversas, de diversos equipamentos eletroeletrônicos, destacando o polímero do tipo acrilonitrila butadieno estireno (ABS) como o mais presente entre os resíduos utilizados.

O Reecycle atua recebendo doações de dispositivos eletrônicos, sobretudo computadores, de pessoas físicas, jurídicas e órgãos públicos. Esses computadores passam por uma avaliação e dependendo do grau do dano verificado, os mesmos podem ser remanufaturados para revenda ou descartados. Os aparelhos descartados passam por um segundo processo, que envolve a desmontagem e separação dos componentes. Nesta etapa, o material polimérico dos aparelhos (carcaça) é armazenado visando uma futura reciclagem.

Para a realização desse trabalho, as carcaças foram trituradas em um triturador da marca plastimax máquinas, pertencente à própria empresa cedente. O material já triturado foi levado ao Laboratório de Materiais de Construção da UFRPE para realização das demais etapas.

Seguindo as determinações da NBR 7211/2019: Agregados para concreto – Especificação (ABNT, 2019), o polímero triturado foi separado com uma peneira granulométrica com abertura de malha de 4,75 mm, sendo aproveitado apenas o material retido, por estar em concordância com a granulometria de agregado graúdo.

Também foi determinada a massa unitária do resíduo, conforme a NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2006). Realizou-se apenas o referido ensaio com o polímero devido a este ser amplamente utilizado e suas características serem de fácil obtenção em fichas técnicas catalogadas.

4.2 CIMENTO PORTLAND

No trabalho, usou-se o cimento Portland tipo CP II-Z 32, produzido e doado pela Cimento Elizabeth, localizada no município de Alhandra/PB, classificado conforme as características estabelecidas pela norma NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018b). As características do material estão resumidas na tabela 2, destacando que os valores estão dentro dos padrões normativos.

Tabela 2 – Características físicas do CP II-Z.

Características Físicas	Unidade	Valores Médios	Normas (ABNT)
Massa específica	g/cm ³	3,02	NBR 16605/2017
Área específica	cm ² /g	4546	NBR 16372/2015
Início de pega	horas	02:57	NBR 16607/2018
Fim de pega	horas	03:56	NBR 16607/2018
Resistência à compressão 1 dia	MPa	11,1	NBR 7215/2019
Resistência à compressão 3 dias	MPa	23	NBR 7215/2019
Resistência à compressão 7 dias	MPa	27,3	NBR 7215/2019
Resistência à compressão 28 dias	MPa	35,3	NBR 7215/2019

Fonte: Adaptada do boletim técnico fornecido pela Elizabeth Cimentos (2020).

Com o material, realizou-se o ensaio de massa específica conforme a NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017), para confirmação do dado repassado pela fabricante.

Para tal, foi utilizado o frasco de Le Chatelier; balança de precisão; funil; termômetro; e xileno, conforme recomendação da referida norma. Encheu-se o frasco de Le Chatelier com o xileno até o nível compreendido entre as marcas de zero e um cm³ da vidraria; e após 30 minutos imerso em água, foi realizada a primeira leitura volumétrica.

Foram pesados 60 g do cimento, sendo este depositado no frasco, que mais uma vez foi imerso em água por 30 minutos. Após esse procedimento foi realizada a segunda leitura do volume, onde foi possível determinar a massa específica do material conforme a equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

Onde,

ρ : Massa específica do cimento (g/cm³);

m : Massa do cimento ensaiado (g);

V_2 : Volume da segunda leitura (cm³);

V_1 : Volume da primeira leitura (cm³).

Para determinação da massa unitária compactada do cimento foi aplicada a metodologia proposta por Cunha (2020) e Silva (2021), utilizando-se uma proveta contendo cimento até a marca de 100 mL, que previamente foi submetido à vibração em uma frequência de 10 Hz.

Com a massa da proveta com o cimento, massa da proveta vazia e volume da proveta, utilizou-se a equação 2 para o cálculo da massa unitária compactada do cimento.

$$\rho_{unit.} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2)$$

Onde,

$\rho_{unit.}$: Massa unitária do cimento compactado (Kg/m³);

m_1 : Massa do recipiente vazio (Kg);

m_2 : Massa do recipiente + cimento (Kg);

V : Volume do recipiente (m³).

4.3 AGREGADOS

Nesta seção serão descritos os métodos de caracterização dos agregados (areia e brita) utilizados, etapa de fundamental importância para a dosagem do concreto. Os materiais aqui descritos foram obtidos no comércio e caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE.

4.3.1 Massa específica do agregado miúdo

Conforme a ABNT (2009c), na norma NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, foram utilizados tais equipamentos para aplicação do ensaio: molde tronco cônico; haste de compactação metálica; balança de precisão; Erlenmeyer de 500 cm³; e estufa. Reservou-se um quilo de areia e posteriormente o material foi submerso em água por 24 horas. Em seguida, a areia foi submetida à secagem natural.

Depois da secagem, aplicou-se o molde de tronco cônico, onde a areia foi compactada por 25 golpes com a haste de compactação. A areia na condição ideal deve manter uma dada umidade superficial, de modo que o cone não se desmorone ao retirar o molde pela primeira vez, conforme a figura 4.

Figura 4 – Ensaio de tronco cônico.

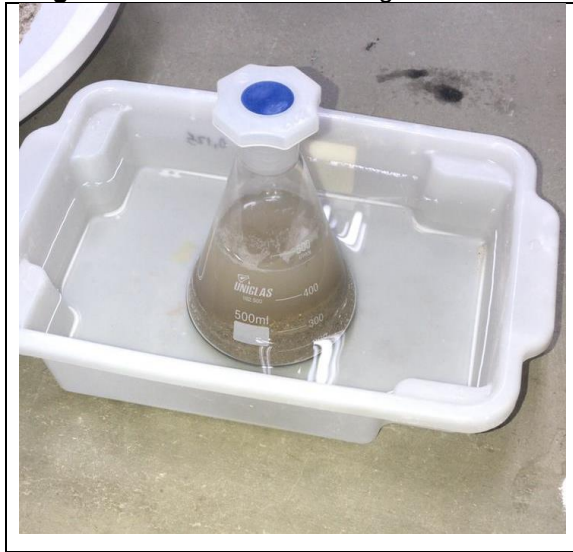


Fonte: Arquivo do autor (2020).

Após o desmoronamento do cone de areia, o material atingiu o seu ponto de saturada superfície seca (PSSS); onde pesou-se 500 g da amostra e esta foi armazenada no Erlenmeyer, registrando a massa do conjunto frasco + areia. Em seguida, preencheu-se o Erlenmeyer com água até próximo dos 500 cm³ e o conjunto foi colocado em banho por uma hora, conforme a figura 5.

Em seguida, completou-se o recipiente com água até os 500 cm³ e foi registrada a massa do conjunto frasco + areia + água. Logo após, retirou-se o material do frasco e o submeteu à estufa, sob 110°C, por 24 horas. Após ser retirado da estufa, aguardou-se o resfriamento da areia e foi registrada a sua massa seca.

Figura 5 – Frasco + areia + água em banho.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Utilizou-se as seguintes equações para obtenção dos dados:

- Massa específica do agregado seco (d_1)

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (3)$$

Onde,

m : Massa seca da areia após estufa (g);

V : Volume do frasco (cm^3);

V_a : Volume de água adicionada ao frasco (cm^3), obtido pela equação 4:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (4)$$

Onde,

m_2 : Massa do frasco + agregado + água (g);

m_1 : Massa do frasco + agregado (g);

ρ_a : Massa específica da água (g/cm^3).

- Massa específica do agregado saturado superfície seca (d_2)

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (5)$$

Onde,

m_s : Massa da amostra saturada superfície seca (g);

V : Volume do frasco (cm^3);

V_a : Volume de água adicionada ao frasco (cm^3).

- Massa específica (d_3)

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (6)$$

Onde,

m : Massa seca da areia após estufa (g);

V : Volume do frasco (cm^3);

V_a : Volume de água adicionada ao frasco (cm^3);

m_s : Massa da amostra saturada superfície seca (g);

ρ_a : Massa específica da água (g/cm^3).

A massa específica do agregado saturado superfície seca (d_2) é importante para o cálculo do teor de umidade da areia, enquanto a massa específica (d_3) será aplicada na dosagem dos compósitos.

4.3.2 Massa específica do agregado graúdo

Conforme a NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009d), utilizou-se no ensaio: balança; cesto metálico com abertura máxima de malha de 3,35 mm; tanque de isopor; e estufa.

Em acordo com a norma, foram utilizados três quilos de brita para o ensaio, devido à dimensão máxima característica do material adquirido (19 mm). Logo após, a brita foi lavada e seca em estufa, sob 110°C, durante 24 horas.

Após o resfriamento, o agregado foi submetido à água por 24 horas e, posteriormente, seco em pano absorvente, para eliminação do excesso de água superficial. Com isso, foi pesado para obtenção da massa na condição saturada superfície seca.

Após, a brita foi depositada no cesto metálico e submersa no tanque com água, para registro da massa do material imerso, conforme a figura 6. A água foi mantida num intervalo de temperatura entre 21°C e 25°C.

Figura 6 – Pesagem hidrostática do agregado em água.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Depois, o agregado foi posto na estufa, a 110°C, por mais 24 horas. Após o resfriamento natural, teve sua massa novamente registrada. A partir daí, utilizou-se as seguintes equações:

- Massa específica do agregado seco (d)

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (7)$$

Onde,

m: Massa do agregado seco (g);

m_a : Massa do agregado em água (g).

- Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (d_s)

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (8)$$

Onde,

m_s : Massa do agregado na condição saturada superfície seca (g);

m_a : Massa do agregado em água (g).

- Massa específica aparente (d_a)

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (9)$$

Onde,

m: Massa do agregado seco (g);

m_s : Massa do agregado na condição saturada superfície seca (g);

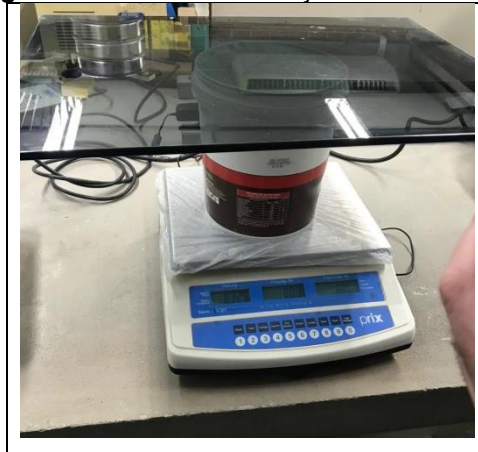
m_a : Massa do agregado em água (g).

4.3.3 Massa unitária dos agregados

A norma NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios estabelece os seguintes equipamentos para a realização do ensaio: balança de precisão; recipiente cilíndrico; termômetro; estufa; e placa de vidro para calibração (ABNT, 2006).

Inicialmente, foram registradas as massas do balde seco e completo com água. O balde com água foi submetido a uma placa de vidro para eliminação das bolhas de ar e do excesso de água, conforme a figura 7, sendo retirada logo após para a devida pesagem. Com isso, calculou-se a massa específica da água e a partir de uma relação com a massa de água adicionada no balde, foi obtido o volume (V) do recipiente.

Figura 7 – Placa de calibração sobre o balde.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Foi definido o método C do ensaio da norma, devido aos agregados serem soltos. Com isso, preencheu-se o balde com areia ou brita e em seguida as bordas do recipiente foram niveladas com o auxílio de uma régua, conforme a figura 8.

Figura 8 – Recipiente com areia e brita.



Fonte: arquivo do autor (2020).

Após isso, registrou-se a massa dos agregados junto com o recipiente e a massa unitária de cada agregado foi calculada a partir da equação 10:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (10)$$

Onde,

ρ_{ap} : Massa unitária do agregado (Kg/m³);

m_{ar} : Massa do recipiente mais agregado (Kg);

m_r : Massa do recipiente vazio (Kg);

V : Volume do recipiente (m³).

4.3.4 Granulometria dos agregados

O ensaio de granulometria dos agregados é importante para a determinação da dimensão máxima característica e do módulo de finura, que são fundamentais para o cálculo da dosagem do material.

Segundo a NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003), a dimensão máxima característica do agregado se dá pela malha onde o agregado fica retido em cerca de 5% em massa; e o módulo de finura, pela soma das porcentagens retidas da massa do agregado nas peneiras da série normal, dividida por 100. Conforme a norma, utilizou-se 300 g de areia seca em estufa, por 24 horas, em uma temperatura de 110°C; que após resfriada naturalmente, foi peneirada sob agitação por 10 minutos, em uma frequência de 15 Hz, em um agitador de peneiras. Após o processo de peneiramento, o conteúdo contido em cada peneira foi pesado separadamente.

Para a brita com dimensão máxima nominal de 19 mm, foram pesados cinco quilos do agregado, que foi submetido à estufa, sob 110°C, por 24 horas. Logo após, o material foi resfriado naturalmente e depositado nas peneiras. O peneiramento se deu através do agitador, por 10 minutos, com uma frequência de 15 Hz. Logo após, o material retido em cada peneira foi pesado.

4.3.5 Teor de umidade do agregado miúdo

Essa determinação é importante para o cálculo de dosagem do concreto, uma vez que o teor de umidade da areia influencia na relação água/cimento, considerando a massa de água total do sistema.

A NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio, define os seguintes equipamentos para a realização do ensaio: balança; e o frasco de Chapman (ANBT, 2012).

Inicialmente, foram pesados 500 g de areia e encheu-se a vidraria com água até 200 mL. Após a adição da água, foi adicionada a areia com auxílio de um funil e inclinou-se o frasco em aproximadamente 45°, que foi levemente agitado para eliminar as bolhas de ar.

Em seguida, aguardou-se 45 segundos, com o frasco em superfície plana, para realização da leitura do volume ocupado pelo agregado, conforme figura 9. E então, utilizou-se a equação 11 para determinação do teor de umidade:

$$h = \frac{[500 - (V - 200) * \gamma]}{(V - 700) * \gamma} \times 100 \quad (11)$$

Onde,

h: Teor de umidade (%);

V: Volume de areia lido no frasco de Chapman (mL);

γ : Densidade na condição saturada de superfície seca, conforme o ensaio de massa específica da areia (g/mL).

Figura 9 – Areia no frasco de Chapman.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

4.4 DESENVOLVIMENTO DO CONCRETO

Nessa seção serão abordados os passos para a produção do concreto, desde o método de dosagem, abordando a metodologia de mistura e moldagem, aos ensaios mecânicos relacionados ao material produzido.

4.4.1 Definição da relação água cimento do concreto

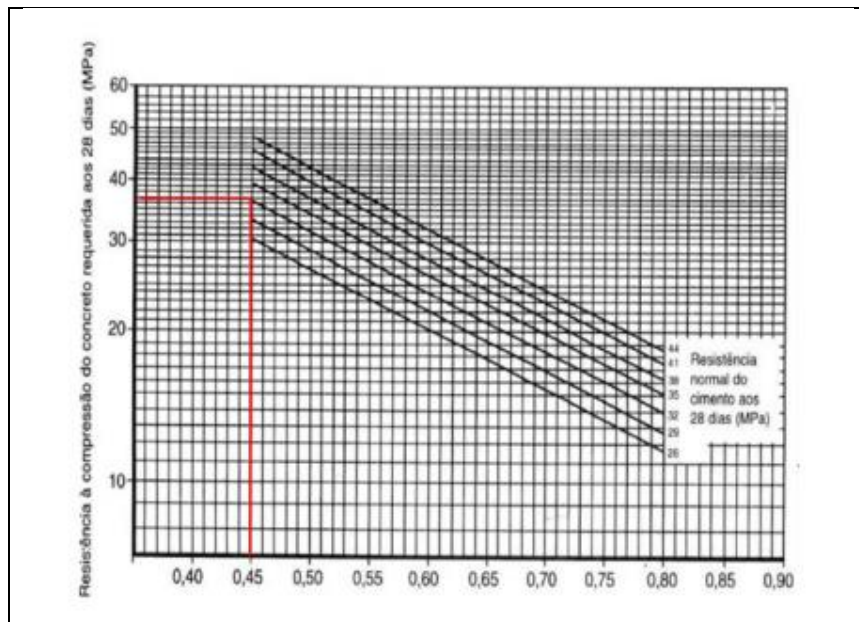
Inicialmente, definiu-se que o concreto seria da classe C30, para balizar os cálculos do traço do material, conforme a NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência; devendo ter resistência característica à compressão de 30 MPa aos 28 dias de moldagem (ABNT, 2015a).

O traço padrão foi determinado a partir do estudo de dosagem recomendado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, por este ser amplamente utilizado no Brasil (RODRIGUES, 1995).

Foi adotada a condição “A” de preparo do concreto, conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015b), levando em conta a dosagem dos componentes em massa e a correção da quantidade de água pela umidade dos agregados.

Com a escolha da condição de preparo, a resistência média da dosagem (f_{cmj}) obtida foi de 36,60 MPa. Lançando o valor obtido do f_{cmj} na curva de Abrams, encontrou-se uma relação água/cimento (a/c) de 0,45, conforme a figura 10. A curva foi determinada pela classe do cimento Elizabeth CP II – Z – 32.

Figura 10 – Determinação da relação a/c pela curva de Abrams.



Fonte: Adaptada de Rodrigues (1995).

4.4.2 Determinação da consistência do concreto

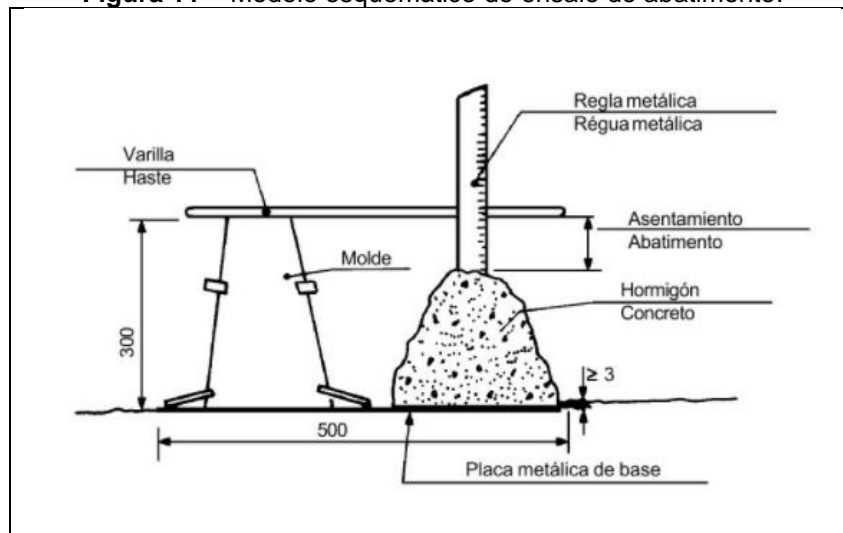
A mistura do concreto foi realizada a partir da norma NBR 12821: Preparo de concreto em laboratório – Procedimentos (ABNT, 2009b), sendo realizada em betoneira de 120 litros, porém, com capacidade máxima de 80 litros de concreto.

Imediatamente após cada betonada, visando o controle da consistência do concreto, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme metodologia da NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 1998).

Na execução do procedimento, foi umidificada a placa da base, bem como o molde e o funil; e, com o molde preso pelos pés, o mesmo foi preenchido com o concreto em duas camadas, onde cada camada foi adensada por 25 golpes pela haste de adensamento.

A distância entre a haste posicionada horizontalmente na parte superior do molde e o eixo da amostra foi determinada em milímetros, como representado na figura 11.

Figura 11 – Modelo esquemático do ensaio de abatimento.



Fonte: ABNT (1998)

A classe de consistência escolhida foi a S50, conforme a norma NBR 8953/2015 (ABNT, 2015), que indica a utilização do concreto em pavimentos e elementos de fundações, com valor do abatimento entre 50 mm e 100 mm.

4.4.3 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme as determinações da norma NBR 5738: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016).

Foram utilizados moldes cilíndricos de 10 x 20 cm e prismáticos de 10 x 10 x 30 cm, sendo revestidos internamente com desmoldante. Através do adensamento manual, os moldes cilíndricos foram adensados por 25 golpes, enquanto os prismáticos foram adensados por 75 golpes.

Após a moldagem, os corpos de prova foram retirados dos moldes depois de 24 horas (cilíndricos) e 48 horas (prismáticos) e foram armazenados em um tanque com água por mais 27 e 26 dias, respectivamente, completando assim o período de cura.

Produziu-se 16 corpos de prova cilíndricos e 8 prismáticos, ilustrados na figura 12, para os compostos padrão, com 5%, com 10% e com 20% de substituição volumétrica da brita pelo polímero, a fim de comparar com os resultados obtidos por Almeida (2017) e atender à quantidade recomendada pela norma NBR 12655 (ABNT, 2015b).

Figura 12 – Corpos de prova moldados.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Os traços desenvolvidos foram denominados T0 (traço padrão), T5, T10 e T20, conforme o percentual de resíduo polimérico utilizado. A tabela 3 resume os quantitativos.

Tabela 3 – Quantitativo de corpos de prova moldados.

Traço	Porcentagem de Polímero	Formato	Quantidade de CPs
T0	0%	Cilíndrico	16
	0%	Prismático	8
T5	5%	Cilíndrico	16
	5%	Prismático	8
T10	10%	Cilíndrico	16
	10%	Prismático	8
T20	20%	Cilíndrico	16
	20%	Prismático	8

Fonte: o autor (2020).

4.4.4 Ensaio de resistência à compressão e tração na flexão

Aos 28 dias de cura após a moldagem, de acordo com as diretrizes da NBR 5739 (ABNT, 2018a) e NBR 12142 (ABNT, 2010), no Laboratório de Materiais de Construção da UFRPE foi realizado o ensaio de resistência à compressão, e na empresa Jov Engenharia foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão.

Para a compressão, foi utilizada uma prensa manual hidráulica, de marca Pavitest – Contenco, conforme figura 13, com capacidade para 100 toneladas, com indicador digital e calibrada em setembro de 2020 pela empresa TECOMAT.

Os corpos de prova cilíndricos foram nivelados manualmente a partir de lixas e tiveram suas dimensões aferidas com paquímetro. Os cabeçotes utilizados no ensaio foram revestidos com discos de neoprene®.

Considerou-se cada betonada como um lote para fins de cálculo da resistência à compressão, conforme parâmetros estabelecidos na NBR 12655 (ABNT, 2015b), onde cada betonada representou um traço.

O controle adotado foi por amostragem parcial, atendendo o número mínimo de exemplares (n) definido pela norma. A norma determina que um exemplar deve ser composto por dois corpos de prova do mesmo traço, com o objetivo de ter uma maior

confiabilidade amostral. A resistência do exemplar será representada pelo maior dos dois valores obtidos no ensaio de resistência à compressão.

Para essa pesquisa, o número de exemplares adotado foi igual a 6, totalizando 12 corpos de prova cilíndricos para cada composição. Acrescenta-se que os pares de corpos de prova foram formados conforme a sequência de moldagem.

Os corpos de prova prismáticos foram levados ao laboratório contratado, onde foram conferidas suas medidas e desconsiderada as extremidades, além de serem divididos em três partes iguais.

Posteriormente, os corpos de prova foram inseridos na máquina de ensaio de resistência a compressão com um suporte de adaptação para realização do procedimento. Após à ruptura, verificou-se a carga e o local de rompimento das amostras.

A resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi obtida através da equação 12.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (12)$$

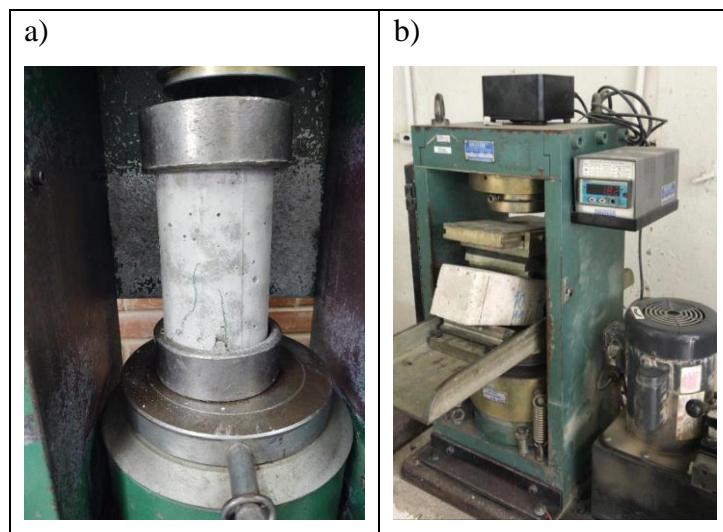
Onde,

f_c : Resistência à compressão (MPa);

F: Força máxima alcançada (N);

D: Diâmetro do corpo de prova (mm).

Figura 13 – Representação dos ensaios de compressão (a) e tração na flexão (b).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

4.4.5 Controle estatístico dos ensaios de resistência à compressão

Estimou-se a resistência característica à compressão ($f_{ck,est}$) de cada traço do concreto a partir do controle estatístico descrito pela equação 13, definida pela NBR 12655/2015.

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m-1} \right] - f_m \quad (13)$$

Onde,

$m: \frac{n}{2}$, sendo n o número de exemplares;

f_1, f_2, \dots, f_m : Valores de resistência característica à compressão dos exemplares dos corpos de prova, ordenados de forma crescente (MPa).

Seguindo a metodologia adotada por Cunha (2020) e Silva (2021), foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e um teste de Tukey, para apontar a diferença estatística entre o desempenho mecânico dos compósitos.

4.4.6 Ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios foram executados conforme a NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2009a).

Foram utilizados quatro corpos de prova cilíndricos de cada concreto para o ensaio, sendo submetidos à estufa por 72 horas, em uma temperatura de 110°C, posteriormente registrando a massa seca.

Em seguida, as amostras foram submersas em água por 72 horas e depois pesadas em balança hidrostática, para determinação da massa saturada imersa. Depois, as amostras foram secas manualmente e pesadas para determinação da massa saturada após imersão.

A absorção de água foi obtida pela equação 14:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (14)$$

Onde,

A: Absorção (%);

m_{sat} : Massa da amostra saturada após imersão (Kg);

m_s : Massa da amostra seca em estufa (Kg);

As massas específicas da amostra seca (ρ_s), saturada (ρ_{sat}) e real (ρ_r) foram calculadas pelas equações (15), (16) e (17), respectivamente.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat}-m_i} \times 1000 \quad (15)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat}-m_i} \times 1000 \quad (16)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s-m_i} \times 1000 \quad (17)$$

Onde,

m_i : Massa da amostra saturada imersa (Kg).

O índice de vazios foi obtido pela equação 18.

$$I_v = \frac{m_{sat}-m_s}{m_{sat}-m_i} \times 100 \quad (18)$$

4.4.7 Microscopia do corpo de prova rompido

Para a caracterização microestrutural do compósito foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura, realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais, da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho – UACSA da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

A amostra do concreto triturada foi submetida à metalização com ouro, sob corrente de 38 mA; taxa de deposição de 2,92 Å/s; e tempo de 60 segundos.

Para obtenção das micrografias, a amostra foi depositada no Microscópio Eletrônico de Varredura VEGA3, da TESCAN, com fonte de elétrons de filamento de tungstênio e Espectômetro de Energia Dispersiva acoplado, para determinação da composição química do material.

5 RESULTADOS

A seguir, serão discutidas as caracterizações referentes ao aglomerante e agregados, a fim de melhor analisar os concretos desenvolvidos no seu comportamento mecânico, bem como sua microestrutura.

5.1 CARACTERIZAÇÕES DO CIMENTO PORTLAND

5.1.1 Determinação da massa específica do cimento

Após as leituras volumétricas com o frasco de Le Chatelier, obteve-se os seguintes dados:

- Massa de cimento ensaiado (m): 60 g;
- Volume da primeira leitura (V_1): 1,10 cm³;
- Volume da segunda leitura (V_2): 20,60 cm³.

Com a equação 1, aplicando os valores acima, foi possível determinar a massa específica do cimento, confirmando um valor semelhante ao repassado pela fabricante do material:

$$\rho = \frac{60}{20,60 - 1,10} = 3,08 \text{ g/cm}^3$$

Conforme a tabela 2, obtida a partir do boletim técnico disponibilizado pela fabricante do cimento, a massa específica para o cimento Elizabeth do tipo CP II-Z é de 3,02 g/cm³, valor que se aproxima da massa específica determinada em laboratório.

5.1.2 Determinação da massa unitária do cimento

A massa unitária do cimento foi obtida a partir da massa de uma proveta vazia e posteriormente com o cimento adensado até a marca de 100 mL. Os valores obtidos no ensaio foram:

- Massa da proveta vazia (m_1): 0,0753 Kg;
- Massa da proveta com o cimento (m_2): 0,1973 Kg;
- Volume da proveta (V): 0,0001 m³.

Com a equação 2, aplicou-se os valores para obter a massa unitária do cimento:

$$\rho = \frac{0,1973 - 0,0753}{0,0001} = 1220 \text{ Kg/m}^3$$

Silva *et al.* (2005) desenvolveram argamassas utilizando como material aglomerante o cimento Portland do tipo CP II-Z-32, bem como o presente trabalho. Nas caracterizações dos componentes do compósito, os autores encontraram como massa unitária média do cimento o valor de 1197 Kg/m³, que se assemelha ao valor obtido na presente pesquisa.

5.2 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO MIÚDO

5.2.1 Massa específica da areia

Na determinação da massa específica da areia, os valores obtidos no ensaio foram:

- Massa da amostra saturada superfície seca (m_s): 500 g;
- Massa da areia seca após estufa (m): 497 g;
- Massa do agregado + frasco (m_1): 690 g;
- Massa do agregado + frasco + água (m_2): 990 g.

Com a equação 4 e os valores supramencionados foi obtido o volume de água no Erlenmeyer:

$$V_a = \frac{990 - 690}{1} = 300 \text{ cm}^3$$

Aplicando o valor de V_a na equação 3, foi determinada a massa específica do agregado seco:

$$d_1 = \frac{497}{500 - 300} = 2,48 \text{ g/cm}^3$$

Já o cálculo da massa específica do agregado saturado superfície seca foi realizado a partir da equação 5:

$$d_2 = \frac{500}{500 - 300} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

No cálculo da massa específica aparente, utilizou-se a equação 6:

$$d_3 = \frac{497}{(500 - 300) \times \frac{(500 - 497)}{1}} = 2,52 \text{ g/cm}^3$$

Com o valor de 2520 Kg/m³, observou-se que a massa específica aparente da areia utilizada no trabalho estava de acordo com os limites característicos citados por Metha e Monteiro (2014), sendo esses de 2500 Kg/m³ e 2700 Kg/m³.

5.2.2 Massa unitária da areia

Conforme a NBR NM 45/2006, registrou-se a massa do balde com água e a temperatura da água, obtendo os seguintes valores:

- Massa do balde + água (m): 12,805 Kg;
- Temperatura da água (T): 25°C.

A massa específica de água obtida foi de 997,033214 Kg/m³. Este valor foi utilizado para determinação do volume do balde, a partir da relação entre a massa do conjunto balde + água e a massa específica de água:

$$V = \frac{12,805}{997,033214} = 0,0128431 \text{ m}^3$$

Com o registro da massa do balde vazio e do balde com a areia, foram obtidos os seguintes valores:

- Massa do balde vazio (m_r): 0,360 Kg;
- Massa do balde + areia: 17,990 Kg;

A partir da equação 10, foi determinada a massa unitária da areia:

$$\rho_{ap} = \frac{17,990 - 0,360}{0,0128431} = 1372,72 \text{ Kg/m}^3$$

5.2.3 Composição granulométrica da areia

Foram peneiradas 300 g de areia para o ensaio e após o peneiramento, pesou-se o conteúdo retido em cada peneira, obtendo os valores apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Composição granulométrica da areia.

Abertura das Peneiras	Massa Retida (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante (%)
4,75 mm	0	0	0	100
2,36 mm	3,60	1,2	1,2	98,8
1,18 mm	22,20	7,4	8,6	91,4
600 µm	66,10	22	30,6	69,4
300 µm	108,90	36,3	66,8	33,2
150 µm	62,80	20,9	87,7	12,3
75 µm	26,40	8,8	96,5	3,5
Fundo	10,40	3,5	100	0

Fonte: O autor (2020).

Calculou-se o módulo de finura da areia, a partir do somatório do percentual retido acumulado em cada peneira da série normal, dividido por 100:

$$MF = \frac{0 + 1,2 + 8,6 + 30,6 + 66,8 + 87,7}{100} = 1,95$$

A dimensão máxima característica da areia obtida foi de 2,36 mm. Na tabela 5 estão os limites normatizados de distribuição granulométrica para o agregado miúdo, que se relacionam com os índices obtidos para a areia em questão.

Tabela 5 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

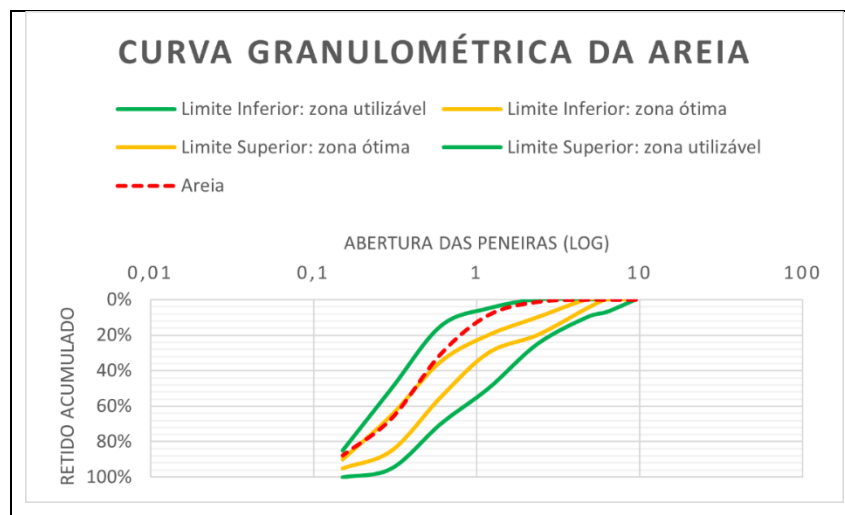
Abertura de Malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90;

O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20;

O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: Adaptada de ABNT (2019).

Figura 14 – Curva granulométrica da areia.

Fonte: O autor (2020).

Com as informações contidas nas tabelas 4 e 5, foi possível classificar a areia como fina, conforme sua curva granulométrica, ilustrada na figura 14, estando entre as zonas ótima e utilizável dos limites inferiores e com módulo de finura compatível aos limites da zona.

Os limites estabelecidos pela norma brasileira indicam o perfil granulométrico que o agregado miúdo deve ter para que influencie positivamente na trabalhabilidade e no índice de vazios do concreto. Caso a curva granulométrica do agregado esteja fora desses limites, deve-se misturar com outro agregado para obter uma curva com melhor desempenho.

5.2.4 Teor de umidade da areia

O teor de umidade da areia foi determinado a partir da norma NBR 9775 (ABNT, 2012), onde realizou-se a leitura do volume de areia no frasco de Chapman. Os valores obtidos na determinação foram:

- Volume de areia no frasco de Chapman (V): 406 mL;
- Densidade saturada de superfície seca da areia (g/mL): $2,5 \text{ g/cm}^3 = 2,5 \text{ g/mL}$.

Com os referidos dados inseridos na equação 11, referenciada na norma, determinou-se o teor de umidade da areia:

$$h = \frac{[500 - (406 - 200) \times 2,5]}{(406 - 700) \times 2,5} \times 100 = \frac{-15}{-735} \times 100 = 2\%$$

Essa porcentagem de umidade foi descontada no cálculo da quantidade de água a ser inserida no concreto, evitando excesso de água no traço do compósito, e alteração da relação a/c.

5.3 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO GRAÚDO

5.3.1 Massa específica da brita

A partir da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), foram obtidos os seguintes valores para determinação da massa específica da brita:

- Massa do agregado seco (m): 2,995 Kg = 2995 g;
- Massa do agregado em água (m_a): 1,885 Kg = 1885 g;
- Massa do agregado na condição saturada superfície seca (m_s): 3,005 Kg = 3005 g.

Aplicando os valores obtidos na equação 7, obteve-se a massa específica do agregado seco conforme o cálculo a seguir:

$$d = \frac{2995}{2995 - 1885} = 2,70 \text{ g/cm}^3$$

Com a equação 8, obteve-se a massa específica da brita na condição saturada superfície seca, como exemplificado a seguir:

$$d_s = \frac{3005}{3005 - 1885} = 2,68 \text{ g/cm}^3$$

A massa específica aparente foi determinada a partir da aplicação dos valores na equação 9, como é possível conferir a seguir:

$$d_a = \frac{2995}{3005 - 1885} = 2,67 \text{ g/cm}^3$$

5.3.2 Massa unitária da brita

Conforme a metodologia descrita na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), também utilizada para a areia, foi obtida a massa unitária da brita a partir dos valores obtidos no ensaio:

- Volume do balde (V): 0,0128431 m³;
- Massa do balde vazio (m_r): 0,360 Kg;
- Massa do balde + brita (m_{ar}): 19,410 Kg.

Aplicando os valores na equação 10, obteve-se a massa unitária da brita:

$$\rho_{ap} = \frac{19,410 - 0,360}{0,0128431} = 1483,30 \text{ Kg/m}^3$$

5.3.3 Composição granulométrica da brita

Com a metodologia descrita na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), a brita foi peneirada e o conteúdo retido em cada peneira foi pesado, cujos valores podem ser observados na tabela 6.

Tabela 6 – Composição granulométrica da brita.

Abertura das Peneiras	Massa Retida (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante (%)
31,5 mm	0	0	0	100
25 mm	0	0	0	100
19 mm	515	10,3	10,3	89,7
12,5 mm	3970	79,4	89,7	10,3
9,5 mm	460	9,2	98,9	1,1
6,3 mm	50	1	99,9	0,1
4,75 mm	0	0	99,9	0,1
2,36 mm	0	0	99,9	0,1
1,18 mm	0	0	99,9	0,1
600 µm	0	0	99,9	0,1
300 µm	0	0	99,9	0,1
150 µm	0	0	99,9	0,1
Fundo	5	0,1	100	0

Fonte: O autor (2020).

A dimensão máxima característica da brita é representada pela peneira onde o agregado ficou retido acumulado ligeiramente inferior ou igual a 5%, sendo, portanto, 25 mm. Calculou-se o módulo de finura da brita a partir do somatório do percentual retido acumulado em cada peneira da série normal, dividido por 100:

$$MF = \frac{10,3 + 98,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9}{100} = 7,09$$

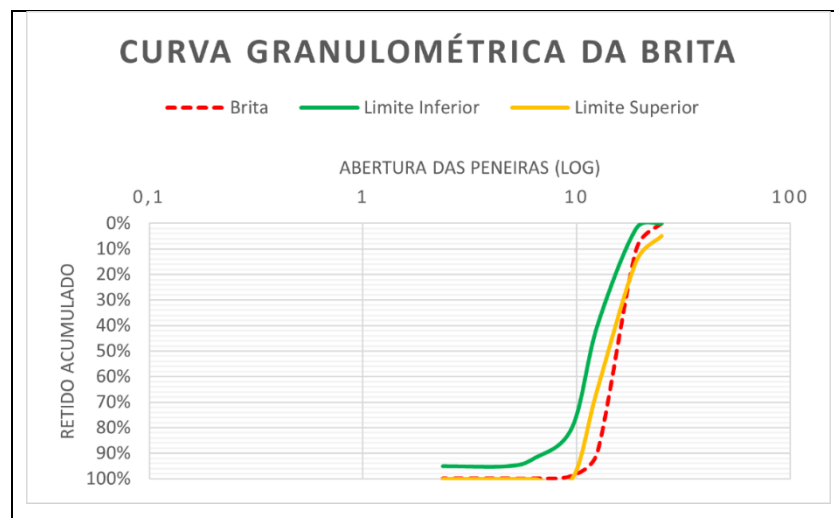
Reunindo os dados das tabelas 6 e 7, a brita em questão ficou na zona granulométrica de 9,5/25, correspondendo à brita tipo 2, com os percentuais retidos acumulados equivalentes aos limites determinados pela norma. Com isso, foi possível obter a curva granulométrica do agregado, conforme a figura 15.

Tabela 7 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Abertura de Malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona Granulométrica				
	d/D				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	–	–	–	–	0-5
63 mm	–	–	–	–	5-30
50 mm	–	–	–	0-5	75-100
37,5 mm	–	–	–	5-30	90-100
31,5 mm	–	–	0-5	75-100	95-100
25 mm	–	0-5	5-25	87-100	–
19 mm	–	2-15	65-95	95-100	–
12,5 mm	0-5	40-65	92-100	–	–
9,5 mm	2-15	80-100	95-100	–	–
6,3 mm	40-65	92-100	–	–	–
4,75 mm	80-100	95-100	–	–	–
2,36 mm	95-100	–	–	–	–

Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

Fonte: Adaptada de ABNT (2019).

Figura 15 – Curva granulométrica da brita.

Fonte: O autor (2020).

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019), os limites estabelecem a granulometria ótima do agregado graúdo para utilização no concreto, uma vez que a não conformidade com esse padrão acarreta um concreto com baixa trabalhabilidade e elevado índice de vazios.

5.3.4 Determinação da massa unitária do polímero

Conforme a metodologia descrita na norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), também utilizada para a areia, foi obtida a massa unitária da brita a partir dos valores obtidos no ensaio:

- Volume do balde (V): 0,010 m³;
- Massa do balde vazio (m_r): 0,405 Kg;
- Massa do balde + polímero (m_{ar}): 5,350 Kg.

Aplicando os valores na equação 10, obteve-se a massa unitária da brita:

$$\rho_{ap} = \frac{5,350 - 0,405}{0,010} = 494,5 \text{ Kg/m}^3$$

Conforme a NBR NM 45 (2005), a massa unitária é o volume aparente do agregado, considerando tanto o volume do agregado propriamente dito quanto o volume dos vazios entre os agregados.

5.4 PARÂMETROS PARA A DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO DA ABCP

A definição das proporções dos materiais a serem utilizados na dosagem dos concretos a serem confeccionados seguirá o método ABCP, formatado por Rodrigues (1995).

5.4.1 Consumo de água (C_a)

Conforme Rodrigues (1995), o consumo de água foi definido pela relação entre a classe de consistência adotada para o concreto e a dimensão máxima característica da brita, sendo, respectivamente, S50 (50 mm ± 10 mm) e 25 mm. Diante da tabela 8, o consumo de água foi de 190 L/m³.

Tabela 8 – Consumo de água aproximado (L/m³).

Abatimento do Tronco de Cone (mm)	Dimensão Máxima Característica do Agregado Graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptada de Rodrigues (1995).

5.4.2 Consumo de cimento (C)

O consumo de cimento se deu pela equação 19, a partir de uma relação entre o consumo de água e a relação água/cimento:

$$C = \frac{C_a}{a/c} \quad (19)$$

Onde,

C_a: Consumo de água;

a/c: Relação água/cimento.

Aplicando na equação 19 os valores da relação água/cimento obtida pela curva de Abrams, do item 4.4.1 da Metodologia, e o consumo de água, obtido no item anterior, foi possível chegar no valor de 422 Kg/m³ de consumo de cimento, ou seja, será necessário 422 kg de cimento para cada 1 metro cúbico de concreto a ser produzido:

$$C = \frac{190}{0,45} = 422,22 \text{ Kg/m}^3$$

Rodrigues e Fucale (2014) produziram concretos com diferentes dosagens, utilizando diferentes agregados miúdos. Para os três traços desenvolvidos, as autoras encontraram 470, 450 e 437 Kg/m³ de consumo de cimento, valores próximos ao encontrado no presente estudo.

Com esse consumo, o concreto foi enquadrado na classe de agressividade ambiental IV, sendo esta muito forte, indicando que o uso em ambientes industriais e

com exposição à maré são de elevado risco de deterioração, segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015).

5.4.3 Consumo de agregado miúdo (C_m) e agregado graúdo (C_b)

Para a determinação do C_b foi necessário encontrar o volume de brita no concreto, conforme a tabela 9, fazendo uma relação entre o módulo de finura da areia e a dimensão máxima característica da brita.

Tabela 9 – Volume compactado seco (V_c) do agregado graúdo por m^3 de concreto.

MF (areia)	D _{máx.} da Brita (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptada de Rodrigues (1995).

Considerou-se o módulo de finura da areia MF = 2, uma vez que esse foi o valor mais próximo de 1,95. Correlacionando com a dimensão máxima característica da brita (25 mm), o consumo da brita foi calculado pela equação 20:

$$C_b = V_c \times M_c \quad (20)$$

Onde,

V_c : Volume compactado seco do agregado graúdo por m^3 de concreto;

M_c : Massa unitária compactada do agregado graúdo.

Aplicando os valores da massa unitária da brita e do volume compactado seco da mesma na equação, obteve-se o consumo de brita igual a 1149,56 Kg/m^3 :

$$C_b = 0,775 \times 1483,30 = 1149,56 \text{ Kg/m}^3$$

Para o consumo de areia, foi calculado o volume de areia a partir da soma da relação entre o consumo de cimento, brita e água e suas respectivas massas específicas, sendo utilizada a equação 21 para a determinação:

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad (21)$$

Onde,

ρ_c : Massa específica do cimento (Kg/m^3);

ρ_b : Massa específica da brita (Kg/m^3);

ρ_a : Massa específica da água (1000 Kg/m^3).

Aplicando os valores pedidos na equação, foi determinado o volume de areia no concreto:

$$V_m = 1 - \left(\frac{422,22}{3080} + \frac{1149,56}{2670} + \frac{190}{1000} \right) = 0,242$$

O C_m foi calculado pela equação 22, multiplicando o volume de areia no concreto e a sua massa específica:

$$C_m = V_m \times \rho_m \quad (22)$$

Onde,

V_m : volume de areia em um m^3 de concreto;

ρ_m : Massa específica da areia (Kg/m^3).

Aplicando os devidos valores na equação, foi obtido o consumo de areia no concreto igual a $609,84 \text{ Kg/m}^3$:

$$C_m = 0,242 \times 2520 = 609,84 \text{ Kg/m}^3$$

5.4.4 Determinação do traço

Conforme o método ABCP (Rodrigues, 1995), para a determinação do traço do concreto é utilizada a equação 23:

$$1: \frac{C_m}{C} : \frac{C_b}{C} : \frac{C_a}{C} \quad (23)$$

Fazendo uma relação dos consumos de areia (C_m), brita (C_b) e água (C_a) com o consumo de cimento (C), obteve-se o traço padrão para o concreto, o qual deve ter a proporção dos materiais com referência no valor unitário de cimento:

$$1: \frac{609,84}{422,22} : \frac{1149,56}{422,22} : \frac{190}{422,22} = 1: 1,44: 2,72: 0,45$$

Considerando um saco convencional de cimento, que possui 50 Kg, o traço em massa foi obtido multiplicando o traço padrão por 50, conforme a tabela 10.

Tabela 10 – Dados da dosagem do concreto padrão.

Componente	Consumo em relação a 1m³ de concreto (Kg)	Traço unitário em massa	Traço em relação a 1 saco de cimento (Kg)
Cimento	422	1	50
Areia	610	1,44	72
Brita	1150	2,72	136
Água	190	0,45	22,5

Fonte: O autor (2020).

A partir dos dados valores do traço em massa, calculou-se o volume real do concreto para um saco de cimento convencional, relacionando a massa dos componentes e suas respectivas massas específicas, conforme a tabela 11.

Tabela 11 – Volume real para um saco de cimento.

Componente	Volume Real (m³)
Cimento	0,0162
Areia	0,0286
Brita	0,0509
Água	0,0225
Total	0,1182

Fonte: O autor (2020).

Para o molde de corpo de prova cilíndrico do tipo 10 x 20 cm, foi necessário calcular o volume do molde através da equação 24, sendo o volume obtido $V_{cp} = 0,0016 \text{ m}^3$:

$$V_{CP} = \frac{(\pi \cdot b^2)}{4} x h \quad (24)$$

Onde,

b: Diâmetro do molde (m);

h: Altura do molde (m).

Multiplicando o volume real de cada componente pelo volume do molde e dividindo os resultados pelo volume real total, obteve-se o volume real de cada componente no corpo de prova. Utilizando esses valores e multiplicando por suas respectivas massas específicas, obteve-se a massa para moldar um corpo de prova, conforme a tabela 12.

Tabela 12 – Volume real e massa de cada componente para moldagem de um corpo de prova.

Componente	Volume Real (m³)	Massa (Kg)
Cimento	0,00022	0,6776
Areia	0,00038	0,9576
Brita	0,00068	1,8156
Água	0,00030	0,30

Fonte: O autor (2020).

Multiplicando o valor da massa de cimento para os moldes de corpo de prova pelo número total de exemplares definido por traço (16), obteve-se a quantidade de cimento necessária para a moldagem.

Para o compósito com a substituição volumétrica da brita pelo polímero triturado, foi feita uma relação entre a massa da brita para o traço padrão e a massa unitária do agregado. O valor foi multiplicado por cada porcentagem de substituição, sendo obtido o volume de brita para cada traço.

Os volumes encontrados foram multiplicados pela massa unitária do polímero, obtendo a massa necessária de polímero para cada traço. Já a massa da brita para cada traço foi obtida pela multiplicação da massa de referência pelo percentual volumétrico restante, descontado o percentual de polímero.

Descontando os 2% de umidade da areia do total de água de amassamento, na tabela 13 estão os traços desenvolvidos para moldar os corpos de prova cilíndricos.

Tabela 13 – Dosagem para a produção de 16 corpos de prova cilíndricos de concretos por traço.

Traço	Quantidade de Polímero (%)	Quantidade dos Componentes (Kg)				
		Cimento	Areia	Brita	Polímero	Água
T0	0	10	14,53	26,62	0,00	4,10
T5	5	10	14,53	25,73	0,44	4,10
T10	10	10	14,53	24,85	0,89	4,10
T20	20	10	14,53	23,07	1,77	4,10

Fonte: O autor (2020).

O procedimento também foi adotado para os corpos de prova prismáticos, diferenciando o volume do molde, sendo igual a 0,003 m³, modificando a quantidade de materiais necessária, conforme a tabela 14.

Tabela 14 – Dosagem para a produção de 8 corpos de prova prismáticos de concretos por traço.

Traço	Quantidade de Polímero (%)	Quantidade dos Componentes (Kg)				
		Cimento	Areia	Brita	Polímero	Água
T0	0	12	17,43	31,94	0,00	4,93
T5	5	12	17,43	30,34	0,53	4,93
T10	10	12	17,43	28,75	1,06	4,93
T20	20	12	17,43	25,56	2,13	4,93

Fonte: O autor (2020).

5.4.5 Análise dos resultados de resistência à compressão

Conforme explanado na metodologia, para a análise dos resultados de resistência à compressão foram rompidos 12 corpos de prova de cada traço, os quais foram agrupados aos pares, formando 6 exemplares para análise.

Os valores de resistência foram organizados de forma crescente, conforme estabelece a norma NBR 12655 (ABNT, 2015), e ilustrado na tabela 15.

Tabela 15 – Resistência característica por corpo de prova (MPa).

CPs	Traço			
	T0	T5	T10	T20
1	31,2172	27,5667	20,4355	21,6451
2	31,9706	29,7102	23,7149	21,6705
3	32,0602	30,4814	24,2391	23,1888
4	33,7536	30,8918	24,5009	24,2552
5	34,1369	31,1562	24,9006	25,1374
6	34,5430	31,3536	25,4775	25,1877
7	36,0199	31,9583	26,0123	26,2237
8	36,3096	32,4383	26,4325	26,4325
9	37,7646	33,2061	26,9163	26,5470
10	37,0761	33,7027	26,9163	27,2473
11	38,8033	34,4666	28,8009	27,4469
12	38,8558	36,3486	32,0092	27,8265

Fonte: O autor (2020).

Seguindo a ordem da tabela 15, cada par de corpos de prova representa um exemplar, onde o corpo de prova de maior resistência entre o par será a resistência característica do exemplar, de forma a atender ao requisito estabelecido pela norma.

A partir disso, foram calculados os valores de resistência característica à compressão estimada de cada compósito, aplicando os valores correspondentes na equação 13. Ressaltando que, conforme a norma, a quantidade de exemplares adotada foi dividida por dois, determinando que, para fins de cálculo, serão utilizados os três maiores valores de resistência característica à compressão entre os exemplares, para cada traço.

Para o traço T0, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{31,9706 + 33,7536}{2} \right] - 34,5430 = 31,2 \text{ MPa}$$

Para o traço T5, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{29,7102 + 30,8918}{2} \right] - 31,3536 = 29,2 \text{ MPa}$$

Já no traço T10, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{23,7149 + 24,5009}{2} \right] - 25,4775 = 22,7 \text{ MPa}$$

E para o traço T20, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{21,6705 + 24,2552}{2} \right] - 25,1877 = 20,7 \text{ MPa}$$

Para uma melhor compreensão dos dados, foi organizada a tabela 16 a partir do cálculo das medidas estatísticas.

Tabela 16 – Estatística descritiva dos traços.

Traço	Menor f_c (MPa)	Maior f_c (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	$f_{ck,est}$ (MPa)
T0	31,2	38,8	35,2	2,7	31,2
T5	27,6	36,3	31,9	2,3	29,2
T10	20,4	32	25,9	2,8	22,7
T20	21,6	27,8	25,2	2,1	20,7

Fonte: O autor (2020).

Aplicando a ANOVA com um nível de significância (α) de 0,05, obteve-se um valor-P que denotou que havia diferença significativa entre pelo menos duas médias. Verifica-se os valores da análise na tabela 17.

Tabela 17 – Análise de Variância para a resistência à compressão.

Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P
Entre os grupos	839,521	3	279,84	44,55	1,71x10 ⁻²⁷
Dentro dos grupos	276,367	44	6,28106		
Total	1115,89	47			

Fonte: O autor (2020).

A fim de determinar quais médias diferiram entre si, foi aplicado o teste de Tukey no *software* Past, com nível de significância de 5%. As médias obtidas estão organizadas na tabela 18.

Tabela 18 – Teste de Tukey para a resistência à compressão.

Comparação entre Médias				
	T0	T5	T10	T20
T0	-	0,0134	0,0001688	0,0001688
T5	4,519	-	0,0001701	0,0001689
T10	12,92	8,4	-	0,9269
T20	13,79	9,269	24,01	-

Fonte: O autor (2020).

Conforme o teste de Tukey, observa-se que a média T20 diferiu estatisticamente das demais, bem como as médias T5 e T10 diferiram estatisticamente da T0, porém, a média T10 diferiu estatisticamente da T5. Com isso, confirma-se que os traços dos concretos contendo o polímero (ABS) não tiveram um melhor desempenho em relação ao concreto padrão desenvolvido.

A resistência característica à compressão do concreto produzido com o traço T5 foi de 29,25 MPa, configurando-o como um material intermediário entre as classes de compressão C25 e C30; já os concretos dos traços T10 e T20, com $f_{ck,est}$ igual a 22,74 MPa e 20,74 MPa, respectivamente, são classificados na intermediação entre as classes C20 e C25.

Ademais, os compósitos produzidos nessa pesquisa podem ser utilizados para fins estruturais, uma vez que a norma estabelece resistência característica mínima de 20 MPa para essa finalidade.

O mesmo comportamento foi observado por Almeida (2017) quando substituiu a brita pelo polímero triturado de carcaças, com proporções de 5%, 8%, 10%, 15% e

20% em massa. Todos os concretos desenvolvidos apresentaram resistência à compressão característica superior aos 20 MPa, também concluindo a viabilidade em uso estrutural.

5.4.6 Análise dos resultados de resistência à tração na flexão

Para a referida determinação, foram rompidos 7 corpos de prova de cada traço, conforme a tabela 19, observando que a ruptura ocorreu dentro do terço médio, atendendo ao requisito estabelecido pela norma NBR 12142 (ABNT, 2010).

Tabela 19 – Resistência à tração na flexão por corpo de prova (MPa).

CPs	Traço			
	T0	T5	T10	T20
1	4,6969	4,3263	2,7463	2,5824
2	4,7319	4,4050	4,6574	2,7191
3	4,7444	4,4411	4,7971	2,9365
4	4,8084	4,4734	4,9050	3,2344
5	4,9347	4,5703	5,1428	3,5706
6	4,9650	4,7417	5,5392	4,3856
7	5,5202	4,9840	5,6854	4,4275
Média	4,9145	4,5631	4,7819	3,4080

Fonte: O autor (2020).

Realizou-se uma ANOVA com um nível de significância (α) de 0,05 e obteve-se um valor-P igual a 0,0007166, denotando que há diferença significativa entre pelo menos duas médias, conforme a tabela 20.

Tabela 20 – Análise de Variância para a resistência à tração na flexão.

Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P
Entre os grupos	9,94035	3	3,31345	8,009	0,0007166
Dentro dos grupos	9,92861	24	0,413692		
Total	19,869	27			

Fonte: O autor (2020).

Com isso, foi aplicado o teste de Tukey no *software* Past, com nível de significância de 5%, para analisar quais médias se diferiram entre si, conforme os valores indicados na tabela 21.

Tabela 21 – Teste de Tukey para a resistência à tração na flexão.

Contraste entre Médias				
	T0	T5	T10	T20
T0	-	0,7384	0,9801	0,001201
T5	1,445	-	0,9193	0,01304
T10	0,5455	0,8999	-	0,002903
T20	6,197	4,751	5,651	-

Fonte: O autor (2020).

Observa-se que o concreto do traço T20 foi o único que se diferiu estatisticamente dos demais traços, demonstrando que o referido compósito obteve o pior desempenho de resistência à tração na flexão.

Almeida (2017) observou que a redução da resistência à tração em relação ao concreto padrão para os concretos de 0% a 10% de polímero, em substituição à brita, não se diferiu estatisticamente; contudo, houve diferença estatística significativa nos concretos com 15% e 20% de polímero, como no presente trabalho.

5.4.7 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos compósitos

Seguindo a norma NBR 9778 (ABNT, 2009), foram utilizadas as equações 14 a 18 para as referidas determinações, onde ρ_s é a massa específica seca; ρ_{sat} é a massa específica saturada; e ρ_r é a massa específica real.

Para efeito de análise, a norma estabelece que os valores devem ser apresentados através de suas médias. Com isso, é possível observar a média e o desvio padrão (DP) dos valores obtidos na tabela 22.

Tabela 22 – Valores médios de absorção, índice de vazios e massa específica dos compósitos.

	Unidade	T0	T5	T10	T20
Absorção	%	3,77	4,59	5,68	5,67
Vazios	%	8,73	10,22	12,17	11,52
ρ_s	Kg/m ³	2313,94	2224,32	2143,32	2032,43
ρ_{sat}	Kg/m ³	2401,33	2326,52	2265,00	2147,62
ρ_r	Kg/m ³	2535,54	2477,51	2440,26	2297,02

Fonte: O autor (2020).

A norma NBR 8953 (ABNT, 2015) determina que todo concreto com massa específica seca compreendida entre 2000 Kg/m³ e 2800 Kg/m³ seja classificado como concreto normal, portanto, como observado na tabela, todos os compósitos desenvolvidos foram classificados como concreto normal.

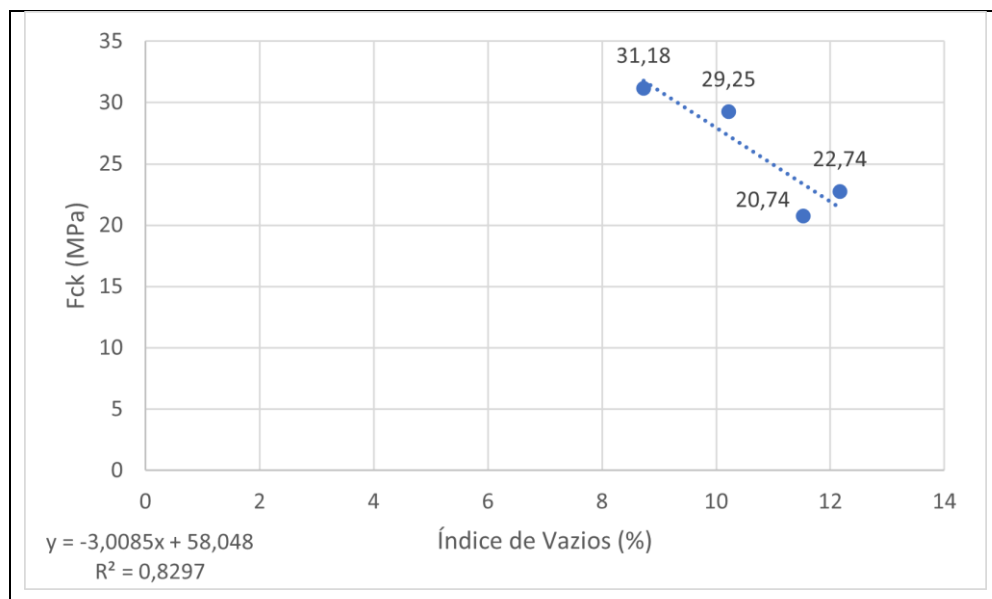
Diante da substituição da brita por resíduos poliméricos, notou-se um aumento na absorção de água e no índice e vazios, porém, o compósito do traço T20 teve uma redução nos referidos índices em relação ao traço T10.

Mehta e Monteiro (2014) destacaram que a porosidade do concreto tem uma relação inversamente proporcional à resistência mecânica, isto é, conforme é aumentado o índice de vazios do concreto, menor é a resistência característica do material.

Silva *et al.* (2018) observaram que a utilização de polímeros como agregados em compósitos cimentícios aumenta o índice de vazios, e conseqüentemente a porosidade, devido à baixa interação química entre o resíduo e a matriz cimentícia, além da falta de aderência do polímero aos demais componentes, por causa da superfície lisa e da área específica irregular.

Na figura 16, é possível observar no gráfico de dispersão que há uma correlação inversamente proporcional entre a resistência e o índice de vazios dos compósitos desenvolvidos, corroborando com Mehta e Monteiro (2014).

Figura 16 – Correlação entre a resistência à compressão e o índice de vazios.

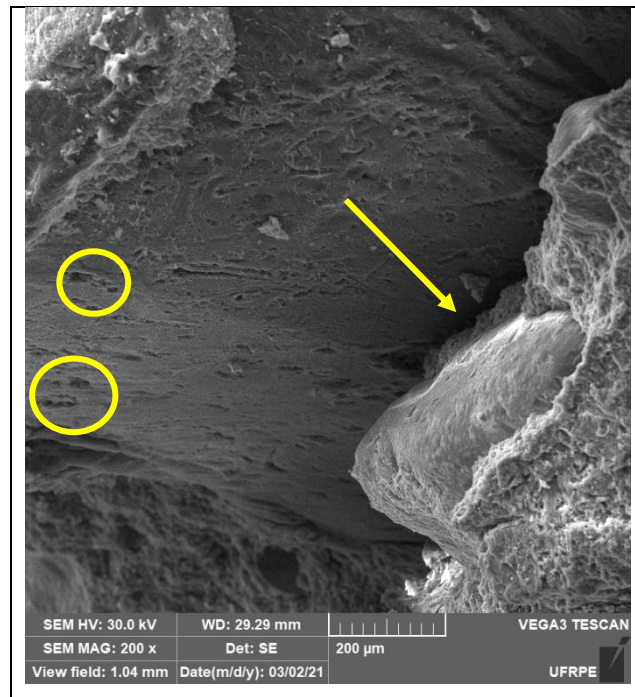


Fonte: O autor (2020).

5.4.8 Análise microestrutural do concreto com resíduos poliméricos

Na figura 17, observa-se na micrografia do corpo de prova com 5% de polímero a região de interface entre a matriz cimentícia e o polímero. Nota-se a presença de micro poros no resíduo (conforme os círculos) e uma certa aderência entre a pasta e o polímero (conforme a seta), porém, no material rompido, o resíduo podia ser destacado do concreto aplicando uma certa força.

Figura 17 – Interação entre a pasta de cimento e o polímero.

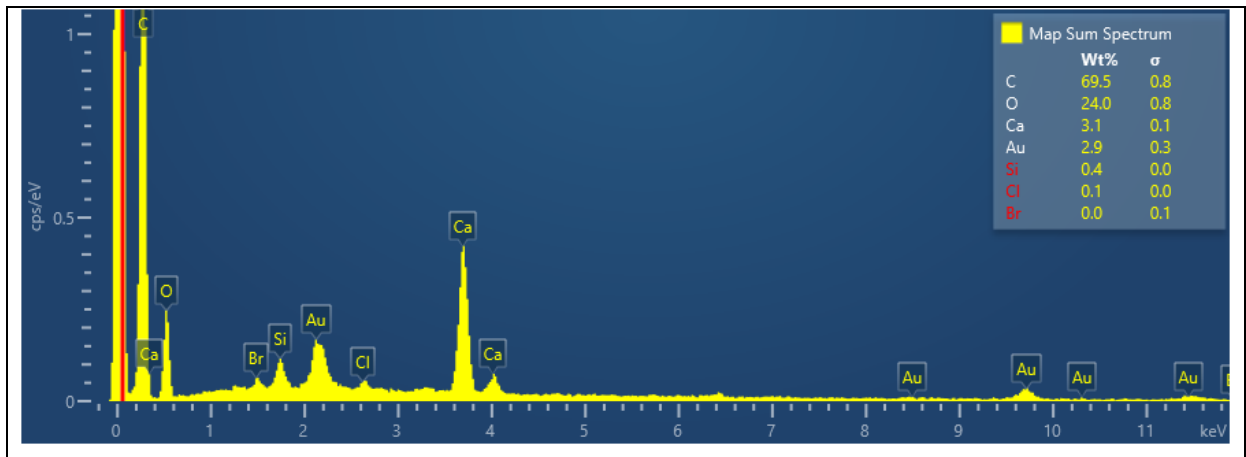


Fonte: Arquivo do autor (2020).

Observa-se na figura 18 a grande incidência de carbono, que pode ser atribuído principalmente à presença do polímero no material, mas também estando presente na composição do cimento. O oxigênio, o cálcio e o silício estão presentes nos óxidos que compõem o cimento, bem como na areia que forma a argamassa, conforme Bauer (2008).

O aparecimento de ouro no espectro do EDS se deve ao processo de metalização da amostra, para a realização da microscopia, portanto, trata-se apenas de uma contaminação do material, fato também observado por Santos (2007).

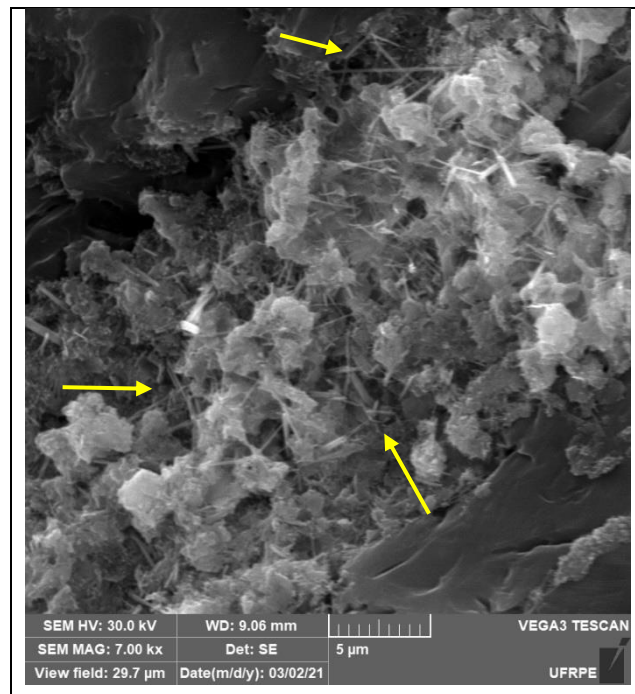
Figura 18 – EDS da interface entre pasta de cimento e polímero no concreto com 5% do resíduo.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

No compósito rompido foi observada a presença de etringita tardia, que é a etringita formada durante a cura, após o endurecimento completo do concreto e sem exposição a fontes externas de sulfatos (TAYLOR *et al.*, 2001). O cristal pode ser observado na figura 19, indicado pelas setas.

Figura 19 – Etringita tardia no concreto com 5% de polímero rompido aos 28 dias.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Segundo Katsioti *et al.* (2011), a etringita é um mineral de aspecto acicular, formado por sulfoaluminato de cálcio nas primeiras horas da hidratação, a partir da

reação entre o gesso e o aluminato de cálcio. Segundo Kudlanvec Júnior *et al.* (2018), a expansão da etringita pode desintegrar a pasta de cimento.

A presença da etringita tardia ocasiona alguns defeitos mecânicos no material, como expansão do concreto e as fissuras pelas tensões na microestrutura. Segundo Torres e Andrade (2016), os cimentos do tipo CP II apresentaram teor de SO_3 superior a 3% e essa característica se mostra favorável ao desencadeamento da referida fase cristalina. Como o tipo de cimento utilizado no presente trabalho foi CP II-Z, pode ter havido um favorecimento ao surgimento desse cristal.

6 CONCLUSÕES

A etapa de caracterização dos componentes do concreto é de fundamental importância para a correta dosagem do material, uma vez que o método utilizado necessita de dados relativos às características físicas dos componentes, como massa específica, massa unitária, teor de umidade e módulo de finura.

A adição de resíduo polimérico no concreto em substituição do agregado graúdo reduziu a resistência à compressão característica do compósito, uma vez que o concreto convencional alcançou F_{ck} de 31 MPa; o concreto com 5% de polímero alcançou 29 MPa; com 10% obteve 22 MPa; e com 20% obteve 20 MPa. Porém, todos os compósitos alcançaram resistência suficiente para serem classificados como concretos estruturais perante a norma técnica brasileira

Em relação à resistência à tração na flexão, T0 obteve uma resistência média de 4,91 MPa; T5 de 4,56 MPa; T10 de 4,78 MPa; e T20 de 3,41 MPa. Conforme a análise estatística, apenas o traço T20 se diferiu estatisticamente dos demais traços, apontando que a substituição de até 10% do volume de brita por polímero não influencia na resistência à tração do compósito.

Diante da substituição do agregado pelo polímero, a densidade do material reduziu de forma linear, dada a densidade do resíduo em relação à brita. A rigor, o índice de vazios também aumentou com o aumento do teor do resíduo, influenciando diretamente no desempenho mecânico, uma vez que há uma relação inversamente proporcional entre a resistência e a porosidade do material.

No geral, os compósitos podem ser aplicados em pavimentos, conforme a classe de consistência adotada.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. **Avaliação da utilização de resíduos eletroeletrônicos (REEE) incorporados ao concreto em substituição ao agregado graúdo**. 2017. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Sorocaba. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/151876>. Acesso em: 05 de set. 2020.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248: agregados – determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 45: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

_____. **NBR 12821: preparação de concreto em laboratório – procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

_____. **NBR NM 52: agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.

_____. **NBR NM 53: agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.

_____. **NBR 12142: concreto – determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 9775: agregado miúdo – determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 8953: concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

_____. **NBR 12655: concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

_____. **NBR 5738: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

_____. **NBR 16697**: cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BALDÉ, C. P.; FORTI, V.; GRAY, V.; KUEHR, R.; STEGMANN, P. **The Global E-waste Monitor – 2017**, *In*: United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/Global-E-waste%20Monitor%202017%20.pdf>. Acesso em: 18 de fev. 2021.

BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial balsáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. 2002. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84274/212200.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 de jan. 2021.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. A evolução da normalização e de algumas propriedades dos cimentos Portland brasileiros. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 52, 2010, Fortaleza/CE. **Anais[...]** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 5 ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CORRÊA, A. C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CPIII-40**. 2010. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. Disponível em: <http://poscivil.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/461/2018/10/definitivaabduche.pdf>. Acesso em: 16 de jan. 2021.

CUNHA, A. L. X. **Reciclagem dos rejeitos da atividade de mariscagem: uso na indústria de blocos pré-moldados de concreto**. 2020. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

FABRO, F.; GAVA, G. P.; GRIGOLI, H. B.; MENEGHETTI, L. C. Influence of fine aggregates particle shape in the concrete properties. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 4, n. 2, p. 191-212, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/PhgGy3shqJsp4rFqjDwKbSJ/abstract/?lang=en>. Acesso em: 14 de mar. 2021.

GABRIEL, A. P.; GROCHAU, I. H.; SANTANA, R. M. C.; VEIT, H. M. Reciclagem de carcaças de monitores: propriedades mecânicas e morfológicas. **Polímeros**, v. 23, n. 6, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/B4Zff6LMpLLD3r7rCmMdjTr/?lang=pt>. Acesso em: 12 de mar. 2021.

GIACCIO, G.; ROCCO, C.; VIOLINI, D.; ZAPPITELLI, J.; ZERBINO, R. High strength concretes incorporating different course aggregates. **Materials journal**, v. 89, n. 3, 2020. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=2568>. Acesso em: 10 de fev. 2021.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C (org.). **Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinzas e aglomerantes alternativos**. *In*: Tecnologias e materiais alternativos de construção [s.n.], 2003. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001766122>. Acesso em: 12 de fev. 2021.

KANNING, R. C. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland**. 2013. 192p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/30448/R%20-%20T%20-%20RODRIGO%20CEZAR%20KANNING.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 de fev. 2021.

KASPER, A. C.; BERSELLI, G. B. T.; FREITAS, B. D.; BERNARDES, A. M.; VEIT, H. M. Estudo da reciclagem das blendas PC+ABS e PC+ABS+ÉPOXI provenientes de sucatas eletrônicas. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 16. 2010. Disponível em: http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/386. Acesso em: 18 de fev. 2021.

KATSIOTI, M.; PATSIKAS, N.; PIPILIKAKI, P.; KATSIOTIS, N.; MIKEDI, K.; CHANIOTAKIS, M. Delayed ettringite formation (DEF) in mortars of white cement. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 900–905, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810003569?via%3Dihub>. Acesso em: 09 de fev. 2021.

KUDLANVEC JÚNIOR, V. L.; CANALLE, R.; NUNES, T. K. L.; RESENDE, E. C. R. C.; SILVA, M. D. S. C. Identificação de formação de etringita em concreto através de microscopia eletrônica de varredura: estudo de caso em reator UASB. *In*: CONTECC, 2018, Maceió. **Anais[...]** Maceió, 2014. Disponível em: https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/132_idfdeecadmedvedceru.pdf. Acesso em: 10 de fev. 2021.

LEITE, M. B.; COSTA, J. A. Estudo da influência do agregado reciclado de concreto pré-moldado na resistência do concreto. *In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 2014, Maceió. **Anais[...]** Maceió, 2014. Disponível em: http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper_786.pdf. Acesso em: 13 de fev. 2021.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com ou sem sílica ativa para resistências entre 50 e 60 MPa**. 1999. 170p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/37904>. Acesso em: 18 de fev. 2021.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em agronegócio e meio ambiente**. Maringá, v. 1, n. 3, p. 405-418, set./dez., 2008. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/850>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

MARTINS, P. B. M. **Influência da granulometria do agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. 2008. 93p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana. Disponível em: <https://pdf4pro.com/download/influ-202-ncia-da-granulometria-agregado-2ba55a.html>. Acesso em: 15 de jan. 2021.

MEDEIROS JÚNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, 2014. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352014000200116. Acesso em: 15 de fev. 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MORF, L. S.; TREMP, J.; GLOOR, R.; SCHUPPISSER, F.; STENGELE, M.; TAVERNA, R. Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste – actual levels in Switzerland. **Waste management**, v. 27, p. 1306-1316, 2007. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17008085/>. Acesso em: 18 de fev. 2021.

OLIVEIRA, E. M.; ANDRADE, J. A. B.; GALVÃO, T. W. F. B.; SOUZA, P. D. S.; PENEDO, L. S.; GALVÃO, T. W. F. B. Cumprimento de políticas públicas ambientais e destinação de resíduos eletrônicos: uma análise dos fatores dificultadores. **Revista teccen**, v. 14, n. 1, 2021. Disponível em: <http://editora.universidadedevassouras.edu.br/index.php/TECCEN/article/view/2553/1618>. Acesso em: 16 de fev. 2021.

PATRÍCIO, T. F. **Adição de resíduos de material polimérico na fabricação de concretos**. 2018. 41p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga, Formiga. Disponível em: https://bibliotecadigital.uniformg.edu.br:21015/xmlui/bitstream/handle/123456789/810/TCC_T%c3%balioFonsecaPatricio.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 de jan. 2021.

POMPEU NETO, B. B.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho, e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Revista matéria**, v. 16, n. 2, p. 690-702, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/ysCVKynhjwjHTkvFS7CWsGp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 22 de fev. 2021.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Revista ambiente construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/kn7FrBBPKVTbZBVynfzmstB/?lang=pt>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

RODRIGUES, F. A. **Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra/matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de Malva**. 2015. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5223>. Acesso em: 14 de fev. 2021.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 2 ed. São Paulo: ABCP, 1995.

ROSSINI, V.; NASPOLINI, S. H. D. F. Obsolescência programada e meio ambiente: a geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. **Revista de direito e sustentabilidade**, Brasília, v. 3, n. 1, p. 51-71, 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/210565564.pdf>. Acesso em: 15 de fev. 2021.

SANTOS, N. A. **Incorporação do resíduo de lâ de vidro para produção de placas cimentícias**. 2015. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/340>. Acesso em: 19 de fev. 2021.

SANTOS, R. M. **Avaliação da adição de pó da casca de coco verde, como material estruturante, na biorremediação de solo contaminado por petróleo**. 2007. 156p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://186.202.79.107/download/po-da-casca-de-coco-verde-na-biorremediacao.pdf>. Acesso em: 14 de fev. 2021.

SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concretos. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 1, p. 233-260.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. *In*: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/SBTA2005.pdf>. Acesso em: 23 de fev. 2021.

SILVA, J. H. **Incorporação de cinza de biomassa, decorrente da queima em caldeiras de lavanderias de jeans do agreste de Pernambuco, no concreto.** 2021. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho.

SILVA, R. O.; NUNES, C. G. L.; GUERRA, T. D.; LUZ, P. M. S. G.; MENDONÇA, A. M. G. D. Avaliação da absorção de água e índice de vazios de argamassas incorporadas com politereftalato de etileno. *In: III CONAPESQ*, 2018, Campina Grande. **Anais[...]** Campina Grande, 2018. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/42962>. Acesso em: 21 de fev. 2021.



TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and concrete research**, v. 31, n. 5, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884601004665>. Acesso em: 20 de fev. 2021.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife – PE – Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 3, p. 357-394, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/zX5CrBchZQq8z8ZMSM3zzFG/?lang=en>. Acesso em: 23 de fev. 2021.



TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. *In: ISAIA, G. C (org.). Concreto: ciência e tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011.

VRENNNA, J. P. C.; REIS, E. A. P. Estudo da inserção de resíduos poliméricos provenientes de equipamentos eletroeletrônicos inservíveis em compósitos cerâmicos/poliméricos. *In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 2017, Presidente Prudente. **Anais[...]** Presidente Prudente, 2017. Disponível em: <http://intertemas.toledoprudente.edu.br/index.php/ETIC/article/view/6060>. Acesso em: 25 de fev. 2021.


APÊNDICE A – RESULTADO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

 UFRPE		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À TRAÇÃO							 CITAR <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small>	
Traço	Betonada	Data de moldagem	Data de Rompimento	Ruptura no terço médio?	l (mm)	b (mm)	d (mm)	a (mm)	Força (N)	Resistência à tração (MPa)
T5	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	104,00	-	18148,50	4,9840
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	100,00	104,00	-	15597,90	4,3263
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	100,00	102,00	-	15401,70	4,4411
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	99,50	103,00	-	15499,80	4,4050
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	100,00	100,00	-	14911,20	4,4734
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	101,00	-	16284,60	4,7417
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	101,00	-	15696,00	4,5703
T10	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	100,00	100,00	-	15990,30	4,7971
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	102,00	-	19914,30	5,6854
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	103,00	100,00	-	15990,30	4,6574
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	103,00	102,00	-	9810,00	2,7463
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	100,00	101,00	-	18835,20	5,5392
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	99,00	100,00	-	16971,30	5,1428
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	102,00	100,00	-	16677,00	4,9050
T20	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	101,00	-	15205,50	4,4275
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	104,00	-	10692,90	2,9365
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	101,00	-	12262,50	3,5706
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	103,00	-	9711,90	2,7191
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	101,00	100,00	-	10889,10	3,2344
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	100,00	99,00	-	8436,60	2,5824
	1	09/12/2020	06/01/2021	SIM	300,00	102,00	100,00	-	14911,20	4,3856

APÊNDICE B – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T5

		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO					 <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small>	
Traço	Betonada	Data de moldagem	Data de Rompimento	Força (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistência à compressão (MPa)	
T5%	1	10/08/2020	07/09/2020	24.970,00	9,90	21,00	32,4383	
T5%	2	10/08/2020	07/09/2020	24.470,00	10,00	20,00	31,1562	
T5%	3	10/08/2020	07/09/2020	22.870,00	9,90	20,00	29,7102	
T5%	4	10/08/2020	07/09/2020	25.120,00	10,10	20,00	31,3536	
T5%	5	10/08/2020	07/09/2020	23.940,00	10,00	20,00	30,4814	
T5%	6	10/08/2020	07/09/2020	27.070,00	10,00	21,00	34,4666	
T5%	7	10/08/2020	07/09/2020	24.750,00	10,10	20,00	30,8918	
T5%	8	10/08/2020	07/09/2020	26.080,00	10,00	19,00	33,2061	
T5%	9	10/08/2020	07/09/2020	27.980,00	9,90	20,00	36,3486	
T5%	10	10/08/2020	07/09/2020	25.100,00	10,00	20,00	31,9583	
T5%	11	10/08/2020	07/09/2020	21.220,00	9,90	19,00	27,5667	
T5%	12	10/08/2020	07/09/2020	26.470,00	10,00	20,00	33,7027	

APÊNDICE C – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T10

 UFRPE		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				CITAR  CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS	
Traço	Nº CP	Data de moldagem	Data de Rompimento	Força (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistência à compressão (MPa)
T10%	1	10/08/2020	07/09/2020	16.050,00	10,00	21,00	20,4355
T10%	2	10/08/2020	07/09/2020	20.760,00	10,00	20,00	26,4325
T10%	3	10/08/2020	07/09/2020	22.170,00	9,90	20,00	28,8009
T10%	4	10/08/2020	07/09/2020	19.950,00	10,10	20,00	24,9006
T10%	5	10/08/2020	07/09/2020	21.140,00	10,00	20,00	26,9163
T10%	6	10/08/2020	07/09/2020	20.010,00	10,00	21,00	25,4775
T10%	7	10/08/2020	07/09/2020	19.000,00	10,10	20,00	23,7149
T10%	8	10/08/2020	07/09/2020	25.140,00	10,00	19,00	32,0092
T10%	9	10/08/2020	07/09/2020	18.860,00	9,90	20,00	24,5009
T10%	10	10/08/2020	07/09/2020	20.430,00	10,00	20,00	26,0123
T10%	11	10/08/2020	07/09/2020	19.420,00	10,10	19,00	24,2391
T10%	12	10/08/2020	07/09/2020	21.140,00	10,00	20,00	26,9163

APÊNDICE D – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T20

		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				 <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small>	
Traço	Nº CP	Data de moldagem	Data de Rompimento	Força (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistência à compressão (MPa)
T20%	1	10/08/2020	07/09/2020	17.000,00	10,00	20,00	21,6451
T20%	2	10/08/2020	07/09/2020	17.850,00	9,90	20,00	23,1888
T20%	3	10/08/2020	07/09/2020	21.400,00	10,00	20,00	27,2473
T20%	4	10/08/2020	07/09/2020	21.010,00	10,10	20,00	26,2237
T20%	5	10/08/2020	07/09/2020	19.350,00	9,90	20,00	25,1374
T20%	6	10/08/2020	07/09/2020	20.760,00	10,00	21,00	26,4325
T20%	7	10/08/2020	07/09/2020	21.990,00	10,10	20,00	27,4469
T20%	8	10/08/2020	07/09/2020	20.850,00	10,00	19,00	26,5470
T20%	9	10/08/2020	07/09/2020	21.420,00	9,90	20,00	27,8265
T20%	10	10/08/2020	07/09/2020	17.020,00	10,00	20,00	21,6705
T20%	11	10/08/2020	07/09/2020	20.180,00	10,10	19,00	25,1877
T20%	12	10/08/2020	07/09/2020	19.050,00	10,00	20,00	24,2552