



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO DE ASSIS CHAVES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DOS AGREGADOS PELO PÓ DE PEDRA E
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

PAU DOS FERROS

2019

FRANCISCO DE ASSIS CHAVES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DOS AGREGADOS PELO PÓ DE PEDRA E
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

Monografia apresentada pelo discente Francisco de Assis Chaves, ao Colegiado do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros/RN, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: José Daniel Jales Silva, Prof. Me.

PAU DOS FERROS

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C512a Chaves, Francisco de Assis.
Avaliação das propriedades mecânicas do concreto
com pó de pedra e agregados reciclados de concreto
/ Francisco de Assis Chaves. - 2019.
66 f. : il.

Orientador: José Daniel Jales Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2019.

1. Impactos ambientais. 2. Resíduos da
construção civil. 3. Controle tecnológico do
concreto. 4. Resistência à compressão. I. Silva,
José Daniel Jales, orient. II. Título.

FRANCISCO DE ASSIS CHAVES

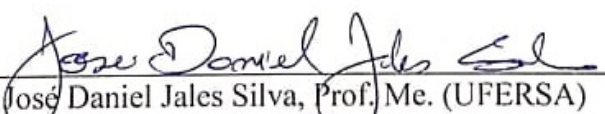
**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DOS AGREGADOS PELO PÓ DE PEDRA E
AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO**

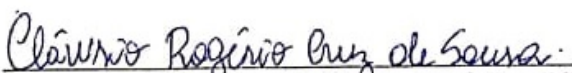
Monografia apresentada pelo discente Francisco de Assis Chaves, ao Colegiado do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros/RN, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

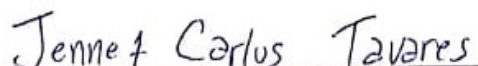
Orientador: José Daniel Jales Silva, Prof. Me.

Aprovada em: 09 / 08 / 2019

BANCA EXAMINADORA


José Daniel Jales Silva, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente


Cláudio Rogério Cruz de Sousa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


Jeneff Carlos Tavares, Bel. (EXTERNO)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Cosma Nanci de Aquino Lopes, pelos cuidados que sempre teve para comigo e pelo apoio incondicional ao longo de toda minha trajetória estudantil. Sem ela, com certeza, não teria sido possível alcançar mais esse objetivo.

Agradeço ao meu pai, José, as minhas irmãs, Francisca (Elivania), Vania e Regivania (Regia), e a minha avó, Inês (Santa), pelo carinho e suporte ao longo de todos esses anos.

Agradeço a todos os amigos e amigas que ganhei ao longo desses anos de graduação, em especial a Samuel, Liliane, Lilian, Bruna, Tairine, Alexsandro, Luma, Fernanda, Romário e Gerlânia. Agradeço em específico a minha amiga Hingrid, a qual foi minha parceira na realização dos ensaios e produção dos corpos de prova para esse trabalho.

Agradeço a todos os professores, que repassaram os seus conhecimentos, e que me fizeram mais sábio. Em nome de todos estes, agradeço a meu orientador, Daniel Jales, e a Jennef Tavares, que contribuíram em muito na realização desse trabalho.

Agradeço por último a todos os profissionais que compõem a UFERSA, pelo ótimo trabalho realizado e por sempre estarem dispostos a ajudar quando o outro necessita.

RESUMO

As questões ambientais se tornaram uma temática muito abordada em todo o mundo. Há-se o desejo de crescer, ao mesmo tempo, a preocupação com as gerações futuras. Nesse contexto, soluções para mitigar os impactos ambientais estão cada vez mais sendo buscadas através de pesquisas. A extração de agregados para produção do concreto e a inadequada destinação de resíduos da construção civil tem trazido vários prejuízos ao meio ambiente. Dessa forma, nessa pesquisa buscou-se analisar os efeitos da incorporação de dois resíduos da construção civil, o pó de pedra de britagem e o agregado reciclado de concreto, sobre as características do concreto, com ênfase sobre as implicações da adição deste em suas propriedades mecânicas. O pó de pedra foi coletado em uma britadeira no município de Encanto – RN, enquanto o agregado reciclado de concreto foi produzido por meio do fracionamento de corpos de prova moldados em laboratório. A dosagem foi feita com base no método da ABCP/ACI, e para isso houve a caracterização dos agregados utilizados, incluindo os resíduos. Os concretos foram dosados para uma resistência característica de 25 MPa e foram feitos 5 traços: o referencial, contendo somente agregados naturais, um com 10% de pó de pedra em substituição ao agregado miúdo, e os outros três, com a porcentagem fixa de 10% de pó de pedra em substituição à areia, e 5%, 10% e 15% de agregado reciclado de concreto, em substituição ao agregado graúdo. Com base no resultado de absorção do agregado reciclado, optou-se por molha-lo antes de adicioná-lo à mistura. Para o controle tecnológico do concreto, foram realizados os ensaios de massa específica fresca, consistência, absorção à 28 dias e resistência à compressão com 7, 21 e 28 dias. Verificou-se que todos os traços apresentaram resistência superior à desejada, com exceção o traço com utilização de 10% de pó de pedra e 15% de agregado reciclado, o qual o resultado foi inconclusivo. Portanto, as adições dos resíduos nos concretos, mostraram-se opções muito eficientes na substituição dos agregados naturais.

Palavras-chave: Impactos ambientais. Resíduos da construção civil. Controle tecnológico do concreto. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Environmental issues have become a hot topic around the world. There is the desire to grow, at the same time, the concern with future generations. In this context, solutions to mitigate environmental impacts are increasingly being sought through research. The extraction of aggregates for concrete production and the inadequate disposal of construction waste has brought several damages to the environment. Thus, this research aimed to analyze the effects of the incorporation of two construction residues, crushing stone dust and recycled concrete aggregate, on the characteristics of concrete, with emphasis on the implications of the addition of this on their properties. mechanical. The stone dust was collected in a crusher in Encanto - RN, while the recycled concrete aggregate was produced by fractioning laboratory molded specimens. The dosage was made based on the ABCP / ACI method, and for this there was the characterization of the aggregates used, including the residues. The concretes were dosed to a characteristic strength of 25 MPa and 5 strokes were made: the reference, containing only natural aggregates, one with 10% stone dust as a substitute for fine aggregate, and the other three, with a fixed percentage of 10 % stone dust to replace sand, and 5%, 10% and 15% recycled concrete aggregate to replace coarse aggregate. Based on the absorption result of the recycled aggregate, it was decided to wet it before adding it to the mixture. For the technological control of the concrete, the tests of fresh specific mass, consistency, absorption at 28 days and compressive strength at 7, 21 and 28 days were performed. All traits were found to have higher than desired resistance, with the exception of 10% stone dust and 15% recycled aggregate, which was inconclusive. Therefore, the addition of residues in concretes proved to be very efficient options in replacing natural aggregates.

Keywords: Environmental impacts. Construction wastes. Technological control of concrete. Compressive strength.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Massa específica do agregado miúdo	31
Equação 2 – Massa unitária agregados.....	32
Equação 3 – Massa específica do agregado graúdo seco	34
Equação 4 – Massa específica do agregado graúdo na condição saturado superfície seca ...	34
Equação 5 – Absorção do agregado graúdo	34
Equação 6 – Massa específica fresca do concreto	37
Equação 7 – Resistência a compressão axial.....	38
Equação 8 – Desvio padrão do ensaio de resistência	39
Equação 9 – Coeficiente de variação do ensaio de resistência.....	39
Equação 10 – Absorção do concreto	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia experimental da primeira etapa da pesquisa	27
Figura 2 – Metodologia experimental da segunda etapa da pesquisa.....	28
Figura 3 – Agregados miúdos utilizados: (1) Areia natural e (2) Pó de pedra	29
Figura 4 – Agregados graúdos utilizados: (1) Brita e (2) Agregado reciclado de concreto ...	29
Figura 5 – Quarteamento: (1) Amostra de brita revolvida; (2) Divisão em quatro partes iguais e (3) Eliminação de duas porções em sentido diagonal.....	30
Figura 6 – Massa específica por meio do frasco de Chapman: (1) Amostra de 500 gramas; (2) Frasco contendo água (200 ml) e agregado miúdo e (3) faz-se a leitura.....	31
Figura 7 – Ensaio de granulometria com a brita	33
Figura 8 – Ensaio de massa específica e absorção: (1) lavagem do material na peneira 4,75 mm; (2) Amostras submersas e (3) Amostra saturada superfície seca	34
Figura 9 – Ensaio de abatimento com tronco de cone: (1) Equipamento montado com pés sobre as aletas; (2) Amostra assentada ao lado do molde e (3) Determinação das medidas de diferença de altura.....	36
Figura 10 – Determinação da massa específica do concreto fresco	37
Figura 11 – Moldagem e cura dos corpos de prova: (1) Preparo do traço; (2) Corpos de prova moldados (3) Cura	38
Figura 12 – Ensaio de resistência a compressão.....	38
Figura 13 – Etapas de dosagem pelo método da ABCP/ACI.....	41
Figura 14 – Curva granulométrica da areia	44
Figura 15 – Curva granulométrica do pó de pedra	45
Figura 16 – Curva granulométrica da brita.....	46
Figura 17 – Curva granulométrica do ARC de concreto	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistência à compressão do concreto REF	52
Gráfico 2 – Resistência à compressão do concreto P10	53
Gráfico 3 – Resistência à compressão do concreto P10R5	54
Gráfico 4 – Resistência à compressão do concreto P10R10	55
Gráfico 5 – Resistência à compressão do concreto P10R15	56
Gráfico 6 – Comparativo da resistência à compressão entre os traços nas idades de 7, 21 e 28 dias.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cimento Portland, designação, sigla e classes.....	20
Quadro 2 – Coeficientes d_2	39
Quadro 3 – Nível de eficiência do ensaio.....	39
Quadro 4 – Traços	42
Quadro 5 – Quantidade de corpos de prova moldados e ensaios do estado endurecido	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do traço em massa.....	48
Tabela 2 – Massa específica dos concretos	49
Tabela 3 – Consistência dos concretos	49
Tabela 4 – Absorção para os diferentes traços	50
Tabela 5 – Resistência à compressão do concreto REF	51
Tabela 6 – Resistência à compressão do concreto P10	52
Tabela 7 – Resistência à compressão do concreto P10R5.....	53
Tabela 8 – Resistência à compressão do concreto P10R10.....	54
Tabela 9 – Resistência à compressão do concreto P10R15.....	55
Tabela 10 – Percentual de resistência à compressão dos traços ao longo das idades.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Bel	Bacharel
D _{máx}	Diâmetro máximo característico
Dr	Doutor
et al	e outros
etc	e o resto
f _{ck}	Resistência característica do concreto
Me	Mestre
MF	Módulo de Finura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RN	Rio Grande do Norte

LISTA DE SÍMBOLOS

&	E
%	Porcentagem
dm ³	Decâmetro cúbico
Cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
CP	Corpo de prova
G	Grama
Kg	Quilograma
M	Metro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
n°	Número
µm	Micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	CONCRETO.....	19
3.1.1	Materiais constituintes	19
3.1.1.1	Aglomerante	19
3.1.1.2	Agregados	20
3.1.1.3	Aditivos e adições.....	22
3.2	PÓ DE PEDRA.....	23
3.2.1	Pesquisas com pó de pedra como substituto da areia – Efeitos sobre a resistência à compressão	24
3.3	AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETOS	25
3.3.1	Pesquisas com o ARC como substituto da brita – Efeitos sobre a resistência à compressão	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	MATERIAIS	28
4.1.1	Cimento	28
4.1.2	Agregados.....	29
3.1.3.3	Agregado miúdo natural e pó de pedra.....	29
3.1.3.3	Agregado graúdo natural e RCD de concreto.....	29
4.2	MÉTODOS	30
4.2.1	Ensaio de caracterização agregados	30
4.2.1.1	Agregado miúdo natural e pó de pedra.....	30
4.2.1.2	Agregado graúdo natural e agregado reciclado de concreto.....	32
4.2.2	Controle tecnológico do concreto	35
4.2.2.1	Controle tecnológico do concreto no estado fresco.....	35
4.2.2.2	Controle tecnológico do concreto no estado endurecido.....	37
4.2.3	Dosagem.....	40
4.2.3.1	Primeira etapa	41
4.2.3.2	Segunda etapa	41

4.2.4	Produção dos concretos.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	44
5.1.1	Agregados miúdos	44
5.1.1.1	Granulometria.....	44
5.1.1.2	Massa específica e massa unitária	45
5.1.2	Agregados graúdos	46
5.1.2.1	Granulometria.....	46
5.1.2.2	Massa específica, massa unitária e absorção	47
5.2	OBTENÇÃO DO TRAÇO	48
5.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	48
5.3.1	Massa específica fresca.....	48
5.3.2	Consistência.....	49
5.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	50
5.3.1	Absorção	50
5.3.2	Resistência à compressão	51
5.3.2.1	Traço REF	51
5.3.2.2	Traço P10.....	52
5.3.2.3	Traço P10R5.....	53
5.3.2.4	Traço P10R10	54
5.3.2.5	Traço P10R15	55
5.3.2.6	Comparativo entre os traços	56
6	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DA PRIMEIRA ETAPA	65
	APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO DA PRIMEIRA ETAPA	66

1 INTRODUÇÃO

A construção civil, devido as diversas atividades a ela ligada, é uma das grandes responsáveis pelos impactos negativos que acometem o meio ambiente. Um dos principais materiais usados no setor, em virtude principalmente da sua versatilidade, custo benefício e propriedades, é o concreto. O concreto é o segundo material mais usado no mundo, sendo seu consumo só superado por o da água (GARCÍA, 2017).

A produção de concreto está diretamente relacionada a extração de recursos naturais, e os impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva, do mesmo, são inumeráveis. As pedreiras, por exemplo, degradam áreas, poluem as fontes de ar e água e geram deslizamentos de terra (THOMAS *et al.*, 2018). Nesse sentido, produção de cimento no mundo gera de 600 a 700 kg de dióxido de carbono por tonelada, isso equivale a 5% das emissões de CO₂ (CEMBUREAU, 2014).

Outro problema ambiental causado pela construção civil, e pelo uso do concreto, é a geração de resíduos. Cabe destacar o resíduo de construção e demolição (RCD) e o resíduo proveniente do processo de britagem, o pó de pedra. Esses resíduos são gerados em grandes quantidades, e sua disposição é, na maioria das vezes, feita de forma inadequada, além de que pode se despendar muito dinheiro para acondicioná-los (SCHANKOSKI, 2017; FLOREA & BROUWERS, 2012, apud VERIAN *et al.*, 2018).

Deste modo, a extração acentuada dos recursos naturais e a incorreta disposição dos resíduos provenientes da cadeia produtiva do concreto, tem levado pesquisadores a realizar estudos sobre a incorporação desses resíduos na própria matriz do concreto, em substituição total ou parcial, dos seus constituintes. São exemplos a incorporação do agregado reciclado de concreto, em substituição ao agregado graúdo, e também do pó de pedra em substituição do agregado miúdo.

Todavia, há de se haver um controle sobre a utilização desses materiais. Em se tratando de RCD, no Brasil, a resolução nº 307 do Conama (2002) estabelece que, para fins de uso como agregado, só podem ser utilizados resíduos da Classe A, no qual encontram-se classificados os rejeitos de construção, demolição, reformas e reparos, tais como, componentes cerâmicos, argamassa e concreto entre outros. Com relação ao uso do pó de pedra, não existe graves restrições, há de se atentar principalmente, no teor de materiais pulverulentos, além de assegurar que o material seja inerte e livre de impurezas.

Por existir algumas diferenças entre metodologias adotadas entre os estudiosos, ainda não se foi possível afirmar, com exatidão, as consequências da inclusão desses resíduos na

composição do concreto. De certo, em relação a questão ambiental, a admissão em larga escala desses componentes no concreto seria de grande importância. Mas, e quanto a influência deles nas propriedades desse compósito? Alguns dos principais estudos mostram que, a porcentagem introduzida desses resíduos, tem relação direta quanto as características apresentadas no concreto, tanto no estado fresco, quanto no endurecido. Porém, ainda não há concordância entre as pesquisas, no que se refere as quantidades substituídas e o seu respectivo efeito nas propriedades.

Assim sendo, é de suma importância trabalhos nessa área, sobretudo, com relação a propriedades tão importantes, como se faz a resistência mecânica, visando um maior conhecimento, a aceitação e confiabilidade, o que pode acarretar em um futuro próximo, um uso mais elevado e mais diversificado desses resíduos como constituintes do concreto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência da incorporação do agregado reciclado de concreto (ARC) e do pó de pedra, respectivamente, em substituição de porcentagens do agregado natural graúdo e do miúdo, nas propriedades do concreto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física dos materiais empregados;
- Dosar e produzir diferentes traços de concreto para uma resistência característica (f_{ck}) de 25 MPa;
- Avaliar a influência dos resíduos utilizados nas propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCRETO

Estima-se que o consumo de concreto no mundo seja de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano. O concreto é um compósito formado pela mistura entre agregados, gráúdo e miúdo, cimento e água, podendo ser acrescido em sua composição adições e aditivos (METHA & MONTEIRO, 2014). O mesmo se apresenta basicamente em dois estados, o fresco e o endurecido. O estado fresco corresponde a fase de mistura a manuseio, e tem duração prevista de 1 a 5 horas, já o estado endurecido compreende o período desde o início da hidratação e perdura por toda a existência do concreto (NOGUEIRA, 2015).

As propriedades vistas como mais importantes do concreto são as de longo prazo, notadamente a resistência, a durabilidade, a impermeabilidade e a estabilidade de volume. Todavia, faz-se importante, um controle de qualidade sob as propriedades do concreto fresco, como a trabalhabilidade, uma vez que as mesmas afetam diretamente as características do concreto endurecido (NEVILLE & BROOKS, 2013).

A resistência, no concreto, é entendida como a tensão máxima que uma amostra de concreto pode suportar. A depender de como a tensão atua sobre o elemento, ela pode comprimi-lo, traciona-lo, flexiona-lo, torce-lo ou cisalha-lo. Devido à microestrutura do concreto, a resistência à compressão é geralmente maior do que os outros tipos de resistência (METHA & MONTEIRO, 2014).

Dessa forma, o concreto, por estrutura heterogênea, é influenciado pela característica individual de cada constituinte, bem como, da relação entre eles na mistura, fazendo-se necessário o conhecimento de cada componente (NOGUEIRA, 2015). Nesse sentido, como auxílio no controle das propriedades desejadas do concreto, é preciso também o conhecimento sobre a microestrutura do mesmo (METHA & MONTEIRO, 2014).

3.1.1 Materiais constituintes

3.1.1.1 Aglomerante

O cimento é um dos principais constituintes do concreto. Sua capacidade de endurecer após o contato com água, cimento hidráulico, aliado à sua qualidade, no estado endurecido, de não sofrer alterações químicas em contato com água ao longo do tempo, foram primordiais para

a difusão do concreto como material de construção (NEVILLE & BROOKS, 2013). Foram produzidos 57 milhões de toneladas de cimento em 2016 no Brasil (SNIC, 2019).

O Cimento Portland, usado atualmente, é uma mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais de contenham óxido de ferro (NEVILLE & BROOKS, 2013). Os tipos de Cimento Portland, com sua designação normalizada, sigla e classe, estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Cimento Portland: Designação, sigla e classes.

Designação normalizada do (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 OU 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Com adição	CP I - S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto-forno	CP II - E		
	Com material carbonático	CP II - F		
	Com material pozzolânico	CP II - Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozzolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 OU 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	-	

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originária.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 Mpa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: ABNT NBR 16697, 2018.

3.1.1.2 Agregados

“Agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de mistura de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos” (BAUER, 2008, p.63).

No concreto, os agregados ocupam cerca de 75% do volume. Um maior teor de agregados no concreto, torna-o mais barato, visto que, o cimento é mais caro. Mas, acrescentar agregados na pasta vai além da questão financeira, pois, este pode influenciar positivamente ou negativamente nas principais características do concreto (NEVILLE & BROOKS, 2013).

A porosidade, a granulometria, a absorção de água, a resistência à compressão e a presença de substâncias deletérias, são algumas propriedades dos agregados que mais influem sobre a composição do concreto (METHA & MONTEIRO, 2014).

O elevado percentual na composição do concreto, junto ao seu uso em outras aplicações, fez com que a demanda por agregados no Brasil, chega-se a ser de 740 milhões de toneladas em 2014, possuindo uma projeção para 2019 de 543 milhões toneladas (ANEPAC, 2014).

Os agregados naturais são conformados pelo processo de intemperismo ou por britagem, as suas principais propriedades estão relacionadas as propriedades da rocha-mãe. Quanto a classificação, os agregados podem ser categorizados de acordo com o tipo de rocha origem, textura, forma, massa específica, entre outros (NEVILLE & BROOKS, 2013).

Uma forma usual de classificar os agregados é quanto a dimensão das partículas, dessa forma, utiliza-se o termo agregado graúdo para caracterizar partículas maiores que 4,75 mm e menores que 50 mm, e agregado miúdo, para partículas menores que 4,75 mm e maiores que 0,75 mm (METHA & MONTEIRO, 2014).

➤ Agregado graúdo

O agregado graúdo geralmente utilizado como material de construção é a brita, o mesmo pode ser entendida como um produto de cominuição de rocha, cuja forma dos grãos decorre da natureza da rocha, e em caso de agregados industrializados, do tipo de britador (BAUER, 2008).

A ABNT NBR 7211 (2009) classifica o agregado graúdo de acordo com sua granulometria em cinco faixas, que também são usadas como parâmetro comercial:

- Brita 0: 4,75 mm / 12,5 mm;
- Brita 1: 9,5 mm / 25 mm;
- Brita 2: 19 mm / 31,5 mm;
- Brita 3: 25mm / 50 mm
- Brita 4: 37,5 mm/ 75 mm

➤ Agregado miúdo

O agregado miúdo usado comumente como material de construção é a areia, a mesma é um sedimento elástico inconsolidado, de grãos geralmente quartozos, geralmente extraída dos

leitos de rios ou de cavas, cujo limite granulométrico pode ser entendido, como o compreendido entre 0,15 mm / 4,8 mm, apesar de não haver muito consenso nessa questão (BAUER, 2008).

A ABNT NBR 7211 (2009) classifica o agregado miúdo de acordo com seu módulo de finura (MF) (soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100) em:

- MF da zona utilizável inferior (1,55 - 2,90);
- MF da zona ótima (2,20 - 2,90);
- MF da zona utilizável superior (2,90 – 3,50);

Para Bauer (2008), os agregados miúdos (areias) podem ser classificados em faixa granulométrica como:

- Fina: 0,15 mm / 0,6 mm
- Média: 0,6 mm / 2,4 mm
- Grossa: 2,4 mm / 4,8 mm

A areia influencia nas propriedades do concreto fresco, restando parte água de amassamento, através da formação de capilares nos vazios dos grãos, e em sendo, a distribuição granulométrica dos grãos continua, a mesma diminui o consumo de água, mantendo a mesma trabalhabilidade. Já no estado endurecido, a mesma atua atenuando as tensões de endurecimento da fração ativa, e em sendo a distribuição granulométrica dos grãos continua, diminui a porosidade e aumenta a resistência mecânica (CARNEIRO & CINCOTTO, 1999).

3.1.1.3 Aditivos e adições

Aditivo/adição é qualquer elemento diferente de cimento hidráulico, agregado ou água, que seja inserido no concreto antes ou durante a mistura do concreto (ASTM C 125, apud METHA & MONTEIRO, 2014). No Brasil, entende-se por adição, o elemento mineral em forma de pó, adicionado ao cimento ou ao concreto para melhorar algumas das suas características (NEVILLE & BROOKS, 2013). E por aditivo, um produto, geralmente químico, adicionado durante o processo de preparação do concreto, para melhorar alguma de suas características, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no mesmo (ABNT NBR 11768, 2011).

As principais adições utilizadas são o fíler (material carbonático), a escória de alto forno e a pozolana, esses ingredientes, por seus atributos, estão na composição de alguns dos Cimentos Portland, como pode ser visualizado no Quadro 1. No tocante aos aditivos, há uma

grande variedade dos mesmos no mercado, alguns dos principais são, redutor de água / plastificante, superplastificante, incorporador de ar, o acelerador/retardador de pega, acelerador de resistência, entre outros (ABNT NBR 11768, 2011).

3.2 PÓ DE PEDRA

Nas pedreiras, o processo de britagem fornece produtos com aplicação nobre, os agregados graúdos usados na construção civil, e como subproduto gera o pó de pedra, que acabam estocados em pilhas nas áreas das pedreiras (ALMEIDA & SILVA, 2005, apud CAMPOS, 2015);

O pó de pedra é um material com graduação genérica de 0 a 4,8 mm (BAUER, 2008). Eles representam um percentual de 15 a 20% do total de material decorrente da britagem, e também é conhecido como areia artificial, areia de britagem, finos de pedreira, finos de britagem, finos de pedra britada e etc (DUARTE, 2013). A indústria tem dificuldade para armazenar esse resíduo, e boa parte são dispostos em aterros sanitários, aterros de resíduos não controlados ou em área abertas. Causando assim, vários problemas ambientais, como a poluição, devido a sua natureza fina (SCHANKOSKI, 2017).

Em razão da forma que é alcançado, a distribuição granulométrica do pó de pedra é bem homogênea e praticamente isenta de impurezas (DUARTE, 2013). Além disso, o pó de pedra, apresentam grande quantidade de material pulverulento, dimensão inferior a 0,075 mm, que dentro dos limites aceitáveis conferem ao concreto uma maior trabalhabilidade, preenchendo os vazios da pasta, ao passo que, quando em quantidade demasiada, torna-se prejudicial ao concreto, requerendo mais água para manter a mesma trabalhabilidade (CABRAL, 2007, apud DUARTE, 2013).

Dessa forma, a ABNT NBR 7211 (2009) estabelece como valores aceitáveis para teor máximo de materiais pulverulentos, uma quantidade de 3%, em relação a massa do agregado miúdo, para concretos submetidos a desgaste superficial, e de 5% para concretos protegidos a desgaste superficial.

No tocante a forma dos grãos, o grau de esfericidade da areia natural é maior do que o da areia britada, logo o uso do pó de pedra tende a deixar o concreto menos trabalhável (SILVA *et al*, 2005). Nesse sentido, dentre as rochas de origem, as areias artificiais que deixam o concreto menos áspero e mais trabalhável são as provenientes de granitos e pedras que contenham boa proporção de sílica (PETRUCCI, 1998).

Em relação a viabilidade econômica, o uso do pó de pedra torna o custo final do serviço bem mais barato, desde que, garantido que a presença de materiais pulverulentos esteja dentro dos padrões recomendados e que o agregado é inerte e isento de impurezas, o pó de pedra chega em obra pronto para uso, não havendo, por tanto, necessidade de peneiramento e separação de grãos de tamanhos indesejados (BASTOS, 2005, apud TEODORO, 2013).

3.2.1 Pesquisas com o pó de pedra como substituto da areia – Efeitos sobre a resistência à compressão

Menossi *et al.* (2010), avaliou a substituição da areia natural no concreto por porcentagens de 25, 50, 75, 100% de pó de pedra. O resultado obtido foi que a resistência à compressão melhorou com o aumento do teor de pó de pedra, para uma relação a/c constante. Para o mesmo teor de pó de pedra, agora mantendo o abatimento constante, e variando a relação a/c, obteve-se que quão maior a porcentagem de pó de pedra, maior a relação a/c, além disso, obteve-se uma maior resistência à compressão para uma composição de 50% de pó de pedra.

Fabro *et al.* (2011), em um estudo sobre a influência da forma dos agregados nas propriedades do concreto, obteve que a resistência à compressão em argamassas e em concretos, confeccionados com pó de pedra, foram ligeiramente superiores ao da argamassa e do concreto com areia natural. Nesse estudo os teores de pó de pedra basáltica acrescentados aos traços foram de 30% e 70%, e a superioridade das resistências dos concretos com pó-de-pedra foram atribuídas ao maior fechamento dos poros proporcionado pelo material pulverulento presente no pó-de-pedra.

Duarte (2013), no entanto, realizou um estudo em que o mesmo substituiu a areia (agregado miúdo natural) pelas seguintes porcentagens de pó de pedra: 10%, 30%, 50%, 100% e 100% com aditivo, em corpos de prova cilíndricos referência de fck's de 20, 25 e 30 MPa a 28 dias e comparou com o traço controle (sem adição de pó de pedra). A composição com 10% de pó de pedra foi o que apresentou resultados mais parecidos, em termos de resistência à compressão, com o traço de controle, inclusive o superando no traço moldado com fck = 30 MPa. De forma geral, observou-se que, o aumento do teor de pó de pedra piorou as características físicas e mecânicas estudadas no concreto, porém todas as composições, com exceção da com 100% de pó de pedra para fck = 20 MPa, comprovaram viabilidade técnica para a produção com fins estruturais.

3.3 AGREGADOS RECICLADO DE CONCRETO

Entende-se como resíduos da construção civil, os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. E são exemplos materiais, tais como, tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, entre outros (ABNT NBR 15114, 2004).

Estima-se que sejam gerados cerca de 850 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição por ano na Europa, o que representam 31% da geração total de resíduos (MARINKOVIC *et al*, 2010). No Brasil os RCD's correspondem a 60% dos resíduos sólidos produzidos nas cidades (PINTO, 2011).

Os resíduos que podem ser reciclados e aproveitados como agregados são os pertencentes a Classe A (Resolução nº 307 do Conama), provenientes de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação (e de outras obras de infraestrutura), edificações e fabricação/demolição de pré-moldados. Componentes cerâmicos, argamassas e concretos, são exemplos de elementos que podem reaproveitados para esse uso (CONAMA, 2002).

Os agregados reciclados de concreto são agregados obtidos por esmagamento resíduos de concreto vindo de locais de demolição, de pré-moldados rejeitados, de amostras de laboratório e etc. Entre os principais fatores que determinam as características do ARC, pode-se citar, as características do concreto original, o processo de reciclagem e a fração de tamanho de agregados (THOMAS *et al*, 2018).

Os agregados de concreto normalmente apresentam menor massa específica, maior desagregação e maior absorção que o agregado natural, isso acontece devido a presença da pasta de argamassa aderida. Devido a maior absorção, aumenta-se a demanda de água, que pode ser ajustada aumentando a relação a/c na mistura, usando aditivos redutores de água ou ainda fazendo a pré-imersão do ARC em água antes de realizar a mistura (MCGINNIS *et al*, 2017)

A porosidade e a fragmentação são principais diferenças entre o agregado natural e o reciclado de concreto. Entretanto, os agregados reciclados de concreto, de boa qualidade, usado em porcentagem apropriada, são considerados um bom substituto para os agregados natural na produção de concreto (THOMAS *et al*, 2018).

3.3.1 Pesquisas com o ARC como substituto da brita – Efeitos sobre a resistência à compressão

Safiuddin *et al.* (2011) estudou os efeitos sobre algumas propriedades do concreto quando realizada a substituição do agregado graúdo natural por ARC com porcentagens de 30, 50, 70 e 100%. Entre outros resultados, obteve que não ocorreu mudanças significativas, quanto a resistência à compressão, entre os traços com utilização do ARC e o traço referência feito apenas com agregado graúdo natural. No entanto, foi constatado que com o aumento no teor de ARC, aumenta-se também os espaços vazios permeáveis do concreto, e esse aumento é creditado maior porosidade do agregado reciclado de concreto.

Thomas *et al* (2013), incorporou porcentagens de 20, 50 e 100% de ARC em substituição ao agregado graúdo natural, para concretos de classe 25 MPa e 50 MPa com diferentes fatores de relação a/c. O resultado obtido mostra que com 20% de ARC a 28 dias a resistência a compressão não muda significativamente em relação ao concreto sem adição de ARC, porém, para a substituição 100%, houve perda significativa.

McGinnis *et al.* (2017) obteve em seu estudo que a resistência a compressão decresce com a adição de ARC, 16,6% com 50% e 26,4% com 100%. Thomas *et al.* (2018), obteve que a redução da resistência à compressão para uma um percentual de substituição de agregado graúdo natural por 25% de ARC é mínima, mas que para um percentual de 100% observou-se uma redução de 19% da resistência à compressão.

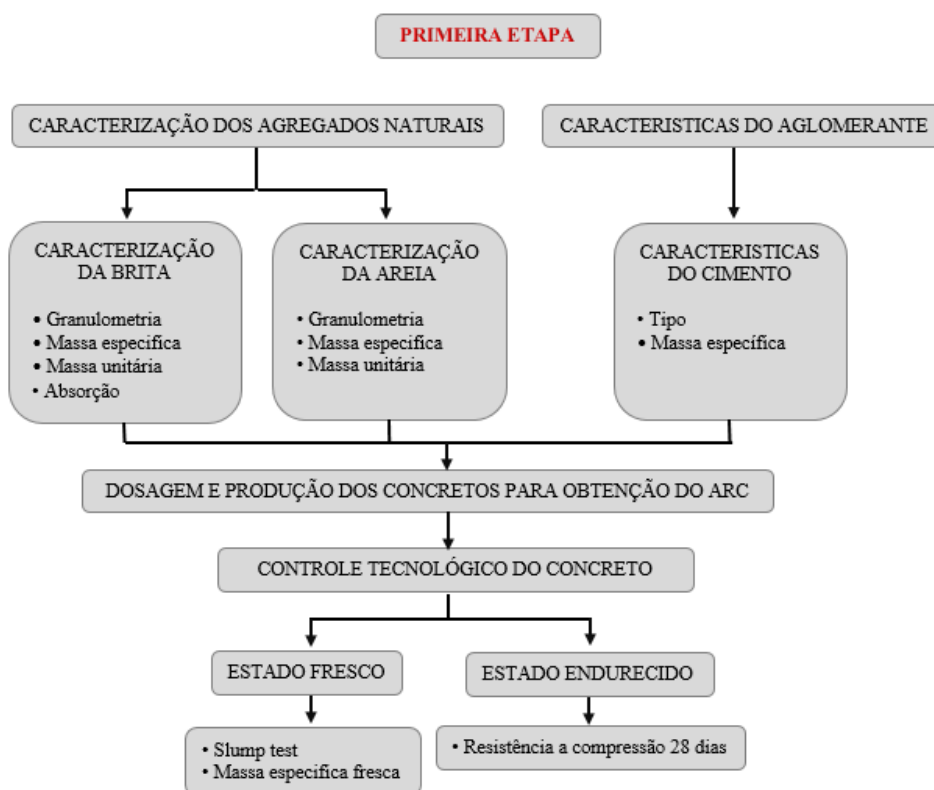
4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de pesquisa está dividida em duas etapas. A primeira é relativa ao agregado reciclado de concreto, pelo qual, foi optado por obtê-lo pelo processo de fragmentação de corpos de prova moldados em laboratório. A escolha pela produção do próprio ARC deu-se por não existir nenhuma usina de reciclagem desse resíduo na região, assim como, pelo desejo de um maior controle sobre a qualidade do mesmo.

A fim da produção desses corpos de prova, foram realizados os ensaios de caracterização, padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através das NBRs (Normas Brasileiras), com os materiais constituintes do concreto. A caracterização foi feita no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), e concluída, procedeu-se o cálculo do traço e posterior produção do concreto.

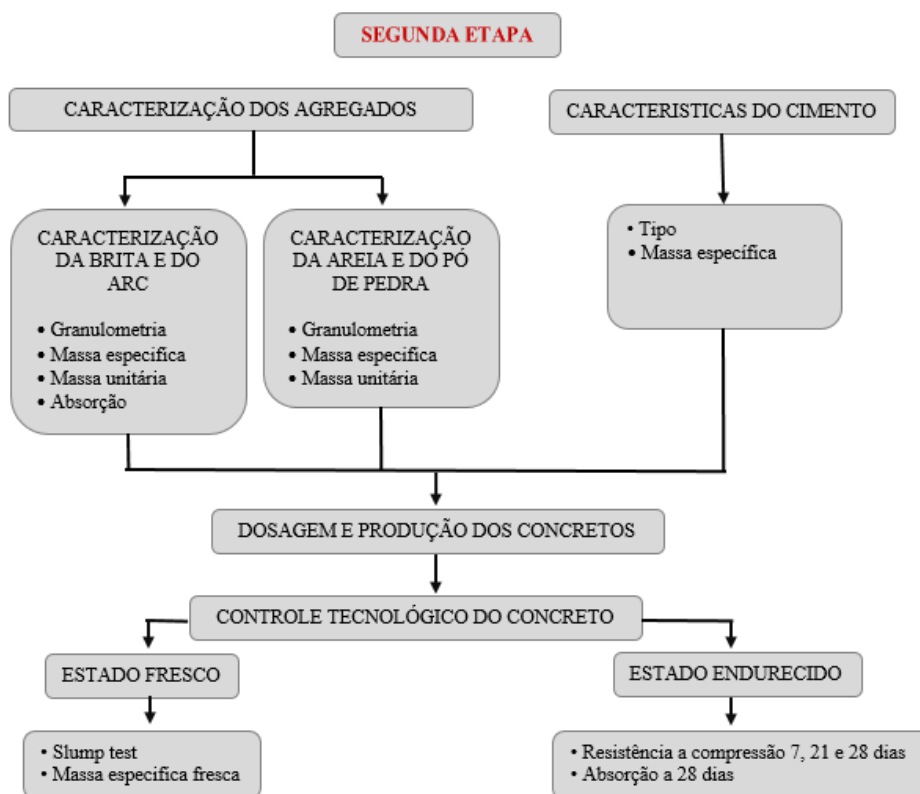
O concreto foi produzido manualmente, e em seguida ocorreu a moldagem de corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O total de corpos de prova moldados foi calculado para corresponder a um volume suficiente de ARC necessário para o estudo. Na Figura 1 são mostradas as fases da primeira etapa.

Figura 1 – Metodologia experimental da primeira etapa da pesquisa



A segunda etapa consistiu na caracterização de todos os materiais e dos concretos escopos da pesquisa, e foi realizada, logo após a fragmentação dos concretos da fase anterior. Na Figura 2 são mostradas as fases da segunda etapa.

Figura 2 – Metodologia experimental da segunda etapa da pesquisa



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento

O cimento usado em ambas as etapas foi o CP II-32-E RS, da marca Mizu. A escolha deu-se por ser um cimento muito usado na região. Com massa específica considerada de 3,10 g/cm³, obtida por Campos (2007), para um cimento de composição semelhante.

4.1.2 Agregados

4.1.2.1 Agregado miúdo natural e o pó de pedra

O agregado miúdo natural utilizado é uma areia de origem natural, obtida de uma obra na cidade de Pau dos Ferros – RN. O resíduo de pó de pedra foi obtido em uma pedreira no Município de Encanto – RN. Os dois materiais são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Agregados miúdos utilizados: (1) Areia natural e (2) pó de pedra.



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.1.2.2 Agregado graúdo natural e o agregado reciclado de concreto.

O agregado graúdo natural utilizado foi obtido de uma obra na cidade de Pau dos Ferros – RN. O ARC, como já mencionado, foi produzido em laboratório, e os corpos de prova foram fragmentados um a um com o auxílio de uma marreta. Os dois materiais são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Agregados graúdos utilizados: (1) Brita e (2) ARC de concreto.



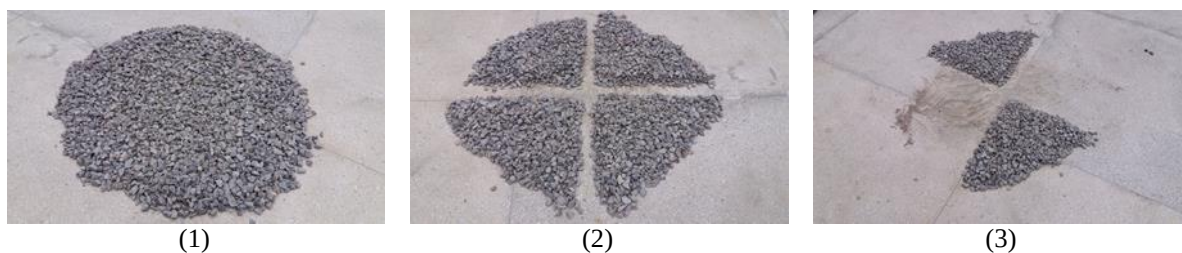
Fonte: Autoria própria, 2019.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Ensaios de caracterização dos agregados

As amostras dos agregados foram escolhidas por quarteamento, seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR NM 27 (2001) como é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Quarteamento: (1) Amostra de brita revolvida; (2) Divisão em quatro partes iguais e (3) eliminação de duas porções em sentido diagonal.



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.2.1.1 Agregado miúdo natural e o pó de pedra

Os ensaios realizados para caracterização desses materiais e suas respectivas normas, estão listados abaixo:

- **Granulometria** - ABNT NBR NM 248:2003: Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- **Massa específica** – ABNT NBR 9776:1987 Versão Corrigida: 1988 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio;
- **Massa unitária** - ABNT NBR NM 45:2006 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios;

➤ Granulometria

O ensaio foi realizado com duas amostras, de massa superior à de 0,3 kg e passantes na peneira 4,8 mm (agregado miúdo), seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 248 (2003). Com resultado obtido pela média dos valores e amostras não diferindo, entre si, acima dos

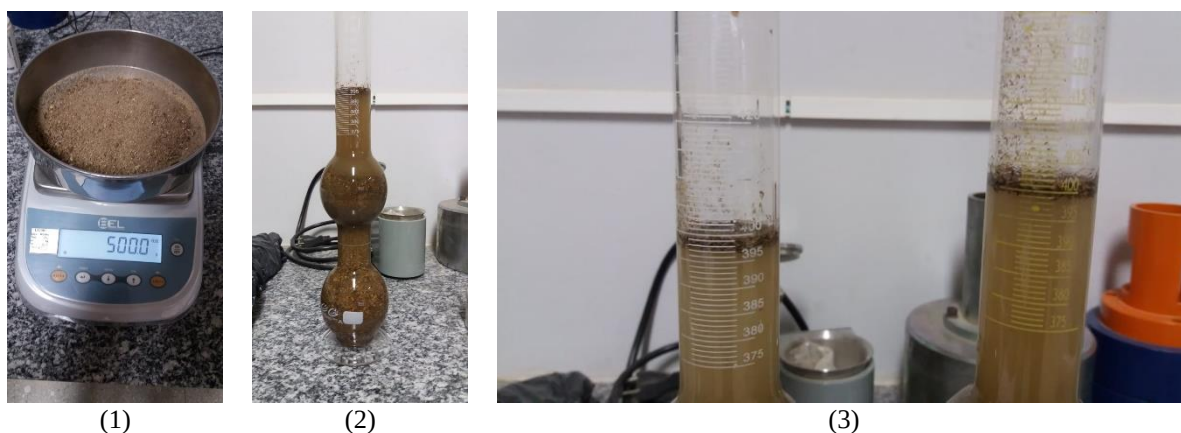
valores constantes na norma. O propósito foi obter o $D_{máx}$ e o módulo de finura (MF). Por fim, elaborar a curva granulométrica, a partir da determinação das porcentagens retidas nas peneiras.

➤ Massa específica

Entende-se com massa específica a relação entre a massa do agregado seco em estufa até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis (ABNT NBR 9776, 1988).

Foi realizado um ensaio de duas amostras seguindo os procedimentos da ABNT NBR 9776 (1988). A Figura 6 ilustra algumas etapas da prática.

Figura 6 – Massa específica por meio do frasco de Chapman: (1) Amostra de 500 gramas; (2) Frasco contendo água (200 ml) e agregado miúdo e (3) faz-se a leitura.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O resultado foi obtido pela média das determinações, com resultados individuais não diferindo mais de $0,05 \text{ g/cm}^3$. A massa específica foi calculada através da Equação 1:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (1)$$

Onde: γ é massa específica real (g/cm^3), 500 é a massa da amostra (g), 200 é o volume inicial de água que deve ser inserido no frasco (cm^3) e o L é o valor da leitura após inserido amostra no frasco.

➤ Massa unitária

Massa unitária de um agregado é a relação entre sua massa e seu volume sem compactar, considerando-se também os vazios entre os grãos (ABNT NBR NM 45, 2006).

Foram utilizadas três amostras, seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 45 (2006). Usando o Método C (massa unitária solta) da norma e com resultado calculado por intermédio da Equação 2. A massa unitária foi obtida pela média das três determinações, com resultados individuais não apresentando desvios maiores que 1% e relação à média.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde: ρ_{ap} é massa unitária (kg/dm³), V o volume do recipiente (10 dm³) e m é a massa da amostra que preencheu o recipiente (kg).

4.2.1.2 Agregado graúdo natural e o agregado reciclado de concreto

Os ensaios que foram realizados para caracterização desses materiais e suas respectivas normas, estão listados abaixo:

- **Granulometria** - ABNT NBR NM 248:2003: Agregados - Determinação da composição granulométrica;
- **Massa específica e Absorção** – ABNT NBR NM 53:2009: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- **Massa unitária** - ABNT NBR NM 45:2006 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios;

➤ Granulometria

O ensaio foi realizado com duas amostras, com massa superior a 5 kg (D_{máx} = 19mm), seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 248 (2003). A Figura 7 apresenta a brita sendo peneirada na peneira 6,3 mm.

Figura 7 – Ensaio de granulometria com a brita.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O resultado foi obtido pela média dos valores, com amostras não diferindo, entre si, acima dos valores constantes na norma. O propósito foi obter o $D_{m\acute{a}x}$ e o m3dulo de finura (MF). Por fim, elaborar a curva granulom3trica, a partir da determina33o das porcentagens retidas nas peneiras.

➤ Massa espec3fica, massa espec3fica aparente e Absor33o

Massa espec3fica 3 a rela33o entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros perme3veis 3 3gua. Massa espec3fica aparente 3 a rela33o entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros perme3veis 3 3gua. Absor33o 3 o aumento de massa do agregado devido ao preenchimento de seus poros perme3veis por 3gua (ABNT NBR NM 53, 2009).

Realizou-se o ensaio de duas amostras, com massa superior a 3 kg ($D_{m\acute{a}x} = 19mm$), seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 53 (2009). A Figura 8 ilustra algumas etapas da pr3tica.

Figura 8 – Ensaio de massa específica, massa específica aparente e absorção: (1) Lavagem do material na peneira 4,75 mm; (2) Amostras submersas e (3) Amostra saturada superfície seca.



(1)



(2)



(3)

Fonte: Autoria própria, 2019.

Resultado obtido pela média das duas determinações, que foram calculadas individualmente pela Equação 3, para massa específica do agregado seco, Equação 4, massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, e Equação 5, absorção. A diferença entre dois resultados individuais atendeu ao disposto na norma.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (3)$$

Onde: d é massa específica agregado seco (g/cm^3), m é massa da amostra seca (g) e m_a é massa da amostra submersa em água (g).

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (4)$$

Onde: d_s é massa específica agregado na condição saturado superfície seca (g/cm^3), m_s é massa da amostra saturada superfície seca (g) e m_a é massa da amostra submersa em água (g).

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (5)$$

Onde: A é absorção, m_s é massa da amostra saturada superfície seca (g) e m é massa da amostra seca(g).

➤ Massa unitária

Massa unitária compactada é a relação entre sua massa e seu volume compactado segundo um determinado processo, considerando-se também os vazios entre os grãos (ABNT NBR NM 45, 2006).

Foram utilizadas três amostras, seguindo os procedimentos da ABNT NBR NM 45 (2006). Usando o Método A (massa unitária compactada) da norma e com resultado calculado por intermédio da Equação 2. A massa unitária foi obtida pela média das três determinações, com resultados individuais não apresentando desvios maiores que 1% e relação à média.

4.2.2 Controle tecnológico do concreto

Os ensaios que foram realizados como controle tecnológico do concreto e suas respectivas normas, estão listados abaixo:

- **Determinação da consistência** - ABNT NBR NM 67:1998: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone;
- **Massa específica fresca** - ABNT NBR 9833:2008: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico;
- **Resistência à Compressão 7, 21 e 28 dias** - ABNT NBR 5738:2015 versão corrigida 2016: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova & ABNT NBR 5739:2018: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos;
- **Absorção** - ABNT NBR 9778:2005 versão corrigida 2:2009: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica;

4.2.2.1 Controle tecnológico do concreto no estado fresco

➤ Determinação da consistência

A consistência é uma medida de umidade da mistura de concreto, e, portanto, indica o quão fluido ele está. Esse parâmetro é mensurado através do ensaio de abatimento do concreto fresco, que é realizado usando um tronco de cone (METHA & MONTEIRO, 2014).

O ensaio foi realizado para todos os traços, seguindo os procedimentos da ABNT NM 67 (1998). A Figura 9 ilustra algumas etapas da prática.

Figura 9 – Ensaio de abatimento com tronco de cone: (1) Equipamento montado com pés sobre as aletas; (2) Amostra assentada ao lado do molde e (3) Determinação das medidas de diferença de altura.



Fonte: Autoria própria, 2019.

➤ Massa específica fresca

A massa específica fresca do concreto é relação entre a massa de concreto e o seu volume após adensamento, incluindo neste volume o ar eventualmente retido ou propositadamente incorporado a ele (ABNT NBR 9833, 2008).

A massa específica foi determinada seguindo os procedimentos da ABNT NBR 9833 (2008). A Figura 10 mostra o concreto fresco dentro de um recipiente de volume conhecido, sendo pesado, para determinação de sua massa específica.

Figura 10 – Determinação da massa específica do concreto fresco.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O resultado é calculado pela Equação 6.

$$P_{ap} = \frac{m_{rc} - T}{V} \times 100 \quad (6)$$

Onde: ρ_{AP} é massa aparente do concreto fresco (kg/m^3), M_{rc} é massa do concreto (kg), T é a tara do recipiente vazio (kg) e V o volume do recipiente (dm^3).

4.2.2.2 Controle tecnológico do concreto no estado endurecido

➤ Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão uniaxial é mais simples de se realizar em laboratório, e o ensaio de resistência à compressão a 28 dias é aceito globalmente como um índice geral de resistência do concreto (METHA & MONTEIRO, 2014).

Os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 5738 (2016). A Figura 11 ilustra algumas etapas do processo.

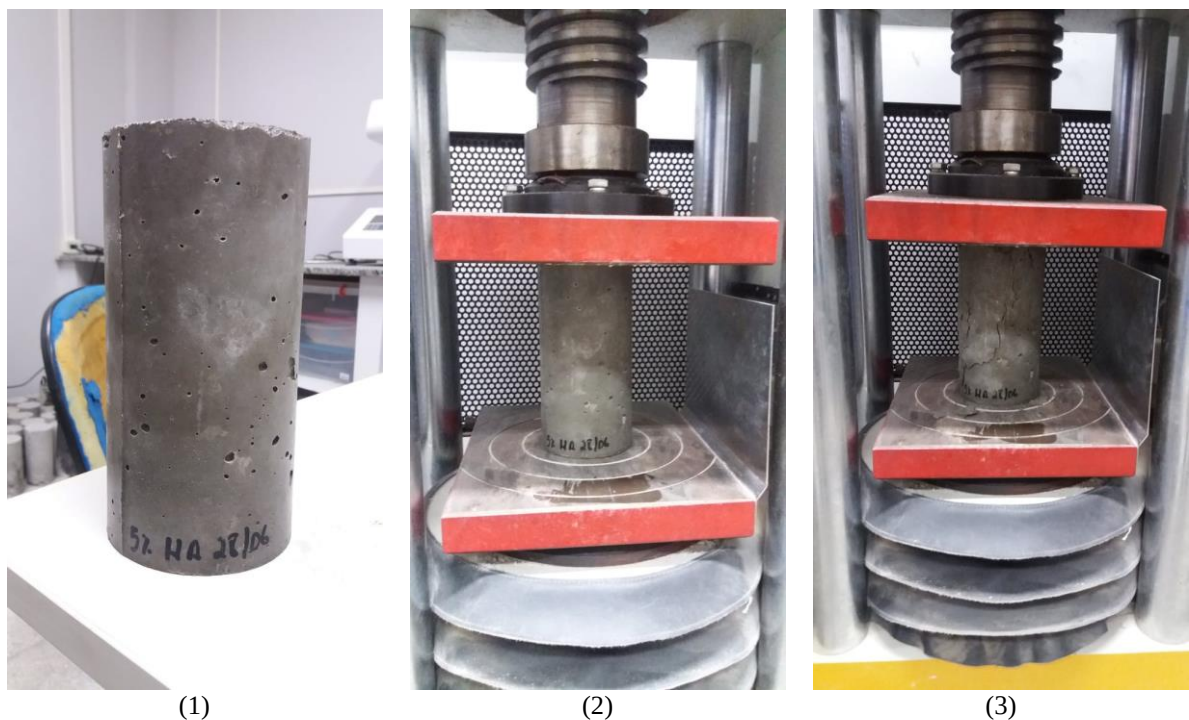
Figura 11 – Moldagem e cura dos corpos de prova: (1) Preparo do traço; (2) Corpos de prova moldados e (3) Cura.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Posteriormente, os CP's foram preparados para o ensaio de compressão de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015). A Figura 12 ilustra algumas etapas da prática.

Figura 12 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autoria própria, 2019.

O cálculo da resistência é obtido pela Equação 7.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} MPa \quad (7)$$

Onde: f_c é a resistência à compressão, em Megapascals (MPa), F é a força máxima (N) e D o diâmetro do corpo de prova (mm).

❖ Avaliação estatística

Calcular o desvio-padrão do ensaio pela Equação 8.

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \times n} \quad (8)$$

Onde: S_e é o desvio padrão, A_i é a diferença entre o maior e menor resultado da amostra em megapascals (MPa), n é o número de exemplares da amostra e d_2 o coeficiente obtido por meio do Quadro 2.

Quadro 2 – Coeficientes d_2

Nº de corpos de prova do exemplar	2	3	4	5	6
Coeficiente d_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534

Fonte: ABNT NBR 5738, 2015.

A partir do resultado obtido do desvio padrão, calcular o coeficiente de variação de ensaio (CV_e) pela Equação (9):

$$C_{ve} = \frac{S_e}{f_{cm}} \times 100 \quad (9)$$

Onde: C_{ve} é o coeficiente de variação do ensaio, S_e o desvio padrão e f_{cm} a resistência média dos exemplares (MPa). O resultado do nível do ensaio pode ser verificado na Quadro 3.

Quadro 3 – Nível de eficiência do ensaio

Nível 1 Excelente	Nível 2 Muito bom	Nível 3 Bom	Nível 4 Razoável	Nível 5 Deficiente
$C_{ve} \leq 3,0$	$3,0 \leq C_{ve} \leq 4,0$	$4,0 \leq C_{ve} \leq 5,0$	$5,0 \leq C_{ve} \leq 6,0$	$C_{ve} \geq 6,0$

Fonte: ABNT NBR 5738, 2015.

➤ Absorção

Absorção de água por imersão é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um sólido poroso. O concreto poroso penetra água em seus poros permeáveis, estabelece a relação com a sua massa em estado seco. Este ensaio avalia a porosidade do concreto em corpos-de-prova moldados para o ensaio (ABNT NBR 9778, 2009).

Os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 5738 (2016) passaram por ensaio de absorção na idade de 28 dias, o ensaio de absorção seguiu o procedimento da ABNT NBR 9778 (2009), com o resultado sendo a média das duas determinações realizadas. O cálculo de absorção foi realizado por intermédio da Equação 10.

$$A = \frac{m_{sat} - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (10)$$

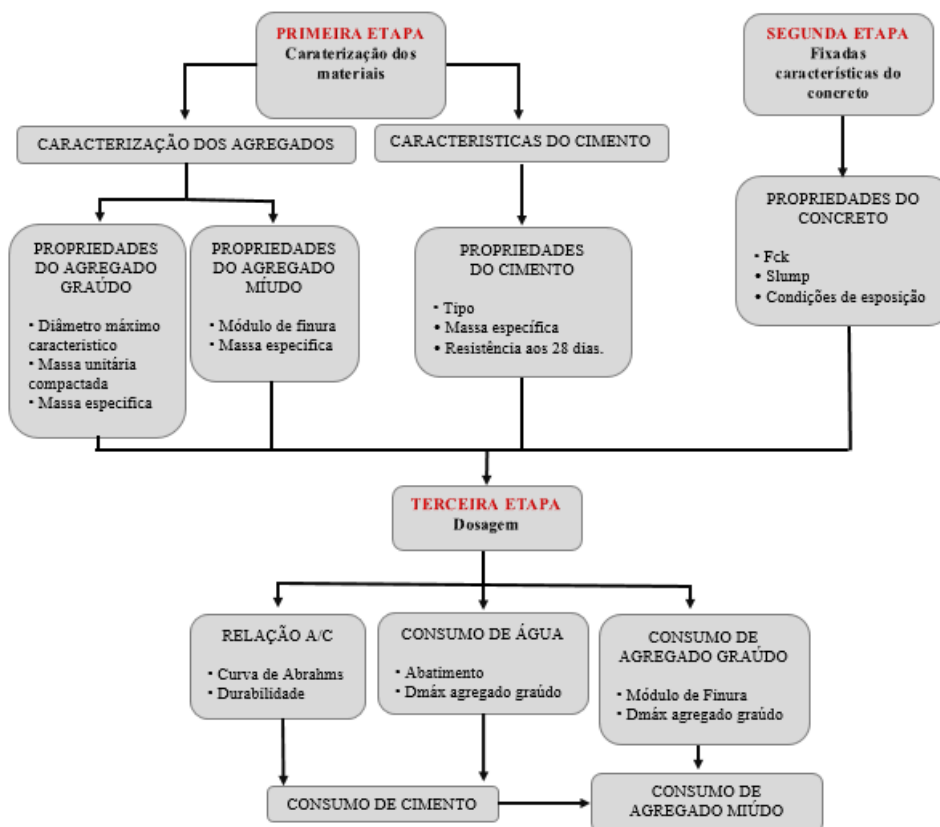
Onde: A é a absorção, m_{sat} é a massa da amostra saturada em água e M_s é a massa da amostra seca.

4.2.3 Dosagem

Dosagem é o proporcionamento adequado dos constituintes do concreto para que o mesmo seja o menos oneroso, com trabalhabilidade no estado fresco e atendendo as exigências impostas pelo projeto no estado endurecido (ABCP, 2019). Existem vários métodos de dosagem, exemplos destes são: Método IBRACON, Método do ACI e Método de De Larrard, Método de Vitervo O'Reilly (TUTIKIAN, 2011).

O método escolhido para dosagem dos concretos desse trabalho, foi o ABCP/ACI, que é um método que possui basicamente 3 etapas, como será apresentado na Figura 13 (ABCP, 2019).

Figura 13 – Etapas de dosagem pelo método da ABCP/ACI.



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.2.3.1 Primeira etapa

Os concretos que viraram ARC foram dosados pelo método da ABCP/ACI, para um $f_{ck}=25$ MPa e condição de controle A (ABNT NBR 12655, 2015). Para as características dos agregados mostradas no Apêndice A e um abatimento desejado de 80 a 100 mm, o traço obtido foi de 1: 1,88: 2,25: 0,5 (Cimento: Areia: Brita: Água).

4.2.3.2 Segunda etapa

Os concretos foram dosados pelo método da ABCP/ACI, para um $f_{ck}=25$ MPa e condição de controle A (ABNT NBR 12655, 2015). O Quadro 4 apresenta a composição dos traços em relação ao teor de resíduos incorporados.

Quadro 4 – Traços

Traços	Pó de pedra (%)	ARC (%)
REF	-	-
P10	10	-
P10R5	10	5
P10R10	10	10
P10R15	10	15

Fonte: Autoria própria, 2019.

O Quadro 5 detalha sobre os traços, a quantidade de corpos de prova, as idades e os respectivos ensaios que foram feitos na segunda etapa do estudo.

Quadro 5 – Quantidade de corpos de prova moldados e ensaios do estado endurecido.

Traços	Idade	Quantidade	Ensaio	
			Resistência à compressão	Absorção
REF	7	3	3	-
	21	3	3	-
	28	5	3	2
P10	7	3	3	-
	21	3	3	-
	28	5	3	2
P10R5	7	3	3	-
	21	3	3	-
	28	5	3	2
P10R10	7	3	3	-
	21	3	3	-
	28	5	3	2
P10R15	7	3	3	-
	21	3	3	-
	28	5	3	2
Total		55	45	10

Fonte: Autoria, própria, 2019.

4.2.4 Produção dos concretos

Os concretos foram produzidos manualmente, em ambas as etapas, em traço obtido por dosagem. A superfície onde realizam-se as misturas é constituída por uma camada de argamassa sobre o solo, e para evitar absorção de água do concreto por meio desta, a mesma foi previamente molhada antes da prática.

Devido as condições de preparo do concreto, manualmente, em espaço aberto, sujeito as condições de tempo local e etc, a manipulação de uma só mistura seria difícil, pois afetaria diretamente a trabalhabilidade do concreto, sobretudo dos últimos corpos a serem moldados. O preparo, dessa forma, foi dividido para primeira etapa em três misturas, obedecendo as mesmas

proporções de materiais da dosagem. Da primeira mistura foram feitos os ensaios do estado fresco e das outras duas foram moldados os corpos de prova. Para a segunda etapa reduziu-se a quantidade de misturas para duas, a primeira serviu para realizar os ensaios no estado fresco e moldagem de alguns corpos de prova, e a segunda unicamente para moldagem dos CP's restantes.

Com relação a ordem de adição dos materiais na mistura, primeiro foi colocado a areia, sendo seguida por, em sequência, pó de pedra, ARC, brita, o cimento, água. Posteriormente a colocação de cada material, a mistura era revolvida, e procedida a homogeneização, fazia-se uma abertura no centro e adicionava-se, nessa cova, o material. A medida foi tomada para que não houvesse perda na incorporação do novo elemento na mistura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados nesta seção referem-se à segunda etapa, objeto de estudo desse trabalho, os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados e do controle tecnológico do concreto da primeira etapa encontram-se nos Apêndices A e B.

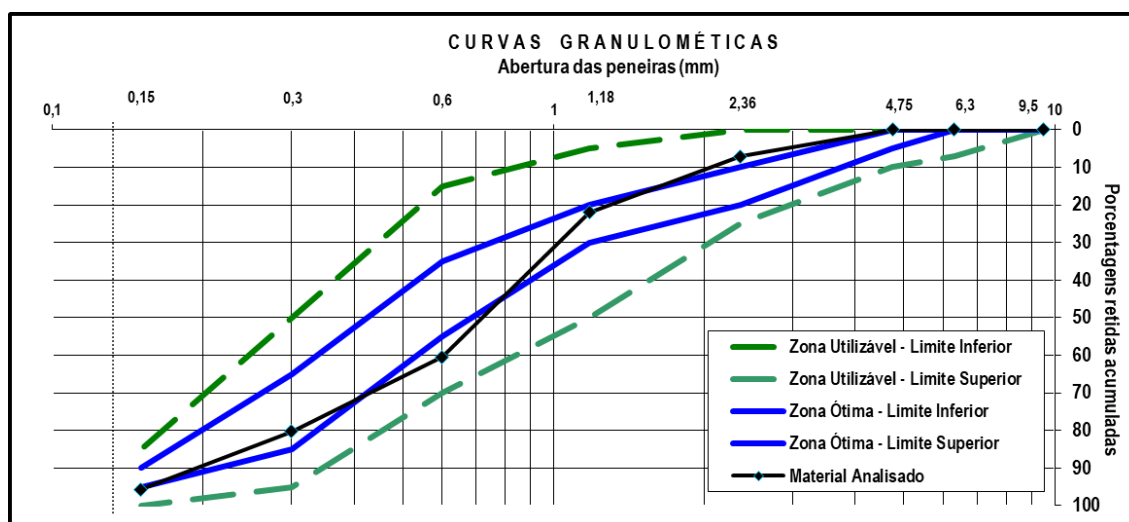
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

5.1.1 Agregados miúdos

5.1.1.1 Granulometria

Fundamentando-se nesse ensaio, tem-se que a dimensão máxima característica dessa areia é de 4,75 mm e que seu modulo de finura é de 2,65, que segundo a ABNT NBR 7211 (2009) está dentro de um limite que o classifica com MF da zona ótima. A distribuição granulométrica é melhor apresentada através da curva granulométrica da Figura 14.

Figura 14 – Curva granulométrica da areia



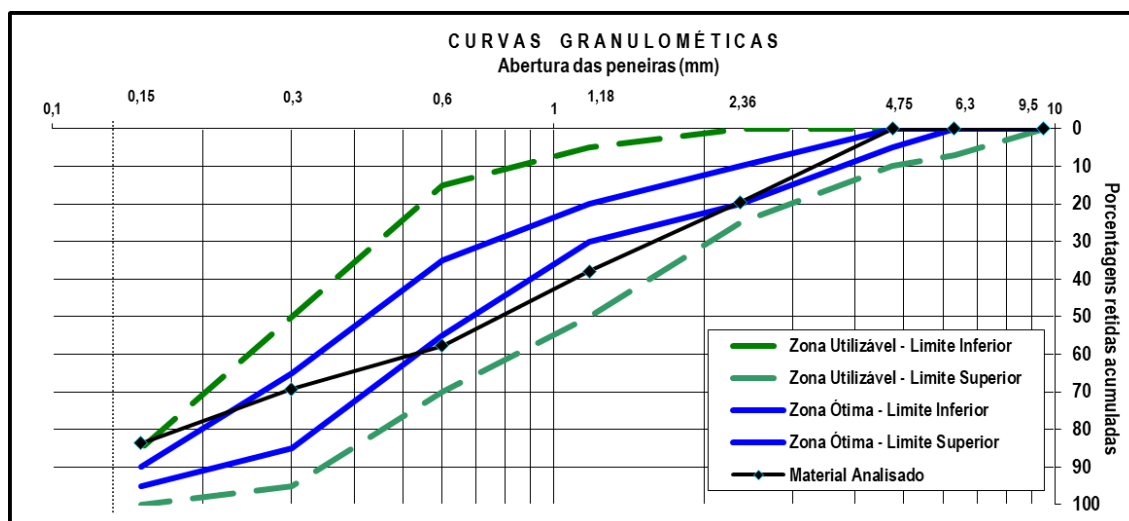
Fonte: Autoria própria, 2019.

Analisando-se a curva granulométrica apresentada, tem-se que a areia utilizada alternou – se entre os domínios da zona ótima e da zona utilizável, e pelo formato da curva, tem-se que essa areia é bem graduada, sendo, portanto, ideal para concretos.

A dimensão máxima característica para o pó de pedra, também foi de 4,75 mm, e seu módulo de finura, de 2,68, mostrando-se a partir desses parâmetros características muito

parecidas a da areia utilizada. A distribuição granulométrica é melhor apresentada através da curva granulométrica da Figura 15.

Figura 15 - Curva granulométrica do pó de pedra.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Analisando-se a curva granulométrica apresentada, tem-se que pó de pedra também alternou – se, em sua maior parte, entre os domínios da zona ótima e da zona utilizável, e aparentemente mostrou-se bem graduada, a curva apresenta-se como uma distribuição quase linear, demonstrando que os percentuais retidos em cada peneira são parecidos.

Além disso, outra importante informação que é possível extrair da curva, é com relação a soma do material retido acumulado até a peneira 0,15 mm, esse ponto está fora da zona utilizável inferior, indicando que ficou mais material retido no fundo que o desejado, e portanto, que o pó de pedra apresenta um razoável percentual de finos. No entanto, por este está apenas um pouco abaixo da zona utilizável, e em razão da porcentagem de pó de pedra ser de apenas 10% nos traços, optou-se por utilizar-se desse agregado em estado natural.

5.1.1.2 Massa específica e massa unitária

A massa específica e massa unitária da areia e do pó de pedra, também apresentaram valores próximos, a massa específica da areia foi de $2,56 \text{ g/cm}^3$, enquanto o do pó de pedra de $2,53 \text{ g/cm}^3$, já em relação a massa unitária, as medidas foram de $1,49 \text{ g/cm}^3$ para as areias e $1,5 \text{ g/cm}^3$ para o pó de pedra. Os resultados permitiram assumir que a areia é um pouco mais densa que o pó de pedra, porém, por seus grãos serem mais arredondados, assim como, por ter menos

finos, está deixando mais vazios entre os grãos, dessa forma, sua massa unitária é um pouco inferior ao do pó de pedra.

Os resultados apresentados apresentaram similaridade com outros trabalhos que caracterizaram o pó de pedra para utilização em concreto. Sá (2006) encontrou uma massa específica para o pó de pedra de $2,66 \text{ g/cm}^3$ e $2,63 \text{ g/cm}^3$ para areia natural, o módulo de finura foi de 2,82 para a areia e de 2,16 para o pó de pedra. Menossi *et al* (2010) obteve que uma massa específica de $2,79 \text{ g/cm}^3$ para o pó de pedra e $2,66 \text{ g/cm}^3$ para a areia natural, e uma massa unitária de $1,52 \text{ g/cm}^3$ para a areia natural e 1,49 para o pó de pedra, nesse caso o módulo de finura foi 2,29 para areia e 2,48 para o pó de pedra, com $D_{\text{máx}}$ característica para o pó de pedra de 2,38 mm.

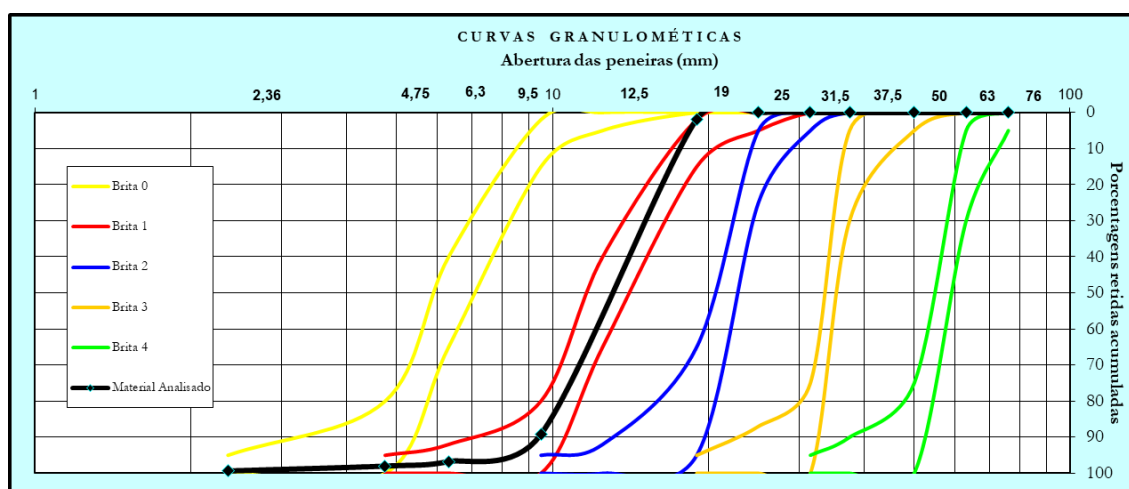
Dessa maneira, tem-se que quando ponderado todos os parâmetros obtidos nessa pesquisa, nota-se que o pó de pedra apresentou maior semelhança com a areia natural do que os estudos supracitados.

5.1.2 Agregados graúdos

5.1.2.1 Granulometria

Baseando-se nesse ensaio, tem-se que a dimensão máxima característica dessa brita é de 19 mm e módulo de finura 6,87. A distribuição granulométrica é melhor apresentada através da curva granulométrica da Figura 16.

Figura 16 – Curva granulométrica da brita.

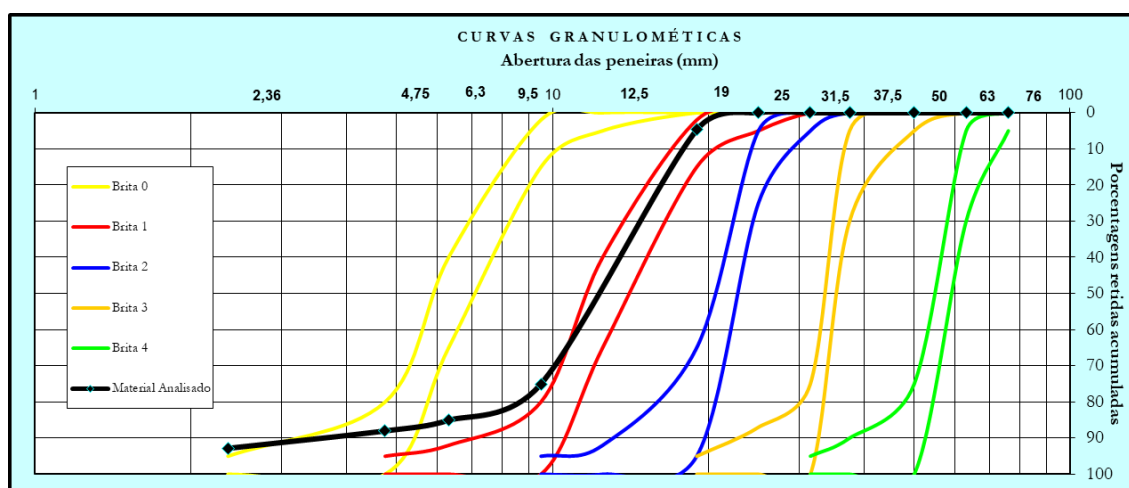


Fonte: Autoria própria, 2019.

Pela curva granulométrica pode-se verificar que, a brita utilizada para os traços de concreto, se ajusta dentro dos limites da brita nº 1.

O ARC foi fragmentado de modo que a dimensão máxima característica fosse 19 mm, sendo seu módulo de finura 6,51. A distribuição granulométrica é melhor apresentada através da curva granulométrica da Figura 17.

Figura 17 – Curva granulométrica do ARC de concreto.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A curva granulométrica mostra um agregado de organização complexa, com parte entre os limites da brita nº1, parte entre o limite inferior da brita nº 1 e superior da nº 0, e outra parte ainda, entre os limites da brita nº 0.

Dessa forma, observou-se que apenas 88% do material era de fato agregado graúdo (grãos maiores que 4,75 mm). A utilização do agregado assim afetaria, provavelmente, em muito, as propriedades do concreto, pois isso significaria 12% de agregado miúdo amais, basicamente resíduo de argamassa. Por isso, todo o ARC foi passado na peneira de 4,75 mm, e foi utilizado apenas o material retido na fabricação dos concretos. Um novo ensaio granulométrico não foi realizado, mas com base na curva granulométrica, pode-se verificar que após o citado, o ARC de concreto ficou com características de brita nº 1.

5.1.2.2 Massa específica, massa unitária e absorção.

No ensaio de massa específica obteve-se uma massa específica de 2,63 g/cm³ e uma massa unitária de 1,55 g/cm³ para brita. Para o ARC, a massa específica foi de 2,39 g/cm³ e a massa unitária de 1,33 g/cm³. A diferença entre os valores obtidos nos agregados, dá-se pelo

fato da existência da argamassa aderida brita do ARC. A argamassa é leve, o que torna o ARC mais leve.

A argamassa também tem influência direta sobre a absorção, constatou-se que para a brita esse valor foi 0,35% e para o ARC 5,49%. Devido a absorção do ARC ser razoavelmente alta, optou-se por molha-lo antes de mistura-lo aos outros componentes, e manter a dosagem sem correção.

O resultado vai de acordo com o apresentado em algumas pesquisas. Thomas *et al.* (2018) em seus resultados mostrou que o ARC apresentou uma massa específica de 2,34 g/cm³, uma massa unitária de 1,49 g/cm³ e um índice de absorção 6,4%, nesse caso, os agregados também foram pré-humedecido para a condição seca superfície saturado antes da mistura. Bhasya & Bharatkumar (2018) mostraram que a massa específica e massa unitária do ARC é mais ou menos 10% menor que a brita comum, e que a absorção foi de cerca de setes vezes maior.

5.2 OBTENÇÃO DO TRAÇO

Por meio das características dos constituintes apresentadas, para um abatimento desejado de 80 mm, e, usando-se da metodologia apresentada, obteve-se os traços apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do traço em massa

Traços	Traço em massa					
	Cimento	Areia	Pó de pedra	Brita	ARC	Água
REF	1	1,65	0,00	2,67	0,00	0,5
P10	1	1,48	0,17	2,67	0,00	0,5
P10R5	1	1,48	0,17	2,54	0,13	0,5
P10R10	1	1,48	0,17	2,41	0,27	0,5
P10R15	1	1,48	0,17	2,27	0,40	0,5

Fonte: Autoria própria, 2019.

5.3 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

5.3.1 Massa específica fresca

A Tabela 2 apresenta os valores para a massa específica fresca para os diferentes traços produzidos de concreto.

Tabela 2 – Massa específica fresca dos concretos

TRAÇO	MASSA ESPECIFICA FRESCA (g/cm ³)
REF	2,26 g/cm ³
P10	2,27 g/cm ³
P10R5	2,24 g/cm ³
P10R10	2,22 g/cm ³
P10R15	2,24 g/cm ³

Fonte: Autoria própria, 2019.

A massa específica, como esperado, é um pouco menor para os concretos com adição de ARC, visto que, esses apresentam menor massa específica que a brita. Thomas *et al.* (2018) em sua pesquisa também já havia mostrado isso.

5.3.2 Consistência

A Tabela 3 apresenta os valores de consistência para os diferentes traços produzidos de concreto. O valor é a média de três determinações com desvio padrão do valor médio, que indica a precisão com que a média populacional foi estimada. Os traços foram feitos em diferentes dias, em diferentes horários, e as condições temporais diferentes podem terem influenciado diretamente sobre a consistência dos concretos. Por esse motivo, são exibidas as principais particularidades sobre o momento do ensaio, e portanto, da mistura e manuseio do concreto.

Tabela 3 – Consistência dos concretos

	REF	P10	P10R5	P10R10	P10R15
Abatimento médio (mm)	80,0 ± 0,0	53,3 ± 1,8	46,3 ± 1,3	99,3 ± 0,9	108,3 ± 4,4
Horário (h)	09:30	07:20	09:45	10:20	11:10
Temperatura do ar (°C)	29,7	27,8	29,7	29,7	28,5
Umidade relativa (%)	55,0	72,0	52,0	51,0	59,0
Condições do tempo sobre o local de mistura e manuseio do concreto	Sol na maior parte do período.	Sol na maior parte do período (Local na sombra)	Sol na maior parte do período.	Muitas nuvens com curtos períodos de Sol.	Céu totalmente encoberto, sem abertura de Sol.

Fonte: Autoria própria, 2019.

Com base no exposto na Tabela 3, é possível constatar a partir dos valores obtidos no traço REF e P10, que mesmo em condições mais favoráveis, o traço P10 apresentou-se mais

seco, indicando que o concreto com adição de pó de pedra requeria uma maior quantidade de água para obter o mesmo abatimento que o concreto sem o uso desse resíduo. Drago *et al.* (2009) e Menossi *et al.* (2010) também observaram o mesmo efeito. Fato que foi atribuído por Drago *et al.* (2009) pela maior quantidade de finos do pó de pedra e por seus grãos serem mais ásperos e angulosos, em comparação à areia natural.

É possível notar também um menor abatimento do traço P10R5, o qual, quando comparado com o traço P10, pode ser atribuído as condições temporais como, temperatura do ar mais alta, menor umidade relativa e superfície de mistura e manuseio mais aquecida. Além disso, os traços P10R10 e P10R15 tiveram um maior abatimento, alguns fatores que podem estar relacionados com o resultado são a maior porcentagem de ARC, que foram pré-molhados antes da mistura, e a superfície de mistura e manuseio está com temperatura mais baixa, se comparado ao P10R5.

5.4 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

5.4.1 Absorção

A Tabela 4 apresenta a absorção dos concretos para os diferentes traços produzidos, os valores são expressos pela média das amostras com o desvio padrão do valor médio.

Tabela 4 – Absorção para os diferentes traços.

TRAÇO	ABSORÇÃO (%)
REF	$4,37 \pm 0,02$
P10	$6,19 \pm 0,08$
P10R5	$6,40 \pm 0,20$
P10R10	$6,54 \pm 0,28$
P10R15	$6,37 \pm 0,10$

Fonte: Autoria própria, 2019.

Nota-se que a absorção do concreto aumentou com a adição do pó de pedra e do ARC no concreto. Duarte (2013) também constatou que o acréscimo de pó de pedra aumenta a absorção do concreto, fato ao qual relacionou com a granulometria fina e angulosa do pó de pedra, que no concreto, demanda um percentual de água maior para que ocorram as reações cimentícias, e assim, torna a mistura mais porosa.

No que diz respeito ao ARC, Bhasya & Bharkat Kumar (2018), também constataram, que a presença do mesmo no concreto, aumenta a absorção, no estudo realizado, concretos com

porcentagens de 50 e 100% de agregado reciclado de concreto, respectivamente, apresentaram absorção de 6,1 e 6,49%, enquanto o apenas com agregado natural apresentou 4,22%.

5.4.2 Resistência a compressão

5.4.2.1 Traço REF

A Tabela 5 apresenta os resultados de resistência a compressão para o traço REF.

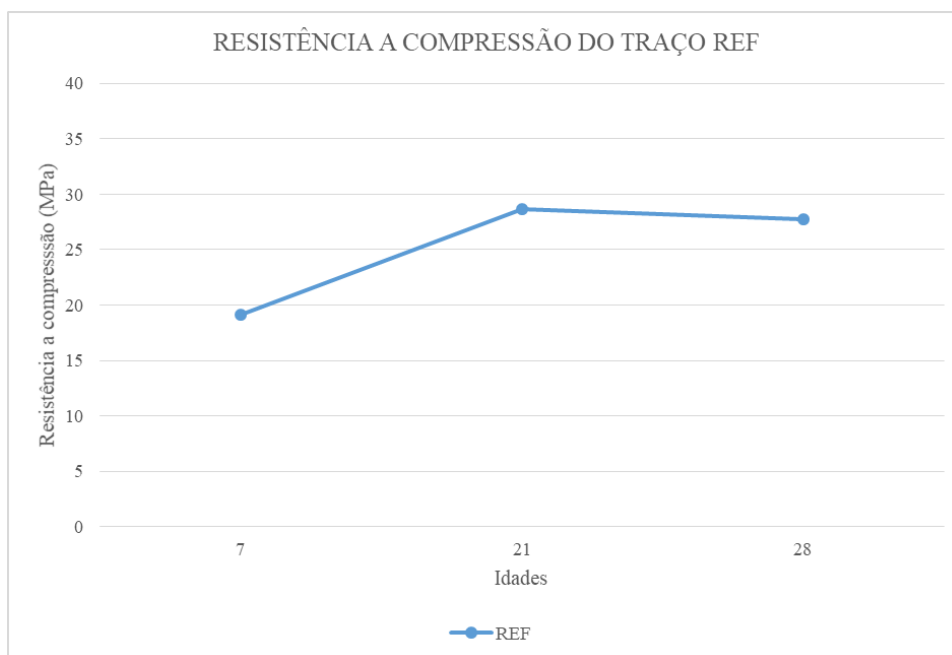
Tabela 5 – Resistência a compressão do concreto REF.

IDADE	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) (MPa)			AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA			
	CP1	CP2	CP3	Média (f_c) (MPa)	S_e	CV_e	Eficiência
7 dias	19,53	19,17	18,71	19,14	0,16	0,84	Excelente
21 dias	28,51	29,43	28,16	28,70	0,25	0,87	Excelente
28 dias	30,07	27,70	25,57	27,78	0,89	3,20	Muito bom

Fonte: Autoria própria, 2019.

Por meio da Tabela apresentada, detectou-se uma incompatibilidade, pois, há uma diminuição do valor da resistência média, de 21 para 28 dias. O resultado, inesperado, talvez, poderia ser diferente caso um número maior de amostras fossem submetidas ao ensaio, pois a determinação de amostras pontuais, afetariam menos o resultado final. Nesse caso, há de salientar, que a maior resistência individual dos corpos de prova foi obtida aos 28 dias. Apesar da contradição, a resistência a compressão a 28 dias superou a resistência calculada de 25 MPa. O Gráfico 1 apresenta a resistência ao longo das idades para o traço REF.

Gráfico 1 – Resistência a compressão do concreto REF.



Fonte: Autoria própria, 2019.

5.4.2.2 Traço P10

A Tabela 6 apresenta os resultados de resistência a compressão para o traço P10.

Tabela 6 – Resistência a compressão do concreto P10.

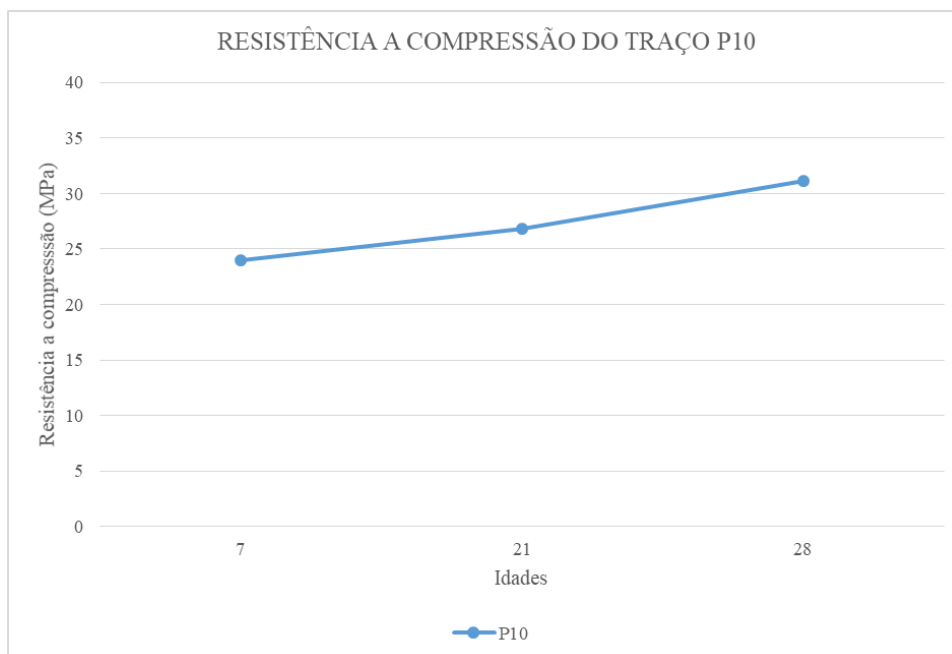
IDADE	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) (MPa)			AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA			
	CP1	CP2	CP3	Média (f_c) (MPa)	S_e	CV_e	Eficiência
7 dias	23,39	24,76	23,67	23,94	0,27	1,13	Excelente
21 dias	27,07	32,56	20,73	26,79	2,33	8,69	Deficiente
28 dias	26,63	29,79	37,08	31,17	2,06	6,60	Deficiente

Fonte: Autoria própria, 2019.

O ensaio a 21 e a 28 dias, mostraram-se deficientes, de acordo com o recomendado pela norma, pois a amplitude entre o maior e o menor valor dos exemplares foi alto, provavelmente devido as condições de produção. Entretanto, o traço P10 apresentou uma resistência a compressão 31,17 MPa a 28 dias, valor que supera em 24,68% o 25 MPa para qual o traço foi calculado. Vale destacar que um dos CP rompido apresentou resistência de 37,08 MPa, a maior resistência encontrada entre todos CP's de todos os traços, representando 48,32% a mais que

os 25 MPa. Para esse traço a resistência a 21 dias também foi superior a 25 Mpa. O Gráfico 2 apresenta a evolução da resistência ao longo das idades para o traço P10.

Gráfico 2 – Resistência a compressão do concreto P10.



Fonte: Autoria própria, 2019.

5.4.2.3 Traço P10R5

A Tabela 7 apresenta os resultados de resistência a compressão para o traço P10R5.

Tabela 7 – Resistência a compressão do concreto P10R5.

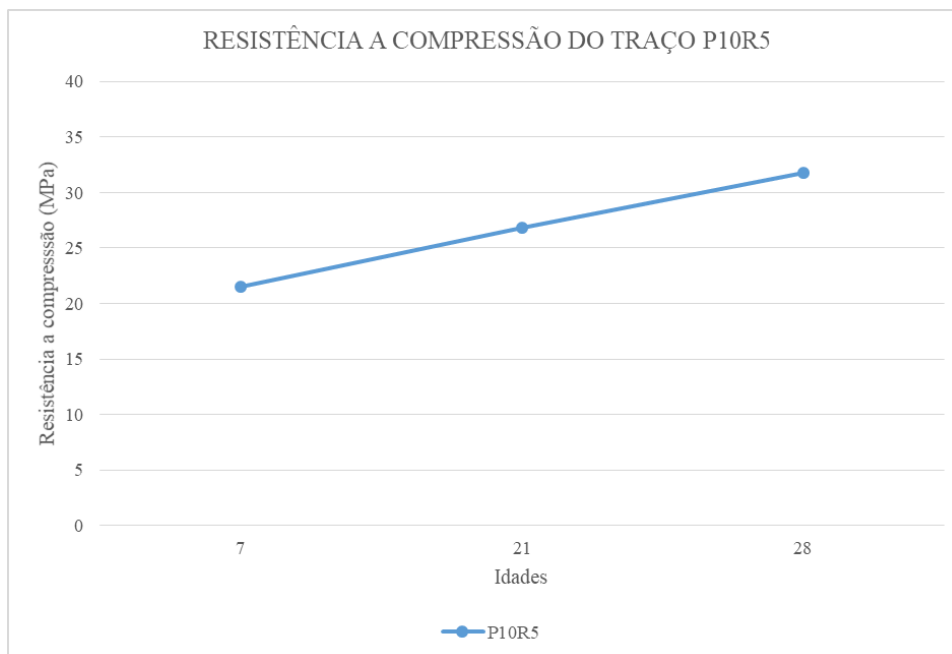
IDADE	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) (MPa)			AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA			
	CP1	CP2	CP3	Média (f_c) (MPa)	S_e	CV_e	Eficiência
7 dias	18,10	22,24	24,23	21,52	1,21	5,61	Razoável
21 dias	29,16	25,69	25,72	26,86	0,68	2,54	Excelente
28 dias	34,29	30,69	30,31	31,76	0,78	2,47	Excelente

Fonte: Autoria própria, 2019.

O traço P10R5 apresentou uma resistência a compressão 31,76 MPa a 28 dias, muito superior aos 25 MPa para qual o traço foi calculado. Para esse traço a resistência a 21 dias

também já haverá sido superior a 25 Mpa. O Gráfico 3 apresenta a evolução da resistência ao longo das idades para o traço P10R5.

Gráfico 3 - Resistência a compressão do concreto P10R5.



Fonte: Autoria própria, 2019.

5.4.2.4 Traço P10R10

A Tabela 8 apresenta os resultados de resistência a compressão para o traço P10R10.

Tabela 8 - Resistência a compressão do concreto P10R10.

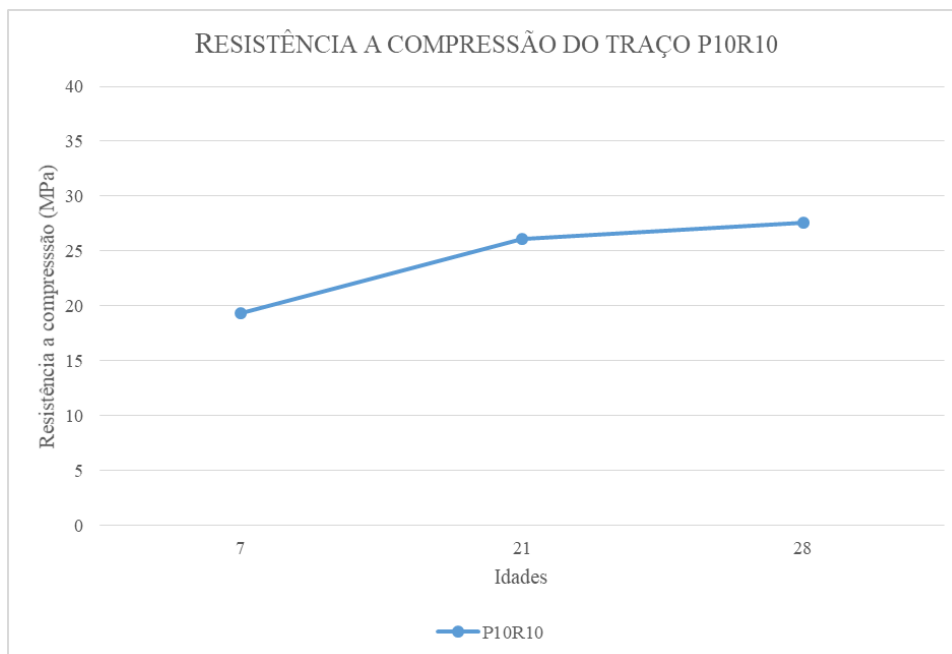
IDADE	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) (MPa)			AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA			
	CP1	CP2	CP3	Média (f_c) (MPa)	S_e	CV_e	Eficiência
7 dias	19,35	18,58	20,18	19,37	0,32	1,63	Excelente
21 dias	27,07	23,67	27,50	26,08	0,75	2,89	Excelente
28 dias	32,35	27,26	23,19	27,60	1,80	6,52	Deficiente

Fonte: Autoria própria, 2019.

O traço P10R10 apresentou uma resistência a compressão 27,60 MPa a 28 dias, e 26,08 MPa a 21 dias, e assim como, o traço REF, o traço P10 e o traço P10R5, superou, em ambas as idades, a resistência de 25 MPa para qual o traço foi calculado. O ensaio a 28 dias segundo a

norma, da mesma forma que o de 21 e 28 dias para o traço P10, foi deficiente. O Gráfico 4 apresenta a evolução da resistência ao longo das idades para o traço P10R10.

Gráfico 4 – Resistência a compressão do concreto P10R10.



Fonte: Autoria própria, 2019.

5.4.2.5 Traço P10R15

A Tabela 9 apresenta os resultados de resistência a compressão para o traço P10R15.

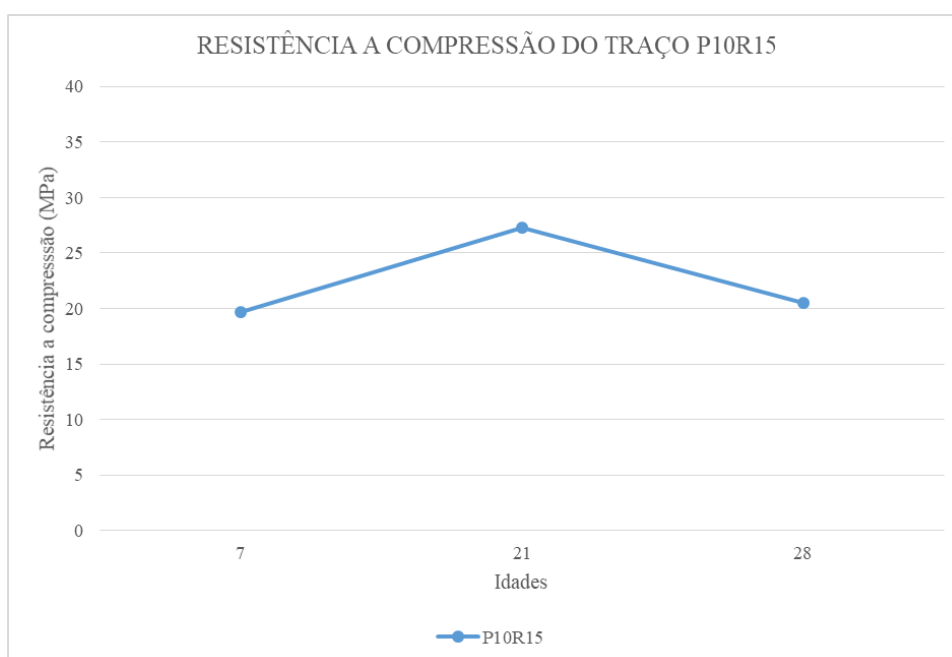
Tabela 9 – Resistência a compressão do concreto P10R15.

IDADE	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) (MPa)			AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA			
	CP1	CP2	CP3	Média (f_c) (MPa)	S_e	CV_e	Eficiência
7 dias	19,15	21,51	18,36	19,67	0,62	3,15	Muito Bom
21 dias	29,05	24,84	28,01	27,3	0,83	3,04	Muito Bom
28 dias	22,61	18,53	20,23	20,46	0,80	3,93	Muito Bom

Fonte: Autoria própria, 2019.

Semelhante ao que aconteceu para o traço referência, a resistência compressão a 28 dias, foi inferior ao valor registrado para 21 dias. Mas, diferente do de referência, para esse traço, a diferença foi demasiada, o que torna o resultado inconclusivo. Como mostrado na Tabela 11, o valor de resistência a 28 dias foi de 20,23 MPa, muito inferior aos 25 MPa para a qual foi calculado, e apenas um pouco superior ao valor apresentado aos 7 dias. Porém a 21 dias, a resistência foi superior a 25 MPa. O Gráfico 5 apresenta a resistência ao longo das idades para o traço P10R15.

Gráfico 5 - Resistência a compressão do concreto P10R15.

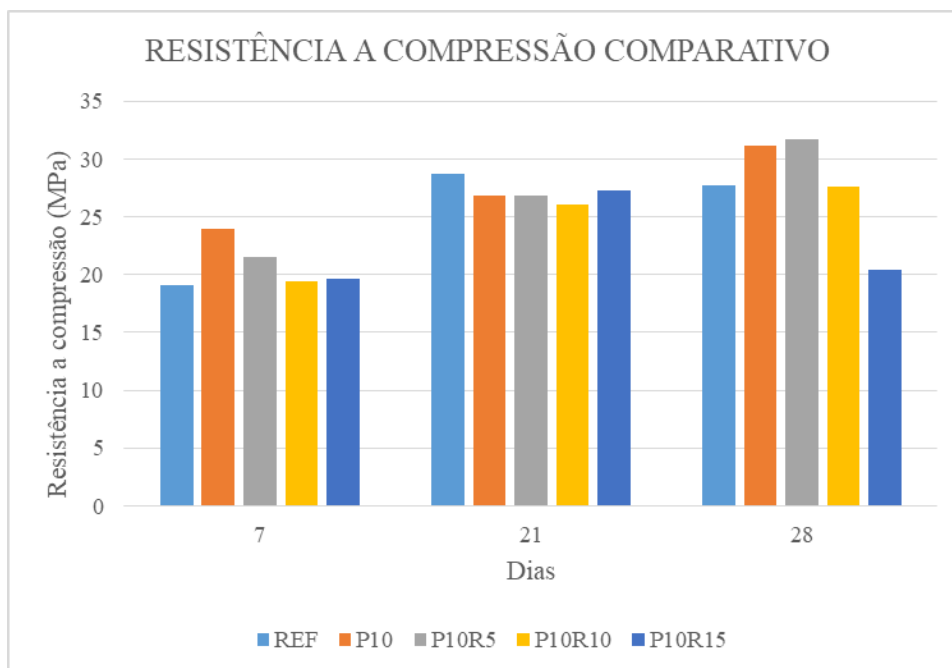


Fonte: Autoria própria, 2019.

5.4.2.6 Comparativo entre os traços

Uma análise sobre o efeito da adição dos resíduos no concreto, pode ser feita quando comparado os resultados de cada traço ao longo das idades. O Gráfico 6 mostra o comparativo do ensaio de resistência para todos os traços e idades.

Gráfico 6 – Comparativo da resistência a compressão entre os traços nas idades de 7, 21 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria 2019.

Aos 7 dias o traço REF e o traço P10 apresentaram, respectivamente, em valor absoluto, a menor e a maior resistência. Aos 21 dias o traço REF passou a ser o de maior resistência. Dessa forma, foi o traço em que houve maior variação de resistência de 7 para 21 dias, ganhando 49,45% de resistência a mais do que o que registrava na primeira idade avaliada. No caminho inverso, o traço P10 foi o que menos apresentou variação, ganhando apenas 11,9%. O resultado indica que após um processo de fortalecimento até os 7 dias, o traço P10, estabilizou-se e passou a ganhar resistência de forma bem lenta, enquanto que o traço REF obteve o ganho de resistência em um processo mais acelerado entre essas idades.

O resultado é contraditório ao apresentado por Menossi *et al.* (2010), que obteve um aumento de resistência com o tempo maior para maiores percentuais de pó de pedra. Em seu estudo o traço com adição de 100% de pó de pedra variou a resistência em aproximadamente 70% de 7 para 91 dias. Enquanto o traço sem utilização do pó de pedra, apresentou o menor ganho entre as datas, 31%.

A Tabela 10 apresenta o percentual de resistência a compressão dos traços ao longo das idades considerando a resistência a 28 dias como 100%, ou seja, a máxima resistência.

Tabela 10 – Percentual de resistência a compressão dos traços ao longo das idades.

Tempo (dias)	REF (%)	P10 (%)	P10R5 (%)	P10R10 (%)	P10R15 (%)
7	68,90	76,80	67,76	70,18	96,14
21	103,31	85,95	84,57	94,49	133,43
28	100	100	100	100	100

Fonte: Autoria própria, 2019.

Ao fazer uma análise sobre o resultado, tem-se que a resistência a 7 dias para todos traços ficou próximo dos 70% da resistência final. Exceção feitas, ao traço P10, que excedeu (um pouco mais que os outros) esse valor, e o traço P10R15, que devido ao resultado desconexo apresentado aos 28 dias, distorceu o percentual do que foi apresentado a 7 dias. Mas, se considerar a resistência a 21 dias do traço P10R15 como a resistência característica para esse traço, obterá que também para esse traço a resistência a 7 dias está próxima a 70% da resistência final, precisamente 72,05%.

Aos 28 dias o traço P10R5 foi o que apresentou maior resistência, e o traço P10 composto apenas por 10% de pó de pedra, a segunda maior resistência. Os traços P10R10 e P10R15, com maior porcentagem de ARC apresentaram as menores resistências.

Pelo apresentado, tem-se que o resultado final da resistência pode estar relacionado a consistência do concreto, já que, a ordenação das resistências está diretamente relacionada aos valores apresentados de abatimento na Tabela 5 (quão maior o abatimento menor a resistência).

Essa teoria, por sua vez, leva a pressupor que o resultado final foi influenciado tanto pelas condições de produção, quanto pela incorporação dos próprios resíduos, já que estes tendem a deixar o concreto mais ou menos trabalhável. Dessa forma, pode-se teorizar, que a adição do pó de pedra melhorou a resistência do concreto, pois se comparado diretamente, o traço REF com o traço P10, no último a resistência foi maior. Já em relação ao acréscimo de ARC, tem-se que a introdução de porcentagens maiores diminuiu a resistência do concreto. Vale ressaltar que o ARC foi molhado antes da mistura, o que também pode ter influenciado.

6 CONCLUSÕES

A extração dos agregados para produção do concreto e a geração e inadequada destinação de resíduos provenientes da construção civil, tem trazido muitos danos ao meio ambiente. Por meio dessa pesquisa buscou-se uma alternativa para diminuição desses impactos, para isso, analisou-se a influência da incorporação do agregado reciclado de concreto e do pó de pedra, em substituição de porcentagens dos agregados naturais, sobre algumas propriedades do concreto, com ênfase na resistência a compressão

Os ensaios revelaram que o pó de pedra analisado possui muita semelhança com a areia (agregado miúdo natural) utilizada em termos de índices granulométricos, massa específica e massa unitária, no entanto, apresenta uma quantidade de finos relativamente maior

Com relação ao ARC, o mesmo apresenta menor massa específica, massa unitária e índice de absorção que a brita utilizada. Esses resultados devem-se o teor de argamassa aderido sobre as pedras.

Em relação as propriedades no estado fresco, foi constatado que os concretos produzidos com ARC, como esperado, apresentam uma massa específica ligeiramente inferior aos produzidos apenas com a brita. Sobre a consistência, verificou-se que a adição do pó de pedra diminuiu a trabalhabilidade da mistura, por requerer uma maior quantidade de água, além disso as condições de produção e a adição do ARC também influenciaram na trabalhabilidade dos traços.

No tocante aos ensaios do estado endurecido, notou-se que aumentou a absorção do concreto com a adição do pó de pedra, assim como também, aumentou com a adição do ARC.

A respeito da resistência a compressão verificou-se que todos os traços apresentaram resistência superior aos 25 MPa para os quais foram calculados, com exceção o traço P10R15, o qual o resultado foi inconclusivo. O traço P10R5 apresentou a maior resistência aos 28 dias, 31,76 MPa, além disso, percebeu-se uma relação entre a consistência apresentada no concreto fresco com os valores de resistência, pois quão maior foi abatimento menor a resistência do traço.

Dessa forma, tem-se que as adições dos resíduos nos concretos, nas proporções estudadas, com a metodologia utilizada e em relação a resistência a compressão, apresentaram-se como alternativas muito eficientes na substituição dos agregados naturais, podendo assim, futuramente, e com mais pesquisas que constatem o mesmo, terem seu uso mais difundido pelo mundo, o que conseqüentemente reduziria os impactos ambientais.

Para trabalhos futuros sugere-se produzir traços com ARC como o único resíduo, traços com maiores teores de agregado reciclado de concreto e pó de pedra e, por fim, misturas com ARC na condição seca e previamente saturados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Disponível em: http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/files_mf/34aRTIC1983.pdf. Acesso em: 18 jul. 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEPAC). Disponível em: <https://www.anepac.org.br/agregados/mercado>. Acesso em: 01 mai. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015 versão corrigida 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987 Versão Corrigida:1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005 versão corrigida 2:2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015 Versão Corrigida:2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15114**: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BAUER, F. L.A. **Materiais de Construção**. 5.ed. revisada, [reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BHASYA, V.; BHARATKUMAR, B. H. Mechanical and Durability Properties of Concrete Produced with Treated Recycled Concrete Aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 2, 2018.

CAMPOS, Viviane de. **Avaliação da aplicabilidade do método INT de dosagem de concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

CAMPOS, Heloisa Fuganti. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: estudo experimental**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1999. Boletim Técnico nº 237.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307 de 05 de julho de 2002. Dispõe sobre Gestão dos Resíduos da Construção Civil, 2002.

DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 3, p. 399-408, 2009.

DUARTE, João Batista. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por pó de pedra em concreto de Cimento Portland**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU). **The role of cement in the 2050 low carbon economy**. 2014.

FABRO, F. *et al.* Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **RIEM-IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 4, n. 2, 2011.

GARCÍA, Christian Mario Varhen. **Avaliação do uso do filer calcário como substituição ao cimento no comportamento reológico e retração de microconcretos**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MCGINNIS, M. J. *et al.* Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 258-269, 2017.

MARINKOVIĆ, S. *et al.* Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255-2264, 2010.

MENOSSE, R. T. *et al.* Pó de Pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto?. **Holos Environment**, v. 10, n. 2, p. 209-222, 2010.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

NOGUEIRA, João Rafael Severo. **Avaliação do método da mistura nas propriedades da mistura do concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. Porto Alegre: Globo, 1998.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Guia para elaboração dos Planos de Gestão de Resíduos Sólidos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

SÁ, Maria das Vitórias Vieira Almeida de. **Influência da substituição da areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SAFIUDDIN, Md. *et al.* Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. **Materials Research**, v. 14, n. 2, p. 248-255, 2011.

SCHANKOSKI, Rudiele Aparecida. **Estudo de concreto autoadensável contendo filer de britagem: características das partículas, floculação e reologia**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. Argamassas com areia britada: Influência dos finos e da forma das partículas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI. 2005, Florianópolis. Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005, p. 11-22.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 01 mai. 2019.

TEODORO, Sabrina Bastos. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural**. 2013. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

THOMAS, C. *et al.* Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1054-1065, 2013.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 349-365, 2018.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. Capítulo 12. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland**. Concreto: Ciência e Tecnologia. sl: IBRACON, 2011.

VERIAN, K. P.; ASHRAF, W.; CAO, Y.. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 30-49, 2018.

APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS DA PRIMEIRA ETAPA

Figura A.1 - Curva granulométrica da areia

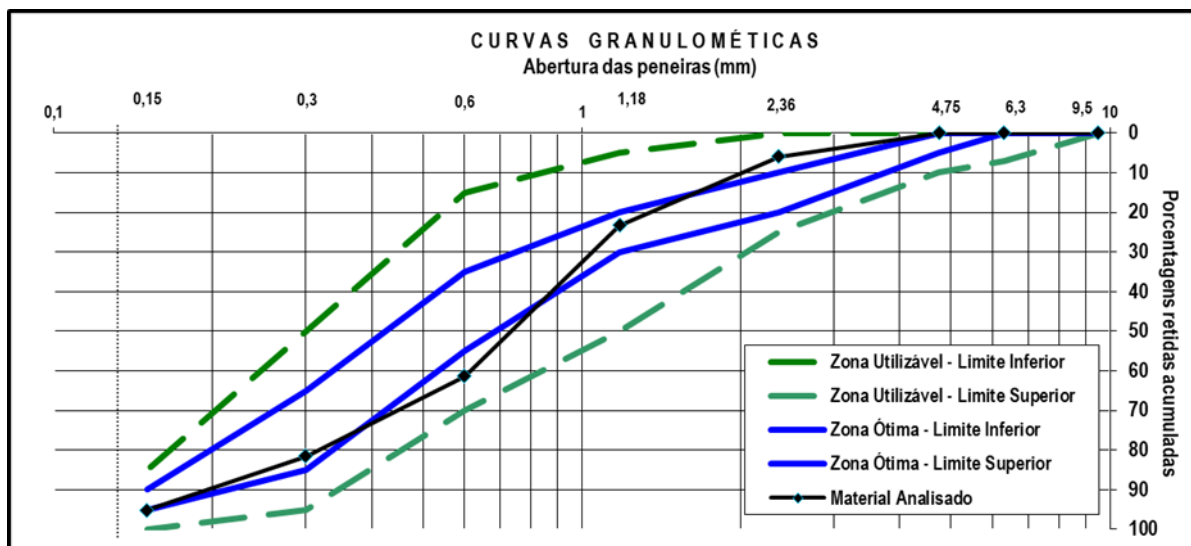


Figura A.2 - Curva granulométrica da brita

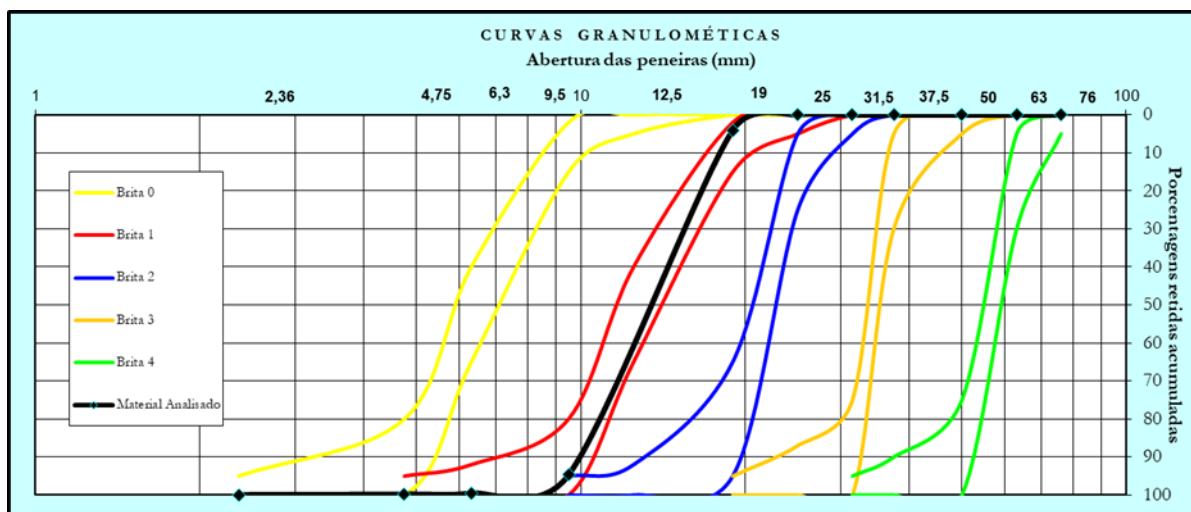


Tabela A.1 – Principais características dos agregados

Parâmetro	Areia	Brita
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	19
Módulo de finura (MF)	2,67	6,98
Massa específica (g/cm ³)	2,5	2,64
Massa unitária (g/cm ³)	1,42	1,38
Absorção (%)	-	0,32

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO DA PRIMEIRA ETAPA

Tabela B.1 – Consistência do concreto.

Primeira determinação (mm)	Segunda determinação (mm)	Terceira determinação (mm)	Média Resultados (mm)	Horário (h)	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	Condições do tempo sobre o local de mistura e manuseio do concreto
30,0	27,0	30,0	29,0 ± 1,0	12:10	33,5	39,0	Sol na maior parte do período.

Tabela B.2 – Resistência à compressão do concreto com 28 dias.

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (f_c) A 28 DIAS (MPa)					AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA			
CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média (f_c) (MPa)	S_e	CV_e	Eficiência
25,03	27,14	33,22	30,55	30,44	29,28	0,78	2,72	Excelente