



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E  
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

DOUGLAS MARTINS SOUSA

**UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DO COBRE COMO AGREGADO MIÚDO NA  
PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Tucuruí - PA

2019

DOUGLAS MARTINS SOUSA

**UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DO COBRE COMO AGREGADO  
MIÚDO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Tucuruí

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

M379u Martins Sousa, Douglas  
Utilização de rejeito de minério do cobre como agregado miúdo na produção do concreto / Douglas Martins Sousa. — 2019.  
xiii, 85 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

1. Concreto. 2. Rejeito de cobre. 3. Agregado miúdo. I. Título.

CDD 691.9

---

DOUGLAS MARTINS SOUSA

**UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DO COBRE COMO AGREGADO  
MIÚDO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador: Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Aprovada em 29 de março de 2019.

BANCA EXAMINADORA:

---

Dr. Paulo Sérgio Lima Souza - UFPA - Orientador

---

Dr<sup>a</sup> Luciana, de Nazaré Pinheiro Cordeiro - UFPA

---

Dr<sup>a</sup>. Isaura Nazaré Lobato Paes - UFPA

---

Dr. Laércio Gouvêa Gomes - IFPA

## **Dedicatória**

Para minha esposa Soraia e a Deus  
que me abençoou me permitindo chegar até  
aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por todas as oportunidades, sabedoria e fé que me proporcionou ao longo da vida, e que me permitiu que eu acreditasse cada dia mais nas minhas escolhas e no meu trabalho, me dando perseverança e foco para a realização deste trabalho.

A minha família, em especial minha esposa Soraia Abreu, e meus pais Maria Edilva e Francisco Martins, que me apoiaram incondicionalmente e me deram todo o suporte e tiveram toda a compreensão do mundo, principalmente nas horas em que eu tive que me ausentar para que eu alcançasse este objetivo.

Ao prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza, pela dedicada orientação e apoio incondicional na realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Denílson, da Silva Costa e Dra. Lygia Maria Policarpio Ferreira, por terem contribuído com orientações e suporte nas diversas solicitações feitas na Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

A todo o grupo de pesquisa do GPMAC, e também ao técnico de laboratório Joel, que foram de extrema importância, principalmente nos momentos de maior dificuldade durante minha estadia na UFPA, para que eu pudesse concluir esta pesquisa.

A todos os meus amigos da pós-graduação, os quais foram de fundamental importância no aprendizado de cada disciplina, mostrando-me seu companheirismo e coleguismo.

A VALE S/A, por ter cedido o material desta pesquisa, em especial ao técnico Renan Souza, que foi muito solícito e prestativo em todos nossos pedidos.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu concluísse minha dissertação, meu **MUITO OBRIGADO**.

## RESUMO

Uma grande preocupação com os recentes acidentes envolvendo barragens de rejeito tornou a despertar a urgente necessidade de adequação das empresas mineradoras quanto ao destino dado aos rejeitos de minério gerado por suas operações. Neste contexto, o reaproveitamento destes materiais na indústria da construção civil, mostra-se com uma excelente alternativa. Nesta pesquisa, avaliou-se o reaproveitamento de rejeito da mineração do cobre como substituto parcial aos agregados miúdos na produção de concretos convencionais objetivando a avaliação do desempenho mecânico do concreto produzido com este material, também se objetiva, conseguir uma material destinação sustentável para este. Apenas na mina de onde o material foi coletado, existem cerca de 160 milhões de toneladas deste material acumulados na bacia de rejeitos da mineradora, o que demonstra que existe uma fonte considerável deste material disponível para reaproveitamento. No programa experimental houve a produção de quatro séries de estudo: uma de referência, composta pelo concreto sem a adição do rejeito, e outras três com 15 %, 30% e 45% de substituição aos agregados miúdos, além da utilização de duas relações água/cimento. Foram feitos ensaios no estado fresco para se avaliar qual a influência do rejeito nas propriedades plásticas do concreto, e no estado endurecido, foram ensaiados corpos de prova aos 07 e 28 dias para o ensaio de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade. Os resultados obtidos foram tratados com estatisticamente através de análise de variância (ANOVA) e provaram para o parâmetro substituição de rejeito, houve significatividade. Os resultados mostraram que as amostras com substituição de rejeito obtiveram bons resultados, elevando significativamente tanto a resistência à tração quanto a resistência à compressão do concreto, quando comparados com série de referência sob as mesmas condições. Portanto, neste quesito o rejeito de cobre se mostra com um excelente potencial para ser reutilizado na produção de concretos, no que diz respeito a seus efeitos nas propriedades mecânicas do concreto, além de conseguir uma destinação mais sustentável do que a dos dias atuais.

Palavras chave: agregados miúdos, rejeito de cobre, concreto

## ABSTRACT

A major concern with recent accidents involving tailings dams has again raised the urgent need for mining companies to adapt to the fate of ore tailings generated by their operations. In this context, the reuse of these materials in the construction industry shows itself to be an excellent alternative. In this research, it was evaluated the reuse of copper mining waste as a partial substitute for the small aggregates in the production of conventional concretes, aiming the evaluation of the mechanical performance of the concrete produced with this material, also if it is objective, to obtain a material destination sustainable for this material. Only in the mine where the material was collected, is there about 160 million tons of this material accumulated in the mine tailings basin, which shows that there is a considerable source of this material available for reuse. In the experimental program there were four study series: one reference composed of concrete without the addition of the tailings, and another three with 15%, 30% and 45% of substitution to the small aggregates, besides the use of two water ratios /cement. Fresh tests were carried out to evaluate the influence of the reject on the plastic properties of the concrete, and in the hardened state, test specimens were tested at 07 and 28 days for the axial compressive strength, diametral compression traction, traction in flexion and modulus of elasticity. The results obtained were statistically treated through analysis of variance (ANOVA) and proved for the substitution parameter of reject, there was significance. The results showed that the samples with substitution of tailings obtained good results, significantly increasing both the tensile strength and the compressive strength of the concrete when compared with reference series under the same conditions. Therefore, copper reject shows an excellent potential to be reused in the production of concrete, with respect to its effects on the mechanical properties of the concrete, in addition to achieving a more sustainable destination than today.

Keywords: fine aggregate, tailings copper, concrete.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – LINHA DO TEMPO – ERA DAS CIVILIZAÇÕES (DNPM,2009) .....	8
FIGURA 2.2 - CONSUMO MUNDIAL DE COBRE REFINADO. (COCHICO, 2017) .....	9
FIGURA 2.3 – CONSUMO DE COBRE POR PROPRIEDADE. (COCHILCO, 2017) .....	11
FIGURA 2.4 - COMPARATIVO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE VÁRIOS MATERIAIS. (COCHILCO,2017) .....	12
FIGURA 2.5 - COMPARATIVO ENTRE A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE VÁRIOS MATERIAIS. (COCHILCO,2017) .....	12
FIGURA 2.6 – SÉRIE HISTÓRICA DO CONSUMO DE COBRE POR SETOR. (COCHILCO,2017).....	13
FIGURA 2.7 – PRINCIPAIS PROJETOS MINERAIS NA PROVÍNCIA DO CARAJÁS. (JUNIOR, 2010) .....	15
FIGURA 2.8 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO COM A LOCALIZAÇÃO DOS CORPOS PISTA, SERQUEIRINHO, BAIANO, CURRAL E SOSSEGO. E (B) DISTRIBUIÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ZONAS DE ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS (MODIFICADO DE VALE(2015), MONTEIRO ET AL., 2008). .....	16
FIGURA 2.9 – VISTA DO MIRANTE – CAVA DO SOSSEGO. ....	17
FIGURA 2.10 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO. (VALE, 2017) .....	18
FIGURA 2.11 – VISTA AÉREA DO PROJETO DO SOSSEGO - (GOOGLE EARTH, 2018) .....	20
FIGURA 2.12 – ROTA DE PROCESSAMENTO DO COBRE. (VALE, 2017).....	21
FIGURA 2.13 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL. (THOMAS ET AL.,2013).....	27
FIGURA 2.14 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (EREN & ONUAGULCHI. 2012) .....	28
FIGURA 2.15 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO. (THOMAS ET AL.,2013).....	29
FIGURA 2.16- RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (EREN & ONUAGULCHI. 2012) .....	29
FIGURA 2.17 - RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (SHETTIMA, 2016).....	31
FIGURA 2.18- RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (ANJOS ET AL., 2017) .....	31
FIGURA 2.19 – IMAGEM DE BRUMADINHO/MG APÓS ROMPIMENTO DE BARRAGEM. (G1, 2019) .....	33
FIGURA 2.20 – LAGO CONTAMINADO PELA DAM (SOUSA, 2016) .....	34
FIGURA 3.1 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	36
FIGURA 3.2 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO AGREGADO MIÚDO E REJEITO UTILIZADO.....	44
FIGURA 3.3- DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA AMOSTRA .....	46
FIGURA 3.4 – MEV DA AMOSTRA DE REJEITO DE COBRE. ....	46
FIGURA 3.5 – FOTO AMPLIADA 1000X DO REJEITO DE COBRE. ....	47
FIGURA 4.1 – PERCENTUAL DE ADITIVO ADICIONADO PARA RELAÇÃO A/C 0,40. ....	50
FIGURA 4.2 – PERCENTUAL DE ADITIVO ADICIONADO PARA RELAÇÃO A/C 0,60 .....	51
FIGURA 4.3 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES AOS 07 E 28 DIAS, PARA RELAÇÃO A/C 0,40. VALORES EXPRESSADOS EM RESISTÊNCIA MÉDIA ± DESVIO PADRÃO. (ANOVA; P<0,05).....	56
FIGURA 4.4 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES AOS 7 E 28 DIAS, PARA RELAÇÃO A/C 0,60. VALORES EXPRESSADOS EM RESISTÊNCIA MÉDIA ± DESVIO PADRÃO. (ANOVA; P<0,05) .....	56
FIGURA 4.5 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 7 E 28 DIAS, PARA RELAÇÃO A/C 0,40. VALORES EXPRESSADOS EM RESISTÊNCIA MÉDIA ± DESVIO PADRÃO. (ANOVA; P<0,05).....	63

FIGURA 4.6- RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 7 E 28 DIAS, PARA RELAÇÃO A/C 0,60. VALORES EXPRESSADOS EM RESISTÊNCIA MÉDIA $\pm$ DESVIO PADRÃO. (ANOVA; $P < 0,05$ ).....	63
FIGURA 4.7 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 7 E 28 DIAS, PARA RELAÇÃO A/C 0,40.....	67
FIGURA 4.8 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À NA FLEXÃO AOS 7 E 28 DIAS PARA RELAÇÃO A/C 0,60. ....	67
FIGURA 4.9 - RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 7 E 28 DIAS PARA RELAÇÃO A/C 0,40.....	70
FIGURA 4.9 - RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE AOS 7 E 28 DIAS PARA RELAÇÃO A/C 0,40.....	70

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - CONSUMO DE COBRE POR TIPO DE VEÍCULO (ICSG,2017) .....	10
TABELA 3.1 – VARIÁVEIS DE CONTROLE .....	37
TABELA 3.2 – RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS E CORPOS DE PROVA.....	38
TABELA 3.3 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO UTILIZADO SEGUNDO O FABRICANTE. ....	39
TABELA 3.4- CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS .....	40
TABELA 3.5 – CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS AGREGADOS MIÚDOS.....	41
TABELA 3.6 - CARACTERIZAÇÃO DO ADITIVO SEGUNDO O FABRICANTE .....	41
TABELA 3.7 - CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO REJEITO DE COBRE .....	43
TABELA 3.8 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO REJEITO DE COBRE SEGUNDO LABORATÓRIO PARTICULAR.....	44
TABELA 3.9 – ENSAIOS E METODOLOGIAS UTILIZADAS.....	47
TABELA 3.10 – TRAÇOS EM MASSA DOS CONCRETOS COM RELAÇÃO A/C = 0,40.....	48
TABELA 3.11 - TRAÇOS EM MASSA DOS CONCRETOS COM RELAÇÃO A/C = 0,60 .....	48
TABELA 4.1 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO PARA RELAÇÃO A/C 0,40.....	53
TABELA 4.2 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA RELAÇÃO A/C 0,60.....	53
TABELA 4.3 – ANOVA DOS RESULTADOS PARA RELAÇÃO A/C 0,40 .....	54
TABELA 4.4 - ANOVA DOS RESULTADOS PARA A RELAÇÃO A/C 0,60.....	55
TABELA 4.5 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA RELAÇÃO A/C 0,40 .....	60
TABELA 4.6 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA RELAÇÃO A/C 0,60 .....	60
TABELA 4.7 - TESTE TUKEY PARA ANOVA DOS RESULTADOS PARA RELAÇÃO A/C DE 0,40 .....	61
TABELA 4.8 - TESTE TUKEY PARA ANOVA DOS RESULTADOS PARA RELAÇÃO A/C DE 0,60 .....	62
TABELA 4.9 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DIAMETRAL PARA RELAÇÃO A/C 0,40 .....	65
TABELA 4.10 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DIAMETRAL PARA RELAÇÃO A/C 0,60 .....	65
TABELA 4.11 - RESULTADOS DE ANOVA DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA RELAÇÃO A/C 0,40 .....	65
TABELA 4.12 - RESULTADOS DE ANOVA DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO PARA RELAÇÃO A/C 0,60 .....	66
TABELA 4.13 - RESULTADO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA RELAÇÃO A/C 0,40.....	68
TABELA 4.14 - RESULTADO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA RELAÇÃO A/C 0,40.....	69
TABELA 4.15- RESULTADO DE ANOVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA RELAÇÃO A/C 0,40 .....	69
TABELA 4.16 - RESULTADO DE ANOVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA RELAÇÃO A/C 0,60 .....	69

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. OBJETIVOS.....</b>	<b>5</b>
1.2.1. OBJETIVO GERAL .....	5
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>1.3. LIMITAÇÃO DA PESQUISA .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>6</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. COBRE .....</b>	<b>8</b>
2.1.1. CARACTERÍSTICAS DO METAL DE COBRE .....	10
2.1.2. PROCESSO PRODUTIVO DO COBRE.....	13
2.1.3. PROCESSO PRODUTIVO DO COBRE NA MINERAÇÃO .....	14
2.1.4. LOCALIZAÇÃO DO PROJETO.....	14
2.1.5. GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL .....	15
2.1.6. DESMONTE E TRANSPORTE:.....	16
2.1.7. ETAPA DE BRITAGEM E MOAGEM:.....	17
2.1.8. MÉTODO DE CONCENTRAÇÃO .....	18
2.1.9. BACIA DE REJEITOS:.....	19
2.1.10. PROCESSO PRODUTIVO DO COBRE NA METALURGIA.....	20
<b>2.2. REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3. REAPROVEITAMENTO DE REJEITO DE COBRE NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....</b>	<b>25</b>
2.3.1. NO ESTADO FRESCO .....	25
2.3.2. NO ESTADO ENDURECIDO .....	26
<b>2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS PELA DISPOSIÇÃO ERRÔNEA DE REJEITOS. ....</b>	<b>32</b>
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>36</b>
<b>3.1. PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS. ....</b>	<b>36</b>
3.1.1. VARIÁVEIS DE CONTROLE .....	36
3.1.2. VARIÁVEIS DE RESPOSTA .....	37

<b>3.2. CARACTERIZAÇÃO E SELEÇÃO DOS MATERIAIS. ....</b>	<b>38</b>
3.2.1. CIMENTO PORTLAND.....	38
3.2.2. AGREGADO GRAÚDO.....	39
3.2.3. AGREGADO MIÚDO NATURAL .....	40
3.2.4. ADITIVOS.....	41
3.2.5. ÁGUA .....	42
3.2.6. REJEITO DE COBRE .....	42
<b>3.3. ENSAIOS E NORMAS UTILIZADAS.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4. DOSAGEM E PRODUÇÃO DO CONCRETO .....</b>	<b>48</b>
3.4.1. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	49
3.4.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....	49
<b><u>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</u></b>	<b><u>50</u></b>
<b>4.1. COMPORTAMENTO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO. ....</b>	<b>50</b>
<b>4.2. COMPORTAMENTO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>52</b>
4.2.1. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	52
4.2.2. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	60
4.2.3. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	64
4.2.4. RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE .....	68
<b><u>5. CONCLUSÕES .....</u></b>	<b><u>72</u></b>
<b>5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>72</b>
<b>5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>74</b>
<b><u>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u></b>	<b><u>75</u></b>

# 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios da indústria da mineração atualmente é o impacto ambiental gerado em decorrência das atividades exploratórias. Impactos estes que quando ocorrem, têm elevada magnitude e grandes repercussões midiáticas nacionais e internacionais, devido as grandes proporções, sejam elas pela grande área afetada ou pela população total atingida.

Mesmo assim, é uma das indústrias cada vez mais importante no Brasil e no mundo, visto que grande parte dos componentes utilizados, desde a construção da infraestrutura até os bens de consumo duráveis e não duráveis, serem fabricados a partir de componentes provenientes destas indústrias. Neste contexto umas das indústrias que mais vem se destacando é a indústria do cobre, dado que o consumo mundial do metal cresceu cerca de 50% nos últimos 20 anos, e acarretou em um forte aumento do preço do minério entre os anos de 2015 e 2016, depois de enfrentar uma forte recessão no mercado internacional, demanda esta que foi alavancada devido à retomada do crescimento de países chaves como a China, Índia e Brasil (COCHILCO, 2017).

No relatório apresentado pela Comissão Chilena do Cobre (COCHILCO, 2017), apontava-se que a perspectiva de consumo deste material para o futuro tem fortes tendências de crescimento, uma vez que muito deste material é consumido na área de infraestrutura básica nas cidades, como o setor da construção civil e de telecomunicações de países que ainda estão em desenvolvimento como os BRICS, há também o desenvolvimento crescente de novas tecnologias como carros elétricos e fontes mais limpas de energia como a energia solar e eólica, são baseadas em um maior consumo desta matéria prima.

Nas mineradoras, uma das maiores preocupações em relação aos impactos ambientais está relacionado as suas barragens de rejeitos. Os materiais destinados às bacias de rejeitos, muitas das vezes não possuem um reaproveitamento economicamente viável ou técnico, fazendo com que exista a necessidade de se construir mais barragens de rejeitos, ou aumentar a capacidade daquelas já existentes através de técnicas construtivas de alteamento, conseqüentemente por muitas vezes aumentando os riscos e probabilidades de acidentes e problemas estruturais nestas barragens.

Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), dados do ano de 2016 mostram que no Brasil existem cadastradas 839 barragens de rejeitos dos mais diversos

tipos de materiais e tamanhos. Essas barragens são classificadas segundo alguns critérios, como dimensões, capacidade total e tipo de resíduo que armazena. Outra classificação importante é quanto ao risco da barragem, em que neste relatório mostra que 80% são consideradas de baixo risco, 15% de médio risco e 5% consideradas de alto risco, entretanto cerca de 50% deste total de barragens tem um alto dano potencial associado, o que significa que, se caso aconteça algum acidente nelas, o dano causado seria grande em termos econômicos, sociais ambientais ou em perda de vidas humanas (DNPM, 2016). Neste cenário o estado do Pará recebe grande destaque, dado que atualmente ocupa a 3º colocação no ranking de estados com mais barragens de mineração, ao todo no estado são 93 barragens, das quais 66 delas já estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens.

Dentre todos os minerais explorados no Brasil, um dos que mais se destaca é o minério de cobre, que segundo DNPM somente em 2016 foram processadas cerca de 89 milhões de toneladas de cobre no Brasil, e deste total, cerca de 71 milhões delas foram processadas no estado do Pará. Minério esse que possui aproximadamente teor de 0,66% de cobre, que geraram aproximadamente 890 mil toneladas de cobre concentrado com teor médio de 31,76%. Nota-se que devido ao baixo teor de cobre no processamento do minério, a diferença entre o material que foi processado e o material que efetivamente tornou-se concentrado de cobre, destinou-se a bacia de rejeitos destas empresas.

Em 2010 criou-se a Lei 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), que dispõe sobre barragens para acumulação de água para quaisquer finalidades, acumulação final ou temporária de rejeitos e a acumulação de resíduos industriais, esta lei entrou em vigor para dispor sobre critérios e instrumentos de fiscalização e avaliação que tornassem as barragens mais seguras em todo o país (BRASIL, 2010)

Embora a questão ambiental em torno de barragens de rejeito nas mineradoras no Brasil tenha sido debatida durante décadas, e possuir até lei específica para tratar do caso, as discussões sobre e as ações efetivas para o aperfeiçoamento da segurança deste tipo de estruturas ficam em grande parte do tempo em segundo plano. Essa situação ocorre, pois esta temática gera grande incomodo nas empresas mineradoras, uma vez que modificações em legislações e normas de segurança mais rígidas acarretam em custos operacionais bilionários para o setor, que em muitas das vezes são vistas pelos governos como grandes fontes de arrecadação de impostos e até mesmo como polo de desenvolvimento regional em cidades com pouca diversidade econômica, mas que tais discussões de tempos em

tempos acabam por serem retomadas após ocorrência de algum acidente (CARMO et al., 2017).

Por outro lado, a Indústria da construção civil é uma das que mais utiliza matérias prima no mundo, e que segundo Oliveira (2008) cerca de 50% do consumo de matéria prima mundial, pode ser creditada a esta indústria. Porém ao mesmo tempo em que é uma das indústrias que mais consome matérias prima no mundo, é também a que mais consegue absorver resíduos da própria indústria da construção civil e de outras áreas, principalmente das indústrias minerais e metalúrgicas, aonde estas reutilizações já vem sendo importantes práticas de sustentabilidade para o setor (SGANDERLA, 2015). Agopyan e John (2011) abordam sobre as diversas limitações para as aplicações de produtos reciclados dentro desta importante indústria, porém é possível encontrar na literatura muitos *cases* de sucesso de reutilização destes materiais, inclusive alguns até patenteados e comercializados.

## **1.1. Justificativa**

Dados de 2016 da *International Corporate Governance Society* (ICGS) mostram que o Brasil é o 15º maior produtor de cobre refinado do mundo, com produção aproximada de 225 mil toneladas de cobre refinado. Segundo o DNPM (2014) só o estado do Pará é responsável por cerca de 85% desta produção. Esses números, só evidenciam a urgente necessidade de encontrar uma solução alternativa viável para este material, principalmente dentro do estado Paraense, que por ser o maior produtor, é o estado que mais se beneficia financeiramente pela extração, mas também, conta com as maiores barragens de rejeito deste material, ou seja, com os maiores passivos ambientais.

Segundo (VALE, 2018), apenas no ano de 2017, na mina do Sossego, foram gerados mais de 13 milhões de toneladas de rejeito. Este fato, corrobora que existe uma grande fonte geradora deste material, e que potencializa o interesse (tanto da empresa mineradora, quanto da comunidade e de pesquisadores) para que seja encontrada uma solução alternativa para o material, uma vez que há material disponível para utilização e que a tendência ao longo prazo é o aumento da produção do minério. Um exemplo deste tipo de utilização alternativa, é que se este material for reaproveitado dentro da indústria da construção civil, na produção de concreto, por exemplo, reduziria consideravelmente a quantidade de agregados naturais utilizados nesta indústria.

É importante ressaltar, que a grande produção de minério ou o aumento da mesma, gera cada vez mais rejeitos, existindo assim a necessidade da construção de mais barragens ou do alteamento da capacidade do volume das estruturas já existentes, uma vez que não se reaproveita este material, não há saída de material das barragens de rejeito, somente a entrada de materiais, fazendo com que as elas tenham uma vida útil previsível e limitada. Isso tem impacto altamente negativo ao meio ambiente e as empresas mineradoras, uma vez a cada vez que uma barragem nova é construída, ou sofre alteamento, aumentam-se os riscos envolvidos. Além disto, deve-se pontuar que essas estruturas demandam um custo extremamente alto para as empresas mineradoras, pois todos os anos são investidos milhões de dólares para a manutenção e monitoramento destas barragens para que estejam sempre estáveis e seguras, evitando assim acidentes e danos ao meio ambiente (IBRAM, 2013).

Mesmo com todos os investimentos feitos pelas mineradoras e com a fiscalização do governo federal, infelizmente grandes acidentes envolvendo barragens de rejeito têm acontecido no país. Como consequência destes incidentes, foram causados danos incalculáveis ao meio ambiente, as comunidades e cidades ao entorno das minas e a vida humana, fato este que só comprova a real necessidade de algum modo evitar que estes materiais fiquem dispostos desta maneira.

Por outro lado, há o fato que atualmente a indústria da construção civil é a responsável pela imensa quantidade de agregados naturais consumidos no mundo, e também por ser a indústria com maior capacidade de absorção deste tipo de material reaproveitado. Em alguns casos de sucesso abordados pela literatura, tem-se o uso incorporado ao concreto de sílica ativa, cinzas volantes, escória de alto forno entre outros materiais. É importante ressaltar que todos esses eram materiais, eram considerados rejeitos e resíduos das suas respectivas indústrias, onde não tinham muita utilização até a descoberta e desenvolvimento do potencial dos mesmos, da mesma forma como os rejeitos de modo geral são tratados pelas empresas mineradoras (FURQIM, 2006).

As pesquisas relacionadas à reutilização de resíduos das indústrias minerais e metalúrgicas no Brasil estão em uma fase bem inicial quando comparada a estes estudos em alguns países como Índia, Alemanha, Estados Unidos Chile e Canadá, por exemplo, principalmente quanto assunto é reaproveitamento de rejeito de minerais como o cobre, bauxita, magnetita e etc. Um dos maiores exemplos deste atraso em relação aos outros países demonstra-se por meio do comparativo entre a literatura nacional e a internacional a respeito do reaproveitamento de rejeitos do minério de cobre. Enquanto a literatura

internacional tem uma quantidade significativa de artigos e pesquisas publicadas em periódicos renomados com abordagens de diversos tipos de utilização, na literatura nacional se encontram poucos artigos que tratam especificamente deste tema.

Neste sentido este trabalho procura unir essas duas variáveis apresentadas nos tópicos acima, que são a enorme quantidade de rejeitos gerados pelas empresas mineradoras, em especial pela indústria mineradora de cobre, e o grande potencial da indústria da construção civil em absorver esse tipo de material. A proposta do trabalho é a utilização deste material que atualmente está depositado na barragem de rejeitos na mina do Sossego, situada no município de Canaã dos Carajás, como agregado na produção de concreto, pois atualmente os agregados naturais estão cada vez mais escassos e, portanto, seu custo acaba se elevando, enquanto que as bacias de rejeito ficam cada vez mais cheias, gerando maiores custos para as empresas mineradoras e riscos ambientais e de segurança para as comunidades que vivem ao redor destas estruturas. Desta forma pode-se reduzir significativamente a extração de matérias primas da natureza como também reduzir os impactos ambientais causados pela disposição deste material nas barragens.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o emprego e os efeitos da substituição parcial do agregado miúdo por rejeito de cobre na produção de concreto convencional.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Este trabalho contará com os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o rejeito proveniente da exploração do cobre na mina do Sossego em Canaã dos Carajás do ponto de vista físico-químico e mineralógico, uma vez que a literatura sobre as características deste material é muito restrita;
- Avaliar qual o efeito dos diferentes percentuais de substituição de cobre por agregado miúdo, nas propriedades do concreto em estado fresco;

- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição de cobre por agregado miúdo, nas propriedades mecânicas do concreto quando submetidos a ensaios de resistência mecânica no estado endurecido;
- Buscar alternativa mais sustentável para a utilização do rejeito;

### **1.3. Limitação da Pesquisa**

Esta pesquisa se limitará em substituir percentual da massa de agregados miúdos por rejeito de cobre. Não serão feitos testes em substituição a massa do cimento ou de agregados graúdos. Tal limitação deve-se ao fato que em seu estado natural como subproduto, o resíduo de cobre apresenta características muito próximas dos agregados miúdos, não sendo necessárias assim ações de beneficiamento para a utilização do mesmo.

### **1.4. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho será estruturado em aproximadamente cinco capítulos que estão descritos a seguir.

No primeiro capítulo, teremos a introdução ao tema, focalizando em pontos chaves que justificam tal pesquisa, a quantidade de rejeito que é gerado atualmente e a perspectiva de crescimento do consumo mundial, a capacidade que o setor da construção civil tem para a absorção deste material, e os graves danos ambientais e sociais que são causados por desastres de barragens de rejeito. Neste capítulo também são apresentados os objetivos e a estrutura da pesquisa

No segundo capítulo, será feita uma revisão bibliográfica que abordará sobre o histórico do cobre, bem como suas principais utilizações e sua perspectiva de consumo para os próximos anos, bem como mostrar como é a cadeia produtiva do cobre e diferenciar os tipos de rejeitos que são geradas nas fases distintas do processo produtivo do cobre. Além destes temas, também será abordado sobre os resíduos sólidos industriais especialmente os resíduos do beneficiamento do cobre estão sendo utilizados na construção civil e como isso impacta diretamente o meio ambiente. No final foram citados alguns exemplos de sucesso de resíduos sólidos industriais aplicados na construção civil.

No terceiro capítulo discutiu-se a metodologia do trabalho, ou seja, como foram feitas as caracterizações, ensaios, produção dos corpos de prova e tipos de dosagens e todo

planejamento que foram realizados durante a pesquisa. Essa discussão será feita com base nas referências bibliográficas.

O quarto capítulo será destinado a exposição dos resultados e a análise dos mesmos produzidos pelo programa experimental, que mostrará se o que foi discutido e abordado na revisão bibliográfica por outros autores, está se confirmando diante dos dados.

E por fim, o último capítulo destina-se a fazer as considerações finais do estudo, levando em consideração os resultados obtidos com a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Cobre

Desde os primórdios o metal de cobre sempre trouxe grandes mudanças para a humanidade, sua descoberta deu-se por volta de 10.000 anos atrás no Oriente Médio, onde se iniciaram os primeiros processos de manejo e fundição do cobre. (DNPM, 2016). Após muitos anos esse processo de manejo e fundição se tornou tão importante na época, que ficou historicamente conhecida como a Era do Bronze e Cobre conforme é possível ver na Figura 2.1.

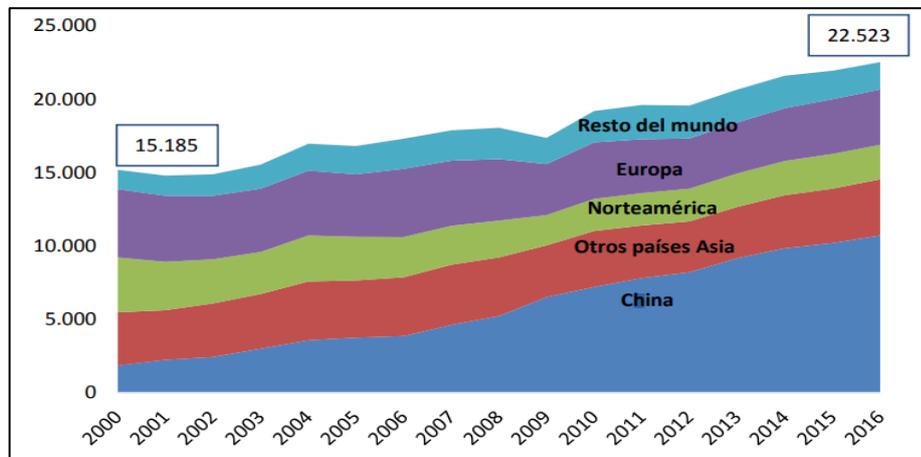
Figura 2.1 – Linha do Tempo – Era das civilizações (DNPM,2009)



No entanto ao longo dos séculos, houve muito aperfeiçoamento da técnica de fundição e do desenvolvimento de novas tecnologias, que permitiram que o homem utilizasse o material com seu potencial máximo, e de acordo com a necessidade de aplicação do mesmo. Neste sentido, o período onde a demanda mundial por cobre cresceu consideravelmente, foi justamente no período da revolução industrial, ocorrida no continente europeu entre os séculos XVIII e XIX, onde o cobre teve um papel fundamental nas descobertas e desenvolvimentos tecnológicos relacionados à eletricidade e magnetismo (ICGS, 2010).

Desde então, a demanda por cobre no mundo aumenta a cada ano, conforme estudo realizado no ano 2017 e publicado pela Comissão Chilena do Cobre (COCHICO, 2017). O estudo mostrou um forte aumento no consumo mundial de cobre refinado nos últimos 20 anos. Na Figura 2.2 é possível constatar que no ano de 2000 o consumo mundial era de 15.185 mil toneladas e no ano de 2016 saltou para 22.523 mil toneladas, um expressivo crescimento 48% na demanda mundial.

Figura 2.2 - Consumo mundial de cobre refinado. (COCHICO, 2017)



É pertinente observar que um dos maiores propulsores dessa demanda foi a China, que nos anos 2000 tinha consumo aproximado de 1850 toneladas, e no ano de 2016 consumiu 10.706 toneladas de cobre refinado, o que representou um aumento de 578% em 16 anos, e que atualmente representa sozinho 48% do consumo mundial de cobre. Tal fenômeno pode ser explicado pelas elevadas taxas de crescimento do PIB nos últimos anos e a explosão do setor de infraestrutura e telecomunicações que aconteceu nas duas últimas décadas no país (COCHILCO, 2017).

O relatório da COCHICO também aponta que nos próximos anos, haverá um grande aumento ainda maior na demanda mundial por cobre, visto que existe uma tendência mundial que as montadoras de automóveis, aos poucos, parem de fabricar automóveis movidos a combustíveis fósseis e comecem a fabricar automóveis movidos à combustíveis mais sustentáveis, como é o caso dos automóveis elétricos.

Neste caso, o consumo de cobre aumentaria pois para a fabricação dos automóveis elétricos, as indústrias automobilísticas utilizam aproximadamente quatro vezes mais cobre em seus componentes, principalmente nas baterias e no motor destes automóveis como apontado pela Tabela 2.1 Deste modo, estima-se que o crescimento desta demanda até o ano de 2027 deverá gerar um aumento na demanda mundial na ordem de 1,75 milhões de toneladas (MANGRAVITI, 2018).

Tabela 2.1 - Consumo de cobre por tipo de veículo (ICSG,2017)

<b>Tipo de Veículo</b>	<b>Consumo de Cobre (Kg)</b>
Motor de combustão interna	23
Veículo elétrico híbrido	40
Veículo elétrico híbrido recarregável	60
Veículo elétrico de baterias	83
Ônibus elétrico híbrido	89
Ônibus elétrico a bateria	224 - 369*

\*Depende do tamanho da bateria.

O Brasil no cenário mundial de produção de cobre figura apenas na 15<sup>o</sup> colocação, porém mesmo assim tem produção expressiva, onde segundo o DNPM (2018) no ano de 2016 foram processadas 89 milhões de toneladas de cobre (com teor médio de 0,62% de Cu) e destes foram gerados 1,1 milhão de cobre concentrado (com teor de aproximadamente 30% de Cu) que por sua vez, geraram 225 mil toneladas de cobre refinado (que possui no mínimo 99,3% do elemento Cu).

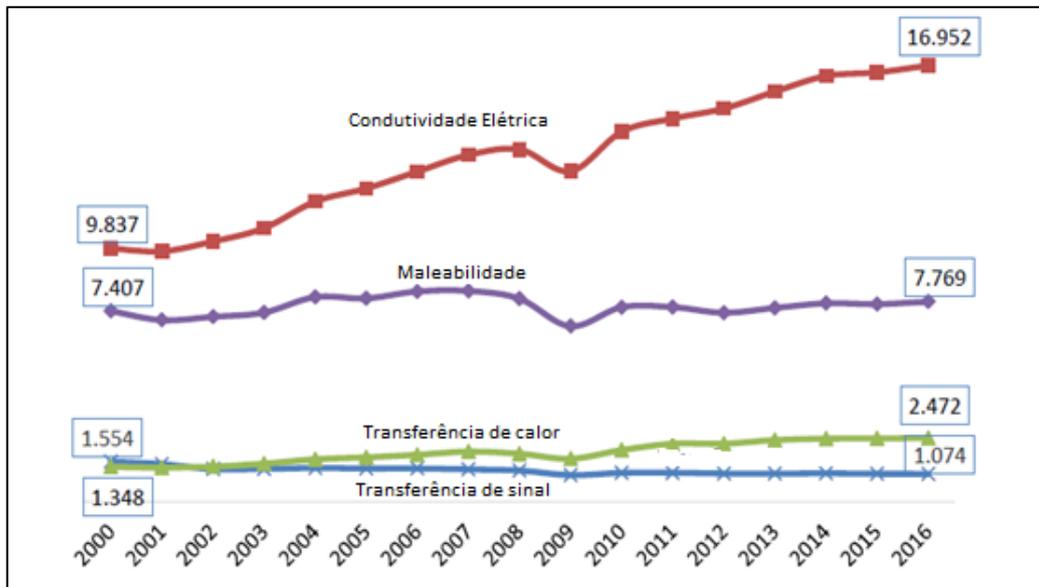
Neste cenário, destaca-se a indústria mineral paraense, que atualmente é responsável por praticamente 80% de toda a produção bruta nacional. Deste total, 75% é produzido pela empresa Vale S.A nas minas do Sossego e do Salobo, situadas nos municípios de Canaã dos Carajás e Marabá respectivamente (DNPM,2018).

### 2.1.1. Características do metal de cobre

Desde sua descoberta, o cobre sempre teve largo emprego na história da humanidade devido seus atributos físico-químicos, como relativo baixo ponto de fusão, boa ductilidade, maleabilidade, resistência a corrosão e alta condutividade térmica e elétrica. Estes atributos fizeram o fizeram ser um dos principais metais utilizados pelo Homem, marcando em sua era moderna, pelo grande emprego principalmente nas indústrias da construção civil e telecomunicações (DNPM, 2010).

Pode-se destacar que a indústria em geral, utiliza preferencialmente o cobre por conta de um conjunto de propriedades físicas específicas que são de extrema importância para um setor. Na Figura 2.3 observa-se a divisão do consumo de cobre baseado nas suas principais características, enquanto que na Figura 2.6 estão separados por setor de utilização.

Figura 2.3 – Consumo de Cobre por Propriedade. (COCHILCO, 2017)



Na Figura 2.3 se observa que o maior emprego do cobre atualmente é dado por principalmente por quatro características, que são a boa condutividade elétrica, que pode ser reforçada pela Figura 2.4. Estas figuras demonstram sua excelente condutividade elétrica quando comparado a outros metais (ficando atrás somente do grafeno e da prata que são materiais mais nobres e caros quando comparados ao cobre), por sua grande maleabilidade (ocupa a quarta posição entre os metais mais maleáveis, ficando atrás somente do ouro, platina, estanho e chumbo), por sua excelente condutividade térmica, apresentado pela Figura 2.5, e por fim, pela sua capacidade de transferência de sinal (COCHILCO, 2017).

Figura 2.4 - Comparativo entre a condutividade elétrica de vários materiais. (COCHILCO,2017)

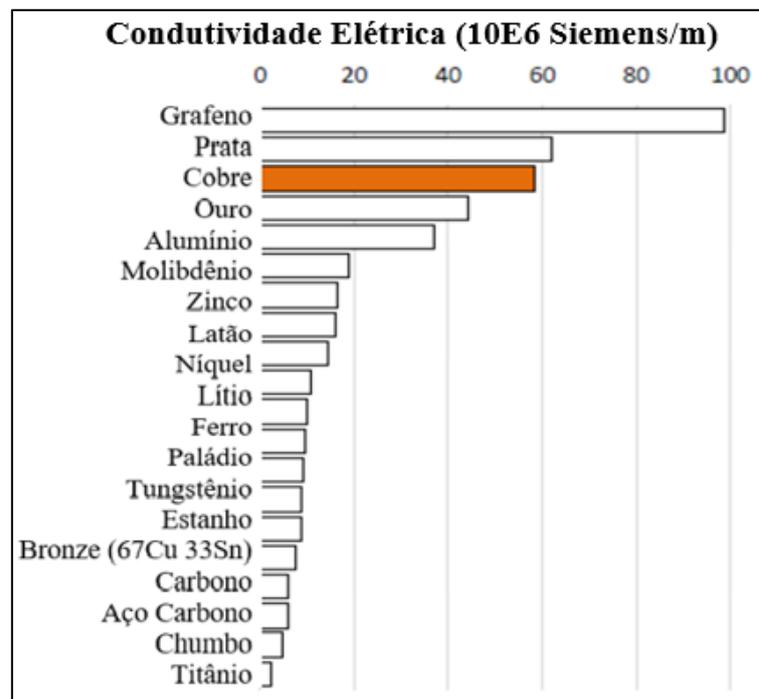


Figura 2.5 - Comparativo entre a condutividade térmica de vários materiais. (COCHILCO,2017)

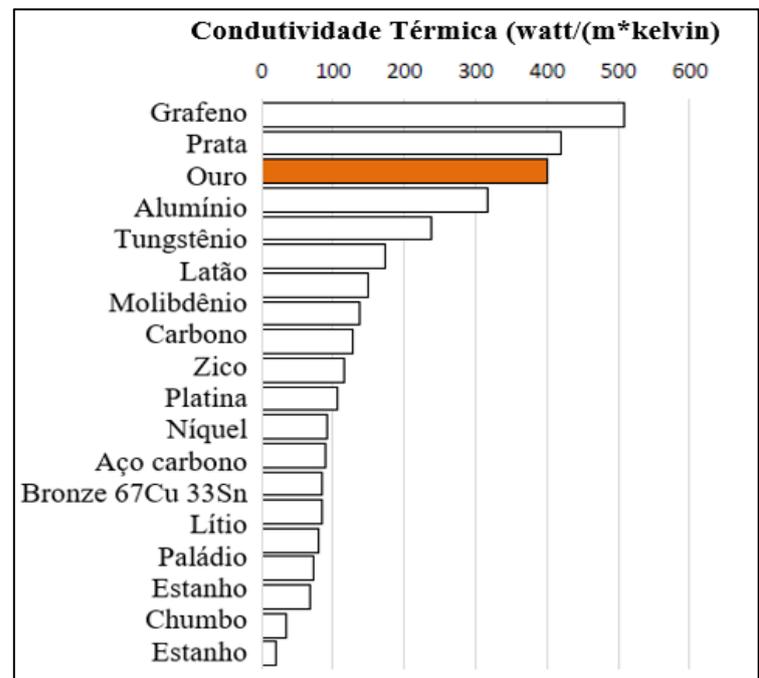
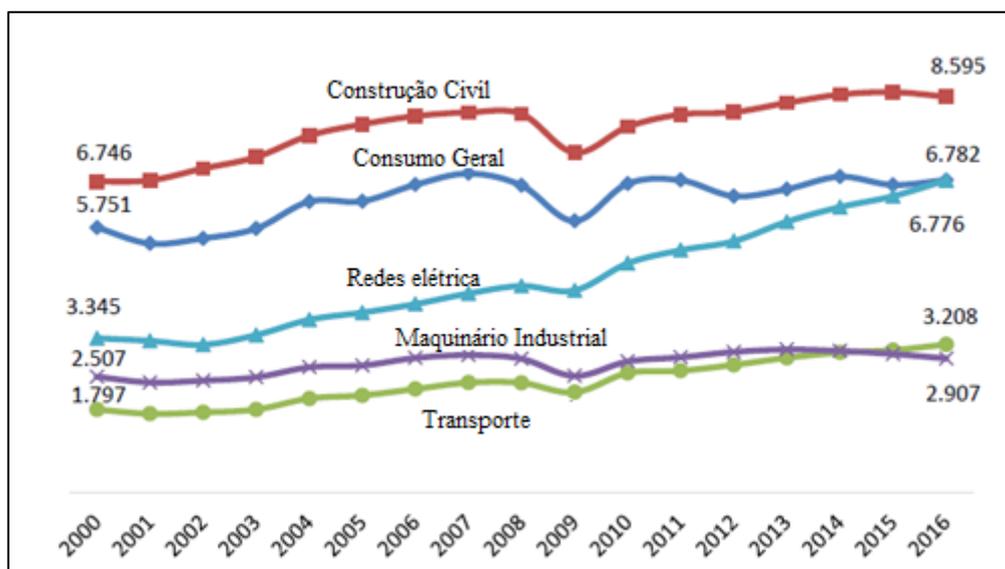


Figura 2.6 – Série histórica do consumo de cobre por setor. (COCHILCO, 2017)



Já entre os setores da economia, o emprego pode ser dividido em 5 grandes setores que são serão expostos a seguir. O primeiro e maior setor é o da construção civil, que são em sua grande maioria pode ser representado por insumos como cabos de alimentação, dutos de refrigeração, chapas de cobre e associados. O segundo é representado pelo setor de redes elétricas, que estão representadas pelos cabos em geral, barramentos, filamentos, chapas em geral, além dos componentes presentes nas torres de transmissão. O terceiro, pelo setor de consumo geral que são representadas por acessórios, eletrônicos de consumo, moedas, artilharia militar e comercial entre outros. O quarto, representado pelo setor de transporte que englobam as indústrias automobilísticas, aeronáuticas, ferroviários e aeroespaciais. E por fim o quinto setor, representado pelos maquinários industriais que incluem os maquinários em geral, válvulas e trocadores de calor.

### 2.1.2. Processo Produtivo do Cobre

O processo produtivo da cadeia do cobre pode-se dividir em duas etapas bem distintas. A primeira etapa é a etapa mineradora, que envolve desde os processos de extração do mineral das rochas, até a produção do concentrado de cobre, com teores aproximados de 30%. Após essa etapa concluída, o cobre é transportado até as refinarias metalúrgicas, onde se inicia a segunda etapa do processo produtivo, que é responsável por produzir o cobre puro para comercialização.

É de extrema importância ressaltar que este trabalho visará o emprego do rejeito da primeira etapa, que é a etapa da mineração. Portanto o material utilizado neste estudo foi rejeito de cobre, que atualmente encontra-se na bacia de rejeitos da mineradora.

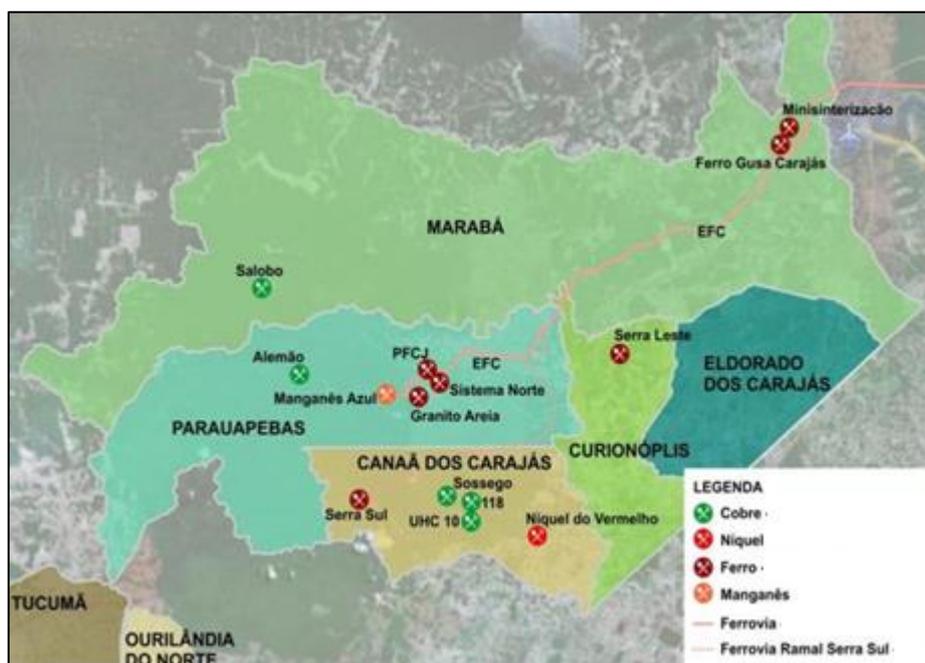
### **2.1.3. Processo Produtivo do Cobre na Mineração**

Nos tópicos a seguir, serão descritas sucintamente as operações relacionadas a primeira etapa da produção do cobre, que ocorrem na mina do Sossego, onde está localizado a barragem de rejeito onde as amostras de rejeito foram coletadas.

### **2.1.4. Localização do Projeto**

A mina do Sossego é uma mina de cobre, pertencente à mineradora VALE S/A, e está situado no pequeno município de Canaã dos Carajás, na mesorregião sudeste do estado do paraense. Segundo o IBGE (2017), o município tem aproximadamente 36 mil habitantes e uma extensão territorial de 3.146 km<sup>2</sup>, mas que se encontra na 8<sup>o</sup> colocação entre os maiores de produtos interna brutos (PIB) dos municípios do estado, devido aos grandes projetos mineradores que existem em seu território, conforme é possível observar pela Figura 2.7. Dentre estes projetos pode-se destacar o projeto S11D (Serra Sul) que atualmente é o maior complexo de extração de minério de ferro no Brasil, e o projeto Sossego que está em funcionamento desde o ano de em 2004, que é responsável pela produção de aproximadamente 100 mil toneladas de cobre concentrado segundo o relatório de produção anual da empresa em 2017 (VALE, 2017).

Figura 2.7 – Principais projetos minerais na província do Carajás. (Junior, 2010)

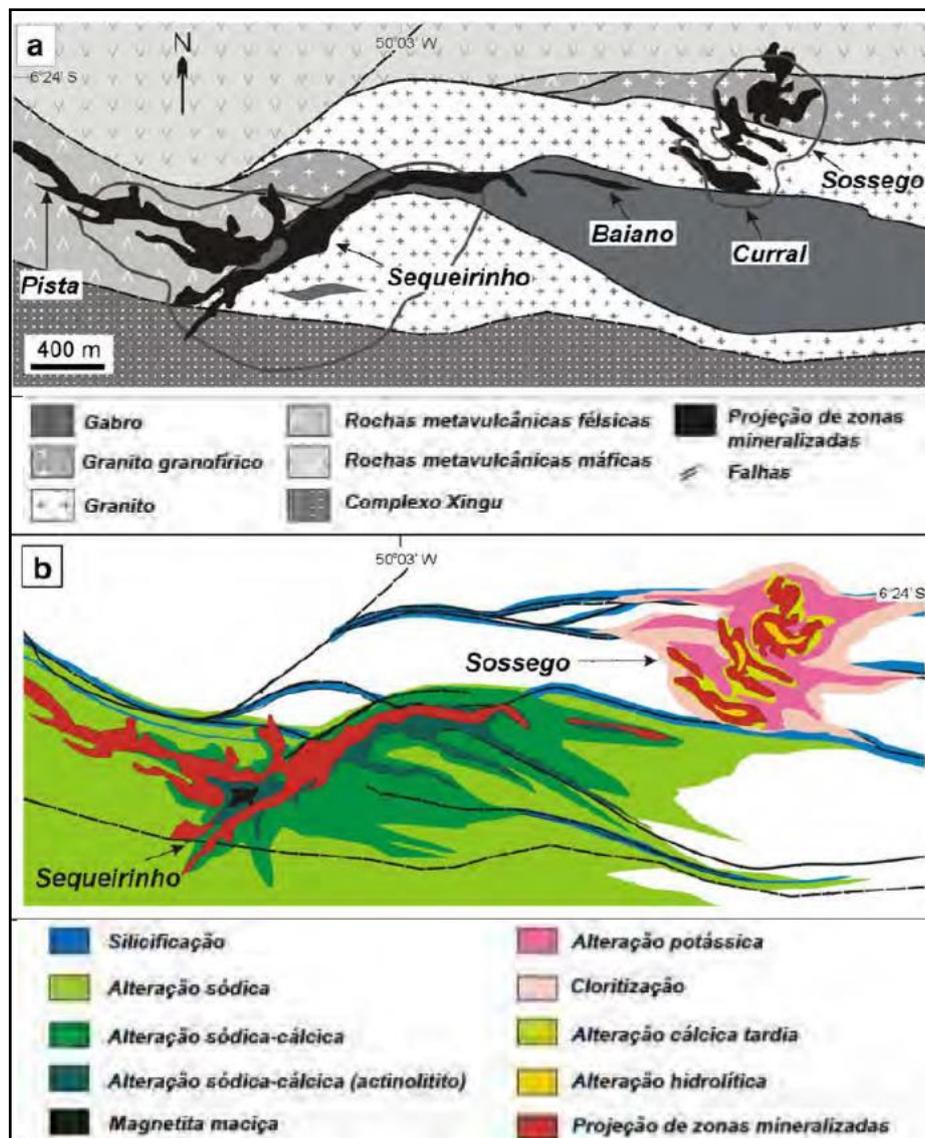


### 2.1.5. Geologia Regional e Local

A região citada acima é conhecida como província mineral de Carajás, que atualmente é uma das maiores províncias mineral do mundo, apresentando grandes jazidas de ferro, manganês, níquel, cobre entre outros minerais. Geologicamente o projeto Sossego está localizado na porção sudeste do Craton Amazônico, e é constituída por dois compartimentos tectônicos: O cinturão de Cisalhamento Itacaiunas a norte, e o terreno granito-*greenstone* Rio Maria a sul. Basicamente, os corpos minerais estão localizados ao longo de uma zona de cisalhamento, que permitiu que através das diversas falhas e fraturas nas rochas, intensos fluidos hidrotermais alterassem a composição das rochas hospedeiras (granitos, gabros e rochas metavulcânicas) e permitiram diversos tipos mineralização nas rochas, que acabaram por gerar cinco corpos mineralizados, que são: Pista, Serqueirinho, Baiano, Sossego e Curral (SHIMIZU, 2012).

Atualmente a operação da mina que é responsável pela extração do minério, acontece em torno de três corpos minerais que são eles: Serqueirinho, Sossego e Pista conforme ilustrado na Figura 2.8, sendo o Serqueirinho o mais importante corpo mineral e o Sossego o segundo mais importante.

Figura 2.8 - Mapa geológico simplificado com a localização dos corpos Pista, Serqueirinho, Baiano, Curral e Sossego. e (b) Distribuição esquemática das zonas de alterações hidrotermais (modificado de VALE(2015), MONTEIRO et al., 2008).



### 2.1.6. Desmonte e Transporte:

Na mineração, a primeira etapa da cadeia produtiva do minério de cobre é feita através do desmonte de rocha, a qual contém o minério de interesse. Através de equipamentos como perfuratrizes, são feitos furos nas bancadas de minérios e preenchidos com explosivos que geralmente são ANFO (nitrato de amônia + óleo diesel), emulsões ou dinamites, conforme pode ser visualizado na Figura 2.9 a qual mostra a cava do Sossego. Após o carregamento dos furos com os explosivos, as detonações são executadas, e o material que foi detonado começa a ser carregado por escavadeiras e caminhões fora de

estrada com capacidade carga entre 150 e 240 toneladas, até o seu primeiro destino de beneficiamento que é a etapa de britagem. Portanto, nesta primeira etapa, o objetivo do desmonte de rocha é reduzir o maciço rochoso em blocos de diâmetros menores, capazes de alimentar o britador primário que se encontra no próximo estágio de beneficiamento que é a britagem.

Figura 2.9 – Vista do Mirante – Cava do Sossego.



#### 2.1.7. Etapa de Britagem e Moagem:

As etapas de britagem e moagem consistem na fragmentação de um material heterogêneo, que na maioria das vezes estão aglutinados em uma única rocha, visando liberar os materiais valiosos dos materiais que não servem ao processo (ganga). Nos casos de materiais homogêneos, necessita-se da fragmentação do material até a dimensão requerida para sua utilização no processo produtivo (FIGUEIRA et al., 2010).

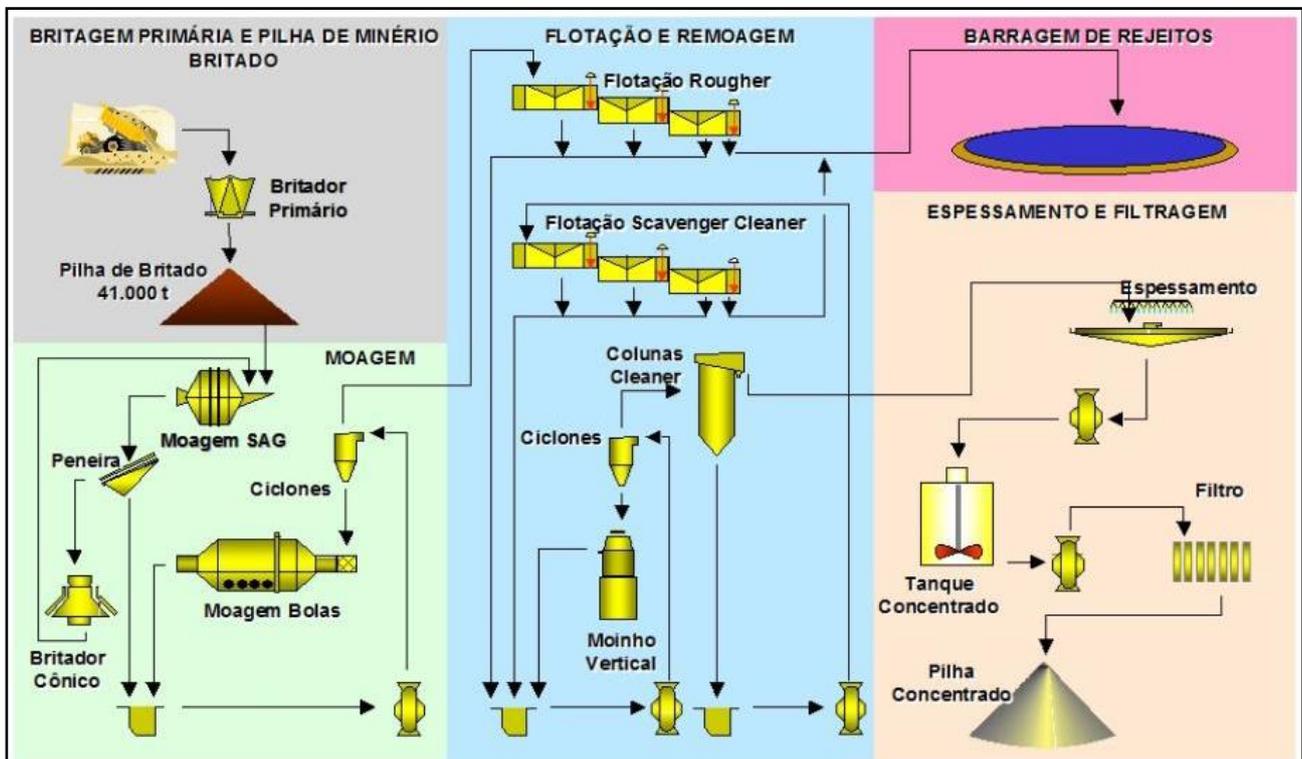
No projeto Sossego, a etapa de britagem é composta por um britador primário, que é do tipo cônico com capacidade de processamento de até 2.400 toneladas por hora, e de britar blocos com até 1,2m de diâmetro. O principal objetivo desta etapa é a redução do tamanho dos blocos que alimentam o britador, de forma que os diâmetros máximos sejam de até 5,5” de diâmetro.

Após esta etapa, o minério é encaminhado por uma correia transportadora de aproximadamente 4,5 km, para alimentar uma pilha pulmão (pequeno estoque), e que posteriormente, alimenta um moinho semi-autogeno (SAG) utilizado para realizar mais uma etapa de fragmentação do material a moagem.

A moagem, segundo FIGUEIRAS et al., (2010) é o último estágio do processo de fragmentação, pois neste processo, as partículas são reduzidas em diversas combinações de impactos, compressões, abrasões e atritos. Essa redução visa a obtenção de um tamanho adequado a liberação do material de interesse, que geralmente é utilizado para ser concentrado nos processos subsequentes.

Na planta de beneficiamento da usina da mina do Sossego, existem 2 linhas idênticas de processamento, onde cada uma delas possui 1 moinho SAG e 1 moinho de bolas, responsáveis pela cominuição do material até a fração necessária para a primeira fase de concentração que é a flotação, conforme demonstrado pela Figura 2.10.

Figura 2.10 – Fluxograma do Processo Produtivo. (Vale, 2017)



### 2.1.8. Método de concentração

A flotação é um método de concentração de partículas sólidas de diferentes naturezas, onde a separação se dá através da suspensão destas partículas através da polpa de minério (mistura de minério e água) da qual elas serão removidas. É injetado um gás dentro da polpa (geralmente ar), gerando assim um fluxo de bolhas ascendente. Depois de ocorrido este processo as partículas são obrigadas a percorrerem um fluxo, sendo que este fluxo é determinado pela química de superfície das partículas, de modo que as partículas

que possuem afinidade com o ar (hidrofóbicas) tendem a se aderirem as bolhas, fazendo com que o conjunto bolha-partícula tenha uma densidade menor do que a do líquido. Este fenômeno, acarreta um fluxo ascendente deste conjunto partículas-bolhas e que ocasiona na parte superior do tanque a formação de uma espuma e tão logo são retiradas do tanque por transbordamento. Já as partículas que possuem afinidade com a água (hidrofílicas) tendem a não se aderir as bolhas e seguem seu fluxo natural descendente no tanque e são recolhidas ao fundo do mesmo (CHAVES, A. P. et al., 2010).

No projeto Sossego, a etapa de flotação possui três estágios. A primeira etapa é a Rougher, responsável pela concentração máxima do mineral de interesse. A segunda é a coluna de flotação, onde se tem um refinamento do concentrado da etapa rougher e do material recuperado pela etapa scavenger-cleaner e a terceira etapa é a scavenger-cleaner. Esta última etapa é responsável pela máxima recuperação do minério de interesse, pois teoricamente o material que não foi flotado na coluna de flotação, deveria ir direto para a barragem de rejeito. Porém, nesta etapa ainda há um percentual significativo de minério de interesse na polpa, fazendo com que exista a necessidade de mais uma etapa, para recuperação destas partículas.

Após todo esse processo de flotação, o material de interesse vai para o espessador e após passar por um filtro, dá origem a pilha de concentrado, que é o material final dentro do processo de concentração do cobre dentro das mineradoras. O material que não é de interesse (ganga), é descartado e enviado para a bacia de rejeitos da mineradora para acumulação.

#### **2.1.9. Bacia de Rejeitos:**

Devido às atividades de produção mineral gerar um volume significativo de massa do minério que é rejeitada no processo de lavra e beneficiamento, são necessárias construções de grandes estruturas de contenção para receber tal volume de material descartado, as barragens de rejeito.

As estruturas das barragens, devem atender às exigências de proteção ambiental e de segurança, além de inserir-se como parte integrante do processo produtivo, atendendo, por exemplo, necessidades como reutilização de água para utilização na mina e na usina. Também deve se pensar que o rejeito que hoje está acumulado na bacia de rejeitos e ainda não é tecnicamente ou economicamente viável para seu processamento e sua concentração, mas que pode em um futuro não muito distante, se tornar material de interesse. Nos

últimos anos, vem se conseguido expressivos avanços tecnológicos para métodos de concentração e também a escassez de bens minerais podem torna viável o reprocessamento destes materiais (SOARES, L., 2010).

Em termo de área de expansão, no projeto Sossego, é possível afirmar que a área da barragem de rejeitos (circulado em vermelha) é maior do que a área de todo restante do projeto, conforme é possível observar na Figura 2.11. Em seu último balanço hídrico, só ano de 2017 a companhia afirmou que foram depositadas aproximadamente 13 milhões de toneladas de rejeito que foram destinadas a esta bacia de rejeitos. E que no total existem aproximadamente uma massa de 160 milhões de toneladas, ou seja, é um material com imenso potencial para ser explorado e reutilizado.

Figura 2.11 – Vista aérea do projeto do Sossego - (Google Earth, 2018)

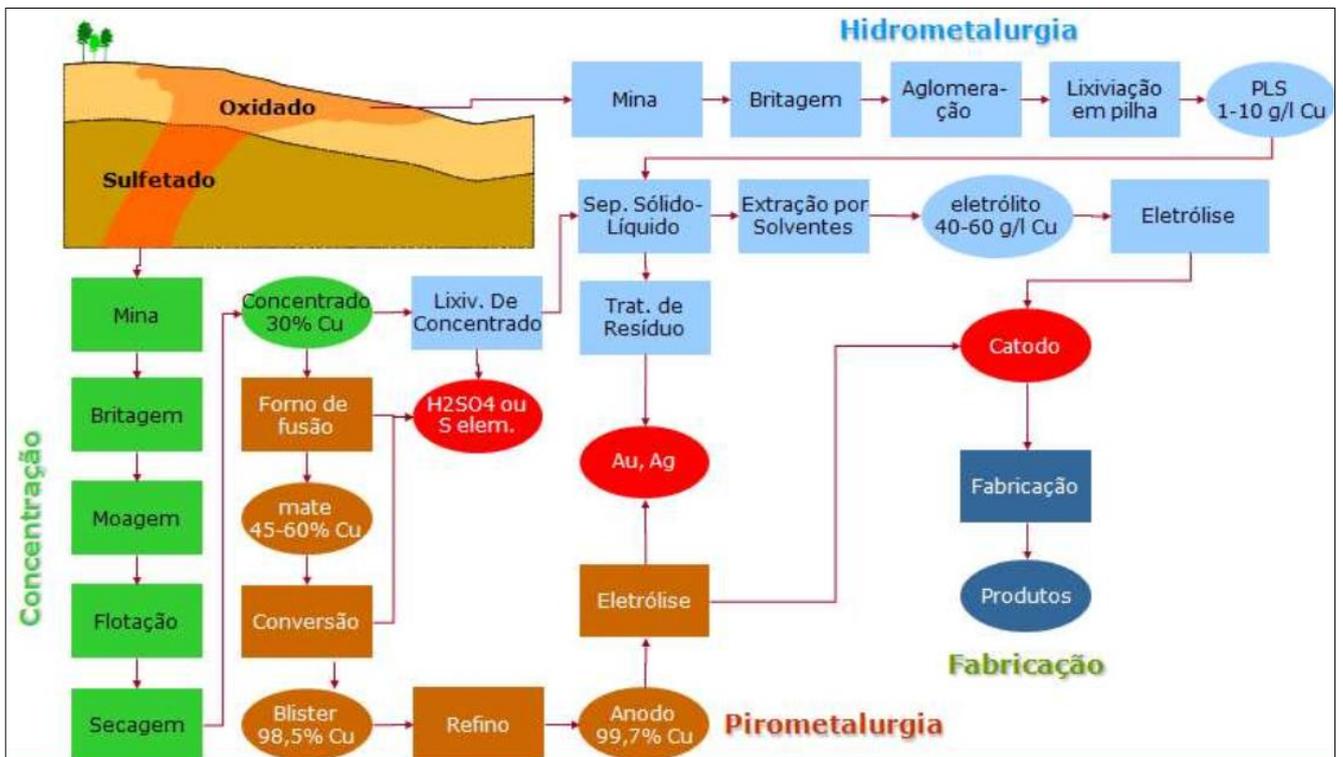


#### 2.1.10. Processo Produtivo do Cobre na Metalurgia

Após a etapa de extração e beneficiamento primário nas indústrias mineradoras, conforme descritos nos tópicos anteriores, o cobre é transportado até as indústrias metalúrgicas e terá uma rota de processamento até que se torne metal pronto para comercialização. Porém, neste processo, existem duas rotas de processamento para processar esse concentrado de cobre: a pirometalurgia e a hidrometalurgia. De modo geral

o processo hidrometalurgico é utilizado quando os minerais são oxidados, e o processo pirometalurgico pode ser utilizado quando os materiais forem oxidados ou para materiais sulfetados como, por exemplo, a calcocita ( $Cu_2S$ ). Na Figura 2.12 pode-se observar que os fluxos são bem diferentes dependendo do tratamento a ser escolhido para cada minério.

Figura 2.12 – Rota de processamento do Cobre. (VALE, 2017)



Observa-se que em verde está à etapa correspondente a fase da mineração de materiais sulfetados (que é o caso da mina do Sossego), e que após a fase final de produção do concentrado do cobre, existe uma bifurcação no fluxograma que conduzem para as duas rotas mencionadas anteriormente, em azul a rota da hidrometalurgia e em marrom, a pirometalurgia.

É possível verificar também que existe uma rota alternativa da hidrometalurgia na qual o minério oxidado é britado, empilhado e aglomerado, para iniciar-se o procedimento de lixiviação de pilhas, conforme demonstrado no fluxograma da Figura 2.12. Contudo, esse processo é pouco utilizado no Brasil, de modo que mais de 90% da produção de cobre primário provêm de minérios sulfetados, redução e refino (SILVA, 2011).

Estes dois processos (hidrometalurgia e pirometalurgia) também geram resíduos que comumente são denominados de escória e podem ser reaproveitados em outras áreas, inclusive na indústria da construção civil. Um grande exemplo destes trabalhos é o trabalho

de Resende (2009), que utilizou a escória metalúrgica do cobre como agregado miúdo na produção de argamassas e o trabalho de Anjos (2017), que utilizou a escória metalúrgica como substituição parcial aos agregados miúdos. Basicamente, devido às características físico-químicas da escória de cobre, em ambos os trabalhos, os autores perceberam que ao adicionar a escória de cobre na mistura, o produto final, seja ele o concreto ou a argamassa, perdia aproximadamente 10% da resistência à compressão axial, e 15% na resistência à tração do concreto. Porém, o principal foco deste trabalho não é a análise da utilização desta escória metalúrgica, mas sim analisar a substituição do rejeito da mineração na produção do concreto, que possui características físico-químicas muito diferentes da escória metalúrgica do cobre.

## **2.2. Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Industriais.**

Com a crescente preocupação dos órgãos governamentais e a grande pressão exercida pelas comunidades ambientais internacionais, pelo desenvolvimento mais sustentável das atividades humanas no meio em que vivemos, é cada dia mais comum as grandes empresas tentarem ajustar seu processo produtivo ao ponto se serem o mais eficiente possível (EDITORA3, 2016).

Neste sentido, nos últimos anos é comum visualizar em trabalhos científicos como este, onde existe tanto o apoio das empresas que são geradoras dos resíduos e rejeitos, quanto de empresas e pesquisadores, que buscam a possibilidade de reutilização desses materiais. Deste modo, pesquisadores e empresas trabalham em conjunto na tentativa de viabilizar uma solução que seja benéfica tanto para o gerador do resíduo, quanto para quem irá reaproveitá-lo. Conseguindo promover desta forma a sustentabilidade na maior parte da cadeia produtiva do material. É importante ressaltar que essas pesquisas, por muitas vezes, geram resultados positivos a sociedade e a comunidade científica, sejam eles financeiros tecnológicos, ou ambientais (SIEBEN et al., 2017).

Tais ações efetivamente começaram a ser discutidas na primeira conferência mundial a tratar da preservação do meio ambiente em Estocolmo. Porém, foi no início da década de 90, onde no evento ECO-92 realizado no Rio de Janeiro, vários países produziram conjuntamente um documento denominado AGENDA 21. Neste documento os países signatários, se comprometiam em realizar um novo padrão de desenvolvimento ambiental racional, dando apoio e suporte a práticas mais sustentáveis.

Embora o evento ocorresse no Brasil, nesta época, haviam apenas algumas discussões sobre o tema, mas ainda não havia nada concreto sobre legislação específica que tratasse objetivamente de destinação sustentável. Principalmente no que diz respeito aos resíduos sólidos industriais produzidos em larga escala, pelas maiores indústrias do país. O primeiro projeto de lei, com este tema em específico, foi protocolado no ano de 1991, onde se tentou-se a criação de um projeto de lei, do qual versava sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde, visando solucionar a problemática da mistura de resíduos comuns com resíduos hospitalares. Contudo esse projeto recebeu mais de cem propostas de alteração, para inclusão de outros dispositivos na lei e arrastou-se durante longos anos no congresso nacional. E apenas no ano de 2007 o governo federal de fato iniciou o trâmite que culminaria no ano de 2010, na criação da Lei 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (MMA, 2016).

Um grande fator que ajudou também o impulsionamento deste tipo de pesquisa, é o fato de que as jazidas de recursos naturais, ou seja, de matérias primas como areia, seixo, ferro, cobre, entre outros elementos largamente empregados na indústria da construção civil, estarem ficando mais escassas. Essa situação tem resultados em custos logísticos cada vez maiores, para sua obtenção e transporte, o que por sua vez acabam tornando o produto comercializado cada vez mais caro e até muitas vezes inviável economicamente.

No caso em específico, nas indústrias de transformações primárias, onde se enquadram as mineradoras e as metalúrgicas, esse processo de reaproveitamento é um pouco mais complexo, devido ao seu resíduo final muitas das vezes estar contaminado por produtos tóxicos, ou possuir em sua composição metais pesados e perigosos para a saúde e para o meio ambiente. (NAGALI, 2014)

Atualmente no Brasil, vigora a NBR 10.004 (ABNT, 2004) que classifica resíduos sólidos em duas categorias, a classe I que se refere aos resíduos perigosos e a classe II que se refere aos não perigosos. Dentro da classe II, ainda há uma subdivisão entre os materiais que não são inertes (classe II-A) e os inertes (classe II-B). Como existem muitas restrições quanto ao manuseio, acondicionamento e disposição sobre os resíduos classe I, a indústria da construção civil, tende a tentar reaproveitar o material que é enquadrado como classe II, já que estes possuem um processo mais simplificado para voltar a ciclo da cadeia produtiva

Segundo Berrios & Morais (2013) e Luz & Almeida (2016), durante décadas muitos materiais considerados como rejeitos e resíduos industriais, foram estudados e pesquisados com a finalidade de encontrar-se uma solução mais adequada ao seu destino. Esta se tornou

mais relevante, ao passo que estes materiais além de ocuparem volume significativo de espaço dentro das companhias, ainda apresentam outros problemas como, por exemplo, elevado custo de armazenamento, monitoramento e contam com a problemática de que se forem descartados inadequadamente, podem causar grandes danos ambientais, além de multas e embargos gerados pelos órgãos fiscalizadores.

Existem alguns exemplos de materiais que após muitos estudos e pesquisas deixaram de ser classificados como resíduos, para serem classificados como subprodutos. Essa nova denominação, evidencia um maior valor agregado ao processo e ao material. Dentre tais materiais podemos destacar os seguintes:

- Sílica Ativa – Subproduto do silício metálico.
- Cinzas Volantes – Subproduto do carvão mineral.
- Escórias Siderúrgicas – Subproduto do ferro gusa e de aciaria.
- Resíduos da Construção Civil – Subproduto de construções e demolições.

Todos estes materiais citados acima já são produtos comercializáveis, com valor econômico agregado e grande importância em suas áreas de atuação. É de extrema importância a existência destes materiais que já foram consagrados pelo mercado, uma vez que eles dão força e suporte para que outras pesquisas que busquem avaliar a reutilização de outros resíduos e rejeitos como alternativas a substituições de matérias primas naturais.

Neste contexto, pode-se citar o trabalho de Guerra (2014), que utilizou rejeito de minério de ferro (pellet feed) em substituição do agregado miúdo na produção de blocos intertravados. O estudo apresentou melhores resultados de resistência à compressão com nos blocos onde houve adição de rejeito de ferro, do que com os agregados naturais. Também pode-se citar a pesquisa feita por Janković et al., (2015), que utiliza-se de rejeito de chumbo e zinco para substituição de agregados miúdos na produção de concreto auto adensável, obtendo ganhos de resistência de até 6% na resistência à compressão do concreto, além de não alterar a habilidade passante do mesmo.

Existem também alguns estudos que visam o aproveitamento de subprodutos para a indústria asfáltica, como aponta o relatório técnico da ANTT (2017) que verificou a viabilidade da utilização da escória de ferrosa de silício-manganês em misturas asfálticas em substituição aos agregados naturais. Neste relatório, analisou-se esta substituição na construção da VIA 040, que ligará Belo Horizonte/MG ao Distrito Federal/DF, e constatou

em seus estudos técnicos, que tecnicamente é possível a substituição em até 40% de agregado naturais por escória dentro da mistura asfáltica.

E além dos trabalhos já mencionados, há muitos outros trabalhos que utilizam diversos tipos de resíduos, com uma vasta gama de aplicações na indústria da construção civil, como por exemplo, para base ou sub-base de estradas, asfalto, lastro de ferrovias, adições para concretos, argamassas, produção de artefatos pré-moldados e elementos não estruturais entre outros. Nestas pesquisas, o principal objetivo é o de encontrar uma solução mais sustentável para o rejeito ou escória que é gerado pelo processo de fabricação de algum material, para que seja possível a redução dos passivos ambientais causados, tanto pela utilização de novos recursos naturais, quanto pela disposição ambiental deste material sem valor agregado.

### **2.3. Reaproveitamento de Rejeito de Cobre na Construção Civil**

Estudos apontam que para cada tonelada de cobre refinado produzido, são gerados em torno de 2,2 toneladas de rejeito e resíduo de cobre (GORAI et al., 2002). No ano de 2016 segundo o DNPM (2017), foram produzidas cercas de 509 mil toneladas de cobre concentrado, o que resultou em aproximadamente 1,120 milhões de toneladas de resíduos de cobre em todo o Brasil. As unidades federativas que mais contribuíram para essa produção foram o estado do Pará com aproximadamente 394,1 mil toneladas, seguido pelo estado do Goiás com 83,8 mil toneladas e pelo estado da Bahia com 31,4 mil toneladas. Atualmente quase todo esse rejeito produzido é acondicionado em grandes bacias de rejeitos.

Na literatura, especialmente em países líderes mundiais na produção de cobre como Chile, Peru, China e Estados Unidos, existem algumas pesquisas que utilizaram rejeito de cobre como substituto parcial ou total na produção de concreto e que serão apresentados abaixo, com a finalidade de dar embasamento e suporte aos resultados encontrados nesta pesquisa.

#### **2.3.1. No estado Fresco**

No estado fresco, as pesquisas que utilizaram rejeito de cobre como substituição de agregados, como as pesquisas de Onuaguluchi & Eren (2012), Thomas et al., (2013) e Janković et al., (2015), demonstram no mesmo sentido, que existe uma relação diretamente

proporcional entre a adição de rejeito de cobre no concreto com a consistência do mesmo, ou seja, quanto mais rejeito de minério de cobre é adicionado ao concreto, menor será sua consistência.

Esta característica da diminuição da consistência, também é comum em outros trabalhos que estudaram esse tipo de substituição (total ou parcial) de agregados miúdos. A pesquisa de Shettima (2016) e Viveiros (2017) utilizam respectivamente minério de ferro e minério de manganês para tal substituição, porém em ambos os trabalhos, observou-se essa característica de diminuição da consistência do concreto após a adição dos rejeitos na mistura.

Porém, para percentuais maiores de substituição de rejeito na mistura, observa-se que, na medida em que o concreto vai diminuindo sua consistência, sua coesão vai aumentando, ao ponto que se verifica a necessidade da utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes para manter o concreto em condições satisfatórias de utilização.

Os únicos trabalhos encontrados na literatura, que tem comportamento no estado fresco oposto às citadas nas pesquisas acima, são os trabalhos de Moura (2000) e de Anjos et al., (2017). Onde os autores demonstram em seus trabalhos que a utilização da escória metalúrgica do cobre, ao ser adicionada a mistura, devido a suas características físicas (formato esférico das partículas), fez com que houvesse um aumento da consistência do concreto à medida que escória metalúrgica de cobre era adicionada na mistura.

Pode-se observar que nos trabalhos acima, basicamente as propriedades no estado fresco, quando se trata de substituição de rejeito por agregados miúdos, são diretamente afetadas por duas características físicas que são: a granulometria do material e com o formato geométrico das partículas. De modo que, quanto mais fino o material, mais coeso ficará o concreto, assim como, quanto mais irregulares forem as partículas que compõem o rejeito mais coeso será o concreto.

### **2.3.2. No estado Endurecido**

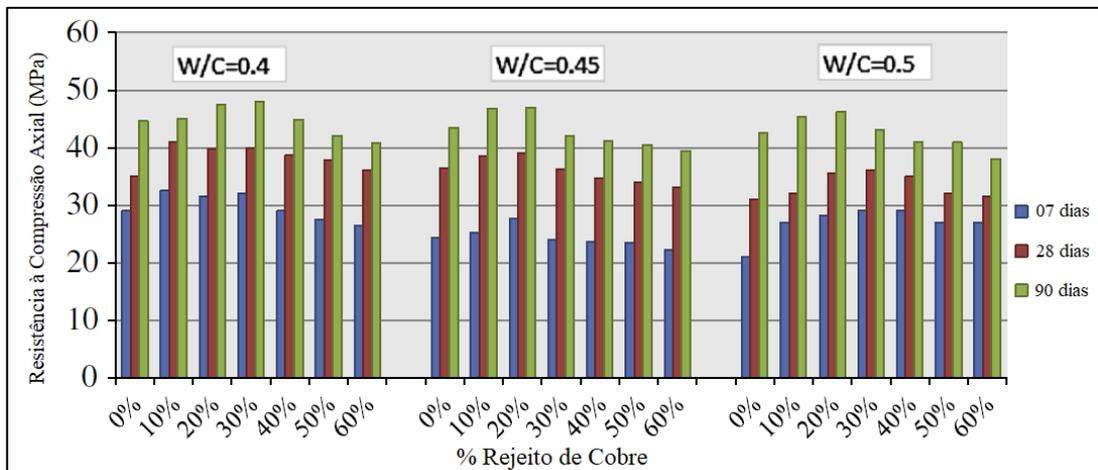
- **Resistência à compressão axial**

Nos trabalhos onde se deseja mensurar as alterações nas propriedades mecânicas do concreto, o principal ensaio realizado é o de resistência à compressão axial, portanto este é o ensaio tem maior número de pesquisas e resultados disponíveis. Dentre elas, pode-se citar a pesquisas desenvolvido por Jabari et al., (2009) onde os autores utilizaram rejeito de cobre como substituto parcial e total nos percentuais de 0, 10, 20, 40, 50, 60, 80 e 100% de substituição dos agregados miúdos em concretos e argamassas de alta performance com

relação  $a/c = 0,35$ . Constatou-se que substituições com até 50%, proporcionam aumentos da resistência axial à compressão em até 10%, quando comparados ao concreto de referência. No caso das argamassas, constatou-se que houve um acréscimo de 5% na resistência à compressão da mesma, quando comparada as argamassas sem rejeito (JABARI et al., 2011).

Já em estudo feito na Índia, Thomas et al., (2013), os autores utilizaram 7 percentuais de substituição que foram: 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 60% e três relações água / cimento: 0,40, 0,45 e 0,50. Neste estudo, comprovou-se que aos 28 dias, todos os traços que utilizaram rejeito de cobre apresentaram ganho de resistência em relação aos traços de referência. Na relação  $a/c$  de 0,40, com um teor de substituição de 10%, obteve-se o maior ganho de resistência, na ordem de 20%, em relação ao concreto de referência. Este nível de melhoria também foi obtido na relação  $a/c$  de 0,50, contudo, neste caso, a melhoria foi obtida com 30% de substituição. Na relação 0,45, o melhor resultado foi obtido com 20% de substituição, onde se constatou melhorias nos resultados em torno de 8,5%. Todos os resultados da pesquisa de Thomas et al., (2013), podem ser conferidos na Figura 2.13.

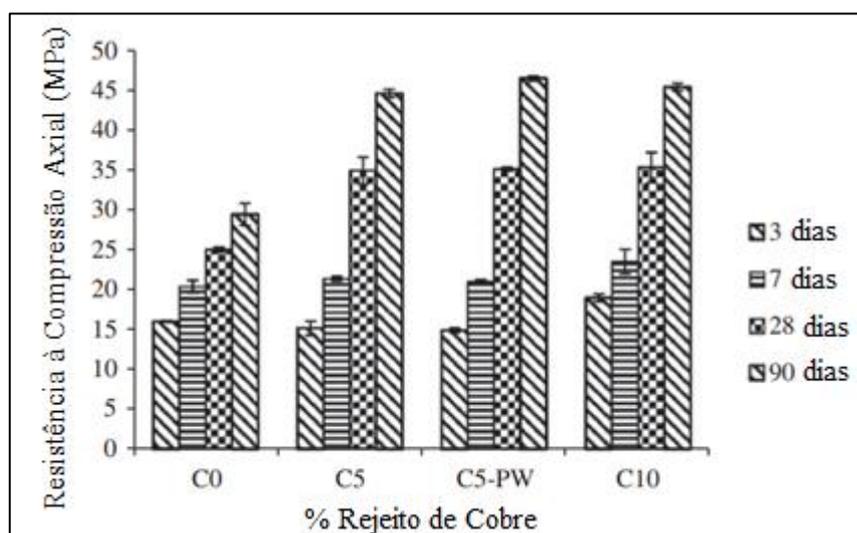
Figura 2.13 - Resultados de resistência à compressão axial. (Thomas et al.,2013)



Outra referência também encontrada na literatura, foi na pesquisa de Beniwal et al., (2015) que também optou por três relações  $a/c$  (0,45, 0,50 e 0,55) com 4 percentuais de substituição (0, 10, 20 e 30%). Nesta pesquisa, apenas para a relação  $a/c$  0,55 houve um ganho de resistência da ordem de 10%. Nas demais relações  $a/c$ , nos percentuais onde houve onde adição de rejeito, a resistência no máximo igualou-se ou teve sua resistência minorada, quando comparado ao traço referência.

Para melhor entendimento e como resultado comparativo, pesquisaram-se também trabalhos que utilizaram a substituição dos agregados por rejeito, em argamassas comuns. Na pesquisa de Eren & Onuagulchi (2012), utilizaram-se argamassas com 0, 5 e 10% de substituição de agregados miúdos por rejeito de cobre. Neste estudo, conforme observado a Figura 2.14, se constatou que as argamassas que continham rejeito, demonstraram um resultado para resistência a compressão em média, 40% maiores quando comparados às argamassas onde não foram utilizados rejeito de cobre.

Figura 2.14 - Resultados de resistência à compressão axial (Eren & Onuagulchi. 2012)

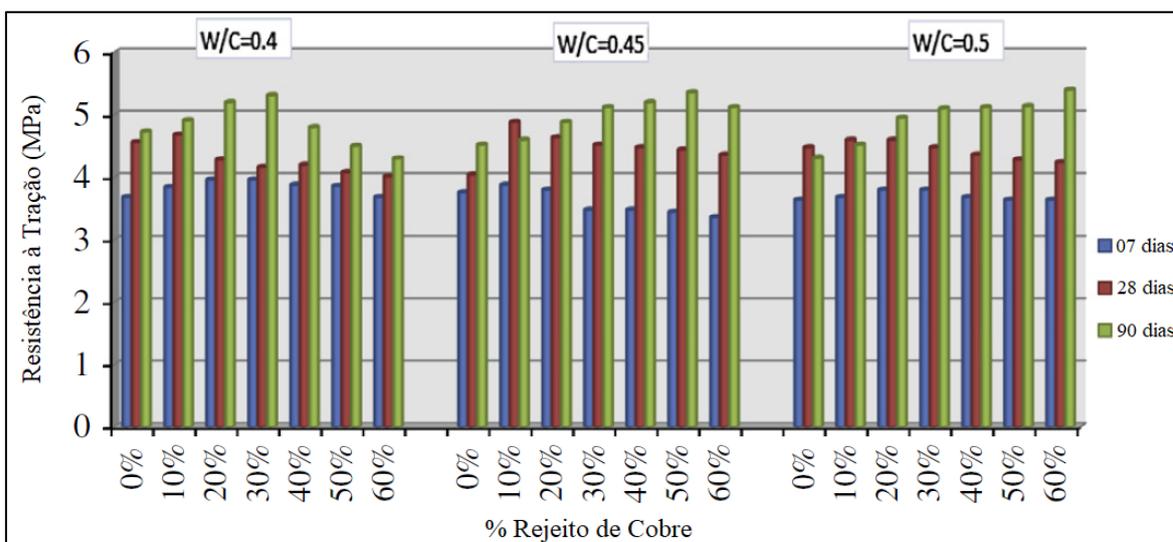


- **Resistência à tração**

Neste tópico, encontraram-se resultados, que correlacionassem a adição de rejeito dentro do concreto, com a variação da resistência à tração. Serão apresentados, resultados de tração por compressão diametral e resultados de tração na flexão, uma vez que ambos os ensaios, refletem a resistência à tração do concreto.

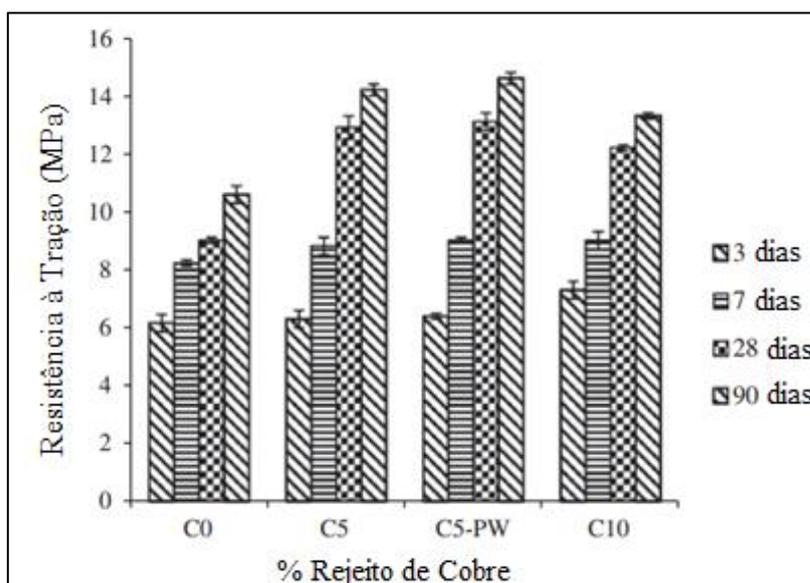
Neste sentido, na pesquisa de Thomas et al., (2013) os autores demonstraram alguns comportamentos interessantes para o ensaio de resistência à tração. Na Figura 2.15, observa-se que para relação a/c 0,40, os maiores percentuais de resistência à tração, deram-se no intervalo entre 30 e 40% de substituição. Já para a relação a/c 0,45, os melhores resultados deram-se entre 40 e 50%. E por fim, para a relação a/c 0,50 o melhor resultado, deu-se aos 60% de substituição. Constatou-se que para esta propriedade, a adição de rejeito de cobre, promoveu aos 90 dias, ganhos de resistência em média de 10% para a primeira relação a/c, e 15% para as demais.

Figura 2.15 - Resultados de resistência à tração. (Thomas et al.,2013)



Nesta mesma linha de pesquisa, porém estudando-se de argamassas, Eren & Onuaguluchi (2012), pesquisaram a substituição de agregados miúdos, com 3 percentuais de adição 5, 5% hidratado, e com 10%. Constata-se também que nesta pesquisa, houve um acréscimo de resistência significativo para todos os traços onde houve adição de rejeito de cobre. Os percentuais de 5% e 5% hidratado apresentaram resultados de ganhos de resistência à tração de aproximadamente 35%, enquanto o percentual de 10% de substituição resultou em ganho de resistência de 25%, conforme se verifica na Figura 2.16.

Figura 2.16- Resultados de resistência à tração (Eren & Onuaguluchi. 2012)



Jabari et al., (2011), pesquisaram a utilização da escória de cobre como substituto aos agregados miúdos na produção de argamassas. Nesta pesquisa, utilizaram-se oito percentuais de substituição: 0, 10, 20, 40, 50, 60, 80 e 100% de substituição aos agregados miúdos. Segundo o autor, devido às características físicas e geométricas da escória de cobre, todas as amostras onde se adicionou rejeito de cobre obteve-se um decréscimo na resistência a tração do concreto. Destacam-se os resultados de 10, 20 e 50% que perderam apenas 7% da resistência, quando comparado com o traço de referência, e para o traço com 100% de substituição, que perdeu mais de 30% de resistência, também quando comparado com o traço de referência.

Assim como nos trabalhos citados anteriormente, observa-se que um dos principais fatores influenciadores na substituição do rejeito por agregados são suas características físicas, principalmente granulometria e formato dos grãos. Observou-se que quando aplicado materiais como o rejeito de cobre, que possuía uma granulometria mais fina e uma geometria das partículas mais irregular em comparação ao agregado miúdo, os autores obtiveram resultados positivos em relação a resistência do concreto. Já para os autores que utilizaram materiais como a escória de cobre, que possui maior granulometria e formato das partículas mais simétrico, em alguns casos, obtiveram ganhos quase insignificativos de resistência, ou como apresentado na pesquisa de Jabari et al., (2011), decréscimos na resistência do concreto.

- **Módulo de Elasticidade**

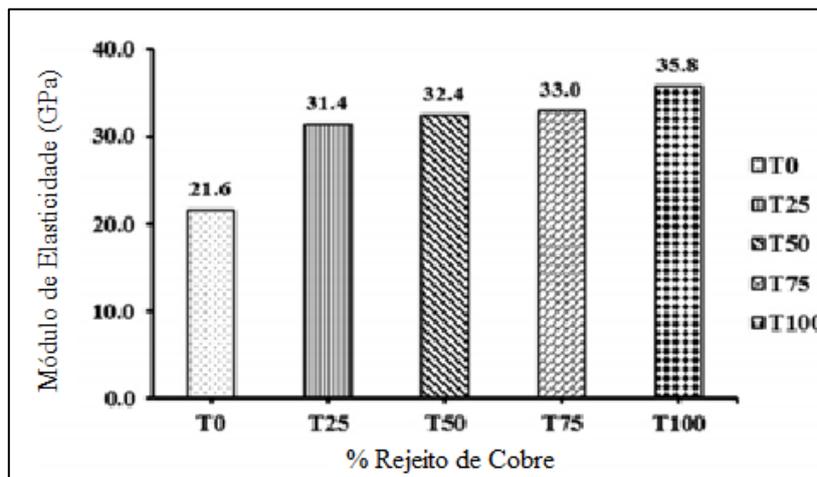
O módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida de rigidez de um material sólido, sendo uma propriedade fundamental no projeto de estruturas de concreto, consistindo na relação entre as tensões e as deformações do concreto (CALLISTER, 2014).

Não se encontrou na literatura, pesquisas que mostrassem resultados para os ensaios de módulo de elasticidade quando adicionados rejeitos de minério de cobre no concreto. Por outro lado, têm-se algumas pesquisas que estudaram o módulo de elasticidade do concreto com o emprego de rejeitos similares, oriundos de outros tipos de mineralização.

Shettima (2016) desenvolveu um trabalho que utilizou rejeito de minério de ferro, como substituto dos agregados miúdos ao concreto, utilizou apenas uma relação água/cimento de 0,50, e cinco percentuais de substituição (0, 25, 50, 75 e 100%). Neste trabalho, o autor obteve resultados positivos, nesta propriedade em análise. Constatou-se que todas as amostras onde se adicionou de minério de ferro, com destaque para o

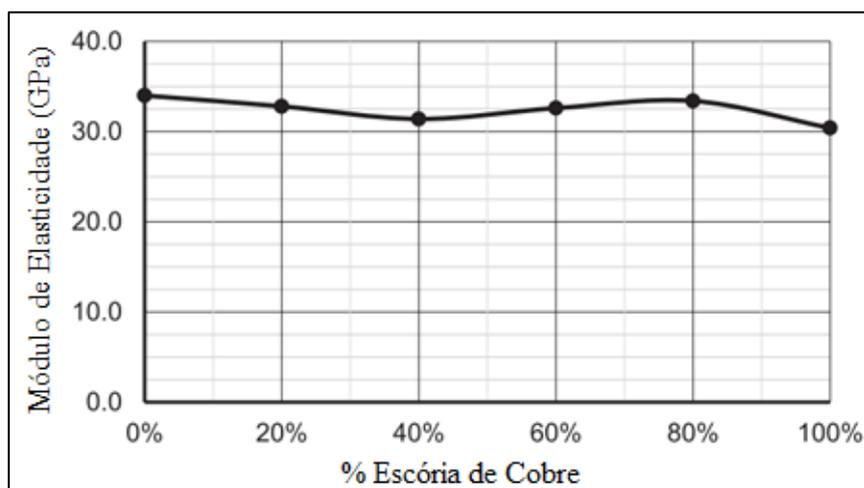
percentual de 100% de substituição que elevou o módulo de elasticidade em 42% quando comparado com o concreto de referência.

Figura 2.17 - Resultados de módulo de elasticidade (Shettima, 2016)



Outro resultado encontrado para este tipo de ensaio foi à pesquisa de Anjos et al., (2017), o qual utilizou escória metalúrgica de cobre como substituto parcial do agregado miúdo, e para os ensaios de módulo de elasticidade. Neste trabalho constatou-se que para todos os percentuais de substituição utilizados no trabalho (0, 20, 40, 60, 80 e 100%), houve um decréscimo médio de resistência da ordem de 10% em relação ao traço de referência. Por outro lado, quando se substituiu 100% do agregado miúdo pelo rejeito, teve-se uma diminuição do módulo de elasticidade na ordem de 10%, quando comparado com o concreto de referência.

Figura 2.18- Resultados de módulo de elasticidade (Anjos et al., 2017)



É de grande importância ressaltar que principalmente nos rejeitos provenientes das mineradoras, devido ao mesmo mineral de interesse estar associado a diversos tipos de rochas e a geologia regional de cada local serem diferenciada entre si, trabalhos com o mesmo objetivo (substituição parcial ou total de agregados miúdos) podem originar resultados completamente diferentes, uma vez que a composição físico-química do rejeito dependerá exclusivamente das características das rochas hospedeiras, sendo que estas podem variar muito de uma localidade para a outra.

#### **2.4. Impactos ambientais gerados pela disposição errônea de rejeitos.**

Os impactos ambientais causados por acidentes gerados por falhas nas contenções em barragens de rejeito acabam por acarretar extensos danos como demonstrado pelo estudo de dano associado de barragens apresentado pelo DNPM no ano de 2016.

Dentre os casos ocorridos podem-se destacar alguns deles, como por exemplo, o ocorrido em outubro de 2015 na cidade de Mariana em Minas Gerais. Na ocasião em questão à barragem de rejeito de ferro da mineradora Samarco Mineração S.A, rompeu-se devido uma falha estrutural, acarretando um despejo de cerca de 62 milhões de metros cúbicos na parte alta do município de Mariana, que foi totalmente devastado por conta deste acidente, além de ter provocado a morte de 19 pessoas no município. A lama (rejeito de minério de ferro) proveniente da barragem além da devastação do município, ainda poluiu muitos rios e afluentes da região, chegando até mesmo contaminar parte do Oceano Atlântico, devido ao grande volume de lama despejado. Devido as grandes consequências deste acidente, este evento foi noticiado no mundo inteiro devido a sua proporção e foi considerado o maior desastre ambiental brasileiro envolvendo barragens de rejeitos (CARMO et al., 2017).

Em outro caso no estado do Pará, um escândalo nacional aconteceu envolvendo a mineradora norueguesa Norsk Hydro que tem filial no município de Barcarena. Neste episódio o Instituto Evandro Chagas, produziu relatório técnico (relatório 02/2018) que trata da avaliação dos impactos referentes ao transbordo de lama vermelha na cidade de Barcarena, após grandes períodos chuvosos na região. Concluiu-se que águas de diferentes pontos de coleta do município, entre rios e áreas alagadiças estão com níveis de concentração de metais acima do permitido pela resolução do CONAMA 357/2011,

fazendo com que a saúde da população seja afetada com doenças dos mais diversos tipos (IEC, 2018).

E infelizmente recentemente, o caso com a maior tragédia humana que ocorreu na cidade de Brumadinho - MG onde até a presente data não há número certo de fatalidades, contudo há um número muito grande de falecidos. Se o evento ocorrido em Mariana foi considerado o maior desastre ambiental envolvendo barragens no Brasil, o de Brumadinho já pode ser considerado o pior desastre com mortes humanas, dado que muitas instalações administrativas da mineradora como refeitórios e outras áreas administrativas, localizavam-se na parte mais baixa da barragem, que após o rompimento foram completamente devastadas. Além das instalações da mineradora, a lama do rejeito ainda devastou maior parte do município por onde a lama passou, destruindo tudo que estavam no curso da barragem de rejeitos conforme é possível observar na Figura 2.13 (G1, 2019).

Figura 2.19 – Imagem de Brumadinho/MG após rompimento de barragem. (G1, 2019)



Viveiros (2017) relata em sua pesquisa problemas oriundos de uma barragem de rejeito de manganês no sudeste paraense, no município de Marabá - PA, onde em períodos de muita chuva na região, se comprovou que a bacia de rejeitos estava transbordando e o material transbordava para o rio, impossibilitando a utilização do rio pela comunidade ribeirinha local.

Tais acidentes decorrem normalmente da falha estrutural da barragem ou da falta de capacidade da barragem, que acabam por romper ou transbordar, criando-se um caminho de destruição pelo enorme volume de rejeitos que são deslocados em um curto espaço de

tempo. Porém, além destes problemas ambientais, ainda há outros problemas, como a contaminação do solo e do lençol freático das comunidades locais. Especificamente se tratando de minério de cobre, ainda são necessárias muitas observações e um rígido controle para evitar que ocorra a drenagem ácida de mina (DAM).

Estudos específicos de minério de cobre, apontam que o mais grave problema ambiental gerado é a drenagem ácida de mina (DAM) que é definida por Silva (2011) como uma solução aquosa caracterizada por possuir pH geralmente abaixo de 3 e diversos metais dissolvidos com concentrações que podem variar de 100 a 300mg.L-1. Devido a essas características, a DAM representa grandes riscos ambientais, em especial, impactos hídricos, em consequência da solubilização e mobilização de metais pesados. Na Figura 2.20, é possível observar um lago que foi contaminado pela DAM, e está impróprio para uso.

Figura 2.20 – Lago contaminado pela DAM (SOUSA, 2016)



Benvenuti et al., (1997) identificaram concentração de metais pesados e ácidos em concentrações nocivas a saúde humana em rios próximos a uma mina de cobre abandonada na região sudeste da toscana na Itália. Já Zhou et al., (2007) identificaram a contaminação do solo, por metais como zinco chumbo e níquel entre outros metais pesados, que foram comprovadamente atribuídos a ocorrência da má disposição dos rejeitos e da drenagem ácida de mina.

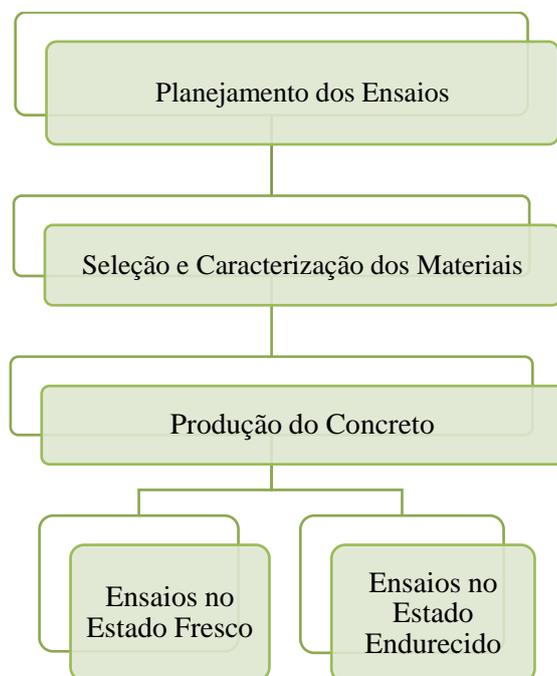
Apresentado tais problemas, só justifica ainda mais o objetivo desta pesquisa que é a tentativa da reutilização deste material de modo que ele venha produzir o mínimo de

impactos ambientais, principalmente relacionados ao acondicionamento final destes rejeitos que por muitas vezes causam grandes transtornos e passivos ambientais.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para avaliação do comportamento do concreto com o uso do rejeito de cobre, foi realizado um programa experimental constituído etapas apresentadas na Figura

Figura 3.1 - Fluxograma do programa experimental



#### 3.1. Planejamento dos ensaios.

O planejamento dos ensaios é fundamental para que se obtenham as respostas desejadas ao longo dos experimentos, por este motivo foram delimitadas neste trabalho dois tipos de variáveis, as de controle e as de resposta.

##### 3.1.1. Variáveis de Controle

Nesta pesquisa, foram adotados como variáveis de controle os seguintes parâmetros: idades de rompimento, relação água/cimento, percentual de substituição do rejeito, sucintamente descritos a seguir.

- **Idades de rompimento:**

Foram adotadas duas idades de rompimento dos corpos de prova estabelecidas em 7 e 28 dias. As idades escolhidas são justificáveis visto que 7 dias é uma idade inicial para cura do concreto e nos permite avaliar um comportamento preliminar da curva de ganho de

resistência do concreto, além de ter efeito comparativo com outros trabalhos (Onuaguluchi & Eren (2012), Janković et al., (2015), e Thomas et al., (2013)), e aos 28 dias, pois esta é a idade padrão na qual se define a resistência à compressão do concreto. Ambas as idades estão em conformidade com a NBR 5739 (ABNT, 2018)

- **Relação água/cimento**

Foram fixadas duas relações água /cimento 0,40 e 0,60. Tais relações foram adotadas para que o estudo abrangesse os dois extremos das relações a/c comumente usadas e verificar-se qual sua influência juntamente com a inserção parcial do rejeito.

- **Percentual de substituição de rejeito:**

Foram definidos quatro percentuais de substituições de agregado miúdo por rejeito, sendo eles: 0%, 15%, 30% e 45%, estes percentuais foram adotados tendo como parâmetros outras pesquisas similares descritas pela literatura, nos quais demonstraram os resultados mais satisfatórios. Após análise da massa específica dos dois materiais em questão, pela proximidade de seus valores, adotou-se a substituição em peso.

Na Tabela 3.1 podem-se ver resumidamente as variáveis de controle.

Tabela 3.1 – Variáveis de Controle

<b>Descrição</b>	<b>Parâmetro</b>
<b>Idade de Ensaio</b>	07 e 28 dias
<b>Relação a/c</b>	0,40 e 0,60
<b>% Substituição por Rejeito</b>	0%, 15%, 30% e 45%

### 3.1.2. Variáveis de Resposta

Neste trabalho, adotaram-se como variáveis de resposta as seguintes propriedades mecânicas do concreto: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. A escolha destas variáveis é justificável, uma vez que as principais mudanças no comportamento mecânico do concreto podem ser analisadas por estas variáveis. Também se justificam, dado que foram escolhidas por estarem presentes em outros trabalhos e pesquisas com o mesmo tema, existindo assim uma base de efeito comparativo entre as pesquisas.

A Tabela 3.2 relaciona todas as variáveis de controle e de resposta, obtendo-se assim o programa experimental elaborado nesta pesquisa.

Tabela 3.2 – Relação entre variáveis e corpos de prova

Concreto Produzido	Relação a/c	Resistência à Compressão Axial Simples		Resistência à Tração por Compressão Diametral		Resistência à Tração na Flexão		Módulo de Elasticidade	
		Idade de Ensaio (em dias)		Idade de Ensaio (em dias)		Idade de Ensaio (em dias)		Idade de Ensaio (em dias)	
		7	28	7	28	7	28	7	28
Referência	0,40	4	4	4	4	2	2	2	2
	0,60	4	4	4	4	2	2	2	2
15% de Substituição de Escória	0,40	4	4	4	4	2	2	2	2
	0,60	4	4	4	4	2	2	2	2
30% de Substituição de Escória	0,40	4	4	4	4	2	2	2	2
	0,60	4	4	4	4	2	2	2	2
45% de Substituição de Escória	0,40	4	4	4	4	2	2	2	2
	0,60	4	4	4	4	2	2	2	2
Número de Corpos de Prova por Ensaio		64		64		32		32	
Total de Corpos de Prova		192							

## 3.2. Caracterização e seleção dos materiais.

### 3.2.1. Cimento Portland

Nesta pesquisa, utilizou-se cimento CP-I (Cimento Portland Comum), pois nele não há quaisquer adições, além do gesso (utilizado como retardador de pega), e assim poderá se verificar qual a real influência do rejeito de cobre na substituição parcial aos agregados miúdos. As características físicas, químicas e mecânicas do cimento empregado foram fornecidas pelo próprio fabricante e estão apresentadas na Tabela 3.3, onde se constata que o material utilizado atende a NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 3.3 - Características químicas, físicas e mecânicas do cimento utilizado segundo o fabricante.

Características	Determinações		Resultados Obtidos	Especificações NBR 16697 (ABNT,2018)
Químicas	Teores (%)	PF	1,3	$\leq 2$
		MgO	5,6	$\leq 6,5$
		SO <sub>3</sub>	2,5	$\leq 4,0$
		RI	0,3	$\leq 1,0$
Físicos e Mecânicos	Finura	#200	0,7	$\leq 10,0$
		#325	7,3	N/A
	Blaine	(cm <sup>2</sup> /g)	3270	$\geq 2800$
	Água	consist(%)	26,9	N/A
	Tempo de pega	Início (min)	159	$\geq 60$
		Fim (min)	219	$\leq 600$
	Expansibilidade a quente (mm)		0	$\leq 5,0$
	Resistência à Compressão	3 dias	27,7	$\geq 15$
		7 dias	36,6	$\geq 25$
		28 dias	47,9	$\geq 40$

### 3.2.2. Agregado Graúdo

No experimento, utilizaram-se agregados graúdos (seixo) extraídos de rios provenientes da região metropolitana de Belém - PA. A composição granulométrica e a dimensão máxima característica foram determinadas de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), a massa unitária determinada pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e a massa específica foi obtida através da NBR NM 53 (ABNT, 2009), conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Caracterização mecânica dos agregados graúdos

Determinações	Método de Ensaio	Resultados Obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	ABNT (mm)	Individual	Acumulada
		25	0	0
		19	29	29
		12,5	70	99
		9,52	1	100
		6,3	0	100
		Fundo	0	100
DMC (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	25,00		
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	7,29		
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,45		
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,63		
Índices de Vazios		45%		

### 3.2.3. Agregado miúdo Natural

Como agregado miúdo no experimento utilizou-se areia extraída de rios provenientes da região metropolitana de Belém - PA. A composição granulométrica e o módulo de finura foram determinados de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), a massa unitária determinada pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e a massa específica foi obtida conforme a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Caracterização mecânica dos agregados miúdos

Determinações	Método de Ensaio	Resultados Obtidos		
Composição Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
		ABNT (mm)	Individual	Acumulada
		4,8	0	0
		2,4	2	2
		1,2	4	6
		0,6	8	14
		0,3	55	69
		0,15	18	87
	Fundo	13	100	
DMC (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,4		
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,75		
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,65		
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,64		
Índices de Vazios		37%		

#### 3.2.4. Aditivos

Para os traços de concretos onde não foi possível obter o abatimento estabelecido, foi utilizado um aditivo polifuncional líquido de pega normal, com alto poder de redução de água. Sua caracterização foi fornecida pelo fabricante e encontra-se na Tabela 3.6

Tabela 3.6 - Caracterização do aditivo segundo o fabricante

Indicadores	Resultados Obtidos
<b>PH</b>	5,5 ± 1,0
<b>Densidade (kg/l)</b>	1,19 ± 0,02 (kg/l)
Recomendação de Uso pelo Fabricante:	
<b>Plastificante</b>	0,30 a 0,65%
<b>Super Plastificante</b>	0,70 a 1,20%

### 3.2.5. Água

Foi utilizada água do sistema de abastecimento local que fornece água para o Laboratório de Engenharia Civil da UFPa do campus de Belém.

### 3.2.6. Rejeito de Cobre

O rejeito de cobre, utilizado neste experimento como substituto parcial dos agregados miúdos, foi coletado na barragem de rejeitos da Mina do Sossego. Os procedimentos de coleta e caracterização foram realizados segundo métodos descritos nos tópicos a seguir.

- **Coleta das amostras**

As amostras de rejeito do minério de cobre foram coletadas conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004). Foram coletados aproximadamente 200 kg de rejeito, em vários pontos da barragem. O material foi acondicionado dentro de sacos plásticos com aproximadamente 15 kg cada e em seguida as amostras foram encaminhadas aos laboratórios para caracterização. Para a realização dos ensaios as amostras foram homogeneizadas, quarteadas e reduzidas conforme a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

- **Métodos de caracterização do rejeito de cobre**

Para a caracterização do rejeito de cobre, foram feitos ensaios físicos, químicos e mineralógicos, as metodologias empregadas em cada ensaio estarão descritas sucintamente nos itens abaixo.

- **Caracterização Física**

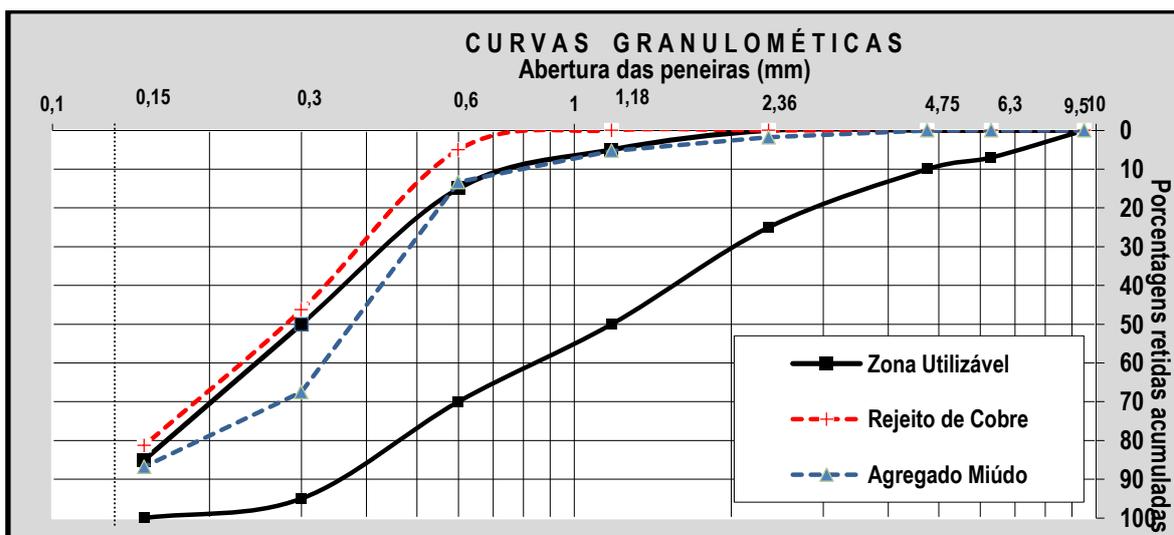
A composição granulométrica e o módulo de finura foram determinados de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), a massa unitária pela NBR NM 45 (ABNT, 2006), e a massa específica foi obtida conforme NBR NM 53 (ABNT, 2009). Em caráter complementar calculou-se também o índice de vazios da amostra, os resultados estão descritos na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Caracterização mecânica do rejeito de cobre

Determinações	Método de Ensaio	Resultados Obtidos		
		Abertura da peneira	Porcentagem retida (em massa)	
Composição Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	ABNT (mm)	Individual	Acumulada
		4,8	0	0
		2,4	0	0
		1,2	0	0
		0,6	5	5
		0,3	42	47
		0,15	35	82
		Fundo	18	100
DMC (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0,6		
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,33		
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,58		
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,82		
Índices de Vazios		44%		

Na Figura 3.2 se observam as duas curvas granulométricas dos materiais utilizados nesta pesquisa como agregado miúdo. As linhas pretas representam a zona utilizável de utilização dos materiais como agregado miúdo de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Pode-se observar que a curva granulométrica do agregado miúdo (linha azul) está dentro dos limites estabelecidos pela norma, enquanto que o rejeito de cobre (linha vermelha) está fora do limite estabelecido pela norma. Comportamento já esperado após a verificação da diferença de módulos de finura e diâmetro máximo característico entre o agregado miúdo natural e o rejeito de cobre.

Figura 3.2 – Curvas granulométricas do agregado miúdo e rejeito utilizado.



- **Caracterização Química**

Para a validação da caracterização química do rejeito, utilizou-se a análise por fluorescência de raios X (FRX) realizada por um laboratório particular, cujo laudo está disponível nos apêndices deste trabalho. Na Tabela 3.8 são apresentados os resultados obtidos através da FRX para os principais óxidos.

Tabela 3.8 - Caracterização química do rejeito de cobre segundo laboratório particular.

Rejeito de Cobre	
Composto	% (massa)
Óxido de Silício - SiO <sub>2</sub>	58,95
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,45
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,65
Óxido de Cálcio - CaO	4,69
Óxido de Magnésio - MgO	3,28
Óxido de Titânio - TiO <sub>2</sub>	0,96
Óxido de Fósforo - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,55
Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O	3,78
Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O	1,46
Óxido de Manganês - MnO	0,04
Cobre - Cu	0,08
Perda ao Fogo	1,77

Nesta tabela é importante ressaltar a presença de alguns elementos que podem gerar reações formadoras de produtos expansivos que podem provocar a diminuição da resistência do concreto com o passar do tempo. Deste modo devem ser analisados

cuidadosamente elementos como CaO, MgO e Na<sub>2</sub>O e verificar no caso das substituições, os limites em percentuais permitidos pela legislação vigente.

- **Caracterização Mineralógica**

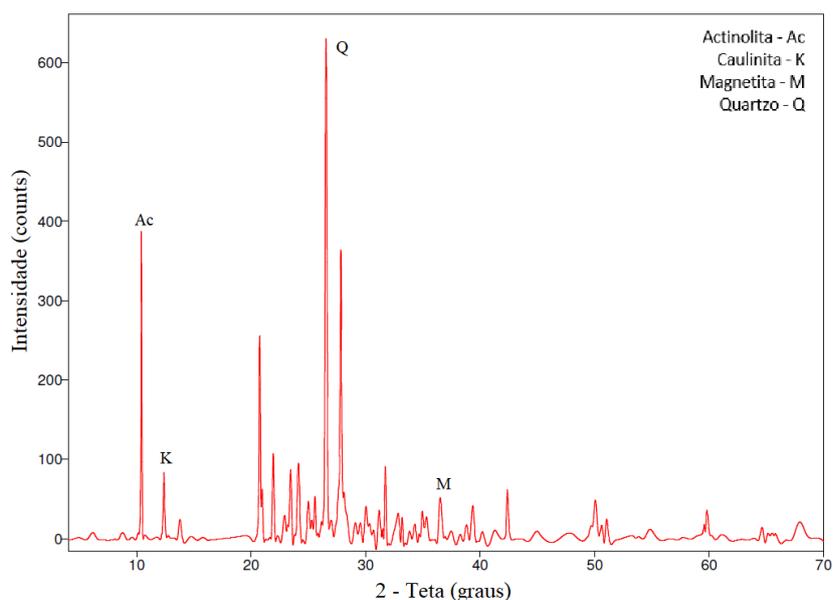
A utilização do DRX é um importante instrumento de avaliação da reatividade do material, neste caso a amostra foi submetida à caracterização com a finalidade de se identificar as fases amorfa ou cristalina presentes na estrutura que constituem o rejeito de cobre. Nos casos onde há predominância da forma cristalina indicam baixa reatividade, enquanto que na forma amorfa indicam maior potencial pozolânico.

Segundo Callister (2014), os materiais com fases cristalinas caracterizam-se por apresentarem em seus difratogramas formas com intensa quantidade de picos, enquanto que os materiais com fases amorfas se caracterizam por apresentarem curvas com formas abauladas e ausência de picos. Portanto, um material cristalino é aquele em que os átomos estão situados em um arranjo que se repete, ou periódicos, ao longo de grandes distâncias atômicas.

Fez-se difratograma de raios X (DRX) da amostra de rejeito de cobre no equipamento de bancada Rigaku MiniFlex 600, com ângulo de incidência de 2°, passo de 0,05° em 2θ.

Na Figura 3.2 pode-se observar que o material possui caráter predominantemente cristalino devido aos vários picos de intensidade identificados pelo equipamento, e norteia a escolha da utilização do material como substituição aos agregados miúdos e não substituto a massa do cimento, por exemplo.

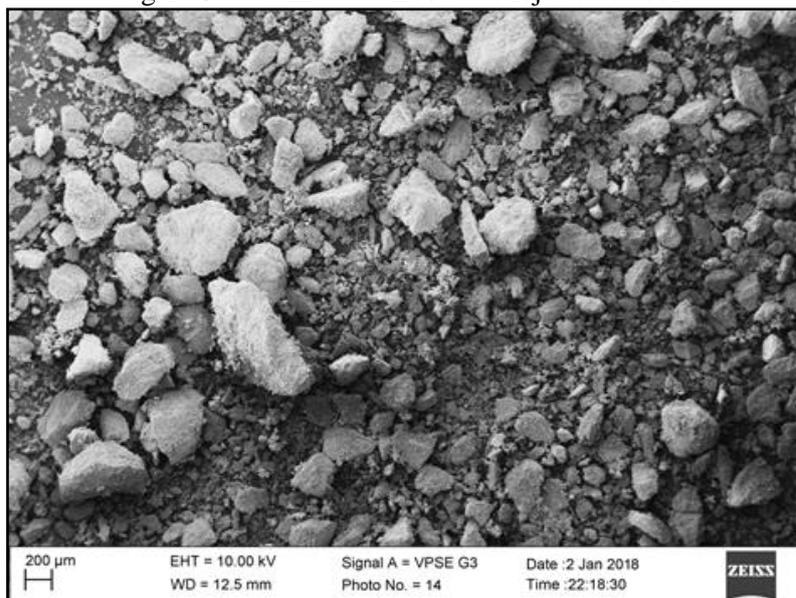
Figura 3.3- Difratoograma de Raios X da amostra



- **Caracterização Morfológica**

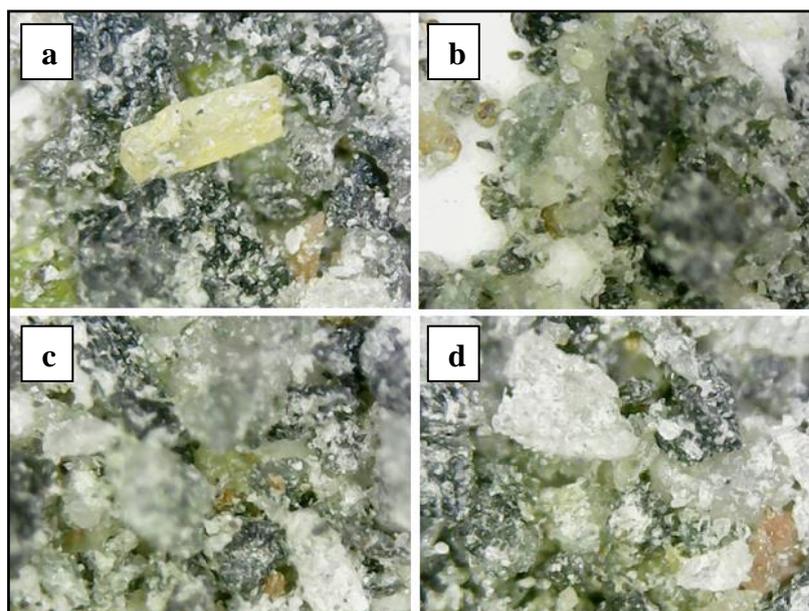
A morfologia das partículas que constituem o rejeito de cobre foi obtida através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), realizada em equipamento da marca ZEISS, modelo EVO MA10, com detector de elétrons secundários e elétrons retro espalhados. A análise foi feita no laboratório de geociências da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA). Na Figura 3.3 pode-se identificar que as partículas possuem forma irregular e com superfícies ásperas.

Figura 3.4 – MEV da amostra de rejeito de cobre.



Também como forma de analisar a morfologia das partículas, utilizou-se de um microscópio ótico digital com capacidade de ampliação em 1000x. Na Figura 3.4 pode-se confirmar o que demonstraram os resultados do MEV, os minerais têm diversos formatos além de não possuírem regularidade em suas dimensões conforme se pode observar o cristal de Actionolita na imagem “a” da Figura 3.4 e em sua grande maioria representado pelas imagens “b,”c” e “d” a matriz de quartzo com alguns outros pequenos minerais.

Figura 3.5 – Foto ampliada 1000x do rejeito de cobre.



### 3.3. Ensaios e normas utilizadas

Para o cumprimento do objetivo desta pesquisa e para a quantificação e avaliação das variáveis de resposta, foram executados, ensaios no estado fresco e no estado endurecido do concreto, os quais estão elencados com seus respectivos métodos de ensaio na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Ensaios e metodologias utilizadas

<b>Ensaio no Estado Fresco</b>	<b>Método de Ensaio</b>
Consistência do Concreto	NBR NM 67, (ABNT, 1998)
<b>Ensaio no Estado Endurecido</b>	
Resistência à Compressão Axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Resistência à Compressão Diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)
Resistência a tração na Flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)
Módulo de Elasticidade	NBR 8522 (ABNT, 2017)

### 3.4. Dosagem e Produção do Concreto

Os traços utilizados nesta pesquisa foram extraídos de um gráfico de dosagem, elaborado pela metodologia do IPT, onde se adotou o teor de argamassa ( $\alpha$ ) em 51%. Para a elaboração deste gráfico, adotou-se o abatimento de tronco de cone em  $130 \pm 20$  mm. Os traços utilizados nesta pesquisa (em massa) estão descritos nas Tabelas 3.10 e 3.11

Tabela 3.10 – Traços em massa dos concretos com relação a/c = 0,40

<b>Relação a/c - 0,40 / Abatimento 130±20mm / <math>\alpha</math>: 51%</b>					
<b>Traço</b>	<b>Cimento</b>	<b>Agregado Miúdo</b>		<b>Agregado Graúdo</b>	<b>Água</b>
		<b>Rejeito de Cobre</b>	<b>Areia</b>		
<b>01 - Ref.</b>	1,00	0,00	1,35	2,25	0,40
<b>02 - 15%</b>	1,00	0,20	1,15	2,25	0,40
<b>03 - 30%</b>	1,00	0,40	0,95	2,25	0,40
<b>04 - 45%</b>	1,00	0,61	0,74	2,25	0,40

Tabela 3.11 - Traços em massa dos concretos com relação a/c = 0,60

<b>Relação a/c - 0,60 / Abatimento 130±20mm / <math>\alpha</math>: 51%</b>					
<b>Traço</b>	<b>Cimento</b>	<b>Agregado Miúdo</b>		<b>Agregado Graúdo</b>	<b>Água</b>
		<b>Rejeito de Cobre</b>	<b>Areia</b>		
<b>01 - Ref.</b>	1,00	0,00	2,57	3,43	0,60
<b>02 - 15%</b>	1,00	0,39	2,18	3,43	0,60
<b>03 - 30%</b>	1,00	0,77	1,80	3,43	0,60
<b>04 - 45%</b>	1,00	1,16	1,41	3,43	0,60

Para todos os traços adotou-se um tempo de mistura de 5 minutos, sendo a ordem de adição dos materiais na betoneira a seguinte: agregado graúdo (seixo), 30% do volume de água, agregado miúdo (areia), cimento, rejeito de cobre e todo o restante da água. Devido à grande quantidade de finos do rejeito de cobre, a sua inserção na mistura causou perda de consistência e trabalhabilidade, por esse motivo, por último utilizou-se aditivo para melhorar a trabalhabilidade do concreto e para atingir-se o abatimento de tronco de cone estabelecido em  $130 \pm 20$  mm.

### 3.4.1. **Moldagem dos Corpos de Prova.**

Todo o concreto foi produzido em uma betoneira de eixo inclinado, com volume total de 150L do laboratório de engenharia civil (LEC) da UFPa do campus de Belém. As bateladas sempre foram feitas de uma única vez, para que todos os corpos de prova do mesmo traço estivessem em condições totalmente homogêneas.

Foram utilizadas formas cilíndricas de metal, com dimensões 100x200mm para a moldagem dos corpos de prova, exceto para os ensaios de tração a flexão, que foram utilizados corpos de provas prismáticos. Após moldados, aguardou-se 24 horas para a desforma e os corpos de prova foram colocados em um tanque com água e cal para permanecerem em cura úmida, e que posteriormente foram submetidos aos ensaios mecânicos elencados pelas variáveis de respostas. Todo procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova, foram feitos observado o disposto na NBR 5738 (ABNT, 2016).

### 3.4.1. **Análise estatística dos resultados**

Os resultados do concreto no estado endurecido foram submetidos estatisticamente à análise de variância (ANOVA) por meio do software Microsoft Excel. Análise de variância (ANOVA) testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais. As ANOVAs avaliam a importância de um ou mais fatores, comparando as médias de variáveis de resposta nos diferentes níveis de fator. A hipótese nula afirma que todas as médias de população (médias de nível de fator) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente (MINTLAB, 2018).

Nas hipóteses onde se provou que pelo menos um dos grupos eram diferentes dos outros, procedeu-se o teste de Tukey HSD (Teste de Tukey da Diferença Honestamente Significativa) que é conceituado como um teste que permite a comparação de grupos quando os tamanhos amostrais dos grupos são iguais, o teste de Tukey é um teste exato, ou seja, para o conjunto de todas as comparações par a par, a taxa de erro do conjunto dos testes é exatamente  $\alpha$  (nível de significância) e o intervalo de confiança é também exatamente  $1 - \alpha$ . Vale ressaltar que testes de comparações múltiplas exatos são raros, uma vez que a maioria não controla o nível de significância adotado. O Teste de Tukey consiste em comparar todos os possíveis pares de médias e se baseia na diferença mínima significativa (D.M.S.), considerando os percentis do grupo. No cálculo da D.M.S. utiliza-se também a distribuição da amplitude estudentizada, o quadrado médio dos resíduos da ANOVA e o tamanho amostral dos grupos. (FARIA, 2017).

## 4. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos no estado fresco e endurecido dos concretos produzidos conforme planejado no programa experimental.

### 4.1. Comportamento do concreto no estado fresco.

No estado fresco, além de verificações visuais quanto à coesão e compacidade da mistura, se realizou ensaio de consistência do concreto pelo método do abatimento de tronco de cone, seguindo as recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1998) para se atingir o abatimento estabelecido de  $130 \pm 20$ mm. Quando necessário, para a obtenção deste abatimento, principalmente nas misturas com a utilização do rejeito, adotou-se o emprego de aditivo polifuncional. Na Figura 4.1 e 4.2 observam-se os percentuais de aditivo incorporado a mistura em relação à massa do aglomerante para as relações a/c 0,40 e 0,60 respectivamente.

Figura 4.1 – Percentual de aditivo adicionado para relação a/c 0,40.

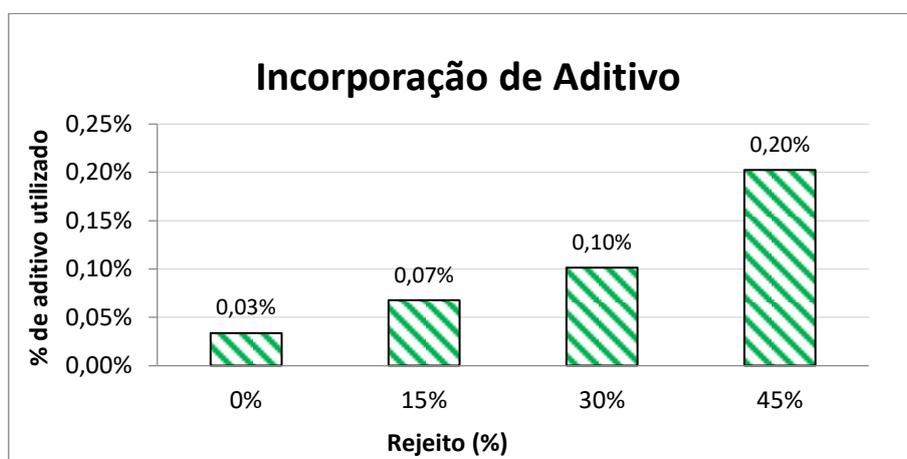
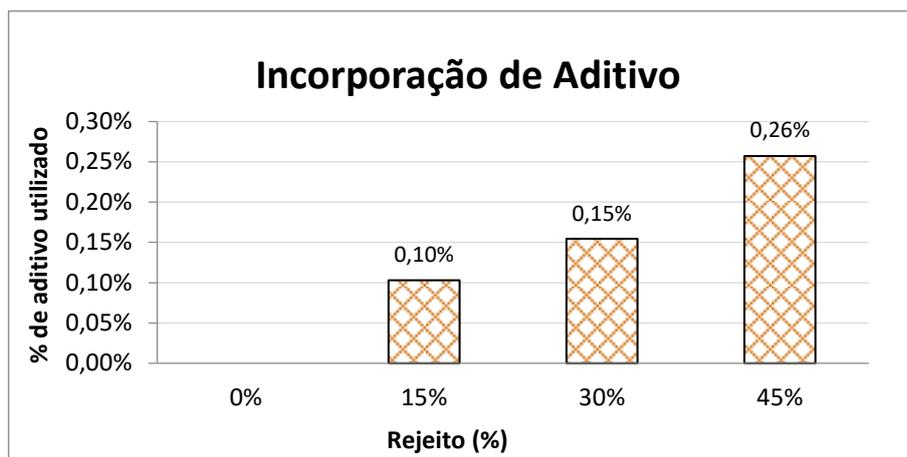


Figura 4.2 – Percentual de aditivo adicionado para relação a/c 0,60



Ao analisar as Figura 4.1 e 4.2, percebe-se que de modo geral existe uma relação entre a quantidade de rejeito substituído na mistura, a coesão do concreto e sua consistência. Tal relação pode ser descrita como uma relação direta para a propriedade de coesão do concreto, e inversa para a consistência do mesmo. De modo que, quanto maior o percentual de rejeito substituído na mistura, maior a coesão do concreto e menor sua consistência.

E ainda, quanto maior a quantidade de rejeito substituído na mistura, maior será a quantidade de aditivo necessário para o atingimento da consistência necessária, estabelecida pelo teste de abatimento de tronco de cone. Para os maiores percentuais de substituição utilizados nesta pesquisa, mesmo para relação a/c de 0,60, a consistência sem a utilização de aditivo variou entre 10 e 30 mm, muito maior do que a consistência pré-estabelecida.

Este comportamento pode ser explicado pelo formato geométrico das partículas e pela granulometria das mesmas. Quanto à geometria das partículas, observou-se que tanto nas imagens geradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), quanto nas imagens geradas pelo microscópio ótico, revelavam que as partículas possuem formato irregular e arestas angulosas, fato este que proporciona uma melhor interação física entre as partículas do agregado e da matriz cimentícia, características semelhantes foram descritas e observadas na pesquisa de Shettima et al., (2016).

Já no quesito granulometria, pode ser explicado devido o material (rejeito) ser mais fino do que o agregado miúdo, características demonstradas através do módulo de finura e do diâmetro máximo característico, onde o rejeito possui DMC de 0,6mm e módulo de finura de 1,33 enquanto que o agregado miúdo tem DMC de 2,4mm e módulo de finura de

1,75. Segundo Metha & Monteiro (2014), devido a esta característica de ser mais fino e possuir formato irregular, conseqüentemente, o rejeito possui uma maior área superficial específica, exigindo assim a necessidade de mais água em sua estrutura interna do que quando as partículas são maiores e mais arredondadas.

Comportamento similar foi observado nas pesquisas de Onuaguluchi & Eren, (2012), Thomas et al., (2013) e Janković et al., (2015), onde a consistência do concreto diminuiu após a substituição de agregados por este tipo de material.

Cabe ressaltar que mesmo para os traços que utilizaram o maior percentual de aditivo (neste caso, os traços que foram produzidos com 45% de substituição agregados por rejeito de cobre), não houve o emprego de teores de aditivo maiores que os recomendados pelo fabricante, conforme elencado no tópico 3.2.4, que é de 0,65% para o seu emprego como plastificante.

## **4.2. Comportamento do concreto no estado endurecido**

Para os ensaios de resistência do concreto no estado endurecido, foram utilizadas ferramentas estatísticas simples como médias, desvio padrão, coeficiente de variação e também ferramentas mais complexas como análise de variância (ANOVA), seguidos por testes Tukey, quando comprovadas significâncias estatísticas. Para melhor compreensão de cada uma das variáveis, assim como na revisão bibliográfica, os resultados de cada ensaio foram separados por tópicos.

### **4.2.1. Resultados de resistência à compressão axial**

Os resultados dos concretos para resistência à compressão axial foram obtidos conforme recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), e estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, os resultados estão expressos em função de suas respectivas médias, com os desvios padrões.

Tabela 4.1 - Resultados de resistência a compressão para relação a/c 0,40

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	30,18	28,63	30,32	31,28	30,10	1,10	3,64%
15%		33,95	33,44	32,58	31,51	32,87	1,07	3,3%
30%		33,77	34,72	35,52	33,66	34,42	0,88	2,5%
45%		35,83	36,47	36,77	34,56	35,91	0,98	2,7%
0%	28	34,91	35,67	37,31	38,09	36,50	1,46	4,00%
15%		39,61	38,09	39,23	38,7	38,91	0,66	1,7%
30%		41,19	42,09	39,92	40,38	40,90	0,95	2,3%
45%		42,17	44,48	42,54	45,53	43,68	1,60	3,7%

Tabela 4.2 - Resultados de resistência à compressão para relação a/c 0,60

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	14,42	13,32	14,50	13,29	13,88	0,67	4,8%
15%		15,90	13,72	14,81	14,10	14,63	0,96	6,5%
30%		15,85	15,94	15,78	15,00	15,64	0,43	2,8%
45%		16,43	15,00	16,04	16,16	15,91	0,63	3,9%
0%	28	18,76	20,90	18,43	20,08	19,54	1,15	5,9%
15%		19,89	19,88	21,45	20,80	20,51	0,76	3,7%
30%		21,31	21,67	23,72	21,03	21,93	1,22	5,6%
45%		21,46	22,25	24,57	22,14	22,61	1,36	6,0%

Realizou-se análise de variância (ANOVA de uma via), com a finalidade de averiguar se isoladamente a substituição de rejeito de cobre na mistura do concreto possui de fato significância estatística. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 respectivamente, e em ambas as tabelas, as células preenchidas em cor vermelha, são aquelas em que ficou demonstrada a significância estatística, que neste caso são determinadas pelo nível de significância, que foi estabelecido em 5%, portanto toda vez que o valor de “p” for menor que 0,05 significa que houve significância estatística.

Tabela 4.3 – ANOVA dos resultados para relação a/c 0,40

<b>ANOVA – Relação a/c 0,40 - 07 dias</b>						
<b>Indicadores</b>	<b>G.L.</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	
<b>Fator</b>	3	73,81	24,60	24,17	2,25E-05	
<b>Resíduos</b>	12	12,21	1,01			
<b>Teste Tukey</b>						
<b>Análise entre traços</b>	<b>0 - 15%</b>	<b>0 - 30%</b>	<b>0 - 45%</b>	<b>15 - 30%</b>	<b>15 - 45%</b>	<b>30 - 45%</b>
<b>P-valor</b>	0,0101	0,0002	1,63E-05	0,1871	0,0052	0,2114
<b>Significância</b>	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO
<b>ANOVA – Relação a/c 0,40 - 28 dias</b>						
<b>Indicador</b>	<b>G.L.</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	
<b>Fator</b>	3	111,28	37,09	24,61	2,05E-05	
<b>Resíduos</b>	12	18,08	1,50			
<b>Teste Tukey</b>						
<b>Análise entre traços</b>	<b>0 - 15%</b>	<b>0 - 30%</b>	<b>0 - 45%</b>	<b>15 - 30%</b>	<b>15 - 45%</b>	<b>30 - 45%</b>
<b>P-valor</b>	0,0692	0,0013	1,37E-05	0,1550	0,0006	0,0329
<b>Significância</b>	NÃO	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor em relação ao nível de significância ( $p < 0,05$ ).

Os resultados apresentados na Tabela 4.3, demonstraram que ao substituir agregados miúdos por rejeito de cobre na mistura e utilizando uma relação a/c 0,40, houve diferença significativa entre os resultados (células vermelhas).

Feita esta primeira análise, se procedeu através de teste Tukey à verificação de quais os resultados referentes aos percentuais de substituição eram diferentes entre si e ambos os resultados (para 07 e 28 dias), podem ser visualizados na tabela 4.3.

Analisando a Tabela 4.3, observa-se que existe uma grande quantidade de células em vermelho, o que demonstra ampla significância estatística entre os resultados. Para as amostras de 07 e 28 dias, apenas duas interações não foram significativas, que neste caso foram as interações entre os percentuais de substituição de 15-30% e 30-45% para os resultados de 07 dias, e de 0-15% e 15-30% para os resultados de 28 dias.

Estes resultados demonstram que a substituição de rejeito de cobre, gerou um aumento expressivo na resistência à compressão do concreto, ao ponto que provou não só a significância entre o concreto com rejeito e o concreto de referência, mas também comprovou significância nos diferentes percentuais de substituição (como por exemplo entre 30-45%), o que demonstra que para estas condições (relação a/c e percentuais de substituição) o material de fato foi benéfico ao concreto, nesta propriedade.

Tabela 4.4 - ANOVA dos resultados para a relação a/c 0,60

ANOVA - Relação a/c 0,60 - 07 dias						
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p	
Fator Resíduos	3	11,06	3,68	8,30	0,00293	
	12	5,32	0,44			
Teste Tukey						
Análise entre traços	0 - 15%	0 - 30%	0 - 45%	15 - 30%	15 - 45%	30 - 45%
P-valor	0,4187	0,0131	0,0037	0,1946	0,0587	0,8823
Significância	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
ANOVA - Relação a/c 0,60 - 28 dias						
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p	
Fator Resíduos	3	22,91	7,63	5,83	0,01070	
	12	15,71115	1,309263			
Teste Tukey						
Análise entre traços	0 - 15%	0 - 30%	0 - 45%	15 - 30%	15 - 45%	30 - 45%
P-valor	0,6444	0,0513	0,0120	0,3355	0,0943	0,8387
Significância	NÃO	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor em relação ao nível de significância ( $p < 0,05$ ).

Já a análise da Tabela 4.4, ao contrário da tabela anterior, apresenta-se com um número bem menor de significância entre suas interações. Para as amostras de 07 dias, apenas duas interações se mostraram significantes (0-30% e 0-45%), e aos 28 dias, apenas o resultado entre (0-45%) apresentou essa diferença.

Analisando conjuntamente os dados das Tabelas 4.3 e 4.4, verifica-se que o efeito da substituição dos agregados miúdos por rejeito, foi mais expressiva na relação a/c 0,40 do que na relação a/c 0,60, como foi demonstrado pelo maior número de interações com significância estatística na primeira relação a/c em comparação com a segunda.

Possivelmente, este comportamento ocorreu devido ao efeito *filler* ter sido mais efetivo na menor relação a/c, onde há um menor número de vazios. Tal afirmação pode ser melhor visualizada ao analisar a Figura 4.2 e 4.3, que apresentam os resultados em forma de gráficos, onde é possível observar que a como a substituição de agregados miúdos por rejeitos na mistura alterou a resistência à compressão axial nas duas relações a/c.

Figura 4.3 - Resultados de Resistência à compressão simples aos 07 e 28 dias, para relação a/c 0,40. Valores expressados em resistência média  $\pm$  desvio padrão. (ANOVA;  $p < 0,05$ )

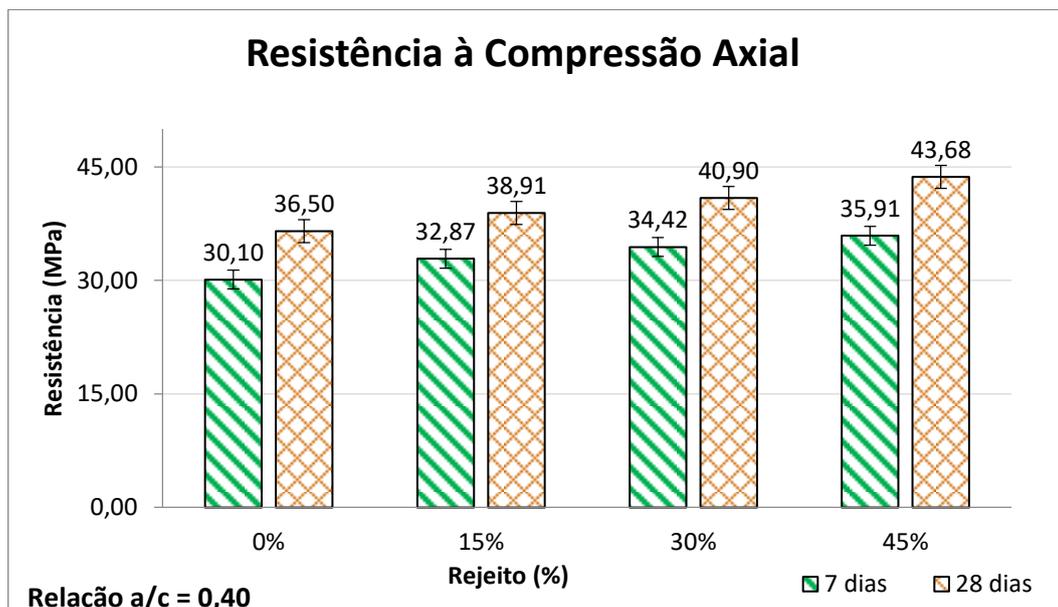
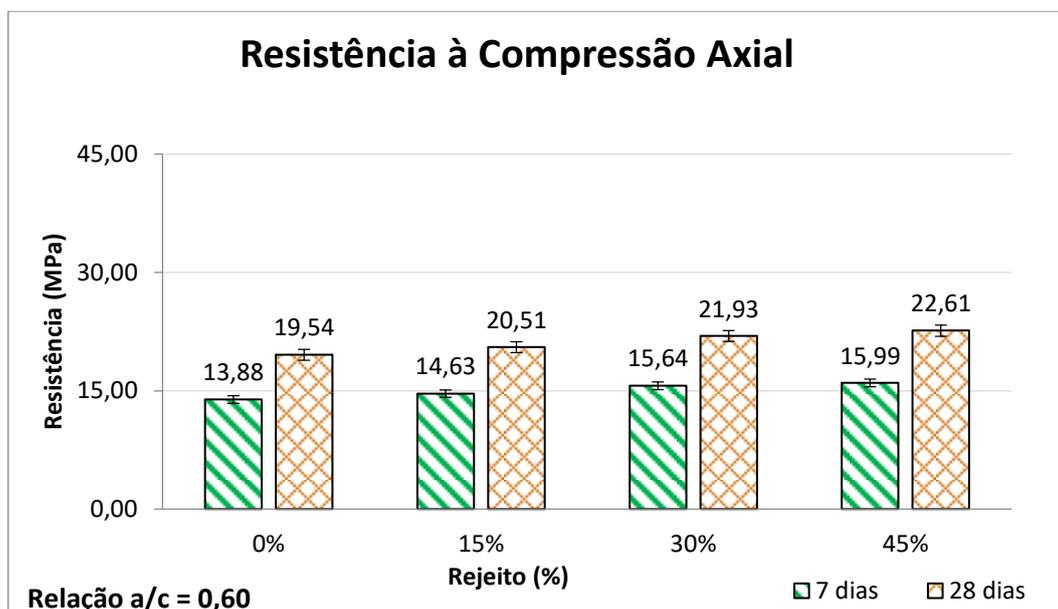


Figura 4.4 - Resultados de Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias, para relação a/c 0,60. Valores expressados em resistência média  $\pm$  desvio padrão. (ANOVA;  $p < 0,05$ )



Nas Figuras 4.3 e 4.4, além do efeito da substituição do rejeito na mistura, notam-se a influência de mais duas variáveis que afetaram de maneira significativa a resistência nos concretos, a primeira refere-se à idade em que os concretos foram ensaiados, e a segunda, a relação água/cimento das misturas.

No quesito idade de ensaio, amostras ensaiadas aos 07 dias possuem resistências inferiores as amostras ensaiadas aos 28 dias, isso pode ser explicado pelo aumento do grau de hidratação no cimento e conseqüentemente no aumento da presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (QOMI, et al., (2014), bem como na redução da porosidade do mesmo (GRIGOLI & HELENE, 2002). Neste sentido, observa-se que comparando os resultados entre 07 e 28 dias, constata-se que as resistências encontradas aos 07 dias são em média 25% menores do que aos 28 dias.

O segundo comportamento, refere-se ao aumento da relação água/cimento e a diminuição substancial da resistência do concreto, que segundo Metha & Monteiro (2014), pode ser explicado pelo enfraquecimento natural da matriz cimentícia causado pelo aumento da porosidade decorrente da maior relação água/cimento. Por este motivo, as amostras com relação a/c de 0,40, obtiveram valores de resistência muito superiores aos apresentados na relação a/c 0,60. Em média, os valores de resistência a compressão axial para a relação a/c 0,40 apresentam valores aproximados de duas vezes os valores de resistência apresentados pela relação a/c 0,60, conforme observam-se nas Figuras 4.3 e 4.4 respectivamente.

Porém, ambos os resultados demonstrados acima já eram esperados, e em condições normais, teriam ocorrido naturalmente, mesmo sem a presença do rejeito de cobre que foi substituído na mistura. Portanto, o foco maior desta pesquisa foi descobrir, o quanto positivamente a variável de estudo deste trabalho, que é a substituição parcial do agregado miúdo por rejeito de minério de cobre, teve influência sobre os resultados de aumento de resistência apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 e nas Figuras 4.3 e 4.4.

Na Figura 4.3, a qual nos mostra a análise da variação da resistência à compressão axial para a relação a/c = 0,40, pode-se observar que os valores de resistência aos 07 dias, obtiveram bons resultados, e mostraram que qualquer traço com adição de rejeito de cobre obteve um desempenho melhor do que o traço de referência. Os valores de resistência aumentaram gradativamente com o maior percentual de substituição de rejeito na mistura, de modo que para percentual de substituição de 45% de cobre por agregados miúdos, houve um aumento na resistência média do concreto de 19,28% aos 07 dias e 19,69% aos 28 dias em relação ao traço de referência.

O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 4.4 que analisa a variação de resistência à compressão axial para a relação a/c = 0,60. Nessa figura, as amostras também demonstraram uma evolução de resistência à medida que houve a substituição de rejeito na mistura. Houve um aumento na resistência média do concreto em relação ao traço de

referência para o percentual de 45% de substituição de 15,16% aos 07 dias e de 15,67% aos 28 dias em relação ao traço de referência. O menor desempenho da relação a/c 0,60 em relação ao ganho de resistência, já poderia ser notado pela análise de variância feita com o teste Tukey, que nos mostrou mais significatividade para a primeira relação a/c.

Houve um ganho de resistência à compressão axial significativo, quando se compara o concreto de referência com os concretos onde houve adição de rejeito. Neste sentido, se observou que existe uma relação direta entre a resistência à compressão axial e percentual de rejeito adicionado à mistura. Onde é possível traçar uma tendência linear de aumento na resistência do concreto em função da quantidade de rejeito adicionado. Porém, como nesta pesquisa não foram utilizados percentuais maiores de substituição de agregados miúdos por rejeito de cobre, não foi possível provar se esta linearidade se confirmará com percentuais de substituição maiores.

Este aumento na resistência à compressão axial do concreto, pode ser explicado por algumas variáveis relacionadas às características físico-químicas do rejeito. Essas características podem principalmente ser atribuídas pela finura do material e formato do material, além de sua composição química. Como discutido nos resultados no estado fresco, o formato irregular das partículas observado no MEV e também no microscópio ótico, aliado a menor granulometria deste material quanto comparado com o agregado miúdo, pode ter ajudado na ancoragem entre a interface agregada e a matriz cimentícia, e também ajudado no preenchimento de poros que normalmente estão contidos dentro do concreto, possivelmente, permitiram um potencial aumento de resistência devido a maior força destas ligações e do melhor empacotamento do concreto como um todo, na pesquisa conduzida por Shettima et al., (2016) condições semelhantes foram encontradas.

A redução da porosidade do material ocorre através do preenchimento dos espaços vazios por material inerte, esse processo também é conhecido como efeito *filler*. Este efeito pode ser conceituado como, a ocupação de espaços que outrora estavam vazios, como por exemplo, os espaços onde existiam bolhas de ar ou espaços vagos deixados pelos encaixes irregulares provocados pelas partículas da pasta e do agregado.

A consequência deste fenômeno é a redução dos poros do material. Onde é possível identificar uma densificação da matriz do concreto, tornando-o assim, mais sólido e compacto, provocando também o aumento de sua resistência, uma vez que, a interconexão destes poros, acarreta em aberturas de fissuras e trincas por caminhos preferenciais (pelos poros) no momento da realização dos ensaios (SALGUEIRO et al., 2004).

Este efeito *filler*, pode ser constatado ao analisar os resultados de resistência a compressão axial aos 07 e 28 dias. Se observa nas Figuras 4.3 e 4.4 um maior crescimento de resistência para a relação a/c 0,40 do que para 0,60, uma vez que a relação 0,40 possui menos água em sua composição, conseqüentemente menos poros. Esta característica permitiu que o rejeito de cobre atuasse com mais eficácia. Na amostra de 0,60 o rejeito também teve um bom desempenho, mas provavelmente devido aos muitos vazios existentes na amostra, não conseguiu preencher satisfatoriamente estes espaços quanto na mistura com relação a/c 0,40.

Também é pertinente ressaltar que na análise da composição química do material, cerca de 60% do rejeito é composto por  $\text{SiO}_2$ , fato que comprova que mais da metade do material tem composição química igual do agregado miúdo ao qual ele substituiu, e mais de 26% de composto pelos compostos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  que estão na forma dos minerais Actinolita, Magnetita, apontados pelo DRX da Figura 3.2 e também observada na Figura 3.4. Estes minerais possuem características semelhantes aos do Quartzo (dióxido de sílica). Neste contexto, mesmo que a composição química possa não contribuir com o ganho de resistência, consegue-se comprovar que a composição química dos materiais que estão sendo utilizados na substituição (rejeito de cobre), tem composição muito semelhante dos agregados substituídos.

Em comparação com outros resultados encontrados na literatura, observou-se comportamento similar. Em pesquisa desenvolvida por Eren & Onuaguluchi et al., (2012), os autores demonstraram que para todos os percentuais de rejeito utilizados, obteve-se ganhos de resistência à compressão em argamassas, em destaque para o percentual de 5%, onde obteve até 40% de aumento de resistência.

Já na pesquisa de Beniwal et al., (2015), os autores utilizaram 3 relações a/c em seus trabalhos e demonstrou-se que para a relação a/c 0,55 e percentual de 30% de substituição, obteve-se ganhos de até 11% de resistência à compressão axial quando comparados com o traço de referência. Porém, para as relações 0,50 e 0,45 os resultados ficaram abaixo dos resultados obtidos pelo traço de referência.

Na pesquisa de Thomas et al., (2013), para a relação a/c 0,40, o maior ganho de resistência, deu-se no percentual de 30% de substituição. Nas relações a/c= 0,45 e 0,50 o maior ganho de resistência, se deu através de 20% de substituição. Porém é válido ressaltar que nesta pesquisa, os percentuais de substituição de 40, 50 e 60% em média, ficaram abaixo do resultado obtido pelo concreto de referência.

Estas análises demonstram que os resultados apresentados nesta pesquisa, estão de acordo com o comportamento apresentado pelas outras pesquisas existentes. Contudo, é necessário salientar que devido o material utilizado ser um material com formações geológicas (origens) e submetidos a processamentos minerais diferentes um dos outros, estes materiais, podem possuir algumas características físico-químicas distintas que acarretam em algumas pequenas variações de comportamento demonstrado pelas pesquisas dos demais autores.

#### 4.2.2. Resultados de resistência à compressão diametral

Os resultados dos concretos para resistência à tração por compressão diametral estão apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6 e foram obtidos segundo a NBR NBR 7222 (ABNT, 2011). Os resultados estão expressos em função suas respectivas médias, com os desvios padrões e coeficientes de variação.

Tabela 4.5 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral para relação a/c 0,40

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1 (Mpa)	CP2 (Mpa)	CP3 (Mpa)	CP4 (Mpa)	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	2,34	2,33	2,17	2,21	2,26	0,08	3,72%
15%		2,69	2,55	2,28	2,32	2,46	0,20	8,0%
30%		2,54	2,67	2,50	2,69	2,60	0,10	3,7%
45%		2,58	2,56	2,70	2,35	2,55	0,15	5,8%
0%	28	2,45	2,71	2,51	2,32	2,50	0,16	6,55%
15%		2,85	2,83	2,73	2,59	2,75	0,12	4,3%
30%		2,81	3,08	2,71	2,98	2,89	0,16	5,6%
45%		2,71	2,75	2,80	2,82	2,77	0,05	1,8%

Tabela 4.6 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral para relação a/c 0,60

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1	CP2	CP3	CP4	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	1,52	1,34	1,56	1,37	1,45	0,11	7,7%
15%		1,62	1,47	1,51	1,61	1,55	0,08	4,8%
30%		1,63	1,62	1,68	1,67	1,65	0,03	1,9%
45%		1,59	1,61	1,61	1,62	1,61	0,01	0,8%
0%	28	1,85	2,06	2,12	2,04	2,02	0,12	5,9%
15%		2,03	2,28	2,30	2,12	2,18	0,13	6,0%
30%		2,16	2,48	2,35	2,27	2,32	0,14	5,8%
45%		2,32	2,31	2,25	2,25	2,29	0,04	1,7%

Ao analisar os resultados encontrados nas Tabelas 4.5 e 4.6, verifica-se que os resultados de resistência à tração estão dentro do esperado. Uma vez que os resultados que normalmente encontrados em ensaios de tração, segundo a NBR 6118 (ABNT,2014), podem se relacionar através da relação entre a resistência à compressão axial e a compressão diametral, que pode ser expresso pela Equação 4.1:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (4.1)$$

Onde:

**f<sub>ct,m</sub>** = Resistência média à tração

**f<sub>kc</sub>** = Resistência característica à compressão do concreto.

Neste ensaio, também se fez análise estatística utilizando análise de variância (ANOVA de uma via), para verificar se isoladamente os percentuais de substituição de rejeito de cobre dentro da mistura do concreto possui de fato significância estatística para este ensaio, e os resultados estão expressos nas Tabelas 4.7 e 4.8 respectivamente.

De mesmo modo como se procedeu na análise do item anterior, após a constatação de que as amostras tinham significância estatística, foi utilizado o teste Tukey para averiguação de quais resultados eram significativos dentro da amostra.

Tabela 4.7 - Teste Tukey para ANOVA dos resultados para relação a/c de 0,40.

ANOVA – Relação a/c 0,40 - 07 dias						
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p	
Fator	3	0,26415	0,08805	4,697044	0,021582	
Resíduos	12	0,22495	0,018746			
Teste Tukey						
Análise entre traços	0 - 15%	0 - 30%	0 - 45%	15 - 30%	15 - 45%	30 - 45%
P-valor	0,227361	0,020284	0,052213	0,496777	0,803168	0,946869
Significância	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
ANOVA – Relação a/c 0,40 - 28 dias						
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p	
Fator	3	0,333069	0,111023	6,290993	0,008253	
Resíduos	12	0,211775	0,017648			
Teste Tukey						
Análise entre traços	0 - 15%	0 - 30%	0 - 45%	15 - 30%	15 - 45%	30 - 45%
P-valor	0,08077	0,005536	0,056212	0,443816	0,996399	0,562276
Significância	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor que reflete a significância em relação ao erro padrão (p<0,05).

Tabela 4.8 - Teste Tukey para ANOVA dos resultados para relação a/c de 0,60

ANOVA – Relação a/c 0,60 - 07 dias						
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p	
Fator	3	0,091969	0,030656	6,685597	0,006646	
Resíduos	12	0,055025	0,004585			
Teste Tukey						
Análise entre traços	0 - 15%	0 - 30%	0 - 45%	15 - 30%	15 - 45%	30 - 45%
P-valor	0,180378	0,00556	0,026132	0,228627	0,668205	0,811338
Significância	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
ANOVA – Relação a/c 0,60 - 28 dias						
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p	
Fator	3	0,214569	0,071523	5,717069	0,011471	
Resíduos	12	0,150125	0,01251			
Teste Tukey						
Análise entre traços	0 - 15%	0 - 30%	0 - 45%	15 - 30%	15 - 45%	30 - 45%
P-valor	0,212209	0,012519	0,025719	0,377073	0,60077	0,975541
Significância	NÃO	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor que reflete a significância em relação ao erro padrão ( $p < 0,05$ ).

Observadas as Tabelas 4.7 e 4.8, é interessante analisar que para a relação a/c 0,40, houve diferença significativa apenas para a interação entre o percentual de 30% em relação ao traço de referência. Para a relação a/c 0,60, houveram dois resultados com significância, que foram as interações entre 0-30% e 0-45%. Estes dados refletem que a substituição de agregado miúdo por rejeito de cobre, foi bem mais significativa para o ensaio de resistência à compressão axial, do que para o ensaio de tração por compressão diametral.

Segundo Metha e Monteiro (2014), a influência do efeito *filler* na resistência a compressão axial é mais expressiva do que na resistência a tração, por este motivo, pode-se observar um pequeno decréscimo dos valores em relação aos percentuais de aumento de resistência à tração, quando comparados com a resistência à compressão axial.

Para uma melhor análise, geraram-se dois gráficos representados pelas Figuras 4.5 e 4.6, as quais apresentam os resultados de resistência à tração por compressão diametral nas duas relações a/c estudadas nesta pesquisa.

Figura 4.5 - Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 e 28 dias, para relação a/c 0,40. Valores expressados em resistência média  $\pm$  desvio padrão. (ANOVA;  $p < 0,05$ )

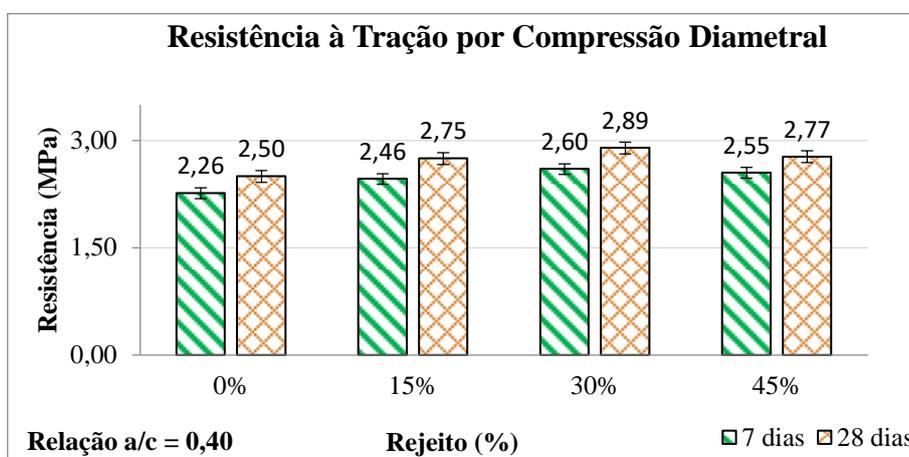
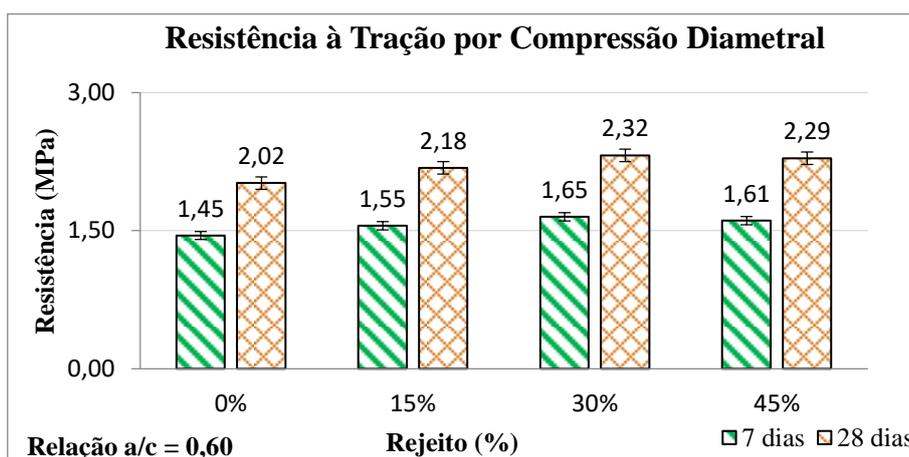


Figura 4.6- Resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 e 28 dias, para relação a/c 0,60. Valores expressados em resistência média  $\pm$  desvio padrão. (ANOVA;  $p < 0,05$ ).



Da mesma maneira que ocorreu com a resistência à compressão axial, os resultados de tração por compressão diametral também apresentaram dois comportamentos usuais que foram relatados na propriedade de resistência à compressão axial, sendo eles o aumento da resistência ao longo das idades e a diminuição da resistência conforme o aumento da relação a/c. Que neste caso, também pode ser explicadas, pelo aumento do grau de hidratação no cimento e conseqüentemente no aumento da presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), bem como na redução da porosidade do mesmo (HELENE, 2008). E no caso da relação a/c pelo enfraquecimento natural da matriz cimentícia causado pelo aumento da porosidade, decorrente da maior relação água/cimento. (METHA & MONTEIRO, 2014).

Para estes resultados, também se observou que o rejeito de cobre influenciou positivamente em todos os traços onde foi adicionado. Porém diferentemente dos ensaios de resistência à compressão, onde a cada percentual maior de agregado substituído por rejeito, aumentava-se a resistência à compressão do concreto, neste ensaio verificou-se que o maior ganho de resistência em relação ao traço de referência deu-se no percentual de substituição de 30% para ambas as relações a/c, obtendo assim, aumento de resistência à tração de 15,38% para relação a/c 0,40 e de 14,48% para relação 0,60.

Comportamento similar ao apresentado pode ser observado nas pesquisas de Thomas et al., (2013) e de Eren & Onuaguluchi (2012). No primeiro observa-se que há um ganho de resistência a tração no percentual de 30% para relação a/c 0,40 e aproximadamente em 50% para as relações a/c 0,45 e 0,50. Já na segunda pesquisa, onde se focaliza em argamassas, houve um aumento expressivo para o percentual de 5% de adição.

E mesmo para pesquisas que utilizaram materiais diferentes, como a de Moura (2000) que utilizou escória metalúrgica de cobre, também obteve resultados de resistência à tração por compressão diametral com resultados semelhantes com os apresentados nesta pesquisa. Seus resultados comprovam que todos os resultados com adição de escória metalúrgica obtiveram resultados satisfatórios, quando comparados ao traço de referência, com destaque para a relação a/c 0,50 houve aumento de resistência à tração de 17%.

Os resultados acima só comprovam que de fato, a adição de rejeito de cobre na mistura, aumenta a resistência dos mesmos em relação à tração. É pertinente ressaltar que se o objetivo do trabalho for maximizar a resistência do concreto a tração, deve-se utilizar rejeito de cobre com percentual de substituição na faixa de 30% conforme demonstrado pelos resultados das Figuras 4.5 e 4.6

#### **4.2.3. Resultados de resistência à tração na flexão**

Os resultados dos concretos para resistência à tração na flexão estão apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10 e foram obtidos segundo NBR 12142 (ABNT, 2010). Os resultados estão expressos em função suas respectivas resistências potenciais, com os desvios padrões e coeficientes de variação.

Tabela 4.9 - Resultados de resistência à tração na flexão diametral para relação a/c 0,40.

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	Resistência Potencial (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	2,81	3,17	3,17	0,25	8,53%
15%		3,36	3,20	3,36	0,12	3,6%
30%		3,23	3,54	3,54	0,22	6,6%
45%		3,32	3,47	3,47	0,11	3,1%
0%	28	3,87	4,11	4,11	0,17	4,25%
15%		4,04	4,46	4,46	0,30	7,0%
30%		4,67	4,05	4,67	0,43	10,0%
45%		4,46	4,49	4,49	0,02	0,5%

Tabela 4.10 - Resultados de resistência à tração na flexão diametral para relação a/c 0,60.

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)	Resistência Potencial (Mpa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	2,66	3,08	3,08	0,30	10,4%
15%		3,02	3,26	3,26	0,17	5,4%
30%		3,44	3,47	3,47	0,02	0,6%
45%		3,27	3,12	3,27	0,11	3,3%
0%	28	3,05	3,29	3,29	0,17	5,4%
15%		3,48	3,44	3,48	0,03	0,9%
30%		3,65	3,62	3,65	0,02	0,6%
45%		3,41	3,54	3,54	0,10	2,7%

Também se realizou análise de variância (ANOVA de uma via), com a finalidade de averiguar se isoladamente a substituição de rejeito de cobre dentro da mistura do concreto, possui de fato significância estatística. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resultados de ANOVA de resistência a tração na flexão para relação a/c 0,40

ANOVA – Relação a/c 0,40 - 07 dias					
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p
Fator	3	0,21425	0,071417	2,086681	0,244708
Resíduos	4	0,1369	0,034225		
ANOVA – Relação a/c 0,40 - 28 dias					
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p
Fator	Fator	3	0,253209	0,084403	1,101284
Resíduos	Resíduos	4	0,306563	0,076641	

GL = Grau de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor em relação ao nível de significância ( $p < 0,05$ ).

Tabela 4.12 - Resultados de ANOVA de resistência a tração na flexão para relação a/c 0,60

<b>ANOVA – Relação a/c 0,60 - 07 dias</b>						
<b>Indicador</b>	<b>G.L.</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	
<b>Fator</b>	3	0,35	0,12	3,60	0,12413	
<b>Resíduos</b>	4	0,13	0,03			
<b>ANOVA – Relação a/c 0,60 - 28 dias</b>						
<b>Indicador</b>	<b>G.L.</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>p</b>	
<b>Fator</b>	3	0,23	0,08	7,64	0,03930	
<b>Resíduos</b>	4	0,04	0,01			
<b>Teste Tukey</b>						
<b>Análise entre traços</b>	<b>0 - 15%</b>	<b>0 - 30%</b>	<b>0 - 45%</b>	<b>15 - 30%</b>	<b>15 - 45%</b>	<b>30 - 45%</b>
<b>P-valor</b>	0,13049	0,03142	0,11370	0,41277	0,99856	0,47449
<b>Significância</b>	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor em relação ao nível de significância ( $p < 0,05$ ).

Ao analisar a Tabela 4.11, verificou-se pela primeira vez que surgiram resultados sem significância estatística dos conjuntos de amostras analisados. Verifica-se que somente o resultado com idade de 28 dias e relação a/c de 0,6 apresentou significância. Considerando, que os resultados desta propriedade já foram discutidos no tópico anterior, os resultados apresentados estão completamente dentro da normalidade. Nos resultados anteriores, a relação 0,40 aparecia com apenas um resultado com significância, enquanto que a relação a/c 0,60 apresentou dois resultados. Nesta análise, devido ao número menor de dados, a análise identificou apenas um resultado que está apresentado na Tabela 4.12.

Do mesmo como foram feitos em outros tópicos, também se geraram dois gráficos, que estão representados pelas Figuras 4.7 e 4.8. Estes gráficos apresentam uma análise comparativa entre o concreto produzido como referência e os concretos produzidos com diferentes percentuais de rejeitos para os ensaios de tração na flexão. Os valores foram expressos em função da resistência potencial, conforme preconizado na NBR 12655 (ABNT, 2015).

Figura 4.7 - Resultados de Resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias, para relação a/c 0,40.

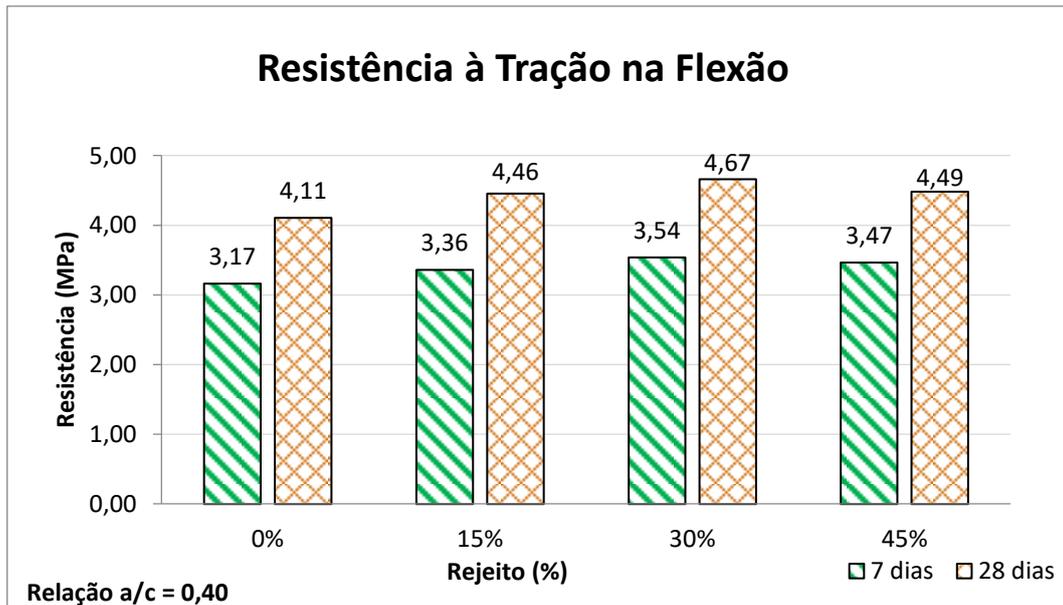
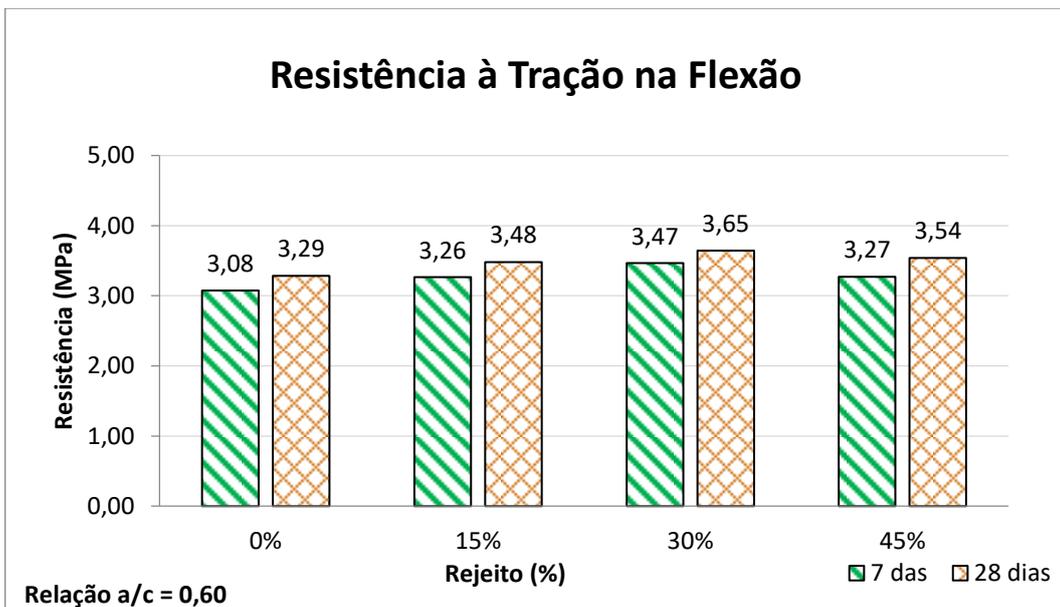


Figura 4.8 - Resultados de Resistência à na flexão aos 7 e 28 dias para relação a/c 0,60.



Nas Figuras 4.7 e 4.8 é possível observar que os traços onde se houve substituição de rejeito, houve aumento da resistência a tração, de modo que, assim como no ensaio de resistência à compressão tração por diametral, o percentual que apresentou melhor desempenho foi o percentual de substituição de 30%, com um aumento 12,68% para a relação a/c de 0,40 e 11,82% para a relação a/c 0,60. A explicação para o aumento de tais,

valores encontram-se pautadas no item anterior, uma vez que abordam a mesma propriedade, porém com ensaios diferentes.

Porém, ao analisar os resultados dos ensaios de tração na flexão e tração por compressão diametral, observa-se que os resultados do primeiro ensaio, são ligeiramente maiores do que do último. Este comportamento é explicado por Pinheiro et al., (2004), que demonstra que os ensaios de tração na flexão apresentam resultados até 20% superiores quando comparados aos ensaios de tração por compressão diametral. Este fenômeno explica-se, pois, os ensaios de tração na flexão estão submetidos a flexão pura, enquanto os ensaios de tração por compressão diametral são rompidos através de tração indireta (ruptura por fendilhamento), e isso confere maiores valores de resistência, para os ensaios de tração na flexão.

#### 4.2.4. Resultados de módulo de elasticidade

Os resultados dos concretos para o módulo de elasticidade estão apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14 e foram obtidos segundo NBR 8522 (ABNT, 2017). Os resultados estão expressos em função de seus módulos de elasticidade potenciais, com os desvios padrões e coeficientes de variação, conforme preconizado pela NBR 12655 (ABNT, 2013).

Tabela 4.13 - Resultado de módulo de elasticidade para relação a/c 0,40.

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1 (GPa)	CP2 (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	15,58	14,75	15,58	0,59	3,8%
15%		17,40	16,43	17,40	0,69	4,1%
30%		16,47	16,63	16,63	0,11	0,7%
45%		16,16	16,75	16,75	0,42	2,5%
0%	28	17,51	18,50	18,50	0,70	3,8%
15%		19,30	20,93	20,93	1,15	5,7%
30%		18,41	20,71	20,71	1,63	8,3%
45%		18,12	20,14	20,14	1,43	7,5%

Tabela 4.14 - Resultado de módulo de elasticidade para relação a/c 0,60

TRAÇOS	Idade (dias)	CP1 (GPa)	CP2 (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
0%	07	12,87	11,70	12,87	0,83	6,7%
15%		14,82	14,19	14,82	0,45	3,1%
30%		14,30	13,37	14,30	0,66	4,8%
45%		14,38	13,80	14,38	0,41	2,9%
0%	28	15,10	14,77	15,10	0,23	1,6%
15%		17,22	15,83	17,22	0,98	5,9%
30%		16,83	15,82	16,83	0,71	4,4%
45%		16,98	17,05	17,05	0,05	0,3%

Realizou-se análise de variância (ANOVA de uma via), com a finalidade de averiguar se isoladamente a substituição de rejeito de cobre dentro da mistura do concreto, possui de fato significância estatística. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.15 e 4.16.

Tabela 4.15- Resultado de ANOVA do módulo de elasticidade para relação a/c 0,40.

ANOVA – Relação a/c 0,60 - 07 dias					
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p
Fator	3	3,50	1,17	4,66	0,08567
Resíduos	4	1,00	0,25		
ANOVA – Relação a/c 0,60 - 28 dias					
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p
Fator	3	8,86	2,95	2,97	0,15993
Resíduos	4	3,97	0,99		

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor em relação ao nível de significância ( $p < 0,05$ ).

Tabela 4.16 - Resultado de ANOVA do módulo de elasticidade para relação a/c 0,60.

ANOVA – Relação a/c 0,60 - 07 dias					
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p
Fator	3	5,64	1,88	5,07	0,07549
Resíduos	4	1,48	0,37		
ANOVA – Relação a/c 0,60 - 28 dias					
Indicador	G.L.	SQ	QM	F	p
Fator	3	4,77	1,59	4,15	0,10142
Resíduos	4	1,53	0,38		

GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrados Médios; F = Valor estatístico de F considerando erro de 5%; p = valor em relação ao nível de significância ( $p < 0,05$ ).

Ao analisar-se a Tabelas 4.15 e 4.16, pode se observar que em nenhuma das amostras foi constatada a significância estatística, por este motivo não foi necessária a realização de testes adicionais (teste Tukey) para os resultados de módulo de elasticidade.

Consolidaram-se também as informações das tabelas 4.15 e 4.16, e geraram-se dois gráficos, que foram expressos pelas Figuras 4.9 e 4.10, nos quais apresentam uma análise comparativa entre o concreto produzido como referência, e os concretos produzidos com diferentes percentuais de rejeitos para os ensaios de módulo de elasticidade.

Figura 4.9 - Resultados de módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias para relação a/c 0,40.

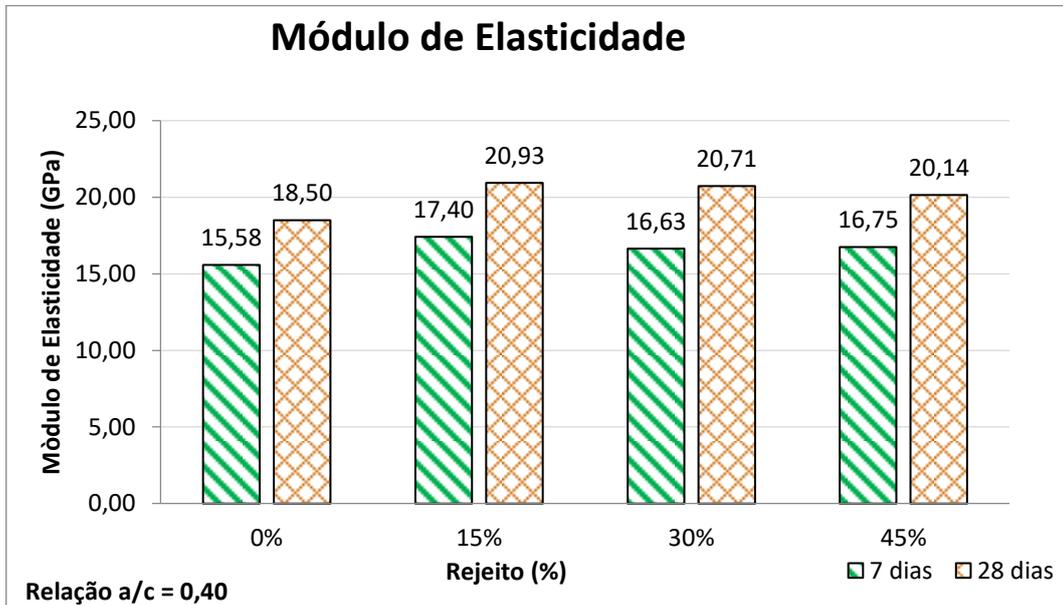
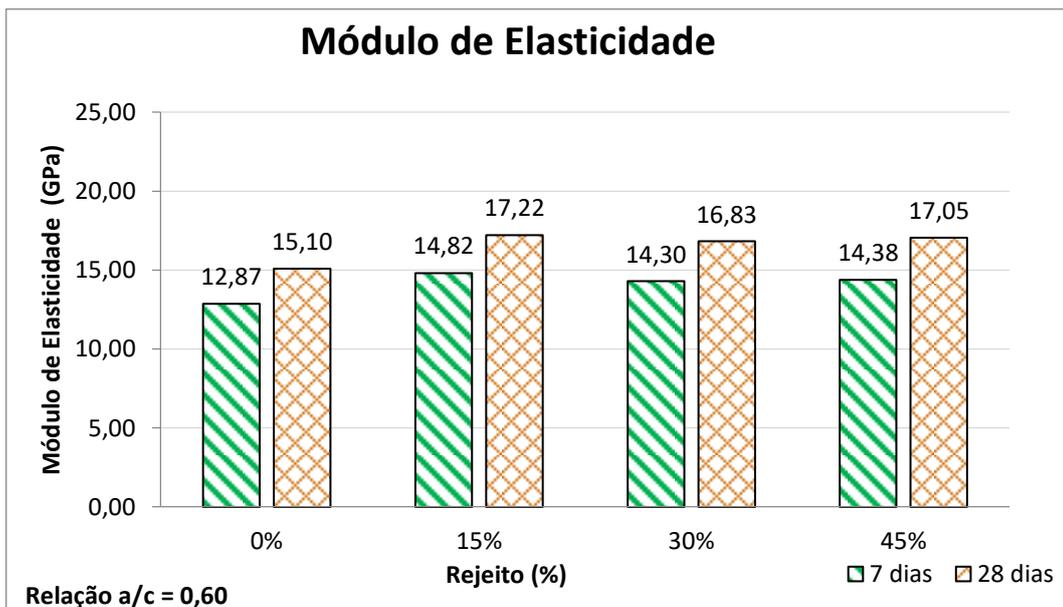


Figura 4.10 - Resultados de módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias para relação a/c 0,60.



Nas Figuras 4.9 e 4.10 é possível observar que, por mais que as Tabelas 4.15 e 4.16 não tenha demonstrado significância estatística entre os resultados, em todos os traços com adição de rejeito houve aumento do módulo de elasticidade. Neste cenário, não houve um percentual de substituição que se destacou dos demais, mas percebe-se que nos três percentuais de substituição houve aumento médio no módulo de elasticidade de 12% em relação ao traço de referência.

Portanto, nestas figuras observa-se que não há uma tendência de comportamento entre os percentuais de substituição, apenas um aumento no módulo de elasticidade em relação ao traço referência. Este comportamento apenas comprova que os percentuais de substituição obtiveram desempenho satisfatório em relação ao módulo de elasticidade.

Na literatura, não se encontrou resultados para módulo de elasticidade quando utilizado rejeito de cobre como substituto de agregados miúdos. Porém, para outras pesquisas que se utilizaram material similar, os resultados apresentados acima, mostram-se em concordância.

A pesquisa de Shettima et al., (2016), que utilizou rejeito de ferro (pellet feed) como substituto aos agregados miúdos no concreto, demonstrou que para os ensaios de módulo de elasticidade, todos os quatro percentuais de substituição obtiveram seus módulos de elasticidade aumentados, com destaque para a substituição total de agregados miúdos por rejeito, no qual obteve expressivos 42% de aumento no módulo de elasticidade. Os outros traços, no entanto, apresentaram comportamento similar com o demonstrado nesta pesquisa, tendo em média 32% de aumento no módulo de elasticidade nos três primeiros percentuais de substituição.

Anjos et al., (2017) que utilizou escória metalúrgica de cobre como substituto parcial de agregados miúdos, não obteve resultados positivos nesta substituição. Porém, como já explanado anteriormente as características físico-químicas da escória metalúrgica do cobre e morfologia das partículas, conduziram para este resultado ao final. Nesta pesquisa todos os resultados ficaram em média 6% abaixo do valor do de módulo de elasticidade do concreto de referência.

Deste modo, o rejeito de cobre mostra-se viável para ser utilizado como agregado miúdo, no tocante ao módulo de elasticidade. Uma vez que mesmo não possuindo significância estatística, demonstrou em todos os seus resultados, valores superiores ao do módulo de elasticidade do concreto de referência.

## 5. Conclusões

### 5.1. Considerações Finais

Esta pesquisa teve como objetivo geral a utilização e a avaliação dos efeitos da substituição parcial do agregado miúdo por rejeito de cobre na produção de concreto. Desta forma, podemos concluir que o presente trabalho atingiu seus respectivos objetivos, uma vez que foram analisados e discutidos ao longo dos resultados, as influências positivas e negativas que esta substituição ocasionou ao concreto. De modo geral, os resultados apresentados nesta pesquisa possibilitam afirmar que os concretos produzidos com rejeito de cobre apresentaram resultados com expressivas melhorias de desempenho quando comparados com os concretos produzidos sem a presença do rejeito.

Quanto aos objetivos secundários desta pesquisa, obteve-se que por meio da caracterização do minério de cobre, se identificaram que os óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  somam aproximadamente 86% da composição química do material. Atenta-se pelo fato de que o material que está sendo substituído (areia), ter composição química próxima aos materiais que foram utilizados como substitutos (rejeito de cobre), e que acabaram por garantir que a resistência do material substituído, ficasse próxima do material utilizado.

Também se verificou que por meio de caracterização física, o material em seu estado natural tem módulo de finura e diâmetro máximo característico menor do que dos agregados miúdos. Esta característica conferiu ao concreto um melhor preenchimento dos espaços vazios dentro do mesmo, fazendo com que o concreto tivesse um melhor empacotamento e uma maior densificação do que os concretos não houve adições de rejeito.

Por fim, na análise morfológica das partículas, constatou-se que o rejeito de cobre possui partículas de superfície áspera e com bordas bem irregulares. Esta característica, também podem ter contribuído para uma ligação física mais coesa entre os agregados e matriz cimentícia.

Nos resultados apresentados nesta pesquisa, o foco principal foram os ensaios mecânicos resultantes das variáveis de resposta elencadas no início do estudo. Constatou-se que estatisticamente por análise de variância que os ensaios onde houve adição de rejeito obtiveram-se resultados com significância relevante (com exceção dos resultados de módulo de elasticidade), conforme constatado pelos testes de ANOVA e Tukey.

Nas propriedades do estado fresco, observou-se que o rejeito de cobre conferiu menor consistência ao concreto, devido sua maior quantidade de finos. Observou-se

também que com o aumento dos percentuais de substituição de agregados por rejeito de cobre, a coesão do concreto melhorou. Houve a necessidade de se utilizar aditivo para manter o concreto nas condições de abatimento estabelecidas no início da pesquisa e com uma boa coesão, uma vez que a utilização excessiva de finos dentro da mistura combinado a uma baixa relação a/c, acarreta em uma mistura extremamente seca e fora dos limites estabelecidos.

Apesar do aumento na necessidade de aditivo, conforme o aumento do percentual de rejeito se constatou que mesmo na condição mais desfavorável, que foi a relação a/c de 0,40 e teor de substituição de 45%, não se teve o emprego de aditivo em um percentual acima do valor estabelecido pelo fabricante.

Nas propriedades do estado endurecido, pode-se afirmar categoricamente que para os teores de substituição estudados, todos os traços de concreto onde se adicionou rejeito de cobre, houve alguma melhora em suas propriedades. Para os ensaios de resistência a compressão, constatou-se que para o traço com relação a/c de 0,40 e percentual de substituição de 45%, houve aumento de quase 20% na resistência à compressão do concreto. Na mesma maneira que ocorreu para os ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão, onde se verificou que para o percentual de substituição de 30% de agregados miúdos por rejeito, obteve-se em média 13% da resistência a tração do concreto.

É de extrema importância, ressaltar que em todos os resultados, foram feitas análises estatísticas por meio de ANOVA e comprovadas que tais aumentos de resistências eram estatisticamente significativos.

Verificou-se também, que mesmo os resultados de módulo de elasticidade, não apresentarem significância estatística, apresentou bons resultados, uma vez que os concretos que continham rejeito de cobre, obtiveram desempenho em média de 12% em relação ao traço de referência.

Deste modo, pode-se concluir, sob o ponto de vista dos ensaios mecânicos, que o aproveitamento do rejeito de cobre como substituto parcial ao agregado miúdo, se provou eficaz e com utilização viável, posto que os resultados apresentados para os concretos onde houve adição de rejeito de minério de cobre foram expressivamente melhores do que os dos concretos de referência.

Portanto, desta maneira é possível concluir que se abrem possibilidades alternativas em relação à utilização deste rejeito. Possibilita-se a partir de agora, que as mineradoras tenham mais uma alternativa de como este material poderá ser tratado e utilizado e

armazenado. É importante ressaltar que durante toda a pesquisa, se demonstrou o quanto é perigoso e custoso as estruturas de contenções de rejeito. A utilização deste material como agregado miúdo, na indústria da construção civil, evitaria a extração de milhões de toneladas de agregados miúdos nesta indústria, ao passo que diminuiria consideravelmente o volume de rejeitos que atualmente é armazenado nas barragens de rejeito. Esta situação possibilitaria a diminuição dos riscos de acidentes ambientais e humanos como os casos de Mariana e Brumadinho, tornando-se assim uma solução efetivamente sustentável, com impactos econômicos, sociais e ambientais.

## **5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Considerando o grande volume de rejeito disposto nas bacias de rejeito, o grande potencial para a utilização deste rejeito e os riscos envolvidos no armazenamento deste material, é importante que seja dado continuidade aos estudos em caráter complementar a esta pesquisa, para consolidar e validar os resultados aqui apresentados. Deste modo, destaca-se a necessidade de sugestões para trabalhos futuros, nos seguintes itens:

- Estudar maiores percentuais de substituição de rejeito de cobre por agregados miúdos, visto que para propriedades como a resistência a compressão axial mesmo utilizando o maior percentual de substituição (45%), os resultados demonstram excelentes resultados. Fazendo com que assim, existam prováveis percentuais com maior teor de substituição que poderão demonstrar melhores resultados.
- Realizar ensaios de durabilidade como permeabilidade, carbonatação, resistência a sulfatos e cloretos em concretos produzidos com a utilização do rejeito de cobre para verificar se o seu desempenho atende minimamente as normalizações existentes;
- Realizar o estudo de viabilidade econômica da utilização do rejeito, uma vez que o custo gasto pelas empresas para a manutenção das barragens de rejeitos é bastante significativo, porém as mineradoras geralmente estão em locais de acesso restrito e remoto e custo médio do transporte nestes locais é considerável;

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

\_\_\_\_\_. **NBR 10.004:** Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007:** Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142:** Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **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 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522:** Concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522:** Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27:** Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

AGOPYAN V., JOHN V.M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil:** José Goldemberg, (coord.). São Paulo: Blucher, 2011.

ANJOS, M.A.G dos, SALES, A.T.C., ANDRADE, N. **Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete** - Journal of Environmental Management 196 (2017) 607-613pgs.

ANM – Agencia Nacional de Mineração. **Classificação de Barragens de Mineração.** 2016. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/plano-de-seguranca-de-barragens>. Acessado em: 19 de março de 2018.

ANTT- Agência Nacional de Transportes Terrestres - **Recurso de desenvolvimento tecnológico - RDT: utilização de escória de ferro silício-manganês como agregado em misturas asfálticas dosadas pela metodologia superpave.** Relatório Final. Minas Gerais - 2017

BENIWAL P., KUMAR R., USMAN M., SANGWAN S. **Use of Copper Tailings as the Partial Replacement of Sand in Concrete** - International Journal for Research in

Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) - Volume 3 Issue XII, December 2015.

BENVENUTI M., et al., **Mine waste dumps and heavy metal pollution in abandoned mining district of Boccheggiano (Southern Tuscany, Italy)**. Environ Geol 1997;30:238–43.

BERRIOS, M. R & MORAES, J. L. **La Recolección Selectiva de Residuos Sólidos y las Repercusiones Sociales y Espaciales en Brasil**. Revista Climep. Rio Claro (SP). Vol.7, n.1, janeiro/junho /2013, p.134.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. - MMA, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília - DF

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, v. 8º Edição, 2014

CARMO, F, F., et al., **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context**. Perspectives in Ecology and Conservation 15 (2017). pgs 145–15

CHAVES, A.P. et al., **Flotação – O estado da arte no Brasil**. Signus Editora - Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, da mesma editora V.4, 2006

COCHILCO - Comision Chilena del Cobre - **Tendencias de usos y demanda de productos de cobre**. Chile, 2017. 41pg

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005** - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico** – Brasília: DNPM, 2018. 95 pg.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas** – Brasília: DNPM, 2016. 31 pg.: 1 - 13.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Cobre** – Brasília: DNPM, 2009. 216 - 235 Pg.

EDITORA3, Revista Istoé Dinheiro - **As 50 empresas do bem**. Disponível em: <https://www.istoedinheiro.com.br/noticias/negocios/20110401/empresas-bem/52137>.

Acessado em: 12 jul. 2018

FARIA, B. - **Comparações Múltiplas – Teste de Tukey** – ABG Consultoria Estatística. Disponível em: <http://www.abgconsultoria.com.br/blog/comparacoes-multiplas-teste-de-tukey/>. Acessado em 15.jul.2018

FIGUEIRA, H. V. O., LUZ, A. D., ALMEIDA, S. L. M. - **Britagem e Moagem** - Tratamento de Minérios - 5ed. Cap.4 (2010)

FURQIM, P.R.V. **Estudo Estatístico de Produção de Concretos com Adições Minerais**. Universidade Federal de Santa Maria (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Materiais de Construção). Santa Maria, 2006.

G1. **Rompimento de barragem de rejeitos de minério provoca desastre em Brumadinho (MG)**. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal->

[nacional/noticia/2019/01/25/rompimento-de-barragem-de-rejeitos-de-minerio-provoca-desastre-em-brumadinho-em-minas-gerais.ghtml](http://nacional/noticia/2019/01/25/rompimento-de-barragem-de-rejeitos-de-minerio-provoca-desastre-em-brumadinho-em-minas-gerais.ghtml) acessado em: 25 jan. 2019

GOOGLE EARTH-MAPAS. 2018. Disponível em: <https://mapas.google.com> .

Acesso em: 15 jul. 2018

GORAI, B., JANA, R.K., PREMCHAND,. **Characteristics and utilization of copper slag -a review. Resources. Conservation Recycle.** 39, pgs – 299 -313, 2002

GRIGOLI, A. S. & HELENE, P. R. L. **Porosidade do concreto: melhora pela introdução de adições inertes.** Anais.. Brasília, DF: UnB, 2002.

GUERRA, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro PELLET FEED em pavimentos de blocos intertravados de concreto.** Universidade Federal de Minas Gerais (Dissertação de Mestrado em Construção Civil). Belo Horizonte, 2014

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativa Populacional para 2017.**, 2017, Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2017/estimativa\\_dou\\_2017.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2017/estimativa_dou_2017.pdf) , acessado em 11 de março de 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PIB dos Municípios - base de dados 2010-2015.** Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Pib\\_Municipios/2015/base](ftp://ftp.ibge.gov.br/Pib_Municipios/2015/base), acessado em 11 de março de 2018.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Guia para planejamento do fechamento de mina.** 1ª Edição. 224 p. 2013. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>  
Acesso em: 06 set. 2018

ICGS - International Copper Association - Copper Alliance. **Copper Alliance.** Disponível em: <https://www.copperalliance.org>. Acessado em 06 out. 2018

ICGS -International Copper Association Latin America. **pocobre.org**. Disponível em: <https://www.copperalliance.org>. Acessado em 04 out. 2018

IEC - Instituto Evandro Chagas - **Avaliação dos impactos referente ao transbordo de efluentes de lama vermelha na cidade de Barcarena, estado do Pará**. - Relatório Técnico 02/2018. Pará. 2018

JABARI K.S Al, et al., **Copper slag as sand replacement for high performance concrete**. Cement & Concrete Composites 31 (2009) 483–488

JABARI K.S Al, et al., **Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete**. Construction and Building Materials 25 (2011) 933–938

Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 19, p. 829-896.

VALE - **Balanço Hídrico da Usina de Beneficiamentos da Mina do Sossego** - Relatório Técnico, 2018.

JANKOVIĆ, K., BOJOVIĆ. D., STOJANOVIĆ. M., LONČAR, L. **The use of mine tailings as a partial aggregate replacement in scc concrete**. - International conference Contemporary achievements in civil engineering 24. April 2015. Subotica, SERBIA

JUNIOR, R. R., - **Mineração na Região de Integração: Carajás** – Contraponto e Reflexão. Disponível em: [http://ribamarribeirojunior.blogspot.com.br/2010/12/mineracao-na-regiao-de-integracao\\_9059.html](http://ribamarribeirojunior.blogspot.com.br/2010/12/mineracao-na-regiao-de-integracao_9059.html) acessado em 11 de março de 2018.

LUZ, A. B., ALMEIDA, S. L. M. –**Materiais substitutivos** - Cap.16 – Manual para Construção Civil, 2 Ed. – CETEM, 2016 págs. 306 – 308.

MANGRAVITI R. - **O preço do cobre, os veículos elétricos e a energia renovável**. Disponível em: <http://sustentabilidade.com/o-preco-do-cobre-os-veiculos-eletricos-e-energia-renovavel/>. Acesso em: 15 ago de 2018

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 4 ed. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2014.

MME - Ministério de Minas e Energia - **Relatório Técnico 63 -Perfil Técnico do Cobre** - Brasília: 2009. **79pg**

MONTEIRO, L. V. S. et al., **Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in Sossego iron-oxide-gold-copper deposit, Carajas Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotopes constraints.** Mineralium Deposita v.43 p. 129 – 159, 2008.

MOURA, W.A – **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (tese de doutorado) - Porto Alegre – 2000.

MOURA, W.A, DAL MOLIN, D. C. C - **Influencia da adição de escória de cobre em características relacionadas a durabilidade do concreto** – Ambiente Construído – v.4 n.2 p. 41-56 – (2004)

MINTLAB – Suporte ao Minitab 2018 – O que é ANOVA?. Disponível em: em <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>. Acesso em 19. mar de 2019.

NAGALI, A., **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil** –. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, E. G. de & MENDES, O. **Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Demolição: Estudo de Caso da Resolução 307 do CONAMA.** Universidade Católica de Goiás (UCG). 2008

ONUAGULUCHI O, EREN Ö. **Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars.** Construction and Building Materials 37 (2012) 723–727

PINHEIRO, L.B., MUZARDO, C.D., SANTOS, S.P. **Estruturas de Concreto - Capítulo 2** - Universidade de São Paulo - USP - Departamento de Engenharia Civil, 2004.

QOMI M.J, et. al., **Combinatorial molecular optimization of cement hydrates** - Nature Communications - 2014.

SALGUEIRO, W.; SOMOZA, A.; CABRERA, O.; CONSOLATI, G. **Porosity study on free mineral addition cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 91-97, 2004.

SGANDERLA, M. S. **(Re) aproveitamento dos resíduos classe a da construção civil na substituição parcial do agregado miúdo do concreto**. Universidade Regional do Noroeste do Estado Do Rio Grande do Sul – UNIJUI (Monografia). 2015

SHETTIMA, U.A, et al., **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete**. Construction and Building Materials 120 (2016) 72–79

SHIMIZU, V. K.,. **Classificação e caracterização de tipos de minérios de cobre da Mina do Sossego – Região de Carajás**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

SIEBEN, P. G. et al., **Descarte de resíduos nas empresas automotivas - Gestão e Tecnologia e Inovação** - Vol.01 n.3, p.1-8, 2017.

SILVA A. G. G.,. **Cadeia Produtiva do Cobre** – Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais – 2011.

SILVA, A. G. G. da. **Cadeia Produtiva do Cobre** - Universidade Federal de Minas Gerais - (Monografia de Especialização) - Belo Horizonte, 2011.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de

SOUSA, E. J. C., **O que é Drenagem Ácida de Mina (DAM)?** – Disponível em: <https://2engenheiros.com/2016/10/19/drenagem-acida-de-mina-dam/>. Acessado em 10 out. 2018.

THOMAS, B. S., DAMARE, A., GUPTA R.C. **Strength and durability characteristics of copper tailing concrete.** Construction and Building Materials 48 (2013) 894–900

VIVEIROS, D. C. S. Rejeito de Minério de Manganês como Material de Construção Civil - Universidade Federal do Pará (Dissertação de Mestrado). Belém - PA. 2017

ZHOU JM, DANG Z, CAI MF, LIU CQ. **Soil heavy metal pollution around the Dabaoshan Mine, Guangdong Province, China.** Pedosphere 2007;17(5):588–94

# APÊNDICES

## ANEXO A

### ANÁLISE FÍSICO QUÍMICA



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

#### CERTIFICADO DE ANÁLISES PB1800764

##### Dados do Cliente

**Nome:** DOUGLAS MARTINS SOUSA  
**Attn.:** Eng Douglasmartins  
**Endereço:** RUA ARAGUAIA 941 NOVO HORIZONTE 68.502-390 PA MARABA

##### Referência do Lote de Amostras

**Ref. Cliente:** Pedido 05/09/2018  
**Produto:** MINERIO DE COBRE  
**Projeto:** Default

**Número de Amostras:** 1  
**Data do Recebimento:** 12/09/2018  
**Data de Envio:** 03/10/2018  
**Completado Em:** 03/10/2018

##### Referência Analítica

**PHY01E:** LOI (Loss on ignition) - Perda ao fogo por calcinação da amostra a 405°C e/ou 1000°C  
**XRF79C:** Fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF

##### Legenda

<b>L.D.</b> = Limite de Detecção	<b>BLK</b> = Branco	<b>REP</b> = Replicata	<b>DUP</b> = Duplicata
<b>L.N.R.</b> = Listado e não Recebido	<b>I.S.</b> = Amostra Insuficiente	<b>N.A.</b> = Não Analisado	<b>STD</b> = Padrão
<b>I.N.F.</b> = Não reportado devido a interferentes		<b>OVR</b> = Não Analisado devido ao alto teor	

  
**Marcelo Filipe Gonçalves Silva**  
CRQ II 02202046  
Responsável Técnico

Os análises foram realizadas na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespertino - MG - Brasil - CEP: 33.200-000  
Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br  
Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABR 32982 e ABR 36911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

**CERTIFICADO DE ANÁLISES**  
**PB1800764**

Análises	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	TiO2	P2O5	Na2O	K2O
Método	XRF79C								
Unidade	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Limite Detecção	0,10	0,10	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01	0,10	0,01
BRANCO_PREP	98,0	<0,1	1,56	<0,01	<0,1	<0,01	<0,01	<0,1	0,01
REJ. COBRE SOSSEGO	59,3	11,6	11,7	4,74	3,30	0,96	0,56	3,75	1,48
* REP REJ. COBRE SOSSEGO	58,6	11,3	11,6	4,64	3,27	0,96	0,55	3,81	1,44
* STD_SG_142	59,2	11,1	13,3	3,34	1,71	0,88	0,35	0,65	2,28

Análises	MnO	Cu	LOI
Método	XRF79C	XRF79C	PHY01E
Unidade	%	%	%
Limite Detecção	0,01	0,01	-45,00
BRANCO_PREP	<0,01	<0,01	0,11
REJ. COBRE SOSSEGO	0,05	0,08	1,79
* REP REJ. COBRE SOSSEGO			1,75
* STD_SG_078			9,55
* REP REJ. COBRE SOSSEGO	0,04	0,08	
* STD_SG_142	0,26	0,02	

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000  
 Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br  
 Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.