



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DIEGO DEYVISON DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE EM
PERCENTUAIS DA MASSA DO AGREGADO MIÚDO
NATURAL PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
SUSTENTÁVEL**

Caruaru
2019

DIEGO DEYVISON DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE EM
PERCENTUAIS DA MASSA DO AGREGADO MIÚDO
NATURAL PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
SUSTENTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Civil/Materiais de Construção.

Orientador: Profª. Dra. Ana Cecília Vieira da Nóbrega.

Coorientador: Prof. Dr. Cézar Augusto Casagrande.

Caruaru
2019

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

S237a Santos, Diego Deyvison dos.
Avaliação da adição de escória de cobre em percentuais da massa do agregado miúdo natural para produção de concreto sustentável. / Diego Deyvison dos Santos. – 2019.
84 f. il. : 30 cm.

Orientadora: Ana Cecília Vieira da Nóbrega.
Coorientador: Cézar Augusto Casagrande.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Escória metalúrgica. 2. Cobre. 3. Concreto. 4. Agregados (Materiais de construção). 5. Reutilização. 6. Sustentabilidade. I. Nóbrega, Ana Cecília Vieira da (Orientadora). II. Casagrande, Cézar Augusto (Coorientador). III. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-126)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGreste

NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da defesa do Trabalho de Conclusão de Curso
**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE EM PERCENTUAIS DA
MASSA DO AGREGADO MIÚDO NATURAL PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO
SUSTENTÁVEL**

Defendido por
DIEGO DEYVISON DOS SANTOS

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 15 de julho de 2019.

Prof^a Dr^a. ANA CECÍLIA VIEIRA DA NÓBREGA – UFPE (Orientadora)

Prof. Dr. CÉZAR AUGUSTO CASAGRANDE – UFPE (Coorientador)

Prof. Dr. FLÁVIO EDUARDO GOMES DINIZ – UFPE (Examinador)

Prof. Dr. HUMBERTO CORRÉIA LIMA JÚNIOR – UFPE (Examinador)

“Ideias e somente ideias podem iluminar a escuridão”

Ludwig von Mises

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que já aconteceu em minha vida.

Agradeço à minha família que sempre me serviu como base moral e emocional.

Mais precisamente ao meu pai, João Antônio, por ser o homem que serve de principal referencial para minha vida, um homem trabalhador que sempre lutou para me dar o melhor, sempre se colocando em segundo plano.

À minha mãe Josefa Oliveira por ser meu apoio emocional, me ajudando nos meus momentos de maiores dificuldades, sempre preocupada em me oferecer o melhor.

À minha irmã Daffany Luana por me incentivar e também por ser um exemplo de dedicação.

Agradeço à minha namorada Renata Rocha por muitas vezes não me fazer desistir e ser uma companheira nos meus momentos de dificuldade.

Agradeço aos professores, primeiramente à minha orientadora, professora Ana Cecília Vieira da Nobrega, por ter se disponibilizado e contribuído no desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao meu coorientador professor Cézar Augusto Casagrande que também me ajudou bastante no decorrer deste trabalho.

Aos técnicos da UFPE Everton Alves, Fabiola França e Henrique pela disponibilidade, me ajudando em todos os processos desta pesquisa.

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso.

À empresa Polimix, especialmente ao funcionário Renato Silva, líder da unidade de Caruaru, pela doação realizada de parte do material usado neste trabalho.

Aos professores do CAA pela construção de grande parte dos meus conhecimentos no decorrer destes anos e por fazer parte da minha construção profissional, onde sei que levarei para o resto da minha vida.

RESUMO

A escória de cobre é um resíduo gerado no processo de purificação do cobre. Ele pode ser formado de duas maneiras, através do arrefecimento ao ar e vertido em água, este último gera um material granular, escuro, sólido, denso, de aparência semelhante a um agregado natural. Além disso, ele pode causar impactos ambientais e custos de descarte e armazenamento. Perante os fatos, avaliou-se a possibilidade da adição da escória de cobre em percentuais de 10, 20 e 30% da massa do agregado miúdo natural ao concreto. Tendo em vista o grande potencial da indústria da construção de absorver esses resíduos. Para isto foram estudadas as propriedades físico-químicas da escória e comparando-as ao agregado miúdo natural. Também foi comparado o concreto com as adições em relação ao concreto de referência (sem adição). Para determinar a dosagem do concreto de controle, utilizou-se o método racional de dosagem ABCP, e com isto após as correções encontrou-se o traço unitário em massa padrão. Para realizar os comparativos foram avaliadas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto, com as idades de 7 e 28 dias. Após a realização dos ensaios constatou-se que a resistência à compressão foi satisfatória para adição de 30%, mesmo com o aumento da massa específica do concreto e com a redução do consumo de cimento. Já do ponto de vista da durabilidade o concreto com idade de 28 dias, com adição de escória de cobre, apresentou uma pequena redução na absorção de água por imersão total, para os percentuais de 20 e 30%, como também para a absorção capilar em todas as porcentagens no período de 48 horas. Portanto reduziu a permeabilidade de água em seu interior, assim reduzindo a possibilidade da penetração de agentes agressivos ao sistema. Contudo a consistência apresentou uma redução para todas as adições de escória ao concreto. De maneira geral o concreto com 30% de adição de escória de cobre, apresentou resultados positivos.

Palavras-chave: Escória de cobre. Concreto. Reutilização. Agregado. Sustentável.

ABSTRACT

Copper slag is a residue generated in the process of copper purification. It can be formed in two ways, by cooling the air and pouring in water, the latter generates a dense, dark, solid, granular material that looks like a natural aggregate. In addition, it can cause environmental impacts and disposal and storage costs. Given the facts, the possibility of adding the copper slag in percentages of 10, 20 and 30% of the mass of the natural aggregate to the concrete was evaluated. Given the great potential of the construction industry to absorb such waste. For this, the physical-chemical properties of the slag were studied and compared to the natural aggregate. Also the concrete was compared with the additions relative to the reference concrete (without addition). To determine the dosage of the control concrete, the rational dosage method ABCP was used, and with this after the corrections was found the standard unit mass trait. In order to perform the comparatives, properties were evaluated in the fresh and hardened state of the concrete, with the ages of 7 and 28 days. After the tests, it was verified that the compressive strength was satisfactory for addition of 30%, even with the increase of the specific mass of the concrete and with the reduction of the cement consumption. From the point of view of durability, the concrete at the age of 28 days, with addition of copper slag, presented a small reduction in water absorption by total immersion, for the 20 and 30% percentages, as well as for the capillary absorption in all percentages in the period of 48 hours. Therefore, it reduced the permeability of water in the interior, thus reducing the possibility of penetration of aggressive agents into the system. However, the consistency showed a reduction for all additions of slag to concrete. In general, the concrete with 30% addition of copper slag showed positive results.

Keywords: Copper slag. Concrete. Reuse. Aggregate. Sustainable.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Curva de distribuição normal para resistência do concreto à compressão.....	24
Figura 2 –	Ensaio de tração na flexão.....	26
Figura 3 –	Diagrama de esforços solicitante.....	26
Figura 4 –	Ensaio de tração por compressão diametral.....	27
Figura 5 –	Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal.....	28
Figura 6 –	Fluxograma da metodologia experimental.....	44
Figura 7 –	Curva granulométrica do agregado miúdo.....	46
Figura 8 –	Curva granulométrica do agregado graúdo.....	48
Figura 9 –	Escória de cobre utilizada.....	49
Figura 10 –	Curva de Walz para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.....	51
Figura 11 –	Curva de inchamento da areia.....	54
Figura 12 –	Prensa Universal Shimadzu.....	58
Figura 13 –	Curva granulométrica da escória de cobre.....	62
Figura 14 –	Curva granulométrica da escória de cobre e da areia.....	62
Figura 15 –	Curva granulométrica da areia com e sem adições de escória de cobre.....	65
Figura 16 –	Abatimento do tronco de cone do concreto com adição de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%.....	66
Figura 17 –	Resistência média à compressão do concreto com as idades de 7 dias e 28 dias com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0,10, 20 e 30%.....	67
Figura 18 –	Resistência à compressão dos corpos de provas (CP) na idade de 7 dias para adição de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%.....	68
Figura 19 –	Resistência à compressão dos corpos de provas (CP) na idade de 28 dias para adição de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%.....	68
Figura 20 –	Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (Cc).....	70

Figura 21 –	Razão entre a resistência à compressão dos concretos a 7 e 28 dias pelo consumo de cimento por metro cúbico de concreto.....	70
Figura 22 –	Absorção média de água por imersão total para o concreto nas idades de 7 e 28 dias com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0, 10, 20 e 30%.....	71
Figura 23 –	Absorção média de água por capilaridade para o concreto com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0, 10, 20 e 30%, para a idade de 7 dias.....	72
Figura 24 –	Absorção média de água por capilaridade para o concreto com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0, 10, 20 e 30%, para a idade de 28 dias.....	72
Figura 25 –	Corpos de prova rompidos à compressão diametral para a idade de 7 e 28 dias, com adições de (a) 0%, (b) 10%, (c) 20% e (d) 30%, para determinar a distribuição de água no interior do concreto.....	73
Figura 26 –	Densidade de massa para as idades do concreto de 7 e 28 dias, para cada percentual de adição de escória de cobre (0%,10%, 20% e 30%).....	74
Figura 27 –	Razão da resistência à compressão dos concretos a 7 e 28 dias pela massa específica.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classes de resistência do concreto - grupo I.....	25
Tabela 2 –	Classes de resistência do concreto - grupo II.....	25
Tabela 3 –	Classes de agressividade ambiental (CAA).....	33
Tabela 4 –	Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	33
Tabela 5 –	Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = \text{mm}$	34
Tabela 6 –	Composição química da escória de cobre de diferentes origens, em porcentagem (%).....	35
Tabela 7 –	Slump e resistência do concreto a 7 e 28 dias.....	36
Tabela 8 –	Características químicas do CP V- ARI.....	45
Tabela 9 –	Características físicas do CP V- ARI.....	45
Tabela 10 –	Granulometria do agregado miúdo.....	46
Tabela 11 –	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	47
Tabela 12 –	Características físicas do agregado miúdo.....	47
Tabela 13 –	Granulometria do agregado graúdo.....	48
Tabela 14 –	Características físicas do agregado graúdo.....	49
Tabela 15 –	Estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto em função do diâmetro máximo característico do agregado e do abatimento da mistura.....	52
Tabela 16 –	Volume compactado seco de agregado graúdo por metro cúbico de concreto (V_b).....	53
Tabela 17 –	Traços unitários em massa.....	56
Tabela 18 –	Granulometria da escória de cobre e areia média.....	61
Tabela 19 –	Características físicas da escória de cobre e da areia.....	63
Tabela 20 –	Composição química da escória de cobre.....	64
Tabela 21 –	Inchamento da areia média.....	82
Tabela 22 –	Média da granulometria do agregado miúdo com adição de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%.....	82
Tabela 23 –	Resistência à compressão do concreto para adições de 0, 10,	

	20 e 30% de escória.....	83
Tabela 24 –	Absorção de água por imersão total.....	83
Tabela 25 –	Absorção de água por capilaridade a 7 dias.....	83
Tabela 26 –	Absorção de água por capilaridade a 28 dias.....	84
Tabela 27 –	Massa específica do concreto a 7 dias.....	84
Tabela 28 –	Massa específica do concreto a 28 dias.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a/c: Relação água cimento do concreto

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

Al₂O₃: Óxido de alumínio

As₂O₃: Trióxido de arsênio

C₂S: Silicato dicálcico

C₃S: Silicato tricálcico

C₄AF: Ferroaluminato tetracálcico

C_a: Consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto

CaO: Óxido de cálcio

C_b: Consumo de agregado graúdo por metro cúbico de concreto

C_c: Consumo de cimento por metro cúbico de concreto

CI: Coeficiente de inchamento da areia

Cl⁻: Íon cloreto

CO₂: Dióxido de carbono

CP V – ARI: Cimento Portland de alta resistência inicial

CuO: Óxido de cobre (II)

C_w: Consumo de água por metro cúbico de concreto

f_{cj}: Resistência média do concreto à compressão prevista para j dias

f_{ck}: Resistência característica do concreto à compressão

Fe₂O₃: Óxido de ferro (III)

h: Umidade

K₂O: Óxido de potássio

MgO: Óxido de magnésio

MoO₃: Trióxido de molibdênio

NaO₂: Superóxido de sódio

NBR: Norma Brasileria

O₂: Molécula de oxigênio

P₂O₅: Pentóxido de difósforo

Sd: Desvio padrão

SiO₂: Dióxido de silício

SO₃: Trióxido de enxofre

V_a: Volume do agregado miúdo

V_b: Volume do agregado graúdo

V_h: Volume úmido da areia

V_s: Volume seco da areia

ZnO: Óxido de zinco

γ_a: Massa específica da areia

γ_b: Massa específica da brita

γ_c: Massa específica do cimento

γ_e: Massa específica da escória de cobre

δ_b: Massa unitária da brita

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
2.	OBJETIVOS.....	20
2.1.	Objetivo Geral.....	20
2.2.	Objetivos Específicos.....	20
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
3.1.	Cimento Portland e sua hidratação.....	21
3.2.	Concreto de cimento Portland.....	22
3.2.1.	Propriedades no estado fresco.....	22
3.2.1.1.	<i>Trabalhabilidade.....</i>	22
3.2.2.	Propriedades no estado endurecido.....	23
3.2.2.1.	<i>Resistência à compressão.....</i>	23
3.2.2.2.	<i>Resistência à tração na flexão.....</i>	25
3.2.2.3.	<i>Resistência à tração por compressão diametral.....</i>	26
3.2.2.4.	<i>Módulo de elasticidade.....</i>	27
3.2.3.	Indicadores de durabilidade do concreto.....	28
3.2.3.1.	<i>Absorção de água por imersão total.....</i>	28
3.2.3.2.	<i>Absorção de água por capilaridade.....</i>	29
3.2.3.3.	<i>Porosidade.....</i>	30
3.2.3.4.	<i>Permeabilidade.....</i>	30
3.2.3.5.	<i>Resistência à penetração de íons cloreto.....</i>	30
3.2.3.6.	<i>Resistividade elétrica.....</i>	31
3.2.3.7.	<i>Carbonatação.....</i>	31
3.2.3.8.	<i>Resistência ao ataque ácido.....</i>	32

3.2.3.9.	<i>Exposição ao meio-ambiente</i>	32
3.2.4.	Escória de cobre.....	34
3.2.5.	Possíveis influências da incorporação da escória de cobre nas propriedades do concreto no estado fresco.....	35
3.2.5.1.	<i>Trabalhabilidade</i>	35
3.2.6.	Possíveis influências da incorporação da escória de cobre nas propriedades do concreto no estado endurecido.....	36
3.2.6.1.	<i>Resistência à compressão</i>	36
3.2.6.2.	<i>Resistência à tração na flexão</i>	37
3.2.6.3.	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	37
3.2.6.4.	<i>Módulo de elasticidade</i>	38
3.2.7.	Possíveis influências da incorporação da escória de cobre nas propriedades do concreto nos indicadores de durabilidade do concreto	38
3.2.7.1.	<i>Absorção de água por imersão total</i>	38
3.2.7.2.	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	39
3.2.7.3.	<i>Porosidade</i>	39
3.2.7.4.	<i>Permeabilidade</i>	40
3.2.7.5.	<i>Resistência à penetração de íons cloreto</i>	40
3.2.7.6.	<i>Carbonatação</i>	40
4.	ESTADO DA ARTE	42
5.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	44
5.1.	Materiais de partida	45
5.1.1.	Cimento Portland.....	45
5.1.2.	Agregado miúdo.....	45
5.1.3.	Agregado graúdo.....	47
5.1.4.	Escória de cobre.....	49

5.1.5.	Areia com adição de escória de cobre.....	50
5.1.6.	Água de amassamento.....	50
5.2.	Dosagem do concreto de referência.....	50
5.2.1.	Correção da relação água/cimento e areia utilizada.....	54
5.2.2.	Verificação experimental e correção do traço.....	55
5.2.3.	Moldagem dos corpos de prova.....	56
5.3.	Propriedades do concreto no estado fresco.....	56
5.3.1.	Consistência.....	56
5.4.	Propriedades do concreto no estado endurecido.....	57
5.4.1.	Resistência à compressão.....	57
5.4.2.	Absorção de água por imersão total.....	58
5.4.3.	Absorção de água por capilaridade.....	58
5.4.4.	Massa específica.....	59
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
6.1.	Escória de cobre.....	61
6.1.1.	Propriedades físicas.....	61
6.1.2.	Propriedades químicas.....	63
6.2.	Areia com adição da escória de cobre.....	65
6.3.	Concreto.....	65
6.3.1.	Propriedades do concreto no estado fresco.....	65
6.3.1.1.	<i>Consistência.....</i>	65
6.3.2.	Propriedades do concreto no estado endurecido.....	66
6.3.2.1.	<i>Resistência à compressão.....</i>	66
6.3.2.1.1.	<i>Razão entre a resistência à compressão e o consumo de cimento.....</i>	68
6.3.2.2.	<i>Absorção de água por imersão total.....</i>	71

6.3.2.3.	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	71
6.3.3.	Massa específica.....	73
6.3.3.1.	<i>Razão entre a resistência à compressão e a massa específica</i>	74
7.	CONCLUSÕES	76
8.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – ENSAIOS DOS AGREGADOS	82
	APÊNDICE B – ENSAIOS DOS CONCRETOS	83

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos gerados nas indústrias tornam-se uma ameaça em todo o mundo, a maneira correta de reduzi-la é o gerenciamento eficaz (VIJAYARAGHAVAN, JUDE e THIVYA, 2017). Uma forma de reduzir a geração de resíduos sólidos é a reutilização, diminuindo os custos de descarte e ainda os problemas ambientais (AL-JABRI, AL-SAIDY e TAHIA, 2011).

A construção civil pode impactar o meio ambiente de diversas maneiras, gerando grandes quantidades de resíduos sólidos, ter uma grande demanda de energia e recursos naturais, entre outros problemas. Mas por outro lado tem grande potencial para a reutilização e reciclagem de diversos tipos de resíduos gerados em diversos setores.

Os recursos naturais vêm se esgotando pelo mundo inteiro, contudo novos produtos estão sendo gerados por diversas indústrias e aumentando a geração de resíduos. A indústria da construção civil pode solucionar parte deste problema, podendo reutilizar os materiais de duas maneiras, uma delas é a incorporação das escórias industriais ao cimento Portland, a outra é a adição ou substituição como agregado na argamassa ou ao concreto, podendo ser parcial ou completa (AMBILY et al., 2015).

Esse reaproveitamento já vem ocorrendo no Brasil há alguns anos, alguns materiais, como a escória de alto forno, já vem sendo utilizada na fabricação de cimentos, como substituição parcial dele ou do agregado (MOURA, GONÇALVES e LEITE, 2009). Outros materiais também estão sendo utilizados como substituto parcial do cimento, como a sílica ativada, cinza volante de carvão e a cinza volante pulverizada (VIJAYARAGHAVAN, JUDE e THIVYA, 2017).

Para este trabalho o material escolhido a ser utilizado na incorporação como agregado miúdo artificial ao concreto, foi à escória de cobre em seu estado granulado, devido a grande produção do resíduo e as suas propriedades semelhantes ao agregado miúdo natural. São gerados cerca de 2,2 a 3 toneladas de escória de cobre a cada tonelada de cobre produzida (AMBILY et al., 2015).

A geração da escória de cobre está intrinsecamente ligada ao processo piro-metallúrgico da purificação do cobre. A formação da escória de cobre pode ocorrer de duas maneiras, a primeira é através do arrefecimento ao ar e a segunda vertendo-se em água, onde nessa última possui forma granulada, favorecendo a sua utili-

zação como agregado artificial (GORAI *et al.*, 2003 apud RESENDE, 2009). No Brasil estima-se que a produção de escória de cobre, em 2016, foi de aproximadamente 413 mil toneladas. A escória de cobre já é reaproveitada como material abrasivo para restauração de peças metálicas, removendo ferrugem e incrustações da superfície, utilizada em sub-base para asfalto e em massa asfáltica (PARANAPANEMA, 2016).

Neste trabalho optou-se por utilizar a escória de cobre como adição ao concreto, pois, o concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, possibilitando a absorção deste subproduto, consequentemente reduzindo possíveis impactos que possam ser gerados ao meio ambiente ao realizar o descarte e ainda reduzindo os custos de descarte e/ou armazenamento.

Para analisar a possibilidade de aplicação da escória ao concreto, foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto com adição, em relação a um concreto de referência (sem a adição da escória de cobre). Para a adição da escória de cobre utilizou-se como base a massa da areia; e a partir desta somou-se as porcentagens da escória ao concreto. As propriedades físicas e químicas da escória também foram analisadas e comparadas ao agregado miúdo natural.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da adição da escória de cobre ao concreto em percentuais de massa do agregado miúdo natural em relação ao concreto de referência (convenional até 50 MPa, sem adição de escória de cobre).

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar como a adição da escória de cobre ao agregado miúdo natural interfere nas propriedades do concreto no estado fresco;
- Avaliar como a adição da escória de cobre ao agregado miúdo natural interfere nas propriedades do concreto no estado endurecido;
- Analisar a aplicabilidade de realizar-se a adição de escória de cobre ao concreto.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Cimento Portland e sua hidratação

O cimento Portland foi criado pelo inglês Joseph Aspdin, onde foi patenteado em 1824. Na época, era comum construir na Inglaterra com pedras da ilha de Portland, que ficava ao sul do país, como a cor e a dureza da invenção se aproximavam dessas, ele deu à sua patente esse nome (GUIA BÁSICO DE UTILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND, 2002).

O cimento Portland é um pó de granulometria fina (normalmente < 100 micrometros), que ao ser misturado com água devido a reações químicas torna-se um material rígido, devido a suas propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, mesmo que logo após torna-se um material sólido e entre em contato com a água, ele não se desfará.

Há duas formas em que os compostos do cimento podem hidratar com a água, uma é chamada de verdadeira hidratação e a outra hidrólise. Na primeira ocorre a incorporação de algumas moléculas de água nos compostos, já na segunda ocorre a quebra das moléculas com a água. A solubilidade dos produtos hidratados do cimento em meio aquoso é baixa. No entanto o cimento hidratado adere fortemente ao cimento não hidratado. Uma possível explicação para este último caso é que os produtos recém-hidratados formem um envoltório que cresce pela reação da água onde penetra o filme circundante de produtos hidratados. Uma segunda alternativa é que os silicatos dissolvidos passam pelo envoltório e precipite como uma camada mais externa. Ou, ainda, uma terceira possibilidade é a precipitação da solução coloidal após ser alcançada a saturação e a hidratação continuar a ocorrer no interior da estrutura (NEVILLE, 2016).

Contudo, os produtos de hidratação diminuem de forma contínua, de modo que mesmo após um longo período ainda há uma quantidade considerável de cimento anidro. Aos 28 dias em contato com a água pode-se observar que a uma profundidade de apenas 4 µm, encontra-se grãos de cimento hidratados. Estima-se que a hidratação completa de cimento é possível para partículas inferiores a 50 µm. Através de análise por microscópio observou-se que não há evidências de penetração de água nos grãos de cimento de modo que hidrate os compostos mais reativos, como o silicato tricálcico (C_3S), que se encontram no centro do grão. Observou-se

que após bastante tempo que ainda existiam moléculas de C₃S e silicato dicálcico (C₂S) não hidratadas no cimento em grãos onde possuíam dimensões maiores. Os silicatos de cálcio hidratado e o aluminato tricálcico hidratado são os principais compostos hidratados, acredita-se que o Ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) se hidrate na forma de aluminato de cálcio hidratado e uma fase amorfa (CaO.Fe₂O₃.aq) e ainda que o óxido de ferro III (Fe₂O₃) em pequena quantidade esteja presente na solução sólida de aluminato tricálcico hidratado (NEVILLE, 2016).

3.2. Concreto de cimento Portland

Atualmente o concreto de cimento Portland é o material mais importante utilizado em elementos estruturais na construção civil, apesar de ser um material com descoberta relativamente recente, pode ser considerado como uma das maiores descobertas tecnológica da história do desenvolvimento da humanidade assim bem como de melhoria de qualidade de vida. O concreto é o segundo material mais utilizado pela humanidade, depois da água, ele foi descoberto no final do século XIX tendo seu uso intensificado no século XX, revolucionando o modo de construir e projetar, onde a evolução da construção sempre esteve associada ao desenvolvimento da civilização da história da humanidade. No Brasil, assim como em outros países, o concreto possui uma posição de destaque em relação a outros materiais (ANDRADE e HELENE, 2010).

O concreto de cimento Portland é um produto da mistura entre agregado miúdo, agregado graúdo, envolvidos por uma pasta de cimento, onde a pasta é composta basicamente por grãos de cimento e água. O concreto deve ser produzido de maneira correta para que possua todas as características necessárias para a aplicação na construção civil, onde após o endurecimento ele deve resistir a diversas ações de cargas solicitantes derivadas das condições de carregamento que o elemento estrutural esteja submetido (PEREIRA, 2016).

3.2.1. Propriedades no estado fresco

3.2.1.1. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade mais subjetiva do que física, onde o concreto apresenta características que se adequam ao tipo da obra, aos métodos de adensamento, de lançamento e acabamento que serão destinados à obra. A consistência é a propriedade física mais importante da trabalhabilidade, pois está relacionada à mobilidade da massa e da coesão entre os componentes. O concreto pode ter misturas diferentes para que se atinjam consistências variadas podendo este ser seco, úmido, plástico ou fluido. O que irá determinar a consistência do concreto é a natureza da obra ou a intensidade do adensamento (BAUER, 2010).

3.2.2. Propriedades no estado endurecido

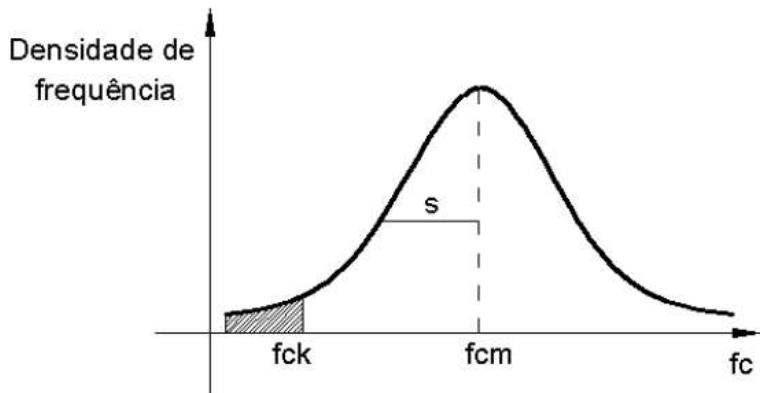
3.2.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão axial (f_c) é a característica mais importante do concreto. Para determinar a resistência à compressão do concreto é necessário realizar ensaios de compressão, onde são utilizados corpos de prova que são modelados segundo a NBR 5738:2015 e ensaiados segundo a NBR 5739:2018. O corpo de prova padrão do Brasil são no formato cilíndrico, com diâmetro de 10 cm, altura de 20 cm e tempo de hidratação para ensaio de 28 dias (MUZARDO, PINHEIRO e SANTOS, 2004).

No entanto, há vários fatores que pode levar a uma dispersão dos resultados obtidos nos ensaios, fatores esses que podem ser ocasionados devido à forma que se modela o corpo de prova, levando em consideração os cuidados ao confeccioná-lo. Portanto, a resistência à compressão do concreto é de natureza probabilística, onde as variações de resistência ocorrem devido a fatores randômicos, desde a fabricação até influências do sistema, como por exemplo: influências atmosféricas, mudanças do fornecimento da matéria-prima, capacitação dos colaboradores nas empresas, entre outros fatores (AURICH e GUTFREIND, 2009).

Ao realizar um grande número de ensaios, pode-se obter um gráfico que relaciona os valores de f_c com a quantidade de corpos de prova, podendo assim determinar um diagrama de frequência, a curva pode ser chamada de *Curva Estatística de Gauss* ou *Curva de Distribuição Normal* (Figura 1) (MUZARDO, PINHEIRO e SANTOS, 2004).

Figura 1 - Curva de distribuição normal para resistência do concreto à compressão.



Fonte: Muzardo, Pinheiro e Santos (2004).

Na curva podem-se obter dois valores importantes que é o f_{cm} (resistência média do concreto a compressão) e o f_{ck} (resistência característica do concreto a compressão). O f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c e o valor de f_{ck} é obtido pela expressão:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s \quad (1)$$

Onde “s” é o desvio-padrão que corresponde à distância entre a abscissa de f_{cm} e o ponto de inflexão da curva. Já o valor de 1,65 corresponde ao percentual de 5%, ou seja, 5% dos corpos de prova possuem $f_c < f_{ck}$ ou ainda 95% dos corpos de prova possuem $f_c \geq f_{ck}$. Portanto o f_{ck} é o valor da resistência que não possui 5% da probabilidade de ser alcançada (MUZARDO, PINHEIRO e SANTOS, 2004).

Segundo a NBR 8953:2015 os concretos são divididos em classes de resistência a compressão como apresentado nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Classes de resistência do concreto - grupo I.

Grupo I de Resistência	fck (MPa)
C 15	15
C 20	20
C 25	25
C 30	30
C 35	35
C 40	40
C 45	45
C 50	50

Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

Tabela 2 - Classes de resistência do concreto - grupo II.

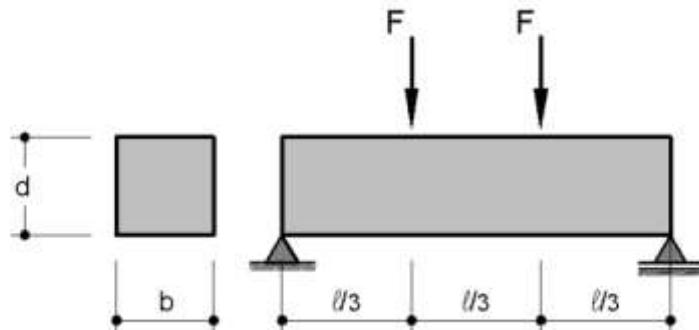
Grupo II de Resistência	fck (MPa)
C 55	55
C 60	60
C 70	70
C 80	80

Fonte: ABNT NBR 8953:2015.

3.2.2.2. Resistência à tração na flexão

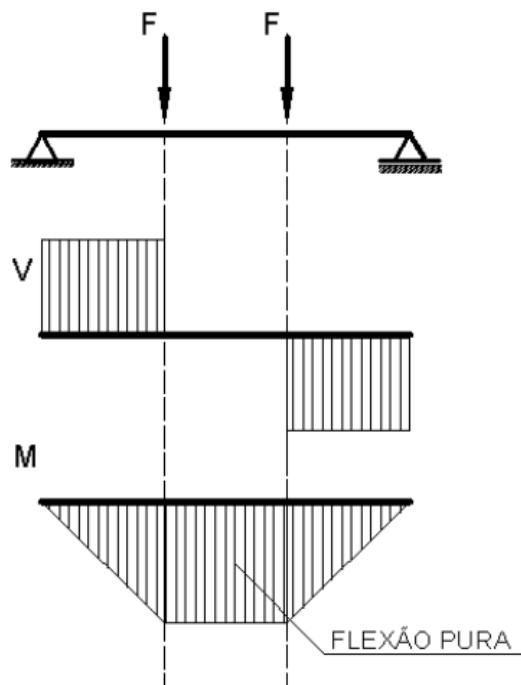
Para realizar este ensaio é necessário um corpo de prova de seção prismática, que é submetido à flexão com um carregamento simétrico, o carregamento é aplicado nos terços do vão, até a ruptura, como se vê na Figura 2. Ao analisar os diagramas de esforço cortante e momento fletor, pode-se observar que no local onde há cortante nulo existe um momento máximo, como se pode ver na Figura 3, podendo assim determinar o f_{ctm} (MUZARDO, PINHEIRO e SANTOS, 2004).

Figura 2 - Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Muzardo, Pinheiro e Santos (2004).

Figura 3 - Diagrama de esforços solicitantes.



Fonte: Muzardo, Pinheiro e Santos (2004).

O ensaio é realizado segundo a NBR 12142:2010 e os corpos de prova são moldados segundo a NBR 5738:2015.

3.2.2.3. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração na compressão diametral é o mais utilizado por ser o ensaio mais simples de ser executado e ainda utilizar o mesmo corpo de prova do en-

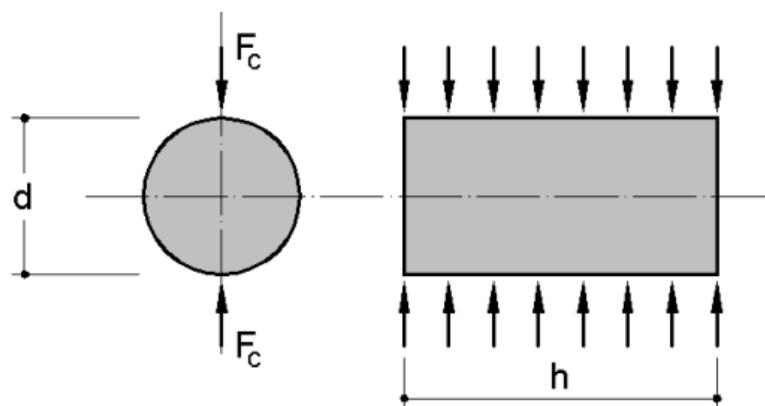
saio de compressão. A NBR 7222:2011 serve de referência para a realização do ensaio. Este ensaio também pode ser chamado de Ensaio Brasileiro, pois foi desenvolvido pelo brasileiro Lobo Carneiro, em 1942 (FREITAS, 2012).

Como pode-se perceber a ruptura neste ensaio ocorre por tração indireta, ocorrendo à ruptura por fendilhamento.

Quando uma carga linear atua sobre um corpo cilíndrico ou prismático colocado horizontalmente, surgem tensões de tração transversais, aproximadamente constantes no trecho médio da seção transversal, que, levados ao valor máximo produzem o fendilhamento da seção. O estado de tensões na peça é biaxial (AURICH, GUTFREIND, 2009, p.17).

A representação das cargas aplicadas pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 - Ensaio de tração por compressão diametral.

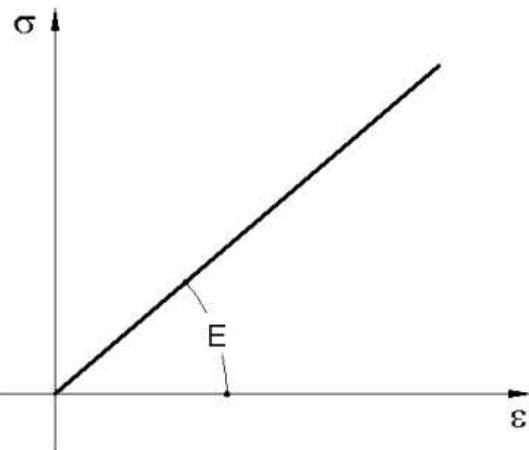


Fonte: Muzardo, Pinheiro e Santos (2004).

3.2.2.4. Módulo de elasticidade

Um aspecto de suma importância em um projeto estrutural é a relação entre a tensão e a deformação. A curva da relação entre a tensão e a deformação pode ser aproximada de uma reta (lei de Hooke), ou seja, $\sigma = E \cdot \epsilon$, onde “ σ ” é a tensão, “ E ” é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal e “ ϵ ” é a deformação específica (MUZARDO, PINHEIRO e SANTOS, 2004).

Figura 5 - Módulo de elasticidade ou de deformação longitudinal.



Fonte: Muzardo, Pinheiro e Santos (2004).

Para o módulo de deformação tangencial inicial (E_{ci}) se tem uma reta tangente somente na parte reta da curva ou quando simplesmente não houver uma parte reta na curva, essa reta sai da origem da curva (MUZARDO, PINHEIRO e SANTOS, 2004).

O módulo de elasticidade no concreto seja ele o tangente inicial, o secante, ou a qualquer outra tensão deve ser obtido segundo os ensaios da NBR 8522:2008.

3.2.3. Indicadores de durabilidade do concreto

3.2.3.1. Absorção de água por imersão total

A NBR 9778:1987 estabelece que o ensaio de absorção por imersão deve ser constituído por três amostras, podendo elas ser moldadas segundo a NBR 5738:2015, ou obtida a partir de extração de testemunhos. Para o ensaio do teste-munho ou peças endurecidas, cada uma delas deve possuir um mínimo de 2500 cm³ de concreto endurecido, com agregados de até 50 mm e no caso de agregados com dimensão máxima superior a 50 mm o volume deve ser de 10000 cm³. Os corpos de prova não podem apresentar óleo ou qualquer outro material aderido na sua moldagem.

Segundo a NBR 9778:1987 o ensaio determina o índice de vazios, a massa específica do concreto endurecido e a absorção de água, através da imersão. Para determinar o a absorção de água por imersão utiliza-se a expressão da Equação 2.

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

M_{sat} é a massa do corpo de prova saturado;

M_s é a massa do corpo de prova seco em estufa.

3.2.3.2. Absorção de água por capilaridade

A NBR 9779:1995 é utilizada no ensaio para a determinação da absorção de água, através da ascensão capilar na argamassa e no concreto. Como no ensaio anterior os corpos de prova de concreto devem ser moldados de acordo com a NBR 5738:2015 ou obtidos através de testemunhos extraídos de acordo com a NBR 7680:2015 e deve ser realizado com pelo menos três corpos de prova. Também em relação ao seu volume ele segue o mesmo padrão adotado no ensaio anterior e sob as mesmas condições.

O concreto é um material poroso e sua durabilidade é determinada de acordo com a facilidade que a água percorre através do material. A porosidade do concreto está relacionada com a sua composição primária, como o tipo de material, sua dosagem, a finura do cimento e a relação água/cimento, nesta última, quanto menor for menor será a porosidade do concreto.

A água serve para ativar as propriedades de resistência do concreto, mas em excesso evapora e deixa poros. As fundações, quando entram em contato com a água (lençol freático), permitem que através dos poros a água percorra em direção à superfície vencendo a ação da gravidade (por capilaridade). A água, mesmo em seu estado puro, pode gerar problemas à estrutura, se houver a presença de oxigênio e a despassivação do aço pode ocorrer a corrosão da armadura. A água ainda pode carregar agentes agressivos ao concreto ou ao aço, como por exemplo, sulfatos que expandem o concreto gerando fissuras, ou ainda, águas salinas que ocasionam a corrosão da armadura (KOHLS *et al.*,2017).

3.2.3.3. Porosidade

Como já foi mencionado, o concreto é um material poroso e a porosidade influí diretamente na sua durabilidade. Esta propriedade é determinada de acordo com a composição primária do concreto.

Segundo Bauer (2010, p.307), o concreto é um material poroso e seus vazios tem a sua origem devido a diversos fatores, como o excesso de água de mistura necessária para a obtenção da trabalhabilidade adequada, o ar que é introduzido a mistura tanto propositalmente, quanto ocasionalmente, a diminuição do volume devido à hidratação do cimento, entre outros fatores. Estas causas podem ser devido à elaboração insatisfatória ou à má dosagem do concreto, ocasionado, assim, a aparição de vazios que facilitam a permeabilidade.

3.2.3.4. Permeabilidade

Para Bauer (2010), a permeabilidade do concreto à água é expressa pela quantidade de água que atravessa uma superfície unitária durante uma hora sob uma pressão unitária ($1/m^2h$). A importância do grau de permeabilidade é justificada pela possibilidade da introdução de materiais agressivos à estrutura, podendo prejudicar a durabilidade da mesma.

A permeabilidade no concreto é algo difícil de estudar, pois há um grande número de parâmetros, como o efeito do inchamento do concreto, tornando-o menos impermeável, ou também a dissolução de sais solúveis e da cal que são transportados na direção da corrente, dentro dos canalículos. Por fim, eles se cristalizam por queda de pressão ou, eventualmente, pela evaporação da água. Portanto, a água que permeia no concreto é a mesma que pode vir a diminuir a permeabilidade.

O ensaio de determinação da permeabilidade é realizado em um corpo de prova cilíndrico ao qual é forçada a passagem de água sob pressão constante. A vazão que percola é proporcional à área do corpo de prova, bem como a um coeficiente de permeabilidade; e, inversamente proporcional à espessura.

3.2.3.5. Resistência à penetração de íons cloreto

Os pesquisadores em todo o mundo vêm estudando os ataques dos íons cloretos às armaduras do concreto armado, buscando obter uma melhor durabilidade maior das estruturas. As análises tentam melhorar a interface concreto-aço, visando à redução da entrada de agentes agressivos, como: íons cloretos (Cl^-), moléculas de oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2). Os íons cloretos podem entrar no concreto através do ambiente externo, principalmente em ambientes salinos e poluídos, ou pela utilização de água e/ou agregados contaminados (SANTOS, 2012).

A porosidade é outro fator que pode influenciar a penetração dos íons cloretos assim como a adição de aditivos.

Os cloretos podem ser adicionados involuntariamente ao concreto a partir da utilização de aditivos aceleradores do endurecimento, de agregados e de águas contaminadas, ou a partir de tratamentos de limpeza realizados com ácido muriático. Por outro lado, podem também penetrar no concreto ao aproveitarem-se de sua estrutura porosa (SOUZA e RIPPER, 1998, p. 38).

A NBR 6118:2014 recomenda o uso de cimento composto com adição de escória ou material pozolânico para prevenir os efeitos ocasionados pelos íons cloretos, efeitos esses que ocasionam a despassivação da armadura.

3.2.3.6. Resistividade elétrica

A condutividade do concreto varia com o tipo de material e principalmente dependendo da sua umidade. Para concretos de 300 kg de cimento por metro cúbico de dosagem, a resistência elétrica varia entre 10^4 e 10^7 ohms/cm² e entre idades de 1 a 800 dias, há um aumento de 1000 vezes em sua resistência. No entanto, mesmo após esse período, ao umidificar o concreto, a resistência retornará ao seu valor inicial de 10⁴ ohms/cm². Se comparado a outros materiais como o mármore que tem a resistência entre 10⁹ e 10¹¹ ohms/cm², ou a ardósia que tem a resistividade de 10⁸ ohms/cm², o concreto não chega a ser um condutor, mas também não é um isolante (BAUER, 2010).

3.2.3.7. Carbonatação

A carbonatação ocorre em ambientes onde o concreto é exposto a grandes concentrações de gás carbônico (CO_2). O dióxido de carbono penetra no concreto

através dos poros, dilui-se na umidade e forma o composto ácido carbônico (H_2CO_3). O ácido reage com alguns componentes do cimento hidratado que resulta em água e carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Apenas o carbonato de cálcio não é o problema para o concreto, mas a sua formação consome álcalis da pasta reduzindo o pH. O concreto possui um pH próximo de 13, mas ao carbonatar ele reduz para algo próximo de 8. A carbonatação inicia-se na superfície da estrutura e se propaga de fora para dentro, formando duas zonas com pH distintos, uma mais básica e a outra mais neutra, e essa zona adentra cada vez mais na estrutura, alcançando a armadura e causando a despassivação da mesma. Algumas medidas podem reduzir este problema, como: reduzir a relação a/c, logo diminuindo a porosidade, utilizar concretos de baixa permeabilidade e por último a cura do concreto é fundamental para reduzir microfissuras, dificultando a entrada do CO_2 (SANTOS, 2009).

3.2.3.8. Resistência ao ataque ácido

Os ácidos que são prejudiciais ao concreto podem ser de dois tipos os inorgânicos (nítrico, clorídrico, sulfídrico, carbônico, etc.) e também os ácidos orgânicos geralmente encontrados no solo (acético, láctico, esteárico, etc.). A ação dos íons hidrogênio forma produtos solúveis, que ao serem transportados para o interior do concreto o deteriora (SOUZA e RIPPER, 1998).

Em ambientes industriais o concreto pode sofrer a ação de ácidos e também de íons cloretos, que provocam a redução do pH em torno da armadura e dissolve a matriz cimentícia. Ao perder a sua massa o concreto perde sua resistência e aumenta sua porosidade, os efeitos são agravados ao penetrar na armadura (FERREIRA, LIMA e MEIRA, 2013).

3.2.3.9. Exposição ao meio-ambiente

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, o concreto exposto o meio-ambiente pode estar suscetível a agressividades de duas naturezas, física e química e independe das ações previstas no dimensionamento da estrutura como ações mecânicas, fluência, retração hidráulica, entre outras. Para os projetos estruturais deve-se levar em consideração a agressividade de acordo com o ambiente, e para isto utiliza-se a Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	
		Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
		Marinha	
III	Forte	Industrial	Grande
IV	Muito forte	Respingos de maré	Elevado

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

A ABNT NBR 6118:2014 determina a qualidade do concreto e a espessura do cobrimento da armadura em relação à agressividade do ambiente, para isto a norma estabelece respectivamente através das Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 5 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Elementos estruturais em contato com o solo		30	40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

3.2.4. Escória de cobre

A escória pode ser formada através de dois processos, um deles é o arrefecimento ao ar, onde o material fundido é descarregado a uma temperatura de 1000°C a 1300°C. Nesse caso, o processo de resfriamento é mais lento e forma um produto denso, cristalino e duro.

Já no segundo processo, o resfriamento é realizado vertendo-se o material líquido em água, resultando em um material granular amorfó; esta escória de cobre é a mais encontrada, sendo um vidro de silicato de ferro impuro com pequenas inclusões de cobre e sulfeto de cobre (GORAI, JANA e PREMCHAND, 2003).

A escória de cobre é utilizada como material abrasivo devido à sua forma granular e à sua dureza. Tem aspecto parecido com areia natural, no entanto possui a dureza e massa específica maior e, após ser utilizada, as propriedades abrasivas são reduzidas e o resíduo geralmente é armazenado.

A composição da escória de cobre varia de país para país. Em geral, a escória de cobre pode ter compostos como óxidos de ferro, alumínio, cálcio, sílica, entre outros que podem possuir atividade pozolânica ao ser incorporado ao cimento (RESENDE, 2009). Na Tabela 6, expõe-se o percentual de compostos da escória em alguns países.

Tabela 6 - Composição química da escória de cobre de diferentes origens, em porcentagem (%).

Nº	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	CuO	País
1	44,78	40,97	5,24	1,16	3,78	1,06	-	Irã
2	44,80	24,70	10,90	1,70	15,60	0,28	2,1	USA
3	49,50	34,51	2,20	1,48	6,55	1,20	0,43	Canadá
4	45,30	36,0	9,30	3,24	3,45	0,49	0,33	Austrália
5	62,00	26,00	2,50	3,70	-	-	1,40	Brasil
6	52,00	35,50	2,11	1,06	5,90	0,14	0,88	Japão
7	60,00	30,07	0,60	0,75	3,97	0,32	0,79	Espanha
8	53,72	34,30	7,91	0,94	3,83	3,02	-	Taiwan
9	36,00	31,00	4,00	-	6,00	-	0,33-0,80	Malásia
10	41,53	37,13	-	-	-	0,11	0,79	Chile
11	39,65	31,94	3,95	2,82	2,40	-	1,01	Turquia

Fonte: Behnood, Meyer e Shi (2008).

3.2.5. Possíveis influências da incorporação da escória de cobre nas propriedades do concreto no estado fresco

3.2.5.1. Trabalhabilidade

Segundo Al-Jabri *et al.* (2011), ao substituir o agregado miúdo pela escória de cobre, há um aumento significativo da trabalhabilidade. Em seu trabalho, o *slump* de controle com 100% de agregado miúdo (areia) foi de 65,5 mm, já o *slump* para a mistura de 100% de escória de cobre foi de 200 mm. Para os autores, este fato ocorre devido à baixa absorção de água da escória em relação a areia, onde há mais água livre que permanece na matriz de concreto após a hidratação.

No entanto, a exsudação e a segregação podem ser exacerbadas em misturas com uma dosagem maior de escória de cobre. A exsudação pode ser devida também à densidade do concreto, que aumenta com o aumento do percentual de escória.

Na Tabela 7 observa-se o *slump* e a densidade do concreto, de acordo com a percentagem de escória adicionada ao mesmo em Al-jabri *et al.* (2011).

Tabela 7 - Slump e resistência do concreto a 7 e 28 dias.

Dosagem Nº	Tipo de Mistura	Densidade (Kg/m ³)	Slump (mm)	Resistência (MPa)			
				(F _{cu}) ^a	(F _{cu}) ^b	(F _t) ^b	(F _{cr}) ^b
1	Controle (100% S)	2524	65,5	36,2	45,0	3,0	7,7
2	10% CS +90% S	2515	80	38,8	46,0	3,5	7,2
3	20% CS +80% S	2540	80	40,2	47,0	3,7	7,2
4	40% CS +60% S	2550	110	38,7	47,1	3,8	6,5
5	50% CS +50% S	2560	130	38,1	47,0	4,1	7,3
6	60% CS +40% S	2601	165	37,7	46,0	3,6	6,3
7	80% CS +20% S	2597	190	27,8	34,8	3,6	7,2
8	100% CS +0% S	2653	200	29,0	35,1	3,4	5,9

F_{cu} = resistência à compressão, F_t = resistência à tração, F_{cr} = resistência à flexão.

S=areia, CS=escória de cobre.

a = curado a 7 dias, b = curado a 28 dias.

Fonte: Al-jabri *et al.* (2011).

3.2.6. Possíveis influências da incorporação da escória de cobre nas propriedades do concreto no estado endurecido

3.2.6.1. Resistência à compressão

Moura *et al.* (2009) verificaram que houve um aumento na resistência à compressão ao substituir a areia por escória de cobre. Eles acreditam que foi devido à redução de água na mistura, reduzindo, assim, a relação água/cimento e, consequentemente, melhorando a distribuição dos grãos da escória que promoveu uma maior densificação da matriz.

Ainda, os autores observaram que para substituições da areia superiores a 40%, houve redução na resistência à compressão. Atribuem esse comportamento ao fato da granulometria da escória ser maior que a da areia, bem como esse alto teor de substituição pode ter provocado uma quantidade maior de zona de interface pasta-agregado, reduzindo a resistência.

Para Al-Jabri *et al.* (2011), os resultados obtidos e indicados na Tabela 3 apontam que a resistência do concreto para uma substituição de 40% de escória de cobre, que corresponde a dosagem 4, curado a 28 dias, foi a maior obtida. Por outro lado, eles observaram que a menor resistência obtida foi para a dosagem 7, que

possui 80% de escória de cobre, ficando abaixo da dosagem de controle. Eles acreditam que a queda na resistência é devido à água livre que é resultado da baixa absorção de água em relação à areia, aumentando a trabalhabilidade e reduzindo a resistência à compressão.

3.2.6.2. Resistência à tração na flexão

Moura *et al.* (2009) perceberam que a resistência à flexão aumentou até uma substituição de 40% de areia, em volume, pela escória de cobre; observando, também, que o ganho foi ainda maior quanto menor for a relação a/c. Há uma redução dos vazios devido à maior densificação da matriz, onde, abaixo de 40%, há um efeito positivo no ganho de resistência. O método de dosagem utilizado por eles foi o IPT/EPUSP como neste método há três traços um pobre, um médio e um rico, os traços de referência utilizados foram respectivamente 1:2,716:3,867:0,64; 1:2,039:3,163:0,50 e 1:1,363:2,495:0,41.

No entanto, para valores de substituição acima de 40% de areia pela escória de cobre, a redução na resistência à tração na flexão se dá devido à textura lisa da escória, pois há uma redução na aderência entre a pasta e o agregado.

Para Al-Jabri *et al.* (2011), os resultados encontrados na Tabela 7 para a tração na flexão de 28 dias, são superiores ao valor admissível de projeto. A massa dos materiais utilizados foram 416 kg de cimento, 721 kg de agregado miúdo, 338 kg de agregado graúdo de 10 mm, 790 kg de agregado graúdo de 20 mm e 207 kg de água. Logo o traço do concreto de referência utilizado foi: 1:1,733:0,812:1,899:0,498.

Rajasekar *et al.* (2019) verificaram que nos concretos de alto desempenho a resistência à flexão também aumentou com o aumento da incorporação da escória de cobre até 40%; já para valores superiores ao mencionado houve uma queda nessa resistência.

3.2.6.3. Resistência à tração por compressão diametral

Resende (2009) afirma que ao substituir a areia fina por escória de cobre até a porcentagem de 40% há um ganho de resistência à tração por compressão diametral; já para 50% de substituição essa resistência diminuiu. E, ainda, afirma que o

maior ganho de resistência foi para o concreto com 40% de escória curado a 28 dias, onde observou-se que o ganho em relação ao concreto de controle foi de 27%.

Ratificando, para Moura *et al.* (2009), o ganho de resistência no ensaio de compressão diametal teve resultados semelhantes ao de tração por flexão, havendo um ganho de resistência para a substituição de até 40%. Os traços do concreto de referência são os já citados no item 3.2.6.2.

Para substituições maiores, como em Andrade *et al.* (2017), há redução nos valores de resistência à tração por compressão diametal. O método de dosagem do concreto utilizado foi o ABCP, onde o traço para a amostra de referência foi igual a 1:2,05:0,65:1,36:0,52, foram utilizados dois agregados graúdos um do tipo brita 0 e o outro brita 1, proveniente de um granito triturado. A maior redução da resistência observada por esses autores foi para a substituição de 80% de areia por escória de cobre, onde houve uma redução de cerca de 33,5% em relação às amostras de referência sem substituição de escória. Já na mistura com 40% de substituição a perda de resistência foi de apenas 16,5%.

3.2.6.4. Módulo de elasticidade

Segundo Andrade *et al.* (2017), a substituição da areia pela escória de cobre causou uma pequena variação no módulo de elasticidade. Comparando com a mistura de referência, a mistura com 80% teve redução de 1,8% e para 100% da substituição, obteve o valor de 10,6% de redução no módulo de elasticidade. O traço utilizado aqui foi o mesmo citado no item 3.2.6.3.

3.2.7. Possíveis influências da incorporação da escória de cobre nas propriedades do concreto nos indicadores de durabilidade do concreto

3.2.7.1. Absorção de água por imersão total

Moura e Molin (2004) alegam que a absorção por imersão é menor para o concreto com adição de escória de cobre, principalmente com relações água/cimento menores. Eles acreditam que a absorção reduz, pois a porosidade também reduz com a adição de escória. Chegando a reduzir a absorção em até

13,5% para relação a/c de 0,6. Os traços para este estudo foram os mesmos utilizados por Moura *et al.* (2009) já citados em 3.2.6.2.

A absorção por imersão do concreto com escória de cobre é menor que a do concreto de referência. Contudo, há um limite de uso. Para uma substituição de 50% o concreto apresenta uma absorção maior que a do concreto com 40% de escória. Os resultados para a substituição de 40% são as melhores com relação à absorção. Por conseguinte, permite prever uma melhor durabilidade do concreto (RESENDE, 2009).

3.2.7.2. Absorção de água por capilaridade

Os resultados mostrados por Moura e Molin (2004) e Resende (2009) relatam que há uma melhora no desempenho da resistência capilar para concretos com adição de escória de cobre.

A taxa de absorção diminuiu em até 24,1% para relações de a/c de 0,6 em Moura e Molin (2004). Em Resende (2009), na mistura com 20% de escória houve um aumento na resistência de absorção capilar de aproximadamente 17%.

Para Moura e Molin (2004), as reduções estão relacionadas ao melhor preenchimento dos vazios com a adição de escória de cobre, sendo sua dimensão e a sua massa específica fatores determinantes para o favorecimento da densificação do concreto. Resende (2009), ainda, ratifica, dizendo que a melhoria é devido à diminuição na porosidade, que é influenciada pela incorporação da escória de cobre. No entanto, a resistência capilar diminui quando aumenta a relação a/c.

Já para concretos de alto desempenho, Rajasekar *et al.* (2019) dizem que houve um aumento na resistência a permeabilidade capilar ao substituir a areia por escória de cobre. Observa-se que para 60% de escória houve uma melhoria de 13%. No entanto, com 100% de substituição, foram obtidos os piores resultados.

3.2.7.3. Porosidade

Resende (2009) detectou através da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio que houve uma diminuição na porosidade, e ressalta que se deve ao maior preenchimento dos vazios, através da substituição da escória de cobre no concreto.

Ratificando, Rajasekar *et al.* (2019) afirmam que nos concretos de alto desempenho a redução da porosidade se deve ao fato de que a densidade é aumentada pela incorporação da escória, onde a mesma preenche os vazios e também pela melhoria na aderência da pasta com o agregado, reduzindo os microporos no concreto endurecido.

3.2.7.4. Permeabilidade

Moura (2000) observou que há uma diminuição na permeabilidade do concreto com escória de cobre, devido à diminuição da porosidade, que já foi mencionado anteriormente; logo, a escória preenche melhor os espaços e também distribui melhor os poros. Esta propriedade se dá pelo efeito *filler* e pela reação pozolânica, segundo Moura (2000).

3.2.7.5. Resistência à penetração de íons cloreto

Devido ao efeito da redução da porosidade, ocasionado pela incorporação da escória de cobre, que resulta em uma matriz mais densa, há uma diminuição da permeabilidade que dificulta a entrada de íons cloreto, portanto aumentando a durabilidade do concreto. Como mencionado por Moura (2000):

A maior densidade da matriz proporcionada pela escória de alto-forno aumenta a resistência do concreto à penetração de cloretos e ao ataque por sulfatos. Também permite maior controle da reação álcali-sílica, devido à redução na mobilidade dos álcalis (2000, p.10).

Já nos concretos de alta resistência, Rajasekar *et al.* (2019) mencionam que a penetração dos íons cloretos são menores para as percentagens de 60% a 70% de substituição de areia por escória de cobre, devido à microestrutura mais compacta, reduzindo a penetração em aproximadamente 12%.

3.2.7.6. Carbonatação

Os resultados dos ensaios realizados por Moura e Molin (2004) indicam que a adição da escória de cobre melhora o desempenho da resistência à carbonatação

do concreto. Aos 180 dias, a manifestação da carbonatação só foi perceptível nos corpos de prova sem adição, para relação a/c de 0,60. As evidencias são maiores aos 210 dias, onde ele afirma que os corpos de prova com adição de escória apresentam menores espessuras de carbonatação. E aos 240 dias os melhores resultados são para os concretos com adição de escória de cobre, chegando a reduzir a carbonatação em cerca de 80%, para relações a/c de 0,50 e 35,7% para relação a/c de 0,60. A redução da porosidade devido à incorporação da escória tem papel significativo na redução da carbonatação, pois dificulta a penetração do CO₂.

4. ESTADO DA ARTE

Devido ao excesso de resíduos gerados pela indústria metalúrgica e a grande capacidade da construção civil de absorver os resíduos gerados por esta, os pesquisadores entenderam que a escória de cobre pode ser utilizada na composição do concreto, assim, reduzindo os possíveis impactos que podem ser gerados ao meio ambiente. Nos diversos estudos realizados, a escória em sua forma granular, pode ser adicionada ao concreto ou substituir o agregado miúdo natural, como também pode ser substituir ou ser adicionada ao cimento, após a utilização dela como material abrasivo, já em outros estudos pode-se encontrar a sua utilização para produção do clínquer, matéria prima do cimento.

No Brasil, desde 1997, o professor Dr. Washington Moura vem estudando o comportamento da incorporação da escória de cobre ao concreto. Em sua tese publicada em 2000, mostra estes comportamentos decorrentes da substituição do agregado miúdo (areia grossa) pela escória e da adição da escória ao concreto. Através de ensaios de lixiviação e solubilidade realizados, conclui que o resíduo industrial não apresenta riscos ambientais. Também realizou ensaios das características do concreto em seu estado fresco (trabalhabilidade e massa específica) e no estado endurecido (massa específica, resistência à compressão axial e diametral, resistência à flexão, absorção, entre outros). Através dos resultados de seu trabalho é possível concluir que com um percentual de 20% de adição do material há um melhor desempenho no concreto.

Em diferentes locais do planeta pode-se encontrar estudos relacionados à utilização da escória de cobre na composição do concreto, seja na forma de agregado ou como componente substituto do cimento, como se pode encontrar em pesquisas de Behnood, Meyer e Shi (2008), onde eles analisam o comportamento da granulha de cobre como substituto parcial do cimento, para produção de concreto. O objetivo da pesquisa destes foi a redução do impacto na natureza, a redução de custos de produção do cimento e redução da emissão de CO₂. Neste caso o resíduo é utilizado como matéria prima para a produção de clínquer.

Pode-se também encontrar trabalhos internacionais como o de Al-Jabri, Al-Saidy e Taha (2011), onde trata dos efeitos da escória de cobre como agregado miúdo nas propriedades da argamassa e do concreto. Outro trabalho que pode ser ci-

tado é o de Ambily *et al.* (2015), que trata dos estudos sobre o concreto de alto desempenho com a incorporação da escória de cobre como agregado miúdo.

Rajasekar *et al.* (2019) avalia as propriedades do concreto de alta resistência com a incorporação da escória de cobre (resistência e a durabilidade). Nesta investigação ele afirma que o subproduto metalúrgico pode substituir de forma eficaz a areia de quartzo. Em seu trabalho ele observou que houve uma melhora significativa para a substituição do agregado em até 40%, a resistência à compressão aumentou cerca de 4%, a resistência à tração aumentou em média 5,74% e à flexão também houve aumento. Já em relação à durabilidade ele nota que houve melhoria na redução da absorção de água para percentuais de substituição entre 60 e 70%, reduzindo em até 11%, também observou aumento na resistência à penetração de íons cloretos, em até 12%.

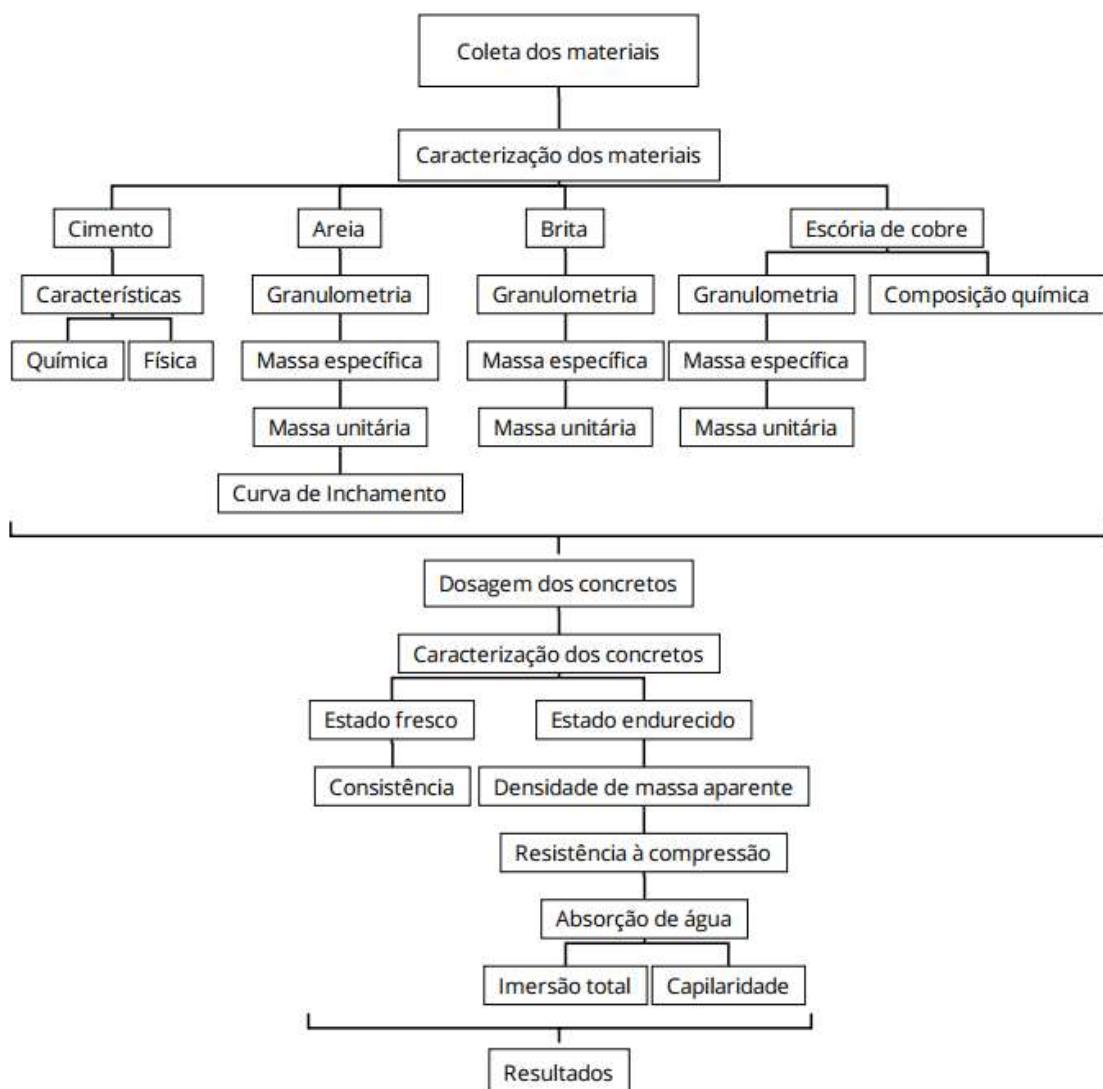
Outros estudos realizados por Moura e Molin (2004) mostram que a adição da escória de cobre ao concreto reduz a absorção de água por imersão. Os autores perceberam que, devido ao fato do material possuir maior número de finos e a sua massa específica ser mais densa que a da areia, preenche mais os vazios, deixando o concreto menos poroso; reduzindo, assim, a absorção por imersão em até 13,5% para relação a/c de 0,6.

Moura, Gonçalves e Leite (2009) viram que ao substituir a areia grossa até o percentual de 40% de escória, o concreto adquire resistência tanto à compressão, quanto à tração.

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento do concreto ao adicionar escória de cobre; com isto, a metodologia seguiu o fluxograma exposto na Figura 6, que vai desde a coleta dos materiais até a obtenção dos resultados.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia experimental.



Fonte: Autor (2019).

5.1. Materiais de partida

Os materiais utilizados foram selecionados em função de serem empregados na construção civil da cidade de Caruaru-PE. Os agregados foram adquiridos no comércio local. O cimento foi cedido por uma central dosadora de concreto da cidade; e, a escória de cobre, também é utilizada na região em obras de restauração de peças metálicas.

5.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CP V- ARI, cedido por uma central dosadora de concreto da região. É um cimento de alta resistência inicial, que é utilizado pela empresa para a produção do concreto estrutural e é bastante empregado em obras na cidade de Caruaru-PE. As características químicas e físicas dele estão dispostas nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 - Características químicas do CP V- ARI.

Composição Química	Média (%)
Perda ao fogo	5,03
Resíduo insolúvel	1,68
SO ₃	2,50
CaO	1,25

Fonte: Boletim técnico fornecido pela empresa Mizu Cimentos Especiais (2019).

Tabela 9 - Características físicas do CP V- ARI.

Resistência à compressão (MPa)				Finura					Expansibilidade	Pega		Consistência
1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	Massa específica (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	#325 (%)	#200 (%)	Quente (mm)	Início (min)	Fim (min)	(%)	
18,16	28,73	37,36	-	3,12	4.596,0	1,27	0,28	1,00	132,86	176,90	28,06	

Fonte: Boletim técnico fornecido pela empresa Mizu Cimentos Especiais (2019).

5.1.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo, adquirido como areia média, após peneirado em malha 4,75 mm, para realizar a remoção de materiais indesejados, foi levado à estufa (24h,

105°C), conforme a NBR 7810:1983 e NBR 7217:1987. As peneiras utilizadas foram a de série normal (como apresentado na Tabela 10). O peneirador utilizado foi o mecânico (Pavitest, Contenco, durante 5 minutos) em duplicata, com amostras de 1 kg cada.

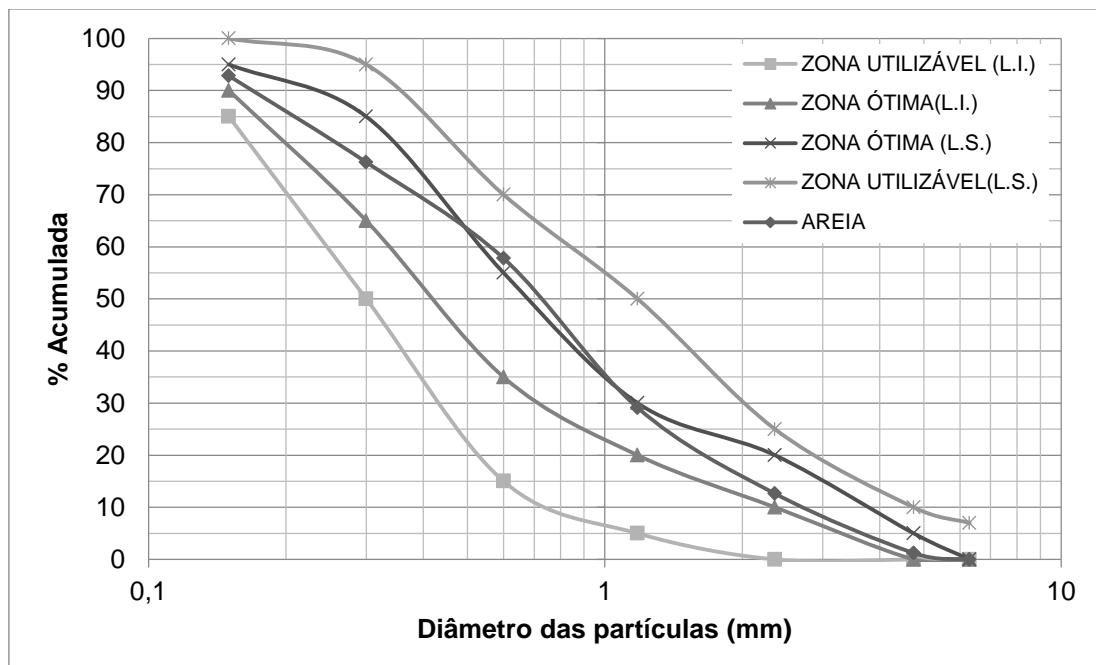
A granulometria da areia utilizada encontra-se na Tabela 10 e a curva granulométrica na Figura 7.

Tabela 10 - Granulometria do agregado miúdo.

PENEIRAS SÉRIE NORMAL (mm)	MÉDIA	
	% RETIDA	% ACUMULADA
9,5	0,00	0,00
4,75	1,23	1,23
2,36	11,40	12,63
1,18	16,48	29,11
0,6	28,68	57,78
0,3	18,46	76,24
0,15	16,58	92,82
Fundo	7,18	100,00
Soma	100,00	-

Fonte: Autor (2019).

Figura 7 - Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Autor (2019).

É possível observar que a areia utilizada se encontra numa zona ótima de utilização segundo a NBR 7211:2005, também podendo ser considerada uma areia média.

Tabela 11 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

PENEIRAS (ABNT NRB NM ISO 3310-1)	PROCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA			
	LIMITES INFERIORES		LIMITES SUPERIORES	
	ZONA UTILIZÁVEL	ZONA ÓTIMA	ZONA ÓTIMA	ZONA UTILIZÁVEL
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

NOTAS:

- 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT NBR 7211:2005.

Na tabela 12 se encontram mais alguns dados obtidos segundo a NBR 7211:2005 e NBR NM 52:2003. O módulo de finura confirma que a areia está numa zona ótima.

Tabela 12 - Características físicas do agregado miúdo.

Características físicas	Valor
Dimensão máxima característica (mm)	4,75
Módulo de finura	2,7
Massa específica (kg/dm ³)	2,525
Massa unitária (kg/dm ³)	1,499

Fonte: Autor (2019).

5.1.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo (brita de granito) foi levado à estufa para secagem a uma temperatura de aproximadamente 105°C, por 24 horas, conforme exige as NBRs 7211:2005, 7217:1987 e NM 248:2003. As séries de peneiras utilizadas foram a

normal e a intermediária (como apresentado na Tabela 13). O peneirador utilizado foi o mecânico. Também foram utilizadas duas amostras do material.

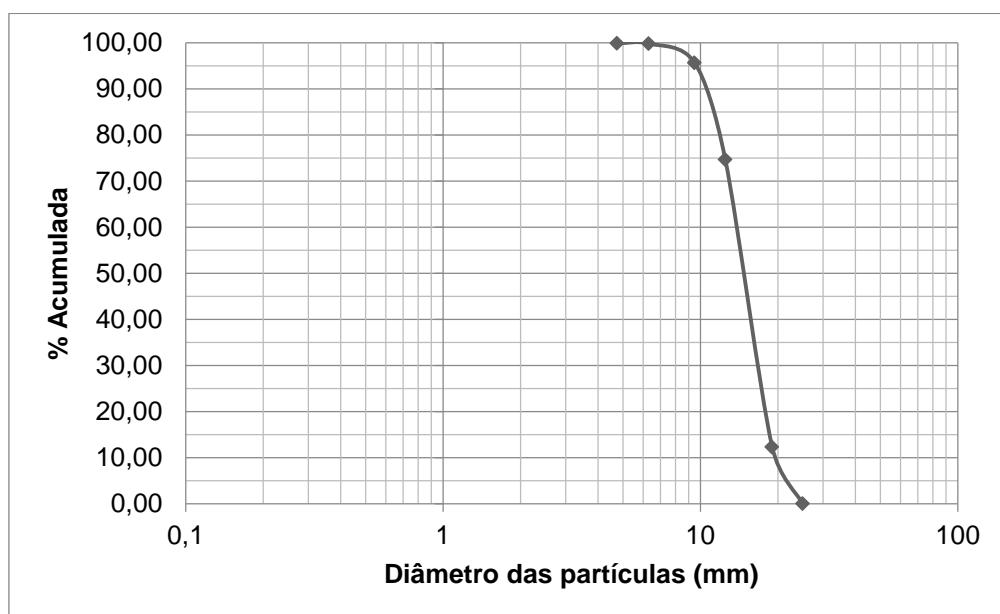
Abaixo se encontram a Tabela 13 com a granulometria do agregado graúdo e o a curva granulométrica (Figura 8) determinadas segundo a NBR NM 248:2003 e NBR 7217:1987.

Tabela 13 - Granulometria do agregado graúdo.

PENEIRAS SÉRIE NORMAL E INTER- MEDIÁRIA (mm)	MÉDIA	
	% RETIDA	% ACUMULADA
25	0,00	0,00
19	12,33	12,33
12,5	62,31	74,64
9,5	20,99	95,63
6,3	4,19	99,81
4,75	0,05	99,87
<4,75	0,13	100,00
Soma	100,00	-

Fonte: Autor (2019).

Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 14 se encontram mais alguns dados obtidos segundo a NBR 7211:2005 e NBR NM 53:2003.

Tabela 14 - Características físicas do agregado graúdo.

Características físicas	Valor
Dimensão máxima característica (mm)	25
Módulo de finura	7,07
Massa específica (kg/dm³)	2,601
Massa unitária (kg/dm³)	1,422

Fonte: Autor (2019).

5.1.4. Escória de cobre

A escória de cobre utilizada foi de uma empresa emblemática da região que trabalha com estruturas metálicas, onde o resíduo é gerado pela fabricação de peças metálicas. No presente estudo a escória de cobre foi aplicada em seu estado bruto, com aspecto que pode ser visto na Figura 9. A escória granular é utilizada para o jateamento e remoção da ferrugem em peças metálicas (material abrasivo).

Figura 9 - Escória de cobre utilizada.



Fonte: Autor (2019).

Com o emprego da técnica de fluorescência de Raios-X (FRX), realizada no Laboratório de Química da UFPE – Campus do Agreste, determinou-se a composição química da escória de cobre utilizada. Primeiramente, o material foi moído no moinho de alta rotação (PM 100 RETSCH a 850 rpm), durante 5 minutos a 500 rpm. E, em seguida, foi levado ao espectrômetro de Raios-X (Migaku, Primini). Onde se determinou a composição do material.

5.1.5. Areia com adição de escória de cobre

Também foram analisadas as características granulométricas da areia com a adição da escória de cobre em percentuais da massa da areia de 10, 20 e 30%. Para isto foram utilizadas como base às normas e metodologias já citadas no item 5.1.2.

Duas amostras de 1 kg foram misturadas ao percentual de 10%, e a cada peneiramento adicionou-se mais 10% da escória, até chegar aos 30%; isto foi feito para manter as características granulométricas das amostras iniciais da areia (sem adição).

5.1.6. Água de amassamento

A água utilizada para realizar a mistura é do abastecimento local (COMPESA), que a priori está livre de impurezas e que possui pH neutro.

5.2. Dosagem do concreto de referência

O método utilizado para determinar o traço foi o ABCP. A resistência desejada para o concreto de referência (sem adição da escória de cobre) foi de 25 MPa aos 28 dias.

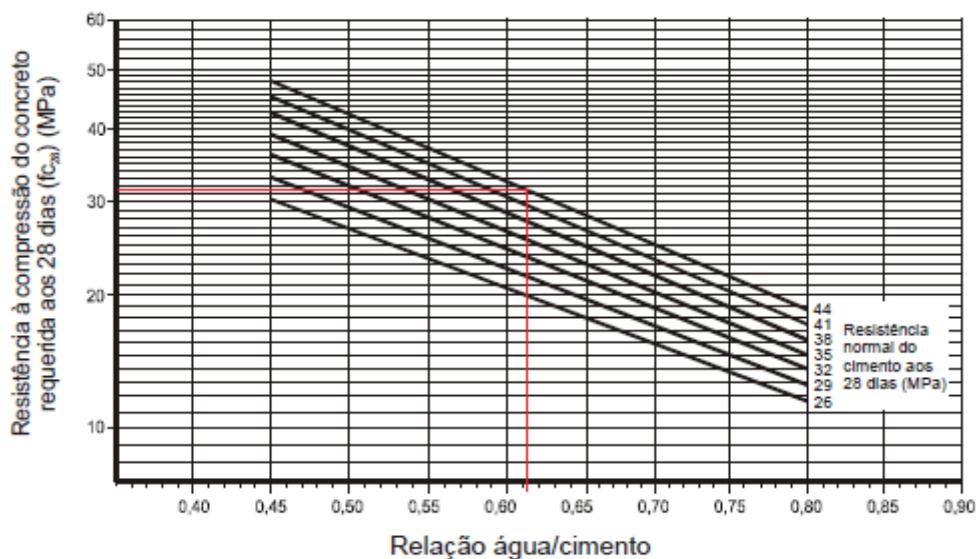
Para determinar a relação a/c (água/cimento) determina-se primeiramente a resistência f_{cj} segundo a NBR 12655:2015. Como os agregados, o cimento e a água foram medidos em massa e houve correção da umidade da areia, o desvio padrão (S_d) segundo a norma é de 4 MPa. Utilizando a Equação 3:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (3)$$

$$f_{c28} = 25 + 1,65 \cdot 4 = 31,6 \text{ MPa}$$

O boletim técnico fornecido pela empresa Mizu não determina a resistência do cimento aos 28 dias. A NBR 16697:2018 também não estabelece um valor definido de resistência aos 28 dias para o CP V – ARI; contudo, o boletim informa que a resistência média aos 7 dias é de 37,36 MPa, logo se estimou que a resistência aos 28 dias é de 44 MPa, o valor máximo existente na curva (Figura 10). Utilizando a curva de Walz (Figura 10) determinou-se a relação a/c.

Figura 10 - Curva de Walz para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.



Fonte: Rodrigues (1998).

Como se pode ver na Figura 10 a relação a/c obtida foi próxima de 0,61.

Continuando com o procedimento de dosagem racional do método ABCP, determinou-se o consumo de água por metro cúbico de acordo com a dimensão máxima característica do agregado graúdo e o abatimento de tronco de cone desejado. A Tabela 15 disponibiliza os dados para a determinação.

Tabela 15 - Estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto em função do diâmetro máximo característico do agregado e do abatimento da mistura

ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (mm)	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (mm)				
	9,5	19	25	32	38
40 a 60	220 L/m ³	195 L/m ³	190 L/m ³	185 L/m ³	180 L/m ³
60 a 80	225 L/m ³	200 L/m ³	195 L/m ³	190 L/m ³	185 L/m ³
80 a 100	230 L/m ³	205 L/m ³	200 L/m ³	200 L/m ³	190 L/m ³

OBSERVAÇÕES:

- 1 – Os valores acima são recomendados para concretos confeccionados com agregado graúdo britado (basalto), agregado miúdo (areia de rio), consumo de cimento por metro cúbico de concreto da ordem de 300kg/m³ e abatimento, medido pelo tronco de cone, entre 4mm a 100mm;
- 2 – Quando usado seixo rolado como agregado graúdo, os valores do consumo de água podem ser reduzidos de 5% a 10%;
- 3 – As areias pertencentes à zona 1 da NBR 7211 (muito fina), podem gerar aumentos de até 10% no consumo de água por metro cúbico de concreto.

Fonte: Rodrigues (1998).

Como o abatimento desejado está entre 80 e 100 mm, conforme a NBR 8953:2015, e o diâmetro máximo característico do agregado graúdo é de 25 mm, o consumo de água por metro cúbico (C_w) é de 200 L/m³.

As formulações expostas para a determinação do traço são provenientes do método de dosagem ABCP. O consumo de cimento por metro cúbico (C_c) determinou-se pela relação exposta na Equação 4.

$$C_c = \frac{C_w}{a/c} = \frac{200}{0,61} = 327,87 \text{ kg/m}^3 \quad (4)$$

Para determinar o consumo de agregado graúdo, primeiramente se encontrou o volume do agregado graúdo (V_b) através da Tabela 16.

Tabela 16 - Volume compactado seco de agregado graúdo por metro cúbico de concreto (V_b).

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

OBSERVAÇÃO: 1 - Os valores acima citados obtidos experimentalmente na Associação Brasileira de Cimento Portland.

Fonte: Rodrigues (1998).

Como o módulo de finura da areia é de 2,7, o volume determinado está entre 0,715 e 0,695, logo o valor de V_b será o exposto na Equação 5.

$$V_b = \frac{0,715+0,695}{2} = 0,705 \quad (5)$$

Através da expressão exposta na Equação 6 se determinou o consumo de agregado graúdo por metro cúbico (C_b).

$$C_b = V_b \cdot \delta_b = 0,705 \cdot 1,422 = 1002,51 \text{ kg/m}^3 \quad (6)$$

O volume de agregado miúdo (V_a) determinou-se pela expressão exposta na Equação 7, substituindo os valores dos consumos encontrados.

$$V_a = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + C_w \right) \quad (7)$$

$$V_a = 1 - \left(\frac{327,87}{3,12} + \frac{1002,51}{2,601} + 200 \right) = 0,309$$

O consumo de agregado miúdo (C_a) determinou-se através da expressão exposta na Equação 8.

$$C_a = V_a \cdot \gamma_a \quad (8)$$

$$C_a = 0,309 \cdot 2,525 = 781,44 \text{ kg/m}^3$$

Por fim para encontrar o traço unitário em massa, utilizou-se Equação 9, substituindo os valores já obtidos dos consumos.

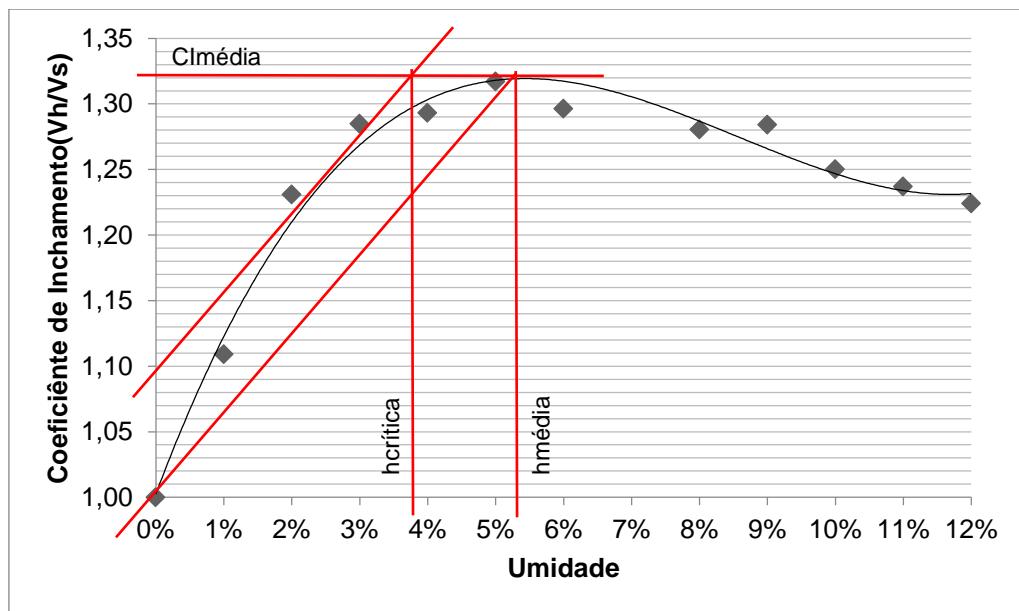
$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : a/c \quad (9)$$

$$1 : 2,38 : 3,06 : 0,61$$

5.2.1. Correção da relação água/cimento e areia utilizada

Para corrigir a relação a/c determinou-se a curva de inchamento da areia. A amostra ficou na estufa por 24 horas a uma temperatura de aproximadamente 105 °C; e, os teores de umidade adicionadas em porcentagem (%) foram de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12. No entanto, a umidade de 7% fugiu muito da curva apresentada e este ponto foi removido. Todo o procedimento foi realizado segundo a NBR 6467:2006. A curva de inchamento da areia utilizada está exposta na Figura 11.

Figura 11 - Curva de inchamento da areia.



Fonte: Autor (2019).

Para encontrar o coeficiente de inchamento foi necessário primeiramente se encontrar a umidade da areia utilizada para realizar a betonada. Com isto, utilizou-se o Speed Test e a umidade encontrada foi de 3,1%.

Com a ferramenta do Excel 2010 e através dos pontos encontrados da curva de inchamento encontrou-se um polinômio de grau três através da linha de tendência que se aproxima dos pontos encontrados. O polinômio encontrado foi o exposto na Equação 10.

$$CI = V_h/V_s = 725,09 \cdot h^3 - 186,1 \cdot h^2 + 13,799 \cdot h + 1,0027 \quad (10)$$

Substituindo a umidade encontrada (3,1%) na expressão polinomial (Equação 10) determinou-se o coeficiente de inchamento (CI).

$$\begin{aligned} CI &= V_h/V_s = 725,09 \cdot 0,031^3 - 186,1 \cdot 0,031^2 + 13,799 \cdot 0,031 + 1,0027 \\ CI &= V_h/V_s = 1,273 \end{aligned}$$

Com isto é possível corrigir o traço utilizando as Equações 11, 12 e 13.

$$C_{w\text{corrigido}} = C_w - C_a \cdot h = 175,77 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

$$V_{\text{acorrigido}} = V_a \cdot CI = 0,394 \quad (12)$$

$$C_{\text{acorrigido}} = V_{\text{acorrigido}} \cdot \gamma_a = 994,77 \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

Logo, a composição estimada em massa foi obtida pela Equação 14.

$$\frac{C_c}{C_c} \cdot \frac{C_{\text{acorrigido}}}{C_c} \cdot \frac{C_b}{C_c} \cdot \frac{C_{w\text{corrigido}}}{C_c} \quad (14)$$

$$1 : 3,03 : 3,06 : 0,54$$

5.2.2. Verificação experimental e correção do traço

Ao realizar a betonada com o traço determinado, o concreto não apresentou o abatimento desejado (entre 80 e 100 mm); com isto, foram adicionados cimento e água à composição. Chegou-se ao traço em massa exposto na Equação 15.

$$1 : 2,841 : 2,728 : 0,634 \quad (15)$$

Os valores do traço unitário em massa são respectivamente do cimento, areia, brita e água. Os traços utilizados para cada betonada são os apresentados na Tabela 17. No entanto a relação a/c só atende o critério de durabilidade para classe de agressividade I para concreto armado segundo a Tabela 4.

Tabela 17 - Traços unitários em massa.

Adição de escória de cobre	Cimento	Areia	Escória de cobre	Brita	Água
0%	1	2,841	0	2,723	0,634
10%	1	2,841	0,284	2,723	0,634
20%	1	2,841	0,568	2,723	0,634
30%	1	2,841	0,852	2,723	0,634

Fonte: Autor (2019).

5.2.3. Moldagem dos corpos de prova

O preparo do concreto foi realizado de acordo com a NBR 12655:2015, bem como as moldagens dos corpos de prova realizadas segundo a NBR 5738:2015. As dimensões dos corpos de prova são de 20 centímetros de altura pelo diâmetro de 10 centímetros e o adensamento foi realizado através de um vibrador de concreto mecânico.

Foram moldados seis corpos de prova para o ensaio de compressão, três para ensaio de absorção por imersão total e mais três para ensaio de capilaridade, isto para o padrão e para cada percentual de adição de escória de cobre (10%, 20% e 30%), também para duas idades do concreto (7 e 28 dias), totalizando 96 corpos de prova.

A escória de cobre foi adicionada ao concreto padrão como adição em porcentagem da massa do agregado miúdo, nos percentuais já citados.

O processo de cura dos corpos de prova foi o submerso em água com adição de óxido de cálcio (CaO).

5.3. Propriedades do concreto no estado fresco

5.3.1. Consistência

A consistência do concreto foi determinada pelo método do abatimento do tronco de cone, seguindo os preceitos da NBR NM 67:1996, como descrito abaixo:

- Foram umedecidos a placa e o molde;

- O molde foi preenchido em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura;
- O concreto no molde foi compactado com 25 golpes por camada, com a haste de socamento e os golpes foram distribuídos pela superfície das camadas;
- Os golpes só penetraram no máximo a camada inferior;
- Na camada superior o concreto ultrapassou a altura do molde onde se realizou o rasamento com a colher de pedreiro;
- O molde foi levantado na direção vertical cuidadosamente para não entrar em contato com o concreto e não interferir nos resultados;
- Logo em seguida o molde foi colocado ao lado do concreto desmoldado e com a haste e uma trena mediu-se a diferença de altura entre o concreto e o molde.

5.4. Propriedades do concreto no estado endurecido

5.4.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 5739:2018. O cálculo da resistência foi determinado de acordo com a seguinte expressão:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (16)$$

f_c é a resistência a compressão expressa em megapascal (MPa);

F é a força máxima alcançada, expressa em kilonewtons (KN);

D é o diâmetro do corpo de prova, expresso em centímetros (cm).

As dimensões dos corpos de prova já foram mencionadas no item 4.2.3 deste trabalho. Após a remoção dos corpos de prova da cura submersa eles foram levados ao ensaio de compressão. Foram utilizadas as idades de 7 e 28 dias para este ensaio. O capeamento foi realizado através do neoprene nas extremidades dos corpos de prova.

O equipamento utilizado foi a prensa Universal Servi Controlada de 2000 kN Shimadzu, disponibilizado pelo Laboratório de Construção Civil, da Universidade Federal de Pernambuco – Campos do Agreste (Figura 12).

Figura 12 - Prensa Universal Shimadzu.



Fonte: Autor (2019).

5.4.2. Absorção de água por imersão total

A absorção foi determinada segundo a NBR 9778:1987 como já citado no item 3.2.3.1 deste trabalho, onde os corpos de prova foram moldados nas dimensões já citadas com 20 centímetros de altura pelo diâmetro de 10 centímetros. Os corpos de prova, depois de retirados do processo de cura, foram levados à estufa, a uma temperatura aproximada de 105°C; onde permaneceram por três dias, até que a massa não mais variasse. Logo após o resfriamento a uma temperatura de aproximadamente 23°C, foram pesados e depois levados à água e submerso por mais três dias, para que os corpos de prova ficassem saturados. Em seguida, foram retirados, secos com pano úmido e pesados novamente. E, assim, determinou-se a absorção de água por imersão total utilizando a formulação já citada no item 3.2.3.1.

5.4.3. Absorção de água por capilaridade

Como já mencionado, este ensaio seguiu os preceitos da NBR 9779:1995. Os corpos de prova utilizados são os já citados no item 5.2.3, sendo o ensaio realizado

para os tempos de 3, 6, 24 e 48 horas. Foram levados à estufa a temperatura de aproximadamente 105°C pelo período de 24 horas até que a massa não mais variasse. Eles esfriaram a uma temperatura de aproximadamente 23°C e, após esfriamento, foram pesados e marcou-se (5±1) milímetros em cada um e, em seguida, levados a um recipiente onde ficaram afastados do fundo por uma malha metálica. Por fim, colocou-se água no recipiente até a marca dos corpos de prova já citada e a cada tempo previsto, já mencionado, foram realizadas as pesagens. Para determinar a absorção foi utilizada a expressão exposta na Equação 17.

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (17)$$

Onde:

C é a absorção de água por capilaridade, em g/cm²;

A é a massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água por um determinado tempo, em g;

B é a massa do corpo de prova seco em estufa e resfriado a temperatura de (23±2)°C, em g;

S é a área da seção transversal do corpo de prova que, em cm².

Ao completar 48 horas de ensaio foi realizado o rompimento à compressão diametral dos três corpos de prova para cada percentual de adição, a fim de se determinar a altura da distribuição de água no interior do concreto.

5.4.4. Massa específica

Para determinar a massa específica, dividiu-se a massa encontrada do corpo de prova, seco ao ar a uma temperatura de aproximadamente 23°C, pelo volume. O cálculo do volume do corpo de prova (V) encontra-se exposto na Equação 18.

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot (0,1m)^2 \cdot (0,2m) = 1,571 \text{ dm}^3 \quad (18)$$

Para isto, foram pesados três corpos de prova e se determinou sua média para cada percentual de escória adicionada. Os corpos de prova utilizados foram os mesmos utilizados para o ensaio de capilaridade.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão abordados os resultados obtidos neste trabalho e apresentadas algumas discussões relacionadas aos dados obtidos nesta pesquisa. Inicialmente será feita uma avaliação dos dados obtidos da escória de cobre. Em seguida serão avaliadas algumas características do agregado miúdo com a adição da escória de cobre nos percentuais de adição em massa (10%, 20% e 30%). Por fim será realizado um comparativo do comportamento das propriedades do concreto com a adição de escória de cobre em massa nas porcentagens já citadas, em relação ao concreto padrão.

6.1. Escória de cobre

6.1.1. Propriedades físicas

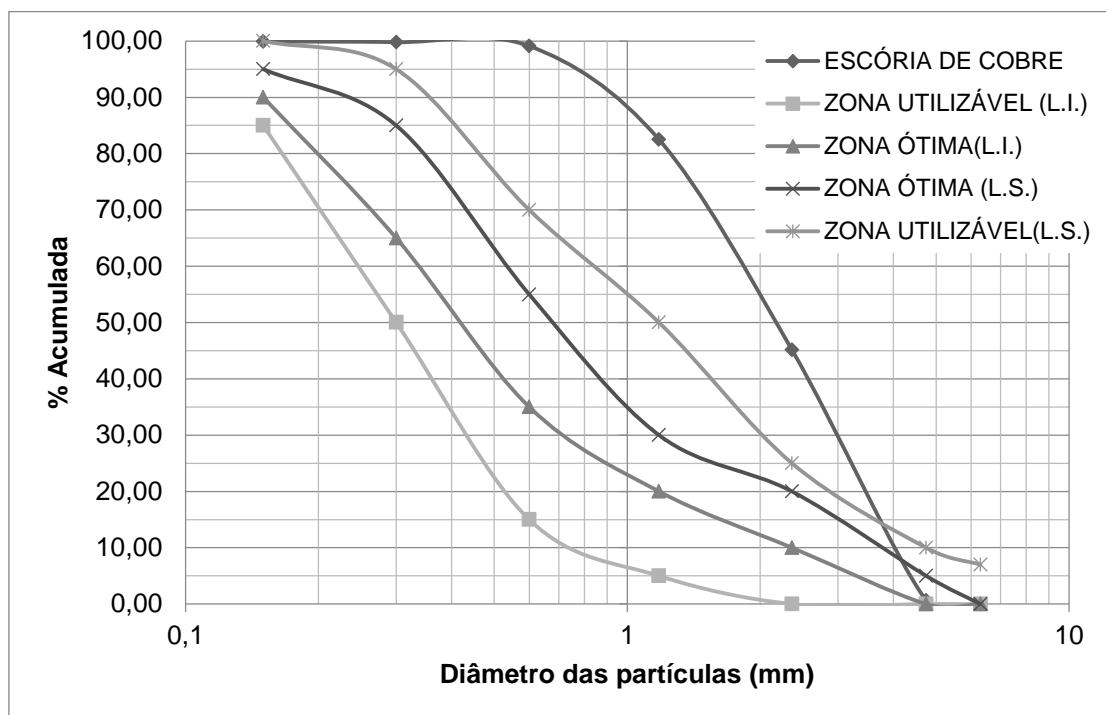
Os ensaios que foram realizados para areia também foram realizados para a escória de cobre seguindo as normas já citadas no item 5.1.2, pois ela está sendo incorporação ao sistema como um agregado miúdo. Na Tabela 18 pode ser visualizada a granulometria da escória de cobre e da areia e, na Figura 13, está exposta sua curva granulométrica.

Tabela 18 - Granulometria da escória de cobre e areia média

PENEIRAS SÉ- RIE NORMAL (mm)	MÉDIA			
	ESCÓRIA DE COBRE		AREIA	
	% RETIDA	% ACUMULADA	% RETIDA	% ACUMULADA
9,5	0	0	0	0
4,75	0,60	0,60	1,23	1,23
2,36	44,53	45,14	11,40	12,63
1,18	37,36	82,50	16,48	29,11
0,6	16,61	99,11	28,68	57,78
0,3	0,69	99,80	18,46	76,24
0,15	0,11	99,91	16,58	92,82
Fundo	0,08	100	7,18	100
Soma	100	-	100	-

Fonte: Autor (2019).

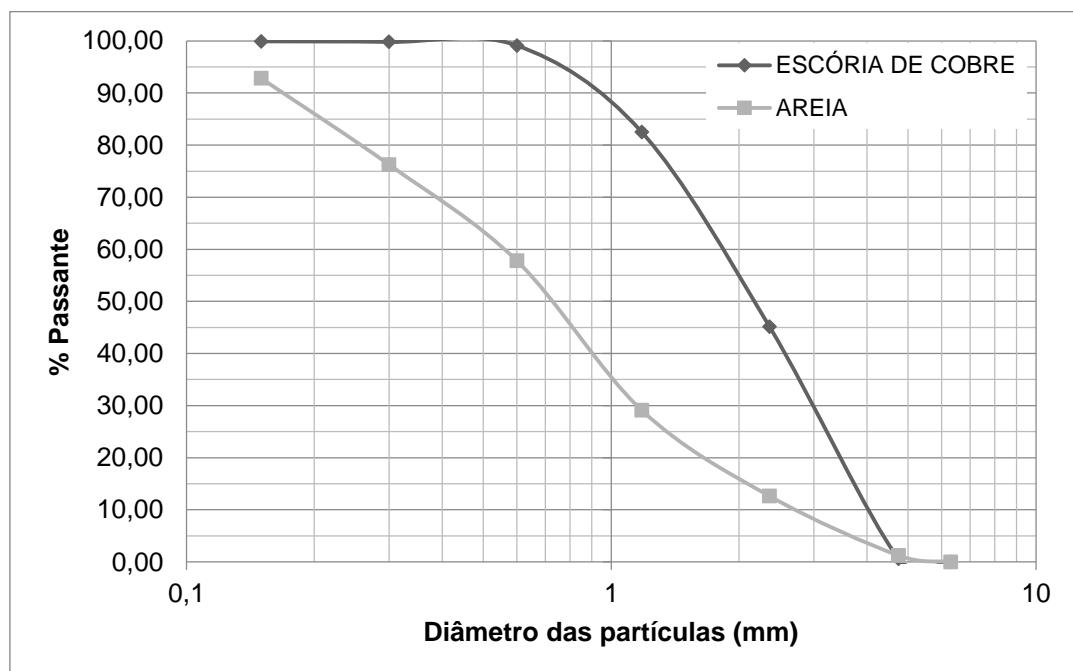
Figura 13 - Curva granulométrica da escória de cobre.



Fonte: Autor (2019).

Para melhor comparação na Figura 14 se encontra a curva granulométrica da areia e da escória de cobre juntas.

Figura 14 - Curva granulométrica da escória de cobre e da areia.



Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 19 há mais alguns dados das características físicas da escória de cobre comparadas à da areia.

Tabela 19 - Características físicas da escória de cobre e da areia.

Características físicas	Escória de cobre	Areia
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	4,75
Módulo de finura	4,27	2,7
Massa específica (kg/dm³)	3,814	2,525
Massa unitária (kg/dm³)	2,097	1,499

Fonte: Autor (2019).

Comparando a Tabela 11 com a Tabela 18 e analisando também a Figura 13 se pode observar que a escória de cobre se encontra acima do limite superior da zona utilizável. O módulo de finura obtido de 4,27 também é superior ao limite de 3,5 apresentado na Tabela 11, logo reitera que a escória de cobre se encontra acima do limite superior da zona utilizável.

Comparando os dados da Tabela 19 pode ser visto que a dimensão máxima característica da escória de cobre e da areia são iguais (4,75 mm), já a massa específica e a massa unitária da escória são bem superiores às da areia utilizada.

Analizando a Tabela 18 observa-se que as dimensões predominantes das partículas estão presentes nas peneiras de 1,18 mm e 2,36 mm, onde representam mais de 80% do material.

6.1.2. Propriedades químicas

Na Tabela 20 estão os resultados obtidos conforme a metodologia descrita no item 5.1.4 para a composição química da escória de cobre.

Tabela 20 - Composição química da escória de cobre.

Composição química	Resultado (%)
MgO	1,171
Al ₂ O ₃	3,968
SiO ₂	25,430
P ₂ O ₅	0,120
SO ₃	1,268
K ₂ O	1,011
CaO	2,415
Fe ₂ O ₃	60,459
CuO	1,469
ZnO	1,600
As ₂ O ₃	0,184
MoO ₃	0,904

Fonte: Autor (2019).

Analizando a Tabela 20, pode-se observar que a escória utilizada apresenta mais de 60% de Fe₂O₃ e mais de 25% de SiO₂, já na Tabela 6 se compila os compostos químicos de outras escórias de cobre utilizadas em diversos países. Pode-se observar que as porcentagens são próximas às obtidas, principalmente as que se referem as já obtidas no Brasil.

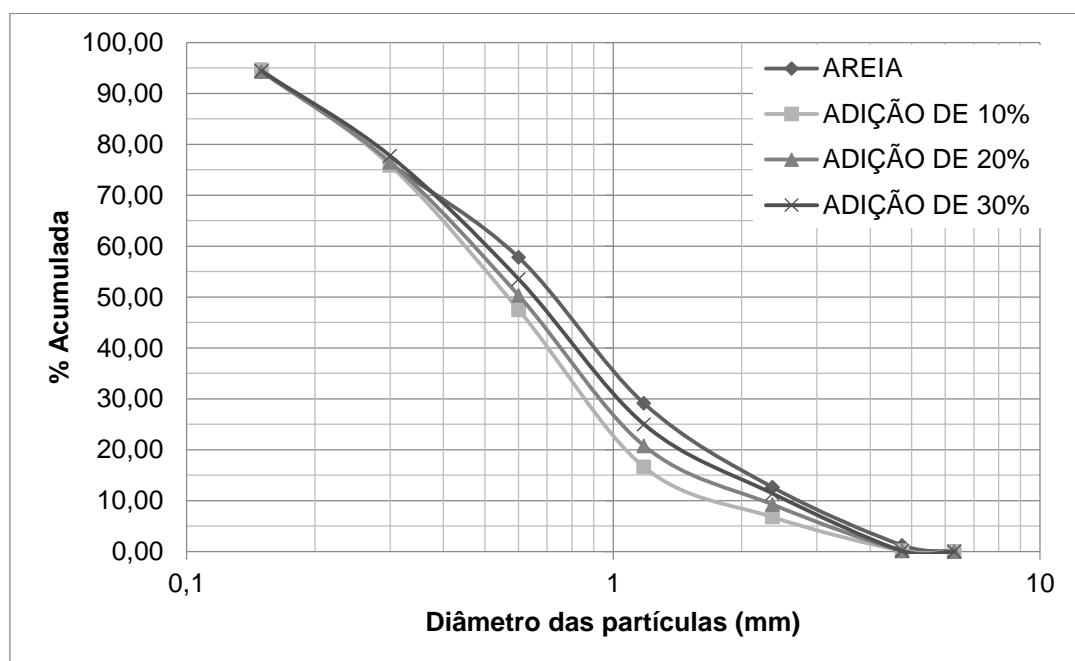
Adicionalmente, na NBR 12653:2014 se estabelece algumas exigências químicas para o material ser considerado pozolânico, um deles é que o material possua uma porcentagem mínima de 50% das somas dos compostos SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, logo realizando a soma destas porcentagens obteve-se o percentual de 89,9% do total.

A norma também exige que não se possua mais de 5% de SO₃ para ter probabilidade de ser um material pozolânico e, neste caso, a escória possui apenas 1,3%, e também não apresenta NaO₂, onde a norma recomenda no máximo 1,5%. Portanto, atende alguns requisitos químicos exigidos pela norma para ser considerado um material pozolânico. No entanto, para comprovar efetivamente esta propriedade são necessários mais alguns ensaios. Acredita-se que à granulometria de trabalho nesse TCC, não se tenha área superficial específica suficiente para atuar reativamente como material pozolânico.

6.2. Areia com adição da escória de cobre

Comparando os dados da Tabela 22 (no Apêndice 1), é possível observar que, mesmo ao adicionar a escória de cobre à areia nos três percentuais já citados, a diferença entre elas e a sem adição não é significativa. Portanto a mistura ainda se encontra na zona ótima de utilização. Também é possível notar ao observar a curva granulométrica na Figura 15.

Figura 15 - Curva granulométrica da areia com e sem adições de escória de cobre.



Fonte: Autor (2019).

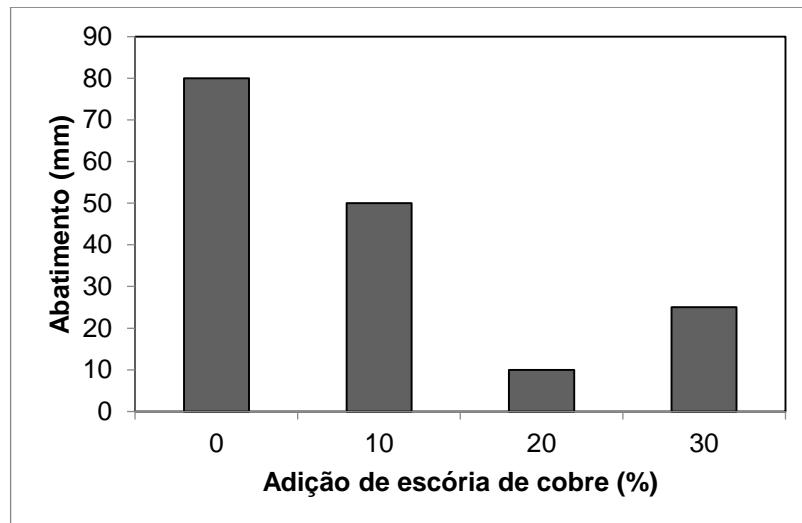
6.3. Concreto

6.3.1. Propriedades do concreto no estado fresco

6.3.1.1. Consistência

Como já mencionado no item 4.3.1 para determinar a consistência utilizou-se o método do abatimento do tronco de cone. Pode-se observar na Figura 16 o comportamento do concreto no estado fresco de referência e com as adições de escória de cobre.

Figura 16 - Abatimento do tronco de cone do concreto com adição de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%.



Fonte: Autor (2019).

Fazendo um comparativo entre os concretos é possível observar que ao adicionar a escória de cobre ao concreto padrão o abatimento teve uma diminuição nas porcentagens de 10% e 20%; isto ocorre provavelmente devido ao aumento de material seco que entra na composição, que absorveu parte da água.

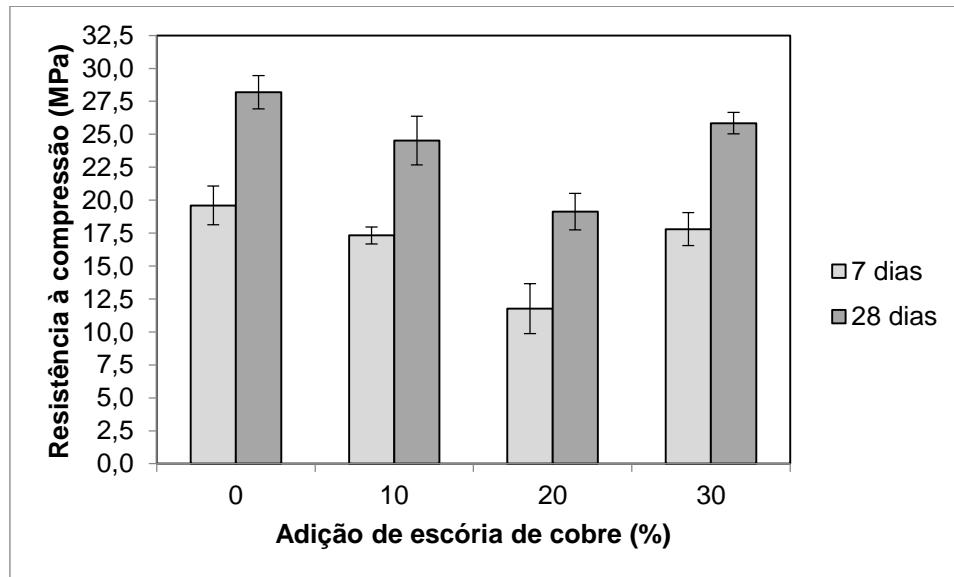
No entanto ao realizar o abatimento do concreto na porcentagem de 30% houve um aumento. Este fato pode ter ocorrido devido à geometria da escória que, por ter formato arredondado e massa específica mais elevada que a da areia, ocasionou um escorregamento entre partículas na interface argamassa/escória com concentrações mais elevadas da escória.

6.3.2. Propriedades do concreto no estado endurecido

6.3.2.1. Resistência à compressão

Como já mencionado no item 5.4.1 deste trabalho a norma utilizada para a determinação da resistência à compressão foi a NBR 5739:2018. Com isto, para cada adição de escória utilizada foram obtidos os resultados expostos na Figura 17 (7 e 28 dias de cura).

Figura 17 - Resistência média à compressão do concreto com as idades de 7 dias e 28 dias com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0,10, 20 e 30%.



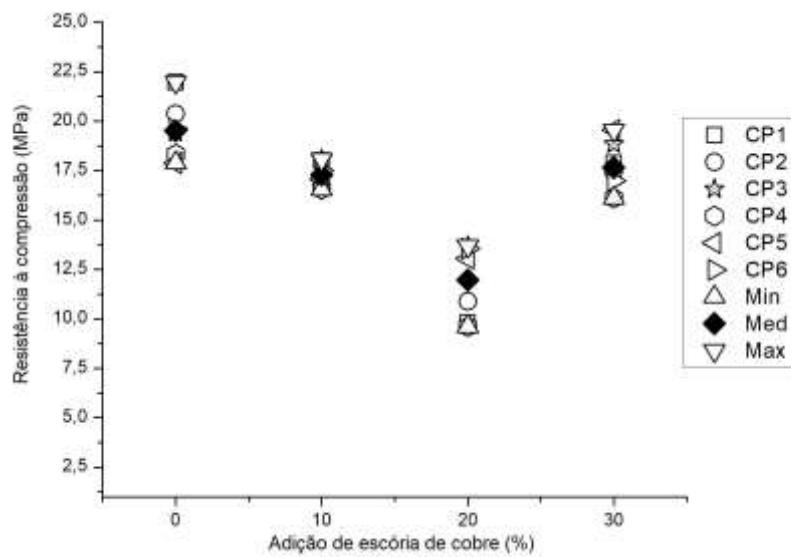
Fonte: Autor (2019).

Analizando os resultados obtidos, inicialmente há uma queda de resistência para o concreto com adição (com 7 e 28 dias), isso pode estar relacionado à redução do consumo de cimento.

No entanto o concreto com adição de 30% houve aumento de resistência em relação aos de 10% e 20%, isso pode ocorrer devido à dureza da escória ser superior ao da areia, como citado por Resende (2009), este fato também pode ocorrer por conta da diminuição da relação a/c e/ou pela maior compacidade dos grãos no concreto, como observado por Moura *et al.* (2009). A queda da resistência aos 20% pode ocorrer também devido a problemas na execução da betonada do concreto.

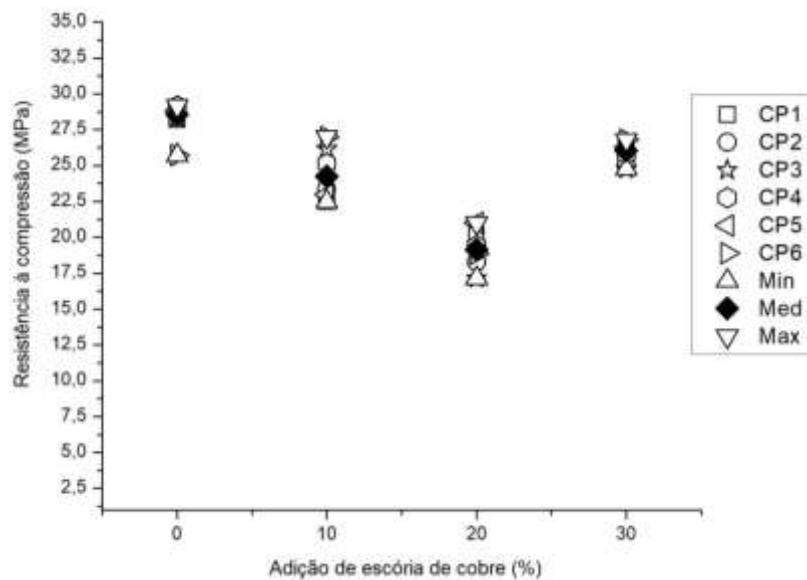
Também vale ressaltar que a redução da resistência do concreto com adição de 10 e 30% em relação ao concreto de referência é pequena, portanto, é um resultado positivo, levando em consideração, a priori, a redução do consumo de cimento. Nas Figuras 18 e 19 estão os resultados dos ensaios realizados para cada corpo de prova.

Figura 18 - Resistência à compressão dos corpos de provas (CP) na idade de 7 dias para adição de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%.



Fonte: Autor (2019).

Figura 19 - Resistência à compressão dos corpos de provas (CP) na idade de 28 dias para adição de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%.



Fonte: Autor (2019).

6.3.2.1.1. Razão entre a resistência à compressão e o consumo de cimento

O consumo de cimento é determinado pela expressão exposta na Equação 19 de Helene e Terzian (1993).

$$C_c = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + a/c} \quad (19)$$

Onde:

C_c é o consumo de cimento, expresso em kg/m³;

γ_c é a massa específica do cimento, expressa em kg/dm³;

γ_a é a massa específica da areia, expressa em kg/dm³;

γ_b é a massa específica da brita, expressa em kg/dm³;

a é o teor da massa de areia pela massa do cimento;

b é o teor da massa de brita pela massa de cimento;

a/c é a relação de água por cimento;

Para determinar o consumo de cimento de acordo com o percentual de escória adicionado a formulação foi modificada, como apresentada na Equação 20.

$$C_c = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + \frac{a.P}{\gamma_e} + a/c} \quad (20)$$

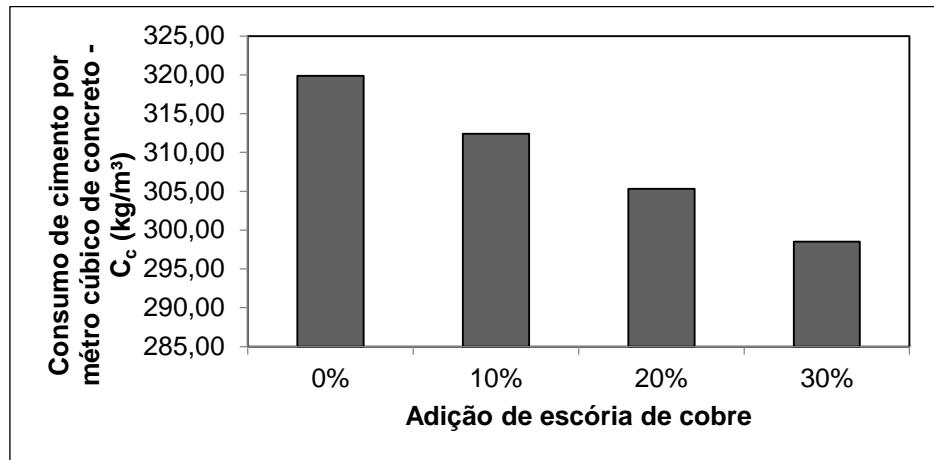
Onde:

P é o percentual de escória de cobre adicionado à composição, em %;

γ_e é a massa específica da escória de cobre, expressa em kg/dm³.

Logo, o gráfico exposto na Figura 20 mostra o comportamento do consumo de cimento para cada tipo de concreto nas adições de 0, 10, 20 e 30% de escória.

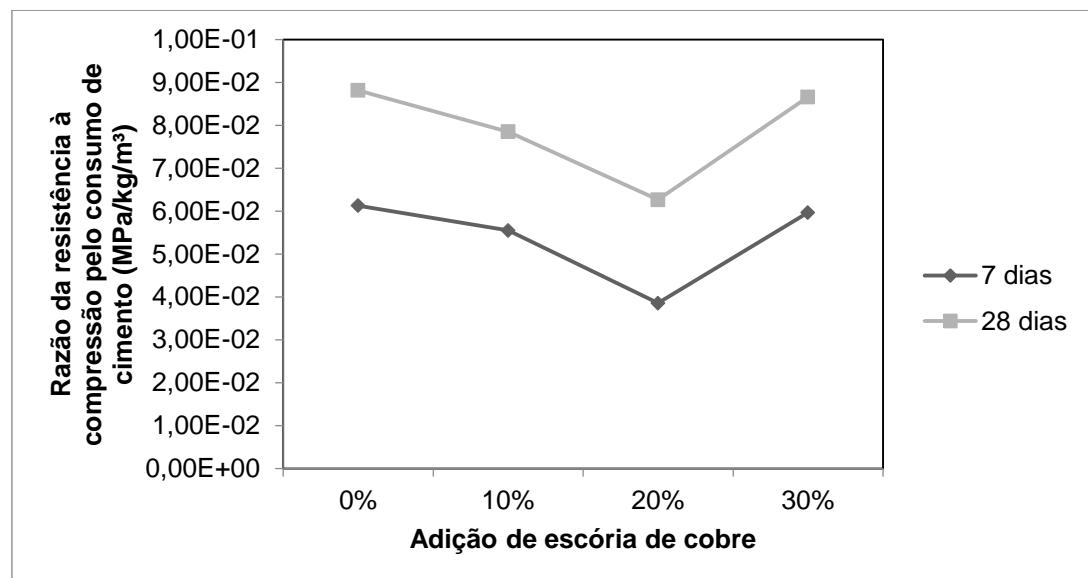
Figura 20 - Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (C_c).



Fonte: Autor (2019).

Fazendo a razão da resistência à compressão a 7 e 28 dias, pelo consumo de cimento foi obtido o gráfico exposto na Figura 21.

Figura 21 - Razão entre a resistência à compressão dos concretos a 7 e 28 dias pelo consumo de cimento por metro cúbico de concreto.



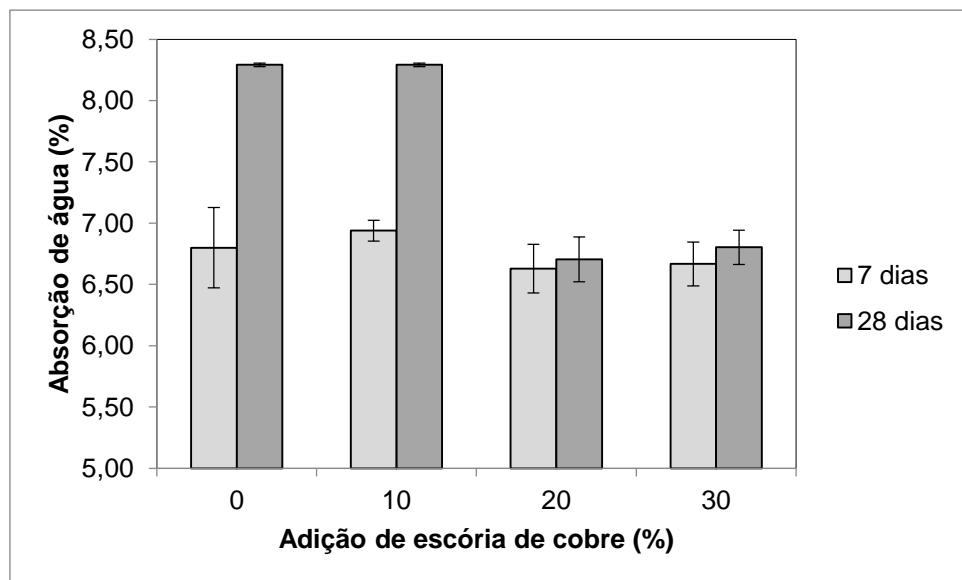
Fonte: Autor (2019).

Observa-se através da figura 21 que a razão da resistência à compressão para a adição de 30% pelo consumo de cimento por metro cúbico de concreto, em relação ao concreto padrão, tanto para idade de 7 dias como para a de 28 dias, mostra resultado semelhante ao padrão. Portanto é possível observar que para o consumo de cimento a resistência se aproxima da resistência de referência.

6.3.2.2. Absorção de água por imersão total

Na Figura 22 é possível observar o comportamento do concreto em relação à absorção de água, segundo os procedimentos descritos nos itens 3.2.2.1 e 5.4.2 deste trabalho. Na figura se observar que não há uma variação tão expressiva da absorção de água para os concretos com adição de 10, 20 e 30% comparados ao concreto padrão para a idade de 7 dias. Já para a idade de 28 dias houve uma pequena redução de absorção para os percentuais de 20 e 30%. Isso pode ocorrer devido ao fato de que a escória de cobre possui partículas maiores a da areia, este fato pode ser observado comparando os dados da Tabela 18. Apesar de não preenchendo os espaços vazios na estrutura do concreto (*efeito filler*), há um preenchimento dos vazios com as partículas maiores, havendo uma melhor acomodação dos grãos. Assim ocasionando uma maior densificação da matriz.

Figura 22 - Absorção média de água por imersão total para o concreto nas idades de 7 e 28 dias com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0, 10, 20 e 30%.

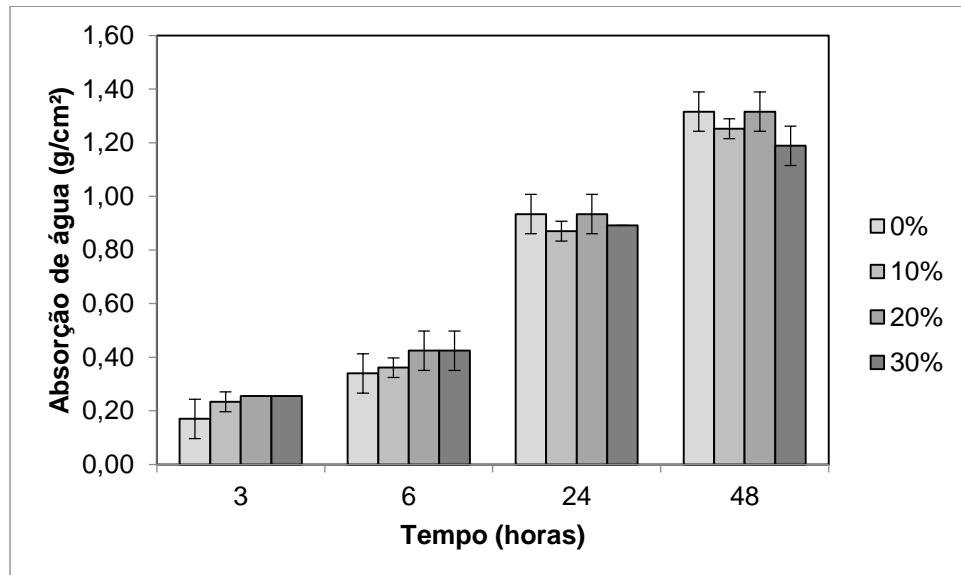


Fonte: Autor (2019).

6.3.2.3. Absorção de água por capilaridade

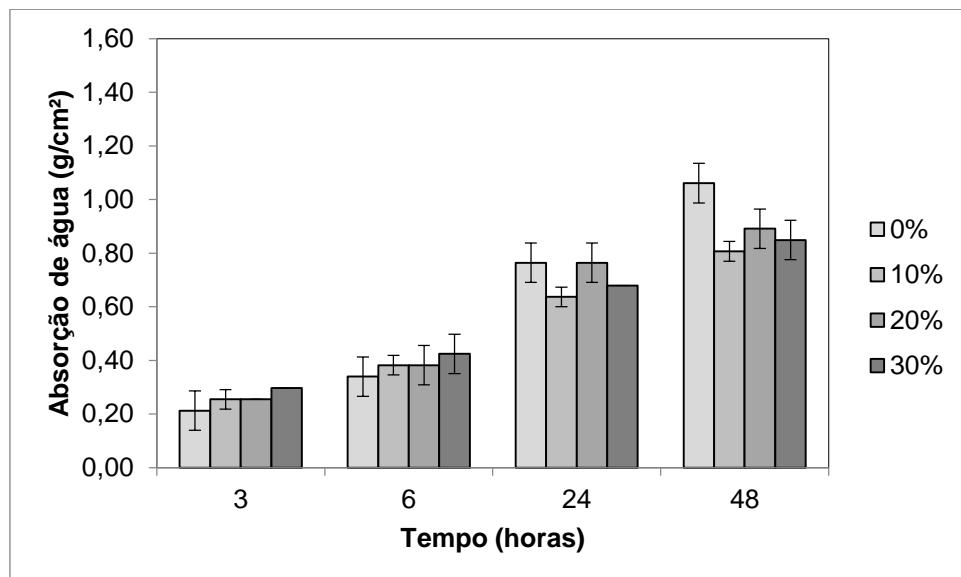
Nas Figuras 23 e 24 é possível observar os resultados obtidos através do ensaio de capilaridade para os períodos de tempo de 3, 6, 24 e 48 horas, nos concretos com adições de escória de cobre de 0, 10, 20 e 30%, para a idade de 7 e 28 dias.

Figura 23 - Absorção média de água por capilaridade para o concreto com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0, 10, 20 e 30%, para a idade de 7 dias.



Fonte: Autor (2019).

Figura 24 - Absorção média de água por capilaridade para o concreto com adição de escória de cobre nas porcentagens de 0, 10, 20 e 30%, para a idade de 28 dias.

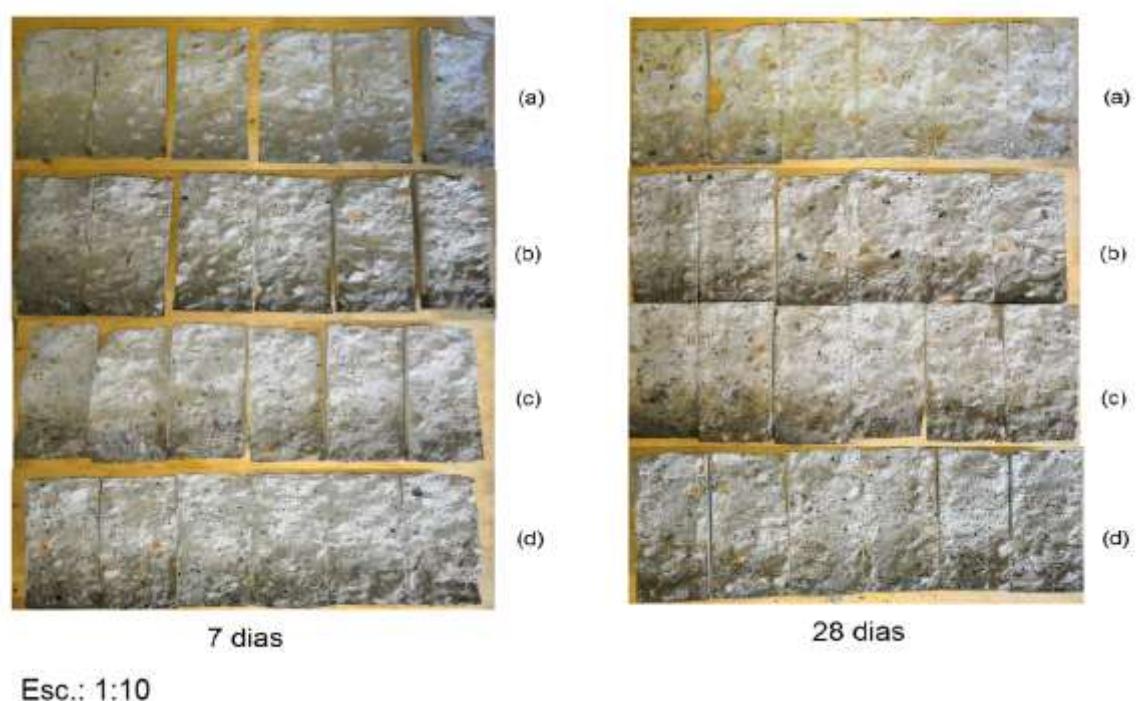


Fonte: Autor (2019).

Levando-se em conta o desvio-padrão, não houve alterações significativas, para a idade de 7 dias, na absorção de água capilar quando da adição da escória de cobre em 10, 20 ou 30%. No entanto para a idade de 28 dias houve uma redução mais significativa da absorção capilar, às 48 horas de ensaio, como se pode observar na Figura 24. Esse fato é positivo do ponto de vista de comportamento do sistema, melhorando as propriedades de transporte de água e agentes agressivos quando da adição, de forma que contribui para a consolidação do uso da escória de co-

bre como areia artificial. O comportamento de manutenção da densificação da matriz observado quando da absorção de água por imersão foi aqui ratificado. Quando se compilam as imagens dos corpos de prova rompidos à compressão diametral, com as alturas atingidas pela água na Figura 25. Como se pode ver na Figura 25, a elevação da água no interior do concreto é visualmente muito semelhante.

Figura 25 - Corpos de prova rompidos à compressão diametral para a idade de 7 e 28 dias, com adições de (a) 0%, (b) 10%, (c) 20% e (d) 30%, para determinar a distribuição de água no interior do concreto.

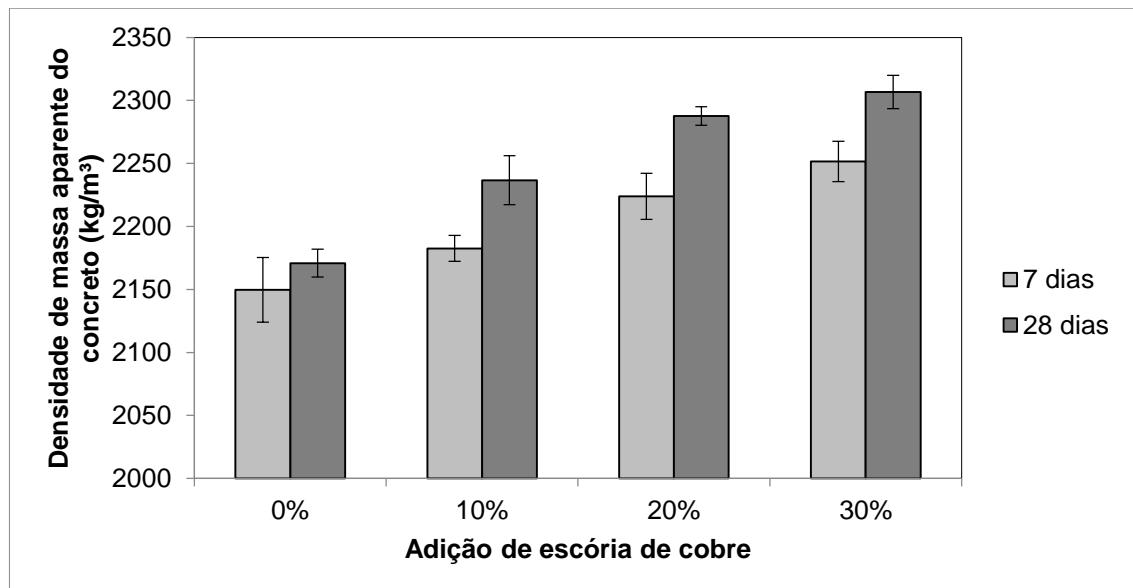


Fonte: Autor (2019).

6.3.3. Massa específica

As massas especifíca obtidas neste estudo estão apresentadas na Figura 26.

Figura 26 - Densidade de massa para as idades do concreto de 7 e 28 dias, para cada percentual de adição de escória de cobre (0%, 10%, 20% e 30%).



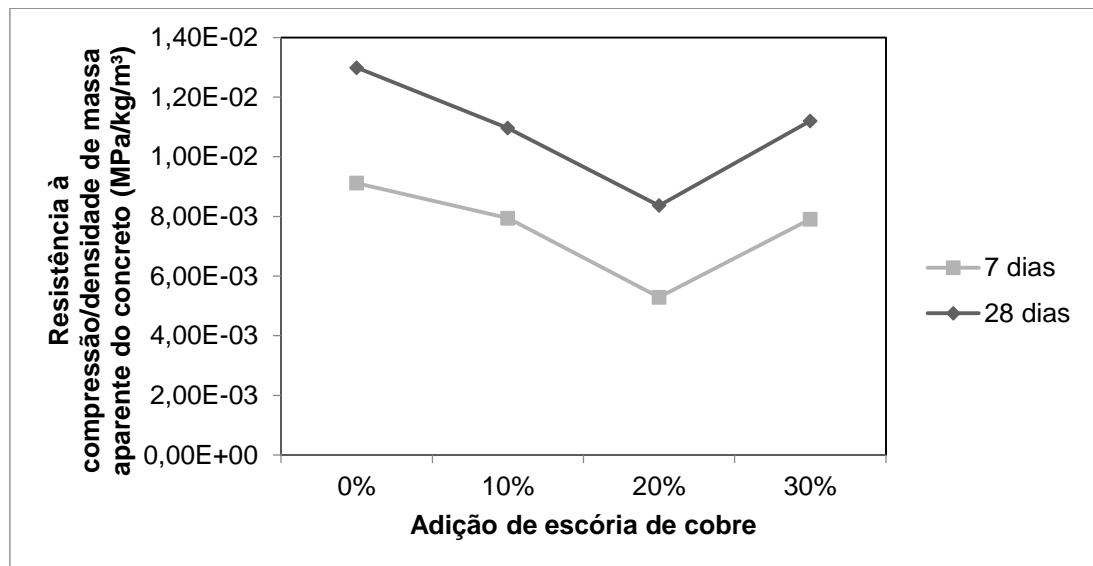
Fonte: Autor (2019).

Observa-se que a densidade de massa específica do concreto aumenta à medida que se aumenta o percentual de adição de escória. Isso provavelmente se deve ao fato da escória possuir a massa específica superior a dos demais compostos do concreto, aumentando assim a massa específica do concreto.

6.3.3.1. Razão entre a resistência à compressão e a massa específica

Fazendo a razão da resistência à compressão pela densidade nas porcentagens para cada percentual de adição obtém-se os resultados apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Razão da resistência à compressão dos concretos a 7 e 28 dias pela massa específica.



Fonte: Autor (2019).

Na figura 27 é possível observar que mesmo com o acréscimo da massa específica do concreto a queda do valor da razão foi muito pequena para os percentuais de adição de 10 e 30%. Logo, se mostra um resultado positivo.

7. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos pode-se observar que com as adições de escória utilizadas houve uma redução da consistência e, consequentemente, houve a redução da trabalhabilidade do concreto. Podendo ser necessário a utilização de aditivos plastificantes para melhorar essa propriedade.

Com relação à resistência à compressão, observou-se que houve uma pequena diminuição em relação ao concreto de referência para todas as adições. Contudo, o melhor resultado apresentado foi com adição de 30% de escória de cobre, que apresentou uma redução média de apenas 9,15% para idade do concreto de 7 dias e de 8,32% para a idade de 28 dias, mesmo sendo o concreto que possui o menor consumo de cimento, onde a relação de consumo de cimento pela resistência se aproxima bastante do concreto de referência.

Ao analisar a massa específica do concreto, observou-se que há um aumento à medida que se eleva a adição da escória de cobre, no entanto, este aumento representa respectivamente 4,74% e 6,26% para as idades de 7 e 28 dias do concreto com adição de 30%. Ao verificar a razão entre a resistência à compressão pela massa específica do concreto percebe-se que para a idade de 7 e 28 dias nos percentuais de 10 e 30% não são tão distantes dos valores apresentados para a razão do concreto padrão. O concreto com adição de escória de cobre apresenta uma resistência superior a 25 MPa. Portanto o concreto com adição de 30% de escória de cobre mostra uma resistência satisfatória.

Com relação à absorção por imersão total os concretos com adição de 20 e 30% apresentaram melhor comportamento para as idades de 28 dias, no entanto a redução é pequena em relação ao concreto padrão. Para absorção capilar os concretos com adição de escória de cobre apresentaram redução em relação à absorção capilar para o período de tempo de 48 horas, para a idade de 28 dias. Portanto se mostra viável a aplicação da escória de cobre do ponto de vista da durabilidade, pois melhora a permeabilidade da água no interior do sistema, assim reduzindo a possibilidade do transporte de agentes agressivos, com isto reitera as observações feitas por Moura (2000) e Rajasekar (2019).

Em um panorama geral, a adição da escória de cobre no percentual de 30% é o mais viável, neste trabalho, tanto do ponto de vista ambiental como econômico.

8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho foi observada a necessidade de mais alguns estudos e também de possíveis trabalhos que podem ser realizados relacionados a este. Assim, complementando este trabalho, e também verificando uma possível aplicabilidade futura destes estudos, sugerem-se algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Verificar atividade pozolânica da escória;
- Verificar a densidade do concreto com adição de escória de cobre em seu estado fresco;
- Avaliar o comportamento do concreto para outras porcentagens de escória de cobre, acima de 30%, nesta mesma linha de estudo;
- Avaliar o comportamento da resistência à compressão do concreto com percentuais de adição de escória de cobre entre 20% e 30% da massa do agregado miúdo;
- Avaliar o comportamento do concreto, realizando a substituição do agregado miúdo por percentuais de escória de cobre em volume;
- Realizar estudo do comportamento do concreto com adição da escória de cobre após a utilização (jateamento para remoção da ferrugem);
- Realizar estudos de durabilidade dos concretos;
- Realizar avaliações de densificação e possíveis outras alterações microestruturais;
- Utilizar outros tipos de cimento para produção de concreto.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para modelagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 7222**: concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 7680**: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunho de estrutura de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 7810**: Agregado em estado compactado seco determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.
- _____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 8953**: Concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupo de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 12142**: Concreto – determina da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro. 2010.
- _____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

- _____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- AL-JABRI, K. S.; AL-SAIDY, A. H.; TAHA, R. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 2, n. 25, p. 933-938, 2011.
- AMBILY, P. S. *et al.* Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate. **Construction and building materials**, v. 77, p. 233-240, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – BT. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** BT-106. São Paulo, 2002.
- AURICH, M.; GUTFREIND, H. **Concreto I.** v. 2. 2009.
- BAUER, L. A. F. Materiais de construção: Novos materiais para construção civil. 5^a ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA. v. 1. Rio de Janeiro. 2010.
- DOS ANJOS, M. A. G.; SALES, A. T. C.; ANDRADE, N. Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete. **Journal of environmental management**, v. 196, p. 607-613, 2017.
- FERREIRA, P. R. R.; LIMA, M. S.; MEIRA, G. R. **Manifestações patológicas na construção.** Estudo do comportamento de concretos em ambientes com a presença de ácido sulfúrico e cloretos. Paraíba. Jun. 2013.
- FREITAS, P. R. **Controle de qualidade em concretos endurecido:** Ensaios Mecânicos. Juiz de Fora. 2012.
- GORAI, B. *et al.* Characteristics and utilisation of copper slag—a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 39, n. 4, p. 299-313, 2003.
- HELENE, P. R. L; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle de concreto. 1^a Ed. São Paulo: Editora Pini, 1993.
- HELENE, P.; ANDRADE, T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2^a ed. IBRACON. São Paulo, 2010.

- KOHLS, M. et al. **Absorção de água por capilaridade em concretos com e sem adição de produtos de proteção.** Disponível em: <<http://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semic/article/view/17567>>. Acesso em: 28 de nov. de 2018.
- MOURA, W. A. Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. 2000. 207 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.
- MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. Influência da adição de escória de cobre em características relacionadas à durabilidade do concreto. **Ambiente construído: revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, RS. Vol. 4, n. 2 (abr./jun. 2004), p. 41-56**, 2004.
- MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos contendo escória de cobre como agregado miúdo. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 2, p. 221-225, 2009.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto. 5ª ed.** Bookman Editora LTDA. São Paulo. 2016.
- PARANAPANEMA. **Relatório de sustentabilidade 2016.** Disponível em: <<https://www.paranapanema.com.br/Download.aspx?Arquivo=GOEA32xrC+1B2Lwof0v5vw==>>. Acesso em: 08 de julho de 2019.
- PEREIRA, C. **Tipos de concretos utilizados na construção civil.** Escola Engenharia, 2016. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-concreto/>>. Acesso em: 16 de dezembro de 2018.
- PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. Fundamentos do concreto e projeto de edifícios. São Carlos. Mar. 2004.
- RAJASEKAR, A.; ARUNACHALAM, K.; KOTTAISAMY, M. Assessment of strength and durability characteristics of copper slag incorporated ultra high strength concrete. **Journal of cleaner production**, v. 208, p. 402-414, 2019.
- RESENDE, C. M. A. Estudo da viabilidade de incorporação de escória de cobre como agregado fino em produtos de construção. 2009. 118 f. Dissertação de Mestrado (Estruturas de engenharia civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2009.
- RODRIGUES, P. P. F. Parâmetros de Dosagem do Concreto. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

- SANTOS, A. **Ataque por íons de cloreto custa R\$ 800 milhões por ano ao Brasil.** Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/ataques-por-ions-de-cloreto-custa-r-800-milhoes-por-ano-ao-brasil/>>. Acesso em 03 de dez. de 2018.
- SANTOS, A. **Carbonatação do concreto.** Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/carbonatacao-do-concreto/>>. Acesso em 10 de dez. de 2018.
- SHI, C.; MEYER, C.; BEHNOOD, A. Utilization of copper slag in cement and concrete. **Resources, Conservation and recycling**, v. 52, n. 10, p. 1115-1120, 2008.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estrutura de concreto.** Editora Pini LTDA. São Paulo. 1998.
- VIJAYARAGHAVAN, J.; JUDE, A. Belin; THIVYA, J. Effect of copper slag, iron slag and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of concrete. **Resources Policy**, v. 53, p. 219-225, 2017.

APÊNDICE A – ENSAIOS DOS AGREGADOS

Tabela 21 - Inchamento da areia média.

Umidade	Água (g)	Massa (kg)	Massa Unitária (kg/dm ³)	Coeficiente de Inchamento
0%	0	22,48	1,499	1,000
1%	300	20,47	1,365	1,109
2%	600	18,63	1,242	1,231
3%	900	18,02	1,201	1,285
4%	1200	18,08	1,205	1,293
5%	1500	17,92	1,195	1,317
6%	1800	18,38	1,225	1,296
8%	2400	18,96	1,264	1,281
9%	2700	19,08	1,272	1,284
10%	3000	19,78	1,319	1,250
11%	3300	20,17	1,345	1,237
12%	3600	20,57	1,371	1,224

Fonte: Autor (2019).

Tabela 22 - Média da granulometria do agregado miúdo com adição de escória de 0, 10, 20 e 30%.

PENEIRAS SÉRIE NORMAL (mm)	ADIÇÃO DE 0%		ADIÇÃO DE 10%		ADIÇÃO DE 20%		ADIÇÃO DE 30%	
	% RET.	% ACUM.	% RET.	% ACUM.	% RET.	% ACUM.	% RET.	% ACUM.
9,5	0	0	0	0	0	0	0	0
4,75	1,23	1,23	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12
2,36	11,40	12,63	6,63	6,77	9,11	9,24	11,28	11,40
1,18	16,48	29,11	9,85	16,61	11,55	20,79	13,61	25,00
0,6	28,68	57,78	30,88	47,49	29,53	50,32	28,53	53,53
0,3	18,46	76,24	28,39	75,88	26,16	76,48	24,19	77,72
0,15	16,58	92,82	18,75	94,64	17,81	94,29	16,69	94,41
Fundo	7,18	100,00	5,36	100,00	5,71	100,00	5,59	100,00
Soma	100,00	-	100,00	-	100,00	-	100,00	-

Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE B – ENSAIOS DOS CONCRETOS

Tabela 23 - Resistência à compressão do concreto para adições de 0, 10, 20 e 30% de escória.

Adição de escória de cobre (%)	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias		28 dias	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	19,60	1,47	28,19	1,26
10	17,33	0,65	24,52	1,85
20	11,77	1,89	19,13	1,37
30	17,80	1,25	25,85	0,81

Fonte: Autor (2019).

Tabela 24 - Absorção de água por imersão total.

Adição de escória de cobre (%)	Absorção média por imersão (%)		Desvio padrão	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
0	6,80	8,29	0,33	0,01
10	6,94	8,29	0,08	0,01
20	6,63	6,71	0,20	0,18
30	6,67	6,80	0,18	0,14

Fonte: Autor (2019).

Tabela 25 - Absorção de água por capilaridade a 7 dias.

Escória de cobre (%)	Absorção capilar (g/cm ²) – 7 dias				
	0 h	3 h	6 h	24 h	48 h
0%	0,00	0,17	0,34	0,93	1,32
10%	0,00	0,23	0,36	0,87	1,25
20%	0,00	0,25	0,42	0,93	1,32
30%	0,00	0,25	0,42	0,89	1,19

Fonte: Autor (2019).

Tabela 26 - Absorção de água por capilaridade a 28 dias.

Escória de cobre (%)	Absorção capilar (g/cm²) – 28 dias				
	0 h	3 h	6 h	24 h	48 h
0%	0,00	0,21	0,34	0,76	1,06
10%	0,00	0,25	0,38	0,64	0,81
20%	0,00	0,25	0,38	0,76	0,89
30%	0,00	0,30	0,42	0,68	0,85

Fonte: Autor (2019).

Tabela 27 - Massa específica do concreto a 7 dias.

Adição de escória de cobre	Massa (kg)	Massa específica aparente (kg/m³)	Desvio padrão
0%	3,38	2149,65	25,73
10%	3,43	2182,54	10,23
20%	3,49	2223,93	18,38
30%	3,54	2251,51	16,02

Fonte: Autor (2019).

Tabela 28 - Massa específica do concreto a 28 dias.

Adição de escória de cobre	Massa (kg)	Massa específica (kg/m³)	Desvio padrão
0%	3,41	2170,87	11,03
10%	3,51	2236,66	19,45
20%	3,59	2287,59	7,35
30%	3,62	2306,69	13,25

Fonte: Autor (2019).