



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

NUBIA GOMES BARBOSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE
MINERAÇÃO EM PROJETOS DE BARRAGENS**

**PALMAS
2019**

NUBIA GOMES BARBOSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE
MINERAÇÃO EM PROJETOS DE BARRAGENS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenheiro Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Me. Cleber Decarli de Assis

**PALMAS
2019**

BARBOSA, Nubia Gomes

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE
RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM PROJETOS DE BARRAGENS/
Nubia Gomes Barbosa – Palmas, 2019

95 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, Campus
Palmas, 2019.

Orientador(a): Prof. Me. Cleber Decarli de Assis

1. Concreto compactado a rolo 2. Agregado reciclado 3. Resíduo de
mineração 4. Projetos de barragens

FOLHA DE APROVAÇÃO

NUBIA GOMES BARBOSA

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM PROJETOS DE BARRAGENS

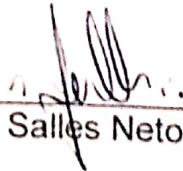
Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Coordenação do curso de
Engenharia Civil Instituto Federal do
Tocantins - Campus Palmas, como
exigência à obtenção do grau em
Engenheiro Civil.

Aprovado em: 10 / 07 / 2019

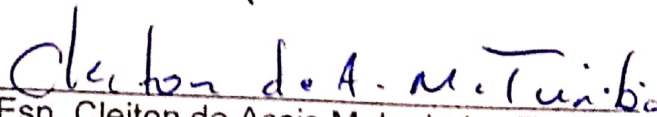
BANCA AVALIADORA



Me. Cleber Decarli de Assis
Orientador



Dr. Moacyr Salles Neto



Esp. Cleiton de Assis Melquiades Turibio

RESUMO

BARBOSA, Nubia Gomes. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de mineração em projetos de barragens**. 2019. 95 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Palmas/TO, 2019.

A indústria siderúrgica durante o processo de fabricação do aço gera co-produtos que são descartados de forma irregular por não dispor de uma destinação ambientalmente adequada. Como alternativa para o aproveitamento desses materiais, são aplicadas atualmente técnicas de beneficiamento cujo o objetivo é produzir agregados reciclados para estruturas de concreto. Os agregados reciclados são mais aplicados em obras de pavimentação rodoviária e para a produção do concreto compactado a rolo, no entanto sua aplicação é indicada também para obras de barragens. Diante do exposto, o objetivo desse trabalho é analisar a viabilidade técnica da utilização de agregados reciclados provenientes da atividade de mineração para a produção do concreto compactado a rolo destinado aos projetos de barragens. Desta forma buscou-se identificar as propriedades dos materiais, bem como avaliar o seu desempenho técnico quando submetido aos ensaios laboratoriais. A partir dos resultados levantados observa-se que a aplicação do resíduo de mineração mostrou-se promissora, apontando melhores desempenhos técnicos em relação ao concreto composto apenas por agregados convencionais.

Palavras-chave: Concreto compactado a rolo. Agregado reciclado. Resíduo de mineração. Projeto de barragens.

ABSTRACT

BARBOSA, Nubia Gomes. Analysis of the technical feasibility of the use of mining waste in dam projects. 2019. 95 p. Final Paper – Civil Engineering, Federal Institute of Education, Science and Technology of Tocantins, Palmas/TO, 2019.

The steel industry during the steelmaking process generates co-products that are improperly disposed due to the lack of an environmentally appropriate destination. As an alternative to the use of these materials, beneficiation techniques are currently applied with the aim of producing recycled aggregates for concrete structures. The recycled aggregates are more applied in road paving works and for the roller-compacted's production, however it is widely used in dam works. In view of the above, the objective of this work is to analyze the technical feasibility of the use of recycled aggregates from the mining activity for the production of roller-compacted concrete for dam projects. In this way, it was sought to identify the properties of the materials, as well as to evaluate their technical performance when submitted to laboratory tests. From the results obtained it is observed that the application of the mining residues showed to be promising, pointing out better technical performances in relation to the concrete composed only by conventional aggregates.

Keywords: Roller-compacted concrete. Recycled aggregate. Mining waste. Dam design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragem Homogênea Modificada.....	22
Figura 2 - Seção Tipo Barragem de Terra Zoneada.....	22
Figura 3 - Barragem de enrocamento com núcleo argiloso.....	23
Figura 4 - Barragem de enrocamento com laje de concreto	24
Figura 5 - Barragem de aterro hidráulico	24
Figura 6 - Central de concreto da UHE Lajeado.....	26
Figura 7 - Transporte realizado por caminhão basculante	27
Figura 8 - Lançamento do CCR pelo método tradicional	27
Figura 9 - Lançamento do CCR pelo método rampado.....	28
Figura 10 - Compactação do CCR.....	29
Figura 11 - Rede de Fluxo.....	31
Figura 12 - Esquema das Forças Envolvidas na Análise de Estabilidade em Barragens.....	33
Figura 13 - Divisão da Superfície Potencial de Ruptura em Fatias.....	34
Figura 14 - Processo de produção do aço.....	35
Figura 15 - Depósitos de laterítas de níquel no mundo.....	36
Figura 16 - Mina de extração do minério de ferroníquel	37
Figura 17 - Processo de produção do ferroníquel da Planta de Barro Alto	37
Figura 18 - Etapas do estudo.....	39
Figura 19 - Etapas do programa experimental	40
Figura 20 - Localização da cidade de Barro Alto - GO.....	41
Figura 21 - Depósito de escória de ferroníquel em Barro Alto - GO	41
Figura 22 - Agregados Miúdos: (a) Convencional; (b) Mineração	42
Figura 23 - Ensaio de caracterização dos agregados	43
Figura 24 – Ensaio de granulometria dos agregados miúdos.....	45
Figura 25 – Ensaio de massa específica dos agregados miúdos: (a) Convencional; (b) Mineração	46
Figura 26 – Etapas de dosagem do concreto	50
Figura 27 – Corpos de provas produzidos na etapa de dosagem: (a) Variando teor de água; (b) Variando teor de cimento.....	52
Figura 28 - Produção dos corpos de provas: (a) moldagem; (b) cura	53

Figura 29 - Ensaio de resistência a compressão axial: (a) Vista de completa; (b) Vista ampliada.....	54
Figura 30 – Ensaio de tração por compressão diametral: (a) Vista completa; (b) Vista ampliada.....	56
Figura 31 – Ensaio de absorção por capilaridade	58
Figura 32 – (a) Ensaio de tração com compressão diametral; (b) Profundidade da ascensão capilar	59
Figura 33 - Resumo da etapa de dosagem	71
Figura 34 - Patologia do Traço T60: (a) Vista completa; (b) Vista Ampliada.....	79
Figura 35 - Ensaio de massa específica do cimento	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre os ensaios e as normas utilizadas para a caracterização dos agregados.....	44
Tabela 2 - Quantidade de corpos de provas para os ensaios do concreto no estado endurecido.....	53
Tabela 3 - Distribuição t de student.....	55
Tabela 4 - Caracterização da escória bruta ferroníquel de redução, lixiviação e solubilização.....	61
Tabela 5 - Análise de espectograma para a escória ferroníquel de redução.....	61
Tabela 6 - Distribuição granulométrica dos agregados.....	62
Tabela 7 - Índice de vazios dos agregados miúdos.....	65
Tabela 8 - Dados do ensaio de compactação.....	67
Tabela 9 - Traços unitários e traços em massa da primeira etapa de dosagem do concreto compactado a rolo com agregados reciclados.....	69
Tabela 10 - Traços unitários e traços em massa da segunda etapa de dosagem do concreto compactado a rolo com agregados reciclados.....	70
Tabela 11 - Traços unitários e traços em massa da segunda etapa de produção do concreto compactado a rolo com agregados reciclados.....	71
Tabela 12 - Massas específicas do concreto no estado endurecido.....	78
Tabela 13 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	78
Tabela 14 - Caracterização do agregado graúdo.....	92
Tabela 15 - Orçamento da pesquisa.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Esquema do teor de água ótimo da dosagem.....	51
Gráfico 2 - Esquema do teor de cimento ótimo da dosagem.....	51
Gráfico 3 - Composição do resíduo de mineração.....	60
Gráfico 4 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos.....	63
Gráfico 5 - Massa específica dos agregados miúdos.....	64
Gráfico 6 - Massa unitária dos agregados miúdos.....	65
Gráfico 7 - Índice de Vazios dos agregados miúdos.....	66
Gráfico 8 - Curva de compactação do agregado de mineração.....	67
Gráfico 9 - Curva de saturação do agregado de mineração.....	67
Gráfico 10 - Absorção de água dos agregados miúdos.....	68
Gráfico 11 - Relação entre a resistência à compressão axial e o teor de água.....	69
Gráfico 12 - Relação entre a resistência à compressão axial e o teor de cimento.....	70
Gráfico 13 - Massa específica do concreto no estado fresco.....	72
Gráfico 14 - Resistência à compressão axial.....	73
Gráfico 15 - Resistência à tração por compressão diametral.....	74
Gráfico 16 - Massas apresentadas pelos corpos de provas submetidos ao ensaio de desgaste.....	75
Gráfico 17 - Resistência à compressão axial dos corpos de provas antes e após o ensaio de desgaste.....	75
Gráfico 18 – Absorção por capilaridade dos corpos de provas.....	76
Gráfico 19 - Ascensão capilar dos corpos de provas.....	77
Gráfico 20 - Taxa de absorção por imersão e índice de vazios.....	78
Gráfico 21 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.....	91

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Massa específica aparente do agregado seco.....	46
Equação 2 – Massa específica do agregado graúdo.....	47
Equação 3 – Massa unitária.....	47
Equação 4 – Índice de vazios nos agregados.....	48
Equação 5 – Absorção de água dos agregados miúdos.....	49
Equação 6 – Absorção de água do agregado graúdo.....	49
Equação 7 – Resistência à compressão axial.....	54
Equação 8 – Média da amostra.....	55
Equação 9 – Resistência à tração.....	56
Equação 10 – Absorção.....	57
Equação 11 – Índice de vazios.....	57
Equação 12 – Massa específica da amostra seca.....	57
Equação 13 – Massa específica da amostra saturada.....	57
Equação 14 – Massa específica real.....	58

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

CCR	Concreto Compactado com rolo
ABNT	Associação Brasileira de Normas T
IFTO	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins
LD	Linz Donawitz
EAF	Eletro Arc Furnace
OH	Open Heart
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora

LISTA DE SÍMBOLOS

Δh	Perda de Carga
ρ_a	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ρ_{sat}	Massa específica Saturada
ρ_r	Massa Específica Real
ρ_s	Massa Específica seca
π	Número irracional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 PROBLEMA DE PESQUISA	16
3 JUSTIFICATIVA	16
4 OBJETIVOS	18
4.1 Objetivo Geral	18
4.2 Objetivos Específicos	18
5 REVISÃO DE LITERATURA	19
5.1 Solos	19
5.1.1 Melhorias de Solos	19
5.2 Barragens	20
5.2.1 Barragens de aterros	20
5.2.1.1 Barragens de Terra	21
5.2.1.1.1 Barragens de Terra com seção Homogênea	21
5.2.1.1.2 Barragens de Terra com Seção Zoneada	22
5.2.1.2 Barragens de enrocamento	22
5.2.1.3 Barragens de Aterro Hidráulico	24
5.3 Concreto Compactado a Rolo em Projetos de Barragens	25
5.4 Execução de barragens compostas por Concreto Compactado a Rolo	26
5.4.1 Produção do Concreto	26
5.4.2 Transporte	26
5.4.3 Lançamento do CCR	27
5.4.3.1 Método Tradicional	27
5.4.3.2 Método Rampado	28
5.4.4 Compactação e Adensamento	28
5.4.5 Juntas de Construção	29
5.5 Projetos de Barragem	29
5.6 Rede de Fluxo	30
5.7 Movimentos de massa	31
5.7.1 Estabilidade de Taludes	32
5.7.1.1 Métodos de Estabilidade	33
5.8 Escórias	34
5.8.1 Escoria de Ferroníquel	35

5.9 Depósitos de níquel	36
5.10 Produção de ferroníquel.....	36
5.11 Agregados reciclados da indústria siderúrgica	38
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
6.1 Programa experimental	39
6.1.1 Coleta dos materiais	41
6.1.2 Caracterização dos agregados	42
6.1.2.1 Composição granulométrica.....	44
6.1.2.2 Massa específica	45
6.1.2.2.1 Massa específica dos agregados miúdos	45
6.1.2.2.2 Massa específica dos agregados graúdos.....	46
6.1.2.3 Massa unitária.....	47
6.1.2.4 Compactação	48
6.1.2.5 Índice de vazios	48
6.1.2.6 Absorção de água.....	48
6.1.2.6.1 Agregados miúdos	48
6.1.2.6.2 Agregados graúdos.....	49
6.1.3 Dosagem do concreto	50
6.1.4 Produção do concreto compactado a rolo.....	52
6.1.5 Ensaio do concreto no estado endurecido	54
6.1.5.1 Ensaio de resistência a compressão axial	54
6.1.5.2 Tração por compressão diametral.....	55
6.1.5.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	56
6.1.5.4 Absorção de água por capilaridade.....	58
6.1.5.5 Ensaio de desgaste.....	59
6.1.6 Análise da viabilidade técnica	59
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
7.1. Composição dos resíduos coletados.....	60
7.2 Ensaio de caracterização dos agregados	62
7.2.1 Granulometria	62
7.2.2 Massa específica	63
7.2.3 Massa unitária.....	64
7.2.4 Índice de vazios	65
7.2.5 Compactação	66

7.2.6 Absorção	68
7.3 Dosagem	68
7.4 Produção do concreto compactado a rolo	71
7.5 Resultados dos ensaios realizados no Concreto no estado endurecido ..	72
7.5.1 Compressão axial	72
7.5.2 Tração por compressão diametral.....	73
7.5.3 Desgaste	74
7.5.4 Absorção por capilaridade	76
7.5.5 Absorção por imersão	78
7.5.6 Outros resultados observados	79
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE A - Caracterização dos agregados graúdos	91
APÊNDICE B – Massa específica do cimento.....	92
APÊNDICE C – Orçamento	93

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é apontada como uma das principais indústrias responsáveis pelo desenvolvimento socioeconômico, entretanto, assume uma considerável parcela referente aos impactos negativos provocados ao meio ambiente, principalmente pelo aspecto da exploração dos recursos naturais. O consumo desses recursos vem aumentando em virtude da utilização dos materiais de construção, voltados à produção de agregados para concreto.

As indústrias metalúrgicas e siderúrgicas geram grande quantidade de resíduos durante a produção do aço e das ligas metálicas, impondo a necessidade de alternativas para o gerenciamento ambientalmente adequado desses materiais. O descarte irregular desses resíduos pode desencadear no comprometimento do cenário local, interferindo no desenvolvimento econômico e espacial do ambiente urbano.

A reciclagem dos resíduos para a produção de agregados é indicada para obras de pavimentação asfáltica e para compor o talude de uma barragem, todavia requer desempenho similar aos agregados convencionais, tanto em relação às características físicas como às características mecânicas, as quais são avaliadas por meio de ensaios de caracterização.

Os ensaios de caracterização normalmente empregados para a identificação das propriedades dos materiais são o de granulometria, massa específica, massa unitária, índice de vazios, absorção de água e compactação. Por meio desses ensaios é possível avaliar o comportamento dos agregados no concreto para os seus diferentes tipos de aplicação.

No projeto de barragem é frequentemente utilizado o concreto compactado a rolo no qual trata-se de um concreto que apresenta na sua composição uma baixa relação a/c e que por meio do processo de compactação mecânica atinge resistência similar aos concretos convencionais, apresentando entretanto como vantagem a rapidez do processo e o menor custo.

Os agregados reciclados são normalmente produzidos a partir dos resíduos da construção e demolição, no entanto o objeto de análise desta pesquisa é a utilização da escória de ferroníquel proveniente da atividade de mineração, cuja a finalidade é a substituição parcial do agregado miúdo no concreto compactado a rolo destinado ao projeto de barragem.

Diante desse contexto, o trabalho busca analisar a viabilidade técnica da aplicação do resíduo de mineração na produção do concreto compactado a rolo. Esse estudo será fundamentado através da comparação entre as informações obtidas por meio dos ensaios de caracterização dos agregados reciclados e convencionais, bem como através dos resultados referentes às propriedades físicas e mecânicas do concreto nos estados fresco e endurecido.

A pesquisa busca mitigar os impactos ambientais, analisando a possibilidade de reutilização desse resíduo na produção do concreto compactado a rolo, cuja a finalidade é obter uma alternativa tecnicamente viável, contribuindo para a redução da disposição inadequada desse material.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

Tendo em vista que os resíduos de mineração de ferroníquel serão descartados de forma irregular e que provocará o aumento no consumo dos recursos naturais, levanta-se a possibilidade da reciclagem desses materiais na produção de agregados para concreto compactado a rolo. A fim de analisar a viabilidade da aplicação desses materiais no projeto de barragens serão realizados ensaios laboratoriais comparando as características físicas e mecânicas do concreto composto por agregados convencionais e por agregados reciclados. Com o intuito de verificar essa alternativa é necessário responder a seguinte questão: Existe viabilidade de aplicação desses resíduos em projetos de barragens composta por concreto compactado a rolo?

3 JUSTIFICATIVA

Para John (2000) a construção civil é considerada um dos setores mais influentes da economia, tornando-se um dos maiores consumidores dos recursos naturais. O autor estima um consumo de 9,4 ton/hab.ano de materiais de construção, podendo apresentar valores superiores devido às perdas incorporadas durante a execução das atividades. Segundo Capello (2006), no Brasil, são produzidos anualmente aproximadamente 65 milhões de toneladas de resíduos.

O instituto aço Brasil (2010) afirma que a indústria siderúrgica no Brasil em 2009, gerou aproximadamente 22 milhões de toneladas de resíduos sólidos. Além disso, o instituto afirma ainda que para cada tonelada de aço produzido são gerados em média 600 kg de resíduos e co-produtos.

A ausência de política efetiva para o aproveitamento dos resíduos impulsionou o surgimento de problemas críticos ao setor siderúrgico. Diante da severidade das legislações em relação aos impactos ambientais o setor busca por tecnologias sustentáveis que promovam uma destinação segura para esses resíduos e que simultaneamente proporcione uma solução viável tecnicamente (Mancio, 2001).

Conforme Santos (2013) a reciclagem dos resíduos siderúrgicos além de diminuir o consumo dos recursos naturais, traz como benefício a redução da emissão do CO₂ à atmosfera e dos aterros de resíduos industriais. A aplicação de escoria pode ser utilizada como agregado em obras de pavimentação, necessitando apenas do controle do material em relação à sua expansibilidade e das suas características físicas, químicas e mecânicas.

O concreto compactado a rolo (CCR) pode ser aplicado em obras de barragem no qual a sua viabilidade é atestada através da produção de aterros experimentais. Conforme Andriolo (2015), no Brasil foram construídas mais de 60 barragens composta por CCR no qual a escolha foi fundamentada em análises de laboratório e observações do comportamento dos aterros experimentais.

Nesse sentido, o estudo é relevante, pois busca mitigar os impactos ambientais através da reciclagem dos resíduos de mineração, reduzindo o consumo dos recursos naturais e a sua deposição irregular.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica do concreto compactado a rolo produzido com agregados provenientes da atividade de mineração.

4.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização dos agregados;
- Aplicar método de dosagem para o concreto compactado a rolo;
- Produzir amostras do concreto compactado a rolo com a incorporação de agregados de mineração e com agregados convencionais;
- Avaliar as propriedades mecânicas do concreto compactado a rolo no estado endurecido;
- Analisar a viabilidade técnica da utilização de agregados provenientes da atividade de mineração.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Solos

Os solos são materiais provenientes do intemperismo ou através da decomposição das rochas. Conforme sua formação geológica eles podem ser denominados residuais, sedimentares ou de origem orgânica. A investigação da origem e da constituição do solo é realizada através da pedologia na qual é a ciência que estuda as camadas que compõem o perfil do solo (ORTIGÃO, 2007).

A análise do seu comportamento permite a previsão de recalques e auxilia na elaboração de projetos de obras de terra. Essa investigação geotécnica é obtida através de ensaios laboratoriais e in situ. Os ensaios em laboratório são comumente realizados para analisar as tensões e deformações do solo, os mais utilizados são o de adensamento, compressão triaxial, cisalhamento direto e compressão isotrópica (CAPUTO, 1988).

5.1.1 Melhorias de solos

Após a investigação geotécnica obtêm-se informações referentes ao solo analisado. Para Póvoa (2016), em locais com a presença de solos moles são identificados problemas de estabilidade das fundações devido à sua alta compressibilidade e baixa permeabilidade. Nesses casos impõe-se a necessidade de aplicar técnicas de melhorias de solos cujo o intuito é aumentar a capacidade de carga do solo e reduzir os efeitos dos recalques.

O melhoramento do solo tem como objetivo modificar as propriedades intrínsecas do solo para reduzir problemas referentes a estabilidade e recalques de fundações. Van Impe (1989) afirma que essa técnica pode ser temporária, permanente ou permanente com adição de materiais ao solo. Os procedimentos mais utilizados são a vibrocompactação, aditivos estabilizantes, drenos verticais e injeções (SOUSA, 2012).

Com a finalidade de aumentar a resistência e reduzir a deformabilidade do maciço aplicam-se também os métodos de reforço do solo. Essas técnicas consistem na incorporação de elementos resistentes para aumentar a resistência e diminuir a deformabilidade do maciço. Para assegurar o reforço de taludes e aterros são inseridas estacas, microestacas, grelhas plásticas e mantas geotêxteis (MECCAFERRI, 2009).

5.2 Barragens

Segundo Marangon (2004), uma barragem pode ser definida como uma estrutura construída de forma transversal à direção do escoamento da água, destinado a criação de um reservatório artificial. Gaioto (2003) afirma que a elaboração do projeto de uma barragem requer o estudo hidrológico, geotécnico, hidráulico, estatístico e geológico.

O surgimento das barragens no Brasil está associado à escassez de água e necessidade de utilização dos recursos hídricos. A primeira barragem no país foi construída no final do século XVII na cidade de Recife – PE, cuja finalidade era conter os processos migratórios que aconteciam na região devido à seca. No final do século XIX começaram a ser implantadas as primeiras barragens nas regiões sul e sudeste do Brasil com o objetivo de promover a geração da energia elétrica (MELLO, 2011).

Gaioto (2003) alega que a construção de uma barragem está voltada ao atendimento de finalidades específicas ou múltiplas, como por exemplo a geração de energia elétrica, irrigação, saneamento, regularização de vazão, abastecimento doméstico e industrial, etc.

A classificação das barragens advém da sua finalidade, projeto hidráulico e tipos de materiais utilizados na sua construção. Os principais tipos são as barragens de terra, enrocamento e concreto a gravidade ou em arco (MARANGON, 2004).

5.2.1 Barragens de aterros

As barragens de aterro têm como composição os materiais naturais, como solo, rochas e brita. Elas dividem-se em barragens de terra e enrocamento. As barragens de terra possuem seção homogênea, zoneada ou aterro hidráulico, enquanto que as de enrocamento são constituídas por núcleo de terra, núcleo asfáltico ou membrana impermeável (SOUZA, 2013).

Para atender aos critérios de viabilidade, Meirelles (2012) indica que as barragens de aterro devem exibir alguns parâmetros, como por exemplo, resistência, incompressibilidade, plasticidade, aderência, baixa permeabilidade e erodibilidade.

5.2.1.1 Barragens de terra

Stephens (2011) afirma que as barragens de terra consistem em estruturas compactadas que resistem ao tombamento e deslizamento a partir da sua massa. Ele indica que essas barragens suportam deslocamentos superiores se comparadas às estruturas mais rígidas, entretanto requer projetos mais rigorosos em relação a vertedouros e ao processo de compactação.

Conforme Eletrobrás (2000), esse tipo de barragem é indicado para locais que apresentam topografia levemente ondulada, com vales pouco encaixados, e com áreas de empréstimo que dispõem de materiais suficientes para a sua construção. Diversos materiais podem ser utilizados na construção desta barragem exceto os solos orgânicos, com a presença de silte, e argilas que indicam limites de liquidez acima de 80%.

Para Sayão (2009), no Brasil as barragens de aterro revelam-se as mais executadas. Essa escolha está diretamente associada à topografia, condições climáticas e disponibilidade de matérias existentes no país. O autor estima que elas correspondem a um percentual de aproximadamente 82% do total das barragens construídas.

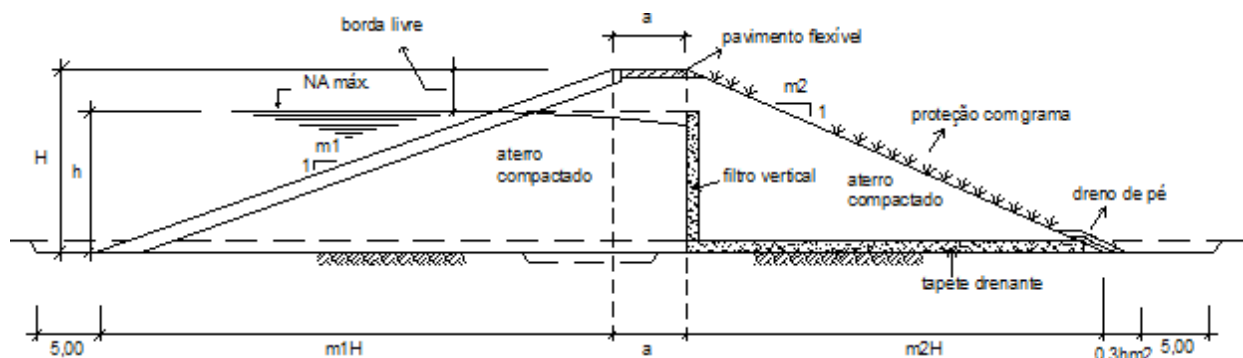
Quintas (2002) indica que essas barragens devem conter dispositivos na fundação que auxiliem na percolação da água e a presença de drenos para aliviar a subpressões. Além disso, o talude de montante exige a proteção contra a ação direta provocada pela água.

A escolha do tipo de seção da barragem de terra está relacionada a diversos fatores, tais como a quantidade e qualidade dos materiais presentes na área de empréstimo, dos sistemas construtivos e dos solos da sua fundação (MEIRELLES, 2012).

5.2.1.1.1 Barragens de terra com seção homogênea

A seção homogênea apresenta como característica primordial a presença de apenas um tipo de material, exceto a proteção dos taludes. O material que compõe a barragem exige técnicas de compactação, cuja a finalidade é impedir a circulação da água. (MARANGON, 2004). A figura 1 abaixo indica o esquema de uma barragem do tipo homogênea composta por proteção do talude com grama e pavimento flexível. A imagem aponta a presença do filtro, dreno de pé, tapete drenante e indica a posição da borda livre.

Figura 1 - Barragem Homogênea Modificada

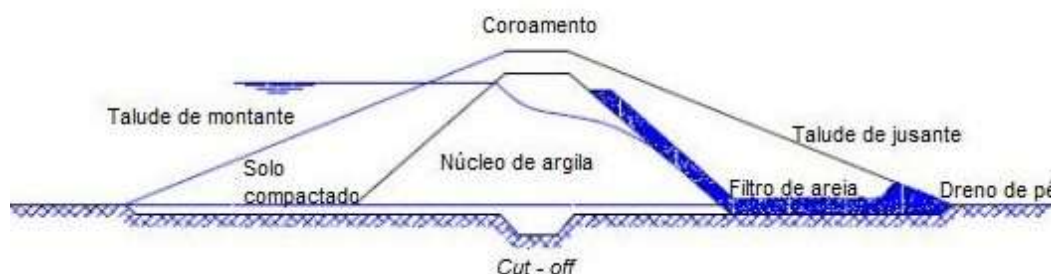


Fonte: Meirelles (2012)

5.2.1.1.2 Barragens de terra com seção zoneada

A barragem do tipo zoneada é representada por materiais permeáveis nas extremidades da seção transversal e por núcleo argiloso. As regiões permeáveis consistem de cascalho, fragmentos de rochas ou areia (MARANGON, 2004). Nesta barragem podem ser aplicadas técnicas de controle de percolação da água conforme mostrado na figura 2, que exibe a presença de dreno de pé e filtro de areia.

Figura 2 - Seção Tipo Barragem de Terra Zoneada



Fonte: Meirelles (2012)

Segundo Stephens (2011) as barragens de terra zoneadas revelam custo superior às barragens homogêneas. Para ele, a necessidade de maior variedade de material no processo de construção induz ao aumento nos custos através dos processos de escavação e transporte.

5.2.1.2 Barragens de enrocamento

As barragens de enrocamento constitui-se em um maciço composto por fragmentos de rochas ou cascalhos compactados com rolo vibratórios, cuja a sua estabilidade é garantida através do seu peso e imbricação. Nessas barragens existem

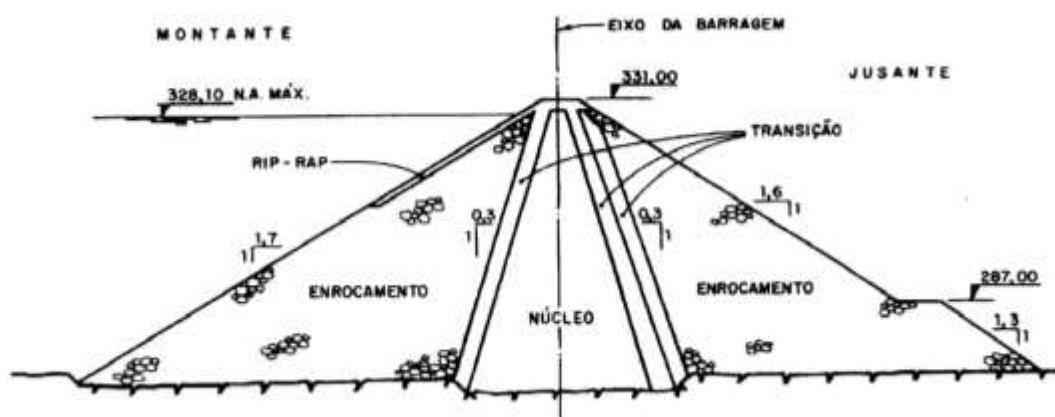
zonas impermeáveis no núcleo, constituídas por solos e filtros de material granular (COSTA, 2012).

Terzaghi e Peck (1967) definem o enrocamento como um material fragmentado, proveniente de rocha sã. A compressibilidade do enrocamento está associada às suas características tais como granulometria, índice de vazios, tipo e velocidade de carregamento, grau de alteração, tamanho, forma e textura das partículas (ALBUQUERQUE JUNIOR, 1993).

Affonso (2004) recomenda a construção de barragens de enrocamento em locais que possuam áreas de empréstimo com pouca disponibilidade de solos finos. Essas barragens apontam como vantagem a possibilidade de execução independente do clima, entretanto impõe a presença de rochas inalteradas pelo intemperismo para compor o aterro da barragem.

As barragens de enrocamento constituem-se de maneira preponderante por material rochoso e núcleo argiloso conforme mostrado na figura 3. Nessas barragens os taludes são protegidos por materiais impermeáveis para conter a ação da água. Dentre as técnicas mais utilizadas estão a face impermeável em concreto ou núcleo asfáltico (COSTA, 2012).

Figura 3 - Barragem de enrocamento com núcleo argiloso

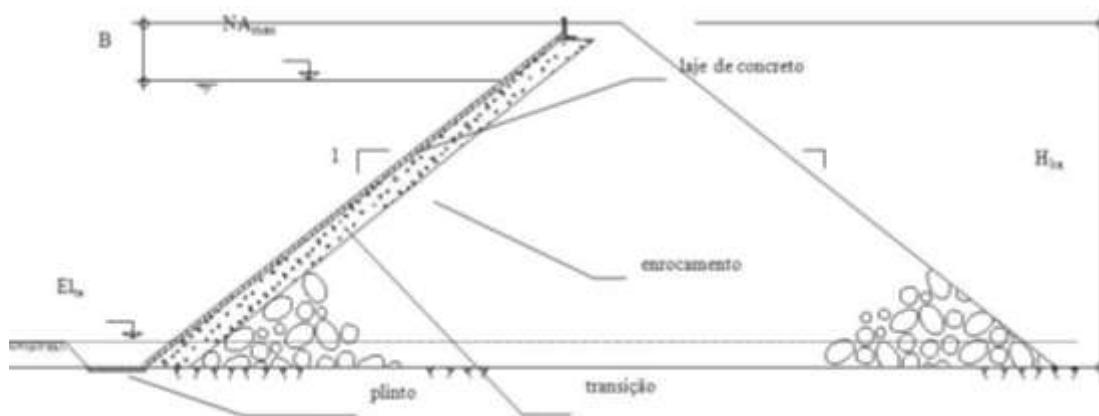


Fonte: Armelin (2013)

A figura 4 abaixo exibe o esquema de uma barragem de enrocamento composta por face de concreto. Conforme mostrado na figura, esse tipo de barragem revela como característica primordial a possibilidade da construção de taludes mais íngremes. Essas barragens são normalmente utilizadas em regiões que apresentam pouca disponibilidade de argilas e areias. Entretanto como desvantagem, a estrutura

requer fundações mais resistentes para evitar excesso de recalques (MEIRELLES, 2012).

Figura 4 - Barragem de enrocamento com laje de concreto



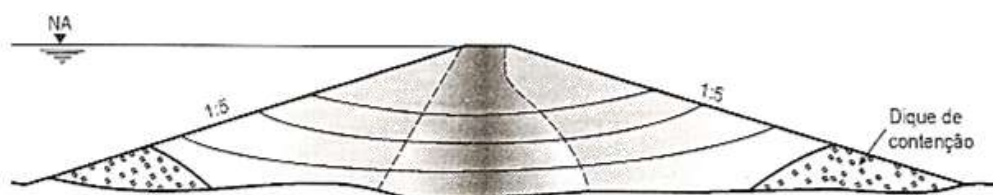
Fonte: Meirelles (2012)

5.2.1.3 Barragens de aterro hidráulico

A construção de barragens de aterro hidráulico envolve a mistura de material granular com água, transportados por meio de bombeamento ou gravidade. Esta técnica é normalmente utilizada para a construção de barragens de rejeitos de mineração ou aplicada em locais em que se tornam inviáveis o transporte de materiais granulares (SOUZA, 2013).

A aplicação dessa técnica revela como vantagem a alta capacidade construtiva, menor custo unitário da obra e menores exigências quanto aos materiais da fundação, podendo ser construídas inclusive sob solos colapsíveis. Entretanto ela requer cuidados específicos quanto aos processos de transporte do solo (MEIRELLES, 2012). A imagem 5 representa um esquema da barragem de aterro hidráulico, indicando a sua inclinação e a presença de dique de contenção.

Figura 5 - Barragem de aterro hidráulico



Fonte: Teixeira (2012)

5.3 Concreto compactado a rolo em projetos de barragens

Para Oliveira e Salles (1995) o concreto compactado a rolo – CCR, trata-se de um concreto convencional com consistência seca, no qual é transportado, espalhado e compactado de modo contínuo. Coutinho (2006) afirma que esse material apresenta baixas porcentagens de volumes de vazios, assegurando assim maiores resistências.

O CCR é considerado também uma técnica de execução que recorre ao manuseio de equipamentos, tornando-se dispensável a necessidade de grandes quantidades de mão de obra, gerando assim um processo rápido e eficiente (MARQUES FILHO; TRABOULSI; PAULON, 2005).

Segundo Milani Filho (2003) o seu surgimento advém da década de 70, e a partir da década de 80 começou a ser utilizado em projetos de barragens substituindo o concreto convencional. A primeira barragem construída com o CCR foi a de Shimajigawa, finalizada em 1980. No Brasil a primeira aplicação do concreto compactado a rolo em barragens foi na usina de Itaipu no ano de 1978.

O Brasil, atualmente, é considerado o segundo maior país construtor de barragens de CCR (ANDRIOLO, 2015). A escolha dessa tipologia está associada ao seu baixo custo e rapidez na execução do processo. De acordo com Kuperman *et al.* (2005), os projetos de barragens com CCR seguem as mesmas diretrizes estabelecidas para as obras construídas com o concreto convencional.

Além disso, esse material indica praticamente as mesmas propriedades do concreto convencional, entretanto verifica-se particularidades quanto ao processo de dosagem, apontando menor teor de água e volume de pasta de cimento (FEDRIGO; ROSA; NUNES, 2014).

A técnica inicia-se mediante o processo de produção com o auxílio de betoneiras estacionárias ou centrais dosadoras e misturadoras. A aplicação do método de dosagem do CCR abrange os critérios estabelecidos no seu projeto. O transporte ocorre por intermédio de equipamentos que não propiciem a segregação do material (RABER, COSTENARO, PATUSSI, 2013).

O lançamento do concreto é promovido por correias transportadoras ou por meio de descargas diretas de caminhões basculantes. Os métodos mais indicados para o lançamento do CCR em uma obra de barragem são os métodos tradicionais e rampados. O intervalo máximo entre os lançamentos das camadas de CCR requer o

atendimento às determinações existentes na pista experimental (MILANI FILHO, 2003).

Após lançado o material, este é espalhado com o auxílio de tratores de esteira. A compactação ocorre por rolos vibratórios ou por intermédio de compactação manual. Em seguida aplica-se uma neblina com ar e água para posteriormente iniciar o processo de cura (MILANI FILHO, 2003).

5.4 Execução de barragens compostas por concreto compactado a rolo

5.4.1 Produção do concreto

A mistura do concreto compactado a rolo ocorre por meio de misturador cônico basculante ou por centrais compostas por misturador contínuo. Em algumas centrais o sistema é totalmente automatizado, garantindo o melhor diagnóstico e verificações de eventuais falhas. Conforme Milani Filho (2003) a central de mistura do CCR deve assegurar uma mistura homogênea, de modo que evite a ocorrência de segregação do material. A imagem 6 a seguir refere-se a central de concreto compactado a rolo da usina hidrelétrica de Lajeado.

Figura 6 - Central de concreto da UHE Lajeado



Fonte: Milani Filho (2003)

5.4.2 Transporte

Após a produção do CCR ele é transportado para o local de execução da obra por meio de caminhões basculantes conforme mostrado na figura 7. O transporte deve assegurar que não ocorra segregação, secagem ou contaminação do material durante a operação (ANDRIOLO, 2015).

Figura 7 - Transporte realizado por caminhão basculante



Fonte: Milani Filho (2003)

5.4.3 Lançamento do CCR

O lançamento do concreto pode ocorrer pelo método tradicional ou rampado. Os tópicos a seguir descreverão brevemente sobre esses métodos.

5.4.3.1 Método tradicional

Esse método consiste no lançamento de camadas horizontais com 20 cm a 1 m de espessura. Nele há a presença de argamassa de ligação entre as camadas do CCR. A imagem 8 a seguir mostra a aplicação das camadas de concreto através do método tradicional.

Figura 8 - Lançamento do CCR pelo método tradicional



Fonte: Lima (2011)

5.4.3.2 Método rampado

No método rampado a área de aplicação e o intervalo de tempo de lançamento das camadas são limitadas. Os processos de lançamento e compactação das camadas de CCR são realizadas sob pequenas inclinações. Esse método apresenta como vantagem a maior produtividade e redução da mão de obra se comparado ao método tradicional. A figura 9 abaixo representa a aplicação do CCR por meio do método rampado.

Figura 9 - Lançamento do CCR pelo método rampado



Fonte: Lima (2011)

5.4.4 Compactação e adensamento

O concreto compactado a rolo é aplicado normalmente em alturas de 33 cm. O espalhamento do material é realizado por meio de tratores de esteiras a fim de assegurar a sua uniformidade para o processo de compactação.

Para realizar a compactação são utilizados rolos vibratórios simples ou duplos com amplitudes e frequências controladas cujo o objetivo é atingir a densidade desejada. A figura 10 a seguir mostra os processos de espalhamento e compactação durante a execução de uma barragem de CCR. A cura do concreto inicia-se após decorridos 5 horas do processo de compactação (ANDRIOLO, 2015).

Figura 10 - Compactação do CCR



Fonte: Lima (2011)

5.4.5 Juntas de construção

Nas barragens de CCR as juntas de dilatações verticais são aplicadas para minimizar o surgimento de fissuras provenientes da dilatação térmica. As juntas de construção horizontais ocorrem durante a execução da barragem e apresentam como desvantagem a possibilidade da passagem da água, impondo desta forma a necessidade de tratamento para a ligação das camadas.

5.5 Projetos de barragem

O projeto de uma barragem requer inicialmente o estudo sobre os impactos ambientais, custos, prazos e sistemas construtivos. Outrossim, impõe a necessidade de investigações geotécnicas para conduzir a elaboração dos projetos (SOUZA, 2013).

Para Lança (1997) os levantamentos preliminares são essenciais para indicar as condições de acesso, materiais disponíveis, presença de água no subsolo, atividade sísmica, condições climáticas, ação das ondas e tempo disponível para a construção. Cruz (1996) ressalta que projetos de barragem seguem princípios que norteiam a sua elaboração, destacando os princípios do controle de fluxo, princípio da estabilidade e compatibilidade das deformações.

No projeto de barragem de terra e enrocamento Souza (2013) indica que é necessário o entendimento sobre temas relacionados ao controle de fluxo,

estabilidade dos taludes, análise de compatibilidade das deformações e proteção contra erosão superficial dos taludes.

Inicialmente é indicado o levantamento planialtimétrico do local. Esse levantamento é aferido a fim de determinar curvas de nível, cuja a finalidade é definir a cota máxima da crista, bem como obter o nível máximo do reservatório (MILAGRES *et al.*, 2016).

Os parâmetros para determinar a cota máxima e a borda livre nas barragens de terra estão condicionados a levantamentos de dados referentes a estudos hidrológicos, admitindo os limites da topografia do local, fatores econômicos e desapropriação de terras. A inclinação do talude decorre da escolha do material constituinte da barragem (MEIRELLES, 2012).

A análise referente à percolação da água é indispensável em projetos de barragens. Essa percolação deve atender aos princípios do controle de fluxo cuja a finalidade é evitar que ocorra processos erosivos internos e minimizar as vazões e poropressões. Para conter problemas referentes à infiltração da água são aplicados elementos drenantes, como por exemplo, os tapetes drenantes, drenos de pé, dreno vertical e dreno inclinado (SOUZA, 2013).

Outro método para controlar a percolação é a escavação de trincheiras de vedação, aplicadas na fundação de uma barragem com o intuito de reduzir a infiltração e melhorar a estabilidade. A profundidade ideal desses elementos é alcançada quando for identificada uma base de fundação resistente (MARANGON, 2004).

5.6 Rede de fluxo

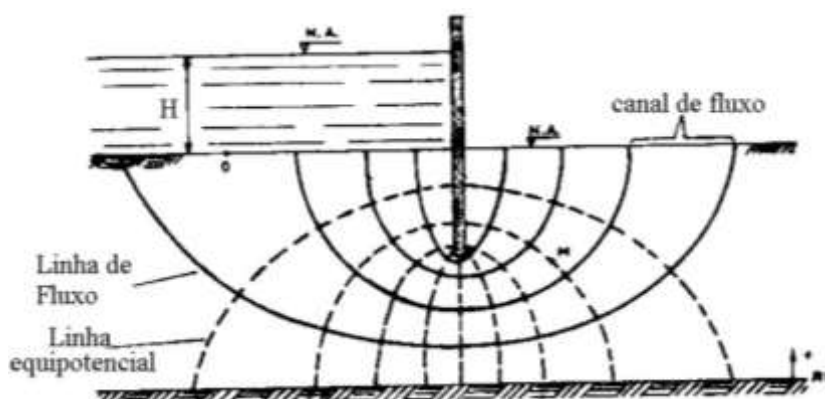
A rede de fluxo consiste em um sistema utilizado na análise da percolação de água nos solos. Essa rede representa a trajetória da água e a sua dissipação de carga. A presença da linha freática aponta o tipo de fluxo, o qual é considerado não confinado caso possua a linha freática e definido como confinado nas situações que indiquem a sua ausência (ROMANINI, 2016). Massad (2010) afirma que a linha freática localiza-se perpendicularmente ao talude de montante, apresentando no seu trecho inicial velocidades nulas.

As redes de fluxos são compostas por um conjunto de linhas equipotenciais e linhas de fluxo que revelam perdas de cargas entre equipotenciais sucessivas e vazão constante entre duas linhas de fluxo consecutivas. A linha de fluxo é definida como o caminho que a água percorre através de um meio saturado, enquanto que as linhas

equipotenciais representam regiões que detêm de linhas de mesma carga total (MASSAD, 2010).

A figura 11 aponta a localização das linhas de fluxos e linhas equipotenciais numa rede de fluxo.

Figura 11 - Rede de Fluxo



Fonte: Marangon (2018)

Conforme mostrado a figura 11, o trecho existente entre duas linhas de fluxo consecutivas é chamado de canal de fluxo. Em relação às linhas equipotenciais, Marangon (2018) afirma que a perda de carga Δh compreendida entre linhas equipotenciais é denominada queda de potencial.

Segundo Mata - Lima (2014) o estudo dessa rede é essencial pois através dela é possível determinar a vazão percolada da água e calcular as poropressões. Em projetos de barragem essa análise contribui para prevenção da erosão interna e para a garantir a estabilidade de taludes. O traçado de uma rede de fluxo pode ser obtido por intermédio de soluções analíticas, gráficas e numéricas (MARANGON, 2018).

5.7 Movimentos de massa

Para Meirelles (2012) o movimento de massa de um solo ocorre em terrenos compostos por superfícies inclinadas quando são aplicados esforços tangenciais, provocando o cisalhamento da superfície. Esses esforços advêm de procedimentos como escavações, acréscimos de carga e liquefações. Para avaliar a estabilidade de um talude é necessário inicialmente identificar fenômenos que possam induzir o surgimento de situações críticas.

Marangon (2006) afirma que as causas dos escorregamentos estão associadas à redução da resistência interna decorrente de um acréscimo das solicitações externas. A ineficiência do processo de execução do aterro contribui para promover esses deslizamentos.

A classificação do tipo de movimento de terra adota como parâmetro a velocidade que ocorre todo o processo. Eles podem ser classificados em desmoronamentos, escorregamentos ou rastejos. Os desmoronamentos acontecem de maneira rápida, provenientes da gravidade sobre a massa de solo, enquanto que os escorregamentos não envolvem separação efetiva dos corpos. Os rastejos consistem em um movimento descendente e lento no qual apresenta superfície de ruptura definida (MARANGON, 2006).

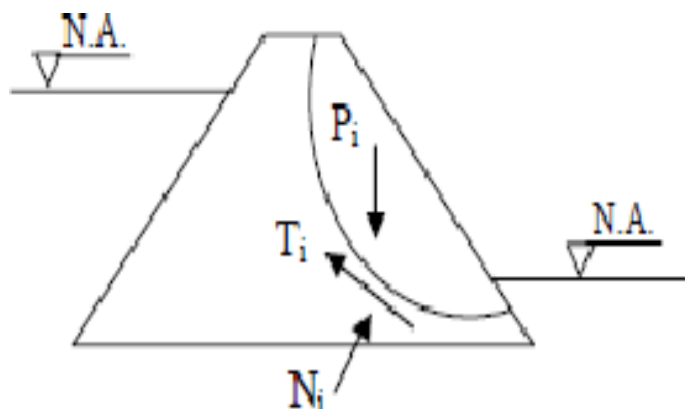
Os escorregamentos decorrem da presença de alguns fatores tais como a inclinação do talude, existência de descontinuidades ou por percolação de água. As superfícies de ruptura e a geometria do talude são parâmetros que classificam os escorregamentos em três tipos, podendo ser rotacionais, translacionais ou complexos (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

5.7.1 Estabilidade de taludes

Para Silva (2013) a finalidade da estabilidade de taludes é avaliar a segurança do talude em relação à ruptura, indicando a necessidade de se adotar medidas de estabilização. Para identificar o seu comportamento é calculado um fator de segurança que é obtido através de teorias e metodologias de dimensionamento.

O fator de segurança de uma barragem é definido através da razão entre forças estabilizadoras e as forças desestabilizadoras. A ruptura do talude ocorre quando essas forças se igualam. Esse fator não possui valor fixo, podendo variar ao longo do tempo (MEIRELLES, 2012). A figura 12 abaixo representa o esquema das tensões atuantes no maciço.

Figura 12 - Esquema das Forças Envolvidas na Análise de Estabilidade em Barragens



Fonte: Meirelles (2012)

5.7.1.1 Métodos de estabilidade

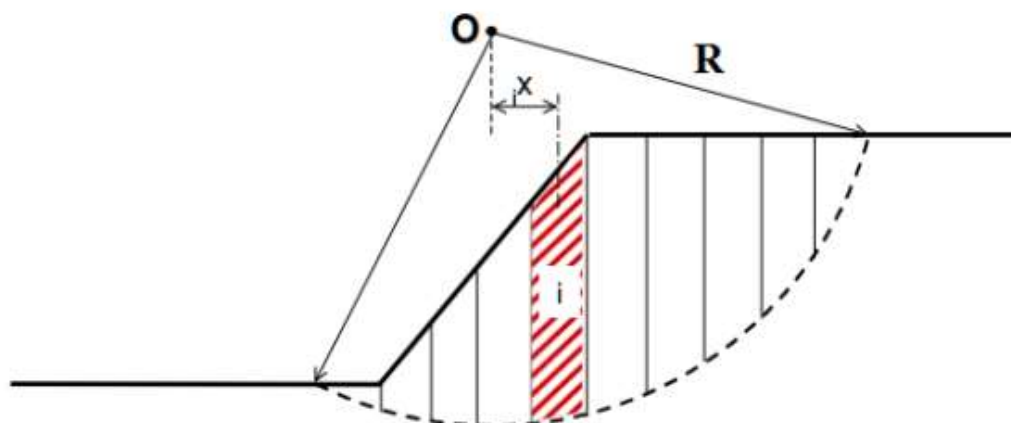
A estabilidade de talude é avaliada através da análise de tensão x deformação ou pelo método do equilíbrio limite. O método da tensão x deformação fundamenta-se no conceito de plastificação do solo, associado a uma condição de fluxo plástico iminente. Entretanto, segundo Marangon (2006) as análises de estabilidade baseiam normalmente na teoria do equilíbrio limite. Tal método admite que a massa de solo atua como um material rígido-plástico e que a mobilização da sua resistência ocorre de maneira uniforme no decorrer da superfície de ruptura.

Faro (2015) afirma que a resistência ao cisalhamento envolve os parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Para determinar esses componentes são adotados os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb. Conforme Marangon (2018), para que ocorra tensões cisalhantes as tensões principais devem ser distintas.

O método do equilíbrio limite - MEF consiste na divisão de uma região do solo demarcada pela superfície de ruptura em fatias verticais, analisando as condições de cada fatia de maneira independente. Esse método foi introduzido por FELLENIUS e consiste em arbitrar uma superfície de deslizamento, que pode assumir formato circular ou não, e realiza o cálculo do equilíbrio por meio das equações da estática (GOMES, 2011).

A figura 13 mostra o ponto e o raio utilizados para identificar a superfície de ruptura do talude. Nessa superfície foi aplicado o método das fatias por meia da sua fragmentação em várias regiões.

Figura 13 - Divisão da Superfície Potencial de Ruptura em Fatias



Fonte: Silva (2013)

Ao longo dos anos foram desenvolvidos e aperfeiçoados diversos métodos que se nortearam na teoria do método das fatias. Os mais apontados na literatura são os métodos de Fellenius, Bishop, Jambu, Morgenstern e Price, Spencer e Correia (FREITAS, 2011).

A análise da estabilidade de taludes por intermédio do MEF determina o valor do fator de segurança e aponta a geometria da ruptura que ocorre ao longo de uma superfície plana, podendo apresentar formato circular, poligonal ou mista (MARANGON, 2004).

A linha de ruptura ao longo da superfície pode apresentar variações, conduzindo a fatores de segurança diferentes para cada seção analisada. Diante disso, é considerada a seção mais crítica do talude para avaliar a sua estabilidade (MEIRELLES, 2012).

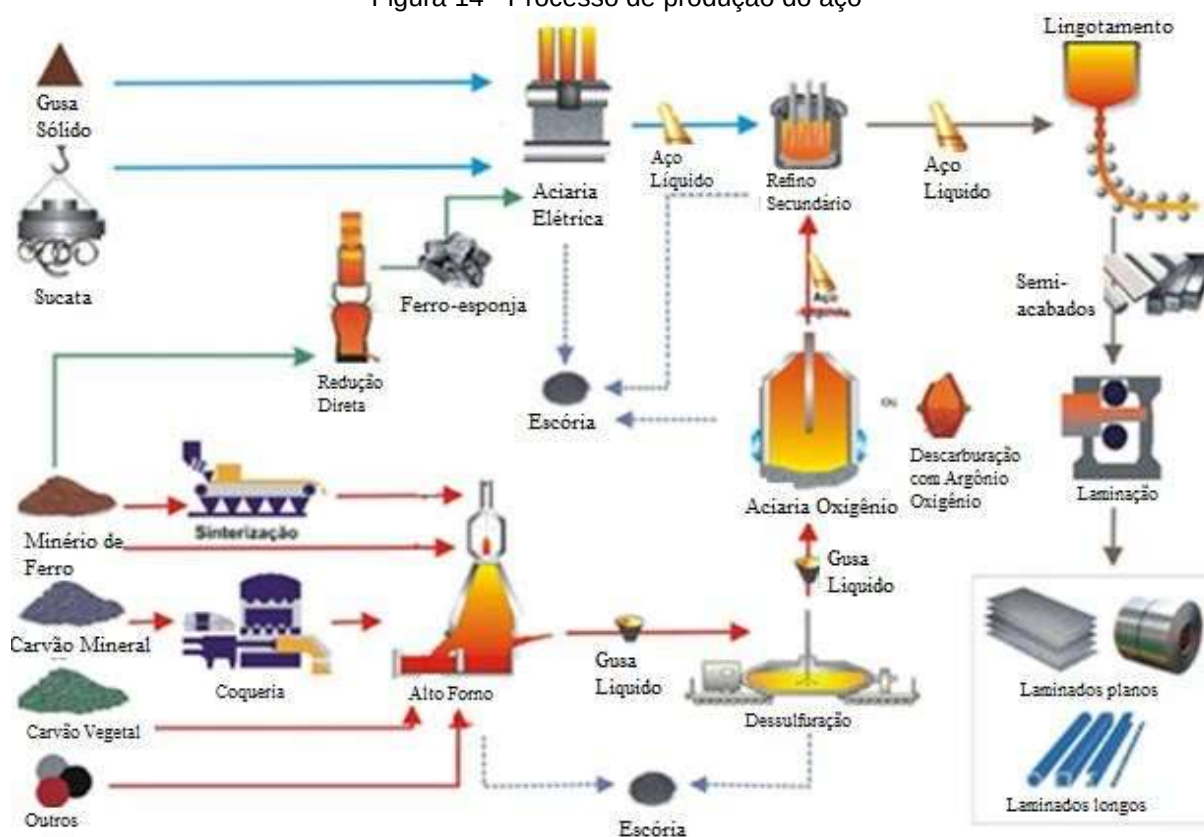
5.8 Escórias

As escórias siderúrgicas são provenientes de processos industriais em que se obtém inicialmente o ferro gusa e em seguida o aço. A composição da escória está relacionada ao seu processo produtivo, no qual fatores como matéria prima, equipamentos e processo de resfriamento interferem diretamente nas suas propriedades. Os principais tipos de escórias são as escórias de alto forno e a escória de aciaria (MASSUCATO, 2005).

Segundo o Instituto Aço Brasil (2010), o Brasil é o oitavo maior produtor de aço bruto do mundo. A produção do aço envolve uma série de etapas, conforme mostrado

na figura 14. Durante esse processo de produção, são gerados co-produtos que podem ser provenientes de um mesmo processo ou sistema. Esses co-produtos são destinados para diversas finalidades, como por exemplo, na produção de agregados para o concreto.

Figura 14 - Processo de produção do aço



Fonte: Instituto Aço Brasil (2010)

Machado (2000) afirma que os sistemas para a fabricação do aço, segundo o processo de refino são:

- LD (Linz-Donawitz): Por meio do conversor a oxigênio;
- EAF (Eletric Arc Furnace): A partir do forno a arco elétrico;
- OH (Open Heart): por intermédio do forno Siemens-Martin.

5.8.1 Escória de ferroníquel

A escória de ferroníquel é produzida por meio da fusão do minério de níquel no qual os elementos não metálicos são granulados com a incorporação de água (Barro Alto Presentation, 2012).

A aplicação desse material na construção civil está normalmente associada a produção de agregados para concreto e como material para pigmento cerâmico. No

caso da produção de agregados deve ser verificada se há a presença de contaminação ou de elementos químicos que possam causar a expansibilidade do agregado (SANTOS, 2013).

O agregado de ferroníquel possui em sua composição elevadas concentrações de óxido de magnésio (MgO) e pequenos traços de óxido de cálcio (CaO). No entanto segundo Silva et al., (2003) apud Castelo Branco (2004) a reação de hidratação do MgO é bastante lenta e a sua instabilidade está relacionada ao tamanho das partículas.

5.9 Depósitos de níquel

As jazidas de níquel podem ser residuais ou magmáticas. Conforme Santos (2013), a ocorrência desse minério no mundo está situada principalmente no Brasil, Cuba, Austrália, Indonésia, Nova Caledônia e Filipinas. Segundo o autor, o Brasil é o sétimo maior produtor de níquel no mundo. A figura 15 mostra os principais depósitos mundiais de laterítas de níquel.

Figura 15 - Depósitos de laterítas de níquel no mundo



Fonte: Santos (2013)

5.10 Produção de ferroníquel

Segundo Santos (2013), o ferroníquel é um metal com elevada dureza e apresenta um acabamento branco brilhante. Dentre as suas principais características estão a resistência à corrosão, reduzida variação dimensional e elevada resistência elétrica. A sua produção inicia-se através da extração do minério na mina, conforme mostrado na figura 16.

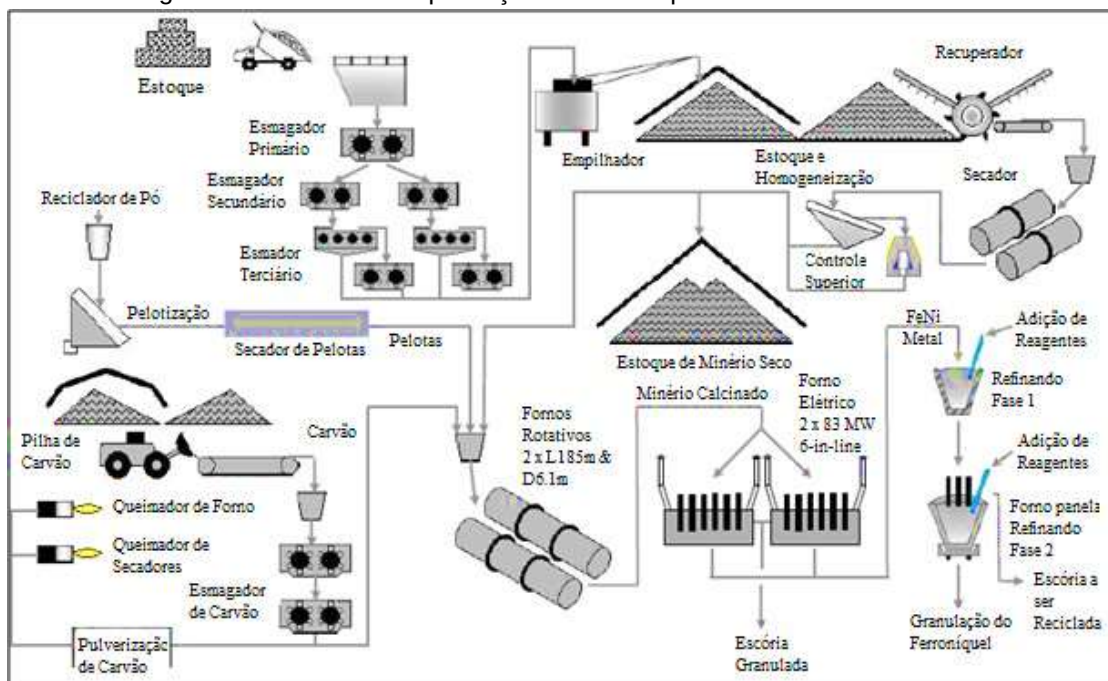
Figura 16 - Mina de extração do minério de ferroníquel



Fonte: Santos (2013)

As etapas de preparo do minério segundo indicado na figura 17 consistem no processo de calcinação, redução e refino. Na etapa de redução é obtido o ferroníquel que, em seguida é encaminhado ao refino para a eliminação das impurezas. Após esse processo a liga está em conformidade para a comercialização. A principal aplicação do ferroníquel é na indústria de aço-inox (Barro Alto Presentation, 2012).

Figura 17 - Processo de produção do ferroníquel da Planta de Barro Alto



Fonte: Santos (2013)

5.11 Agregados reciclados da indústria siderúrgica

Segundo Torres (2018), as propriedades dos agregados provenientes da atividade de mineração dependem do processo de produção e do processamento da escória após o vazamento. Para ele, esses agregados apresentam como vantagem o seu baixo custo, o que viabiliza sua utilização em locais próximos às usinas, bem como proporciona sua disposição ambientalmente adequada.

Os principais agregados reciclados produzidos pela indústria siderúrgica são os da escoria de aciaria e escoria de alto forno. Sua aplicação é destinada principalmente aos projetos de pavimentação, por apresentar maior resistência à abrasão, menor custo, boa capacidade de drenagem, rigidez e adesividade, se comparados aos agregados convencionais (SANTOS, 2013).

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

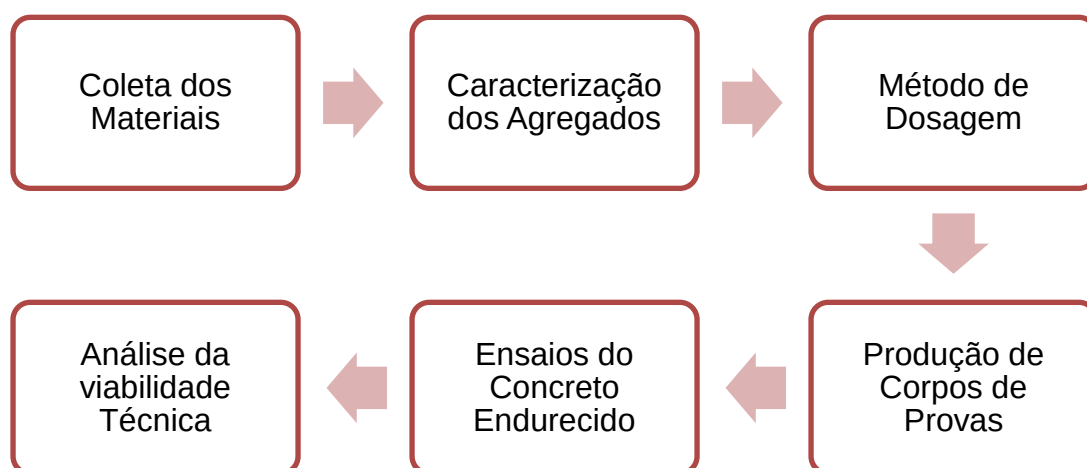
O procedimento metodológico para esse estudo, quanto aos objetivos, é uma pesquisa descritiva e quanto procedimento técnico se baseia em métodos quantitativos e qualitativos.

6.1 Programa experimental

Visando atingir os objetivos propostos, mencionados no tópico 4 deste trabalho, o programa experimental abrange os ensaios laboratoriais referentes à produção do concreto compactado a rolo produzido com agregados reciclados provenientes da atividade de mineração.

O estudo foi realizado nas seguintes etapas: Coleta dos materiais, caracterização dos agregados, dosagem e produção dos corpos de provas, ensaios do concreto no estado endurecido e análise técnica da aplicação do resíduo de mineração no concreto compactado a rolo, conforme mostrado no esquema da figura 18.

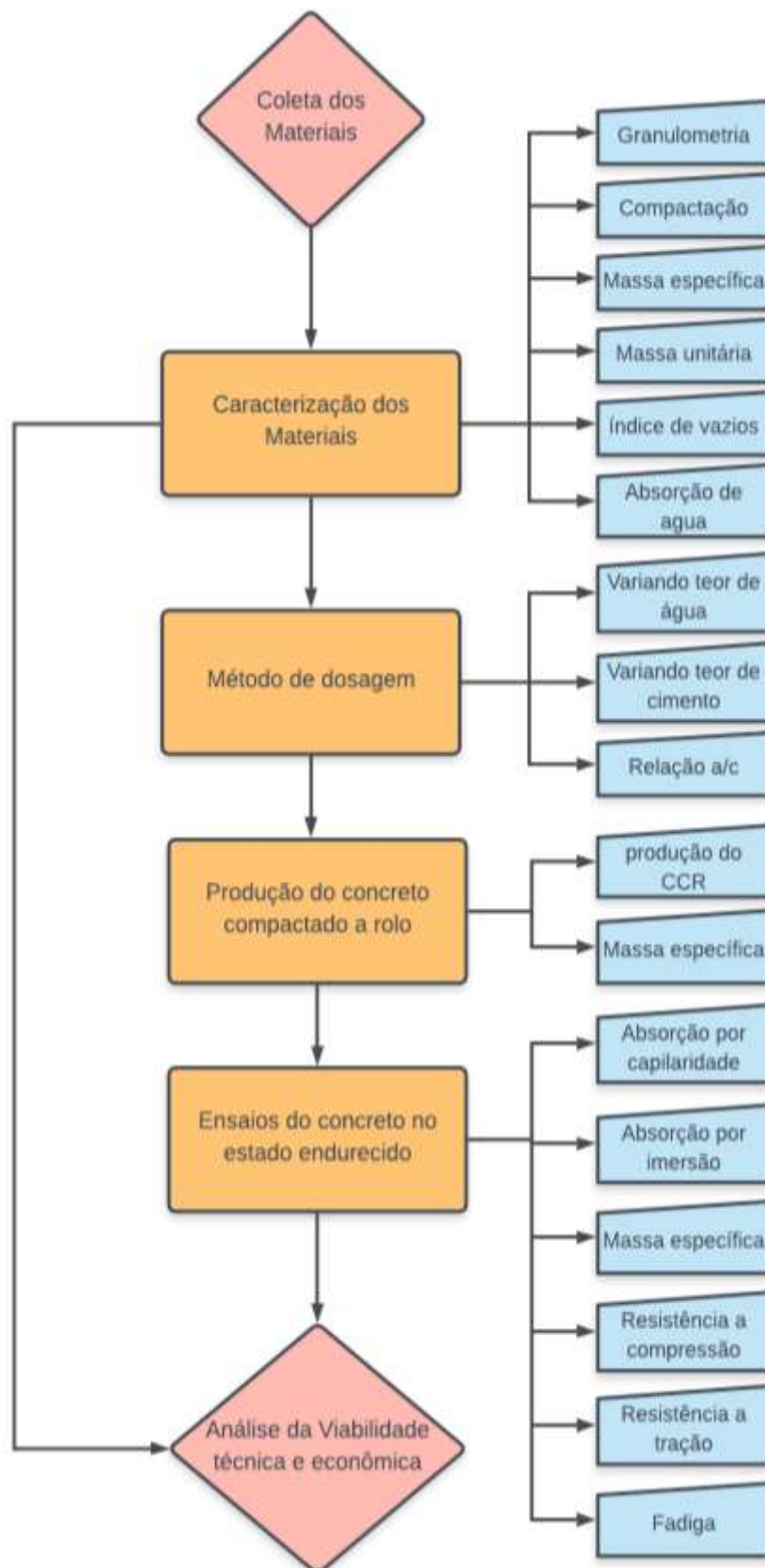
Figura 18 - Etapas do estudo



Fonte: Autor (2019)

Para o melhor entendimento das etapas que compõem os procedimentos experimentais, é mostrada no organograma da figura 19 uma visão sistêmica de todo processo realizado nesse estudo.

Figura 19 - Etapas do programa experimental



Fonte: Autor (2019)

6.1.1 Coleta dos materiais

Os resíduos de mineração foram coletados no município de Barro Alto, localizado no interior do estado de Goiás, conforme mostrado no mapa de localização da figura 20. A escória, objeto de estudo desse trabalho, foi obtida na etapa de redução durante a produção do minério de níquel.

Figura 20 - Localização da cidade de Barro Alto - GO



Fonte: Autor (2019)

No local coletado, em Barro alto, a escória de ferroníquel é armazenada em estoques sob pilhas únicas, não havendo a separação em lotes, conforme mostrado na figura 21. Para esse estudo foram coletados aproximadamente 60 kg do material.

Figura 21 - Depósito de escória de ferroníquel em Barro Alto - GO



Fonte: Santos (2013)

Devido apresentarem granulometria fina, não houve a necessidade de realizar o beneficiamento do material para a produção dos agregados, sendo submetidos apenas ao processo de peneiramento, pois foram considerados no estudo os agregados passantes na peneira #4.75 mm. As figuras a seguir mostram os agregados que foram utilizados na produção do concreto.

Figura 22 - Agregados Miúdos: (a) Convencional; (b) Mineração



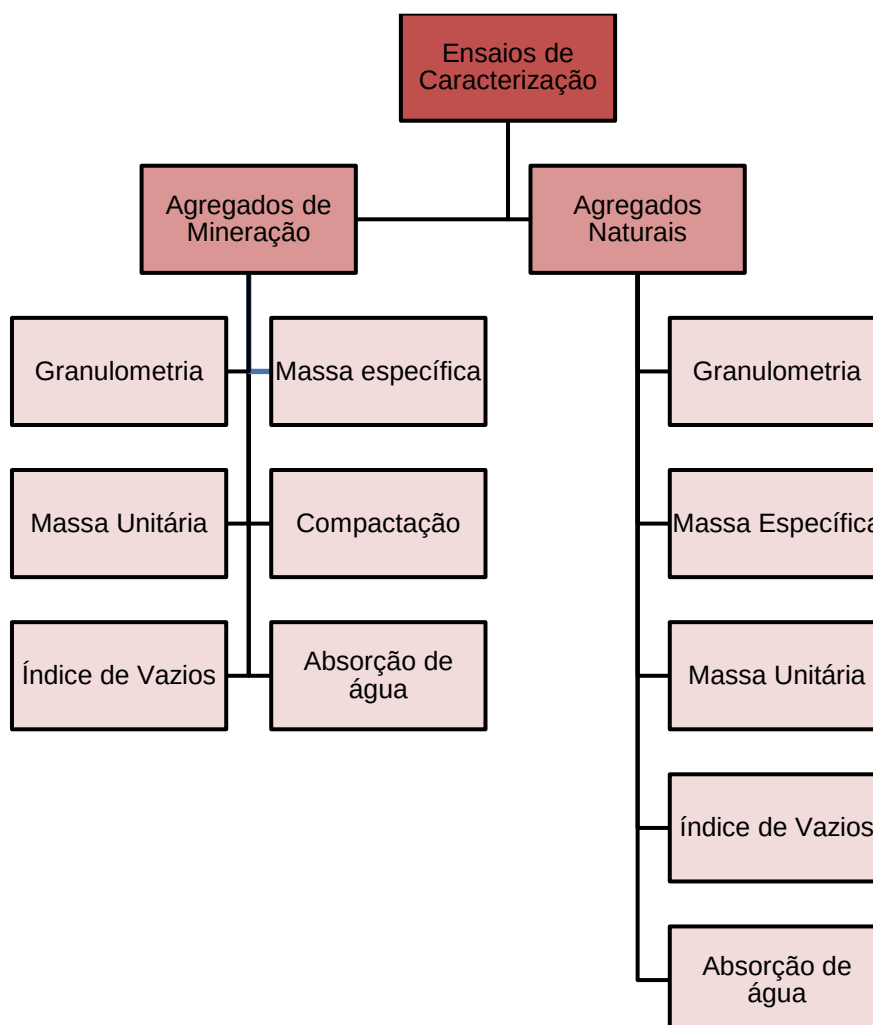
Fonte: Autor (2019)

Neste trabalho foram realizadas comparações envolvendo as propriedades do agregado reciclado e do agregado convencional, cuja a finalidade foi avaliar seu desempenho como agregado miúdo para a substituição parcial no concreto compactado a rolo. O agregado miúdo convencional utilizado neste estudo foi a areia de rio lavada.

6.1.2 Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados teve como intuito identificar as suas características para serem avaliadas nas análises técnicas deste trabalho. Essa caracterização foi aplicada aos agregados convencionais e reciclados, conforme mostrado na figura abaixo que representa o esquema contendo a relação dos ensaios realizados para cada tipo de agregado.

Figura 23 - Ensaio de caracterização dos agregados



Fonte: Autor (2019)

Na tabela 1 estão contidas as relações das normas que foram atendidas para a realização de cada ensaio. Além disso, os tópicos a seguir discorrem brevemente acerca dos ensaios, contendo informações referentes aos procedimentos executados.

Tabela 1 - Relação entre os ensaios e as normas utilizadas para a caracterização dos agregados

Ensaio	Agregado	Norma
Granulometria	Miúdo Convencional	NM 248/2013
	Graúdo Convencional	
	Mineração	
Massa Específica	Miúdo Convencional	NBR NM 9776/1987
	Graúdo Convencional	NBR NM 53/2009
	Mineração	DNER ME 093/94
Massa Unitária	Miúdo Convencional	NM 45/2006
	Graúdo Convencional	
	Mineração	
Compactação	Mineração	NBR 7182/2016
Índice de Vazios	Miúdo Convencional	NM 45/2006
	Graúdo Convencional	
	Mineração	
Absorção de Água	Miúdo Convencional	NM 30/2001
	Graúdo Convencional	NM 53/2009
	Mineração	NM 30/2001

Fonte: Autor (2019)

6.1.2.1 Composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica dos agregados reciclados e convencional atendeu aos procedimentos estabelecidos na NM 248 que trata sobre a determinação da composição granulométrica dos agregados (ABNT, 2003). O objetivo desse ensaio foi indicar a curva granulométrica através do método do peneiramento.

Neste ensaio foram realizadas duas séries para cada tipo de material. O peneiramento consistiu na utilização de um conjunto de peneiras, conforme mostrado na figura 24, cuja a agitação foi promovida por processo mecânico e em seguida pela agitação manual. A agitação manual ocorreu até que a massa de material passante pela peneira atingisse um percentual inferior a 1% da massa do material retido. Após esse procedimento, foram verificadas a massa total do material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto, observando que o somatório de todas as massas não apresentasse resultado inferior a 0,3% da massa inicial.

Figura 24 – Ensaio de granulometria dos agregados miúdos



Fonte: Autor (2019)

A partir da análise granulométrica foram obtidos o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado.

6.1.2.2 Massa Específica

A massa específica indica o consumo de materiais na produção do concreto. Os ensaios dos agregados miúdos e graúdos atenderam aos procedimentos descritos nas normas específicas para cada caso, conforme mostrado na tabela 1 acima. Nos tópicos a seguir serão retratadas informações referentes aos procedimentos desses ensaios.

6.1.2.2.1 Massa específica dos agregados miúdos

O ensaio dos agregados miúdos convencionais seguiu os métodos de execução estabelecidos na NBR 9776 (ABNT, 1987) devido a existência de limitações no laboratório de materiais no momento da execução do ensaio.

O preparo da amostra consistiu na secagem do material em estufa até atingir a constância da massa, cuja finalidade foi garantir que os grãos dos agregados não ficassem aderidos entre si. Esse procedimento foi realizado através do frasco de Chapman.

O ensaio iniciou com inserção de água no frasco até atingir a marca de 200 cm³. Em seguida foram adicionados 500g do material preparado na estufa. Após esse

procedimento a amostra foi mantida em repouso e posteriormente eliminadas as bolhas de ar.

Os resultados foram obtidos a partir da leitura do frasco, substituindo em seguida os dados do ensaio na seguinte equação:

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

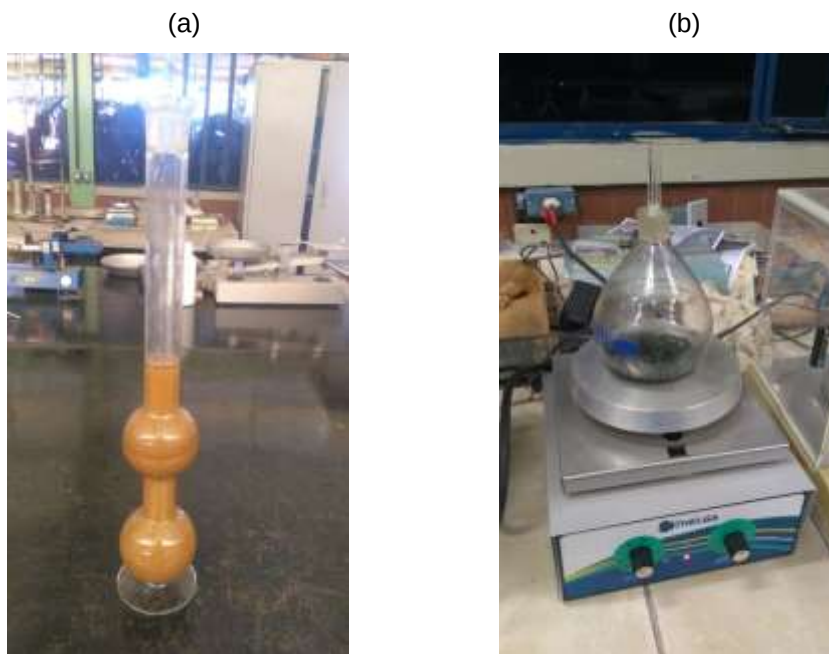
Onde:

γ = é a massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

L = Leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo)

Por apresentar densidade distinta aos demais agregados, a massa específica dos resíduos de mineração foi determinada por intermédio dos procedimentos contidos no DNER ME 093/94 que trata sobre a massa específica dos grãos através do método do picnômetro. As figuras abaixo mostram os ensaios realizados para cada tipo de agregado.

Figura 25 – Ensaio de massa específica dos agregados miúdos: (a) Convencional; (b) Mineração



Fonte: Autor (2019)

6.1.2.2.2 Massa específica dos agregados graúdos

Para os agregados graúdos o ensaio foi realizado conforme as especificações contidas na NM 53 que trata sobre a determinação da massa específica, massa

específica aparente e absorção de água dos agregados graúdos (ABNT, 2009). Os materiais foram submergidos em água à temperatura ambiente por aproximadamente 24h. Após esse período a água superficial foi retirada com auxílio de um pano absorvente para a aferição da sua massa (m_s). A etapa seguinte consistiu em imergir a amostra em água e verificar a sua massa na condição saturada (m_a). A massa específica foi determinada conforme a equação 2.

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (2)$$

Onde:

d_s = Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g/cm^3);

m_s = Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (g);

m_a = Massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g).

6.1.2.3 Massa unitária

A massa unitária é definida como uma massa da unidade de volume do material excluindo-se a presença de vazios. Para obter essa massa foram adotados os procedimentos prescritos na NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2006).

O ensaio ocorreu por meio da utilização de recipiente metálico, haste de adensamento, régua, concha, balança com precisão de 50g e estufa. O processo foi realizado considerando a massa específica no estado solto e em seguida no estado compactado.

No estado compactado, o procedimento consistiu no preenchimento de três camadas, aplicando-se em cada camada 25 golpes com a haste de adensamento. Após essa etapa foi realizado o arrasamento da superfície com o auxílio de uma régua metálica para que em seguida fosse aferida a massa do conjunto.

A massa unitária foi obtida através da equação abaixo.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{ap} = Massa unitária (kg/m^3);

m_{ar} = Massa do conjunto (kg);

m_r = Massa do recipiente vazio (kg);

V = Volume do recipiente (m^3).

6.1.2.4 Compactação

O ensaio de Compactação teve como objetivo determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca dos agregados reciclados, quando compactados. Este ensaio foi executado seguindo os procedimentos estabelecidos na NBR 7182 – Ensaio de compactação (ABNT, 2016).

A técnica utilizada foi a de energia normal, na qual consiste na aplicação de 26 golpes através de um soquete metálico sob três camadas de solo contidas no cilindro de proctor. Os procedimentos descritos na norma foram realizados no mínimo 5 vezes, e a cada ensaio foram aplicados um acréscimo de 2% de água em relação à massa do solo seco. O ensaio foi finalizado após a identificação dos pontos localizados no ramo seco, ramo úmido e do teor ótimo de umidade.

6.1.2.5 Índice de vazios

O ensaio para determinar o índice de vazios dos agregados seguiu os procedimentos descritos anteriormente no tópico 6.1.2.3 que trata sobre a massa unitária dos agregados. O índice de vazios foi determinado a partir da seguinte equação:

$$E_V = \frac{100 [(d_1 \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \rho_w} \quad (4)$$

Onde:

E_V = Índice de vazios nos agregados (%);

d_1 = Massa específica relativa do agregado seco conforme a NM 52 e NM 53;

ρ_w = Massa específica de água (kg/m^3);

ρ_{ap} = Massa unitária média dos agregados (kg/m^3)

6.1.2.6 Absorção de água

A taxa de absorção de água é determinada para auxiliar no processo de dosagem do concreto. Os procedimentos foram realizados para os agregados miúdos e graúdos e seguiram as prescrições indicadas nas normas específicas para cada caso, conforme descrito nos tópicos a seguir.

6.1.2.6.1 Agregados miúdos

O ensaio dos agregados miúdos atenderam as determinações da norma

regulamentadora NM 30 (ABNT, 2001c) que estabelece os procedimentos para obter a taxa de absorção de água para os agregados miúdos.

Os procedimentos iniciaram-se por meio da secagem dos materiais em estufa (m). Em seguida foi adicionada água na amostra e posteriormente mantida em repouso por 24h. Após a secagem o material foi colocado em um molde cônico e aplicados 25 golpes com a haste de compactação. O procedimento ocorreu até que os grãos da amostra não ficassem aderidos entre si (m_s). A taxa de absorção foi determinada pela equação 5 abaixo:

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

Onde:

A = Absorção de água (%);

m_s = Massa ao ar da amostra na condição saturado e de superfície seca (g);

m = Massa da amostra seca em estufa (kg);

6.1.2.6.2 Agregados graúdos

Para os agregados graúdos o ensaio atendeu aos critérios estabelecidos na NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009). O ensaio consistiu na obtenção da massa da amostra submetida ao ar, seca e submergida em água conforme os procedimentos mencionados no tópico 6.2.2.2. Os resultados foram obtidos pela equação a seguir:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

A = Absorção de água (%);

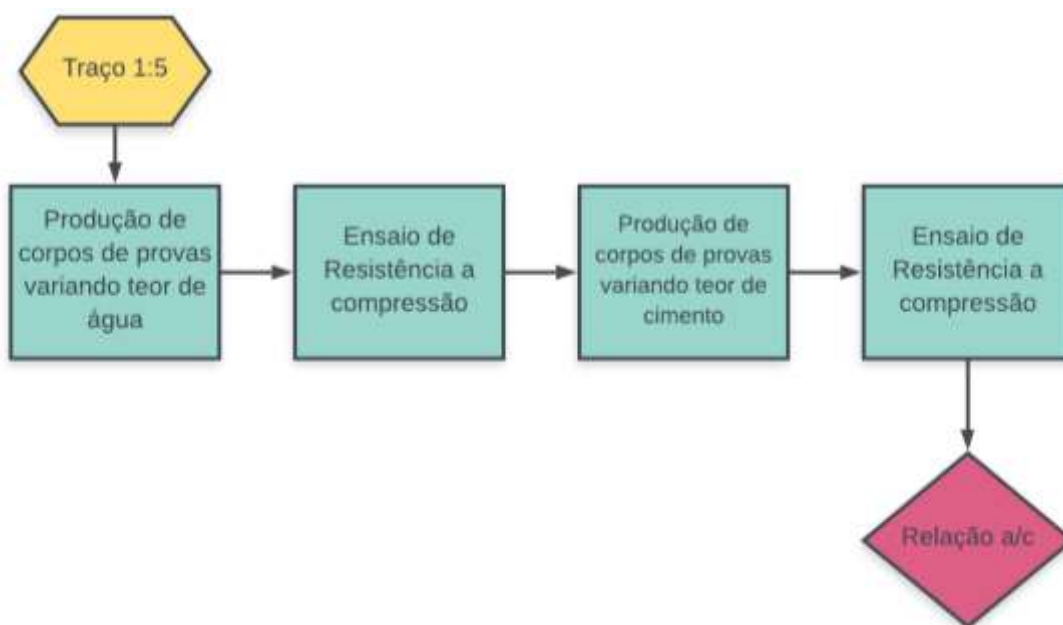
m_s = Massa ao ar da amostra na condição saturado e de superfície seca (g);

m = Massa da amostra seca (g);

6.1.3 Dosagem do concreto

Os procedimentos de dosagem do concreto compactado a rolo foram fundamentados no método de Recena (2011). Este método consiste em identificar o teor ótimo de água e cimento para posteriormente indicar a relação a/c da mistura. Durante a produção do concreto foi verificado o seu abatimento através do método do slump test, conforme determinado na NBR NM 67 (ABNT,1998), cujo objetivo é assegurar o abatimento 0, valor característico do concreto compactado a rolo. Esse procedimento foi realizado, conforme esquematizado na figura 26.

Figura 26 – Etapas de dosagem do concreto



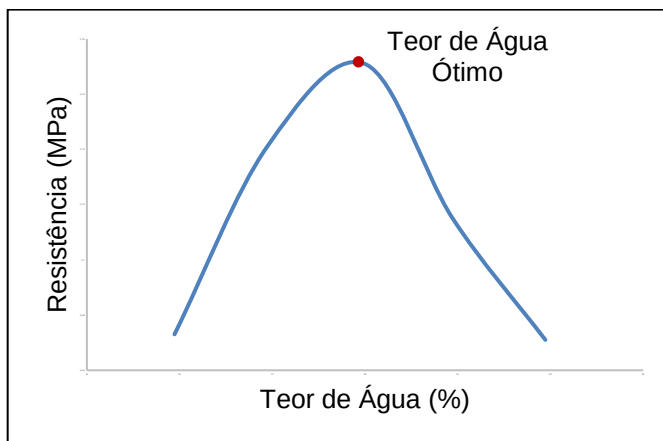
Fonte: Autor (2019)

Com base na figura 26 apresentada acima, e acerca dos procedimentos realizados, é possível inferir as seguintes considerações:

- Inicialmente foi arbitrado um traço padrão em massa de 1:5 (1 parte de cimento para 5 de agregados) e um consumo fixo de cimento;
- Após definido o traço, 5 diferentes teores de água foram incorporados à mistura do concreto compactado a rolo. Para cada teor foram produzidos 3 corpos de provas. A produção dos corpos de prova consistiu no processamento do material em betoneira seguida pela sua compactação por meio de 26 golpes aplicados com o auxílio do soquete metálico. Decorridos onze dias de cura eles foram rompidos e gerado um gráfico apresentando a relação entre a resistência a compressão axial e o respectivo

teor de água. A partir da análise gráfica foi extraído o teor de umidade ótima da mistura, conforme mostrado no esquema representado na figura abaixo.

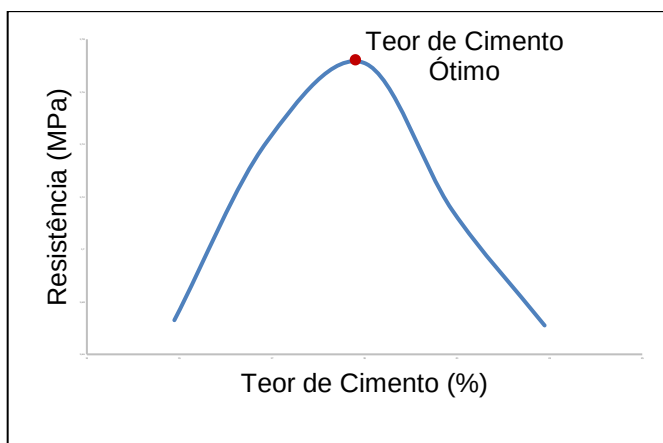
Gráfico 1 – Esquema do teor de água ótimo da dosagem



Fonte: Autor (2019)

c) Na etapa seguinte foram produzidos corpos de provas adotando como parâmetro o teor de umidade ótima obtida na etapa anterior. Nesta etapa foram adotados 5 diferentes teores de cimento à mistura e produzidos 3 corpos de provas para cada teor. Após a idade de onze dias esses materiais foram rompidos e elaborado um gráfico conforme mostrado na figura abaixo, relacionando a resistência à compressão axial e os respectivos teores de cimento.

Gráfico 2 – Esquema do teor de cimento ótimo da dosagem



Fonte: Autor (2019)

d) A última etapa consistiu na identificação da relação a/c com base nos resultados obtidos nas etapas 3 e 4 mencionadas anteriormente. A figura 27 a seguir mostra os corpos de provas produzidos neste método de dosagem.

Figura 27 – Corpos de provas produzidos na etapa de dosagem: (a) Variando teor de água; (b) Variando teor de cimento



Fonte: Autor (2019)

Na figura 27 (a) estão representados os corpos de provas produzidos variando o teor de água. Apesar de terem sido moldados 5 corpos de provas, durante a análise foi desconsiderado o primeiro traço por não apresentar resistência suficiente para a retificação da sua superfície. A figura 27 (b) apresenta os corpos de provas produzidos variando o teor de cimento.

6.1.4 Produção do concreto compactado a rolo

Os materiais utilizados para a produção do concreto compactado a rolo foram: água, cimento CP II – Z, agregados naturais e agregados reciclados. A escolha do cimento está fundamentada em estudos referentes a dosagem do concreto compactado a rolo que indicam que o cimento a ser adotado está associado à disponibilidade de material na região. Para o agregado graúdo foi utilizada a brita 1 e para o agregado miúdo a areia fina.

A preparação do concreto atendeu as determinações estabelecidas na NBR 12821 (ABNT, 2009) que trata sobre a preparação do concreto em laboratório. A amostra foi composta por 80 corpos de provas destinados à realização dos ensaios para o concreto no estado endurecido. A tabela a seguir indica a quantidade de corpos de provas produzidos, bem como os ensaios a serem realizados para cada traço.

Tabela 2 - Quantidade de corpos de provas para os ensaios do concreto no estado endurecido

Traço nº	% *AMR	Quantidade de corpos de prova para os ensaios do concreto no estado endurecido (un)					Total de Cps (un)
		Compressão	Tração	Absorção por Capilaridade	Absorção por Imersão, Índice de vazios e massa específica	Desgaste	
1	0%	6	6	3	3	2	20
2	20%	6	6	3	3	2	20
3	40%	6	6	3	3	2	20
4	60%	6	6	3	3	2	20
Total Geral							80

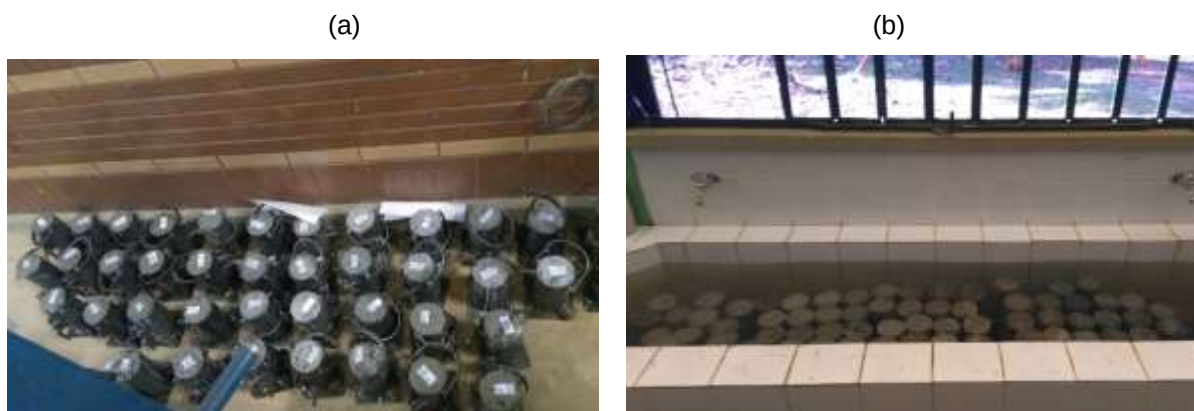
*agregado miúdo reciclado

Fonte: Autor (2019)

A moldagem do CCR seguiu os critérios da NBR 5738 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2003), observando previamente as especificações referentes à dimensão máxima dos agregados e a preparação dos moldes. O processo de compactação atendeu as etapas estabelecidas na NBR 7182/1986 que trata sobre os procedimentos para o ensaio de compactação. Durante a produção do CCR sua massa específica foi determinada seguindo os procedimentos descritos na NBR 16312-3 (ABNT, 2015).

Após a produção dos corpos de provas eles foram mantidos por 24h no laboratório de máquinas e posteriormente submetidos ao processo de cura durante 28 dias. As imagens abaixo mostram as etapas de produção e cura dos corpos de provas.

Figura 28 - Produção dos corpos de provas: (a) moldagem; (b) cura



Fonte: Autor (2019)

6.1.5 Ensaio do concreto no estado endurecido

Os ensaios do concreto no estado endurecido foram iniciados após o intervalo de 28 dias de cura. Conforme mostrado na tabela 2 acima, os ensaios realizados foram: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão de concreto, massa específica, absorção de água por capilaridade, desgaste e índice de vazios. Os tópicos a seguir discorrerão brevemente sobre os procedimentos realizados para cada ensaio.

6.1.5.1 Ensaio de resistência a compressão axial

O ensaio de resistência a compressão axial, conforme mostrado na figura 29, seguiu os critérios estabelecidos na NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 1994a). A resistência foi determinada pela seguinte equação:

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

Onde

f_c = Resistência à compressão (MPa);

f = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm).

Figura 29 - Ensaio de resistência a compressão axial: (a) Vista de completa; (b) Vista ampliada



Fonte: Autor (2019)

Após a obtenção da resistência média por intermédio do ensaio, foi aplicada uma análise estatística para a determinação do intervalo de confiança de 95% utilizando a distribuição t (t de student). Para isso foram utilizadas a tabela 3 e a equação 8, mostradas a seguir.

Tabela 3 - Distribuição t de student

gl	Área na cauda superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850

Fonte: ICMC – USP (2010)

$$\bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

Onde:

$\bar{x}$ = Média da amostra;

t = Valor obtido pela tabela 3;

s = desvio padrão;

n = grau de liberdade (Número de corpos de provas – 1).

6.1.5.2 Tração por compressão diametral

A verificação da resistência a tração por compressão diametral atendeu as especificações da NBR 7222 (ABNT, 1994b) – Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. A figura 30 mostra como foi realizado o ensaio e a partir da equação 9 abaixo foi determinada a resistência dos corpos de provas.

$$f_{ct,sp} = \frac{4F}{\pi dl} \quad (9)$$

Onde

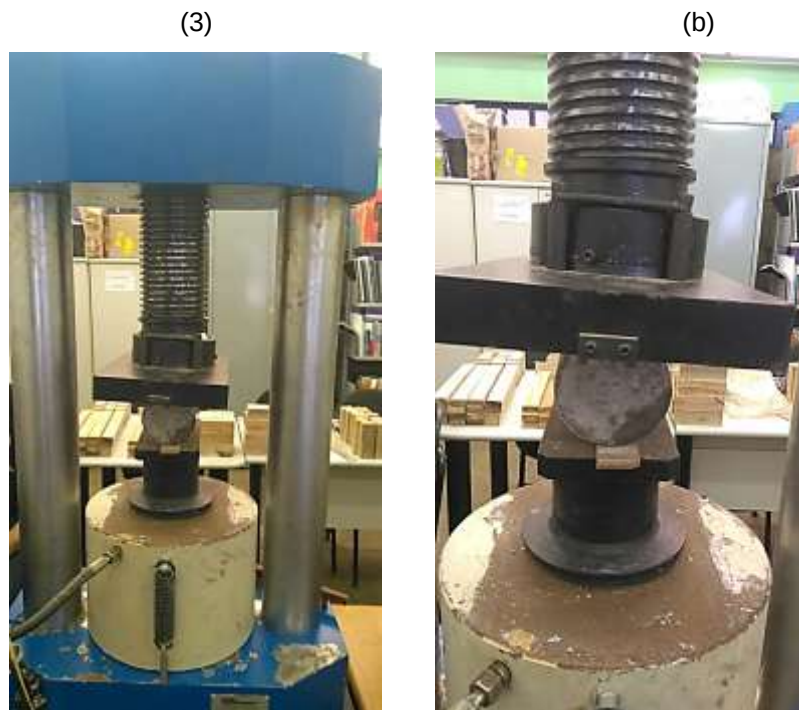
$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = Força máxima alcançada (N);

d = Diâmetro do corpo de prova (mm);

l = Comprimento do corpo de prova (mm).

Figura 30 – Ensaio de tração por compressão diametral: (a) Vista completa; (b) Vista ampliada



Fonte: Autor (2019)

Após a determinação da resistência média obtida através do ensaio, foi aplicada a mesma análise estatística mencionada no tópico anterior.

6.1.5.3 Absorção de água por imersão, índice de Vazios e Massa específica

Para a determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, foram realizados os procedimentos contidos na NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2005).

Os resultados foram obtidos a partir das equações indicadas a seguir.

Absorção de água

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

Onde:

A = Absorção de água (%);

m_{Sat} = Massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

m_s = Massa da amostra seca em estufa (g).

Índice de vazios

$$I_V = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

I_V = Índice de vazios (%);

m_{Sat} = Massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

m_s = Massa da amostra seca em estufa (g);

m_i = Massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

Massa específica da amostra seca

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (12)$$

ρ_s = Massa específica da amostra seca (g/cm³);

m_s = Massa da amostra seca em estufa (g);

m_{Sat} = Massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

m_i = Massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

Massa específica da amostra saturada

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (13)$$

ρ_{sat} = Massa específica da amostra saturada (g/cm³);

m_{Sat} = Massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

m_i = Massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

Massa específica Real

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (14)$$

ρ_r = Massa específica real (g/cm³);

m_s = Massa da amostra seca em estufa (g);

m_i = Massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

6.1.5.4 Absorção de água por capilaridade

Este ensaio seguiu os procedimentos da NBR 9779 (ABNT, 2012) que trata sobre o ensaio de absorção de água por capilaridade. Nele os corpos de provas foram submetidos à secagem em estufa até atingir a constância da massa. A etapa seguinte consistiu em posicionar os corpos de provas sob suportes, cujo intuito era impedir o seu contato com o fundo do recipiente. Em seguida foram adicionadas água de modo que o nível da água permanecesse 5 mm acima da face inferior do corpo de prova, conforme mostrado na figura 31.

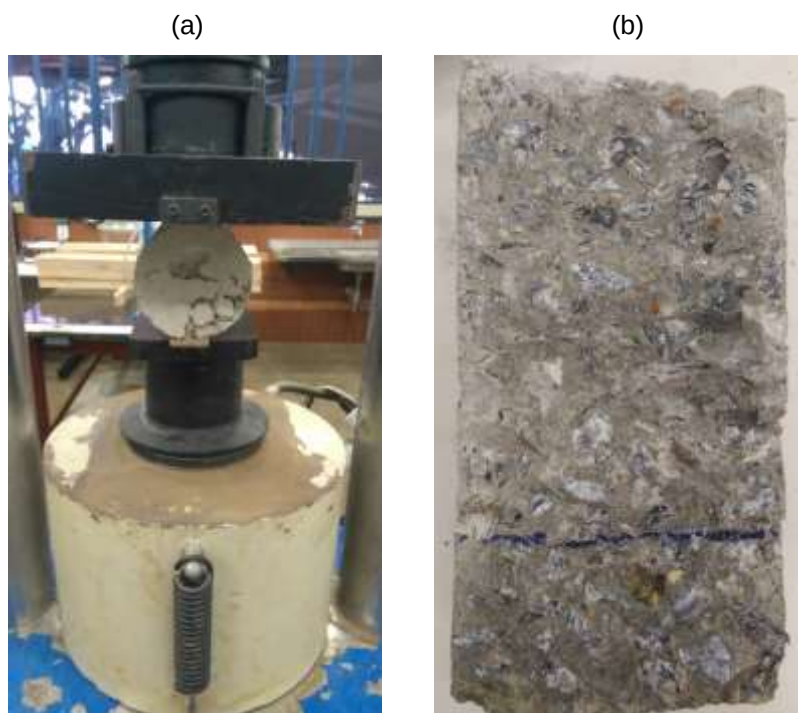
Figura 31 – Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Autor (2019)

O ensaio prosseguiu por meio da pesagem dos corpos de provas após os intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Para aferir a profundidade da ascensão capilar, o material foi submetido ao ensaio de tração por compressão diametral, conforme mostrado nas figuras a seguir.

Figura 32 – (a) Ensaio de tração com compressão diametral; (b) Profundidade da ascensão capilar



Fonte: Autor (2019)

6.1.5.5 Ensaio de desgaste

A fim de determinar o desgaste do concreto, os corpos de provas foram submetidos a ciclos de cura por imersão no tanque e secagem em estufa à temperatura de 60°C por um intervalo de tempo de 10 dias. Após atingido esse período, foi determinada a resistência à compressão axial e aplicada análise estatística conforme mencionado no tópico 6.1.5.1. Essa metodologia foi baseada em ensaios realizados na mecânica dos solos e adaptada conforme as condições reais do ambiente.

6.1.6 Análise da viabilidade técnica

A viabilidade técnica foi determinada através da comparação entre as propriedades identificadas nas etapas de caracterização dos agregados e por meio dos resultados obtidos para o concreto no estado endurecido.

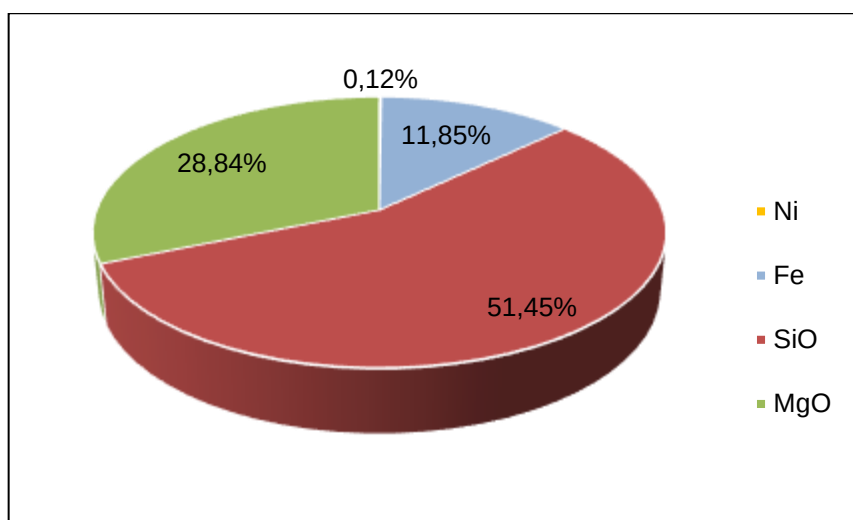
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa sessão serão apresentados os resultados da composição dos resíduos de mineração, a caracterização dos agregados, dosagem e o comportamento do concreto no estado endurecido para cada tipo de agregado. Os tópicos abaixo discorrerão acerca dos resultados obtidos em cada etapa mencionada acima.

7.1. Composição dos resíduos coletados

O resíduo da atividade de mineração foi obtido através do processo de redução do ferroníquel, e conforme mostrado no gráfico 3 abaixo possui na sua composição altos teores de sílica, magnésio e ferro e apresenta pequenas concentrações de níquel.

Gráfico 3 – Composição do resíduo de mineração



Fonte: Autor (2019)

A caracterização química do resíduo de mineração de ferroníquel utilizado neste trabalho foi feita por Brandt (1997), no qual realizou estudos referentes à lixiviação e a solubilização da amostra bruta. Esses resultados estão contidos na tabela 4 abaixo.

Tabela 4 – Caracterização da escória bruta ferroníquel de redução, lixiviação e solubilização

Amostra Bruta		Lixiviação		Solubilização	
Parâmetros	Teores (% e ppm)	Parâmetros	Teores (mg/l)	Parâmetros	Teores (mg/l)
Silício	43,60%	Silício	2,80	Silício	8,10
Magnésio	0,36%	Magnésio	4,60	Magnésio	4,58
Alumínio	3,90%	Alumínio	< 0,05	Alumínio	< 0,05
Ferro	14,90%	Ferro	0,95	Ferro	0,19
Dureza Total em CaCO ₃	1,49%	Dureza Total em CaCO ₃	26,41	Dureza Total em CaCO ₃	26,41
Dureza de Mg	1,49%	Dureza de Mg	18,92	Dureza de Mg	18,86
Cromo	1,30%	Cromo	< 0,05	Cromo	< 0,05
Níquel	0,14%	Níquel	< 0,02	Níquel	< 0,02
Titânio	0,15%	Titânio	< 0,01	Titânio	< 0,01
Manganês	0,34%	Manganês	< 0,11	Manganês	< 0,05
Nióbio	< 5,00 ppm	Nióbio	< 0,10	Nióbio	< 0,10
Cobre	106,00 ppm	Cobre	< 0,02	Cobre	< 0,02
Vanádio	184,00 ppm	Vanádio	< 0,01	Vanádio	< 0,01
Zircônio	27,00 ppm	Zircônio	< 0,01	Zircônio	< 0,01
Cobalto	66,00 ppm	Cobalto	< 0,10	Cobalto	< 0,10

Fonte: Santos (2013)

A tabela 5 apresenta a caracterização qualitativa da massa bruta do resíduo e indica a concentração dos constituintes químicos presentes na amostra estudada.

Tabela 5 – Análise de espectograma para a escória ferroníquel de redução

Escória Ferroníquel de Redução	Maiores constituintes concentração: >5%	Silício, Magnésio, Ferro
	Menores constituintes concentração: < 5% e > 0,1%	Alumínio, Cromo, Cálcio
	Traços: Concentração: < 0,1%	Níquel, Titânio, Manganês, Nióbio, Cobre, Vanádio, Zircônio, Cobalto

Fonte: Santos (2013)

A NBR 10004 (2004) classifica os resíduos conforme o seu grau de periculosidade. Diante dos resultados contidos nas tabelas acima, é possível observar a presença de materiais tóxicos/perigosos na sua composição, como por exemplo, o níquel, cromo, cobre e vanádio. No entanto esses valores são inferiores aos limites estabelecidos na norma, sendo classificado portanto como resíduos da classe III – inertes. Além disso, infere-se que o material não é passível aos processos de lixiviação e solubilização.

7.2 Ensaios de caracterização dos agregados

Neste tópico serão apresentados apenas os resultados dos ensaios dos agregados miúdos, devido ao objetivo do trabalho que é avaliar a viabilidade da utilização dos resíduos de mineração para a produção de agregados miúdos destinados à produção do concreto compactado a rolo.

7.2.1 Granulometria

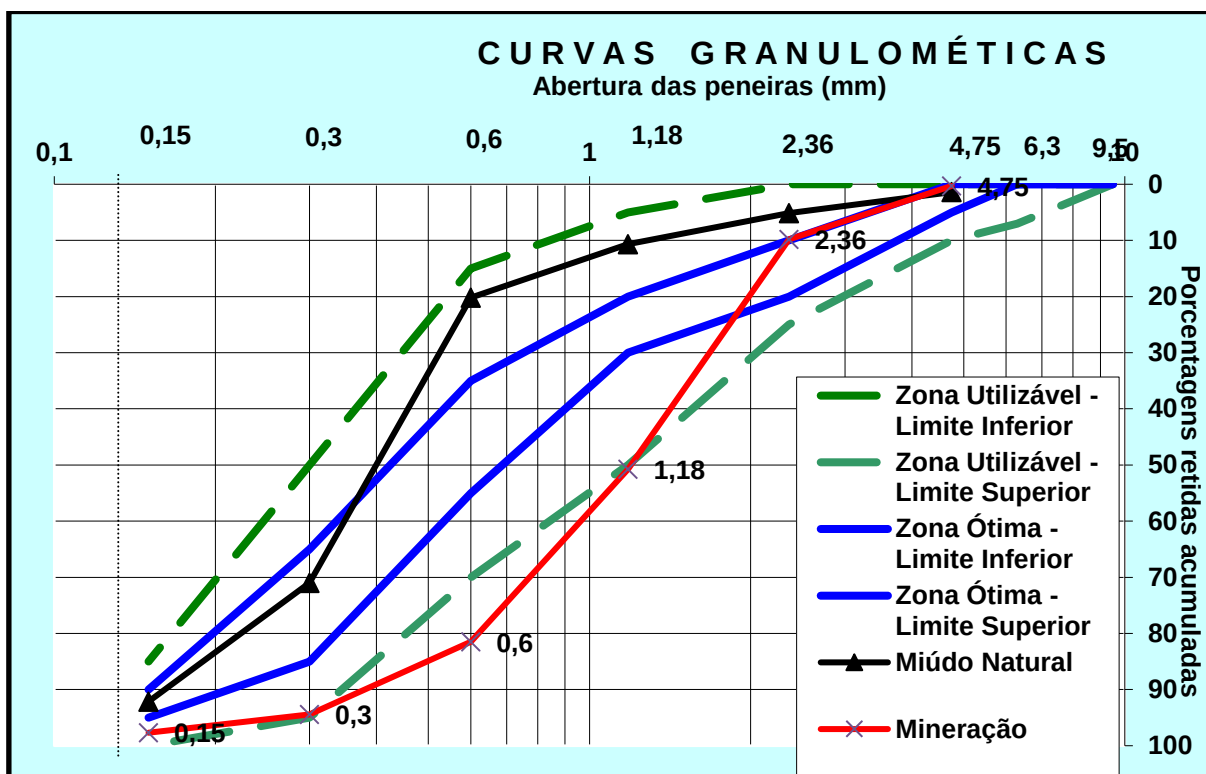
O ensaio de granulometria foi realizado para todos os tipos de agregados, e os resultados obtidos estão contidos na tabela 6. Para melhor compreensão dos resultados, são mostradas no gráfico 4 as curvas granulométricas para os agregados reciclados e convencionais, bem como os limites estabelecidos pela NBR 7211(ABNT, 2009).

Tabela 6 – Distribuição granulométrica dos agregados

Peneira (mm)	Agregado dos Resíduos de Mineração		Agregado Miúdo Convencional	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
75	-	-	-	-
50	-	-	-	-
37,5	-	-	-	-
25	-	-	-	-
19	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-
9,5	-	-	-	-
6,3	-	-	-	-
4,75	0,29	0,29	1,4	1,4
2,36	9,5	9,79	3,73	5,13
1,18	40,95	50,74	5,54	10,67
0,6	30,75	81,49	9,5	20,17
0,3	12,93	94,42	50,82	70,99
0,15	3,27	97,69	21,14	92,13
<0,15	2,22	99,91	7,72	99,85
Total	99,91		99,85	
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,75		4,75	
Módulo de Finura	3,34		2,00	

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 4 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos



Fonte: Autor (2019)

Observa-se que os módulos de finura do agregado reciclado é superior ao apresentado pelo agregado miúdo convencional. Ao analisar o gráfico 4 nota-se que alguns pontos do agregado de mineração estão compreendidos fora dos limites da zona utilizável superior e que em alguns pontos o agregado convencional está inserido na zona ótima utilizável. Apesar disso, a NBR 7211/2009 enquadra os agregados conforme o valor do seu módulo de finura, determinando portanto que o agregado reciclado está compreendido na zona utilizável superior e que o agregado convencional situa-se na zona utilizável inferior.

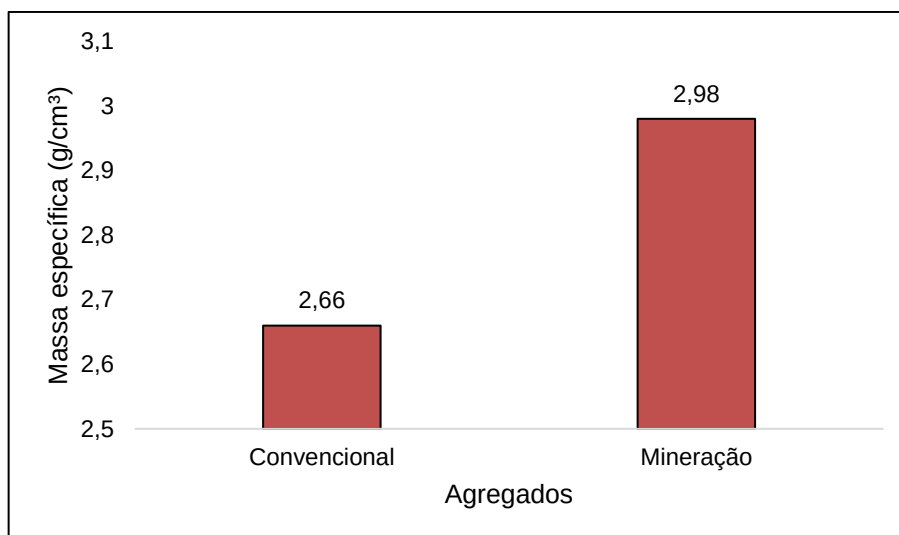
Contudo, apesar do agregado reciclado apresentar pontos fora do limite superior da curva granulométrica não houve correção na granulometria dos agregados reciclados, visto que o intuito do trabalho é utilizar o agregado com o mínimo de beneficiamento possível.

7.2.2 Massa específica

O ensaio de massa específica para os agregados convencionais foi realizado seguindo as determinações da NBR 9776 (ABNT, 1987), enquanto que para os

agregados de mineração foi adotado os procedimentos do DNER ME 093/994. Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados no gráfico abaixo.

Gráfico 5 – Massa específica dos agregados miúdos



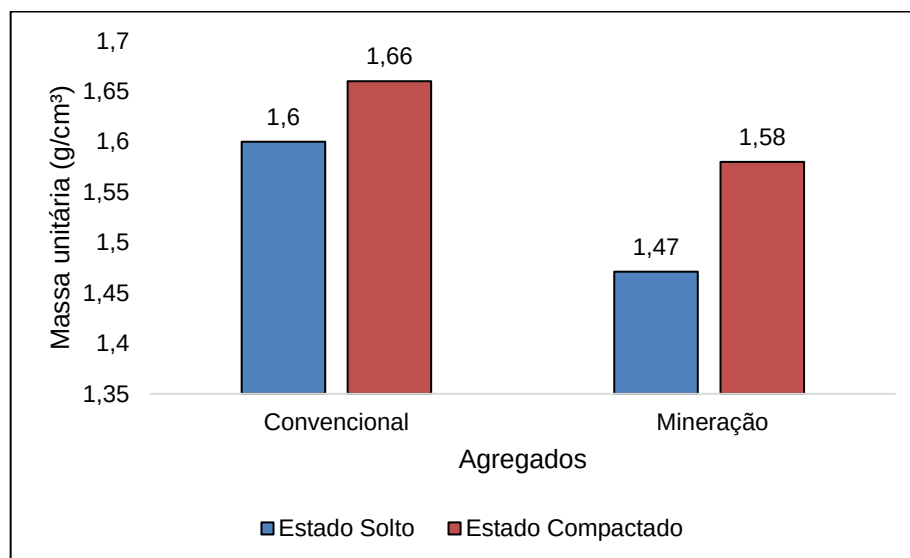
Fonte: Autor (2019)

Segundo Leite (2001), os agregados reciclados da construção e demolição apresentam massa específica inferior aos agregados naturais. No entanto, nota-se no gráfico 5 que os resíduos provenientes da atividade de mineração não apontam o mesmo comportamento.

7.2.3 Massa unitária

A massa unitária foi determinada para o estado solto e compactado, conforme a NM 45 (ABNT, 2002). Os resultados encontrados para este ensaio estão contidos no gráfico 6.

Gráfico 6 – Massa unitária dos agregados miúdos



Fonte: Autor (2019)

A partir do gráfico acima, percebe-se que as massas específicas dos agregados reciclados são inferiores ao do agregado convencional. Esse comportamento já era previsto para os agregados da construção e demolição, conforme mencionado nos estudos realizados por Leite (2001) e Xião *et al.* (2005), mostrando-se também aplicável aos agregados provenientes da mineração.

7.2.4 Índice de vazios

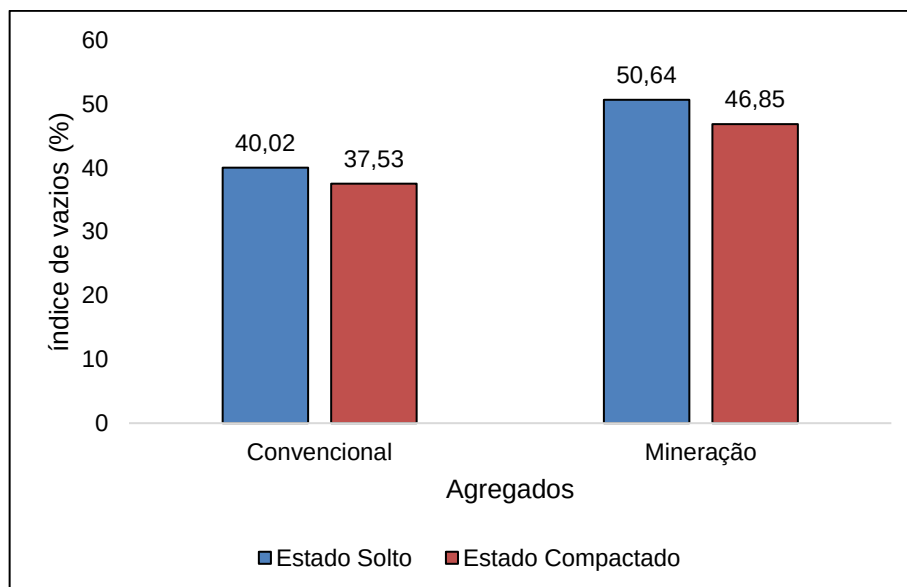
O índice de vazios dos agregados foi obtido por correlações contidas na NBR NM 53, relacionando a massa específica do agregado e da água e a massa unitária dos agregados no estado solto e compactado conforme mostrado na tabela 7 e no gráfico 7 a seguir.

Tabela 7 – Índice de vazios dos agregados miúdos

Agregados		Miúdos Naturais	Resíduos de Mineração
Massa Específica do agregado Seco	-	2660	2980
Massa Específica de água	kg/m³	1000	1000
Massa Unitária Média do agregado Solto	kg/m³	1595,62	1470,95
Massa Unitária Média do agregado Compactado	kg/m³	1661,63	1584,00
Índice de Vazios no Estado Solto	%	40,02	50,64
Índice de Vazios no Estado Compactado	%	37,53	46,85

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 7 – Índice de Vazios dos agregados miúdos



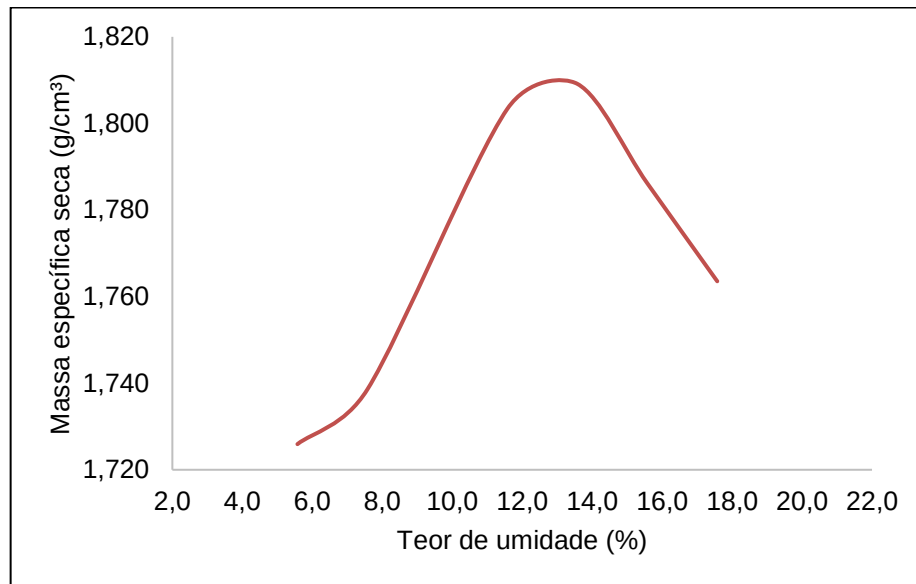
Fonte: Autor (2019)

O índice de vazios é a relação entre o volume total de vazios e volume total dos grãos. Com isso, é possível afirmar que o seu valor é diretamente proporcional a quantidade de vazios presentes no material, e que quanto menor for esse valor, melhor serão as características de resistência, permeabilidade e durabilidade. A partir dos resultados mostrados acima nota-se que os agregados convencionais possuem menores índices de vazios do que os agregados reciclados, mostrando-se assim mais favorável em relação a esse aspecto.

7.2.5 Compactação

O processo de compactação foi realizado para identificar a relação entre a massa específica do agregado seco e o seu teor de umidade. Para este ensaio foi aplicada a energia normal de compactação, conforme os procedimentos descritos na NBR 7182 (ABNT, 2016). Os gráficos 8 e 9 a seguir mostram, respectivamente, a curva de compactação e curva de saturação do agregado de mineração, e a tabela 8 indica os valores da umidade ótima e massa específica seca máxima do agregado.

Gráfico 8 – Curva de compactação do agregado de mineração



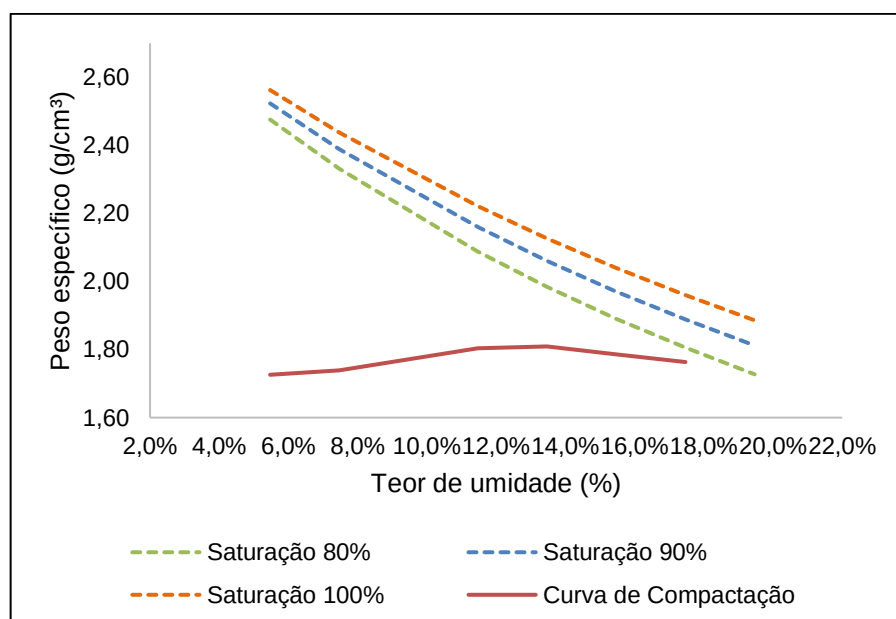
Fonte: Autor (2019)

Tabela 8 – Dados do ensaio de compactação

Umidade ótima (%)	13,58
Massa específica seca máxima (g/cm³)	1,812

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 9 – Curva de saturação do agregado de mineração



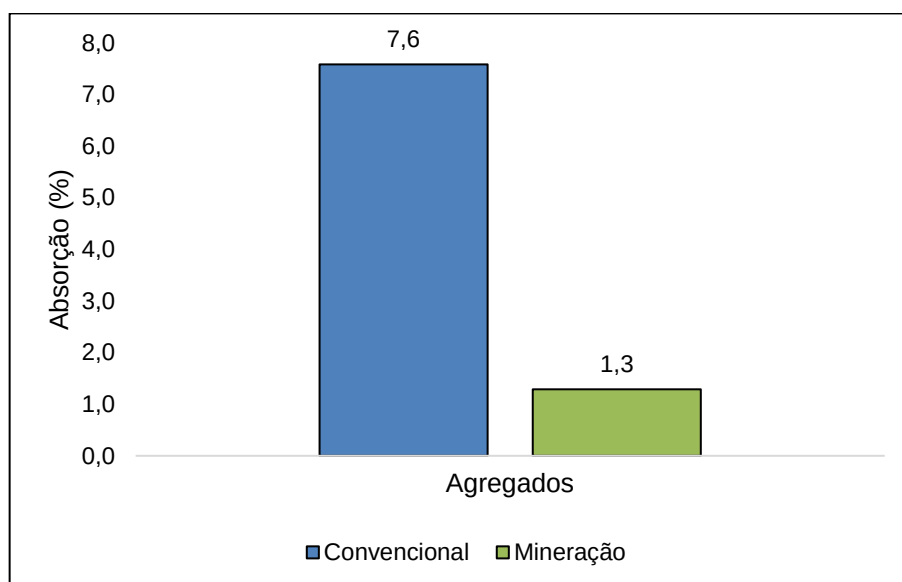
Fonte: Autor (2019)

A partir do gráfico 8 e da tabela 8 é possível inferir que o agregado de mineração atinge a umidade ótima com o teor de umidade de 13,58% e com a massa específica seca máxima de 1,812 g/cm³. Ao analisar a curva de saturação indicada no gráfico 9 percebe-se que a amostra não atinge a saturação máxima, situando-se próxima à saturação com percentual de 80%.

7.2.6 Absorção

O ensaio de absorção dos agregados miúdos foi realizado conforme estabelecido na NM 30 (ABNT, 2001). O gráfico 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

Gráfico 10 – Absorção de água dos agregados miúdos



Fonte: Autor (2019)

Conforme indicado acima, os agregados convencionais apresentam elevada taxa de absorção de água se comparado ao agregado proveniente da atividade de mineração. Essa característica está associada às propriedades físicas dos materiais, relacionada principalmente à porosidade dos grãos.

7.3 Dosagem

Após a caracterização dos materiais foi realizada a dosagem do concreto compactado a rolo. Este procedimento foi executado em etapas, adotando-se inicialmente um traço unitário de 1:5 (1 kg de cimento para 5kg de agregados), conforme mencionado no programa experimental deste trabalho.

Na primeira etapa foram produzidos 5 traços variando o teor de água, conforme indicado na tabela 9. Nela estão apresentados os traços unitários e em massa utilizados nesse procedimento. Após o período de 11 dias de cura esse material foi submetido ao ensaio de compressão axial a fim de identificar o traço com o melhor desempenho. O gráfico 11 apresenta a relação entre a resistência axial e o teor de água para os traços produzidos.

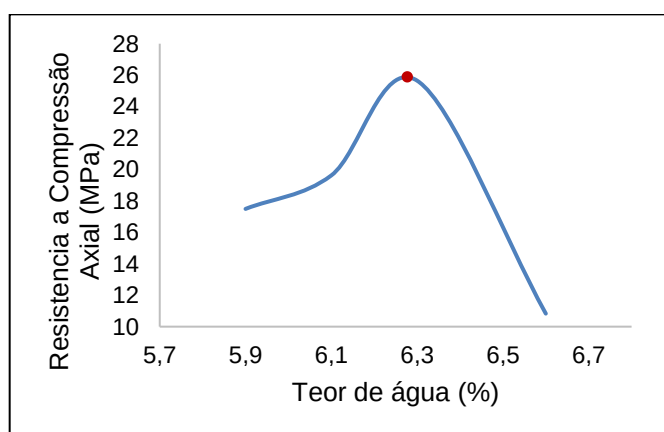
Tabela 9 – Traços unitários e traços em massa da primeira etapa de dosagem do concreto compactado a rolo com agregados reciclados

Traço nº	Qnt. De CPs (um)	Relação a/c	Traço Unitário (1:5)	Traço em Massa (kg)				Água (%)
				Cimento	Areia	Brita	Água	
1	3	0,33	1:2:3	4	8	12	1,3	5,14
2	3	0,38	1:2:3	4	8	12	1,5	5,88
3	3	0,39	1:2:3	4	8	12	1,55	6,07
4	3	0,4	1:2:3	4	8	12	1,6	6,25
5	3	0,43	1:2:3	4	8	12	1,7	11,41

*Obs.: Os traços em massa são em relação à massa do cimento

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 11 – Relação entre a resistência à compressão axial e o teor de água



Fonte: Autor (2019)

Analisando o gráfico acima infere-se que houve um aumento progressivo na resistência do concreto até o Traço 4, havendo uma redução na resistência a partir do traço 5. Com base nessa informação foi adotado para a próxima etapa o percentual de 6,3% de água em relação à massa total, correspondente ao Traço 4 que apresentou a maior resistência.

Na segunda etapa foram produzidos 5 traços fixando-se o percentual de 6,3% de água e variando o teor de cimento, conforme mostrado na tabela 10. Após o intervalo de 10 dias de cura foi realizado o ensaio de compressão axial. As informações obtidas no ensaio, bem como os respectivos teores de água estão contidas no gráfico 12.

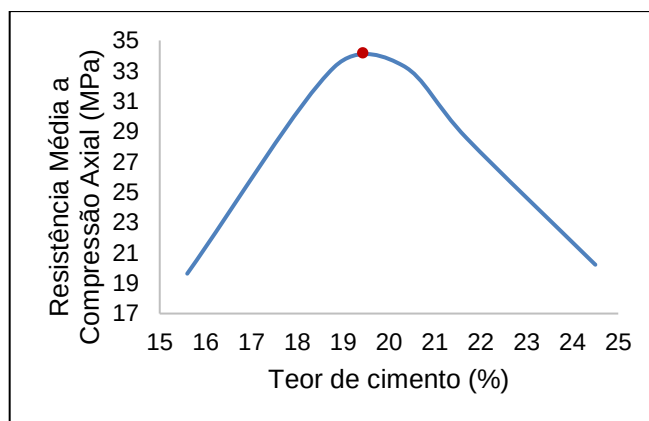
Tabela 10 – Traços unitários e traços em massa da segunda etapa de dosagem do concreto compactado a rolo com agregados reciclados

Traço nº	Qnt. De CPs (um)	Relação a/c	Traço Unitário (1:5)	Cimento (%)	Traço em Massa (kg)			
					Cimento	Areia	Brita	Água
1	3	0,4	1:2:3	15,63	4	8	12	1,6
2	3	0,32	1:2:3	18,8	5	8	12	1,6
3	3	0,29	1:2:3	20,3	5,5	8	12	1,6
4	3	0,27	1:2:3	21,74	6	8	12	1,6
5	3	0,23	1:2:3	24,48	7	8	12	1,6

*Obs.: Os traços em massa são em relação à massa do cimento

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 12 – Relação entre a resistência à compressão axial e o teor de cimento

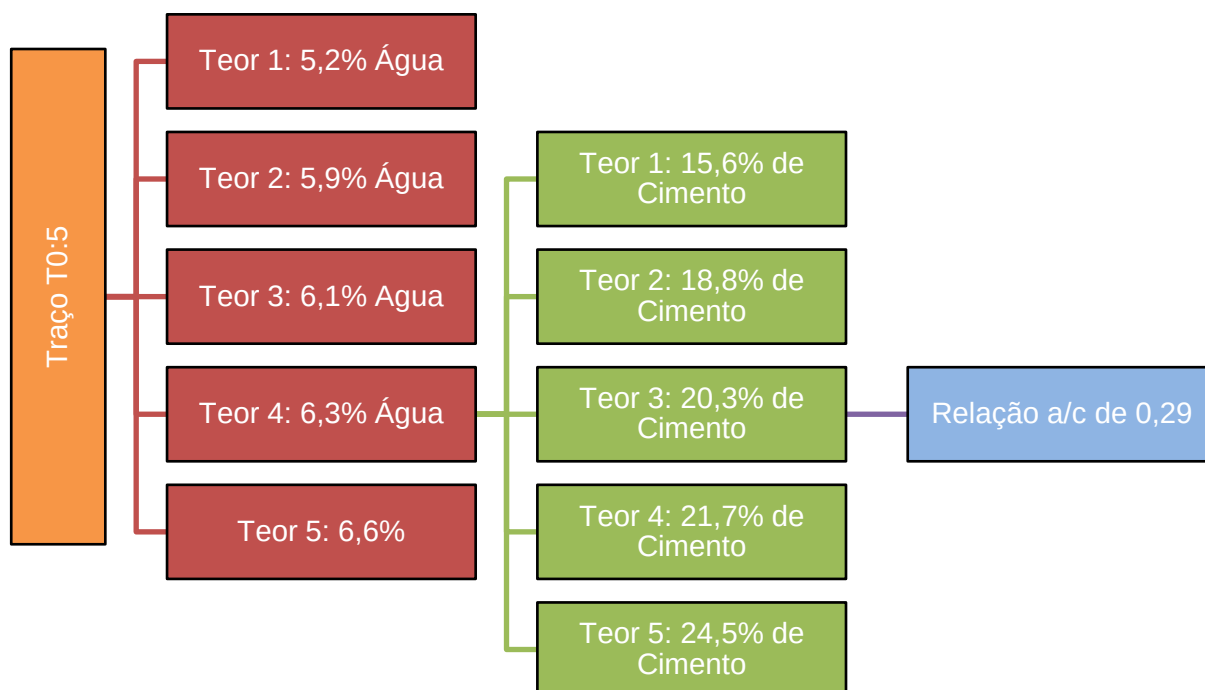


Fonte: Autor (2019)

Com base nos resultados apresentados nota-se houve um aumento na resistência até o Traço 3, havendo uma diminuição progressiva a partir do Traço 4. Diante desse dado foi adotado para a próxima etapa o percentual de 20,3% de cimento em relação à massa total.

Portanto considerando os resultados apresentados nas etapas anteriores foi obtida a relação a/c de 0,29. Para melhor compreensão do método de dosagem, a figura 33 a seguir mostra um resumo das etapas, contendo os resultados obtidos para cada traço.

Figura 33 - Resumo da etapa de dosagem



Fonte: Autor (2019)

7.4 Produção do concreto compactado a rolo

O traço de referência para a produção do concreto compactado a rolo foi determinado conforme o método de dosagem apresentado anteriormente. Nos traços com a incorporação de agregados reciclados foi observado o percentual de substituição do agregado convencional. A tabela 11 apresenta os traços unitários e os traços em massa utilizados na produção do concreto.

Tabela 11 - Traços unitários e traços em massa da segunda etapa de produção do concreto compactado a rolo com agregados reciclados

Traço	a/c (inicial)	Traços unitários			% *AMR	Traços em massa		
		m	a	p		Areia natural (kg)	Areia reciclada (kg)	Brita natural (kg)
T0	0,29	3,67	1,49	2,18	0	47	0	69
T20	0,29	3,67	1,49	2,18	20	32,05	7,9	58,72
T40	0,29	3,67	1,46	2,18	40	25,43	16,95	63,57
T60	0,29	3,67	1,46	2,18	60	16,95	25,43	63,57

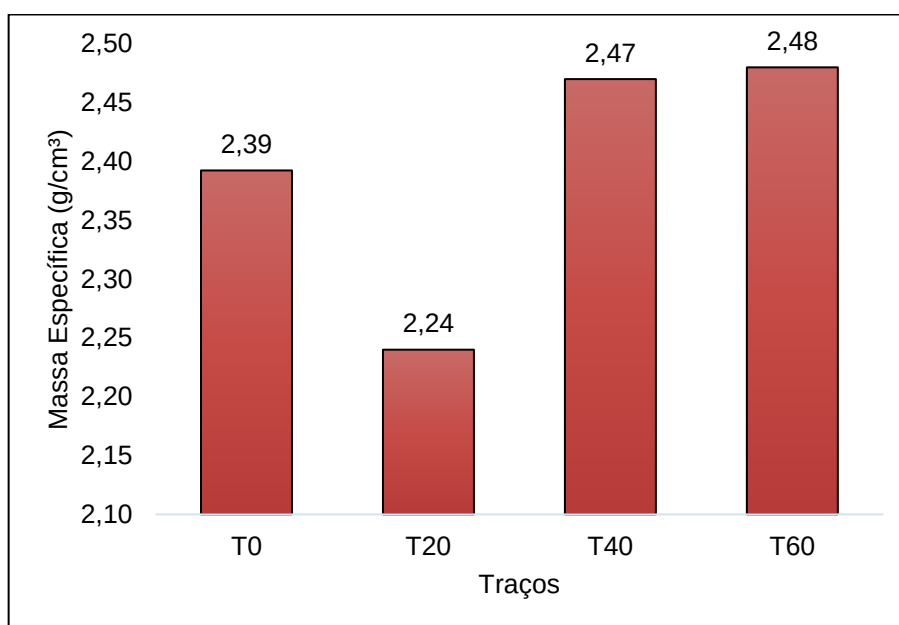
*AMR: Percentual de agregado miúdo reciclado

Fonte: Autor (2019)

Na tabela acima estão apresentados os traços unitários da produção do concreto compactado a rolo, em que “a” representa o traço unitário dos agregados miúdos, “p” dos agregados graúdos e “m” o somatório dos traços unitários dos agregados. O traço unitário foi obtido a partir da relação entre a massa dos agregados e a massa de cimento.

Durante a produção dos corpos de provas foi realizado o ensaio de massa específica do concreto fresco através do consistômetro vebê, conforme os procedimentos descritos na NBR 16312-3 (ABNT, 2015). O gráfico 13 abaixo apresenta os resultados obtidos nesse ensaio.

Gráfico 13 – Massa específica do concreto no estado fresco



Fonte: Autor (2019)

Nota-se que a massa específica do concreto tende a aumentar com a incorporação do agregado reciclado, com exceção do valor apresentado pelo traço T20. No entanto, os resultados apontam valores similares, não apresentando variações significativas para os traços T0, T40 e T60.

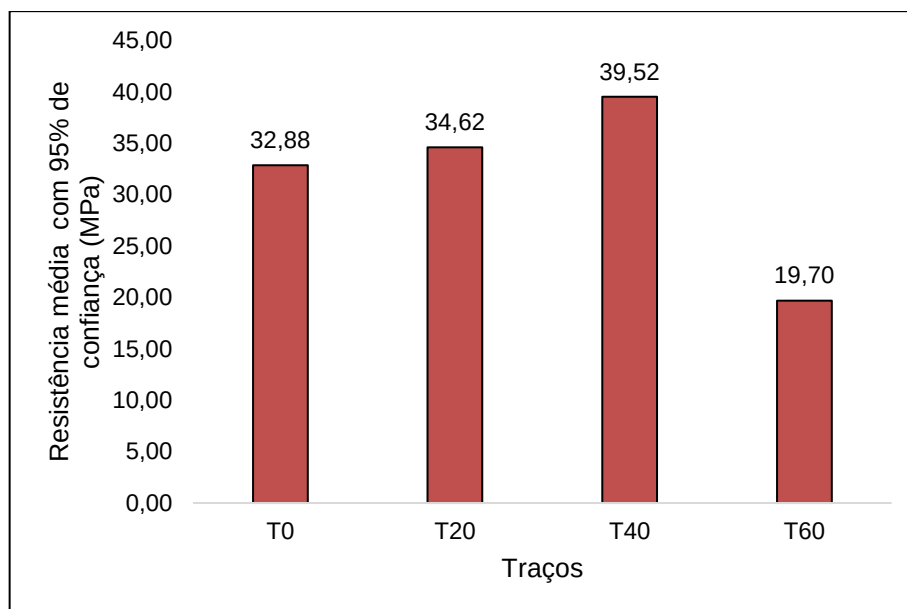
7.5 Resultados dos ensaios realizados no concreto no estado endurecido

7.5.1 Compressão axial

O ensaio de compressão axial foi realizado conforme os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 1994). Após a obtenção da resistência média, foi aplicada uma análise estatística cujo o objetivo foi determinar um intervalo de confiança de 95% dos dados

analisados. Para isso foi aplicado a distribuição t de student, e após identificado o intervalo de confiança foi realizada a média entre os valores contidos no intervalo. As resistências obtidas após a análise estatística estão mostradas no gráfico abaixo.

Gráfico 14 – Resistência à compressão axial



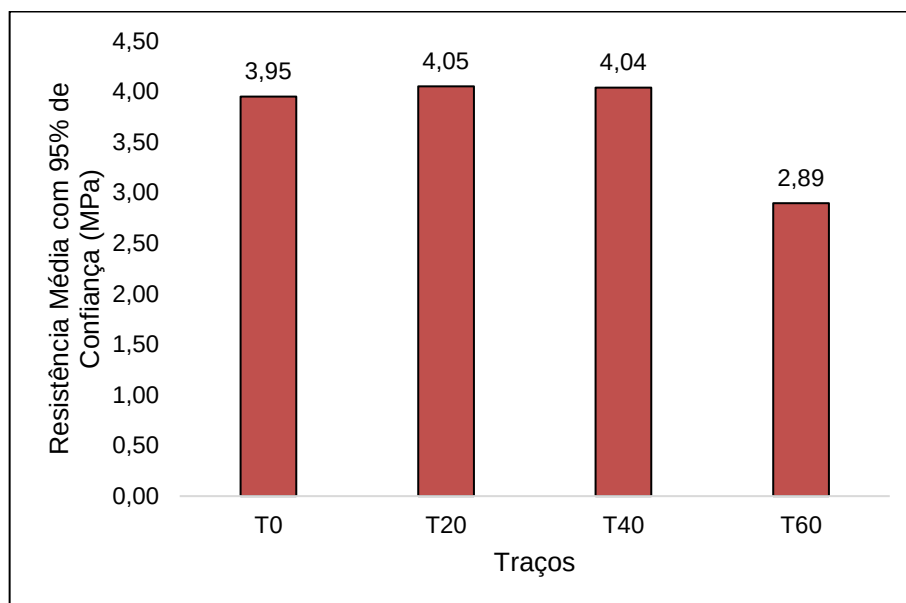
Fonte: Autor (2019)

Com base no gráfico 14 nota-se que a substituição parcial do agregado miúdo convencional se mostrou favorável ao concreto compactado a rolo, exceto para o traço T60, que é composto por 60% de agregado de mineração. Em relação ao Traço T0 houve um aumento de 5,3% para o Traço T20 e 20,2% para o Traço T40. No entanto o Traço T60 apresentou uma redução de 40% na resistência à compressão axial. Além disso, é possível inferir que a substituição de 40% do agregado convencional por agregado de mineração, Traço T40, apresentou o melhor desempenho em relação à resistência a compressão axial. Com isso, percebe-se também que substituições acima de 60% são desfavoráveis, comprometendo a resistência do concreto.

7.5.2 Tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral, determinados através dos procedimentos contidos na NBR 7222 (ABNT, 1994) foram submetidos a um tratamento estatístico conforme mencionado no tópico referente à resistência a compressão axial. O gráfico 15 abaixo apresenta os resultados obtidos após esse tratamento.

Gráfico 15 – Resistência à tração por compressão diametral



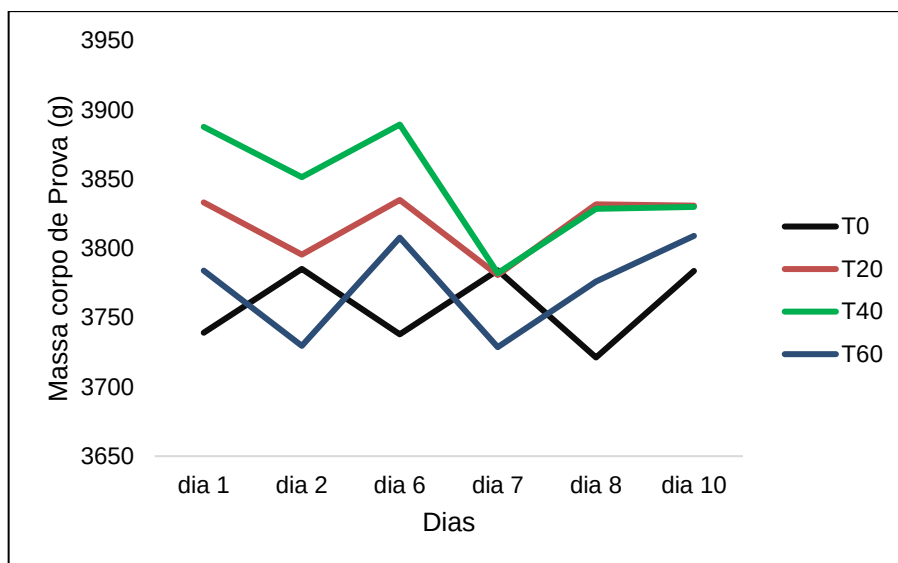
Fonte: Autor (2019)

Percebe-se nos traços T0, T40 e T60 que a substituição parcial do agregado convencional pelo agregado reciclado não interfere de forma significativa na resistência à tração por compressão diametral. Em relação ao Traço T0 houve um aumento de apenas 2,5% para o Traço T20 e de 2,3% para o Traço T40. No entanto, nota-se que houve uma redução significativa na resistência à tração para o Traço T60, apresentando uma redução de 26,8% em relação ao Traço T0. Diante disso, infere-se que a substituição de 60% de agregado convencional por agregado reciclado da mineração compromete a resistência à tração do concreto, mostrando-se desfavorável.

7.5.3 Desgaste

A análise do desgaste foi realizada durante o período de 10 dias. Nesse intervalo foram registradas as massas apresentadas pelos corpos de provas após serem submetidos aos ciclos de cura e secagem em estufa. O gráfico 16 apresenta as informações referentes aos dias 1, 2, 6, 8 e 10.

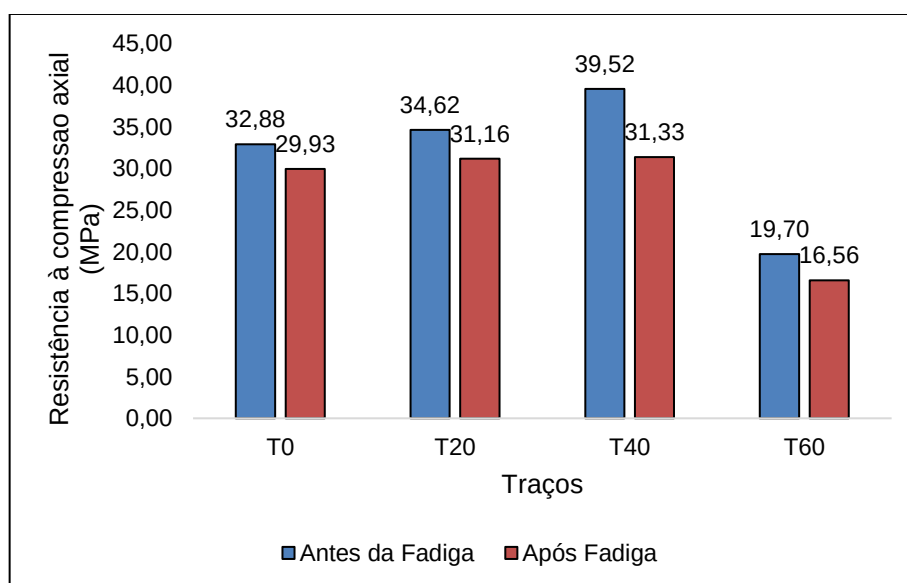
Gráfico 16 – Massas apresentadas pelos corpos de provas submetidos ao ensaio de desgaste



Fonte: Autor (2019)

Com base no comportamento indicado no gráfico 16 acima, percebe-se que o traço que apresentou maiores variações de massa durante o ciclo é o Traço T40. É possível observar ainda que os demais traços revelam comportamentos similares ao longo do ciclo, não apresentando grandes variações. Para determinar o desempenho do concreto, após esse período foi realizado o ensaio de compressão axial. O gráfico 17 indica os resultados obtidos através do tratamento estatístico, realizado pelo método t de student, para os corpos de provas antes e após o ensaio de desgaste.

Gráfico 17– Resistência à compressão axial dos corpos de provas antes e após o ensaio de desgaste



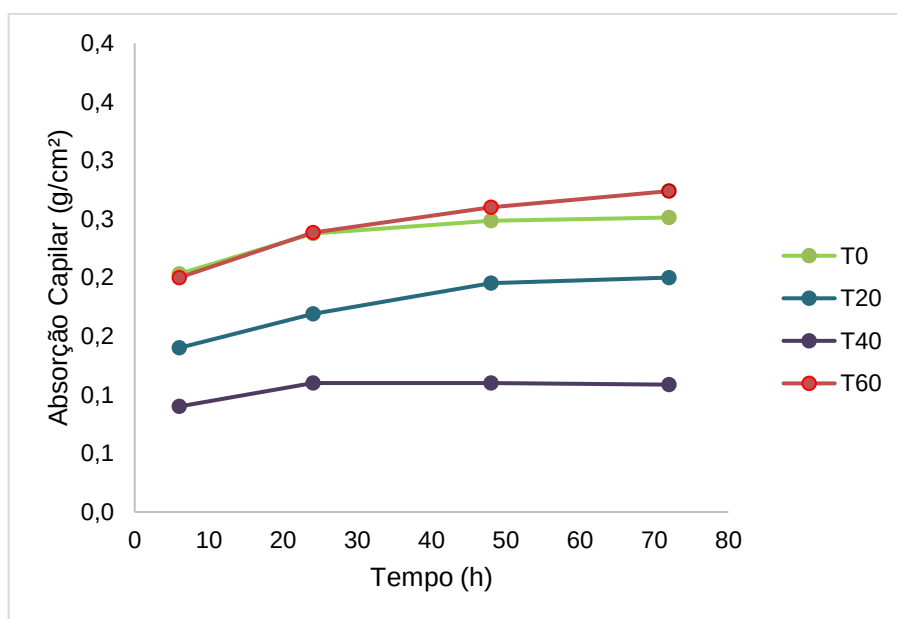
Fonte: Autor (2019)

De acordo com o gráfico 17, os corpos de provas submetidos ao ensaio de desgaste apresentaram redução significativa na resistência à compressão axial. Os traços T0 e T20 apontaram as menores reduções, indicando aproximadamente uma variação de 10% em relação ao valor inicial. Ainda é possível observar que o Traço T40 apresentou a maior variação, tendo uma redução de aproximadamente 20% do valor inicial, seguido pelo Traço T60 com uma variação de 16%.

7.5.4 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade seguiu os procedimentos da NBR 9779 (ABNT, 2012). O ensaio consistiu na aferição da absorção capilar dos corpos de provas nos intervalos de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h. Esses dados estão representados no gráfico 18 a seguir.

Gráfico 18 – Absorção por capilaridade dos corpos de provas



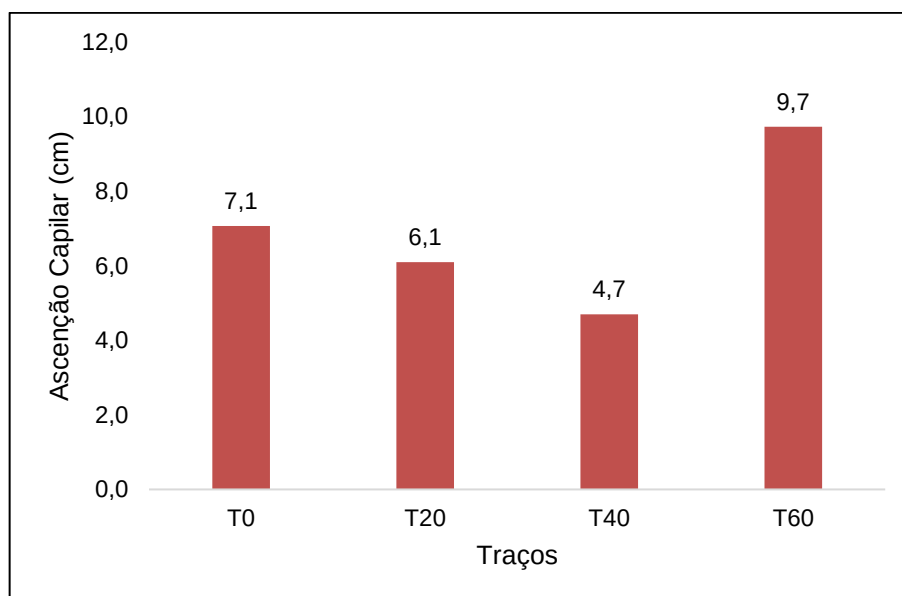
Fonte: Autor (2019)

Por meio da análise gráfica nota-se que os traços T0 e T60 indicaram os maiores valores de absorção capilar. Após as 72h o Traço T0 apresentou uma absorção capilar de 0,25 g/cm³, enquanto que o Traço T60 apontou o valor de 0,27 g/cm³. O Traço T20 indicou um resultado intermediário dentre os corpos de provas analisados, com o valor de absorção de 0,20 g/cm³, enquanto que o Traço T40 mostrou o menor valor de absorção de 0,11 g/cm³, apresentando assim o resultado mais favorável da análise. É possível inferir ainda que a variação de absorção capilar

entre os períodos de 3h e 72h foram de 25% para o Traço T0, 42% para o Traço T20, 22% para o Traço T40 e 35% para o Traço T60.

Após o intervalo de tempo de 72h os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral, para que pudessem ser aferidas as profundidades de ascensão capilar. Os resultados obtidos estão mostrados no gráfico 19 a seguir.

Gráfico 19 – Ascensão capilar dos corpos de provas



Fonte: Autor (2019)

As informações apresentadas no gráfico acima apontam que a maior profundidade da ascensão capilar ocorreu no Traço T60, que contém o maior percentual de agregados de mineração. Entretanto, nota-se que a menor ascensão capilar é obtida pelo Traço T40 que é composto por 40% dos agregados reciclados. Diante disso, percebe-se que o teor ideal em relação a essa análise está representado pelo Traço T40. Ainda segundo o gráfico é possível observar que a profundidade de absorção decresce com o aumento do percentual de agregado de mineração, entretanto ao atingir a taxa de 60% de substituição o valor da profundidade aumenta significativamente.

7.5.5 Absorção por imersão

Através da NBR 9778 (ABNT, 2005) foram determinadas as massas específicas do concreto no estado real, seco e saturado. Esses valores estão representados na tabela 12 abaixo.

Tabela 12 – Massas específicas do concreto no estado endurecido

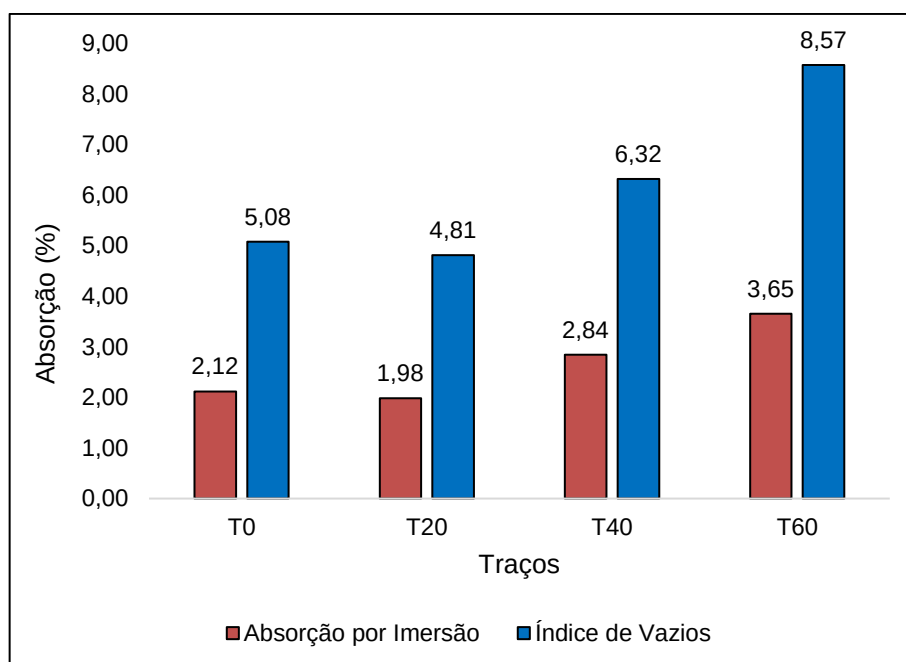
	γ_{seca} (g/cm ³)	$\gamma_{saturada}$ (g/cm ³)	γ_{Real} (g/cm ³)
T0	2,40	2,45	2,53
T20	2,43	2,48	2,56
T40	2,22	2,28	2,37
T60	2,34	2,43	2,56

Fonte: Autor (2019)

A tabela acima indica que o Traço T40 apresenta a menor massa específica nas três condições. Além disso, nota-se que apesar do Traço T20 possuir a maior massa específica, ele aponta resultados similares aos traços T0 e T60.

O gráfico 20 apresenta os valores obtidos para as taxas de absorção por imersão e índices de vazios, conforme determinado na NBR 9778 (ABNT, 2005).

Gráfico 20 – Taxa de absorção por imersão e índice de vazios



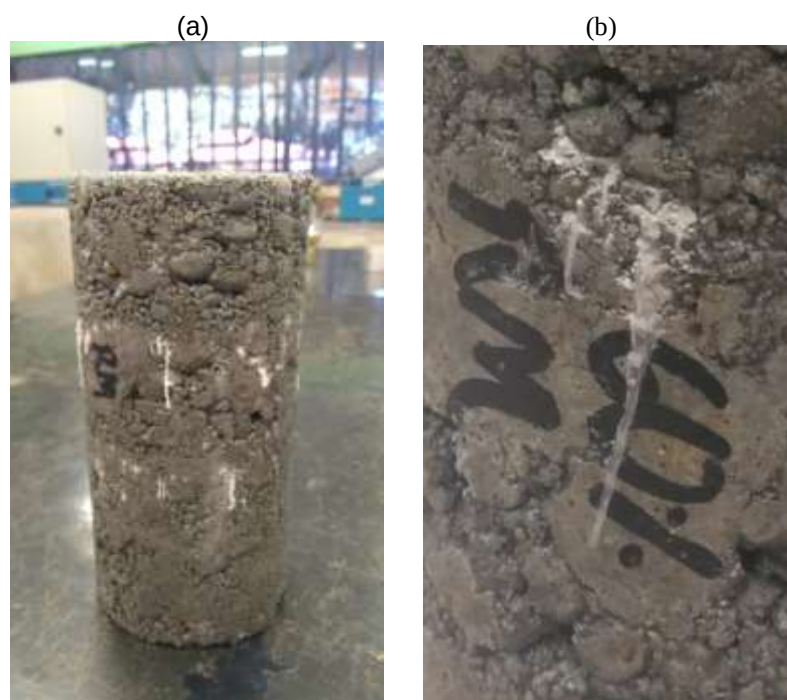
Fonte: Autor (2019)

É possível observar no gráfico 20 que os traços T40 e T60 apresentaram maiores taxas de absorção por imersão e índice de vazios. Em relação ao Traço T0, o Traço T40 apontou um aumento de 34% na absorção por imersão e 24% no índice de vazios, enquanto que o Traço T60 indicou um aumento de 72% na absorção por imersão e 69% no índice de vazios. Para o Traço T20 houve uma redução em relação ao Traço T0 de 6% para a absorção por imersão e 5% para o índice de vazios.

7.5.6 Outros resultados observados

Após o período de 28 dias de cura por imersão em água, o Traço T60, que contém o teor de 60% de agregados de mineração, apresentou externamente patologias de origem química, conforme mostrado nas imagens abaixo. Esse fato está associado às interações existentes entre os minerais constituintes do resíduo de ferroníquel com o cimento utilizado. Após ocorrido esta manifestação patológica, infere-se a necessidade de utilizar cimentos resistentes a sulfatos na dosagem.

Figura 34 - Patologia do Traço T60: (a) Vista completa; (b) Vista Ampliada



Fonte: Autor (2019)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de proporcionar o aproveitamento dos resíduos provenientes da atividade de mineração, o estudo buscou analisar a viabilidade da utilização do resíduo como agregado para o concreto compactado a rolo destinado aos projetos de barragens, avaliando o seu desempenho, quando submetido a diferentes análises laboratoriais. Através dos resultados obtidos por meio do programa experimental mencionado anteriormente, é possível inferir as seguintes considerações:

a) Quanto à composição do resíduo de mineração:

- São classificados como material da classe III – inerte, sendo portanto, indicado para a produção de agregados.

b) Quanto às características dos agregados:

- Os agregados reciclados apresentam características físicas distintas aos agregados convencionais. No ensaio de granulometria, para os agregados de mineração alguns pontos da curva granulométrica situaram-se fora do limite superior da zona utilizável, bem como nenhum dos materiais enquadraram-se na zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

- Em relação à massa específica, o agregado reciclado apontou um valor superior ao agregado convencional, enquanto que para a massa unitária os agregados reciclados indicaram valores inferiores.

c) Quanto à massa específica do concreto fresco:

- Não houve variações significativas entre os traços produzidos.

d) Quanto à resistência à compressão axial:

- O agregado de mineração indicou um bom desempenho em relação à resistência à compressão axial, apontando um aumento de 5,3% para o Traço T20 e 20,2% para o Traço T40 em comparação ao traço sem agregados de mineração. Apenas o Traço T60 apresentou redução, apontando um valor de aproximadamente 40%.

e) Quanto à resistência à tração por compressão diametral:

- Em relação à resistência à tração por compressão diametral o material não sofreu alterações significativas com a incorporação de 20% e 40% do agregado reciclado. Para o Traço T20 houve um aumento de 2,5% em relação ao Traço T0 e

para o Traço T40 um aumento de 5,3%, enquanto que o Traço T60, com 60% de resíduos de mineração, apresentou uma redução significativa de 26,8%.

f) Quanto à resistência ao desgaste:

– Os corpos de provas após submetidos ao ensaio de desgaste apresentaram reduções consideráveis na resistência à compressão. Os traços T0 e T20 indicaram reduções de 10% em relação à resistência inicial, enquanto que os traços T40 e T60, com os maiores teores de agregado reciclado, apontaram redução de 20% e 16%, respectivamente.

g) Quanto à absorção por capilaridade:

– Nessa análise os traços que indicaram maiores percentuais de absorção por capilaridade foram os traços T0 e T60. A aferição da profundidade de ascensão capilar confirma esse fato, apontando uma profundidade de 7,1 cm para o Traço T40 e 9,7 cm para o Traço T60.

h) Quanto à absorção por imersão e índice de vazios:

– O ensaio de absorção por imersão apontou maiores percentuais para o Traço T60, indicando uma taxa de 3,65%, e menores percentuais para o Traço T20 com o valor de 1,98%. Na análise do índice de vazios foi obtida a maior taxa para o Traço T60 com 8,57% enquanto que a menor foi apresentada pelo Traço T20 com a taxa de 4,81%.

i) Análise dos resultados apresentados:

– Diante das informações obtidas infere-se que a incorporação de 40% do agregado de mineração promoveu o melhor desempenho para o concreto. Com base nos resultados levantados, ele apresentou a maior resistência à compressão axial, menor taxa de absorção por capilaridade, boa resistência à tração por compressão diametral, taxas relativamente baixas para absorção por imersão e índice de vazios. No entanto em relação à análise do desgaste foi o traço que apontou maior redução na resistência do concreto.

– A substituição de 60% do agregado convencional por agregado reciclado mostrou-se inviável, por indicar reduções significativas na resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e quando submetido ao desgaste. Além disso, ele apresentou maiores percentuais de absorção por capilaridade, absorção por imersão e índice de vazios. Contudo, nota-se ainda que o elevado teor de agregado

reciclado promoveu também reações químicas que resultaram em patologias no concreto.

Recomendações e sugestões de pesquisas futuras

Para melhor compreensão e confirmação da viabilidade de utilização dos resíduos de mineração para a produção de agregados reciclados sugere-se:

- Realizar o ensaio de desgaste em maiores intervalos de tempo para avaliar com maior confiabilidade o desempenho técnico final e as variações de massa obtidas ao longo do ciclo.
- Produzir corpos de provas com teores intermediários aos percentuais de 40% e 60% e submeter aos ensaios mencionados no programa experimental deste trabalho.
- Realizar um estudo patológico referente à reação química ocorridas nos corpos de provas com 60% de agregado de mineração.
- Analisar a viabilidade econômica da utilização do resíduo de mineração proveniente da cidade de Barro Alto – GO para a produção de agregados reciclados para a cidade de Palmas- TO.
- Analisar a contribuição do agregado reciclado para a contenção de radiação.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, Hugo Manoel Marcato. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, PUC - Rio, Rio de Janeiro, 2004.

ALBUQUERQUE JUNIOR, Fernando Saboya. **“Análise de barragens de enrocamento com face de concreto durante o período de construção e enchimento”**. 1993. 261 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, PUC - Rio, Rio de Janeiro, 1993.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. **Aspectos Sobre o Uso do CCR em Barragens Brasileiras**. In: 7th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC), 7, 2015. Chengdu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2015.

ARMELIN, João Luiz. **Classificação das barragens**. Goiânia, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro. 2006. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado Graúdo – Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água. Rio de Janeiro. 2009. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro. 1998. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro. 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e Argamassa – Determinação da Resistência a Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e Concreto Endurecidos – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica. Rio de Janeiro, 2009. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de Concreto em Laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro. 2009. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16312-1**: Concreto Compactado com Rolo Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro. 2014. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16312-2**: Concreto Compactado com Rolo Parte 2: Preparação em Laboratório. Rio de Janeiro. 2015. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16312-3**: Concreto compactado com Rolo Parte 3: Ensaio de Laboratório em Concreto Fresco. Rio de Janeiro. 2015. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro. 2012. 3p.

BARRO ALTO PRESENTATION, 2012. **Anglo American Barro Alto**.

BRANDT MEIO AMBIENTE. **Relatório de Caracterização da Escória Granulada de Redução**. Belo Horizonte/MG - Brasil, jan 1997.

CAPELLO, Giuliana. **Entulho vira matéria prima: agregados reciclados chegam aos canteiros das construtoras, adquiridos de empresas especializadas ou gerados na própria obra**. Técnica: Pini, São Paulo, v. 14, n. 112, p.32-35, jun. 2006.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 219 p.

CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004). **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 135p.

COUTINO, A. de Sousa. **Fabrico e Propriedades do Betão**. Lisboa: LNEC, 2006. 646 p.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. Oficina dos textos. 352f. 1ª Edição. 2012.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos para pequenas centrais hidrelétricas**. Brasil: Eletrobrás, 2000. 458 p.

FARO, Vítor Pereira. **Mecânica dos Solos – TC 035**. Paraná: UFPR, 2015. 37 slides.

FAUSTINO, Ana Maria. **Análise Numérica**. Departamento de Engenharia Civil, 2004.

FEDRIGO, William; ROSA, Francisco Dalla; NUNEZ, Washington Peres. **Dosagem de Concreto Compactado com Rolo Visando sua Aplicação em Bases e Sub-bases de Pavimentos**. In: COBRAMSEG, 17, 2014, Goiânia.

FREITAS, Marco António Coelho. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Morgenstern-Price e Correia**.

GAIOTO, Nélío. **Introdução ao Projeto de Barragens de Terra e de Enrocamento**. São Carlos: Edusp, 2003. 126 p.

GOMES, Romero César. **Taludes e Movimentos de Massa**. 2011, 35 slides.

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. **O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos**. Brasil: USGS, 2008. 176 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Panorama de Escória de Aciaria no Brasil**. Seminário Internacional de Aplicação da Escória de Aciaria. Belo Horizonte/MG – Brasil – nov 2010.

JOHN, Vanderley M. **Reciclagem de Resíduos na Construção civil**: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, de Engenharia de Construção Civil, PUC USP, São Paulo, 2000.

KUPERMAN, S.C., CAVALCANTI, A.J.C.T., KRUGER, D.A.V., VASCONCELOS, G.R.L., ÁGUAS, M.F.F. **Concreto nas obras de barragens**. In: XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2005, Goiânia. Anais. Goiânia, 2005.

LANÇA, Rui. **Projeto de Investigação Aplicada em Construção: Capítulo III – Tipologias, Condicionantes e Ações em Barragens de Aterro**. Escola Superior de Tecnologia. Universidade do Algarve. CESE em Engenharia Civil. Faro, 1997.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, Eduardo Campos. **Barragens de CCR**. 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/barragens-de-ccr-os-cuidados-da-fiscalizacao-do-concreto-254506-1.aspx>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

MACHADO, A. T. **Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria**. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia de Construção Civil - POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2000.

MANCIO, M. **Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 141p., 2001.

MARANGON, M. **Estado de Tensões e de Equilíbrio dos Solos**. Mecânica dos Solos II – Edição 2018.

MARANGON, M. **Hidráulica dos Solos**. Mecânica dos Solos II – Edição 2018.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Análise de estabilidade de taludes**, Cap 4, 2006.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Barragens de Terra e Enrocamento**, Cap 5, 2004.

MARQUES FILHO, José; TRABOULSI, Maurice Antoine; PAULON, Vladimir Antônio. **Simulação de CCR em laboratório**. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 18, 2005. Curitiba.

MASSAD, Faïçal. **Obras de Terra - Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. Brasil: Oficina de Textos, 2010. 143 p.

MASSUCATO, Carlos José. **UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO À CARVÃO VEGETAL COMO ADIÇÃO NO CONCRETO**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Concentração em Edificações, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MATA-LIMA, Herlander. **Fluxo Bidimensional (Redes de Fluxo)**. Brasil: 2014. 44 slides.

MECCAFERRI. **Manual Técnico: Reforço de Solos**. Brasil: MECCAFERRI do Brasil, 2009. 168 p.

MEIRELLES, Fernando Setembrino Cruz. **Barragens de Terra e Enrocamento**. Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais. Curso Segurança de Barragens, 2012.

MELLO, Flavio Miguez de. **A história das barragens no Brasil, séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta anos do comitê brasileiro de barragens**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 533 p.

MILAGRES, Anderson Nascimento *et al.* Construção da Barragem de Terra na Unidade 3 (Fazenda Escola) da Univiçosa. **Revista Científica Univiçosa**, Viçosa, v. 8, n. 1, p.258-263, jan. 2016.

MILANI FILHO, Luiz. **O uso do concreto compactado com rolo em barragens: tendências futuras.** 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

MT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 096/94: Solos – Determinação da densidade real.**

OLIVEIRA, P. J.; SALLES, F. M. **Concreto compactado com rolo – Características e propriedades.** In: SIMPÓSIO DE OBRAS EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 1. 1995, São Paulo, abr. 1995. p. 187-208.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 385 p.

PÓVOA, Luisa Muylaert de Menezes. **Caracterização geotécnica de um depósito de solo mole em área de baixada localizada em Macaé-RJ.** 2016. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, UENF, Campos dos Goytacazes, 2016.

QUINTAS, Fernando Eduardo Geraldês. **Planeamento da Construção de Barragens de Terra.** 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2002.

RABER, Eduardo; VIEIRA, Guilherme Costenaro; NETO, Sergio Patussi. **CCR – Concreto Compactado com Rolo.** Passo Fundo, 2013.

RACENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland.** 3. ed. EDIPUCRS, 2011.

ROMANINI, Augusto. **Fluxo no Solo –Rede de Fluxo.** Sinop: Universidade do Estado de Mato Grosso, 2016.

SANTOS, Graziella Pereira Pires dos. **UM ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL EM PAVIMENTO RODOVIÁRIO.** 2013. 136 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

SAYÃO, A., 2009, “**Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento**”. Curso de Mestrado da PUC -RJ, Rio de Janeiro.

SILVA, Júlio C. L. da. **Enchentes e deslizamentos de terra no Brasil: Principais Causas**. 2013. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/geografia/enchentes-deslizamentos-terra-no-brasil-principais-causas.htm>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

SILVA, E. A., MENDONÇA, R. L., DOBELE, C. H. M., SIQUEIRA, M., SOARES, J.B. (2003). **Uma experiência Inédita: Uso da Escória de Aciaria LD em Todas as Camadas do Pavimento**. In: Reuniao Anual de Pavimentacao, 34., Campinas. Anal... Campinas: ABPv, 2003. p. 238-244.

SOUSA, Jorge Almeida e. **Reabilitação e Reforço de Estruturas**. Portugal: Instituto Superior Técnico, 2012.

SOUZA, Mariana Miranda de. **Estudo para o Projeto Geotécnico da Barragem de Alto Irani, SC**. 2013. 139 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

STEPHENS, Tim. **Manual sobre pequenas barragens de terra; guia para a localização, projeto e construção**. Roma: FAO, 2011. 120 p.

TEIXEIRA, Christiano Faria. **Análise dos Recalques de um Aterro Sobre Solos Muito Moles da Barra da Tijuca – RJ**. 2012. 326 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 2nd Ed., John Wiley & Sons Pub., New York, 729p.

VAN IMPE, W. F. **Soil improvement techniques and their evolution**. Rotterdam: Balkema, 1989. 125 p.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.** *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 6, p. 1187-1194, june 2005.

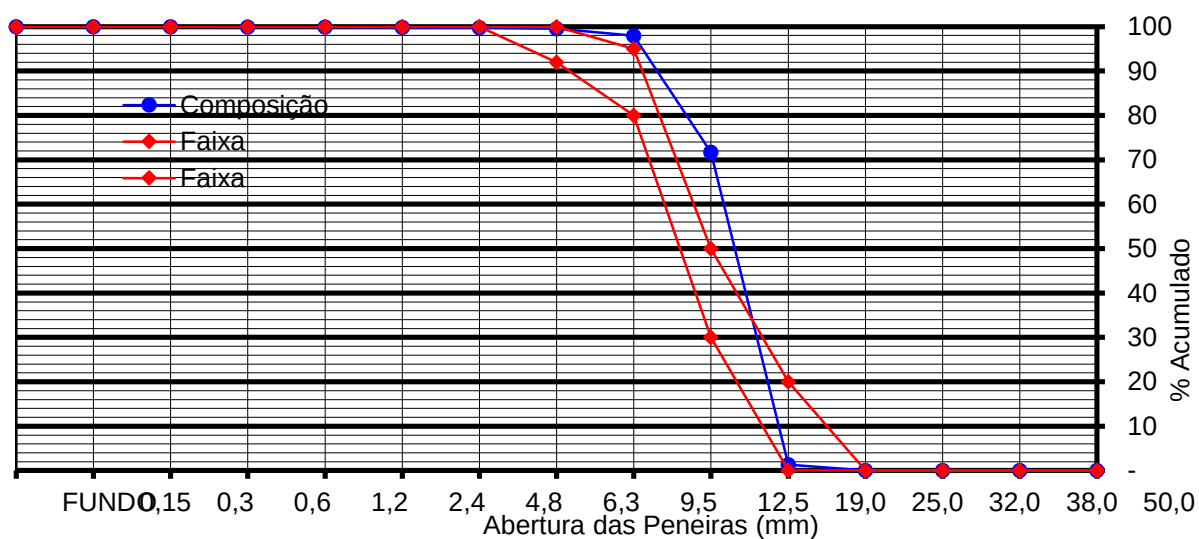
APÊNDICE A - Caracterização dos agregados graúdos

Tabela 13 – Composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira (mm)	Agregado Graúdo	
	% retida	% retida acumulada
75	-	-
50	-	-
37,5	-	-
25	-	-
19	1,34	1,34
12,5	70,4	71,74
9,5	26,2	97,94
6,3	1,6	9,54
4,75	0,22	9,76
2,36	0,09	9,85
1,18	0,03	9,88
0,6	0,06	9,94
0,3	0,02	0,96
0,15	-	9,96
<0,15	-	9,96
Total		
Dimensão Máxima Característica (mm)	19	
Módulo de Finura	8,7	

Fonte: Autor (2019)

Gráfico 21 – Curva granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2019)

Tabela 14 – Caracterização do agregado graúdo

Massa Específica (g/cm ³)			Massa Unitária (g/cm ³)		Índice de Vazios (%)		Absorção (%)
Agregado seco	Saturado Superfície Seca	Média	Estado Solto	Estado Compactado	Estado Solto	Estado Compactado	
2,36	2,35	2,35	1,28	1,4	45,58	40,36	0,29

Fonte: Autor (2019)

APÊNDICE B – Massa específica do cimento

Figura 35 - Ensaio de massa específica do cimento



Fonte: Autor (2019)

Tabela 13 – Massa específica do cimento

Massa Específica NM 23/2000		
Massa do material ensaiado	(g)	60
Volume deslocado pela massa do material ensaiado	(cm ³)	19,1
Massa específica	(g/cm ³)	3,14

Fonte: Autor (2019)

APÊNDICE C – Orçamento

Tabela 15 – Orçamento da pesquisa

DESPESAS				
1. Materiais de Consumo e Serviços	Código Sinapi	Quant.	Valor Unitário	Valor Total
Pedra britada n. 1 (9,5 a 19 mm) posto pedreira/fornecedor, sem frete	00004721	0,375 m³	74,71	28,02
Areia fina - posto jazida/fornecedor (retirado na jazida, sem transporte)	00000366	0,201 m³	70,00	14,07
Cimento Portland composto CP- II - 32 (saco de 50 kg)	00010511	4 sacos	27,11	108,44
Recipiente para armazenamento dos materiais	Mercado	2 unidades	110,00	220,00
Aluguel de Fôrmas	Mercado	110 unidades	2,00	220,00
Retificação de corpos de provas	Mercado	66 unidades	2,00	132,00
Laboratório de Máquinas para produção dos Corpos de provas	Disponibilizado pela instituição			
Laboratório de Solos e materiais para ensaios de caracterização dos agregados	Disponibilizado pela instituição			
Sub-Total de despesas				722,53
3. Taxa Administrativa				
Percentual de 15%				
ISS+Cofins+PIS+CPMF= 7%				
TOTAL DAS DESPESAS				881,48

Fonte: Autor (2019)