

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE Mestrado Profissional em Materiais**

**WESLEN NERI DE LIMA**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE  
CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR  
POLIETILENO TEREFALATO MICRONIZADO PARA FINS  
ESTRUTURAIS**

**VOLTA REDONDA**

**2020**

**WESLEN NERI DE LIMA**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE  
CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR  
POLIETILENO TEREFTALATO MICRONIZADO PARA FINS  
ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais Compósitos, linha de pesquisa em materiais Cerâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

**VOLTA REDONDA**

**2020**

### FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

L732p Lima, Weslen Neri de

Produção e caracterização de compósitos de concreto com substituição do agregado miúdo por polietileno tereftalato micronizado para fins estruturais. / Weslen Neri de Lima. - Volta Redonda: UniFOA, 2020. 115 p.: Il

Orientador (a): Sérgio Roberto Montoro  
Coorientador (a): Ricardo de Freitas Cabral

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em  
Materiais, 2020

1. Materiais - dissertação. 2. Concreto. 3. Construção civil. 4. PET micronizado. I. Montoro, Sérgio Roberto. II. Cabral, Ricardo de Freitas. III. Centro Universitário de Volta Redonda. IV. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



WESLEN NERI DE LIMA

Produção e Caracterização de Compósitos de Concreto com Substituição do Agregado Miúdo por Polietileno Tereftalato Micronizado para Fins Estruturais

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE  
"MESTRE EM MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO  
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro  
Presidente / UniFOA

Profa. Dra. Cirlene Fourquet Bandeira  
Examinador interno / UniFOA

Prof. Dr. José Eduardo Dias  
Examinador externo / UGB/ FERP

Dezembro de 2020.

## DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais amados, Maura Neri e Geraldo Paixão e em especial a minha esposa Kelly Josiane pelo amor, companheirismo e apoio em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a DEUS, pai e criador e ao Mestre Jesus pelo intermédio de todas as orações. Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste projeto, em especial ao orientador Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral pela paciência, dedicação e profissionalismo. Gostaria também de agradecer e ressaltar o excelente trabalho da secretária Ana Maria Oliveira Carvalho, de todos os professores e colaboradores do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

**LIMA, W. N. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR POLIETILENO TEREFTALATO MICRONIZADO PARA FINS ESTRUTURAIIS.** 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) - Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, 2020.

## **RESUMO**

O setor da construção civil é encarregado por consumir uma grande parte dos meios naturais não renováveis e de criar impactos ambientais significativos, demonstrando a necessidade de ações que proporcionem novas práticas construtivas alternativas que atenuem os danos ao meio ambiente causados por este setor. Perante este panorama a inovação tecnológica faz-se fundamental para o alcance dos objetivos pretendidos, a pesquisa de novas tecnologias usando resíduos dos mais diversos segmentos da indústria e reinserindo-os em novos produtos, além de cumprir a necessidade da gestão ambiental reduzindo os impactos gerados, e colabora para o crescimento de um segmento de construção sustentável. Deste feito, este projeto teve o objetivo de apresentar um compósito de concreto para fins estruturais, com parte de seus agregados miúdos substituídos por PET micronizado. Para a utilização deste material na construção civil é necessário o atendimento aos parâmetros técnicos exigidos na NBR 8953:2015 “Concreto para Fins Estruturais”. Dentre os parâmetros exigidos, está a resistência característica do concreto que deve ser maior ou igual a 20 MPa. Para a obtenção desta característica foram realizados estudos de dosagem que contemplaram a execução total de 12 traços de concreto divididos em 3 grupos, no qual um deles foi composto por traços com substituição do agregado miúdo nas porcentagens 0%,5%,10% e 15% por PET e o outro grupo com resíduos de PET que substituíram parte do agregado miúdo em porcentagens que variaram entre 5% e 15% e com adição de aditivo em porcentagens variando entre 1,5% e 3,0%. O concreto PET micronizado depois de 28 dias atingiu o valor de 28,7 MPa com 5,0% de teor de PET demonstrando sua viabilidade técnica. O concreto com PET micronizado se mostra uma alternativa para localidades onde existe escassez de agregados naturais. E foi demonstrado que a utilização do concreto com PET micronizado aumenta a trabalhabilidade do concreto. Esta troca de materiais permitiu auxiliar no alívio dos

impactos ambientais causados pela construção civil e apresentou uma nova alternativa de reciclagem do resíduo de PET.

**Palavras-chave:** concreto, construção civil, reciclagem, resíduos, PET micronizado.

LIMA, W. N. **PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CONCRETE COMPOSITES WITH REPLACEMENT OF THE KID ADDED BY MICRONIZED POLYETHYLENE TEREFALATE FOR STRUCTURAL PURPOSES.** 2020. Dissertation (Professional Master of Material) - Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, 2020.

### ***ABSTRACT***

The construction sector is responsible for consuming a large part of the non-renewable natural resources and of generating significant environmental impacts, showing the need for actions that enable new alternative constructive practices that mitigate the Environmental damage caused by this sector. In view of this panorama, technological innovation is necessary to achieve the desired objectives, the study of new technologies using residues from the most different segments of the industry and reinserting them into new products, in addition to meeting the The need for environmental management, mitigating the impacts generated, contributes to the development of a sustainable construction segment. This work aimed to propose a concrete composite for structural purposes, with part of its natural aggregates replaced by micronized PET. For the use of this material in civil construction it is necessary to meet the technical parameters required in NBR 8953:2015 "concrete for structural purposes". Among the required parameters, is the characteristic strength of the concrete that must be greater than or equal to 20 MPa. In order to obtain this characteristic, dosage studies were carried out that included the total execution of 12 concrete traces divided into 3 groups, in which one of them consisted of traits with substitution of the child aggregate in the percentages 0%, 5%, 10% and 15% by PET and the other group with PET residues that substituted part of the child aggregate in percentages ranging from 5% to 15% and with additive addition in percentages varying between 1.5% and 3.0%. The micronized PET concrete reached the value of 28.7 MPa with 5.0% of PET content demonstrating its technical viability. The micronized PET concrete shows an alternative to localities where there is a shortage of natural aggregates. And it was demonstrated that the use of the concrete with micronized PET

increases the workability of the concrete. This exchange of materials enabled the relief of environmental impacts caused by civil construction and suggested a new alternative to recycle PET residue.

**Keywords: Concrete, construction, recycling, waste, micronized PET.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Preocupações dos líderes do setor de Construção Civil.....	24
Figura 2.	Exemplo de estrutura molecular dos polímeros .....	29
Figura 3.	Simbologia para plásticos.....	35
Figura 4.	Principais aplicações de PET reciclado no Brasil .....	36
Figura 5.	Microestrutura do concreto .....	49
Figura 6.	Representação esquemática da zona de transição entre pasta de cimento e agregado .....	50
Figura 7.	Sequência de passos para realização do ensaio de abatimento do tronco de cone para concretos de consistência plástica.....	52
Figura 8.	Inflência das condições de cura sobre a resistência.....	54
Figura 9.	Tipos de ruptura em ensaios de compressão de Corpos-de-prova cilíndricos .....	56
Figura 10.	Ensaio de tração .....	57
Figura 11.	Fluxograma do projeto.....	61
Figura 12.	Saco de cimento CPIII - 40 RS.....	62
Figura 13.	Brita 1 .....	63
Figura 14.	Areia média .....	63
Figura 15.	PET micronizada .....	64
Figura 16.	Aditivo Super Plastificante(SP).....	65
Figura 17.	Agitador Granulômetro marca H. Roth .....	69
Figura 18.	Peneiras marca Soloteste, para ensaio de granulometria dos agregados. ....	69
Figura 19.	Betoneira marca Menegotti modelo 120 litros Compacta .....	70
Figura 20.	Proveta de plástico modelo 1000 ml para medição da água e PET micronizado .....	70
Figura 21.	Balde metálico graduado modelo 5 litros para dosagem do agregado ..	71
Figura 22.	Balanças de precisão para pesagem do cimento .....	71
Figura 23.	Formas Soloteste - Cilíndricas base Ø10cm x altura 20cm .....	72
Figura 24.	Cone e barra de aço para o Teste de Slump .....	72
Figura 25.	Medição do abatimento e régua metálica .....	73
Figura 26.	Tanque de Cura.....	73
Figura 27.	Prensa Contenco, elétrica digital, 100 toneladas, modelo I-3025-B .....	74
Figura 28.	Microscópio Eletrônico de Varredura.....	74
Figura 29.	Revestimento dos Moldes com Óleo .....	78
Figura 30.	Mistura do concreto na betoneira .....	79
Figura 31.	Material para realização do Ensaio de Consistência .....	79
Figura 32.	Slump Teste.....	80
Figura 33.	Compactação do Concreto nos Moldes.....	80
Figura 34.	CPs conformados .....	81
Figura 35.	CPs na câmara úmida .....	81
Figura 36.	Balança da marca Bel Mark.....	82
Figura 37.	Peneiras para ensaios granulométricos.....	83
Figura 38.	Prensa e preparação do Corpo de Prova .....	84

Figura 39.	Rompimento dos CPs.....	84
Figura 40.	Laudo ensaio de compressão do CP .....	85
Figura 41.	Ensaio de Consistência .....	86
Figura 42.	Granulometria da areia .....	89
Figura 43.	Comparação da resistência dos CPs do Compósito I.....	92
Figura 44.	Comparação da resistência média de cada traço dos CPs do Compósito I .....	93
Figura 45.	Comparação da resistência dos CPs do Compósito II.....	95
Figura 46.	Comparação da resistência média de cada traço dos CPs do Compósito II.....	96
Figura 47.	Comparação da resistência dos CPs do Compósito III.....	98
Figura 48.	Comparação da resistência média de cada traço dos CPs do Compósito III.....	98
Figura 49.	Fck dos Compósitos e limite para concreto de fins estruturais.....	100
Figura 50.	Imagem estrutural 200x Compósito III (0%) .....	104
Figura 51.	Imagem estrutural 20x Compósito III (5%).....	104
Figura 52.	Imagem estrutural 100x Compósito II (15%) .....	105
Figura 53.	Imagem estrutural 200x Compósito II (0%) .....	105
Figura 54.	Imagem estrutural 2000x Compósito I (10%) .....	106
Figura 55.	Imagem estrutural 50x Compósito I (15%) .....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Exemplos de polímeros e principais aplicações .....	27
Tabela 2.	Exemplo de polímeros e suas unidade básicas de repetição .....	28
Tabela 3.	Propriedades mecânicas de alguns polímeros .....	30
Tabela 4.	Massa reciclada e taxa de reciclagem de PET no BRASIL .....	35
Tabela 5.	Classificação dos tipos de cimento .....	38
Tabela 6.	Tipos de aditivos para concreto .....	43
Tabela 7.	Tipos de concreto de acordo com massa específica .....	44
Tabela 8.	Classes de resistência de concretos estruturais .....	45
Tabela 9.	Classe de consistência .....	45
Tabela 10.	Desvio padrão para cada tipo de controle .....	48
Tabela 11.	Proporção em massa para composição do CP III – 40 RS .....	62
Tabela 12.	Principais características físicas do cimento CP III – 40 RS .....	62
Tabela 13.	Características do aditivo Sulfocim NSS 40 .....	65
Tabela 14.	Estimativa de Quantidade mínima total de CPs.....	75
Tabela 15.	Premissas para composição do Compósito .....	76
Tabela 16.	Proporção Teórica pretendida do Compósito I com Adições.....	76
Tabela 17.	Proporção Teórica pretendida do Compósito II com Adições.....	77
Tabela 18.	Proporção Teórica pretendida do Compósito III com Adições .....	77
Tabela 19.	Ensaio de granulométrico da areia .....	89
Tabela 20.	Ensaio granulométrico do PET micronizado.....	90
Tabela 21.	Resultados do ensaio de compressão do Compósito I.....	91
Tabela 22.	Resistência característica do concreto (fck) para Compósito I.....	93
Tabela 23.	Resultados do ensaio de compressão do Compósito II.....	94
Tabela 24.	Resistência característica do concreto (fck) para Compósito II.....	96
Tabela 25.	Resultados do ensaio de compressão do Compósito III .....	97
Tabela 26.	Resistência característica do concreto (fck) para Compósito III.....	99
Tabela 27.	Slump Test do Compósito I .....	101
Tabela 28.	Slump Test do Compósito II .....	102
Tabela 29.	Slump Test do Compósito III .....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP	<i>Associação Brasileira de Cimento Portland</i>
ABIPET	<i>Associação Brasileira da Indústria do PET</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CEFI	<i>Civil Engineering Forum for Innovation</i>
CERF	<i>Civil Engineering Research Foundation</i>
CONAMA	<i>Conselho Nacional do Meio Ambiente</i>
CSN	<i>Companhia Siderúrgica Nacional</i>
DMT	<i>Dimetil Tereftalato</i>
Fck	<i>Resistência Característica do Concreto à Compressão</i>
Fcj	<i>Resistência Média do Concreto à Compressão, Esperada para a Idade de j dias</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>
PTA	<i>Purificação do Ácido Tereftálico</i>
UGB	<i>Centro Universitário Geraldo Di Biase</i>
UniFOA	<i>Centro Universitário de Volta Redonda</i>
Slump	<i>Do Termo em Inglês “slump” (Baixar; Desmoronar). Teste para Controlar e Avaliar a Fluidez do Concreto, o mesmo que Abatimento</i>

## LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 1)	Resistência Média do Concreto à Compressão, Esperada para a Idade de j dias.....	47
(Equação 2)	Resistência à compressão dos CPs de concreto na idade de romper de (j) dias.....	55
(Equação 3)	Resistência Característica do Concreto à Compressão.....	91

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
2. OBJETIVO .....	20
2.1. ObjetivoS ESPECÍFICOS.....	20
3. JUSTIFICATIVA .....	22
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
4.1. CONSTRUÇÃO CIVIL E MEIO AMBIENTE .....	24
4.2. POLÍMEROS.....	26
4.2.1. Monômeros.....	27
4.2.2. Estrutura Molecular.....	28
4.2.3. Propriedades mecânicas .....	29
4.3. PET .....	31
4.4. RECICLAGEM .....	32
4.4.1. Reciclagem de PET .....	34
4.5. MATERIAIS E DEFINIÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND ..	37
4.5.1. Cimento Portland .....	37
4.5.2. Agregados .....	38
4.5.3. Água de Amassamento .....	41
4.5.4. Aditivos .....	41
4.5.5. Concreto de Cimento Portland.....	43
4.6. Concreto para fins estruturais, tipos e classificação .....	44
4.7. Dosagem do concreto .....	46
4.8. MATRIZ E ZONA DE TRANSIÇÃO DO CONCRETO .....	48
4.9. Propriedades do concreto fresco .....	51
4.9.1. Consistência .....	51
4.9.2. Trabalhabilidade .....	52
4.9.3. Pega .....	53
4.9.4. Cura do Concreto .....	53
4.10. Propriedades do concreto endurecido .....	55
4.10.1. Resistência à Compressão.....	55
4.10.2. Resistência à Tração.....	57
4.11. Concreto com Plásticos Reciclados .....	58

5. MATERIAS E MÉTODOS .....	60
5.1. Fluxograma do trabalho .....	60
5.2. Materiais utilizados.....	61
5.2.1. Cimento CP III .....	61
5.2.2. Brita 1 .....	63
5.2.3. Areia .....	63
5.2.4. PET Micronizado .....	64
5.2.5. Aditivo.....	64
5.3. Métodos .....	65
5.3.1. Procedimentos das Normas de Engenharia .....	66
5.3.2. Laboratórios e Equipamentos.....	68
5.3.3. Traços dos Compósitos .....	75
5.3.4. Conformação dos CPs.....	78
5.3.5. Ensaios.....	82
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	103
7. CONCLUSÕES .....	107
8. TRABALHOS FUTUROS .....	109
9. BIBLIOGRÁFICAS .....	110

## 1. INTRODUÇÃO

A atenção com o meio ambiente é visada pelas ações industriais atuais de forma a procurarem cada vez mais o pensamento do desenvolvimento sustentável operacional e reutilização de subprodutos nas redes de fabricação com o aumento de tecnologias em materiais (LOUREIRO, 2017).

O crescimento de rejeitos de garrafas de Polietileno Tereftalato (PET) levou a tomada de iniciativas sendo dada melhor importância ao tema. Assim, a aplicação de compósitos poliméricos se envolve neste conceito em que são apresentados diferentes materiais com características mecânicas distintas de acordo com as necessidades estruturais de peças associado ao custo benefício operacional, como por exemplo o concreto polímero (CONCRETO, 2018).

O material mais usado em obras da construção civil é o concreto, que é feito por uma mistura de aglomerante (cimento), agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra) e água (CONCRETO, 2018). Como mostra nossa história, os romanos foram os primeiros a usar este tipo de material, chamado como "Pozzolana", material que reage junto com hidróxidos de cálcio na participação de água o que dá princípio a um material aglomerante (POZOLANA, 2013).

A durabilidade e resistência do concreto estão intrinsecamente ligadas aos materiais que o compõem. A mistura desses materiais dá-se o nome de traço ou dosagem. A água aplicada contribui para a ação química que torna o cimento Portland em uma massa ou pasta aglomerante. Se a medida de água for bem pequena, a reação não acontecerá por completo e também a capacidade de se integrar às formas será prejudicada, porém se a porção for maior a ideal, a resistência diminuirá em função das aberturas ou poros que ocorrerão quando este excedente evaporar. A relação entre a água e o cimento utilizados na mistura é chamado de fator água/cimento. As quantidades entre areia e brita no composto tem influência na capacidade de se moldar às formas e na resistência (CONCRETO, 2018).

Os compósitos gerados a partir de matrizes poliméricas podem ser possibilidades eficientes ao emprego do concreto tradicional e ao aço, objetos que geram impactos ambientais relevantes na sua fabricação, além de grande consumo de recursos naturais. Entretanto, os compostos com resinas poliméricas mostram uma

propriedade que reduz sua utilização em determinadas aplicações na engenharia civil (TONET, 2009).

O resíduo sólido urbano bastante achado e descartado de forma inadequada na natureza é a garrafa de Polietileno Tereftalato (PET). Na engenharia no ramo de construção civil este material é capaz de ser utilizado em muitas aplicações, entre elas como agregado miúdo para a formação de concreto, quando suas fibras ou pó são adicionadas ou misturadas à areia (SANTOS, BORBA, *et al.*, 2015).

Os rejeitos aproveitados neste estudo são provenientes de garrafas PET micronizado. PET micronizado é o produto da micronização do Polietileno Tereftalato (PET) com objetivo de diminuição de custo no seguimento colchoeiro na sua produção final. O PET micronizado foi criado unicamente como matéria prima na industrialização de Espumas de poliuretano, o PET micronizado mesmo sendo um item novo no mercado, traz diferentes vantagens para quem o compra, além de redução de custos de produção, é um item altamente sustentável que não açoita o meio ambiente e favorece para uma produção mais limpa (MICROPET, 2018).

## **2. OBJETIVO**

Objetivou-se neste trabalho, o desenvolvimento e caracterização de um composto confeccionado a partir do concreto com substituição da areia natural ou agregado miúdo proveniente dos leitos dos rios por PET micronizado com possibilidade compatível com as do concreto sem adições buscando finalidades estruturais..

Para obter este objetivo, utilizou-se os processos de técnicas normatizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por normas regulamentadoras e a Ciência dos Materiais, para criar um concreto com substituição parcial da areia natural (agregado miúdo), por adições percentuais (0%, 5%, 10% e 15%) de agregados miúdos de PET micronizado.

Nesse sentido, a finalidade desta dissertação é avaliar as propriedades de um concreto feito com substituição de uma fração do agregado miúdo (areia natural) por areia de PET micronizado para finalidades estruturais.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudar a influência do acréscimo de materiais poliméricos reciclados (PET micronizado) nas propriedades do concreto, com substituição do agregado miúdo em 5, 10 e 15% por PET micronizado.
- Estudar, em laboratório, o comportamento destes materiais, aplicado em concreto com dosagem similar ao da tabela de Caldas Branco (CONCRETO, 2018).
- Identificação das propriedades mecânicas através da realização de ensaios de compressão e consistência em amostras do compósito.
- Realização do MEV dos materiais obtidos, com o intuito de analisar a interação entre a matriz polimérica e o concreto.

- Contribuir com o meio técnico propondo e avaliando um material que terá como objetivo uma inovação tecnológica que auxilie na diminuição do impacto ambiental na engenharia civil no segmento de construção civil.
- Aprimorar processos para co-dispor materiais de resíduo em estruturas de concreto com finalidades estruturais.
- Verificar se o composto atingirá a resistência e consistência para finalidades estruturais conforme ABNT NBR 8953: 2015.

### 3. JUSTIFICATIVA

Com o aumento da construção civil é possível ver o crescente impacto ambiental causado no país. Porém, assim como este setor tem o grande potencial criador de resíduos, ela também tem a possibilidade de consumir e reciclar seus próprios rejeitos ou resíduos, bem como resíduos de demais setores da indústria. A partir dessa capacidade é que se originaram muitas pesquisas com o intuito de utilizar ao máximo o que os elementos residuais podem oferecer com o estímulo ao reuso e à reciclagem (CALMON, 2007); (SANTOS, BORBA, *et al.*, 2015).

O segundo polímero mais encontrado nos aterros sanitários no Brasil é o PET, que corresponde a aproximadamente 21% do total de plásticos encontrados, sendo este percentual relacionado diretamente com o aumento do consumo de embalagens e descartáveis, principalmente garrafas de refrigerantes. O PET é uma matéria plástica muito versátil e pode ser 100% reciclado e reutilizado em várias formas, e em várias indústrias, inclusive na indústria da construção civil (PEREIRA, 2016); (MELO, 2004).

A reciclagem das garrafas PET baseia-se em realizar a trituração e moagem do material, dando assim novas formas e granulometrias. Como consequência deste processo de trituração ocorre ao longo do processo a formação de um subproduto, o pó de PET. O pó de PET micronizada é um subproduto da trituração e moagem, e em muitos casos é descartado devido a sua falta de uso, dificuldades de estoque e possibilidades de reutilização (PEREIRA, 2016).

Entre as escolhas possíveis para o destino final de resíduos podem-se destacar a descensão dos resíduos/rejeitos em aterros e a reciclagem que, além de diminuir a necessidade de geração de novos aterros, possibilita a diminuição da aplicação de novos recursos naturais não renováveis (MODRO, MODRO, *et al.*, 2009).

Com este estudo, de grande aplicação prática, o uso de resíduos poliméricos oriundo de PET micronizada no concreto pode ajudar ou contribuir para futuras pesquisas, tanto na área de concreto com substituição do agregado como na área de materiais de análise e reparo para estruturas e para fins estruturais.

Leite (2001) explica que o fato de integrar resíduos ao concreto é interessante, observado que este é um material criado em larga escala (cerca de 6 bilhões de toneladas/ano), com simples aplicação, ágil no ponto de se adequar à várias ocasiões, com grande potencial para encapsulamento de substâncias nocivas, sendo indelével (quando bem confeccionado) e razoavelmente forte à agentes químicos e físicos (LEITE, 2001), (OLIVEIRA, SENA, *et al.*, 2016).

Além disso, a reciclagem poderá ocasionar em vantagens econômicas, se associada ou comparada com utilização do concreto convencional, e na possibilidade de criação de um produto com características que permitam aumentar o leque de uso na engenharia no segmento de construção civil, inclusive na produção de elementos de menor valor para utilização em obras civis de interesse social.

Uma nação que está em uma crescente, consumirá cada vez mais riquezas naturais. O reaproveitamento consciente e elaborado de rejeitos oriundos das garrafas de Polietileno Tereftalato (PET), promoverá a sustentabilidade principalmente na construção civil com a redução dos impactos ambientais a níveis adequados e mínimos.

O atual estudo justificou-se pela obrigação atual da reutilização de resíduos industriais e diminuição no consumo das reservas naturais, contribuindo para os problemas econômicos e ambientais das instituições.

Por esses argumentos, neste estudo será utilizada a PET micronizada, obtida por micronização da PET, um polímero componente da família dos poliésteres, como matéria alternativa na produção de concretos buscando finalidade estruturais.

Para a produção deste estudo, optou-se por desenvolver um composto utilizando uma matriz de PET que é um polímero da família das poliolefinas e figura entre os mais utilizados no planeta por ser um material muito versátil, com boas características físicas, mecânicas e térmicas . Dessa forma, o concreto final obtido neste estudo, contém menor quantidade de areia natural, bem como reaproveita um importante resíduo da indústria.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. CONSTRUÇÃO CIVIL E MEIO AMBIENTE

Pesquisa mundial elaborada pela *Civil Engineering Research Foundation* (CERF), hoje chamada *Civil Engineering Forum for Innovation* (CEFI), instituição associada ao *American Society of Civil Engineers* (ASCE) dos Estados Unidos, divulgou que a questão ambiental é uma dos grande interesses dos líderes do setor de construção civil, logo abaixo da informática (Figura 1) (GALVÃO, 2010).

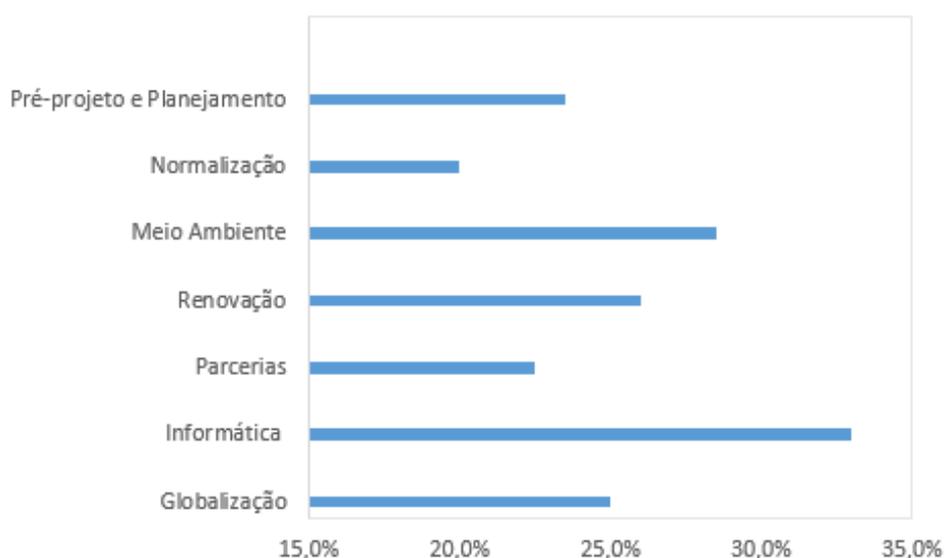


Figura 1 - Preocupações dos líderes do setor de Construção Civil

Fonte: Galvão, 2010

Segundo John (2017), a razão desta atenção decorre de alguns aspectos objetivos (JOHN, 2017), (GALVÃO, 2010):

- a) O maior usuário de recursos naturais. A construção é causador por entre 15 e 50 % do uso dos recursos naturais extraídos. A utilização de agregados naturais varia por volta de 1 e 8 toneladas/habitante.ano. No Brasil a utilização de agregados naturais, apenas na fabricação de concreto e argamassas, é de 220,0 milhões de toneladas.
- b) Matérias primas escassas. Um as matérias primas comuns da construção civil tem territórios mapeados escassos. O cobre e o zinco, por exemplo,

possui reservas suficientes somente para 60 anos. Ainda que estes valores possam de fato ser questionados, certamente exercem influência ou peso no preço dos produtos, prejudicando o uso.

- c) Geração de contaminação do ar. Além de retirar recursos naturais, a fabricação de materiais de construção também gera poluição: poeira,  $\text{CO}_2$ . O processo produtivo do cimento necessariamente causa ou gera  $\text{CO}_2$  gás importante na poluição. Para cada tonelada de clínquer fabricado mais de 600 kg de  $\text{CO}_2$  são produzidos.
- d) Construção: o maior causador de resíduos. Por fim, a construção civil é sem dúvida o maior causador de resíduos de toda a coletividade. O volume de restos de construção e demolição criado é o dobro do volume criado de lixo sólido urbano. Os números internacionais oscilam entre 0,7 a 1,0 ton/habitante.ano.

Nos países em crescimento como o Brasil, esses aspectos são ainda mais relevantes, porque a indústria da construção civil é um área que desempenha importante papel na economia brasileira. A indústria da construção civil é responsável por considerável parte dos investimentos no Brasil proporcionando avanços de desenvolvimento na infraestrutura e, especialmente, apoiando a geração de empregos (GALVÃO, 2010).

Quanto aos entulhos da construção civil Pinto (2005) aponta que a falta de funcionamento ou, em alguns casos, a ausência de políticas públicas que controlam e ordenam os fluxos da aplicação dos resíduos ou entulhos da construção civil nas cidades, relacionadas à falta de compromisso dos originadores no manejo e, especialmente, na destinação dos resíduos, geram os seguintes impactos ambientais (PINTO, 2005), (GALVÃO, 2010):

- degradação das áreas de nascentes e de proteção permanente;
- proliferação de fatores transmissores de doenças;
- assoreamento de flumes e córregos;
- obstrução dos meios de drenagem, tais como galerias, valas, entre outros;

- ocupação de vias e ruas públicas por resíduos, com dano à circulação de pessoas e carros, além da própria destruição da paisagem urbana;
- existência e concentração de resíduos que podem criar risco por sua periculosidade.

Com as políticas públicas de controle dos resíduos da construção civil, em especial, a Resolução CONAMA nº 307 – Controle ou Gestão dos Resíduos da Construção Civil no Brasil, de 5 de julho de 2002 e a divulgação de normas técnicas, percebe-se uma redução das grandes quantidades de resíduos gerados (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2002).

As ações de gestão ou controle de resíduos da construção civil são ainda iniciais, mas apresentam a percepção da obrigação de mudança de cultura dos envolvidos em todas as partes da construção civil, bem como da sociedade num todo, mas ligação com o meio ambiente (GALVÃO, 2010).

## **4.2. POLÍMEROS**

O termo “polímero”, derivado da união das palavras gregas “poli” e “mero” que representam “muitas” e “partes” respectivamente, foi desenvolvido pelo químico alemão Jöns Jacob Berzelius em 1932 para definir compostos com mesma fórmula empírica mas com pesos moleculares distintos. Os polímeros constituem em cadeias ou redes moleculares com um comprimento muito grande, por isso são abalizados como macromoléculas. A estrutura mais importante da molécula polimérica é uma série de unidade repetitivas denominadas de meros. A partir dessas unidades básicas, os monômeros, a rede é sintetizada agregando essas pequenas partes umas às outras. Esse processo tornou-se denominado polimerização (JÚNIOR, 2016).

Devido à grande variedade de propriedades desse grupo de elementos, os polímeros têm uma ampla gama de finalidades. Essa grande variedade de propriedades se deve a estrutura complexa microestrutura desse elemento. Condições como peso molecular, formação química e sistema de produção, entre outros, possibilitam se obter tanto elementos macios quanto elementos muito rígidos (SALVADOR, 2013).

Na tabela 1, foi feito uma relação dos polímeros que são mais utilizados como material de engenharia, também o utilizado nesse trabalho, Polietileno Tereftalato (PET) usado neste trabalho e suas principais aplicações (SALVADOR, 2013).

Tabela 1 - Exemplos de polímeros e principais aplicações

<b>Polímero</b>	<b>Sigla</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Principais Aplicações</b>
<b>Polipropileno</b>	<b>PP</b>	<b>0,91</b>	Fibras, peças automotivas
<b>Polietileno de Alto Módulo</b>	<b>HMPE</b>	<b>0,98</b>	Cabos submarinos
<b>Polietileno Tereftalato</b>	<b>PET</b>	<b>1,35</b>	Embalagens e fibras têxteis
<b>Poliamida</b>	-	<b>1,11 – 1,40</b>	Produtos têxteis
<b>Policloreto de Vinila</b>	<b>PVC</b>	<b>1,30 – 1,58</b>	Canos e tubulações

Fonte: Salvador, 2013

#### **4.2.1. Monômeros**

Os monômeros consistem em moléculas com capacidade para passar pelas ações de polimerização. No geral, são conjuntos de carbono insaturadas. As formas de monômeros presentes na produção do polímero fazem fundamental influência nas características da macromolécula. Polímero com só um único tipo de monômero em sua organização são chamados de homopolímeros, e tendo dois ou mais tipos de monômeros na organização é chamado de copolímeros (JÚNIOR, 2016).

Os copolímeros possuem propriedades mais complexas, gerando materiais com uma gama grande de utilização do que os homopolímeros, que apresentam uma maior limitação em suas características ou propriedades. Para que uma molécula possua potencial para criar uma macromolécula é fundamental que ela tenha um grau de aplicação ou funcionalidade maior do que 2, ou seja, a corpúsculo deve ter mais do que 2 pontos em sua estrutura na qual consiga se conectar a outra molécula (SALVADOR, 2013).

Na tabela 2 estão demonstrados alguns exemplos de polímeros e suas próprias unidade básicas de repetição, que podem compreender um ou mais monômeros (JÚNIOR, 2016).

Tabela 2 - Exemplo de polímeros e suas unidades básicas de repetição

Polímero	Sigla	Classificação	Unidade de repetição
Polipropileno	PP	Homopolímero	$\left[ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right]$
Polietileno de alto módulo	HMPE	Homopolímero	$\left[ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]$
Poliamida (Nylon 6,6)	-	Copolímero	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} & \text{O} & \text{H} & \text{O} \\   &    &   &    \\ -\text{N} & -\text{C} & -\text{N} & -\text{C}- \\   &   &   &   \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Polietileno tereftalato	PET	Copolímero	$\left[ \begin{array}{c} \text{O} & \text{O} & \text{H} & \text{H} & \text{O} \\    &    &   &   &   \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{O} & -\text{C} & -\text{C}- \\   &   & &   &   \\ \text{C}_6\text{H}_4 & & & \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$
Policloreto de vinila	PVC	Homopolímero	$\left[ \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right]$

Fonte: JUNIOR, 2016

#### 4.2.2. Estrutura Molecular

Processos modernos de síntese de polímeros possibilitam um controle considerável sobre as propriedades estruturais das cadeias moleculares. De acordo com sua arquitetura ou forma, os polímeros são classificados em (ASUA, 2007), (CALLISTER, 2010):

- Polímeros lineares: gerados por muitas cadeias lineares de monômeros. Criam materiais flexíveis e de grande peso molecular, com muitas ligações entre as moléculas próximas. O Polietileno, poliestireno, policloreto de vinila e nylon são exemplos de polímeros constituídos dessa forma. A figura 2(a) exemplifica a estrutura linear (CALLISTER, 2010).
- Polímeros ramificados: possuem cadeias lineares que têm ramificações derivadas de reações secundárias na técnica de polimerização. O

empacotamento da cadeia é mais baixo em comparação a cadeia linear e isso constitui para que a densidade do polímero que possui cadeias ramificadas consiga ou tenha uma densidade mais baixa. Em geral esses polímero que constituem estruturas lineares podem constituir estruturas ramificadas, conforme os fatores do processo de polimerização. O polietileno de menor ou baixa densidade é um exemplo de polímero com essa organização. A figura 2(b) exemplifica a estrutura ramificada (CALLISTER, 2010).

- c) Polímeros em rede: são polímeros onde ocorrem alto grau de ligações covalentes cruzadas, formando uma estrutura tridimensional. Exemplo desse grupo podemos citar os epóxis e os poliuretanos. A figura 2(c) exemplifica a estrutura em rede (CALLISTER, 2010).

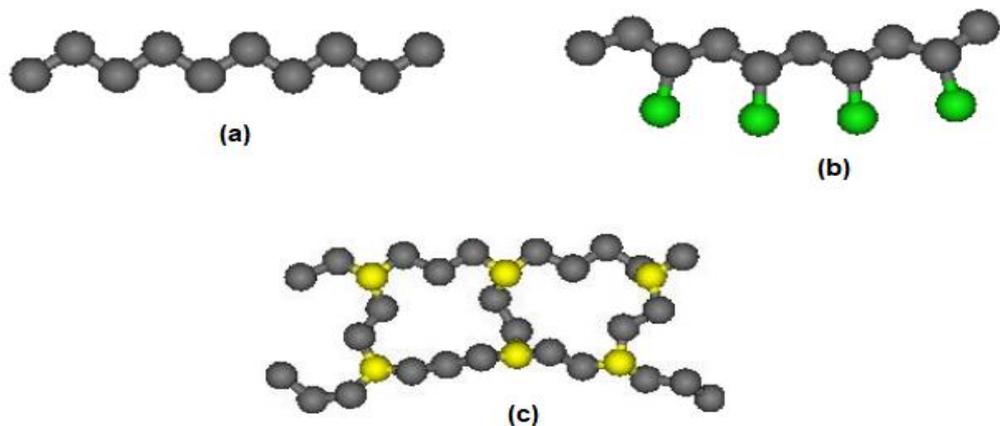


Figura 2 – Exemplo de estrutura molecular dos polímeros

Fonte: CALLISTER, 2010

#### 4.2.3. Propriedades mecânicas

As características mecânicas dos polímeros mudam conforme com a temperatura em que a matéria se encontra, e conforme como a carga é usada. Para os polímeros, portanto como nos demais grupos de, o interesse nas características mecânicas se resume no módulo de deformação, deformação e resistência a tração.

Essas características podem ser determinadas por meio da análise de resistência à tração, que gera o diagrama tensão-deformação (JÚNIOR, 2016).

Os polímeros com maior rígides, os termofixos, são frágeis em comparação aos outros grupos, e possuem alto módulo de elasticidade, porém os polímeros dúcteis, termoplásticos, possuem uma diagrama tensão-deformação mais equilibrado e por esse motivo consomem uma maior quantidade de energia. Os elastômeros faz parte do grupo que apresentam o mais baixo módulo de elasticidade, resultando em altas deformações mesmo com menores solicitações (BRUICE, 2010).

A tabela 3 exemplifica alguns polímeros e suas principais propriedades mecânicas (CALLISTER, 2010).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de alguns polímeros

Polímero	Sigla	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)
Polipropileno	PP	31,0 – 41,4	1,14 – 1,55	100,0 – 600,0
Polietileno de Alto Módulo	HMPE	3.000,0	109,0 – 132,0	3,5
Aramida (Nylon 6,6)	-	75,9	1,59 – 3,79	150,0 – 300,0
Polietileno Tereftalato	PET	48,3 – 72,4	2,76 – 4,14	30,0 – 300,0
Polietileno de Baixa Densidade	PEDB	8,3 – 31,4	0,172 – 0,282	100,0 – 650,0
Polietileno de Alta Densidade	PEAD	22,1 – 31,0	1,08	10,0 – 1.200,0
Policloreto de Vinila	PVC	40,7 – 51,7	2,41 – 4,14	40,0 – 80,0

Fonte: CALLISTER, 2010

As propriedades mecânicas do polímeros estudados nesse trabalho em forma de PET micronizada adicionadas ao concreto fica explicita na tabela 3. O PET possui resistência à tração da ordem de 28,3 MPa a 72,4 MPa e módulo de elasticidade na ordem de 2,76 GPa a 4,14 GPa.

### 4.3. PET

No ano de 1941 os grandes químicos Whinfield e Dickson criaram o material plástico polietileno tereftalato, tratando-se pela sigla (PET) proveniente das primeiras letras do seu conceito ou nome científico, sendo um objeto termoplástico que não sofre mudanças em sua estrutura química enquanto o aquecimento ou esquentamento até a sua fusão, e depois de ser resfriado, pode ser fundido de novo. O PET é adquirido industrialmente a partir de mudanças químicas especiais denominadas reações de polimerização. No processo do PET, os reagentes mais usados são as substâncias orgânicas (ARAGON e GHIRALDELLO, 2014).

O PET é, o polímero composto pela reação do ácido tereftálico e pelo etilenoglicol. Por sua vez, o ácido tereftálico é adquirido pela oxidação do p-xileno, enquanto o etilenoglicol se tornou sintético a partir do eteno, sendo ambos no país produtos da indústria petroquímica. No início o PET era na realidade só obtido a partir do ester do ácido tereftálico, o dimetil tereftalato - DMT, pertinente à dificuldade de alcance do ácido com a pureza eficiente para a aplicação. Essa reação é chamada como transesterificação e atualmente é uma das rotas usadas para a síntese do PET. O aumento de processos próprios à purificação do ácido tereftálico - PTA proporcionou a produção rentável do PET pelo caminho da esterificação direta, hoje muito usada para a fabricação do PET (EDERLI, 2004).

O Polietileno Tereftalato é um polímero cristalino e tem suas características dependentes do ponto de cristalinidade que chega. Quanto maior o grau de cristalinidade, maior a rigidez (e menor resistência ao impacto), superior a resistência térmica e inferior a transparência. A temperatura de transição vítrea é por volta de 75°C, logo é rígido à temperatura ambiente e flexível acima de 75°C (EDERLI, 2004).

De acordo com a ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET, o Polietileno Tereftalato é 100% reciclável e é atualmente utilizado na produção de fibras têxteis, filmes para adesivos, recipientes de bebidas, itens como papéis, tapetes, mantas de tnt, cordas, vassouras, resinas alquídicas utilizadas para fabricação de tintas, resinas insaturadas utilizadas para fabricação de adesivos e resinas poliéster, sofás, pufes, trajes esportivas, calçados, malas, entre outros (ARAGON e GHIRALDELLO, 2014).

Segundo a ABIPET (2016) a reciclagem de PET corresponde a uma

quantidade total de 274 kton do material (ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET, 2016). Se por um lado este elevado índice de reciclagem coloca o Brasil numa excelente posição no ranking dos recicladores de PET, por outro lado ele demonstra que existe uma grande parcela desse produto que não possui esta mesma destinação pós-consumo, sendo seu destino final a deposição em aterros (MODRO, 2008).

Quando disposto em aterros o PET pode passar cerca de 400 anos para se degradar, diminuindo a capacidade física dos aterros e provocando durante esse tempo uma redução da eficiência de percolação de gases líquidos, gerando um aumento no tempo fundamental para a estabilização da matéria orgânica (MODRO, 2008). O PET possui grande resistência a causas biológicas e atmosféricas, e seus itens de degradação não prejudica ao corpo humano (PEZZIN, 2007). As garrafas de Polietileno Tereftalato são completamente inertes, isto significa que, mesmo mal descartadas, não resultam nenhum tipo de destruição para o solo ou lençóis freáticos (CANELLAS, 2005).

A não reciclagem de recipientes de PET para a fabricação de novos produtos ou objetos, com a conseqüente deposição destes recipientes em aterros, causa um grande dano ambiental. Mas, deve-se levar em importância o impacto provocado pela remoção do meio ambiente de novas matérias-primas de uma matriz não renovável (petróleo) para garantir a reposição de reservas. Também deve ter-se em mente o enorme potencial econômico perdido com este ato, seja pelo abandono de matéria-prima completamente reutilizável, seja pelos encargos resultantes da criação e gestão de novos aterros (MODRO, 2008). A reciclagem permite um ganho na redução do uso de energia, pois o sistema de reciclagem usa em média 30,0% da energia que seria essencial ao processo da resina virgem, altera as propriedades do produto final (PIRES, 2015).

#### **4.4. RECICLAGEM**

A rentabilidade do comércio de reciclagem de embalagens plásticas no país (Brasil), como em outros países bem desenvolvido, mostra aspectos interessantes para iniciativas empresariais da área, com reflexos sócio-econômicos que estão diretamente conectados das condições de vida da população, desenvolvimento de

renda, controle de recursos naturais e atenuação de questões ambientais (FORLIN e FARIA, 2002).

Os elementos de embalagem termoplásticos caracterizam-se como objetos de reações de polimerização totais com cadeias lineares ou ramificadas. As características físicas são afetadas quando sujeitos ao calor e resfriamento em determinados ciclos, ocorrendo a formação de baixo índice de ligações cruzadas, as quais estão relacionadas com a rigidez dos mesmos. Os elementos termoplásticos compõem quase totalmente o volume dos plásticos usados como embalagens primárias (FORLIN e FARIA, 2002).

O desenvolvimento de novas tecnologias utilizadas na reciclagem de plásticos, tem como finalidade criar um material para substituir o plástico virgem, reduzindo a utilização de recursos minerais e os efeitos ambientais causados pela mesma exploração ou pelo descarte inapropriado do lixo (FORMIGONI e CAMPOS, 2012).

Em uma economia global, as empresas precisam de vantagens diferenciadas para ficarem no mercado de trabalho. Assim, o mercado passou a ficar mais exigente e privilegiando a seleção de produtos de companhias que usem tecnologias de produção e métodos de gestão que preservem o meio ambiente (FORMIGONI e CAMPOS, 2012).

A reciclagem é vista como uma das alternativas mais fundamentais dentro da avaliação de desenvolvimento sustentável determinado pela ONU (Organização das Nações Unidas), o modo deve ser usado em dois casos (FORMIGONI e CAMPOS, 2012):

- Quando a recuperação dos resíduos da metalurgia for técnica e economicamente viável, e como higienicamente utilizável;
- Quando as propriedades de cada material sejam respeitadas.

#### 4.4.1. Reciclagem de PET

A maior complexidade da reciclagem de PET é a oferta de material, apesar do aumento dos últimos anos, ela ainda é retraída e está aquém da carência. A falta de abastecimento contínuo e homogêneo de matéria-prima é o retrato da quase ausência de uma política de recolhimento seletivo pelas prefeituras. Soma-se a isto a ausência de consciência das pessoas sobre a obrigação de reciclar os resíduos (FORMIGONI e CAMPOS, 2012).

O sucesso na reciclagem de elementos de embalagem descartados pós-consumo ou regressáveis estão literalmente associado com fatores culturais, públicos e sócio-econômicos da multidão a implantação de instituições recicladoras; a participação de programas de coleta selecionada, de reciclagem ou de inclusão com companhias recicladoras, em conjunto às comunidades (prefeituras); o desimpedimento contínua de quantidades recicláveis; a criação de tecnologias e serviços compatíveis para fins de reciclagem econômicas e tecnicamente capaz; programas de apoio para projetos de reciclagem; diminuição de tributação ou dispensa fiscal para a comercialização de materiais reciclados; e, sanções legais para atividades ou agentes não integrados com medidas de reciclagem na relação produção-utilização-consumo de embalagens (FORLIN e FARIA, 2002).

A ABNT, por meio da NBR 13.230 (1994), determina símbolos para a identificação dos termoplásticos usados na aplicação de embalagens e recipientes, trabalho fundamental para viabilizar a economia industrial da reciclagem (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). Esses símbolos padronizados, geralmente são apresentados em alto relevo na parte inferior da embalagem (Figura 3) (FORMIGONI e CAMPOS, 2012).

A maior parte do PET apresentado para reciclagem origina-se de catadores, que constituem um trabalho de varredura pelas vias e lixões e de algumas instituições não governamentais que se estruturaram. Esses separam as garrafas por cor, tirando o rótulo e a tampa e embalando para vender a recicladores. Mas, a grande maioria dos catadores jamais foi treinada e suas expertise sobre o tema foi adquirido na prática (FORMIGONI e CAMPOS, 2012).

A figura 3 demonstra a simbologia utilizada para a identificação e separação de materiais plásticos em processos de reciclagem (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

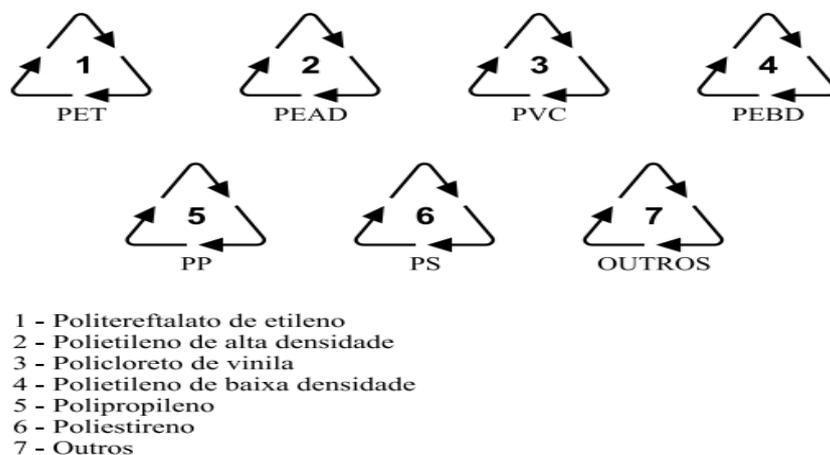


Figura 3 - Simbologia para plásticos

Fonte: ABNT NBR 13230, 1994

Apesar das dificuldades em relação à reciclagem, como por exemplo: a incidência de imposto sobre o material reciclado; o custo da coleta seletiva que é superior ao da coleta convencional; a dificuldade em segregar os tipos de plásticos; a dificuldade de se obter o fornecimento constante do material de boa qualidade; não existem empresas recicladoras próximas das empresas consumidoras; quebrar o paradigma em relação ao uso de produtos reciclados (DUARTE, 2014), no Brasil este processo de reciclagem avança significativamente conforme Tabela 4 (ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET, 2016).

Tabela 4 – Massa Reciclada e Taxa de Reciclagem de PET no BRASIL

<b>Ano</b>	<b>Massa Reciclada (t)</b>	<b>Taxa de Reciclagem (%)</b>
2008	253	54,8
2009	262	55,6
2010	282	55,8
2011	294	57,1
2012	331	58,9
2014	314	-
2015	274	51,0

Fonte: ABIPET, 2016

Observou-se que, apesar da taxa de reciclagem ser elevada, consta-se que ainda há mais de 40% do material sendo encaminhado para aterros. Este tipo de disposição final produz impactos, tais como (MODRO, MODRO, *et al.*, 2009):

- Sua decomposição leva cerca de de 100 a 400 anos;
- Diminui a capacidade física dos aterros;
- Complica a percolação de gases e fluidos;
- Aumenta o tempo para a estabilização do material orgânico, apesar de ser um material inerte, ou seja, seus filamentos não resultam contaminação dos solos e lençóis freáticos.

No Brasil, o PET requalificado tem a melhor variedade de aplicações do mundo, as principais aplicações do PET reciclado são apresentados na (Figura 4) (ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET, 2016).



Figura 4 – Principais Aplicações de PET reciclado no Brasil

Fonte: ABIPET, 2015

Desta forma, analisa-se como a reciclagem do PET pode fazer parte das estratégias empresariais e governamentais a fim de atenuar os impactos gerados por seu descarte, sendo um portador de desenvolvimento socioeconômico para a população e um impulso para as inovações tecnológicas, tanto na indústria como nas instituições de ensino e pesquisa (DUARTE, 2014).

## 4.5. MATERIAIS E DEFINIÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

### 4.5.1. Cimento Portland

A palavra CIMENTO é gerado do latim *CAEMENTU*, que representava na velha Roma espécie de rocha natural de rochedos e não cortada. A origem do cimento foi reportada há cerca de 2.500 anos A.C. (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018).

Em 1824, um construtor britânico de nome Joseph Aspdin incendeu pedras calcárias e argila ao mesmo tempo, transformando-as em pó fino. O material não se separava em água e foi registrada pelo construtor no ano de 1824, e nomeado de cimento “Portland”, que obteve esse nome ao apresentar cor e características parecidas das pedras da ilha britânica de Portland (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018), (INFOFÁCIL, 2010).

Conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2018), o cimento pode ser determinado como um pó fino, com características aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que solidifica sob a reação com a de água (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018).

O cimento Portland é um dos materiais mais consumidas pelo homem e isso se deve às suas características próprias, como trabalhabilidade e moldabilidade (no estado fresco), e grande durabilidade e resistência a cargas comprimidas e ao fogo (no estado duro) (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018).

As primeiras fabricações de cimento no Brasil surgiram por volta de 1888 em uma fábrica instalada na fazenda Santo Antônio, na cidade de Sorocaba-SP (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018).

De acordo com ABCP (2018), os tipos de cimentos podem ser classificados de acordo com a Tabela 5 (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018), (PEREIRA, 2016).

Tabela 5 - Classificação dos tipos de cimento

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Escória Siderúrgica (%)	Material Pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I - S	Comum	95 - 99	1 - 5	1 - 5	1 - 5
CP II - E	Composto	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10
CP II - Z	Composto	76 - 94	-	6 - 14	0 - 10
CP II - F	Composto	90 - 94	-	-	6 - 10
CP III	Alto Forno	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5
CP IV	Pozolânico	45 - 85	-	15 - 50	0 - 5
CP V - ARI	Alta Resistência Inicial	95 - 100	-	-	0 - 5

Fonte: ABCP, 2018

Esses tipos de cimentos variam de acordo com a relação do clínquer e sulfatos de cálcio, e de adição, tais como escórias de alto forno, pozolanas e objetos carbonático, adicionadas no processo de moagem. O objeto carbonático é chamado no jargão da indústria ou fábrica como fíler calcário. Podem ser diferente também em função de características intrínsecas, como grande resistência inicial, a coloração branca etc (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018).

As adições ao cimento favorecem certas características do concreto e protegem o ambiente ao aproveitar resíduos, reduzir o lançamento de gases e também reduzindo a extração de matéria-prima (ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2018).

#### 4.5.2. Agregados

As rochas foram os primeiros elementos de construção utilizados pelas civilizações mais antigas e são usadas até hoje em alguns tipos de construção (COSTA, 2016).

As rochas primitivas têm procedência magmática e foram, criadas pela solidificação da lava resultante do magma das profundidades terrestres dando origem as rochas (POPP, 2012).

Já as rochas sedimentares são originadas da alteração física ou química das pedras ou rochas magmáticas. Muitas dessas pedras, após sofrerem a ação de exercícios tectônicos, das adversidades hídricas, eólicas e atmosféricas, deram princípio às rochas sedimentares e metamórficas. As rochas sedimentares foram criadas principalmente pelo fenômeno denominado “transporte”, que é a erosão dos solos. Seus fragmentos foram amontoados em diversas áreas de menor topografia, devido principalmente às forças associadas à água e à gravidade, em diversas regiões da crosta (POPP, 2012).

Estes fragmentos, na construção civil são chamados de agregados, foram e ainda são, importantes para a aplicação na construções criadas pelas civilizações do planeta (COSTA, 2016).

Quatro deles, são essencialmente a matéria prima natural para as construções humanas, a rocha (maciça ou em pedregulhos ou brita) a areia, o silte e o barro ou argila. Aproximadamente, as rochas e os solos do tipo sedimentares envolvem cerca de 75% da superfície terrestre e a maior parte dos assoalhos oceânicos. A classificação destes quatro elementos baseia-se em suas granulometrias (COSTA, 2016); (WICANDER e MONROE, 2009).

#### **4.5.2.1. Areia**

As areias são só rochas sedimentares segmentada com granulometria entre 0,06 mm e 2,0 mm. São originárias de jazidas de arenito, pedra sedimentar de um mineral, os quais tiveram a ação da erosão por água (do mar ou das geleiras) ou por ação do vento, em decorrência de fenômeno determinado pela geologia como “transporte” (WICANDER e MONROE, 2009).

A água é o componente mais intenso na causa das erosões, porém sob a ação da gravidade agindo sobre os solos com relevo próprio, geram a maior parte dos sedimentos que irão criar os areais, ou também, novas rochas ou pedras sedimentares em bacias aluviais ou marítimas. O relevo tem influência fundamental na criação das areias, geralmente localizadas em bacias de baixa topografia. Algumas areias apresentam cerca de 25,0% de feldspato, outro mineral que pode consistir nas

areias, porém as mais comuns são compostas quase que completamente por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e outros minerais em quantidades pequenas (WICANDER e MONROE, 2009).

A areia comum para a construção civil é a de leito de rios, aglomerada há séculos, e sua função na pasta de concreto é a de “agregado miúdo”, cuja utilização é encher os espaços vazios entre a brita (agregado graúdo) favorecendo para a resistência do concreto (COSTA, 2016).

#### **4.5.2.2. Brita ou Cascalho**

Britas são só rochas fragmentadas, fabricadas por meio de processo de moagem em granulometrias com diversos diâmetros, dependendo da utilização (COSTA, 2016).

A brita serve como “agregado graúdo”, dando a resistência e dureza ao concreto. Dentre as muitas procedências geológicas, as britas mais usadas são aquelas oriundas das pedras de “granito” e “basalto”, cujas tensões de rupimento variam de 80,0 MPa a 200,0 MPa, respectivamente (POPP, 2012).

Dente as duas famílias de rochas ou pedras, a mais comum na região sudeste é a brita de granito. O granito cinzento, é visto em maciços rochosos chamados batólitos, podendo ter outras cores diversas mas todavia com a associação de quartzo e feldspato alcalino. A existência de extratos de mica, mostra a brita característica da construção civil (POPP, 2012).

Na confecção de concreto armado, a engenharia usa o maior diâmetro de brita capaz de passar entre as ferragens e não ultrapassar a geometria das fôrmas. A resistência do material torna-se maior quanto maior for o tamanho ou diâmetro da brita. Os diâmetros de brita mais usados são a brita 1 (0,5 a 19,0 mm) e brita 2 (19,0 mm a 38,0 mm) (COSTA, 2016).

### 4.5.3. Água de Amassamento

O cimento Portland é determinado aglomerante hidráulico, ou seja, quando em junção com água ele permite uma reação química (hidratação) que provoca seu “endurecimento”. Nesse contexto, é determinada “água de amassamento” como toda a água usada numa dosagem de concreto. A associação entre volume da água e o peso do cimento numa dosagem de compósito de concreto é denominada relação água/cimento (a/c) (MODRO, 2008).

Quando se faz uma dosagem de concreto deve-se ter a consciência de utilizar um fator a/c que possibilite a promoção da hidratação do cimento sem “sobrar” ou “faltar” água na mescla, permitindo que o concreto alcance sua resistência máxima. Caso a parte de água seja menor à necessária não ocorrerá hidratação de todo o cimento, não deixando que o concreto alcance sua resistência plena. Caso exista água em quantidade superior que a necessária, após realizada toda a hidratação do cimento esta água em abundância migrará para a superfície da pasta do concreto, gerando capilares no seu interior, responsáveis pela diminuição de resistência mecânica e pelo crescimento da permeabilidade do concreto (MODRO, 2008).

A água de amassamento tem que ser limpa de impurezas, tais como matéria orgânica, resíduos sólidos, açúcares, íons cloreto e íons sulfato (BALLARIN, 2003).

A água potável fornecida por meio de rede de abastecimento público é considerada uma água adequada a utilização nas misturas de concreto, ainda que nem todas as águas abastecidas de boa qualidade para o material sejam potáveis (BALLARIN, 2003).

### 4.5.4. Aditivos

Segundo Mehta e Monteiro (2014) o desenvolvimento das indústrias de aditivos está relacionado diretamente com a verificação da mudança das características do concreto no estado fresco e endurecido a partir da adição de alguns materiais às misturas de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De entendimento da ABNT NBR 11768:2011, que define aditivo como produtos que acrescentado em pequenas quantidades aos concretos alteram algumas de suas

propriedades, com o principal objetivo de aumentar determinadas condições de uso dos concretos (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

A *American Society for Testing Materials ASTM C125* (2010), define aditivo/adição como qualquer material que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos, usado como um material que possa ser adicionado ao concreto ou argamassa rapidamente antes ou durante a mistura (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM), 2010).

Conforme *American Concrete Institute - ACI Committee 212.3R-10* as principais finalidades do uso dos aditivos são (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) , 2010):

- Aumentar a plasticidade do compósito sem aumentar o consumo de água;
- Diminuir a exsudação e segregação;
- Retardar ou adiantar o tempo de pega;
- Acelerar a energia ou resistência nas primeiras idades;
- Aumentar a durabilidade do concreto;
- Reduzir as taxas de evolução do calor do concreto.

Os aditivos podem diferenciar em relação à composição química e em relação ao desempenho de função. Os aditivos químicos podem ser tipo adição mineral, ou seja, atuam no sistema cimento-água instantaneamente ou aditivos redutores de água, onde ocorre o processo de incorporação de ar e com isso melhora a resistência sem aumentar o consumo de água (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os principais aditivos expostos pela ABNT NBR 11768:2011 encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Tipos de aditivos para concreto

ADITIVOS	
Tipo	Função
P	Aditivo Plastificante
R	Aditivo Retardador
A	Aditivo Acelerador
PR	Plastificante Retardador
PA	Plastificante Acelerador
IAR	Aditivo Incorporador de Ar
SP	Aditivo Superplastificante
SPR	Aditivo Superplastificante Retardador
SPA	Aditivo Superplastificante Acelerador

Fonte: ABNT NBR 11768, (2011)

#### 4.5.5. Concreto de Cimento Portland

O concreto é uma matéria composta, constituída por aglomerante (cimento), água limpa, areia natural (agregado miúdo) e pedra ou brita (agregado graúdo). O compósito pode também incluir adições e aditivos químicos, com o objetivo de melhorar ou mudar suas propriedades básicas (BASTOS, 2014).

O concreto é adquerido por um proporcionamento dos materiais, que mostra a quantidade de cada um dos vários materiais, a fim de garantir ao concreto diversas características almeçadas, tanto no regime fresco quanto no regime endurecido (BASTOS, 2014).

O concreto no estado fresco deve ter uma trabalhabilidade adequada às condições de utilização, definidas pelo transporte, lançamento e adensamento. O concreto no estado endurecido deve ter suas propriedades definidas pela resistência aos esforços ou forças mecânicas a que será subjugado e pelas questões relacionadas à durabilidade (ABREU, 2014), (RIBEIRO, PINTO e STARLING, 2013).

De modo geral, na produção de um componente estrutural em concreto armado, as armações de aço são previamente posicionadas na fôrma, em seguida o concreto no estado fresco é lançado para ocuparr a fôrma, quando simultaneamente vai-se fazendo o adensamento do compósito, que deve cobrir e aderir às armações.

Após a cura e outras precauções e com o endurecimento do compósito, a fôrma pode ser removida e assim resulta a peça de concreto armado (BASTOS, 2014).

As estruturas de concreto são encontradas em todos os países do planeta, caracterizando-se pela estrutura principal no Brasil. Comparada a estruturas com demais materiais, a disponibilidade dos materiais componentes do concreto (aglomerante, agregados e água limpa) e do aço e a facilidade de uso, explicam a larga aplicação das estruturas de concreto, nos mais diversos tipos de construção, como edificações de múltiplos pavimentos, pontes e elevados, portos, reservatórios, barragens, pisos industriais, pisos rodoviários e de aeroportos, muro de contenção, etc (BASTOS, 2014).

#### 4.6. CONCRETO PARA FINS ESTRUTURAIS, TIPOS E CLASSIFICAÇÃO

Conforme ABNT NBR 8953:2015, o concreto pode ser decomposto em três classes de acordo com a sua função, ou seja, em função da sua massa específica, resistência à compressão e consistência. Em relação à massa específica o compósito pode ser classificado, apresentado na Tabela 7 (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Tabela 7 - Tipos de concreto de acordo com massa específica

Concreto	Massa Específica
Normal (C)	2000 kg/m <sup>3</sup> e 2800 kg/m <sup>3</sup>
Concreto Leve (CL)	Inferior 2000 kg/m <sup>3</sup>
Concreto Pesado ou Denso (CD)	Superior 2800 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: ABNT NBR 8953, 2015

As classes de resistências de compósitos com finalidades estruturais são classificadas nos grupos I e II, conforme a resistência características à compressão ( $F_{ck}$ ), conforme apresentado na Tabela 8 (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Os concretos (compósitos) com classe de resistência menor que C20 não são estruturais e, na hipótese que sejam usados, precisam ter seu desempenho atendido

segundo a ABNT NBR 6118: 2014 e a ABNT NBR 12655: 2006 (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Tabela 8 – Classes de resistência de concretos estruturais

Classe de Resistência GRUPO I	Resistencia Característica à Compressão MPa	Classe de Resistência GRUPO II	Resistencia Característica à Compressão MPa
<b>C20</b>	20	<b>C55</b>	55
<b>C25</b>	25	<b>C60</b>	60
<b>C30</b>	30	<b>C70</b>	70
<b>C35</b>	35	<b>C80</b>	80
<b>C40</b>	40	<b>C90</b>	90
<b>C45</b>	45	<b>C95</b>	95
<b>C50</b>	50	<b>C100</b>	100

Fonte: ABNT NBR 8953, 2015

Os concretos são classificados quando sua consistência no regime ou estado fresco, definida a partir do análise de abatimento definida pela ABNT NBR NM 67, demonstrado na Tabela 9 (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Tabela 9 - Classe de consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
<b>S10</b>	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
<b>S50</b>	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
<b>S100</b>	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
<b>S160</b>	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto
<b>S220</b>	$\geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade da armadura
<b>Nota 1</b>	De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.	
<b>Nota 2</b>	Os exemplos dessa tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicação.	

Fonte: ABNT NBR 8953, 2015

Os compósitos de concreto devem ser classificados pela massa específica em normal (C), leve (CL) ou pesado (CD), subsequente da sua classe de resistência (Tabela 7) e pela classe de consistência (Tabela 8) (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

Como demonstra Neville e Brooks (2013), ao longo dos anos estudos com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento tecnológico e os avanços nos processos construtivos da indústria da construção civil, o concreto vem sofrendo um processo de inovação, a matriz cimentícia é alterada de maneira a desenvolver algumas propriedades específicas, dando origens como, por exemplo, concreto de alto desempenho, com reforço de fibras, concreto auto adensável, e concretos que contêm polímeros, sendo este último objeto de estudo deste trabalho (NEVILLE e BROOKS, 2013).

#### **4.7. DOSAGEM DO CONCRETO**

A dosagem do concreto deve ser determinada como sendo a técnica de selecionar os materiais certos, cimento, água, agregados e, ocasionalmente, aditivos de forma que o produto final tenha características capazes de satisfazer as condições de serviço e o menor preço possível (PINTO, 2006).

Apesar dos métodos de dosagem divergirem entre si, certas ideias são comuns a todos os concretos, como, por exemplo: o cálculo da determinação da resistência de dosagem, a correlação da resistência à compressão com o fator água/cimento para certo tipo e classe de cimento, a evolução do crescimento da resistência com o tempo, o uso de água por unidade de volume para obtenção da trabalhabilidade requerida, certos ajustes experimentais em laboratório e as correções (ABREU, 2014).

A dosagem experimental pode ser feita a partir da fixação da relação água/cimento, que precisa da resistência de dosagem, das propriedades da obra e da definição de uma trabalhabilidade compatível com os materiais e com a aplicação do concreto (ABREU, 2014) (RIBEIRO, PINTO e STARLING, 2013).

A organização de cada concreto ou compósito de classe C20 ou maior, a ser usado na obra, deve ser determinada, em dosagem racional e experimental, com

certa antecedência em relação ao começo da concretagem da obra. A análise de dosagem deve ser realizada com os mesmos materiais e de maneiras semelhantes às daquelas da obra, considerando as determinações do projeto e as condições de execução (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

A determinação da dosagem do compósito deve ser refeita cada vez que for determinada uma alteração de marca, tipo ou classe do cimento no compósito, na procedência e qualidade dos agregados (areia e brita) e demais materiais (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

O valor da resistência de dosagem, denominado como  $f_{cj}$ , visa garantir que seja assegurado o valor de  $f_{ck}$  especificado no projeto. Conforme com a ABNT NBR 12655, a resistência de dosagem é calculada pela Equação 1 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 s_d \quad (1)$$

Onde:

$f_{cj}$  - resistência média do concreto (compósito) à compressão, esperada para a idade de  $j$  dias, em Mpa (normalmente adotado  $j=28$  dias);

$f_{ck}$  - resistência característica do concreto (compósito) à compressão, em megapascals;

$s_d$  - desvio padrão, em MPa.

O cálculo ou determinação da resistência de dosagem do compósito depende, entre outras condições, das situações de preparo do concreto, o desvio padrão varia de acordo com o controle de preparo do concreto definidos na tabela 10 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

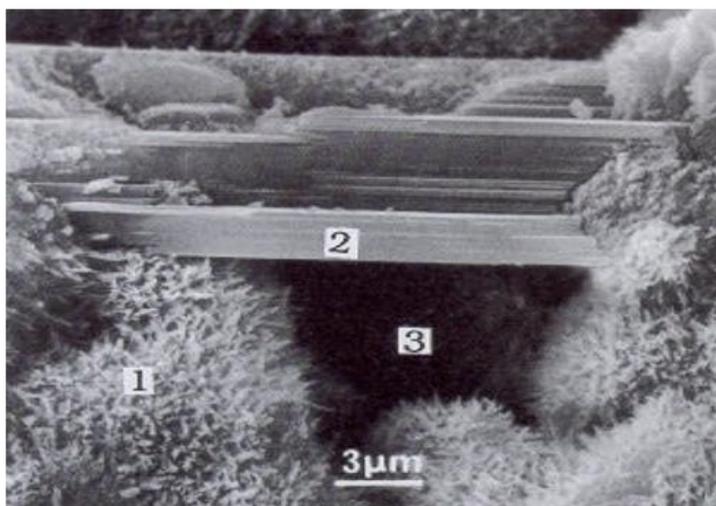
Tabela 10 - Desvio padrão para cada tipo de controle

Controle	Desvio Padrão $s_d$ (MPa)	Condições de Preparo
A	4,0	Aplicável às classes C10 até C80 – o cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.
B	5,5	Aplicável às classes C10 até C25 – o cimento e medido em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e os agregados medidos em volume. O volume de agregados miúdos é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado.
C	7,0	Aplicável às classes C10 até C15 – o cimento e medido em massa, e os agregados medidos em volume.

Fonte: ABNT NBR 12655, 2006

#### 4.8. MATRIZ E ZONA DE TRANSIÇÃO DO CONCRETO

A pasta de cimento que cobre os grãos de areia e do agregado graúdo é chamada de matriz. A matriz é formada por alguns tipos de materiais hidratados do cimento. Os mais relevantes são os silicatos hidratados C-S-H e se assemelha como estruturas fibrosas, o carbonato de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que cristaliza em gigantes placas sextavadas superpostas e a etringita, que solidifica no começo da pega no formato de agulhas. A quantidade de poros total da pasta de cimento está entre 25% a 30% em volume para uma fator a/c de 0,5. Esta quantidade de orifícios é fétida em dois tipos de vazios (espaços), orifícios entre cristais C-S-H, e orifícios capilares entre as composições hidratadas, bolhas e fissuras. A matriz é formada pela zona de transição por agregado e pasta e na pasta propriamente dita, a figura 5 mostra a microestrutura do concreto (MORANVILLE-REGOURD, 1992).



- 1: C-S-H
- 2:  $\text{Ca(OH)}_2$  ou (C-H)
- 3: Vazio Capilar

Figura 5 – Microestrutura do concreto

Fonte: Moranville, 1992

A zona de transição é a parte da pasta de cimento em ligação com a brita. A zona de transição é identificada por ser uma área com maior quantidade de poros e dessemelhança do que o resto da pasta. Esta quantidade de poros é decorrente do aumento do fator água/cimento na mescla em decorrência da película de água que se forma em volta da brita (agregado graúdo). Os maiores espaços possibilitam a produção de grandes cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$  com seu eixo C disposto perpendicularmente ao agregado graúdo, o que cria condições preferenciais de ruptura, conforme figura 6 (MORANVILLE-REGOURD, 1992).

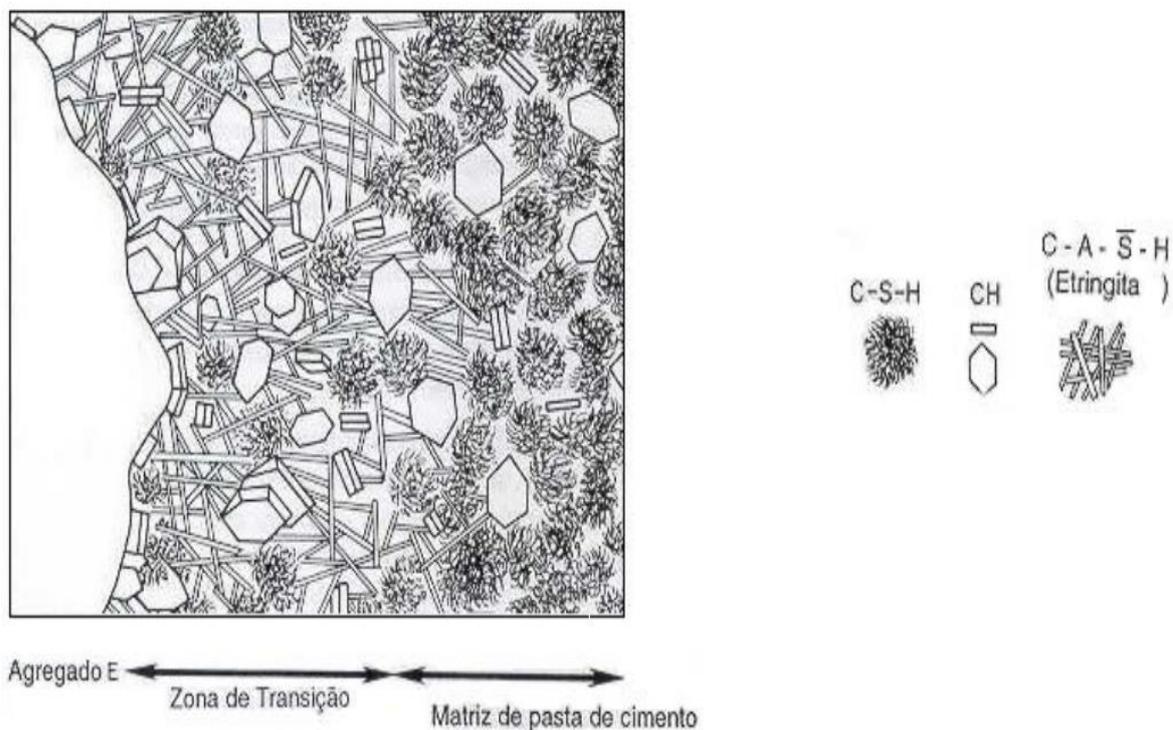


Figura 6 – Representação esquemática da zona de transição entre pasta de cimento e agregado. Fonte: Moranville, 1992

A ação da adesão entre os objetos de hidratação e o elemento de agregado graúdo são as fações de atração de Van Der Waals, no fato da pasta; pois, a resistência da zona de transição em um ponto dependerá do volume e da dimensão dos vazios ou espaços presentes. Até para os concretos de baixo fator água/cimento, nas primeiras idades, o volume e dimensão de espaços na zona de transição são menos resistentes. Mas, aumentando-se a idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou até mesmo superior do que a resistência da matriz de argamassa (SCHETTINO, 2015).

## 4.9. PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

### 4.9.1. Consistência

Consistência representa à máxima ou mínima capacidade que o material ou concreto fresco tem de se deformar, está associado ao meio de transporte, lançamento e adensamento do material e varia em geral, com a medida de água empregada, granulometria dos agregados e pela existência de produtos químicos (CARVALHO e FILHO, 2016).

O ensaio mais utilizado para o controle tecnológico da trabalhabilidade do concreto é o de abatimento ou diminuição de tronco de cone e a ABNT NBR NM 67:1998 regulamenta esse ensaio no Brasil.

No meio de uma base metálica, posiciona-se uma fôrma também metálica de um troco de cone proposto por Abrams, com 300,0 mm de altura, base com 100,0 mm de raio e topo com 500,0 mm de raio. Mantém-se o molde ou forma firme à base metálica, colocando-se os pés sobre as alças presas junto à base do tronco de cone, para ser cheio com três camadas de material (concreto), adensando cada camada com 25 golpes com uma barra ou friso de aço carbono com 16,0 mm de diâmetro. Após o adensamento, remove-se o excedente de concreto. Mantém-se preso o molde sobre a base, pela colocação das mãos sobre as alças presas, enquanto os pés são retirados das alças inferiores. A seguir o molde é levantado, em prazo de 10 s, deixando o concreto fresco sob a ação da sua coesão e consistência interior e que podem ser suficiente para (FILHO, 2010):

- a) Manter a forma original da fôrma (consistência seca ou elevada) ou,
- b) Abater o concreto fresco de modo constante (consistência plástica ou fluida) ou
- c) Desagregar o concreto de modo diferente sem uniformidade, por falta de coesão, consistência e plasticidade.

Após ser retirado, a fôrma é colocada como o topo firmado na base metálica ao lado do material e, com o apoio de uma régua ou escala de aço e de outra escala situada diretamente sobre o concreto, mede-se o abatimento do troco de cone no seu centro, demonstrado na figura 7.

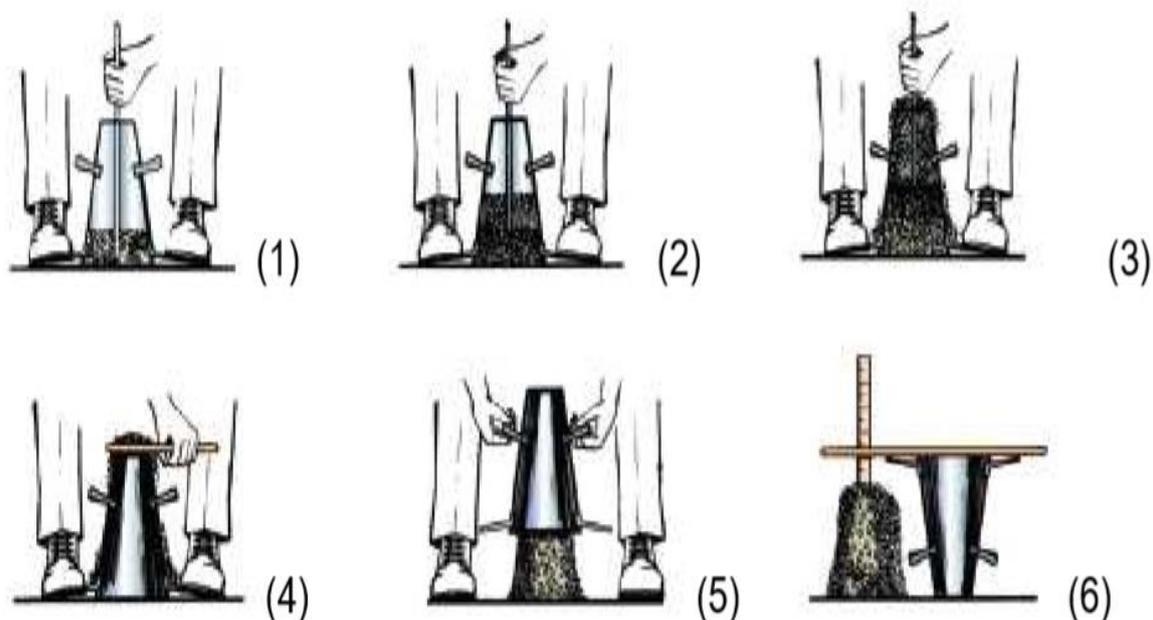


Figura 7 – Sequência de passos para realização do ensaio de abatimento do tronco de cone para concretos de consistência plástica. Fonte: Filho, 2010

#### 4.9.2. Trabalhabilidade

A ASTM C 125 (2010) define a trabalhabilidade como a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda de considerável da homogeneidade (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM), 2010).

Já o *American Concrete Institute* (1991) descreve trabalhabilidade como a facilidade e homogeneidade com que o concreto fresco pode ser manipulado desde a mistura até o acabamento (ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1991).

A trabalhabilidade de um concreto, assim como sua consistência, depende da granulometria dos materiais sólidos, da incorporação de aditivos e, principalmente, do fator água/cimento (CARVALHO e FILHO, 2016).

Assim, a trabalhabilidade do concreto deve ser estabelecido em função da geometria da peça estrutural, do tipo de forma, da taxa de armadura, dos equipamentos de mistura, de transporte, de lançamento e de adensamento. O concreto deve apresentar tixotropia e coesão durante a execução das peças estruturais. A tixotropia é a facilidade de mobilidade por ação dos equipamentos de

lançamento e adensamento e a coesão é a resistência à exsudação e à segregação (FILHO, 2010).

#### **4.9.3. Pega**

O endurecimento do material começa algumas horas após sua produção, e o período entre o início do endurecimento até ele chegar em uma situação que possa ser deformado, mesmo sem ter atingido sua total, é chamado de “pega”. Usualmente, define-se pega quando a consistência do concreto não permite mais a sua trabalhabilidade, ou seja, não é mais capaz de lançá-lo nas fôrmas e adensá-los (CARVALHO e FILHO, 2007).

Um meio objetivo de caracterizar o começo da pega é fazendo a medição da profundidade de penetração de uma haste, de peso e tamanho predefinidos, no material. Quando a profundidade atingida apresentar um valor menor que um preestabelecido, considera-se que está estabelecida a pega, devendo-se, então, começar os procedimentos de cura (CARVALHO e FILHO, 2007).

#### **4.9.4. Cura do Concreto**

A cura do material, no caso concreto, tem como objetivo evitar a evaporação da água essencial à hidratação do cimento. As condições ou situações de umidade e temperatura têm grande valor de importância nas primeiras idades, a ponto de garantir as propriedades do concreto. A saída precoce de água da mistura aumenta o volume de vazios (espaços), além de não ser bastante para hidratar o cimento até o concreto atingir sua resistência final (ABREU, 2014).

De forma mais específica, o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível disso, até que os espaços originalmente preenchidos com água na pasta de cimento fresca tenham sido preenchidos pela quantidade requerida de produtos de hidratação do cimento (NEVILLE, 2016).

A ABNT NBR 6118:2014 recomenda que a superfície do concreto seja mádida ou protegida com película impermeável, no mínimo durante os 7 primeiros dias após o lançamento, para que o concreto não perca água (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). A obrigação da cura é devida a

situação de que a hidratação do cimento só pode haver nos capilares cheios de água. A perda de água depende da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (NEVILLE, 2016).

A cura adequada ajuda a durabilidade do material, além das suas propriedades desejáveis, como resistência mecânica, permeabilidade e consequentemente resistência contra ataques (ABREU, 2014).

Mehta e Monteiro (2014) apresentam um estudo sobre a influência da umidade de cura sobre a resistência de concretos com o mesmo fator água/cimento, Figura 8, demonstrando que, após 180 dias, o concreto curado sob situações continuamente úmidas, apresentou uma resistência três vezes superior do que o concreto curado ao ar (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

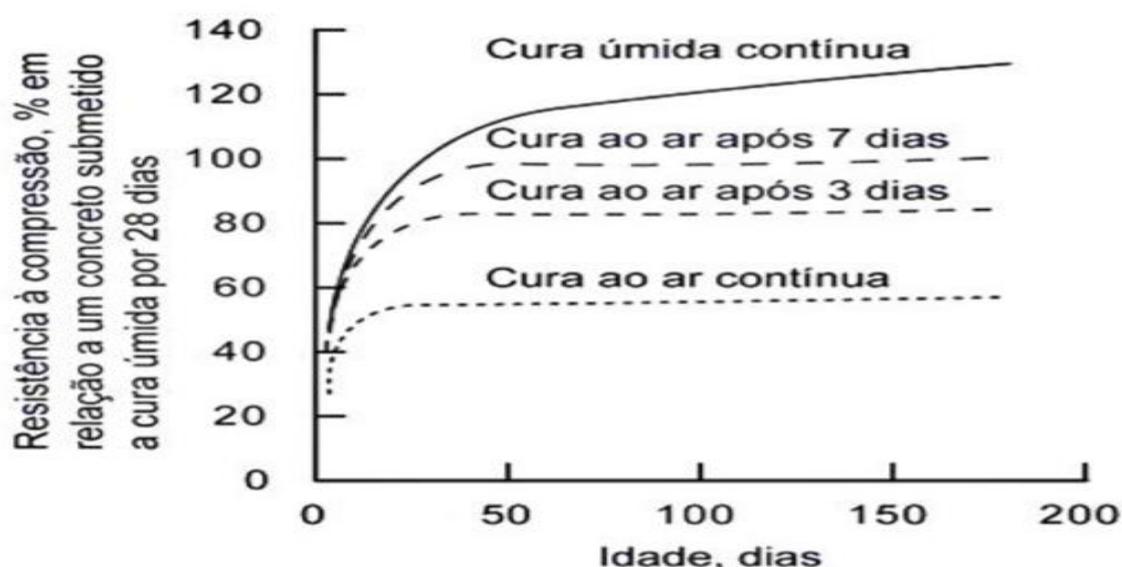


Figura 8 – Influência das condições de cura sobre a resistência

Fonte: Abreu, 2010

A cura do concreto pode ser feita de diversas maneiras dentro do canteiro de obras, algumas delas são: irrigação periódica, cobertura da superfície com manta úmida e a cobertura com materiais impermeáveis (ABREU, 2014).

Para peças usuais, a cura geralmente consiste em molhar as superfícies aparentes do concreto, ou mesmo molhar constantemente as faces das fôrmas de madeira, evitando a secagem destas (CARVALHO e FILHO, 2016).

#### 4.10. PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

No concreto na fase endurecido, as essenciais características de interesse são as mecânicas, sobressaindo-se as resistências à esforço normal ou compressão e à tração. A norma ABNT NBR 6118: 2014, que refere-se das propriedades do concreto na fase endurecido, apresenta uma série de termos a partir das quais se obtêm, devido a resistência à compressão, as resistências do concreto para diferentes tipos de solicitações (CARVALHO e FILHO, 2016).

##### 4.10.1. Resistência à Compressão

A grande ou mais importante característica do concreto no estado endurecido é sua resistência à compressão, a qual é definida pelo ensaio de CPs submetidos à compressão localizada ou centrada; esse ensaio também proporciona a obtenção do módulo elasticidade ou módulo de deformação longitudinal (CARVALHO e FILHO, 2016).

A resintência à compressão, obtida por análise ou ensaio de curta duração do corpos de prova (CPs), é dada pela equação 2 (CARVALHO e FILHO, 2007).

$$f_{cj} = N_{rup} / A \quad (2)$$

Onde:

$f_{cj}$  - resistência à compressão dos CPs de concreto na idade de romper de (j) dias;

$N_{rup}$  – carga ou força de ruptura dos CPs;

$A$  - área da seção transversal do CPs.

O processo para moldagem e cura de CPs cilíndricos ou redondos e prismáticos de concreto são definidos pela ABNT NBR 5738:2015 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

As dimensão usada como relação para os CPs, sendo usado o diâmetro, no caso de CPs cilíndricos, e a menor aresta ou dimensão, no caso de CPs prismáticos, os moldes cilíndricos devem ter altura igual ao dobro do diâmetro, o diâmetro deve ser de 10,0 cm, 15,0 cm, 20,0 cm, 25,0 cm, 30,0 cm, ou 45,0 cm (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

No Brasil são usados CPS cilíndricos, com diâmetro da base ou inferior de 15,0 cm e altura de 30,0 cm e também de 10,0 cm de diâmetro da base e altura de 20,0 cm (CARVALHO e FILHO, 2016).

A ABNT NBR 5739: 2007, descreve o método pelo qual devem ser analisados à compressão os CPs cilíndricos/redondos de concreto, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

A NBR 5739 (2007) também especifica o tipo de ruptura encontrada no corpo de prova, definido em tipos A, B, C, D, E, F e G apresentado na figura 9.

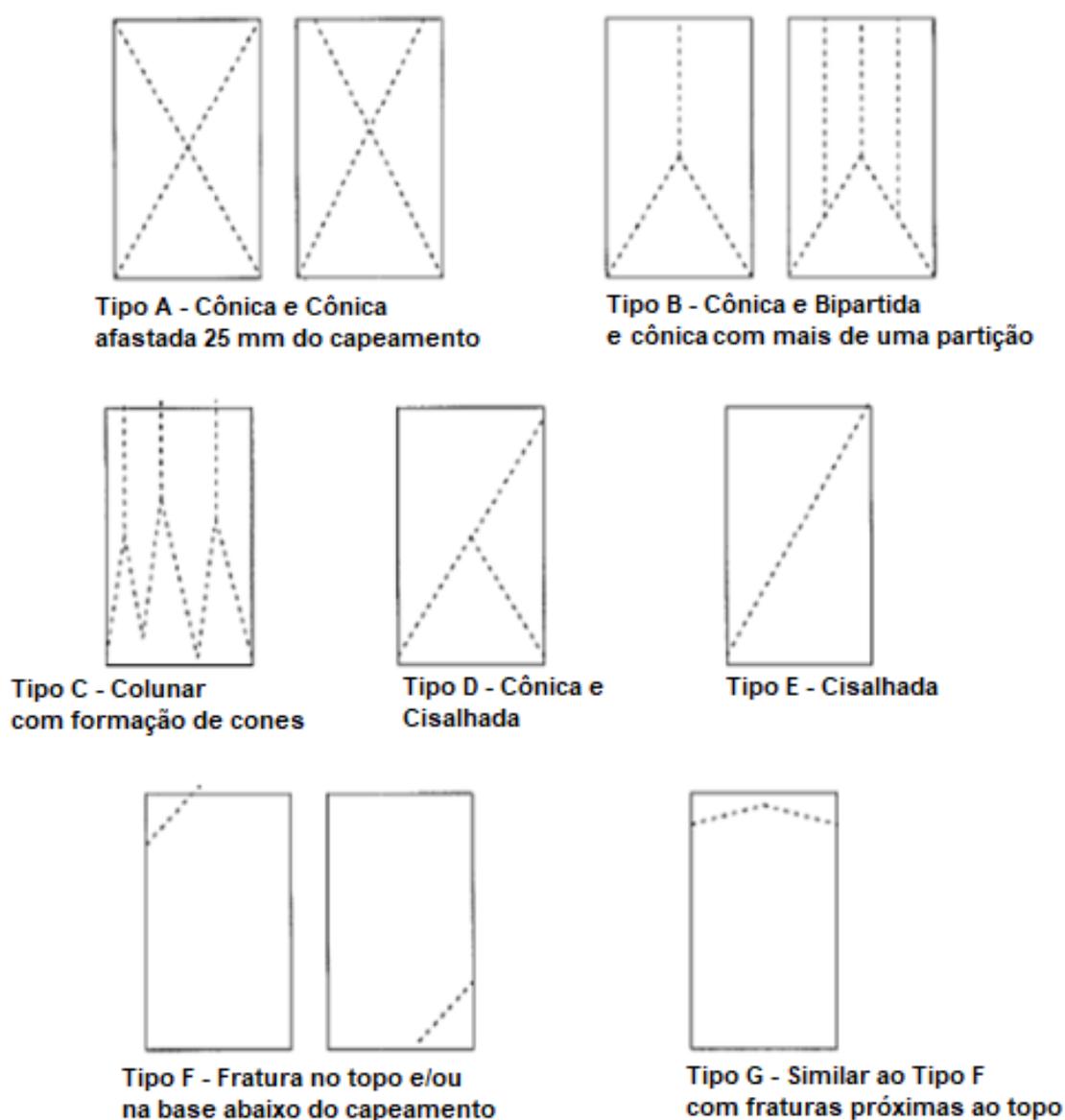


Figura 9 - Tipos de Ruptura em ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

Fonte: ABNT NBR 5739, 2007

#### 4.10.2. Resistência à Tração

Visto que o concreto é um compósito que resiste mal à tração, normalmente não se conta com a ajuda dessa resistência. Porém, a resistência à tração pode estar associada com a capacidade resistente da estrutura, como as forças a esforço cortante, e, diretamente, com a fissuração, sendo importante, por isso, conhecê-la. Existem três tipos de análise para se conseguir a resistência à tração: por flexotração ou tração na flexão, compressão diametral com corpo de prova circular (tração indireta) e tração direta, como demonstra a figura 10 (CARVALHO e FILHO, 2016).

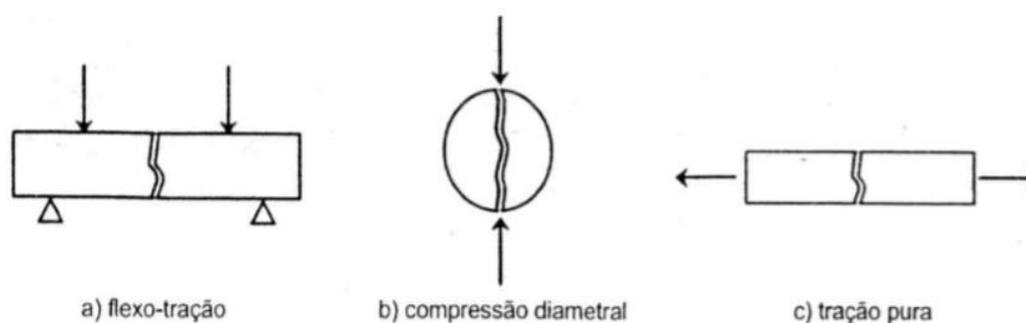


Figura 10 – Ensaio de Tração

Fonte: Carvalho, 2016

A resistência ou força à tração pura (para concretos do grupo I conforme NBR 6118: 2014) é cerca de 85% da resistência à tração por compressão diametral, e cerca de 60% da resistência obtida pelo ensaio ou análise de tração na flexão (CARVALHO e FILHO, 2016).

A resistência ou força à tração devem ser obtidas em ensaios feitos segundo as ABNT NBR 7222 e ABNT NBR 12142 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

#### 4.11. CONCRETO COM PLÁSTICOS RECICLADOS

A inclusão de plásticos ou PET reciclados dá ao concreto de cimento Portland modificações nas suas propriedades se comparados com o concreto convencional, sem adições de PET (GALVÃO, 2010).

Ahmad et al. (2018) investigaram a substituição parcial do agregado miúdo por garrafas de PET trituradas para produzir concreto reforçado com PET como blocos de pavimentação para passarelas de pedrestes, com percentagem variando de 5%, 10%, e 15% de agregados de plástico em volume. As conclusões obtidas foram: (i) o bloco de concreto padrão sem a substituição de PET tem a resistência à compressão de 21,4 MPa enquanto para 5%, 10% e 15% de PET tem 20,9 MPa, 12,2 MPa e 10,9 MPa respectivamente, a baixa força adesiva entre a superfície plástica e a pasta de cimento foi a razão atribuída à diminuição da resistência à compressão e (ii) o PET reciclado não contribui com a resistência do concreto, além disso, a baixa densidade do agregado PET contribuiu para a redução da resistência à compressão do concreto (AHMAD, RAZALI, *et al.*, 2016).

Aswatama et al. (2017) analisaram os efeitos da inclusão de agregados leves produzidos com garrafas de polietileno tereftalato (PET) sobre a densidade do concreto autocompactável. Adicionou PET de 2,5%, 5,0%, 7,5% e 10% em relação ao volume de areia, adição de superplastificante de 1% do peso do cimento. As conclusões obtidas foram: (i) força à compressão, força à tração e módulo de elasticidade diminuirá com o aumento do nível de PET, (ii) A temperaturas de 250 ° C, as características mecânicas do concreto endurecido não demonstraram alteração e (iii) com resíduos de plástico PET até 10% irá aumentar a trabalhabilidade e a consistência do concreto, resultando em um slump maior (ASWATAMA, SUYOSO, *et al.*, 2017).

Khalid et al. (2018) analisaram a substituição da areia por resíduos de garrafa PET em concreto auto desempenho. Foram substituídos de 0% a 8% de areia por resíduos de PET em volume, o superplastificante (SP) utilizado foi o Darex Super 20 adição de 1,5 a 1,6% do peso de cimento. As conclusões obtidas foram: (i) concluiu que o nível de substituição de PET de mais de 6% faz com que o concreto seja mais viscoso, alta viscosidade pode causar maior atrito nas formas e dificuldade na consolidação do concreto, (ii) á medida que o teor de PET aumenta, a plasticidade e

a consistência do concreto fresco são reduzidas, e (iii) a adição de resíduos de PET no concreto não melhora a resistência à compressão do concreto, a criação de concreto de alto desempenho contendo 5% de resíduos de PET é possível com resultados satisfatórios (KHALID, AZMI, *et al.*, 2018).

CHOI *et al.* (2005) observaram os resultados da adição de agregados leves produzidos com garrafas de PET. As medidas da mistura do concreto foram executadas com as relações água-cimento de 45%, 49% e 53%, e as relações de substituição em volume do agregado miúdo por agregado leve de resíduos de garrafas PET foram de 0%, 25%, 50% e 75%. As conclusões obtidas foram: (i) a melhora na trabalhabilidade representou 52, 104 e 123% em comparação com o concreto de referência, e (ii) a resistência à compressão cai com o crescimento do teor de substituição do agregado miúdo ou areia por agregado leve de resíduos de garrafas PET (CHOI, 2005).

## **5. MATERIAS E MÉTODOS**

Nesta parte, para elaboração do compósito pretendido, tem-se as seguintes temáticas:

- O Fluxograma de Trabalho
- Materiais Utilizados
- Métodos
- Preparação dos Materiais
- Ensaio Mecânicos e Consistência
- Análises MEV

### **5.1. FLUXOGRAMA DO TRABALHO**

Para estabelecer a sequência de realização desta pesquisa, foi estabelecido e seguido, o fluxo de trabalho (Figura 11) levando-se em conta as etapas, normas, documentações levantadas e as funções práticas que foram realizadas.

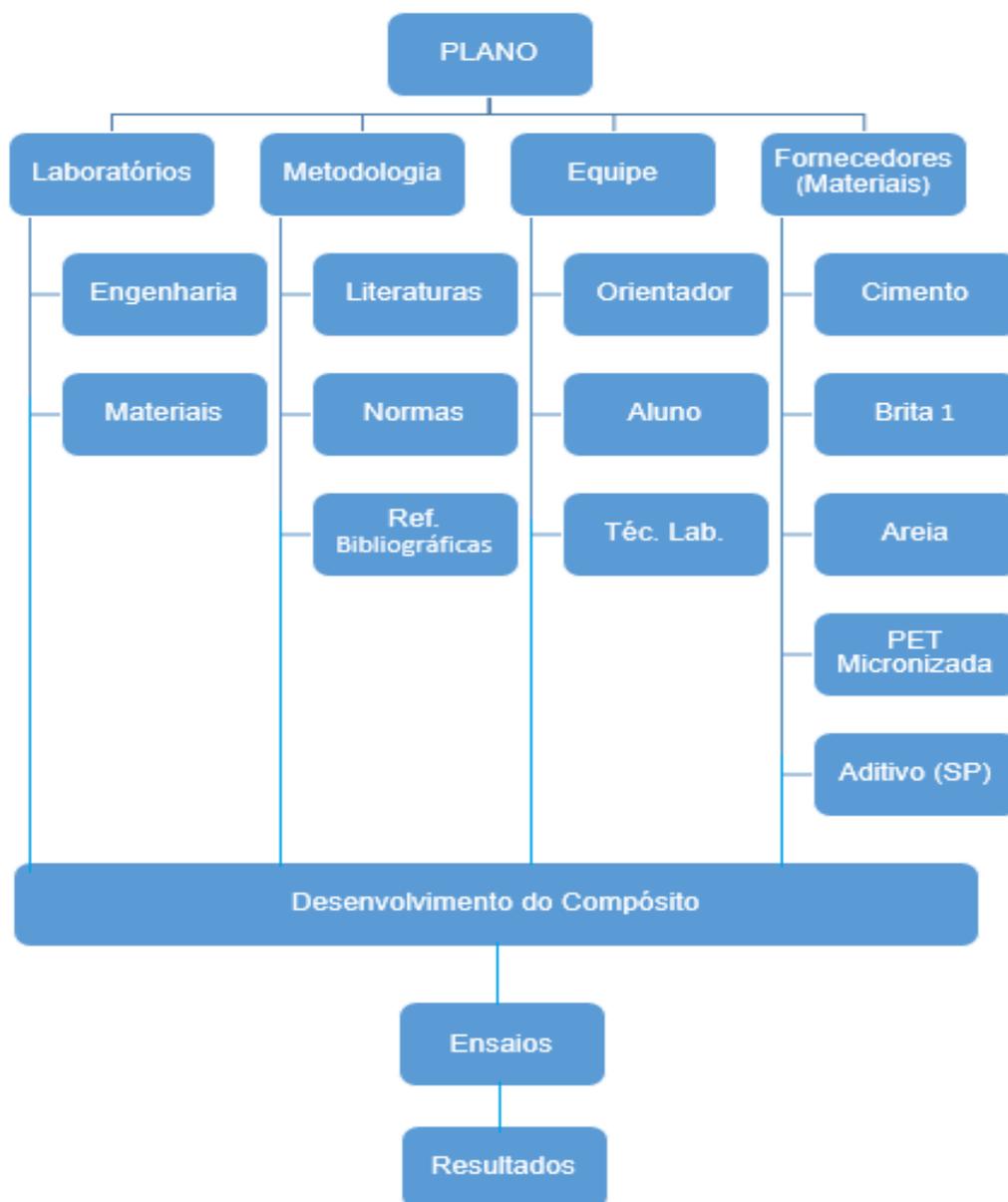


Figura 11 – Fluxograma da pesquisa

Fonte: Autor, 2020

## 5.2. MATERIAIS UTILIZADOS

### 5.2.1. Cimento CP III

Em todo o trabalho, incluindo os estudos preliminares e o estudo inicial, foi empregado o cimento Portland CP III - 40 RS - CSN produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional (figura 12) e comprado na cidade de Volta Redonda, a ABNT normatiza sob o número NBR 5735:1991, a produção industrial que é feita pela

moenda do clínquer e escória granulada do alto-forno, também chamada como LHS - Ligante Hidráulico Siderúrgico. O cimento que apresenta “RS (Resistente a Sulfato) é forte contra a água proveniente de esgotos, água proveniente do mar e uns tipos de solos com compostos adversos, segundo especificações da NBR 5737:1992.” As características físicas e sua composição são demonstrados na tabela 11 e 12 (CSN - COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL, 2019).

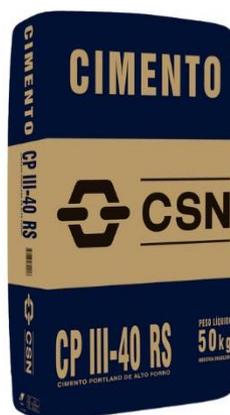


Figura 12 - Saco de cimento CP III - 40 RS

Fonte: CSN, 2019

Tabela 11 - Proporção em massa para composição do CP III – 40 RS

Tipo de Cimento	Clínquer e Gesso	Escória Granulada de Alto Forno	Material Carbonático
CP III	25 – 65%	35 – 70%	0 – 5%

Fonte: CSN, 2019

Tabela 12 - Principais características físicas do cimento CP III – 40 RS

Tipo de Cimento	Classe	Resistência à Compressão				Finura	Tempo de Pega		Expansibilidade	
		MPa 3dias	MPa 7dias	MPa 28dias	MPa 91dias	Resíduo na Peneira 75 µm	Início (horas)	Fim (horas)	À frio (mm)	À quente (mm)
CP III	40	≥12	≥23	≥40	≥48	≤8,0	≥1,0	≤12,0	≤5,0	≤5,0
	32	≥10	≥20	≥32	≥40					

Fonte: CSN, 2019

### 5.2.2. Brita 1

Foi utilizada brita 1 tipo Natural (Figura 13), de composição básica de granito, extraída e comprada na Pedreira Pombal, localizada na Rodovia Presidente Dutra, s/n km 284 no bairro Floriano no município de Barra Mansa – RJ



Figura 13 – Brita 1

Fonte: Autor, 2020

### 5.2.3. Areia

Foi usada areia média com granulometria entre 0,3mm a 1,2mm “comum de leito de rio” extraída no Rio Jacutinga em Santa Rita de Jacutinga - MG (figura 14), adquirida na Loja local Capobiango Materiais de Construção Ltda no bairro Aterrado na cidade de Volta Redonda - RJ.



Figura 14 - Areia média

Fonte: Autor, 2020

#### 5.2.4. PET Micronizado

O PET micronizado foi gentilmente fornecida pela empresa Micropet que está localizada na Avenida Guaraciaba, 268 no bairro Sertãozinho na cidade de Mauá – SP, da linha PET micronizada MP – 05 e com granulometria entre 270# (0,052mm) a 400# (0,037mm), demonstrado na figura 15.



Figura 15 – PET micronizada

Fonte: Autor, 2020

#### 5.2.5. Aditivo

O aditivo utilizado foi o Super Plastificante (SP) Sulfocim NSS 40 (Figura 16), fornecido pela empresa Sisterquímica que está localizada na Estrada velha de Itu, 304 no bairro Jardim Alvora na cidade de Jandira – SP, em galão de 60 Kg de peso líquido.

A Sisterquímica descreve o Sulfocim NSS 40 como um condensado de naftaleno sulfonado de sódio de alto peso molecular adicionando-se pequenas quantidades ao concreto, ele atua para melhora a qualidade e a plasticidade na mistura de concreto a tabela 13 mostra suas características (SISTERQUÍMICA, 2019).

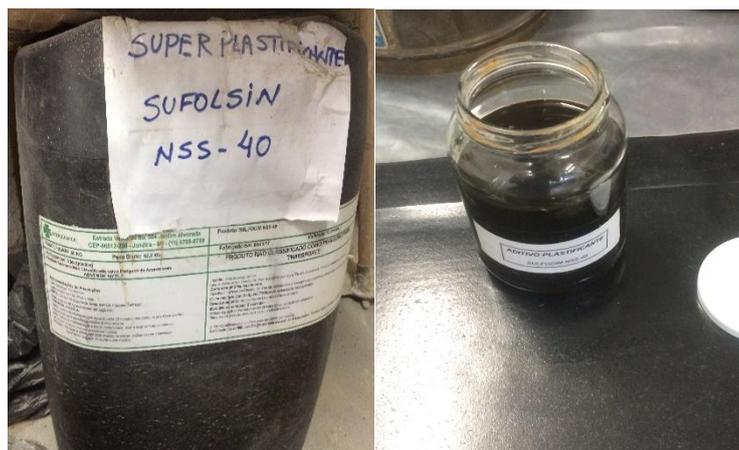


Figura 16 – Aditivo Super Plastificante(SP)

Fonte: Autor, 2020

Tabela 13 – Características do aditivo Sulfochim NSS 40

Aspecto Físico	Não Voláteis	pH (100%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Sulfato de Sódio
Líquido Marrom	39,0 – 41,0%	7,0 – 9,0	1.205 – 1.225	Máximo 7,0%

Fonte: Sisterquímica, 2019

### 5.3. MÉTODOS

Como metodologia técnica para proporcionar a criação do compósito investigado nesta dissertação, utilizaram-se os seguintes procedimentos e normas:

- a) Normas de engenharia da ABNT para criação do compósito de concreto
- b) Laboratórios e equipamentos
- c) Traços do compósito
- d) Conformação dos CPs
- e) Ensaio
- f) Análise MEV do compósito e da PET micronizada

### **5.3.1. Procedimentos das Normas de Engenharia**

A seguir, são descritos basicamente, os procedimentos conforme as normas ABNT, relativos às técnicas utilizadas neste trabalho para a produção do concreto com PET micronizada além dos ensaios.

#### **5.3.1.1. Características das Fôrmas – NBR5738**

Os moldes empregados foram de aço conforme padrão da norma, com superfícies lisas e antiaderentes, base com diâmetro de 10cm e altura de 20cm, imóveis ao cimento e de boa resistência mecânica a ação repetitiva de moldagem e desmoldagem. A forma deve ser aberta em sua extremidade superior e permitir fácil desmoldagem, sem prejudicar os corpos de prova. Os moldes são equipados com recurso para fechamento lateral eficaz de vedar a saída do concreto e também possibilita serem abertos após 24h, para que o corpo de prova de concreto saia facilmente, conforme itens 4.1 e 4.1.3 da norma (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

#### **5.3.1.2. Preparação dos Moldes**

As formas dos CPs foram limpas antes de fazer a moldagem dos corpos de provas, os moldes e suas bases precisam ser devidamente revestidos interiormente com uma fina base de óleo mineral ou um outro lubrificante que não insurja com o cimento e suas superfícies internas cobertas com algumas camadas de óleo para facilitar sua desmoldagem, conforme procedimento da norma (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

#### **5.3.1.3. Mistura e Adequação do Concreto**

Efetou-se a mistura do compósito e homogeneização do concreto na betoneira, para cada traço com substituição de areia com PET micronizada, fazendo-se periodicamente o teste de slump, até se obter a valor de abatimento do traço. O concreto foi depois, envasado nos moldes obedecendo-se ao procedimento de

compactação da norma (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

#### 5.3.1.4. Adensamento

Foi efetuado o adensamento manual do concreto nas fôrmas ( $\emptyset 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ) com uma barra de aço cilíndrica com comprimento de 60cm e diâmetro de 1,5cm com pontas arredondadas. A compactação (Tabela 3 da NBR5738, 2015) foi feita efetuando-se 12 punções, em rotação circularmente, a 50% de preenchimento do molde e outras 13 a 100%. Efetuou-se algumas batidas laterais para que os espaços vazios fossem preenchidos por escoamento. Preencheu-se a última camada até o transborda o molde, fazendo-se então, o rasamento do alto da forma com colher de pedreiro (itens 7.4.2, 7.4.2.1, 7.4.2.2, 7.4.2.3 e 7.4.2.4 da NBR5738, 2015) (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

#### 5.3.1.5. Método de Abatimento do Tronco de Cone (Slump - NM67)

O objetivo deste ensaio é verificar o ponto de consistência que permita o concreto adaptar-se e preencher corretamente as fôrmas e classificar sua consistência no estado fresco para aplicação típica do concreto em elementos estruturais conforme tabela 9.

Fez-se o preenchimento de um cone aço (padronizado pela NM67, 1998) com o concreto feito (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998). O cone foi então, içado verticalmente pelas alças, evitando-se vibrações para o material formar um campanário cônico por gravidade (Figura 7) . O cone foi então colocado invertido ao lado do campanário. A barra de aço usada na compactação, foi colocada na horizontal acima da boca do cone, para que sua projeção ficasse paralela em relação ao topo do campanário. Com uma fita métrica, mediu-se a distância (em centímetros) da linha inferior ou abaixo da barra até o topo do campanário, conforme item 4.9.1 da dissertação. O abatimento visado e demonstrado na tabela 15.

#### 5.3.1.6. Local de Estocagem dos Corpos de Prova

O traslado dos moldes com concreto, foi efetuado evitando-se impactos, vibrações e transporte de corpos de prova recém-moldados, sendo acondicionados ligeiramente sobre o piso plano e fechado do laboratório, em repouso (umidade do ar de  $\approx 62\%$ , à temperatura de  $23^\circ$  a  $28^\circ$ , à luz ambiente) para propiciar a 1ª cura (24h após a moldagem do CP) para evitar adulteração da homogeneidade, conforme itens 7.6 e 8.1.1 da norma NBR5738, 2015.

#### 5.3.1.7. Lançamento na Câmara Úmida

Antes do mergulho na câmara úmida, procedeu-se à identificação ou conhecimento dos CPs (item 8.2.2 da norma). Logo em seguida procedeu-se a imersão dos CPs na câmara úmida, (submersos em tanque de água parada) à temperatura de  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar superior a 95 %conforme item 8.2.3 da norma NBR5738, 2015.

#### 5.3.1.8. Ensaios de Compressão - Rompimento a “j” dias de Cura

Segundo a programação de ruptura, 5 CPs foram tirados da câmara úmida e levados imediatamente para a sala de ensaio de resistência mecânica. Os CPs foram rompidos na prensa hidráulica, sendo feitos os rompimentos aos 7 e 28 dias de cura, como item 5 da norma (NBR5739, 2007). A resistência a compressão é calculada conforme equação 2, o tipo de ruptura do corpo de prova é especificado conforme tabela 9.

### **5.3.2. Laboratórios e Equipamentos**

Nesta seção, são listados os equipamentos do UniFOA e da UGB, usados na preparação e produção do compósito. Laboratório de Eng.<sup>a</sup> Civil do Centro Universitário Geraldo Di Biase (armazenagem, preparação, conformação e ensaios) conforme as normas (NBR5738,2015; NBR5739, 2007) e laboratório de Materiais – CIT para realização do MEV, do Centro Universitário de Volta Redonda (análises morfológica e química).

### 5.3.2.1. Equipamentos de Peneiramento

A seguir, listam-se os elementos ou equipamentos utilizados no Laboratório de Engenharia do UGB (Figuras 17 e 18) usados para fazer o peneiramento dos materiais para ensaio de granulometria dos agregados e da PET micronizada.



Figura 17 – Agitador Granulômetro marca H.Roth

Fonte: Autor, 2020



Figura 18 – Peneiras marca Soloteste, para ensaio de granulometria dos agregados

Fonte: Autor, 2020

### 5.3.2.2. Equipamentos de Mistura e Dosagem do Concreto

No laboratório de Engenharia do UGB foram utilizados os seguintes equipamentos (Figura 19 á 22) para efetuar a mistura e formação do compósito de concreto.



Figura 19 - Betoneira marca Menegotti modelo 120 litros Compacta

Fonte: Autor, 2020



Figura 20 – Proveta de plástico modelo 1000 ml para medição da água e PET micronizado

Fonte: Autor, 2020



Figura 21 – Balde metálico graduado modelo 5 litros para dosagem do agregado

Fonte: Autor, 2020



Figura 22 - Balanças de precisão para pesagem do cimento

Fonte: Autor, 2020

### 5.3.2.3. Equipamentos para Conformação dos CPs

Para envasamento e compactação do compósito, conformando os corpos de prova de concreto, foram utilizados os seguintes equipamentos do laboratório de Eng.<sup>a</sup> do UGB.

Foram utilizadas as fôrmas marca Soloteste (Figura 23) para envasamento, compactação, pré-cura dos CPs do compósito de concreto.



Figura 23 - Fôrmas Soloteste - Cilíndricas base Ø10cm x altura 20cm

Fonte: Autor, 2020

O cone de aço (Figura 24) do teste de Slump, utilizado para formar a torre de concreto e referência na medição do abatimento. A barra de aço (60cm x Ø1,5cm) foi utilizada para compactar tanto o concreto dos moldes como aquele dentro do cone (Figura 24) e também como ponto de referência da medição do abatimento (Figura 25). A fita métrica da trena foi estendida entre barra de aço e topo do cone, para leitura do valor do abatimento em centímetros (Figura 25).



Figura 24 - Cone e barra de aço para o Teste de Slump

Fonte: Autor, 2020



*Figura 25 – Medição do abatimento e régua metálica*

Fonte: Autor, 2020

No laboratório de engenharia do UGB, foram usados os tanques da câmara úmida para submersão dos CPs (Figura 26) para cura até o período de ensaios mecânicos.



*Figura 26 – Tanque de Cura (Câmara úmida)*

Fonte: Autor, 2020

#### 5.3.2.4 Equipamentos de Ensaio Mecânicos

No laboratório de Engenharia do UGB, foi utilizada a Prensa Hidráulica da marca Contenco, elétrica digital, 100 toneladas, modelo I-3025-B (fabricante dos produtos Pavites) de classe 1,0 (Figura 27) para efetuar os ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração, dos CPs de concreto.



Figura 27 - Prensa Contenco, elétrica digital, 100 toneladas, modelo I-3025-B

Fonte: Autor, 2020

#### 5.3.2.4. Análise MEV

Os corpos de prova foram analisados em sua morfologia, com o uso do MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) da marca Hitachi modelo TM 3000 (Figura 28), com uso de um detector de elétrons secundários e tensão no tubo de 5 kV. O equipamento encontra-se disponível no laboratório de Caracterização de Materiais do UniFOA em Volta Redonda- RJ.



Figura 28 - Microscópio Eletrônico de Varredura

Fonte: Autor, 2020

### 5.3.3. Traços dos Compósitos

Conforme o planejamento inicial, foram preparados CPs para cada uma das substituições de areia ou agregado miúdo por PET micronizada nas proporções de 5%, 10% e 15%, além do percentual de referência de 0% de substituição do agregado miúdo, obtendo-se a quantidade (Tabela 14) suficiente para os ensaios, conforme os períodos de rompimento programados (7 e 28 dias de cura) conforme ABNT NBR 5739: 2007.

Foram realizados três tipos diferentes de compósitos, um compósito apenas com as substituições do agregado miúdo por PET micronizada nas porcentagens de 0%,5%,10% e 15% num total de quatro traços, outro compósito com adição do aditivo super plastificante Sulfocim NSS 40 na porcentagem de 1,5% na proporção do cimento com substituição do agregado por PET micronizada nas porcentagens de 0%,5%,10% e 15% totalizando quatro traços, e um compósito com adição do aditivo super plastificante Sulfocim NSS 40 na porcentagem de 3,0% na proporção do cimento com substituição do agregado por PET micronizada nas porcentagens de 0%,5%,10% e 15% mais quatro traços. A utilização do aditivo buscou a melhora da consistência e da resistência à compressão do concreto.

Tabela 14 - Estimativa de Quantidade mínima total de CPs

CPs	Destino (Ensaio/Análise)	Qt. Mínima	Qt. CPs x Qt. Rompimento x Qt. Adições	Qt. CPs
CPs sem Aditivo	Compressão (axial 7, e 28dd).	10	5 x 2 x 4	40
CPs 1,5% Aditivo	Compressão (axial 7, e 28dd).	10	5 x 2 x 4	40
CPs 3,0% Aditivo	Compressão (axial 7, e 28dd).	10	5 x 2 x 4	40
Amostra	Análise Morfológica (0, 5, 10 e 15) %	6	6 x 4	24

Fonte: Autor, 2020

A quantidade mínima foi definida por traço, cinco CPs vezes duas datas de rompimento 7 dias e 28 dias.

O traço unitário adotado foi o volumétrico na proporção de 1:2:21/2 (1 de cimento x 2 de areia x 2,5 de agregado graúdo), adotado da Tabela de Caldas Branco

(2019) (GUERRA, 2017), considerado este, um traço com custo benefício mediano, na engenharia. Com uma resistência de dosagem experimental aos 28 dias ( $f_{cj}$ ) de 30MPa com um fator água/cimento (a/c) de 0,55. A tabela 15 demonstra o traço relativo para a conformação dos compósitos.

Tabela 15 - Premissas para Composição do Compósito

TRAÇO EM VOLUME						
Para 1 Metro Cúbico				Para 1 kg de Cimento		
Cimento (kg)	Areia (litros)	Brita (litros)	Água (litros)	Areia (litros)	Brita (litros)	a/c
374,0	628,0	660,0	206,0	1,679	1,765	0,55

Fonte: Caldas Branco, 2019

Com estas definições atribuídas e a (Tabela 15), foram então adotadas as premissas de conformação dos compósitos, foram definidos três compósitos, compósito I, compósito II e compósito III (Tabela 16, 17 e 18). O compósito I com as premissas: sem aditivo e com substituição do agregado miúdo por PET micronizado nas proporções indicadas (Tabela 16); Compósito II, com 1,5% de adição do aditivo e substituição do agregado miúdo por PET micronizado nas porcentagens indicadas (Tabela 17); e Compósito III, com 3,0% de adição do aditivo e com substituição da areia por PET micronizado nas porcentagens indicadas (Tabela 18).

Tabela 16 - Proporção Teórica pretendida do Compósito I com Adições

COMPÓSITO I					
Material	Traço Referente – TR (1kg de Cimento)	Quantidade Estimada Para 10 CPs – Traço Referência (TR)	Traço 5% PET Micronizado	Traço 10% PET Micronizado	Traço 15% PET Micronizado
Cimento	1,0 kg	9,350 kg	9,350 kg	9,350 kg	9,350 kg
Areia	1,679 L	15,699 L	14,914 L	14,1291 L	13,3442 L
Brita 1	1,765 L	16,503 L	16,503 L	16,503 L	16,503 L
Água	0,55 L	5,143 L	5,143 L	5,143 L	5,143 L
a/c	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
PET Micronizado	-	-	0,785 L	1,5699 L	2,3548 L

Fonte: Autor, 2020

Tabela 17 - Proporção Teórica pretendida do Compósito II com Adições

<b>COMPÓSITO II</b>					
<b>Material</b>	<b>Traço Referente – TR (1kg de Cimento)</b>	<b>Quantidade Estimada Para 10 CPs – Traço Referência (TR)</b>	<b>Traço 5% PET Micronizado</b>	<b>Traço 10% PET Micronizado</b>	<b>Traço 15% PET Micronizado</b>
<b>Cimento</b>	<b>1,0 kg</b>	<b>9,350 kg</b>	<b>9,350 kg</b>	<b>9,350 kg</b>	<b>9,350 kg</b>
<b>Areia</b>	<b>1,679 L</b>	<b>15,699 L</b>	<b>14,914 L</b>	<b>14,1291 L</b>	<b>13,3442 L</b>
<b>Brita 1</b>	<b>1,765 L</b>	<b>16,503 L</b>	<b>16,503 L</b>	<b>16,503 L</b>	<b>16,503 L</b>
<b>Água</b>	<b>0,55 L</b>	<b>5,143 L</b>	<b>5,143 L</b>	<b>5,143 L</b>	<b>5,143 L</b>
<b>a/c</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>
<b>PET Micronizado</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,785 L</b>	<b>1,5699 L</b>	<b>2,3548 L</b>
<b>Aditivo (SP) 1,5%</b>	<b>0,015 L</b>	<b>0,1403 L</b>	<b>0,1403 L</b>	<b>0,1403 L</b>	<b>0,1403 L</b>

Fonte: Autor, 2020

Tabela 18 - Proporção Teórica pretendida do Compósito III com Adições

<b>COMPÓSITO III</b>					
<b>Material</b>	<b>Traço Referente – TR (1kg de Cimento)</b>	<b>Quantidade Estimada Para 10 CPs – Traço Referência (TR)</b>	<b>Traço 5% PET Micronizado</b>	<b>Traço 10% PET Micronizado</b>	<b>Traço 15% PET Micronizado</b>
<b>Cimento</b>	<b>1,0 kg</b>	<b>9,350 kg</b>	<b>9,350 kg</b>	<b>9,350 kg</b>	<b>9,350 kg</b>
<b>Areia</b>	<b>1,679 L</b>	<b>15,699 L</b>	<b>14,914 L</b>	<b>14,1291 L</b>	<b>13,3442 L</b>
<b>Brita 1</b>	<b>1,765 L</b>	<b>16,503 L</b>	<b>16,503 L</b>	<b>16,503 L</b>	<b>16,503 L</b>
<b>Água</b>	<b>0,55 L</b>	<b>5,143 L</b>	<b>5,143 L</b>	<b>5,143 L</b>	<b>5,143 L</b>
<b>a/c</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>	<b>0,55</b>
<b>PET Micronizado</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,785 L</b>	<b>1,5699 L</b>	<b>2,3548 L</b>
<b>Aditivo (SP) 3,0%</b>	<b>0,030 L</b>	<b>0,2805 L</b>	<b>0,2805 L</b>	<b>0,2805 L</b>	<b>0,2805 L</b>

Fonte: Autor, 2020

Objetivou-se neste trabalho, avaliar a resistência e a consistência dentro dos padrões da engenharia, pretendendo-se produzir concreto com resistência característica  $f_{ck} \geq 20\text{MPa}$ , que consiste em um concreto classe C20 conforme ABNT NBR 6118: 2014 e ABNT NBR 8953: 2015, que considera como resistência mínima para concretos com finalidades estruturais, além da adoção da condição “B” de preparo com desvio padrão “ $\sigma$ ” de aceitação  $\leq 5,5\text{ MPa}$  conforme Tabela 10.

#### 5.3.4. Conformação dos CPs

Para a conformação dos CPs de concreto, foram aplicadas as orientações da norma NBR5738: 2015 aplicadas às quantidades e proporções de materiais conforme as premissas especificadas no item 5.3.3 (Tabela 16 a Tabela 18).

Além do concreto convencional com 0% de adição, para cada uma das adições percentuais (5%, 10% e 15% ) de substituição da areia por PET micronizada, repetiu-se o processo para cada compósito proposto.

Os Moldes foram lubrificadas previamente, com uma fina camada de óleo mineral (Figura 29) para que os CPs fossem facilmente retirados dos moldes após a pré-cura de 24h (NBR5738, 2015). Os agregados miúdos e graúdos, além do cimento, foram preparados em separado conforme as adições previstas.



Figura 29 - Revestimento dos Moldes com Óleo

Fonte: Autor, 2020

Efetuu-se a mistura do cimento, brita e 60% a 70% da água de amassamento, medida através da proveta de plástico. A areia e o PET micronizado (no caso dos traços com substituição de agregado miúdo) foi então, adicionado à mistura com mais 20% a 30% da água, no caso dos Compósitos II e III adicionou-se o aditivo SP Sulfocim NSS 40 nas porções indicadas (Tabela 17 e 18). Retomava-se à mistura por mais 3 a 5 minutos (Figura 30).



Figura 30 - Mistura do concreto na betoneira

Fonte: Autor, 2020

O concreto foi misturado, quando se iniciou a consistência em cascata fluida na betoneira, esta foi parada e retirado o material para se efetuar o teste de Slump (para controle da consistência - Figura 31 e 32). Foi realizado o Slump teste em 12 traços, 4 traços de cada compósito.



Figura 31 – Material para realização do Ensaio de Consistência

Fonte: Autor, 2020



Figura 32 – Slump Teste

Fonte: Autor, 2020

Findo o processo de mistura, a betoneira era desligada efetuando-se então, o preenchimento do concreto nos moldes. Cada molde cilíndrico de Ø10cm (base) x 20cm (altura) foi preenchido em dois lances de 50% de sua altura (Figura 33). Cada lance do compósito foi compactado com a barra de ferro efetuando-se 12 punções circulares até haver o transbordo superior do material (NBR5738, 2015). Efetuou-se o nivelamento do concreto no topo molde (Figura 34) com colher de pedreiro, para que a superfície ficasse lisa (NBR5738, 2015).



Figura 33 - Compactação do Concreto nos Moldes

Fonte: Autor, 2020



Figura 34 – CPs conformados

Fonte: Autor, 2020

Após as 24h do envasamento do compósito nos moldes, estes foram desmoldados, identificados e colocados submersos na posição vertical, dentro de tanques d'água na câmara úmida (Figura 35). Os CPs permaneceram no tanque até o início dos ensaios mecânicos programados (7 dias e 28 dias).



Figura 35 – CPs na câmara úmida

Fonte: Autor, 2020

### 5.3.5. Ensaio

Esta etapa trata dos ensaios de análise de distribuição granulométrica, resistência mecânica (NBR5739, 2007), abatimento do tronco do cone (NBR NM 67, 1998) e análise morfológica através do MEV.

#### 5.3.5.1. Análise de distribuição granulométrica

A ABNT NBR NM 248: 2003, prescreve o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

Para essa análise, os agregados foram inicialmente submetidos ao processo de pesagem na balança da marca Bel Mark 5200 (Figura 36) de agregados miúdos e graúdos. Depois, as peneiras foram individualmente introduzidas no agitador de peneira da marca *H.Roth* (Figura 17) de forma decrescente. Posteriormente, foram recolocadas durante dez minutos na peneira para um novo processo de pesagem na frequência de 15 Hz.



Figura 36 – Balança da marca Bel Mark

Fonte: Autor, 2020

As peneiras são destinadas para dois tipos de agregados: agregados miúdos e graúdos. Foram selecionadas por tamanhos decrescentes de 2,4mm; 1,2mm, 600 $\mu$ m, 300 $\mu$ m e 150 $\mu$ m, para agregados miúdos e agregados graúdos as seguintes peneiras em ordem decrescente: dimensões; 24,0mm, 19,0mm, 12,5mm, 9,5mm, 6,3mm, respectivamente, conforme visto na figura 37.

Foram realizados ensaios de granulometria no PET micronizado para determinação das dimensões do PET micronizado, utilizando peneiras iguais do agregado miúdo.



Figura 37 – Peneiras para ensaios granulométricos

Fonte: Autor, 2020

#### 5.3.5.2. Ensaio de resistência à compressão

Foram realizados ensaios de resistência a compressão (axial). O CP foi submetido à compressão via prensa hidráulica, até o seu rompimento com o registro da tensão (ABNT NBR5739, 2007). Para os ensaios de compressão (Figura 38) foi utilizada a prensa hidráulica marca Contenco, elétrica digital, 100 toneladas, modelo I-3025-B (fabricante dos produtos Pavites) de classe 1,0, com capacidade máxima para até 100MPa de tensão (uso normal até 60MPa devido à questão de segurança).

Este ensaio visou obter a resistência característica à compressão do concreto ( $F_{ck}$ ) de cada CP. Inicialmente preparou-se a prensa com o conjunto de ferramental para permitir o ensaio de compressão axial, com a montagem da punção metálica superior na rótula superior (fixa) e a montagem da punção inferior na base inferior (móvel) da prensa. Esta montagem permitiu o posicionamento verticalmente do CP entre as punções superior e inferior (Figura 38). Antes do rompimento, duas juntas metálicas de neopreme foram encaixadas nas bases superior e inferior de cada CP. As juntas de neopreme têm a função de transferir a força aplicada pelo punções superior e inferior, sobre o CP, evitando o desgaste das duas punções da prensa, quando do atrito e impacto do rompimento do corpo de prova.



Figura 38 – Prensa e preparação do Corpo de Prova

Fonte: Autor, 2020

Confirmadas a identificação do CP, liberou-se a pressão, através de mecanismo de injeção de óleo na câmara de pressão. Esta pressão gerou força na base pistão inferior, que fez subir verticalmente o conjunto neopreme inferior e CP, até que o neopreme superior encostasse na face inferior da punção superior. A partir deste ponto, a prensa continuou gerando força no conjunto, comprimindo o CP de baixo para cima até seu rompimento (Figura 39).



Figura 39 – Rompimento dos CPs

Fonte: Autor, 2020

O sensor de pressão do painel digital da prensa registrou a tensão máxima de rompimento de cada CP (Figura 40) e sinalizando (visualmente) para o operador para aliviar a pressão manualmente, fazendo com que o pistão inferior descesse à posição inicial, o resultado da tensão máxima de ruptura (MPa) e o tipo de ruptura (Figura 9) é

apresento na tela do computador em forma de um laudo (Figura 40), com identificação da amostra e idade do CP.

### NBR 5739 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos

#### Dados cadastrais da amostra

**Nome Amostra:** TCC PETMICRO 15% PET SEM SP 7 DIAS  
**Tipo de Ensaio:** NBR 5739 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos  
**Cliente:**  
**Responsável::**  
**Data Moldagem:** 01 março, 2019

#### Dados cadastrais do corpo de prova

**Ident. do C.P.:** PETMICRO 15% SEM SP 7 DIAS  
**Idade:** 7(dias)

#### Resultados do ensaio realizado

**Tensão Ruptura:** 11,6(MPa)  
**Tipo Ruptura:** CISALHADA

#### Gráfico do ensaio realizado

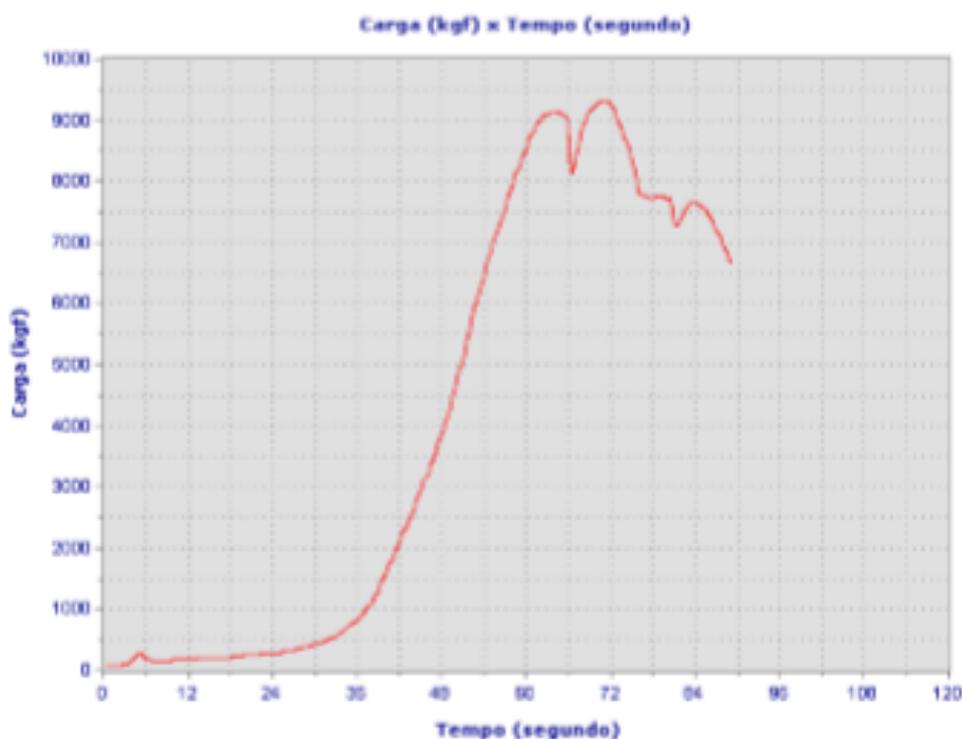


Figura 40 – Laudo ensaio de compressão do CP

Fonte: Autor, 2020

### 5.3.5.3. Ensaio de consistência (*Slump Test*)

Após a mistura foi realizado o abatimento do concreto (*Slump Test*) ou ensaio do abatimento do tronco de cone (itens 4.9.1 e 5.3.4) e conforme figuras 31 e 32, para verificar a trabalhabilidade do concreto em seu estado plástico, medindo sua consistência (Figura 41) e avaliando se está adequada para determinado uso na engenharia civil (Tabela 9).

O slump teste foi realizado em todos os compósitos do projeto, onde cada compósito possui quatro traços (TR 0% adição de PET, 5% adição de PET, 10% adição de PET e 15% adição de PET), os resultados são apresentados no item 6 do presente trabalho.



Figura 41 - Ensaio de Consistência

Fonte: Autor, 2020

### 5.3.5.4. Análise MEV

Com o objetivo de verificar a incorporação do PET micronizado no compósito e sua interação com os agregados e aglomerantes na pasta e zona de transição, foram realizados análises por MEV.

O MEV é uma técnica de maior uso para o estudo, caracterização do tamanho, forma e estrutura de nano partículas. A técnica consiste na utilização de um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional (PEREIRA, 2016).

O MEV exigiu tamanho adequado das amostras, que foram então, quebradas em formas menores. Foram então, agrupadas por adição de PET micronizado (Figura

39) sendo escolhidas duas de cada adição que melhor evidenciassem os elementos constituintes do compósito (a matriz de concreto, brita, cerâmica) e as interfaces entre estes, as amostras utilizadas foram as com 28 dias de idade.

Foram preparadas duas amostras foram colocadas na câmara de vácuo do MEV (Figura 40) e digitalizadas suas imagens para análise morfológica de superfície. Nas magnitudes até 1500x, utilizou-se potência de 5kV e para aquelas acima de 1500x, a nitidez foi conseguida à 15kV. Foi dado foco à qualidade das interfaces (matriz x concreto) e (matriz x cerâmica) além da morfologia do compósito (grãos, vazios, fraturas e porosidade), pois estas têm relação direta com aderência que se reflete na resistência mecânica do compósito.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram listados nesta seção, os resultados dos ensaios de granulometria (PET micronizado, areia e brita), resistência mecânica dos compósitos, trabalhabilidade com ensaio de consistência (Slump) e as análises morfológicas por MEV (PET micronizado e compósito final). Foram utilizados gráficos, figuras e tabelas para melhor discussão dos resultados.

### 6.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Grandeza relacionada à distribuição granulométrica do agregado, equivalente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

O módulo de finura (MF) é o somatório das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

A areia é classificada do seguinte modo:

- Areia Grossa = MF entre 3,35 e 4,05
- Areia Média = MF entre 2,40 e 3,35
- Areia Fina = MF entre 1,97 e 2,40
- Areia muito fina = MF abaixo de 1,97

A areia utilizada nos ensaios (Figura 42) foi classificada como areia média (Tabela 19), com módulo de finura (MF) de 2,96.



Figura 42 – Granulometria da areia

Fonte: Autor, 2020

Tabela 19 – Ensaio de granulométrico da areia

Malha (mm)	Peso do Material Retido	% Retida	%Acumulada
<b>*9,52</b>	0,0	0,0	0,0
<b>*6,35</b>	1,7	0,26153	0,26153
<b>*4,76</b>	5,5	0,84615	1,10768
<b>*2,38</b>	61,2	9,41538	10,52306
<b>*1,19</b>	126,2	19,41538	29,93844
<b>*0,59</b>	226,9	34,90769	64,84613
<b>*0,297</b>	169,0	26,00000	90,84613
<b>*0,149</b>	52,2	8,080760	98,87689
<b>Fundo</b>	7,3	1,273070	100,0
<b>Total</b>	650,0	100,0	-

Fonte: Autor, 2020

A brita é classificada conforme do seguinte modo:

- Brita 0 = 4,8 a 9,5mm
- Brita 1 = 9,5 a 19,0mm
- Brita 2 = 19,0 a 25,0mm
- Brita 3 = 25,0 a 50,0mm
- Brita 4 = 50,0 a 76,0mm

A brita utilizada nos ensaios foi a classificada como brita 1, com diâmetro máximo do agregado de 19,0mm.

A granulometria do PET micronizado foi analisada para confirmar se está de acordo com que o fabricante fornece com granulometria entre 270# (0,052mm) a 400# (0,037mm) (Tabela 20).

Tabela 20 – Ensaio granulométrico do PET micronizado

Malha (mm)	Peso do Material Retido	% Retida	%Acumulada
<b>*2,0</b>	0,00	0,00	0,00
<b>*1,20</b>	0,00	0,00	0,00
<b>*0,60</b>	0,00	0,00	0,00
<b>*0,42</b>	0,00	0,00	0,00
<b>*0,25</b>	6,40	6,40	6,40
<b>*0,15</b>	10,70	10,70	17,10
<b>*0,06</b>	44,20	44,20	61,30
<b>*0,002</b>	23,40	23,40	84,70
<b>Fundo</b>	15,30	15,30	100,00
<b>Total</b>	100,00	100,00	-

Fonte: Autor, 2020

O PET micronizado utilizada nos ensaios foi classificada como material muito fino, com módulo de finura (MF) foi de 1,695.

## 6.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

A seguir são demonstrados os resultados obtidos com o ensaio de resistência a compressão com aplicação de força no sentido axial dos CPs de concreto dos três tipos de compósitos.

Neste trabalho considerou-se como referenciais para avaliação dos resultados das resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) o valor de 20MPa, o mínimo permitido como resistência para estruturas com finalidades estruturais, conforme item 4.6, concreto com classe C20. O ensaio fornecerá a resistência do

concreto aos 7 e aos 28 dias ( $f_{cj}$ ), onde a equação 3 calculará o  $f_{ck}$  para classificação do concreto quanto a resistência conforme item 4.7.

$$f_{ck} = f_{cj} - 1,65 s_d \quad (3)$$

### 6.2.1. Resistência à Compressão do Compósito I

A tabela 21 demonstra os resultados do ensaio de compressão para 7 e 28 dias para o compósito I, sem adição de aditivo e com substituição de agregado miúdo por PET micronizado nas proporções de 0%(Referência), 5%, 10% e 15%.

Tabela 21 – Resultados do ensaio de compressão do COMPÓSITO I

COMPÓSITO I								
Composição	Idade	Resistência CPs					Média (Mpa)	Desvio Padrão
(R.F. 0% de PET micro)	7 dias	15,0	15,4	16,0	14,9	15,2	15,3	0,44
	28 dias	26,7	27,0	28,0	26,3	26,9	<b>26,98</b>	0,63
(5% de PET micro)	7 dias	11,6	13,6	11,8	12,6	12,0	12,32	0,81
	28 dias	18,4	19,4	21,9	22,0	18,0	<b>19,94</b>	1,90
(10% de PET micro)	7 dias	12,0	16,0	15,4	14,0	15,1	14,50	1,57
	28 dias	20,2	19,9	24,9	22,0	21,2	<b>21,64</b>	2,00
(15% de PET micro)	7 dias	11,6	11,2	11,7	12,1	11,5	11,62	0,33
	28 dias	17,5	17,7	18,0	18,5	17,0	<b>17,74</b>	0,56

Fonte: Autor, 2020

Na adição de 0% com 28dd, obteve-se um  $f_{c28}$  médio de 29,5MPa, na adição de 5% de PET micronizado observou-se um diminuição de 8,62% em relação ao traço com 0% de adição, com uma resistência desejada. Neste ensaio, nota-se que os traços com adição de 5% e 10% chegou em uma resistência média maior que 20MPa e que com o uso do aditivo contribuiu para que a resistência a 28 dias ( $f_{c28}$ ) ficasse com uma

resistencia ansiada para concreto com finalidade estrutural, com exceção do traço com 15% de adição.

A figura 43 demonstra a a resistencia a compressão dos 5 CPs para cada traço do Compósito I para uma idade de cura de 28 dias e que o traço com 5% de PET micronizado alcançou maior resistência, a média de resistencia de cada traço e apresentado na figura 44, e a tabela 22 mostra o fck para cada traço do Compósito I, com utilização do  $f_{c28}$  medio, do desvio padrão ( $s_d$ ) e da equação 3 para obtenção do fck.

A ABNT NBR 12655: 2006 descreve que em desvio-padrão conhecido e quando o concreto for elaborado com os mesmos materiais, mediante equipamentos similares e sob condições equivalentes, o valor numérico do desvio-padrão não pode ser considerado menor que 2MPa (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006).

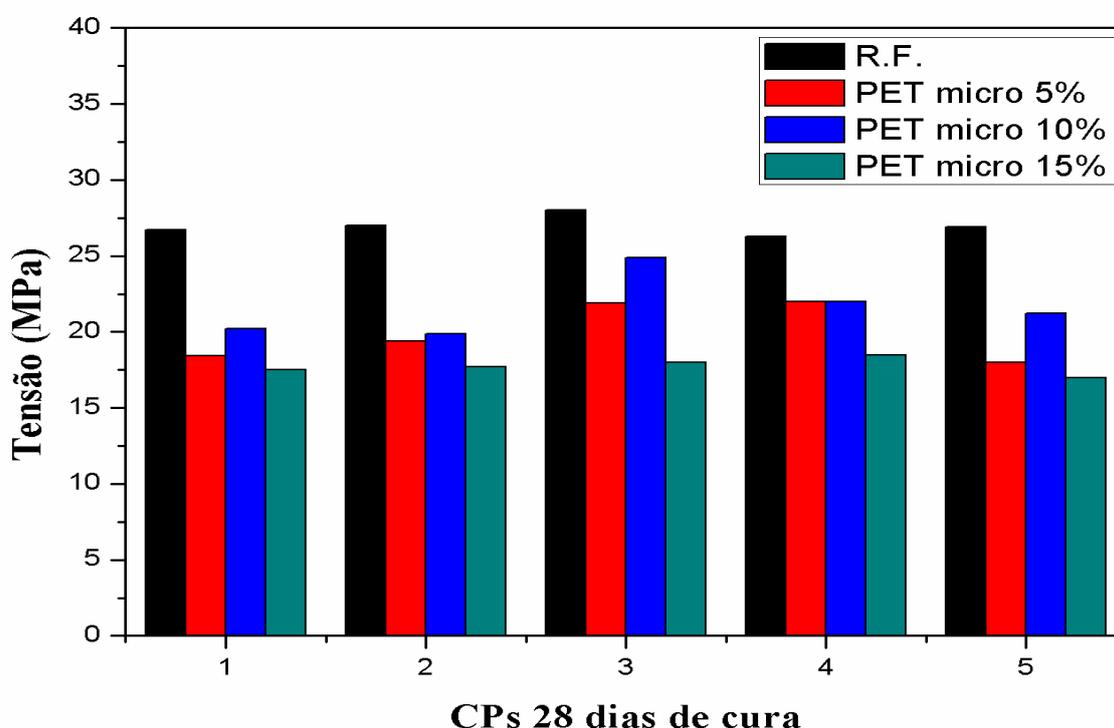


Figura 43 – Comparação da resistência dos CPs do Compósito I

Fonte: Autor, 2020

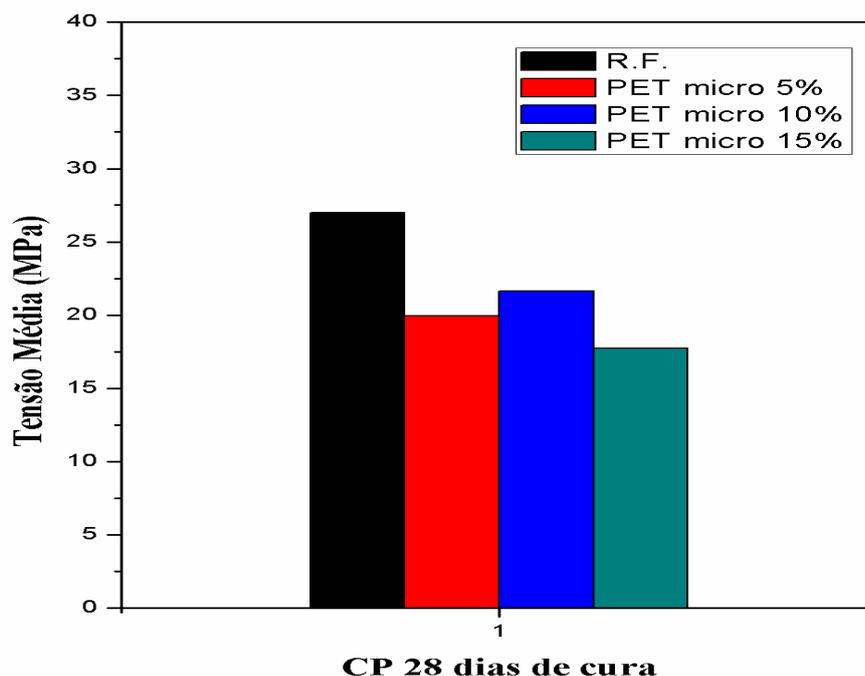


Figura 44 – Comparação da resistência média de cada traço dos CPs do Compósito I

Fonte: Autor, 2020

Tabela 22 – Resistência característica do concreto (fck) para Compósito I

Composição	Idade	fc28 Médio (Mpa)	Desvio Padrão (sd)	fck (Mpa)
(R.F. 0% de PET micro)	28 dias	26,98	2,0	<b>23,68</b>
(5% de PET micro)	28 dias	19,94	2,0	<b>16,64</b>
(10% de PET micro)	28 dias	21,64	2,0	<b>18,34</b>
(15% de PET micro)	28 dias	17,74	2,0	<b>14,44</b>

Fonte: Autor, 2020

### 6.2.2. Resistência à Compressão do Compósito II

Os resultados do ensaio de compressão para 7 e 28 dias para o compósito II, com adição de 1,5% do aditivo SP Sulfochim NSS no peso de cimento e com substituição de agregado miúdo por PET micronizado nas proporções de 0%(R.F.), 5%, 10% e 15%, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de compressão do COMPÓSITO II

COMPÓSITO II								
Composição	Idade	Resistência CPs					Média (Mpa)	Desvio Padrão
(R.F. 0% de PET micro)	7 dias	15,2	14,6	15,8	15,0	15,4	15,20	0,45
	28 dias	31,5	28,9	28,1	29,6	29,4	<b>29,50</b>	1,26
(5% de PET micro)	7 dias	18,2	17,8	18,6	17,9	18,5	18,20	0,35
	28 dias	28,7	28,5	27,4	28,4	28,1	<b>28,22</b>	0,51
(10% de PET micro)	7 dias	15,9	15,6	16,3	15,8	16,0	15,92	0,26
	28 dias	24,0	20,1	22,6	22,0	22,4	<b>22,22</b>	1,40
(15% de PET micro)	7 dias	8,8	13,4	12,9	13,0	11,9	12,00	1,87
	28 dias	17,2	17,3	17,1	17,2	17,2	<b>17,20</b>	0,07

Fonte: Autor, 2020

Na adição de 0% com 28dd, obteve-se um  $fc_{28}$  médio de 29,5MPa, na adição de 5% de PET micronizado observou-se um diminuição de 8,62% em relação ao traço com 0% de adição, com uma resistência desejada. Neste ensaio, nota-se que os traços com adição de 5% e 10% chegou em uma resistencia média maior que 20MPa e que com o uso do aditivo contribuiu para que a resistência a 28 dias ( $fc_{28}$ ) ficasse com uma resistencia ansiada para concreto com finalidade estrutural, com exceção do traço com 15% de adição.

A figura 45 demonstra a a resistencia a compressão dos 5 CPs para cada traço do Compósito III para uma idade de cura de 28 dias e que o traço com 5% de PET

micronizado alcançou maior resistência, a média de resistência de cada traço e apresentado na figura 46, e a tabela 24 mostra o  $f_{ck}$  para cada traço do Compósito II, com utilização do  $f_{c28}$  medio, do desvio padrão ( $s_d$ ) e da equação 3 para obtenção do  $f_{ck}$ .

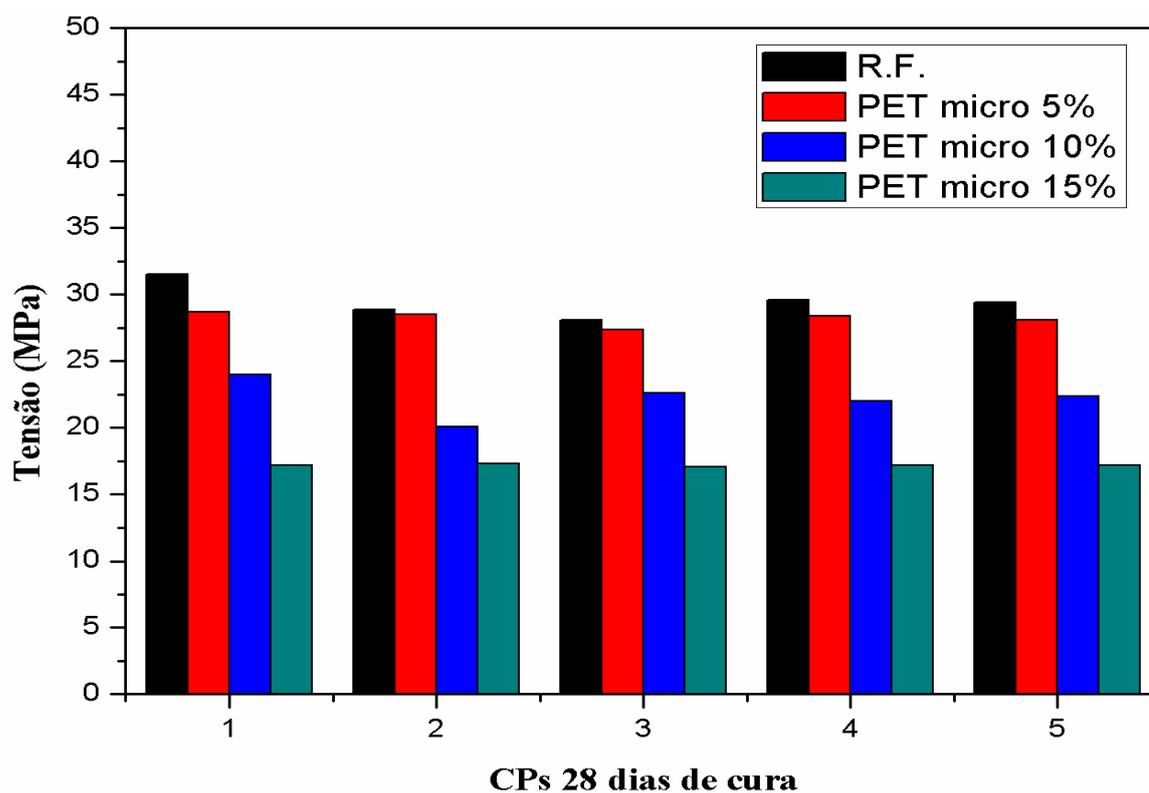


Figura 45 – Comparação da resistência dos CPs do Compósito II

Fonte: Autor, 2020

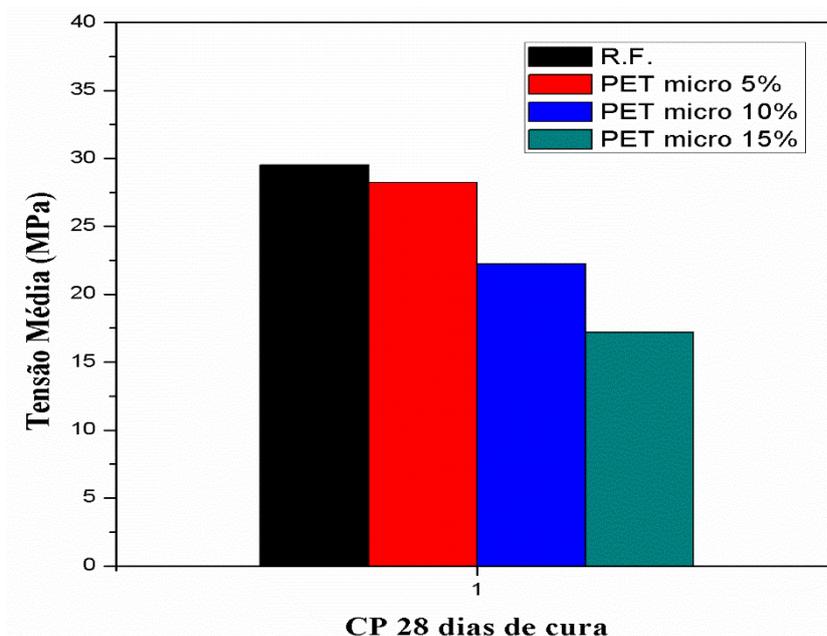


Figura 46 – Comparação da resistência média de cada traço dos CPs do Compósito II

Fonte: Autor, 2020

Tabela 24 – Resistência característica do concreto (fck) para Compósito II

Composição	Idade	fc28 Médio (Mpa)	Desvio Padrão (sd)	fck (Mpa)
(R.F. 0% de PET micro)	28 dias	29,50	2,0	<b>26,20</b>
(5% de PET micro)	28 dias	28,22	2,0	<b>24,92</b>
(10% de PET micro)	28 dias	22,22	2,0	<b>18,92</b>
(15% de PET micro)	28 dias	17,20	2,0	<b>13,90</b>

Fonte: Autor, 2020

### 6.2.3. Resistência à Compressão do Compósito III

A tabela 25 demonstra os resultados do ensaio de compressão para 7 e 28 dias para o compósito III, com adição de 3,0% do aditivo SP Sulfocim NSS no peso de

cimento e com substituição de agregado miúdo por PET micronizado nas proporções de 0%(R.F.), 5%, 10% e 15%.

Tabela 25 – Resultados do ensaio de compressão do Compósito III

COMPÓSITO III								
Composição	Idade	Resistência CPs					Média (Mpa)	Desvio Padrão
(R.F. 0% de PET micro)	7 dias	9,7	12,7	7,9	11,5	8,7	10,10	1,98
	28 dias	15,5	18,9	17,8	17,7	17,1	<b>17,40</b>	1,24
(5% de PET micro)	7 dias	11,9	14,0	11,4	13,0	11,9	12,44	1,05
	28 dias	18,9	19,2	18,5	18,8	19,0	<b>18,90</b>	0,22
(10% de PET micro)	7 dias	12,0	11,0	11,2	11,4	11,6	11,46	0,36
	28 dias	15,4	17,3	17,4	16,5	16,9	<b>16,70</b>	0,81
(15% de PET micro)	7 dias	9,6	10,9	9,1	10,2	9,6	9,88	0,69
	28 dias	13,4	14,9	15,0	14,4	14,4	<b>14,42</b>	0,63

Fonte: Autor, 2020

Na adição de 0% com 28dd, obteve-se um  $f_{c28}$  médio de 17,4MPa, na adição de 5% de PET micronizado observou-se um aumento substancial de 8,62% em relação ao traço com 0% de adição, mas abaixo da resistência desejada. Neste ensaio, nota-se que houve algum problema na dosagem ou conformação e que o aumento do aditivo contribuiu para que a resistência a 28 dias ( $f_{c28}$ ) ficasse abaixo da resistencia ansiada para concreto com finalidade estrutural.

A figura 47 demonstra a a resistencia a compressão dos 5 CPs para cada traço do Compósito III para uma idade de cura de 28 dias e que o traço com 5% de PET micronizado alcançou maior resistência, a média de resistencia de cada traço e apresentado na figura 48, e a tabela 26 mostra o  $f_{ck}$  para cada traço do Compósito III,

com utilização do  $f_{c28}$  medio, do desvio padrão ( $s_d$ ) e da equação 3 para obtenção do  $f_{ck}$ .

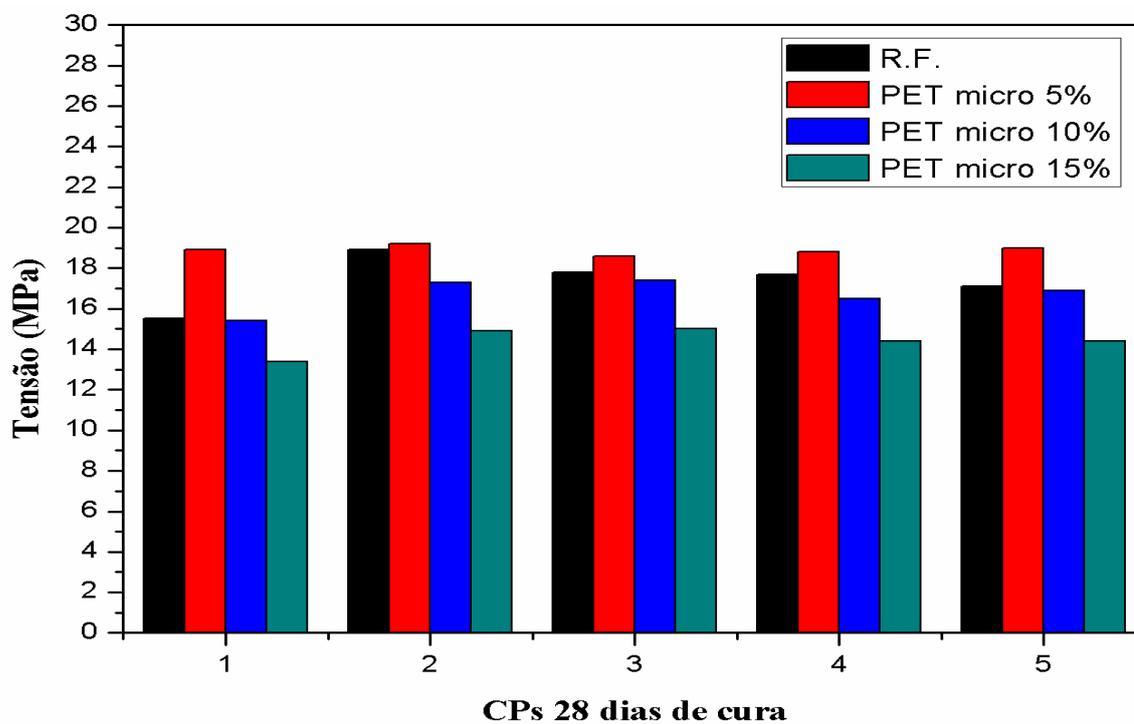


Figura 47 – Comparação da resistência dos CPs do Compósito III

Fonte: Autor, 2020

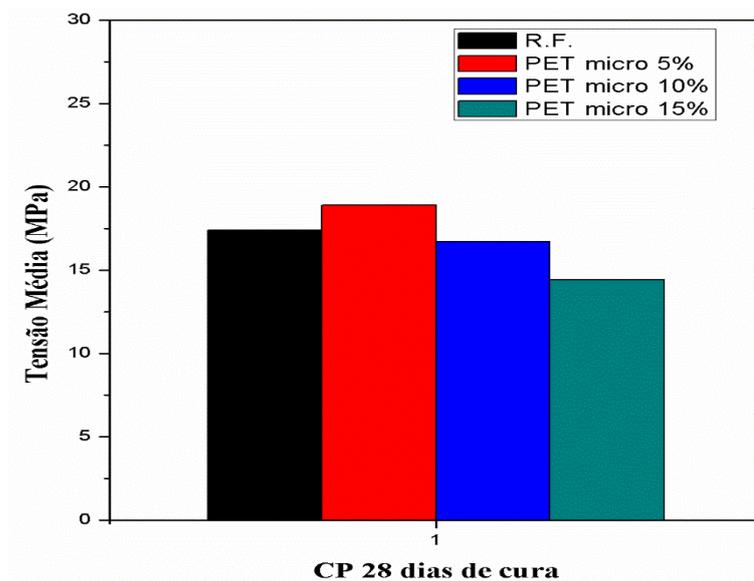


Figura 48 – Comparação da resistência média de cada traço dos CPs do Compósito III

Fonte: Autor, 2020

Tabela 26 – Resistência característica do concreto (fck) para Compósito III

<b>Composição</b>	<b>Idade</b>	<b>fc28 Médio (Mpa)</b>	<b>Desvio Padrão (sd)</b>	<b>fck (Mpa)</b>
<b>(R.F. 0% de PET micro)</b>	28 dias	17,40	2,0	<b>14,10</b>
<b>(5% de PET micro)</b>	28 dias	18,90	2,0	<b>15,60</b>
<b>(10% de PET micro)</b>	28 dias	16,70	2,0	<b>13,40</b>
<b>(15% de PET micro)</b>	28 dias	14,42	2,0	<b>11,12</b>

Fonte: Autor, 2020

#### **6.2.4. Resistência à Compressão dos Compósitos e Limite de Norma**

A Figura 49 apresenta os resultados das Resistência característica do Concreto (fck) de cada Compósito com adição de PET micronizado (0%, 5%, 10% e 15%) e o limite de norma para o concreto com finalidade estrutural conforme NBR 8953:2015, um concreto C20 (fck = 20MPa).

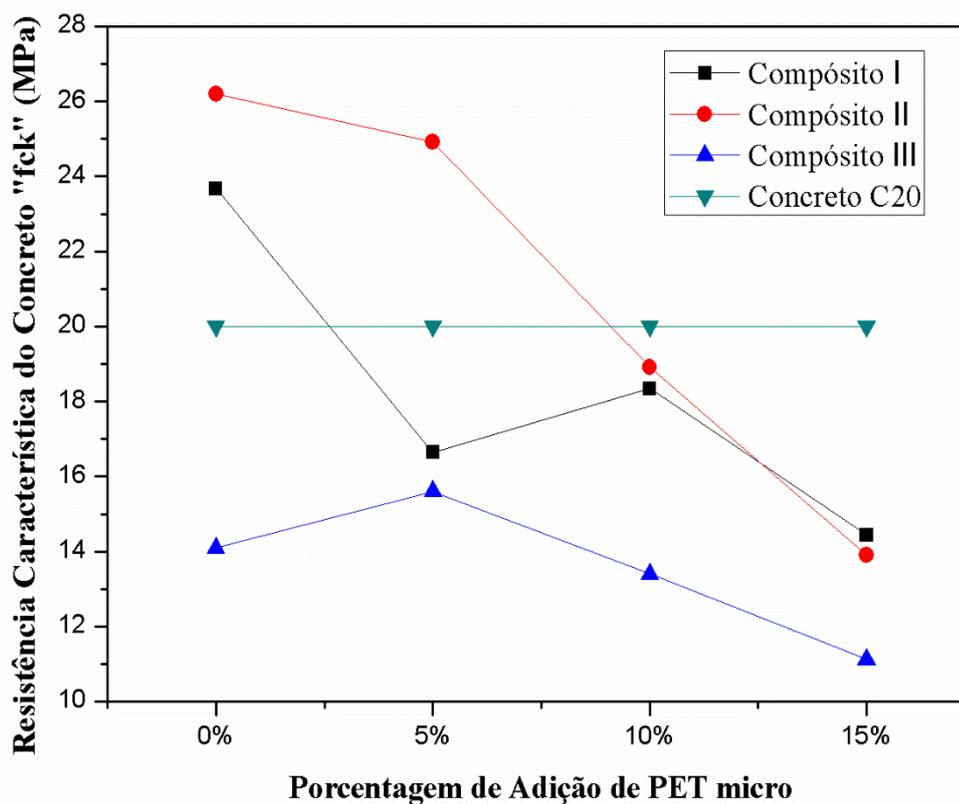


Figura 49 – Fck dos Compósitos e limite para concreto se fins estruturais

Fonte: Autor, 2020

Os resultados demonstram que apenas o Compósito II com 5% de substituição de areia por PET micronizado apresenta fins estruturais quanto a resistência a compressão conforme NBR 8953:2015.

A adição de 1,5% de aditivo (SP Sulfocim NSS 40) melhorou a resistência a compressão do Compósito I para o Compósito II, e o aumento da adição do aditivo para 3% para diminuiu a resistência do Compósito III em relação aos outros Compósitos.

### 6.3. ENSAIO DE CONSISTÊNCIA DO CONCRETO

A consistência do concreto é obtida através do ensaio de abatimento do tronco de cone e regulamentado pela NBR NM 67: 1998, descrito nos itens 4.9.1, 5.3.1.5 e 5.3.5.3, os resultados para cada Compósito (Tabela 27, 28 e 29) são apresentados a seguir.

Com base nos resultados do Compósito I (Tabela 27) o concreto foi classificado quanto sua consistencia pela tabela 9, onde a consistência para os traços de substituição de 0%, 5% e 10% de PET micronizado e classificado como S100 ( $10 \leq \text{Slump} < 16\text{cm}$ ) com aplicações para elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto, e o traço com 15% e classificado como S160 ( $16 \leq \text{Slump} < 22\text{cm}$ ) com aplicação para elemento estrutural e lançamento bombeado do concreto.

Tabela 27 – Slump Test do Compósito I

<b>Composição</b>	<b>Slump Test (cm)</b>
<b>(R.F. 0% de PET micro)</b>	<b>12,5</b>
<b>(5% de PET micro)</b>	<b>14,5</b>
<b>(10% de PET micro)</b>	<b>15,5</b>
<b>(15% de PET micro)</b>	<b>16,5</b>

Fonte: Autor, 2020

Com base nos resultados do Compósito II (Tabela 28) o concreto foi classificado quanto sua consistencia, onde a consistência para os traços de substituição de 0%, 5%, 10% e 15% de PET micronizado e classificado como S100 ( $10 \leq \text{Slump} < 16\text{cm}$ ) com aplicações para elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto.

Tabela 28 – Slump Test do Compósito II

<b>Composição</b>	<b>Slump Test (cm)</b>
<b>(R.F. 0% de PET micro)</b>	<b>12,8</b>
<b>(5% de PET micro)</b>	<b>13,6</b>
<b>(10% de PET micro)</b>	<b>14,5</b>
<b>(15% de PET micro)</b>	<b>15,5</b>

Fonte: Autor, 2020

Com base nos resultados do Compósito III (Tabela 29) o concreto foi classificado quanto sua consistencia, onde a consistência para os traços de substituição de 0%, 5%, 10% e 15% de PET micronizado e classificado como S160 ( $16 \leq \text{Slump} < 22\text{cm}$ ) com aplicações para elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto.

Tabela 29 – Slump Test do Compósito III

<b>Composição</b>	<b>Slump Test (cm)</b>
<b>(R.F. 0% de PET micro)</b>	<b>18,0</b>
<b>(5% de PET micro)</b>	<b>19,0</b>
<b>(10% de PET micro)</b>	<b>20,0</b>
<b>(15% de PET micro)</b>	<b>20,0</b>

Fonte: Autor, 2020

#### 6.4. RESULTADOS MEV

O compósito é composto por conglomerados miúdos e graúdos, unidos quimicamente por ação do cimento em coagulação com a água.

Notou-se nas imagens obtidas no MEV para todos os CP's dos Compósitos I, II e III, a presença dos materiais que foram utilizados na produção do compósito, grãos de brita, o carbonato de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , silicatos hidratados C-S-H, grãos do PET micronizado e vazios, espalhados no concreto. As imagens aqui escolhidas são das amostras recolhidas após o rompimento no ensaio de compressão axial, sendo elas, a morfologia geral do produto em locais pontuais.

Com as imagens ampliadas, os materiais apresentam-se menos detectáveis fazendo-se necessária a inserção de setas, marcações e etiquetas, para melhor identificação. A má distinção das fronteiras separatórias entre os materiais indicou propriedades essenciais da morfologia e químicas parecidas. Este fato apresentou grande relevância, pois, segundo a literatura pertinente a Ciência dos Materiais, compósitos que são formados por materiais de características morfológicas e químicas afins, apresentam notória tendência a terem uma ligação mecânica mais homogênea, melhorando assim o papel final da peça formada.

Os resultados que foram obtidos por meio do MEV são apresentados na Figura 50 até a Figura 55. Foram realizadas aproximações de 20X à 2000X afim de buscar imagens adequadas às análises desejáveis por este estudo.

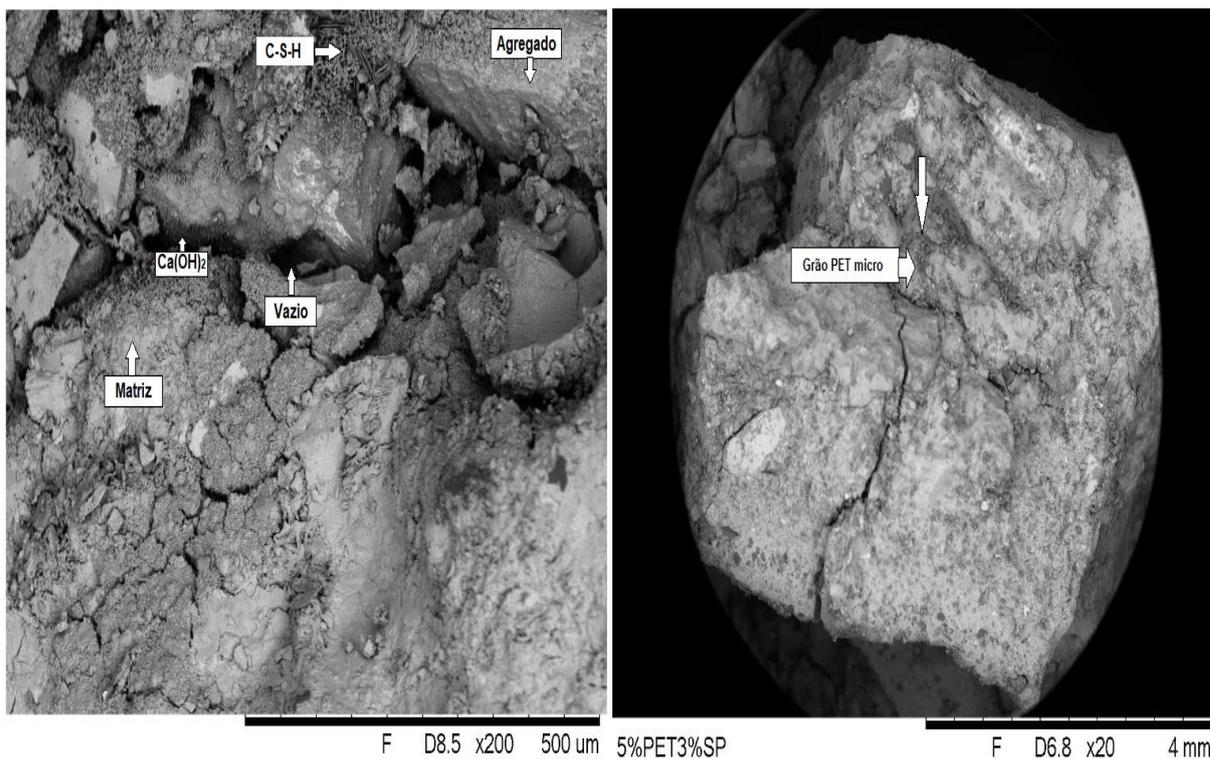


Figura 50: Imagem estrutural 200x  
Compósito III (0%)

Figura 51: Imagem estrutural 20x  
Compósito III (5%)

Fonte: Autor, 2020

Na Figura 50 e Figura 51, com ampliações de 20x e 200 vezes, pôde ser observada uma provável zona de transição existente entre o agregado e a pasta do concreto e o grão de PET micronizado.

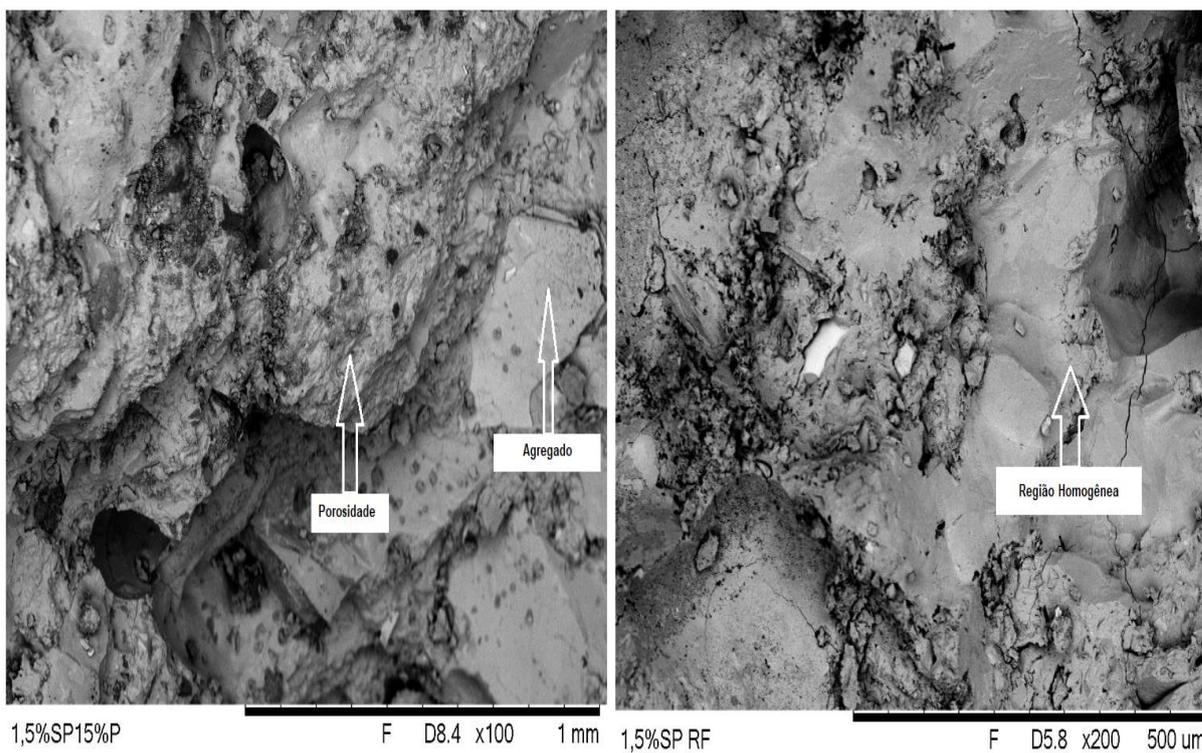
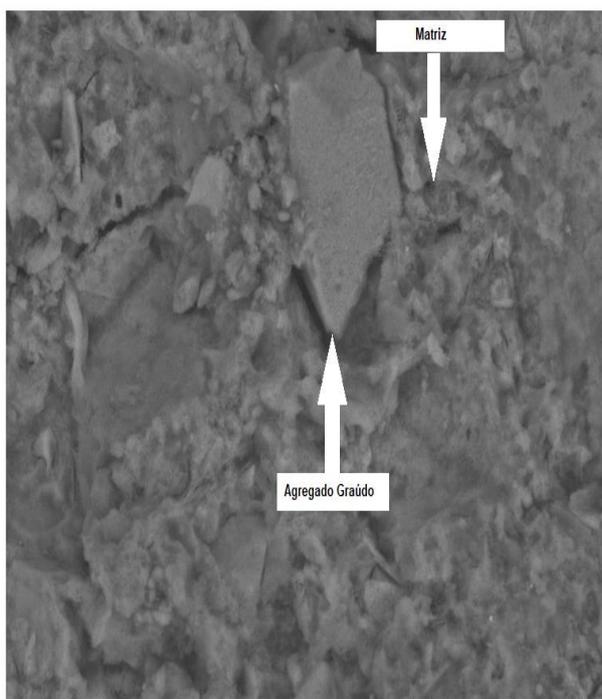


Figura 52: Imagem estrutural 100x  
Compósito II (15%)

Figura 53: Imagem estrutural 200x  
Compósito II (0%)

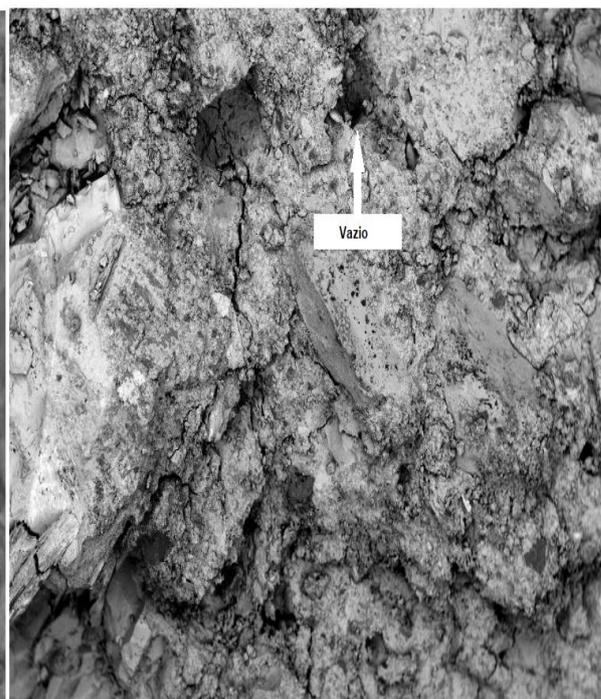
Fonte: Autor, 2020

Na Figura 52 e Figura 53, com ampliações de 100x e 200 vezes, pôde ser observada uma porosidade no concreto e o agregado existente, o concreto ficou homogêneo.



10%P SEMSP

N D6.5 x2.0k 30 um



15%P SEMSP

F D5.5 x50 2 mm

Figura 54: Imagem estrutural 2000x

Compósito I (10%)

Figura 55: Imagem estrutural 50x

Compósito I (15%)

Fonte: Autor, 2020

Na Figura 54 e Figura 55, com ampliações de 100x e 200 vezes, pôde ser observada uma matriz entre o agregado e pasta, o concreto ficou homogêneo e com poucos vazios.

## 7. CONCLUSÕES

Foram encontrados valores com alta variabilidade, porém essa oscilação acidental é considerada própria para os ensaios com compósitos a base de concreto. Uma vez que o concreto é um material compósito composto basicamente por quatro componentes, que são: cimento, água, areia e brita, onde ao menos o cimento, a areia e a brita possuem características que também podem oscilar bem mais do que, por exemplo, os metais ou polímeros, pois são influenciados pela jazida ou maneira de fabricação ou até mesmo o tempo de armazenamento.

O teste para a resistência à compressão, fator relevante para esse estudo, obteve resultado importante de 24,92 MPa (fck), visto que o Compósito II ( 5% de PET micronizado) obteve-se resistência ao que é solicitado em norma para concreto com finalidade estrutural. A adição de 1,5% aditivo melhorou a resistência à compressão do Compósito II em 41,52% em relação ao Compósito I, o aumento de adição de 3,0% diminui a resistência do Compósito III em 49,3%, no ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump) obteve-se resultados satisfatório ao que se estabelece na norma, onde todos os compósitos apresentam aplicações para elementos estruturais, o Compósito III apresentou maior Slump com um aumento de 60% em relação ao Compósito I, esse fato se deve ao aumento na adição de aditivo, outro fato também observado é que conforme se aumenta a adição de PET micronizado aumenta a plasticidade do concreto.

Os resultados obtidos pelos testes laboratoriais ficou claro a viabilidade da utilização do PET micronizado para atuar como agente ecológico e de reforço de propriedades nos concretos para fins estruturais uma vez que o compósito apresentou a resistência à compressão de 24,94MPa , porém, limitando-se a 5% de substituição da areia conforme Compósito II, sendo que, as demais dosagens apresentaram perda de propriedades importantes para utilização de concreto com finalidade estrutural, classificando-se conforme norma com a classe C25, e a classificando-se quanto a trabalhabilidade em S100, conforme norma.

Como o PET micronizado é um plástico, pode passar cerca de 400 anos para se degradar, o aproveitamento desse resíduo proporciona benefícios econômico,

social, agronômico, ambiental e reduz a percolação de gases líquidos no solo nos aterros físicos.

## 8. TRABALHOS FUTUROS

Analisar a resistência mínima para finalidades estruturais do concreto, utilizando a tabela de traços de Bastos e Basboza. Utilizando as mesmas substituições do agregado miúdo e porcentagens de aditivos. A tabela de Bastos e Barboza trabalha com mais agregado miúdo e menos grúdo isso geralmente melhora a resistência do concreto para traços com utilização de aditivos.

## 9. BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Uma breve história do cimento Portland, 2018. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 17 Junho 2018.

ABIPET - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. 10º Censo da Reciclagem de PET no Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em: 17 Junho 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13230:** Simbologia indicativa de reciclabilidade e identificação de materiais plásticos. Rio de Janeiro: [s.n.]. 1994.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: [s.n.]. 1998. p. 8.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2003. p. 13.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2006. p. 18.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2007. p. 14.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento portland. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2011. p. 19.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. 238 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2015. p. 12.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953:** Concreto para fins Estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2015.

ABREU, F. D. S. **Análise Da Durabilidade De Concreto Leve De Argila Expandida Com Camada Protetora Submetido A Meio Agressivo Ácido.** Belo Horizonte: Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2014. p. 55.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Materials and General Properties of Concrete - Committee 222 - Part 1**. Detroit: [s.n.]. 1991. p. 11.

AHMAD, N. F. A. et al. **PET concrete as paver block**. American Institute of Physics. Maryland: [s.n.]. 2016. p. 6.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Committee 212.3R-10**: Report on Chemical Admixtures for Concrete. [S.l.]: [s.n.]. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **C 125**: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken - USA: [s.n.]. 2010.

ARAGON, A. T.; GHIRALDELLO, L. Produtos a Base de Polietileno (PET) na Construção Civil: Um Estudo Diagnóstico no Município de Poços de Caldas. **revista Gestão & Conhecimento**, Pocos de Caldas, 29 Dezembro 2014. 21. Disponível em: <[http://www.pucpcaldas.br/graduacao/administracao/revista/artigos/v2014/Artigo03\\_2014.pdf](http://www.pucpcaldas.br/graduacao/administracao/revista/artigos/v2014/Artigo03_2014.pdf)>.

ASUA, J. M. **Polymer Reaction Engineering**. USA: Blackwell Publishing. 2007.

ASWATAMA, W. K. et al. **The Effect of Adding PET (Polyethylen Terephthalate) Plastic Waste on SCC (Self-Compacting Concrete) to Fresh Concrete Behavior and Mechanical Characteristics**. The 2nd International Joint Conference on Science and Technology (IJCST). Jember: [s.n.]. 2017. p. 11.

BALLARIN, A. W. **Argamassa Armada: tecnologia e aplicações no meio rural**. São Paulo: Editora da Unicamp. 2003.

BASTOS, P. S. D. S. **Estruturas de Concreto I - Notas de Aula (Cap 1 - Introdução)**. Universidade Estadual Paulista - UNESP. Bauru, p. 9. 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil-CONAMA**. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 2002. p. 95-96.

BRUCE, P. Y. **Organic Chemistry**. United States of America: Prentice Hal, 2010.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2010.

CALMON, J. L. Resíduos Industriais e Agrícolas para a Construção Civil. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, São Paulo, v. 2, n. cap.48, p. 1591-1628, 2007.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, Visando a Substituição de Agregado Miúdo em Argamassas**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ). 2005.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado segundo a NBR 6118**: 2003. 3ª. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2007. 368 p.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado segundo NBR 6118**: 2014. 4ª. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2016. 415 p.

CHOI, Y.-W. M. D.-J. C. J.-S. C. S.-K. **Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete**. [S.l.]: Cement and Concrete Research. 2005. p. 776-781.

CONCRETO. Totalmix, 2018. Disponível em: <<http://www.totalmix.com.br/construcao/index.php/servicos/concreto>>. Acesso em: 10 Junho 2018.

COSTA, A. R. B. **Desenvolvimento E Caracterização De Compósito De Concreto Com Adição De Reciclado Cerâmico De Obras Civis**. Volta Redonda: Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA. 2016. p. 166.

CSN - COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. CSN - Cimentos, 2019. Disponível em: <[http://www.csn.com.br/conteudo\\_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59832](http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&conta=45&tipo=59832)>. Acesso em: 24 Fevereiro 2019.

DUARTE, E. B. D. L. **Resistência à Compressão de Argamassa Composta por Resíduo de Construção e Demolição e Politereftalato de Etileno (PET) em Flocos**. São Paulo : Dissertação Apresentada na Universidade Nove de Julho - UNINOVE. 2014. p. 145.

EDERLI, M. **Aapectos do Comportamento e da Degradação de Matrizes de Concreto de Cimento Portland Reforçados com Fibras Provenientes da Reciclagem de Garrafa PET**. Ijuí: Trabalho de Conclusão do Curso do Programa de Graduação em Engenharia Civil do Curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2004. p. 73.

FILHO, A. N. C. **Contribuição ao controle tecnológico de concretos estruturais de cimento Portland em ambientes marítimos**. São Paulo: Dissertação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2010. p. 334.

FORLIN, F. J.; FARIA, J. D. A. F. Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2002.

FORMIGONI, A.; CAMPOS, I. P. D. A. **Reciclagem de PET no Brasil**. Rio de Janeiro: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rio de Janeiro. 2012.

GALVÃO, J. C. A. **Uso de Materiais Poliméricos Reciclados em Estruturas de Concreto para Superfícies Hidráulicas**. Curitiba: Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. 2010. p. 132.

GUERRA, R. S. D. T. Clube do Concreto. **Tabela de traços Eng. Caldas Branco**, 18 Abril 2017. ISSN <http://www.clubedoconcreto.com.br/2017/04/caldas-branco-e-suas-tabelas-1.html>. Acesso em: 29 Maio 2019.

INFOFÁCIL, 2010. Disponível em: <<http://informativofacil.blogspot.com.br/2010/10/como-surgiu-o-cimento-portland.html>>. Acesso em: 17 Julho 2018.

JOHN, V. M. **Versão editada de capítulo a ser publicado no livro: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. USP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2017.

JÚNIOR, J. C. D. A. **Avaliação da Influência da Adição de Fibras Poliméricas nas Propriedades Térmicas e Mecânicas do Concreto**. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET MG. 2016.

KHALID, F. S. et al. **Self-consolidating concretes containing waste PET bottles as sand replacement**. American Institute of Physics. Maryland: [s.n.]. 2018. p. 6.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados**. Porto Alegre: Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001. p. 290.

LOUREIRO, A. T. **Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos de PEAD Reforçado por Resíduos de Eletrodos Revestidos**. Volta Redonda: Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, J. W. **Produção e caracterização de pó de PET – Poli (Tereftalato de etileno), obtido a partir de garrafas pós-consumo**. Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado) – Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT. Universidade Estadual de Minas Gerais. 2004. p. 122.

MICROPET. **MICROPET Respeito ao Meio Ambiente**, 2018. Disponível em: <<http://www.micropet.com.br/produtos.html>>. Acesso em: 10 Junho 2018.

MODRO, N. L. R. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduos Poliméricos de PET**. Joinville: Dissertação de Mestrado Apresentado na Universidade da Região de Joinville - Univille. 2008. p. 87.

MODRO, N. L. R. et al. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, 14, Abril 2009. 725-736.

MORANVILLE-REGOURD, M. Microstructure of high performance concrete. London: E & FN Spon, 1992. p. 3-13.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2ª. ed. Porto Aegre: Bookman, 2013. 440 p.

OLIVEIRA, F. A. D. D. et al. **Análise das Propriedades Mecânicas de Concreto Produzido com Fibras de PET (Polietileno Tereftalato)**. Campina Grande: ConGea - VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2016.

PEREIRA, J. R. **Análise da Produção de Concreto Auto Adensável (CAA) e da Adição do Pó de Poli Tereftalato de Etileno (PET) Reciclado**. Limeira: Dissertação apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas. 2016.

PEZZIN, A. P. T. **Reciclagem Química de Embalagens de PET Pós-Consumo: Síntese de Novos Co-Polímeros Biodegradáveis**. Joinville: (Notas de Aula) Santa Catarina: Universidade da Região de Joinville. 2007.

PINTO, J. D. S. **Análise da influência de superfície protetoras na durabilidade do concreto para uso em meio agressivo: uma abordagem topográfica e da estrutura do material**. Belo Horizonte: Tese doutorado em engenharia metalúrgica e de minas - UFMG. 2006. p. 114.

PINTO, T. P. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: A experiência do SindusCon-SP**. São Paulo: SindusCon-SP. 2005.

PIRES, G. W. M. O. **Avaliação de Blocos Intertravados Manufaturados com Concreto Dosado com Resíduos de PET Como Alternativa Sustentável na Construção Civil**. São Paulo: Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação da Universidade Nove de Julho - UNINOVE. 2015. p. 113.

POPP, J. H. **Geologia Geral**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2012. 309 p.

POZOLANA. **pozolana in Artigos de apoio Infopédia [em linha]**. Porto: Porto Editora, 2013. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/\\$pozolana](https://www.infopedia.pt/$pozolana)>. Acesso em: 10 Junho 2018.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. Belo Horizonte: UFMG. 2013. p. 212.

SALVADOR, R. P. **Análises comparativas de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras**. São Paulo: Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2013.

SANTOS, S. et al. **Viabilidade da Produção de Concreto com Areia de PET e Substituição Parcial de Cimento por Cinza da Casca do Arroz**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'. Fortaleza. 2015.

SCHETTINO, R. M. **Concreto com Adição de Fibras de Politereftalato de Etileno**. Volta Redonda: Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA. 2015. p. 65.

SISTERQUÍMICA. **SULFOCIM NSS 40**. Jandira: [s.n.]. 2019.

TONET, K. G. **Concreto Polímero com Resina Reciclada de PET: Influência na Combustibilidade Frente à Adição de Resíduos Industriais**. São Leopoldo: Dissertação

Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. 2009.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 508 p.