UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

CARLOS MAGNO SOSSAI ANDRADE

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE COPRODUTO DE ACIARIA KR

> VITÓRIA – ES ABRIL/2018

CARLOS MAGNO SOSSAI ANDRADE

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE COPRODUTO DE ACIARIA KR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D.Sc. Patrício José Moreira Pires.

VITÓRIA – ES ABRIL/2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP) (Biblioteca Setorial Tecnológica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Andrade, Carlos Magno Sossai, 1990-

A553b Avaliação de desempenho mecânico e microestrutural da brita graduada tratada com cimento com incorporação de coproduto de aciaria KR / Carlos Magno Sossai Andrade. – 2018. 104 f. : il.

> Orientador: Patrício José Moreira Pires. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

 Rodovias – Pavimentos. 2. Aço – Dessulfuração – Escória.
 Materiais compostos. 4. Brita graduada tratada com cimento (BGTC). 5. Coproduto de aciaria. I. Pires, Patrício José Moreira.
 Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico.
 Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE COPRODUTO DE ACIARIA KR

Carlos Magno Sossai Andrade

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia 16 de abril de 2018 por:

Prof. Or. Patrício José Moreira Pires Doutor em Engenharia Civil Orientador - UFES

Profa. Dra. Geilma Lima Vieira Doutora em Engenharia Civil Examinadora Interna - UFES

our

Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes Doutor em Engenharia Civil Examinador Externo - PUC-Rio

6

Ricardo Filipe Teixeira Moreira Engenharia Industrial Mecânica Examinador Externo - CEFET – RJ

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos materiais constituintes de uma via5
Figura 2 - Equipamento triaxial de carga repetida7
Figura 3 - Estrutura típica de um pavimento semirrígido10
Figura 4 - Influência do tipo de agregado, quantidade de finos e teor de cimento na RCA da BGTC
Figura 5 - Desenvolvimento de esforços de tração indireta nas camadas inferiores de pavimentos
Figura 6 - Esquema de produção do aço14
Figura 7 - Geração e destinação de resíduos e coprodutos em 201315
Figura 8 - Destinação e aplicação de escória de alto-forno16
Figura 9 - Destinação e aplicação de escória de aciaria16
Figura 10 - Mistura feita pela rotação de pás19
Figura 11 - Coproduto KR como fornecido24
Figura 12 - Programa experimental – Caracterizações mecânica e microestrutural
Figura 13 - Moldagem e acabamento dos corpos de prova
Figura 14 - Retificação e armazenamento em câmara úmida
Figura 15 - Prensa <i>Amsler</i>
Figura 16 - Curvas Granulométricas: Agregado granítico
Figura 17 - Curva granulométrica - Coproduto KR
Figura 18 - Curva de compactação para PTM38
Figura 19 - Estufa do ensaio de potencial expansivo
Figura 20 - Curva de expansão PTM39
Figura 21 - Comparação entre o difratograma experimental para a amostra do coproduto KR com os padrões de difração para as fases minerais identificadas42

٧

Figura 22 – Curvas granulométricas de composições de BGS e BGTCKR44
Figura 23 - Curvas de compactação para as misturas45
Figura 24 - Rompimento do BGTC à esquerda e BGTCKR40 à direita aos 28 dias47
Figura 25 - Gráfico do ganho de RCA48
Figura 26 - Relação Tensão-Deformação para tempo de cura de 28 dias49
Figura 27 - Relação Tensão-Deformação para tempo de cura de 56 dias49
Figura 28 - Relação Tensão-Deformação para tempo de cura de 224 dias50
Figura 29 - Instantes do rompimento dos corpos de prova para um mesmo nível de deformação das misturas de BGTC 4% e BGTCKR20 com um período de cura de 224 dias
Figura 30 – Comparação de RCA do Grupo A com a BGTC padrão e BGTCKR2052
Figura 31 - Comparação de RCA do Grupo B com a BGTC 4% e BGTCKR2053
Figura 32 - Comparação de RCA entre o Grupo C54
Figura 33 - Comparação de RCA entre o Grupo D55
Figura 34 - Rompimento diametral do BGTC à esquerda e BGTCKR40 à direita aos 28 dias
Figura 35 - Gráfico do ganho de RTCD56
Figura 36 - Realização do ensaio de módulo de resiliência57
Figura 37 - Curva para obtenção dos coeficientes para modelo A - Tensão confinante
Figura 38 - Curva para obtenção dos coeficientes para modelo B - Tensão desviadora
Figura 39 – Curva do Módulo de Resiliência do BGTC 4%59
Figura 40 - Curva do Módulo de Resiliência do BGTCKR1059
Figura 41 - Curva do Módulo de Resiliência do BGTCKR2060

Figura 42 - Curva do Módulo de Resiliência do BGTCKR30	60
Figura 43 - Curva do Módulo de Resiliência do BGTCKR40	61
Figura 44 - Comparativo entre os resultados obtidos de MR (Ensaio e Modelo C). 63
Figura 45 - Comparação da RCA e MR para o BGTC 4% e BGTCKR20	63
Figura 46 - Amostras e equipamento de metalização	64
Figura 47 – Equipamento Superscan SS-550 e amostras	65
Figura 48 - BGTC4 - 7d esquerda, 90d à direita – ZOOM ~40x	65
Figura 49 - BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita – ZOOM ~40x	66
Figura 50 - BGTC4 - 7d esquerda, 90d à direita - ZOOM 400x	66
Figura 51 - BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x	67
Figura 52 - BGTC4 - 7d esquerda, 90d à direita - ZOOM 1000x	67
Figura 53 - BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 1000x	67
Figura 54 - BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 2000x	68
Figura 55 - BGTC4 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x	69
Figura 56- BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x	69
Figura 57 – BGTC3 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x	78
Figura 58 – BGTC5 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 40x	78
Figura 59 – BGTC5 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 100x	79
Figura 60– BGTC5 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x	79
Figura 61 – BGTCKR10 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x	79
Figura 62 - BGTCKR10 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x	80
Figura 63- BGTCKR10 - 90d direita - ZOOM 15000x	80
Figura 64 – BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 40x	80
Figura 65 - BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 100x	81
Figura 66 - BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x	81

Figura 67- BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x	81
Figura 68 - BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 15000x	82
Figura 69 – BGTCKR40 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 40x	82
Figura 70 - BGTCKR40 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x	82
Figura 71 - BGTCKR40 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x	83
Figura 72 - BGTCKR40 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 10000x	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas granulométricas para BGTC	9
Tabela 2 – Caracterização química do coproduto KR	20
Tabela 3 - Programa experimental.	25
Tabela 4 – Composição das misturas	26
Tabela 5 – Composições com variações	27
Tabela 6 - Exigências para classificação como material pozolânico	29
Tabela 7 – Resultados das caracterizações físicas da brita	36
Tabela 8 – Resultados das caracterizações físicas do coproduto KR	36
Tabela 9 - Resultado da análise química por fluorescência de raios-X	41
Tabela 10 - Resultado dos ensaios de pozolanicidade	41
Tabela 11 - Faixa granulométrica da "graduação B" de BGS para utilização BGTC	em 44
Tabela 12 - Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima das mistu	ras. 45
Tabela 13 - Resistência à compressão axial	46
Tabela 14 - Incremento da RCA com o tempo.	47
Tabela 15 - Resistência à compressão axial das composições com variações	52
Tabela 16 - Resistência à tração por compressão diametral	55
Tabela 17 - Coeficientes dos modelos de MR aplicados	61
Tabela 18 - Resultados de MR para valores dados	62
Tabela 19 - Ensaio de lixiviação e solubilização - Parâmetros orgânicos	84
Tabela 20 - Ensaio de lixiviação e solubilização - Parâmetros inorgânicos	85
Tabela 21 - Informações extras dos ensaios de lixiviação e solubilização	86
Tabela 22 - Tensões de referência utilizadas no ensaio	87

Tabela 23 - Resultados do ensaio de MR para o BGTC padrão 4%	.87
Tabela 24 - Resultados do ensaio de MR para o BGTCKR10	.88
Tabela 25 - Resultados do ensaio de MR para o BGTCKR20	.88
Tabela 26 - Resultados do ensaio de MR para o BGTCKR30	.89
Tabela 27 - Resultados do ensaio de MR para o BGTCKR40	.89

SUMÁRIO

A	GRA	ADECIMENTOS	IV
LI	STA	DE FIGURAS	v
LI	STA	DE TABELAS	VIII
SI	JMÁ	ÁRIO	X
R	ESU	IMO	XIV
A	зѕт	RACT	xv
1		INTRODUÇÃO	1
	1.1	Objetivo	2
	1.2	Organização do trabalho	2
2		REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
	2.1	Pavimentação	4
		2.1.1 Dimensionamento de pavimento e Módulo de resiliência	6
	2.2	Brita graduada tratada com cimento	8
		2.2.1 Dosagem e execução da BGTC	10
		2.2.2 Características mecânicas da BGTC	11
	2.3	Produção do aço, resíduos e coprodutos	14
		2.3.1 A produção de aço e o meio ambiente	17
		2.3.2 Escória KR	18
		2.3.3 Estado da arte da escória de aciaria	20
3		MATERIAIS E MÉTODOS	23
	3.1	Materiais	23
		3.1.1 Brita	23
		3.1.2 Cimento	23
		3.1.3 Coproduto KR	24

	3.2 Métodos	24
	3.2.1 Ensaios de caracterização física	27
	3.2.2 Ensaios de caracterização química	28
	3.2.2.1 Classificação dos resíduos sólidos	28
	3.2.2.2 Fluorescência de raios-X	28
	3.2.2.3 Pozolanicidade	28
	3.2.3 Ensaios de caracterização mineralógica por Difração de raios-X	29
	3.2.4 Ensaios de caracterização mecânica	30
	3.2.4.1 Compactação	30
	3.2.4.2 Moldagem e rompimento por compressão	30
	3.2.4.3 Módulo de resiliência	34
	3.2.5 Ensaio de avaliação microestrutural através de Microscopia Eletrô	ònica
	de Varredura (MEV)	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas	36 36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas 4.1.1 Análise granulométrica	36 36 37
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas 4.1.1 Análise granulométrica 4.1.2 Avaliação do potencial expansivo. 	36 36 37 37
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas 4.1.1 Análise granulométrica 4.1.2 Avaliação do potencial expansivo 4.2 Caracterização química 	36 36 37 37 40
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36 36 37 37 40 40
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas 4.1.1 Análise granulométrica 4.1.2 Avaliação do potencial expansivo 4.2 Caracterização química 4.2.1 Classificação dos resíduos sólidos 4.2.2 Fluorescência de raios-X 	36 37 37 40 40 40
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36 37 37 40 40 40 41
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas 4.1.1 Análise granulométrica 4.1.2 Avaliação do potencial expansivo 4.2 Caracterização química 4.2.1 Classificação dos resíduos sólidos 4.2.2 Fluorescência de raios-X 4.2.3 Pozolanicidade 4.3 Caracterização mineralógica por Difração de raios-X 	36 37 37 40 40 40 41 41
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas 4.1.1 Análise granulométrica 4.1.2 Avaliação do potencial expansivo 4.2 Caracterização química 4.2.1 Classificação dos resíduos sólidos 4.2.2 Fluorescência de raios-X 4.2.3 Pozolanicidade 4.3 Caracterização mineralógica por Difração de raios-X 4.4 Caracterização mecânica 	36 37 37 40 40 40 41 42 43
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES 4.1 Caracterizações físicas 4.1.1 Análise granulométrica 4.1.2 Avaliação do potencial expansivo 4.2 Caracterização química 4.2.1 Classificação dos resíduos sólidos 4.2.2 Fluorescência de raios-X 4.2.3 Pozolanicidade 4.3 Caracterização mineralógica por Difração de raios-X 4.4 Caracterização mecânica 4.4.1 Compactação 	36 36 37 40 40 40 41 42 43 44

	4.4.2.1 Resistência à Compressão Axial	46
	4.4.2.2 Resultados das composições com variações	52
	4.4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral	55
	4.4.3 Módulo de Resiliência	57
	4.5 Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura.	64
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	70
	5.1 Sugestões para trabalhos futuros	71
6	REFERÊNCIAS	73
A	PÊNDICE A – MICROGRAFIAS DO MEV	78
A	PÊNDICE B – CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	84
A	PENDICE C – RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA	87

RESUMO

ANDRADE, Carlos Magno Sossai. **Avaliação de desempenho mecânico e microestrutural da Brita Graduada Tratada com Cimento com incorporação de coproduto de aciaria KR.** 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2018. Orientador: Prof. D.Sc. Patrício José Moreira Pires.

O Brasil é um país onde o transporte de cargas está majoritariamente concentrado nas rodovias, mas apesar da sua importância, a maior parte da malha de rodovias federais não é pavimentada. Essa deficiência possui diversas raízes, sendo uma delas o custo de construção e manutenção das vias com agregados naturais. Esse trabalho alia a necessidade de se utilizar da melhor maneira possível os materiais disponíveis, levando em consideração suas características mecânicas e microestruturais. As indústrias siderúrgicas passaram a gerar um coproduto conhecido como escória do processo de dessulfuração do Reator Kambara (escória KR), que é produzida no processo de dessulfuração do ferro gusa líquido. O emprego desse material para fins de pavimentação tem ganhos ambientais, tanto por dar uma destinação adequada ao material, quanto por se reduzir a necessidade de extração e beneficiamento de agregados naturais. Este trabalho avalia a incorporação da escória KR nas proporções de 10, 20, 30 e 40% em Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), material largamente utilizado em camadas de base de pavimentos no País. Para isso, foi desenvolvido um programa experimental para se determinar as características mecânicas por ensaio de compressão e módulo de resiliência, características mineralógicas por ensaio de difração de raios-X e características microestruturais desse novo material com ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Foi constatado que o material com incorporação de escória KR possui características recomendadas para aplicação em base de rodovias, apresentando resultados de módulo de resiliência superiores ao da BGTC padrão, parâmetro esse que é de fundamental importância no dimensionamento de pavimentos.

Palavras-chave: Rodovias – Pavimentos. Aço – Dessulfuração – Escória. Materiais

compostos. Brita graduada tratada com cimento (BGTC). Coproduto de aciaria.

ABSTRACT

ANDRADE, Carlos Magno Sossai. **Mechanical and microstructural performance evaluation of Cement Treated Crushed Rock with incorporation of KR slag**. 2018. 104 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2018.

Brazil is a country where freight transport is mostly concentrated on highways, but despite its importance, most of the federal highway is not paved. This deficiency has several roots, one of which is the cost of construction and maintenance using natural aggregates. This work combines the need of using available materials, taking into account their mechanical and microstructural characteristics. The steel industry started to generate a by-product known as Kambara Reactor slag (KR slag), which is produced in the process of desulphurisation of liquid pig iron. The use of this material for the purposes of paving has environmental gains, both to give a suitable destination to the material, and to reduce the need for extraction and processing of natural aggregates. This work evaluates the incorporation of KR slag in the proportions of 10, 20, 30 and 40% in Cement Treated Crushed Rock (CTCR), a material widely used in Brazil for the base layers of pavements. For this, an experimental program was developed to determine the mechanical characteristics by compression test and resilient modulus, mineralogical characteristics by X-ray diffraction test and microstructural characteristics of this new material with scanning electron microscopy. It was verified that the material with incorporation of KR slag has recommended characteristics for application in road base, presenting results of resilient modulus superior to the one of the standard CTCR, parameter of fundamental importance in the design of pavements.

Keywords: Roads – Pavements. Steel – Dessulfuration – Slag. Composite materials.

Cement treated crushed rock (CTCR). Stell by-products.

1 INTRODUÇÃO

Estradas e rodovias possuem grande importância no desenvolvimento do País. De acordo com Bernucci *et al.* (2010) esse modal abarca mais da metade de todo o transporte de cargas no Brasil, porém, a conservação e a construção de novas vias não acompanham a real necessidade do transporte. Levantamentos da Confederação Nacional de Transportes constatam que aproximadamente 80% da malha federal não apresenta vias pavimentadas (CNT, 2016). Esse descaso com a conservação de uma via de boa qualidade promove maiores custos de manutenção tanto da rodovia quanto dos veículos que por nela trafegam, intensificando o aumento dos custos de frete e tudo que está relacionado ao transporte de cargas.

O dimensionamento correto da via reflete diretamente em sua qualidade. Com o avanço da tecnologia e das técnicas de construção, a evolução dos métodos de dimensionamento de um pavimento tornou-se fundamentais para a qualidade das rodovias. Inicialmente, o dimensionamento considerava apenas as características da camada de rolamento e a capacidade de penetração da camada asfáltica, atualmente é mais elaborado e considera o pavimento como uma estrutura constituída de diversas camadas (SENÇO, 1997). Os métodos modernos de dimensionamento consideram ainda o tráfego diário médio de veículos, a carga em transporte, as condições climáticas regionais e a finalidade da via, além de considerar os mais diversos tipos de materiais para sua constituição.

A busca pela utilização de novos materiais se justifica no Brasil e no mundo, devido a oferta de recursos minerais cada vez mais escassa e também pela criação de normas reguladoras cada vez mais rígidas de exploração mineral. De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABr, 2014), o País é um dos maiores produtores de aço do mundo, e consequentemente um dos principais geradores de resíduos e coprodutos nas indústrias siderúrgicas. Em 2013 a geração desses resíduos e coprodutos atingiram um total de 17,7 milhões de toneladas. Aproximadamente 6% desse material ainda não possui destinação adequada e é armazenada em estoques.

Este trabalho visa aproveitar a disponibilidade de um desses resíduos siderúrgicos, a escória KR (também conhecida como coproduto KR), e aplicá-lo na construção de

rodovias de forma a atender as normativas existentes no país para as camadas de base de pavimentos. O estudo toma a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), largamente utilizada no país como base de rodovia, e faz a incorporação do coproduto KR de forma a manter ou melhorar as propriedades do BGTC observando as propriedades do coproduto que vem sendo descritas na literatura atual.

1.1 Objetivo

A pesquisa tem por objetivo determinar as características mecânicas e microestruturais da Brita Graduada Tratada com Cimento com substituição parcial do agregado por coproduto KR.

Do objetivo geral, estruturam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física, química e mineralógica dos insumos estudados;
- Realizar ensaios de caracterização mecânica e microestrutural das misturas de BGTC padrão e das misturas com diferentes teores de incorporação de coproduto KR;
- Analisar a influência da incorporação do coproduto KR em diferentes teores e comparar com os resultados obtidos com o BGTC padrão.

1.2 Organização do trabalho

Além do presente capítulo de introdução, essa dissertação está organizada com os seguintes capítulos:

- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica sobre a situação dos pavimentos brasileiros, a utilização da brita graduada tratada com cimento, e a fabricação de aço e consequente geração de resíduos e coprodutos pela indústria siderúrgica;
- Capítulo 3: Aponta os materiais utilizados e a metodologia de pesquisa seguida neste trabalho;

- Capítulo 4: Expõe os resultados obtidos e as análises de todos os ensaios realizados no programa experimental;
- Capítulo 5: Descreve as conclusões obtidas através das análises realizadas ressaltando as principais contribuições da pesquisa, assim como sugestões para trabalhos futuros;
- Capítulo 6: Indica as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentação

A pavimentação de estradas e rodovias tem um peso importante no desenvolvimento do Brasil, pois o modal rodoviário representa aproximadamente 60% do transporte de cargas (BERNUCCI *et al.*, 2010). Apesar de sua importância, levantamentos da Confederação Nacional de Transportes (CNT) constatam que 78,6% da malha federal não apresenta vias pavimentadas (CNT, 2016). Além do baixo conforto imputado aos usuários, vias de baixa qualidade acabam acarretando em maiores custos de manutenção e do transporte no País.

A qualidade de um pavimento está diretamente ligada ao dimensionamento da via, e a evolução dos métodos de dimensionamento remonta aos anos 30 nos Estados Unidos da América (EUA). Os primeiros métodos consideravam apenas as características da camada de rolamento e a capacidade de penetração da camada asfáltica. Estudos subsequentes realizados no Canadá e na extinta União Soviética consideravam também o comportamento elastoplástico do concreto asfáltico. A partir de 1943, começou-se a considerar o dimensionamento dos pavimentos como um sistema constituído de várias camadas, o que é utilizado até hoje (SENÇO, 1997). Os métodos de dimensionamento em várias camadas consideram o tráfego diário médio de veículos, a carga em transporte, as condições climáticas regionais e a finalidade da via, além de considerar os mais diversos tipos de materiais para sua constituição.

Para atender às solicitações impostas pelo tráfego, a estrutura é constituída de várias camadas que devem suportar as tensões verticais e distribuí-las, limitando também as deformações de maneira a garantir o desempenho da via (CNT, 2016).

Tendo em vista a melhoria das condições das rodovias, Gonçalves (2016) afirma que o estudo de novas composições e novas técnicas construtivas é necessário para melhorar as condições de trafegabilidade, almejando a redução de custos tanto na implantação da via, quanto em sua manutenção e em sua utilização no transporte de cargas.

De acordo com Senço (1997), os pavimentos podem ser classificados como pavimentos rígidos ou flexíveis conforme o material empregado na sua composição

(Figura 1), o primeiro com características pouco deformáveis constituído principalmente de concreto de cimento, enquanto que o outro possui características de suportar deformações até um certo limite sem se romper.



O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2006) classifica os pavimentos em:

 Rígido: o revestimento que possui uma rigidez elevada em relação às camadas inferiores, de forma a absorver praticamente todas as tensões impostas pelo tráfego.
 Tem-se como exemplo o pavimento constituído por lajes de concreto Portland.

- Flexível: a estrutura em que todas as camadas, sob um carregamento aplicado, sofrem deformação elástica significativa, distribuindo a carga em parcelas aproximadamente iguais entre seus componentes. Pavimentos com base granular (brita graduada, macadame) ou com base sobre solo pedregulhoso revestida por camada asfáltica.

 Semirrígido: é caracterizado por uma base cimentada por algum tipo de aglutinante, como por exemplo a brita graduada tratada com cimento como base ou sub-base, revestida por uma camada asfáltica.

2.1.1 Dimensionamento de pavimento e Módulo de resiliência

Segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1996) o dimensionamento de pavimentos no Brasil até a década de 70 era norteado principalmente pelos valores do ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC), que considera a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático. De acordo com Marques (2004) esses métodos de dimensionamento eram empíricos, e buscavam primordialmente uma segurança maior contra a ruptura plástica dos subleitos. Porém, foi observado que a fadiga das camadas dos pavimentos ocasionadas pela solicitação dinâmica do tráfego necessitava de um estudo mais aprofundado.

Segundo Motta (1991), as primeiras contribuições em termos de análises para os solos brasileiros foram dadas por Previtera (1974) e Preussler (1978), e também os primeiros resultados a partir da utilização de parâmetros de módulo de resiliência do País. A partir dessa época, uma intensa cooperação do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) com o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) permitiu uma análise de diversas rodovias federais que apresentavam situações críticas de comportamento estrutural, fornecendo dados para o desenvolvimento de um método de projeto de reforço de pavimentos flexíveis com base nas deformações resilientes.

A introdução de parâmetros de Módulo de Resiliência permitiu avaliar o comportamento estrutural até então não explicado pelos métodos clássicos de carga estática, considerando a análise da tensão-deformação da estrutura viária e a previsão dos modelos através de ensaios de laboratório (DNER, 1996).

A norma brasileira que estabelece um método para determinação do módulo de resiliência de solos, para projeto de pavimentos flexíveis, é a DNIT-ME 134 (2010). Esse método prescreve o modo pelo qual se determina os valores do módulo de resiliência de solos para várias tensões aplicadas, utilizando o equipamento triaxial de carga repetida (Figura 2).

Métodos teóricos multicamadas foram criados e com o aperfeiçoamento das técnicas computacionais foi possível o aparecimento de métodos com bases mecanísticas. A racionalização dos métodos de dimensionamento considera a análise dos materiais a

6

partir de ensaios que reproduzam o estado de tensões e condições ambientais a que eles serão submetidos. Segundo Motta (1991), os métodos mecanísticos de dimensionamento utilizam os parâmetros de tensão-deformação do pavimento para projetar uma estrutura viária.



Marques (2004) afirma que os métodos de dimensionamento mais utilizados atualmente são os analisados a seguir, os quais levam em conta os parâmetros de deformabilidade dos materiais, em especial o Módulo de resiliência:

Método da AASHTO

Até 1993 o método da AASHTO era empírico e foi baseado em critérios de desempenho obtidos de uma pista experimental. Esse método foi criado a partir do pressuposto que o rompimento de um pavimento não é súbito, ou seja, que a ação do tráfego afeta progressivamente a estrutura à medida que ela é solicitada (SENÇO,

1997). A pista experimental foi construída em 1956 e o primeiro guia para dimensionamento de pavimentos foi publicado em 1961. Em 1972, 1981 e 1986 foram feitas revisões, e então foi lançado em 1993 um guia baseado em equações de desempenho da AASHO (antiga AASHTO). De acordo com Marques (2004), essa última versão correlacionava os coeficientes estruturais com o módulo de resiliência, o que levava a calcular as espessuras das camadas de acordo com o material a ser empregado.

Método do DNER

O método do DNER foi criado em 1966 a partir de uma adaptação do método do Corpo de Bombeiros do Exército dos EUA pelo Prof. Murilo Lopes de Souza (MARQUES, 2004). Nesse método são levados em consideração o conceito de equivalência estrutural e fator climático, além do tráfego que é tratado pelo número equivalente de operações (N) de um eixo tomado como padrão.

O método mais atual para dimensionamento de pavimentos flexíveis é baseado em um modelo de resiliência, utilizando-se de uma análise mecanística que calcule a deflexão máxima prevista de uma estrutura a partir de uma expectativa de vida de fadiga. Esse método leva em conta o tipo de subleito e a expectativa de tráfego futuro para calcular o valor estrutural da camada betuminosa, levando-se em conta o comportamento elástico-linear dos solos e materiais granulares. O procedimento considera a deflexão na superfície e a diferença entre as tensões horizontal de tração e vertical de compressão, itens relacionados com a vida de fadiga do pavimento, e também a tensão vertical no subleito que está relacionada com as deformações plásticas e permanentes. A resiliência excessiva da estrutura é considerada pela limitação da espessura máxima da camada granular e pelo cálculo da espessura mínima do solo argiloso de baixo grau de resiliência (DNER, 1996).

2.2 Brita graduada tratada com cimento

O objeto de pesquisa desse trabalho, a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), pode ser vista como uma Brita Graduada Simples (BGS) com adição de cimento numa proporção que varia de 3 a 5% em peso como especifica a norma NBR 12.261 (ABNT, 2013). A norma ES-P 16 (DER-PR, 2005) define Brita Graduada Tratada com Cimento

8

como uma camada de base, ou sub-base, composta por mistura de produtos de britagem, cimento e água, adequadamente compactada e submetida a processo eficiente de cura. Além das duas normativas supracitadas, a DER-SP ET-DE-P00-009_A (2005) também estabelece limites de faixa granulométrica da Brita Graduada Simples para fins de utilização como Brita Graduada Tratada com Cimento, como apresentado na Tabela 1. A NBR 12.261 (ABNT, 2013) cita a NBR 11.803 (ABNT, 2013) como referência para a faixa granulométrica.

Tabela 1 - Faixas granulométricas para BGTCNBR 11.803DER-SPDER-SPDER-SP

% Descente		NBR 2	11.803		DEF	R-SP	DER-PR					
/0 F assance	Gradua	ação A	Gradua	ação B	Fa	ixa	Fai	xa 1	Fai	xa 2	Fai	xa 3
(11111)	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
50	100	100	-	-	-	-	100	100	-	-	-	-
37,5	90	100	-	-	100	100	90	100	100	100	100	100
25,4	-	-	100	100	90	100	-	-	-	-	100	100
19,1	50	85	90	100	75	95	50	85	60	95	88	100
9,5	34	60	80	100	45	64	35	65	40	75	55	75
4,8	25	45	35	55	30	45	25	45	25	60	41	56
2	-	-	-	-	18	33	18	35	15	45	30	44
0,42	8	22	8	25	7	17	8	22	8	25	15	25
0,18	-	-	-	-	1	11	-	-	-	-	-	-
0,075	2	9	2	9	0	8	3	9	2	10	2	7

Fonte: NBR 11.803 (ABNT, 2013), DER-SP ET-DE-P00-009_A (2005), DER-PR ES-P16-05 (2005).

A BGTC tem sido bastante utilizada desde o final da década de 70 no Brasil principalmente em vias de alto volume de tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2010). Esse material é geralmente empregado em bases de rodovias com revestimento betuminoso e sub-bases de vias com pavimentos de concreto.

Inicialmente a BGTC era empregada nas camadas de base utilizando a Brita Graduada Simples como sub-base. Porém, foi observado que nessa configuração a camada de rolamento apresentava trincas e fissuras decorrentes da retração devido à cura do cimento na BGTC. De forma que se tem aplicado com frequência a BGTC na camada de sub-base e a BGS como base, de forma a evitar a reflexão de trincas na camada de rolamento da via. Esse tipo de estrutura é conhecido como pavimento semirrígido "invertido" (Figura 3), por conta da inversão dos materiais de base e sub-base dissipando as retrações na camada de Brita Graduada Simples poupando a camada de rolamento da via (BERNUCCI, 2010).



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2010)

2.2.1 Dosagem e execução da BGTC

A norma NBR 12.261 (ABNT, 2013) estabelece que, após definida a faixa de utilização da BGS e o teor de cimento estimado em 4%, deve-se proceder ao ensaio de compactação (ABNT NBR 7.182) empregando a energia intermediária, determinando assim a massa específica seca máxima (ρ_{dmax}) e a umidade ótima ($w_{\delta t}$). A moldagem dos corpos de prova (CP) deve consistir em 3 CPs com teor de cimento utilizado no ensaio de compactação, além de mais 6 exemplares, sendo 3 com o teor de cimento um ponto percentual abaixo e 3 com um ponto percentual acima do executado no ensaio de compactação. Os corpos de prova devem ser executados em molde cilíndrico metálico, com dimensões de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, em cinco camadas de compactação, cada uma delas com 66 golpes do soquete grande, o que corresponde à energia intermediária de compactação.

A norma estipula que após 7 dias de cura, os exemplares devem ter uma Resistência à Compressão Axial (RCA) situada entre 3,5 MPa e 8,0 MPa, de forma a se estabelecer o teor de cimento a ser utilizado na execução em campo. Caso a norma não seja atendida, deve ser realizada outra dosagem até que os requisitos sejam obedecidos.

A norma NBR 12.262 (ABNT, 2013) estabelece as diretrizes para execução de base e sub-base utilizando-se BGTC. A mistura deve ser feita em usina com o teor de cimento e o de umidade determinados na dosagem, o transporte deve ser feito com caminhões cobertos para não haver alteração no teor de umidade. Em sua aplicação deve ser utilizado um distribuidor autopropulsor em uma espessura, de modo que quando compactada atinja a espessura de projeto.

A compactação deve ser iniciada pelas bordas, e em locais inacessíveis ao rolo compressor devem ser utilizados rolos vibratórios portáteis. O acabamento pode ser feito com rolo compressor de roda lisa, de pneus ou metálico. A espessura da camada acabada deve estar nos limites mínimo e máximo de 10 e 15 centímetros, caso o projeto especifique camada com espessura superior a 15 centímetros, ela deve ser executada em mais de uma camada. Para a cura da BGTC deve ser aplicada uma imprimação na superfície acabada e esta deve ficar intacta por pelo menos sete dias. A imprimação pode ser executada sobre a base ou sub-base limpa com jato de ar comprimido com emulsões asfálticas de ruptura rápida, asfaltos diluídos de cura rápida, ou outros produtos, desde que conduzam os mesmos resultados obtidos com o emprego destes.

2.2.2 Características mecânicas da BGTC

De acordo com Jiang e Fan (2013), o comportamento mecânico tem importância fundamental na utilização de Brita Graduada Tratada com Cimento. Propriedades como resistência mecânica à compressão e à tração, e módulo resiliente são propriedades que devem ser levadas em consideração para sua utilização. Seus estudos demonstram que as relações entre os teores de cimento e tempo de cura têm uma influência direta no aumento da resistência à compressão axial.

Outras variáveis também têm relevância na execução da BGTC, como teor de cimento, a quantidade de finos, o tipo de agregado utilizado, o grau de compactação e o tempo de cura. Davis *et al.* (2007) avaliaram a influência dos três primeiros parâmetros citados anteriormente e teve seus resultados compilados por Xuan (2012) em forma de gráfico (Figura 4).

Dos materiais utilizados por Davis *et al.* (2007), é possível perceber a influência da mineralogia na resistência final da BGTC. Em ordem crescente de capacidade de carga tem-se a mica, o calcário e por fim, o diabásio e granito, sendo esses últimos dependentes do teor de finos na mistura. Deve-se ressaltar que o aumento na porcentagem de finos acarreta em uma variação mais abrupta quando o agregado é

o granito, enquanto que para outros materiais a diferença no teor de finos não altera muito o resultado da resistência final. Tem-se também que a variação no teor de cimento fornece as maiores diferenças de resistência para um mesmo material, o que é facilmente observado no gráfico.



Xuan (2012) observa que o aumento no grau de compactação de misturas de BGTC fornece ganhos diversos, como aumento da resistência à compressão axial e à tração. Apesar de a norma brasileira não considerar a tração como item de dimensionamento de uma BGTC, Tessari (2017) afirma que essa propriedade é de fundamental importância para o material. A BGTC quando aplicada em camadas inferiores de pavimentos acaba por suportar esforços de tração gerados indiretamente pela aplicação de cargas verticais, conforme esquematizado na Figura 5.

A fadiga desse material e o decorrente surgimento de trincas estão diretamente relacionados com os esforços de tração nas fibras inferiores da camada. O material ao sofrer ciclos de carregamento, associado a cargas acima do limite máximo de resistência, tende a se fraturar e propagar essas fissuras às camadas superiores, levando a uma deterioração mais acentuada do pavimento. Diversos autores estudaram aspectos que se relacionam com a resistência à tração, podendo-se destacar Xuan (2012) que relaciona o aumento na resistência à tração (RT) com o

aumento da energia de compactação e o aumento no teor de cimento utilizado na mistura, e Balbo (1997) expõe em seu trabalho uma relação da resistência à tração como sendo de 10% em relação à RCA.



Figura 5 - Desenvolvimento de esforços de tração indireta nas camadas inferiores de pavimentos

Fonte: Acervo pessoal.

As características da BGTC sob o olhar de deformações elásticas e da resiliência foram observadas por Lim e Zollinger (2003). Em seus estudos foi possível estabelecer uma relação entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade que independe do agregado a ser utilizado na mistura da BGTC, em sua pesquisa foram estudados calcário e agregado reciclado de concreto. Jitsangiam et al. (2009) investigaram a influência da mudança do teor da umidade ótima na moldagem de corpos de prova e o período de hidratação da mistura nos resultados do módulo de resiliência do material, concluindo que não houve variações expressivas nos resultados do MR que afetassem o seu desempenho.

Chummuneerat et al. (2014) estenderam o estudo do módulo de resiliência ao parâmetro do teor de umidade na compactação dos corpos de prova. Quanto maior o teor de umidade utilizado durante a compactação dos corpos de prova, maior é a massa específica seca aparente da sua amostra. Porém, ao se avaliar o comportamento resiliente do material, percebeu-se um desempenho pior à medida que se aumentava a umidade acima da umidade ótima estimada para a mistura. Jiang e Fan (2013) demonstram em seus estudos que o comportamento resiliente apresentado pela BGTC tem uma relação direta com o teor de cimento e o período de cura.

2.3 Produção do aço, resíduos e coprodutos

A produção brasileira de aço possui a capacidade de produção de 47 milhões de toneladas de aço por ano (CNI, 2012), abarcando 10 estados e um parque produtor que conta com 29 usinas de grande porte. Das usinas, 14 são integradas e as outras semi-integradas.

As usinas integradas produzem o aço a partir do minério de ferro, utilizando carvão (mineral ou vegetal) em alto fornos para obtenção do ferro metálico. Já as usinas semiintegradas utilizam sucata de ferro e ferro gusa para alimentar as aciarias elétricas, deixando de utilizar o carvão, como demonstrado na Figura 6.



A produção do aço tem por consequência a geração de resíduos decorrentes do seu processo produtivo. Nos últimos anos para cada tonelada de aço produzida, cerca de 600 kg de resíduos foram gerados (CNI, 2012), porém grande parte desses resíduos são aproveitados como coprodutos por outras indústrias ou até mesmo retornando para o processo de fabricação do aço.

Segundo Baltazar (2001), a produção do aço pode ser dividida em três etapas:

- A redução do ferro gusa, que ocorre dentro do alto forno, proporcionada pela associação do oxigênio do ferro ao carvão em altas temperaturas liquefazendo o ferro e transformando-o em ferro gusa;
- O refino, que ocorre na aciaria, é feito mediante a queima de impurezas e adições ao ferro gusa transformando-o em aço;
- A laminação, que é um processo de solidificação do aço moldando-o às diversas formas de utilização por outras indústrias, como chapas e bobinas de aço.

Os dois primeiros processos geram, cada um, um tipo de escória. A escória de alto forno é constituída por óxidos, tendo em sua composição, principalmente a presença de sílica, alumina, cálcio e magnésio, dentre outras composições dependendo do tipo de resfriamento ao qual a escória foi submetida. Já a escória de aciaria é obtida durante o processo de transformação do ferro gusa (líquido) em aço pela adição de componentes que oxidarão as impurezas presentes no material, como silício, fósforo e enxofre (GONÇALVES, 2016).

Conforme indica a Figura 7, os resíduos gerados na produção do aço no ano de 2013 obtiveram uma alta taxa de reaproveitamento, sendo somente 6% desses resíduos sofrendo a destinação em aterros.



Figura 7 - Geração e destinação de resíduos e coprodutos em 2013

Ainda segundo a IABr (2014), a escória gerada em alto forno possui a mais alta taxa de reaproveitamento dentre os resíduos do processo de fabricação do aço. A Figura

FUIILE. IADI (2014).

8 mostra que 99% desse tipo de escória é vendido a terceiros, e desse total, 97% é utilizado na fabricação de cimento enquanto que o restante é empregado na construção civil.





De acordo com IABr (2014), a identificação de alternativas para utilização de coprodutos siderúrgicos diminui os impactos ambientais associados não só à produção do aço, como também às diversas indústrias que deixam de utilizar matériaprima natural.





2.3.1 A produção de aço e o meio ambiente

A siderurgia está associada à indústria de transformação e extrativista, de mineração da matéria-prima das jazidas até a transformação em aço, de forma que a questão ambiental é pertinente em toda a sua atuação. O tema vem ganhando relevância no âmbito internacional nos últimos anos com diversas convenções (Mudança do Clima, Biodiversidade, Movimento Transfronteiriço de Resíduos, Poluentes Orgânicos Persistentes, etc.) e a criação de normas e regulamentos no campo da gestão ambiental têm se tornado cada vez mais restritivas devido a relatórios que apontam o esgotamento de recursos naturais do planeta (CNI, 2012).

De acordo com Baltazar (2001), a utilização de rejeitos, tendo eles sido tratados e utilizados com critérios adequados de engenharia, deve ser encarada como uma prática preservacionista com alto ganho ambiental e ecológico. Tendo em vista que o processo de tratamento dos resíduos da fabricação do aço impacta menos que os processos de extração e beneficiamento de rochas para a fabricação de agregados naturais, de forma que o impacto ambiental é reduzido significativamente.

Segundo a IABr (2014), 85% das empresas associadas ao instituto Aço Brasil dispunham de sistemas de gestão ambiental certificados pela ISO 14.001, uma normativa utilizada para controle de impacto ambiental. As certificações ambientais promovem o uso eficiente dos recursos naturais e a redução no desperdício e aumento na reutilização de resíduos gerados nos processos fabris.

Em setembro de 1995 escórias de aciaria e de alto forno foram eliminadas do Catálogo Europeu de Resíduos e da Remessa Europeia de Regulamento de Resíduos da Comunidade Europeia, bem como das listas da *Organisation for Economic Cooperation and Development* (OCDE). Na Alemanha essas normas refletiram na utilização dos subprodutos siderúrgicos em diversos ramos da construção civil em forma de agregado para estradas, terraplenagens e estruturas hidráulicas. O consumo desses produtos chegou a 97% das escórias que foram produzidas no país (MOTZ e GEISELER, 2001).

No Brasil, o DNIT (antigo DNER) elaborou normas para utilização de escória de aciaria em rodovias. A EM 262 (DNER, 1994) e a PRO 263 (DNER, 1994) estabelecem parâmetros para a utilização dos produtos desde o ano de 1994. Como mostrado na Figura 9, no tópico anterior, a escória de aciaria teve 93% de sua produção destinada a diversos fins, sendo os mais consideráveis o emprego em bases de estradas e nivelamentos terrestres.

2.3.2 Escória KR

De acordo com Gonçalves (2016), o minério de ferro contém elementos que não só o ferro necessário para a fabricação do aço. Certos contaminantes não desejáveis no aço como o enxofre também estão presentes durante a transformação do ferro em aço. Esse mineral se mostra indesejável pois, em altas concentrações, infere diretamente na qualidade do aço, tornando-o mais suscetível a trincas longitudinais e reduzindo a resiliência transversal com o aumento de sua concentração, sendo necessário, portanto, um processo para que se retire o excesso do contaminante (KIRMSE, 2006).

O processo de pré-tratamento de dessulfuração do ferro gusa pelo método do Reator Kambara vem para suprir essa demanda e gera, por conseguinte, uma escória específica comumente chamada de escória KR, que é obtida a partir da inserção de um material dessulfurante no ferro gusa de forma a retirar o enxofre. De acordo com Finardi (1997, *apud* KIRMSE, 2006), a cal possui um grande atrativo para utilização como agente dessulfurante pois existe em grande disponibilidade e possui um preço atrativo em comparação com outros agentes. O processo decorre da reação mostrada na Equação 01.

$$CaO_{(s)} + S \leftrightarrow CaS + 0 \tag{1}$$

Existem quatro tipos de processo de dessulfuração utilizando-se a cal. Kirmse (2006) expõe que o primeiro tipo se dá quando o ferro gusa é misturado ao agente dessulfurante durante o basculamento do carro torpedo (utilizado para transporte do ferro gusa) para dentro da panela de gusa. Esse método tem o uso limitado por gerar muita poluição atmosférica devido à grande geração de gás decorrente do carbonato de sódio e calcário que deve ser adicionado no fundo da panela antes do basculamento.

Outro tipo de dessulfuração é dado com a introdução de uma lança vertical através do ferro gusa e injeção do agente dessulfurante no metal líquido, de forma que se faça a agitação necessária para ocorrer a mistura dos materiais. No terceiro tipo, o processo de mistura do agente dessulfurante com o ferro gusa é feito com injeção de gás no fundo ou lateral da panela de gusa ou ainda por campos magnéticos (KIRMSE, 2006). O quarto processo de mistura do agente dessulfurante com o ferro gusa no ferro gusa, como mostra a Figura 10, se dá pela agitação de pás rotativas imersas no metal líquido.



Após a agitação, a escória se eleva à superfície de onde é removida por um separador, e é enviada, então, para o pátio de escórias para sofrer os processos de beneficiamento, como britagem, separação metálica através de ímãs e separação granulométrica por peneiras vibratórias (TESSARI e COBE, 2015).

A utilização da escória KR como agregado para pavimentação, de acordo com Rohde (2002), vem ganhando espaço e competindo diretamente com areia e brita por conta de sua elevada dureza, durabilidade e resistência. Gonçalves (2016) afirma que essas características fazem da escória um bom material para se utilizar em camadas de pavimentos.

Por outro lado, de acordo com Tessari e Cobe (2015), as escórias de aciaria também apresentam reações expansivas devido a certos compostos presentes no material. Dentre os compostos volumetricamente instáveis, destacam-se o CaO e o MgO que são indesejáveis numa estrutura de pavimentação por proporcionar o aparecimento

de trincas e fissuras nas camadas de rolamento, podendo comprometer a estrutura de um modo geral. Os altos teores de óxido de cálcio e de magnésio livres presentes nas escórias KR, apresentados na Tabela 2, podem comprometer a utilização desse material em bases e sub-bases de rodovias.

Tabela 2 – Caracterização química do coproduto KR.

AUTOR	CaO	MgO	AI_2O_2	SiO ₂	MnO	Fe total	S	P_2O_2
Murphy et al. (1997)	35	11,5	3,6	18	6,5	-	-	-
Motz e Geiseler (2001)	45 - 55	< 3	< 3	12 - 18	< 5	18	-	< 2
Geiseler (1999)	48 - 54	1 - 4	1 - 4	11 - 18	1 - 4	14 - 19	-	-
NSA, s.d.	42	8	5	15	5	24	0,08	0,8
George e Sorrentino (1980)	47	6	1	13	5	25	< 0,1	2
Filev (2002)	44,3	6,4	1,5	13,8	5,3	17,5	0,07	-
Little e Setepla (1999)	36 - 46	5,5 - 12,5	0,8 - 4	11 - 15,5	-	14 - 22	-	-

Fonte: Rodrigues (2007 apud GONÇALVES, 2016).

2.3.3 Estado da arte da escória de aciaria

A escória de aciaria aplicada em pavimentação vem sendo estudada sistematicamente com a finalidade de se obter métodos seguros e confiáveis para sua utilização, principalmente no que concerne à instabilidade volumétrica que aparenta ser um dos maiores problemas associados a essa prática.

De acordo com Wang (2004), ao contrário da escória de alto forno, que é volumetricamente estável, a escória de aciaria contém óxidos hidratáveis que podem gerar expansão volumétrica indesejada. Devendo a escória ser tratada previamente através de cura adequada por envelhecimento a fim de garantir sua estabilidade e sua utilização adequada na construção de estradas.

Akinmusuru (1991) realizou ensaios com a finalidade de estudar a cimentação das escórias de aciaria com substituição parcial de componentes no concreto, nos quais os resultados indicaram propriedades de cimentação em certos níveis. Separadamente substituiu-se a areia e a parte granular por escória de aciaria, e foi observado um ganho na resistência do concreto. Porém, com o concreto moldado com escória em substituição ao cimento solidificou-se apenas parcialmente, mostrando que a escória não é uma substituta ideal para o cimento. O autor infere que o ganho de resistência confirma a informação de que a escória de aciaria é quimicamente ativa

e que possui propriedades cimentícias. Os resultados apresentados por Akinmusuru (1991) refletem no trabalho de Kuo (2014), no qual utilizou-se de escória de aciaria e de alto forno moídas para a produção de ligantes não-Portland. Os resultados experimentais mostraram que a escória de dessulfuração do aço pode desencadear reações pozolânicas nas misturas com a escória de alto forno com qualidades satisfatórias como ligante.

Zhao *et al.* (2016) conduziu experimentos com misturas contendo cal até 5% e escória de aciaria em pó com a finalidade de avaliar o calor de hidratação, a água não evaporada da mistura e os picos de reações exotérmicas em comparação com o cimento comum. O autor observou que assim como o cimento, a mistura possui dois picos exotérmicos, porém com um período de hidratação mais longo e com menor taxa exotérmica. Indicando que, assim como o cimento, essa mistura apresenta propriedades cimentícias, mesmo que com uma resistência menor que a do cimento puro, mas com uma taxa relativamente alta do crescimento da resistência.

Resultados indicando capacidade de cimentação também foram obtidos por Cho (2016) através de seus estudos com adição de escória granular de alto forno e escória KR em concreto. Variando a adição de gesso e cimento verificaram que a escória KR pode causar endurecimento da escória de alto forno em misturas sem cimento, mesmo que após 28 dias de cura a resistência à compressão se apresentava muito baixa. No entanto, com a adição de cal a resistência adquiriu valor semelhante à mistura com cimento de escória.

Apesar de a escória de aciaria apresentar uma qualidade positiva, como a cimentação, ela também tem um aspecto negativo que é a expansão. Wang *et al.* (2010) afirma que a expansão da escória está relacionada com o teor de cal livre no material, e que é possível prever a expansão teórica do material através da formulação proposta na Equação 02, que relaciona a densidade da escória e o teor de cal livre na escória.

$$E_s = 0,38 * \gamma_s * F \tag{2}$$

Onde:

 E_s : volume de expansão da escória de aciaria (%);

 γ_s : peso específico da escória;
F: teor de cal livre na escória.

As diferenças de volume apresentadas em amostras reais em relação ao resultado de cálculos teóricos podem estar relacionadas com a porosidade do material e das condições de contorno. É possível que a expansão volumétrica seja absorvida pelo índice de vazios do próprio material, não apresentando assim qualquer expansão aparente. A Equação 02 pode ser aplicada como orientação de utilização de escórias de aciaria como material granular, e também para escórias não-ferrosas.

Na maioria dos casos, a escória de aciaria possui um volume de expansão menor que seu teor de vazios. Essa característica está ligada diretamente à estrutura física porosa da superfície do material. Ao se trabalhar com a escória de aciaria em misturas com outros materiais, é bom observar se há um índice de vazios que absorva sua expansão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de pesquisa utilizada nesse trabalho é Prática Experimental, tendo a sua maioria dos ensaios de caracterização realizados em laboratórios da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), como o Laboratório de Geotecnia e no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC), e o ensaio de Microscopia Eletrônica de varredura realizado no Laboratório de Plasma Térmico (LPT). Alguns ensaios foram realizados fora da UFES, como o ensaio de Módulo de Resiliência executado no Laboratório da VIA 040, em Belo Horizonte, e os ensaio de Difração de Raios-X e Fluorescência de Raios-X realizados no laboratório da NanoBusiness Informação e Inovação LTDA.

Inicialmente serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa no capítulo 3.1, e no capítulo 3.2 será apresentada a metodologia e ensaios empregados no trabalho.

3.1 Materiais

3.1.1 Brita

O agregado utilizado no trabalho é proveniente de matriz de granito de uma jazida situada no município de Cariacica-ES. A brita foi doada e fornecida em três partes: Brita 1, Brita 0 e Pó de Pedra, as quais foram submetidas aos ensaios de análise granulométrica para poder compor uma mistura de Brita Graduada Simples (BGS) a fim de atender aos limites preconizados pela norma NBR 11.803 (ABNT, 2013), que trata da granulometria de BGTC.

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado nessa pesquisa foi disponibilizado pelo Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo, e tem as seguintes características

- Cimento da categoria: CPIII-40-RS.

3.1.3 Coproduto KR

O coproduto KR utilizado no trabalho foi fornecido pela ArcelorMittal Tubarão, e é mostrado na Figura 11.



Figura 11 - Coproduto KR como fornecido.

3.2 Métodos

A pesquisa se desenvolveu com a realização de ensaios de caracterização completa da brita e do coproduto KR, assim como a moldagem dos corpos de prova da BGTC padrão, e das misturas com coproduto KR substituindo 10, 20, 30 e 40% em massa de brita, sendo essas misturas chamadas de BGTCKR10, BGTCKR20, BGTCKR30 e BGTCKR40 respectivamente. Todas as misturas tiveram a resistência à compressão axial avaliada com o tempo, para períodos de cura de 7, 28, 56 e 224 dias, tendo em vista as propriedades imputadas pelo material de ganho de resistência com o tempo observadas na literatura.

As caracterizações foram feitas em etapas conforme a Tabela 3: Etapa I: Caracterização física; Etapa II: Caracterização química; Etapa III: Caracterização mineralógica; Etapa IV: Caracterização mecânica; E Etapa V: Caracterização microestrutural.

Fonte: Acervo pessoal.

Brita e Coproduto KRAnálise GranulométricaDNER-ME 080 (1994)Brita e Coproduto KRAbrasão "Los Angeles"NBR NM 51 (2001)Brita e Coproduto KRDurabilidadeDNER-ME 089 (1994)IBrita e Coproduto KRMassa unitáriaNBR NM 45 (2006)Brita e Coproduto KRAbsorção de água e Massa específicaNBR NM 53 (2009)BritaEquivalente de areiaDNER-ME 054 (1997)BritaÍndice de formaDNER-ME 086 (1994)Coproduto KRExpansão PTMDER-ME 086 (1994)Coproduto KRClassificação dos resíduos sólidosNBR 10004 (2004)IICoproduto KRFluorescência RXIIICoproduto KRDifração RXBGTC e BGTCKRCompactaçãoNBR 7182 (2016)NBR 5739 (2007)NBR 5739 (2007)	Etapa	Material	Ensaio	Norma
Brita e Coproduto KRAbrasão "Los Angeles"NBR NM 51 (2001)Brita e Coproduto KRDurabilidadeDNER-ME 089 (1994)IBrita e Coproduto KRMassa unitáriaNBR NM 45 (2006)Brita e Coproduto KRAbsorção de água e Massa específicaNBR NM 53 (2009)BritaEquivalente de areiaDNER-ME 054 (1997)BritaÍndice de formaDNER-ME 086 (1994)Coproduto KRExpansão PTMDER-MG RT - 01.70 (2009)Coproduto KRClassificação dos resíduos sólidosNBR 10004 (2004)IICoproduto KRFluorescência RXIIICoproduto KRDifração RXBGTC e BGTCKRCompactaçãoNBR 7182 (2016)NBR 5739 (2007)NBR 5739 (2007)		Brita e Coproduto KR	Análise Granulométrica	DNER-ME 080 (1994)
Brita e Coproduto KRDurabilidadeDNER-ME 089 (1994)IBrita e Coproduto KRMassa unitáriaNBR NM 45 (2006)Brita e Coproduto KRAbsorção de água e Massa específicaNBR NM 53 (2009)BritaEquivalente de areiaDNER-ME 054 (1997)BritaÍndice de formaDNER-ME 086 (1994)Coproduto KRExpansão PTMDER-MG RT - 01.70 (2009)Coproduto KRClassificação dos resíduos sólidosNBR 10004 (2004)IICoproduto KRFluorescência RXIIICoproduto KRDifração RXBGTC e BGTCKRCompactaçãoNBR 7182 (2016)NBR 5739 (2007)NBR 5739 (2007)		Brita e Coproduto KR	Abrasão " <i>Los Angeles</i> "	NBR NM 51 (2001)
IBrita e Coproduto KRMassa unitáriaNBR NM 45 (2006)Brita e Coproduto KRAbsorção de água e Massa específicaNBR NM 53 (2009)BritaEquivalente de areiaDNER-ME 054 (1997)BritaÍndice de formaDNER-ME 086 (1994)Coproduto KRExpansão PTMDER-MG RT - 01.70 (2009)Coproduto KRClassificação dos resíduos sólidosNBR 10004 (2004)IICoproduto KRPozolanicidadeNBR 12653 (2015)Coproduto KRDifração RXIIICoproduto KRBGTC e BGTCKRCompactaçãoNBR 7182 (2016)NBR 5739 (2007)NBR 5739 (2007)		Brita e Coproduto KR	Durabilidade	DNER-ME 089 (1994)
Image: Series of the series	1	Brita e Coproduto KR	Massa unitária	NBR NM 45 (2006)
BritaEquivalente de areiaDNER-ME 054 (1997)BritaÍndice de formaDNER-ME 086 (1994)Coproduto KRExpansão PTMDER-MG RT - 01.70 (2009)Coproduto KRClassificação dos resíduos sólidosNBR 10004 (2004)IICoproduto KRPozolanicidadeNBR 12653 (2015)Coproduto KRFluorescência RXIIIIIIICoproduto KRDifração RXBGTC e BGTCKRCompactaçãoNBR 7182 (2016)NBR 5739 (2007)NBR 5739 (2007)		Brita e Coproduto KR	Absorção de água e Massa específica	NBR NM 53 (2009)
Brita Índice de forma DNER-ME 086 (1994) Coproduto KR Expansão PTM DER-MG RT - 01.70 (2009) Coproduto KR Classificação dos resíduos sólidos NBR 10004 (2004) II Coproduto KR Pozolanicidade NBR 12653 (2015) Coproduto KR Fluorescência RX III Coproduto KR Difração RX BGTC e BGTCKR Compactação NBR 7182 (2016) NBR 5739 (2007)		Brita	Equivalente de areia	DNER-ME 054 (1997)
Coproduto KR Expansão PTM DER-MG RT - 01.70 (2009) Coproduto KR Classificação dos resíduos sólidos NBR 10004 (2004) II Coproduto KR Pozolanicidade NBR 12653 (2015) Coproduto KR Fluorescência RX III Coproduto KR Difração RX BGTC e BGTCKR Compactação NBR 7182 (2016) NBR 5739 (2007)		Brita	Índice de forma	DNER-ME 086 (1994)
Coproduto KR Classificação dos resíduos sólidos NBR 10004 (2004) II Coproduto KR Pozolanicidade NBR 12653 (2015) Coproduto KR Fluorescência RX V III Coproduto KR Difração RX BGTC e BGTCKR Compactação NBR 7182 (2016) NBR 5739 (2007) NBR 5739 (2007)		Coproduto KR	Expansão PTM	DER-MG RT - 01.70 (2009)
II Coproduto KR Pozolanicidade NBR 12653 (2015) Coproduto KR Fluorescência RX III Coproduto KR Difração RX BGTC e BGTCKR Compactação NBR 7182 (2016) BGTC e BGTCKR Compressão Axial NBR 5739 (2007)		Coproduto KR	Classificação dos resíduos sólidos	NBR 10004 (2004)
Coproduto KR Fluorescência RX III Coproduto KR Difração RX BGTC e BGTCKR Compactação NBR 7182 (2016) BGTC e BGTCKR Compressão Axial NBR 5739 (2007)	II	Coproduto KR	Pozolanicidade	NBR 12653 (2015)
III Coproduto KR Difração RX BGTC e BGTCKR Compactação NBR 7182 (2016) BGTC e BGTCKR Compressão Axial NBR 5739 (2007)		Coproduto KR	Fluorescência RX	
BGTC e BGTCKR Compactação NBR 7182 (2016) BGTC e BGTCKR Compressão Axial NBR 5739 (2007)		Coproduto KR	Difração RX	
, BGTC e BGTCKR Compressão Axial NBR 5739 (2007)		BGTC e BGTCKR	Compactação	NBR 7182 (2016)
	Ν	BGTC e BGTCKR	Compressão Axial	NBR 5739 (2007)
BGTC e BGTCKR Resistência à Tração por Compressão Diametral NBR 7222 (2011)		BGTC e BGTCKR	Resistência à Tração por Compressão Diametral	NBR 7222 (2011)
BGTC e BGTCKR Módulo de resiliência DNIT-ME 134 (2010)		BGTC e BGTCKR	Módulo de resiliência	DNIT-ME 134 (2010)
V BGTC e BGTCKR Microscopia eletrônica de varredura	V	BGTC e BGTCKR	Microscopia eletrônica de varredura	

Tabela 3 - Programa experimental.

Fonte: Acervo pessoal.

As etapas I, II e III preveem a caracterização física, química e mineralógica completa dos insumos utilizados na pesquisa a fim de se garantir a conformidade para sua utilização em misturas de BGTC.

As etapas IV e V partem para a caracterização das misturas de BGTC padrão e BGTC com incorporação de coproduto KR. A Figura 12 indica os ensaios e o tempo de cura em que eles foram realizados para Resistência à Compressão Axial (RCA), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) e Módulo de Resiliência (MR), onde é avaliado o comportamento do material ao longo do tempo pela influência do coproduto KR nas misturas nos variados graus de incorporação do material.





A Tabela 4 apresenta a quantidade de corpos de prova (CPs) que foram moldados para cada mistura, a quantidade de cada material que foi incorporado em cada traço, e o tamanho dos moldes utilizados. Utilizando-se como moldes grandes os cilíndricos metálicos de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura.

Tabela 4 – Composição das misturas.							
Composição (%)					Cimento	Quantidada da	
Sigla	Molde	Duite 1	Drite 0	Pó de	Coproduto	Dortland	
		впат	Brita U	Pedra	KR	Portianu	exemplates
BGTC 3%		36	28	36	0	3	11
BGTC 4%	Grande	36	28	36	0	4	11
BGTC 5%		36	28	36	0	5	11
BGTCKR10		36	28	16	10	4	17
BGTCKR20	Granda	38	20	22	20	4	17
BGTCKR30	Glanue	42	13	15	30	4	17
BGTCKR40		35	15	10	40	4	17
TOTAL 101							

Fonte: Acervo pessoal.

Fez-se necessário avaliar o comportamento das misturas variando alguns parâmetros, como a redução na incorporação de cimento no BGTCKR20 (Grupo A), e a mistura de BGTCKR20 com incorporação do coproduto KR com uma granulometria mais fina (Grupo B). Utilizou-se nesse grupo o coproduto KR passante na peneira com abertura de 2,0 mm, nas proporções da mistura BGTCKR20. A substituição obedeceu aos critérios da faixa granulométrica estabelecido pela norma NBR 11.803 (ABNT, 2013).

Os grupos C e D foram feitos para se avaliar o comportamento das misturas de acordo com o teor de umidade variando na moldagem. O Grupo C avaliou a influência da moldagem de todos os traços na umidade ótima do BGTC padrão, e o Grupo D utilizou as umidades ótimas dos traços contendo KR no traço do BGTC padrão com 4% de cimento para avaliar a influência da relação água/cimento no material.

A Tabela 5 descreve a quantidade de corpos de prova que foram moldados para cada mistura, as quantidades de cada material que foi incorporado em cada traço, e os moldes utilizados. Sendo moldes grandes os cilíndricos metálicos de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, e os pequenos, cilindros metálicos de 10 cm de diâmetro

por 20 cm de altura. Todas as composições com variações foram avaliadas somente à Compressão Axial aos 7 dias.

Tabela 5 – Composições com variações.								
				Composição (%)				Quantidada da
Grupo	Sigla	Molde	Drite 1	Drite 0	Pó de	Coproduto	Dortland	ovomplaros
			Бла і	впа о	Pedra	KR	FUILIAIIU	exemplates
	BGTCKR20 1%		36	28	36	20	1	3
Α	BGTCKR20 2%	Grande	36	28	36	20	2	3
	BGTCKR20 3%		36	28	36	20	3	3
В	BGTCKR20pass2mm	Grande	25	25	30	20	4	3
	BGTC4%-w7,3	Pequeno	36	28	36	0	4	2
	BGTCKR10-w7,3		36	28	16	10	4	2
С	BGTCKR20-w7,3		38	20	22	20	4	2
	BGTCKR30-w7,3		42	13	15	30	4	2
	BGTCKR40-w7,3		35	15	10	40	4	2
	BGTC4%-w7,6		36	28	36	0	4	2
П	BGTC4%-w7,9	Doguopo	36	28	36	0	4	2
D	BGTC4%-w9,2	Fequeilo	36	28	36	0	4	2
	BGTC4%-w10,5		36	28	36	0	4	2
		Т	OTAL					30

Fonte: Acervo pessoal.

3.2.1 Ensaios de caracterização física

Os ensaios para a caracterização física do agregado granítico seguiram as seguintes normas: ME 080 - Solos - Análise granulométrica por peneiramento (DNER, 1994); ME 035 - Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles" (DNER, 1998); ME 089 - Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio (DNER, 1994); NM 45 – Determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2006); NM 53 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009); NM 52 -Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2009); ME 054 - Equivalente de areia (DNER, 1997); ME 086 - Agregado determinação do índice de forma (DNER, 1994); e para avaliar o potencial expansivo do coproduto KR utilizou-se a recomendação técnica RT – 01.70 – Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria (DER-MG, 2009).

3.2.2 Ensaios de caracterização química

3.2.2.1 Classificação dos resíduos sólidos

A norma utilizada para essa caracterização foi a NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação (ABNT, 2004). Essa norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciadas adequadamente.

A norma classifica os resíduos sólidos em duas categorias:

- A) Sólidos classe I Perigosos;
- B) Sólidos classe II Não perigosos:
 - a. Resíduos classe II A Não inertes;
 - b. Resíduos classe II B Inertes.

Dos resíduos que se enquadram na definição de classe I – Perigosos, a norma ainda indica as classificações quanto a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

3.2.2.2 Fluorescência de raios-X

Segundo Silva *et al.* (2004), o ensaio de fluorescência de raios-X fornece dados a partir de uma técnica analítica não-destrutiva, obtendo assim informações quantitativas e qualitativas da composição das amostras estudadas. Essa análise se dá por meio das intensidades observadas dos raios-X característicos emitidos pelos elementos químicos da amostra quando devidamente excitados (FILHO, 1999). Os maiores picos correspondem à quantidade total dos fótons que foram detectados durante o tempo de medida, sendo esses picos proporcionais à quantidade daquele elemento existente em determinada quantidade de amostra (PARREIRA, 2006).

3.2.2.3 Pozolanicidade

A norma utilizada para a caracterização quanto à pozolanicidade do coproduto KR foi a NBR 12653 – Materiais pozolânicos - Requisitos (ABNT, 2014). Essa norma fixa as condições exigíveis para materiais pozolânicos para uso como adição, onde são desejadas ações aglomerantes, além de outras propriedades normalmente atribuídas às adições minerais finamente divididas.

O coproduto KR foi enquadrado na "Classe E" especificado pela norma, pois não se trata de uma pozolana natural ou artificial (Classe N), nem cinza volante (Classe C). As exigências físicas para que um material seja pozolânico para a Classe E estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 - Exigências para classificação como material pozolânico.							
Requisitos químicos		Requisitos físicos					
	Material		Material				
Propriedades	Pozolânico	Propriedades	Pozolânico				
	Classe E		Classe E				
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%)	≥ 50	Material retido na peneira	< 20				
SO ₃ (%)	≤ 5,0	45μm (%)	< 20				
Teor de umidade (%)	≤ 3,0	Índice de atividade pozolânica					
Perda ao fogo (%)	≤ 6,0	com cimento aos 28 dias, em	≥ 90				
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	≤ 1,5	relação ao controle (%)					
		Atividade pozolânica com o	> 6				
		cal aos 7 dias (MPa)	20				
-							

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014).

3.2.3 Ensaios de caracterização mineralógica por Difração de raios-X

A caracterização de materiais por Difração de raio-X envolve a difração de feixe de raios-X monocromático através de um pó fino do material. Muito utilizado na metalurgia, esse método apresenta a vantagem de ser um ensaio não destrutivo e de não requerer nenhum preparo especial da amostra a ser analisada.

O aparelho utilizado para a caracterização, através do tubo de raios-X, gera um feixe paralelo que incide sobre o material de análise de forma a sofrer difração em diversos ângulos. A detecção dos raios difratados é feita por um sensor instalado em determinado ângulo, a partir da Lei de Bragg é feita a relação entre o comprimento de onda da radiação incidente e o ângulo de reflexão. Os resultados gráficos obtidos pelo ensaio mostram o espectro dos elementos constituintes do material em análise em função dos comprimentos de onda e da energia (QUEIROZ, s.d.).

3.2.4 Ensaios de caracterização mecânica

3.2.4.1 Compactação

O ensaio de compactação executado para o traço da BGTC padrão e para a BGTC com as incorporações de coproduto KR seguiu a norma NBR 7.182: Solo – Ensaio de compactação (ABNT, 2016). Essa norma prescreve o método para determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca máxima dos solos.

De acordo com a norma NBR 12.261 (ABNT, 2013), o ensaio deve proceder utilizandose o cilindro grande. Devendo ser empregada a energia intermediária para compactação que consiste na aplicação de 26 golpes por camada, em cinco camadas, com o soquete grande.

3.2.4.2 Moldagem e rompimento por compressão

Resultados preliminares das misturas de BGTC padrão com as variações de cimento mostraram que todas as misturas de BGTC padrão apresentaram a resistência à compressão axial aos 7 dias de cura dentro dos limites estabelecidos pela NBR 12.261 (ABNT, 2013). Tomando os resultados preliminares da BGTC padrão, estabeleceu-se que as misturas contendo incorporação de coproduto KR teriam a adição de 4% de cimento em massa, para fins de comparação.

A moldagem dos corpos de prova grandes (15x30 cm) seguiu o procedimento da norma NBR 12.261 (ABNT, 2013), utilizando-se moldes cilíndricos metálicos, de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, em cinco camadas, cada uma delas sendo compactada com 66 golpes do soquete grande, com massa de 4.528 g, a uma altura de queda de 455 mm, o que corresponde à energia intermediária para moldagem de BGTC.

Para a moldagem dos corpos de prova no cilindro com dimensões menores (10x20 cm), fez-se uma adaptação da moldagem utilizando-se o soquete Marshall e uma quantidade de golpes equivalente à energia intermediária utilizada nos cilindros grandes. Para aceitação dos corpos de prova pequenos, fez-se uma moldagem teste com 4 CPs de BGTC padrão com 4% de cimento para comparação do grau de

compactação e resistência à compressão axial com 7 dias. Com cálculos da energia adaptada e a moldagem teste, estipulou-se que os cilindros menores devem ser moldados em 3 camadas, cada uma delas sendo compactada com 31 golpes do soquete Marshall, com massa de 4523 g, a uma altura de queda de 465 mm.

O procedimento de mistura dos materiais utilizando a betoneira consistiu nas seguintes etapas: (1) Pesagem dos materiais nas proporções exatas da composição da amostra, incluindo a medida certa de água; (2) Mistura a seco dos agregados dentro da betoneira; (3) Adição de um pouco de água e início do processo de mistura; (4) Adição do cimento; (5) Mistura por mais 30 segundos; (6) Adição do restante da água; (7) Raspagem das laterais da betoneira; (8) Aplicação de 3 minutos de mistura.

O procedimento de moldagem dos corpos de prova grandes consistiu nas seguintes etapas: (1) Execução da primeira e da segunda camadas; (2) Ao final da segunda camada, são retiradas três pequenas amostras para aferição da umidade; (3) Execução da terceira camada; (4) Colocação do colarinho de extensão e execução da quarta e quinta camadas; (5) Pesagem dos corpos de prova no estado fresco; (6) Após 6 horas da moldagem, aplicação de camada fina de regularização com pasta de cimento CP III-40-RS no topo dos corpos de prova na proporção a/c de 1.000g/2.115g; (7) Armazenagem dos corpos de prova com os moldes em câmara úmida.

A moldagem dos corpos de prova maiores está exemplificada na Figura 13, onde é possível observar a compactação da última camada com auxílio de um colarinho, e o acabamento à direita.

O procedimento de moldagem dos corpos de prova de 10x20 cm consistiu nas seguintes etapas: (1) Execução da primeira e da segunda camadas; (2) Ao final da segunda camada, são retiradas três pequenas amostras para aferição da umidade; (3) Colocação do colarinho de extensão e execução da terceira camada; (4) Pesagem dos corpos de prova no estado fresco; (5) Após 6 horas da moldagem, aplicação de camada fina de regularização com pasta de cimento CP III-40-RS no topo dos corpos de prova na proporção a/c de 1.000g/2.115g; (6) Armazenagem dos corpos de prova com os moldes em câmara úmida.

31





Fonte: Acervo pessoal.

Para a obtenção dos corpos de prova no estado endurecido, a desmoldagem foi realizada com 6 dias de cura e seguiu o seguinte procedimento: (1) Retirada dos corpos de prova dos moldes; (2) Retificação da parte superior dos corpos de prova; (3) Pesagem; (4) Armazenamento em câmara úmida até o rompimento. A Figura 14 exemplifica a retificação e a armazenagem dos corpos de prova em câmara úmida.



Figura 14 - Retificação e armazenamento em câmara úmida.

Fonte: Acervo pessoal.

Os ensaios de resistência mecânica foram subdivididos em resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral. O primeiro foi realizado com os tempos de cura de 7, 28, 56 e 224 dias, já o segundo foi realizado com 28 e 56 dias de cura.

Os resultados para os rompimentos por compressão axial foram realizados conforme a NBR 5.739 (ABNT, 2007), e para obter a Resistência à Compressão Axial (RCA) utilizou-se a Equação 3:

$$RCA = \frac{4 * F}{\pi * D^2}$$
(3)

Onde:

RCA: Resistência à compressão axial (MPa);

- F: Força máxima alcançada (N);
- D: Diâmetro do corpo-de-prova (mm).

Os resultados para os rompimentos por compressão diametral foram realizados conforme a NBR 7.222 (ABNT, 2011), e para obter a Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) utilizou-se a Equação 4:

$$RTCD = \frac{2*F}{\pi*D*l} \tag{4}$$

Onde:

- RTCD: 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).

O equipamento utilizado para a realização de ambos os ensaios foi a prensa *Amsler* (Figura 15), com controle de aplicação de carga e leitura analógicos. Para a realização

dos ensaios de resistência à compressão axial os corpos de provas sofreram retificação a fim de manter as faces planas e regulares.



Figura 15 - Prensa Amsler.

Fonte: Acervo pessoal.

3.2.4.3 Módulo de resiliência

A norma de dosagem da Brita Graduada Tratada com Cimento não indica outros ensaios além dos que já foram citados anteriormente. Porém, para o trabalho em questão, foi adicionado o ensaio de módulo de resiliência para se avaliar o comportamento dos materiais no longo prazo (56 dias).

A norma utilizada para esse ensaio é a ME 134 – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio (DNIT, 2010), que estabelece um método para determinar os valores do módulo de resiliência de solos para várias tensões aplicadas, que tem grande utilidade para projetos de pavimentos flexíveis.

O módulo de resiliência (MR) é a relação tensão desvio (σ_d) aplicada diretamente em uma amostra e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente (ε_R), dado pela Equação 5:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \tag{5}$$

A amostra utilizada para o ensaio é proveniente da mesma moldagem executada para o ensaio de compressão axial e passa pelo mesmo processo de cura até o ensaio de determinação do módulo de resiliência.

3.2.5 Ensaio de avaliação microestrutural através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Esse ensaio consiste na observação da microestrutura dos materiais avaliados por meio de imagens geradas com auxílio do microscópio eletrônico de varredura Superscan SS-500 da marca Shimadzu, além de confirmar a composição química das partículas com a utilização de um Espectrômetro por Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao equipamento.

As amostras foram preparadas a partir de fragmentos de corpos de prova rompidos escolhendo parcelas onde fosse possível observar tanto a matriz pétrea quanto o coproduto KR e a argamassa envolvendo os materiais. Após a seleção do fragmento, ele é metalizado por não se tratar de material condutor de corrente elétrica, e então é colado nos suportes de amostras (stab).

Para se observar a influência da incorporação do coproduto KR na BGTC o ensaio foi realizado para 2 tempos de cura, de 7 e 90 dias, para as misturas de BGTC padrão e BGTCKR10, 20, 30 e 40.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterizações físicas

As caracterizações físicas do agregado granítico foram executadas para que seu uso estivesse de acordo com os limites estabelecidos pela norma NBR 11.803 - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento — Requisitos (ABNT, 2013), mostrados na Tabela 7. Alguns ensaios suplementares foram realizados a fim de determinar seus valores, mesmo não tendo pré-requisitos por norma.

Tabela 7 – Resultados das caracterizações físicas da brita.					
Enacio	Resultado	Limite da NBR			
Elisalo	obtido	11803 (2013)			
Massa unitária (kg/dm³)	1,8	-			
Absorção de água (%)	0,83	-			
Massa específica (g/cm³)	2,88	-			
Abrasão " <i>Los Angeles</i> " (%)	40	≤ 40			
Durabilidade (%)	0,11	≤ 20			
Equivalente de areia (%)	57	≥ 35			
Índice de forma	0,8	≤ 2			

Fonte: Acervo pessoal.

As caracterizações físicas do coproduto KR foram executadas para que seu uso estivesse de acordos com os limites estabelecidos pela norma EM 262 – Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários (DNER, 1994). O material utilizado na pesquisa não possui norma brasileira específica, de forma que se utilizou da norma apresentada como simples parâmetro de comparação, tendo os resultados mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados das caracterizações físicas do coproduto KR.					
Encoio	Resultado	Limite da DNER-			
Ensaio	obtido	EM 262 (1994)			
Abrasão "Los Angeles" (%)	24	≤ 25			
Durabilidade (%)	3,2	≤ 5			
Massa unitária (kg/dm³)	1,5	1,5 - 1,7			
Absorção de água (%)	6,8	1,0 - 2,0			
Massa específica (g/cm³)	3,2	3,0 - 3,5			
Avaliação do potencial expansivo	2,7	≤ 3,0			

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada individualmente para as três frações do agregado granítico, tendo seus resultados apresentados na Figura 16.



A análise granulométrica do coproduto KR está apresentada na Figura 17.



4.1.2 Avaliação do potencial expansivo

O ensaio de expansão pelo *Pennsylvania Test Method* (PTM), adaptado para as normas brasileiras pelo RT 01.70 (DER-MG, 2009) estabelece que para esse ensaio

é necessária a realização do ensaio de compactação de 3 corpos de prova para assim dar continuidade com o ensaio de expansão. O coproduto KR não apresenta comportamento regular no ensaio de compactação, de forma que foram feitas 7 amostras variando a umidade de 4 a 16% para se traçar sua curva de compactação (Figura 18).



Após definida a curva de compactação estabeleceu-se que a umidade ótima a ser utilizada seria de 9,2% que apresenta uma massa específica aparente seca de 2,25 g/cm³. Dessa forma, seguiu-se o procedimento descrito na norma moldando-se 3 corpos de prova sendo 1 na umidade ótima, 1 abaixo e outro acima. A Figura 19 apresenta os corpos de prova na estufa em condição submersa.

De acordo com o que se estabelece a norma, é necessário avaliar se há formações cristalinas na superfície das partículas do material ensaiado. Após a conclusão do ensaio, são se observou tais formações.

A Figura 20 mostra o resultado de expansão do corpo de prova número 07, o qual foi moldado próximo à umidade ótima. A amostra apresentou uma expansão total de 2,53%, sendo 1,82% de expansão no período submerso e mais 0,72% de expansão no período saturado não submerso. O material apresentou um peso específico seco máximo de 1,84 g/cm³.

Figura 19 - Estufa do ensaio de potencial expansivo.



Fonte: Acervo pessoal.

Deve-se ressaltar que a média da expansão das 3 amostras foi de 2,73%, sendo que os CPs moldados com a umidade acima e abaixo da ótima tiveram uma expansão superior. O material apresentou uma expansão satisfatória, que atende à norma EM 262 (DNER, 1994), onde se limita a expansão de escórias de aciaria ao máximo de 3%.



De acordo com a formulação de Wang *et al.* (2010), apresentada na Equação 02, e utilizando os dados obtidos na pesquisa, pode-se observar que a equação não é válida para o material em questão.

$$E_s = 0,38 * \gamma_s * F = 0,38 * 44,8\% * 1,84$$

$$E_s = 0,31 \%$$

A expansão teórica proposta por Wang *et al.* (2010) não é aplicável pois eles sugerem a utilização da fórmula para escória granulares, o material utilizado na pesquisa compreende a granulometria de 0,0 a 9,0 mm, de forma que a parcela mais fina pode ter uma influência maior na expansão do que a parcela mais grossa.

4.2 Caracterização química

4.2.1 Classificação dos resíduos sólidos

A classificação dos resíduos sólidos foi apresentada por Gonçalves (2016), cujos ensaios foram realizados de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), e o coproduto KR foi definido como um Resíduo Não perigoso Classe II A – Não inerte.

De acordo com os ensaios de lixiviação e solubilização (Apêndice B), o coproduto KR apresentou Índice de Fenóis maiores que os permitidos no Anexo G da norma. É importante ressaltar que os limites do Anexo G da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) são baseados em padrões de potabilidade, conforme indicado no item 4.2.2.2 da norma, e não tem a intenção de avaliar risco ao meio ambiente. A classificação de um resíduo como Classe II A, indica que existe o potencial para alteração da qualidade da água em contato com o material para valores superiores aos padrões de potabilidade / consumo humano, não sendo esse fato determinante para esta aplicação.

4.2.2 Fluorescência de raios-X

O ensaio de fluorescência de raios-X foi realizado por laboratório especializado, o qual forneceu os resultados apresentados na Tabela 9. A amostra foi preparada em prensa automática VANEOX (molde de 20 mm, P = 20 ton. e t = 30 s), utilizando como aglomerante ácido bórico (H₃BO₃) na proporção de 1:0,3 - 0,6 g do ácido e 2,0 g da amostra seca a 100 $^{\circ}$ C. Os resultados semiquantitativos estão expressos em porcentagem, calculados como óxidos normalizados a 100%.

A análise semiquantitativa (standardless) foi realizada em espectrômetro por fluorescência de raio-X – (WDS-2), modelo AXIOS (Panalytical).

Т	abela 9 - Resultado da análise química por fluorescência de raios-X						
	Óxidos	Amostra (%)	Óxidos	Amostra (%)			
	CaO	44,8	MnO	1,70			
	Fe_2O_3	26,0	P_2O_5	0,51			
	SiO ₂	14,6	TiO ₂	0,33			
	AI_2O_3	5,1	Na ₂ O	0,12			
	SO ₃	3,8	SrO	0,11			
	MgO	2,7	K ₂ O	< 0,1			

Fonte: Acervo pessoal.

O resultado da análise de fluorescência de raios-X fornece as proporções dos elementos contidos no coproduto KR sob a forma de óxidos. Pode-se perceber que em sua composição há uma maior concentração de CaO (44,8%) sendo seguido de Fe_2O_3 (26%) e SiO₂ (14,6%). Há também a presença de outros elementos importantes para descrever o comportamento do coproduto KR em teores relativamente altos, devido a sua importância, como Al₂O₃ (5,1%), SO₃ (3,8%) e MgO (2,7%).

4.2.3 Pozolanicidade

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para a caracterização do coproduto KR quanto à pozolanicidade.

Tabela TO - Nesultado dos elisalos de pozolaricidade.							
Requisitos qu	límicos		Requisitos físicos				
Propriedades	Resultado do ensaio	Limite da Norma NBR 12653 (2014)	Propriedades	Resultado do ensaio	Limite da Norma NBR 12653 (2014)		
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%) SO_3 (%)	45,7 3,8	≥ 50 ≤ 5,0	Material retido na peneira 45μm (%)	22,3	< 20		
Teor de umidade (%) Perda ao fogo (%) Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	2,3 < 0,1 < 0,19	≤ 3,0 ≤ 6,0 ≤ 1,5	Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (%)	79	≥ 90		
			Atividade pozolânica com o cal aos 7 dias (MPa)	0,50	≥ 6		

Tabela 10 -	Resultado	aob	ensaios	de	nozolanicidade
	rtesultauu	uus	CIISalus	ue	pozolariiciuaue.

De acordo com os resultados obtidos, não se pode caracterizar o coproduto KR como um material pozolânico para ser usado como adição para cimento Portland, argamassa e pasta, de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 2014). De todos os limites estabelecidos, quatro itens dos requisitos químicos atenderam à norma. Dos requisitos físicos, vale destacar o resultado de atividade pozolânica com a cal que apresentou valor muito abaixo do esperado, assim como o índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias.

4.3 Caracterização mineralógica por Difração de raios-X

O ensaio de difração de raios-X foi realizado por laboratório especializado onde as condições experimentais foram: Faixa de varredura, $2\theta = 5,0 - 90,0^{\circ}$; tamanho do passo = 0,026°; tempo por passo = 150 s; fendas DS = 1°; máscara = 10 mm; fendas AS = 10,4 mm; temperatura ambiente = 22,8 °C; umidade relativa do ar = 58%. O difratômetro de raios-X utilizado é do fabricante PANalytical, modelo X'Pert PRO MPD.

O resultado é apresentado em um difratograma (Figura 21) com a identificação dos principais compostos encontrados.



Figura 21 - Comparação entre o difratograma experimental para a amostra do coproduto KR com os padrões de difração para as fases minerais identificadas.

O difratograma dá a informação de que o coproduto KR no seu estado natural é um material cristalino, com diversos picos identificados. A ocorrência de hidróxido de cálcio e de dióxido de silício indica que o material tem uma capacidade pozolânica. Porém, para que as reações pozolânicas ocorram os minerais devem estar na forma amorfa. O produto dessa reação é um composto de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que fornece ganho de resistência no longo prazo.

Por outro lado, a ocorrência de etringita naturalmente no material pode provocar uma reação expansiva em idades mais avançadas quando hidratado. A presença de magnésio sob a forma de Magnesioferrita, caso se dissocie, também pode causar expansão (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

4.4 Caracterização mecânica

A dimensão máxima característica dos agregados é de 25 mm, de forma que se enquadra na graduação B da norma NBR 11.803 (ABNT, 2013), que define os materiais para base e sub-base de BGTC. A partir das curvas granulométricas obtidas para cada material (Brita 1, Brita 0, Pó de pedra e coproduto KR) foram produzidas composições para se formar a Brita Graduada Simples (BGS) somente com os agregados graníticos, e as BGTCKR (composições que fazem a substituição granulométrica da brita por coproduto KR em diferentes proporções).

As curvas granulométricas foram criadas de forma a atender a faixa granulométrica proposta pela NBR 11.803 (ABNT, 2013), Graduação B, como mostrado na Tabela 11. A Figura 22 mostra as curvas da Brita Graduada Simples (BGS) e as curvas de BGTCKR10, 20, 30 e 40, que são as curvas contendo substituição do agregado granítico em 10, 20, 30 e 40% por coproduto KR respectivamente. Mostra também a curva da mistura contendo a incorporação de 20% do coproduto passante na peneira de 2,0 mm (BGTCKR20pass2.0mm).

Peneiras		% em peso que passa			
Tipo	mm	Mínimo	Máximo		
1"	25	100	100		
3/4"	19	90	100		
3/8"	9,5	80	100		
n⁰ 4	4,8	35	55		
n⁰ 40	0,42	8	25		
nº 200	0,075	2	9		

Tabela 11 - Faixa granulométrica da "graduação B" de BGS para utilização em BGTC.

Fonte: NBR 11.803 (ABNT, 2013).

É possível perceber que as curvas com incorporação de KR atendem satisfatoriamente a substituição granulométrica, acompanhando o mesmo traçado da curva contendo a BGS.



4.4.1 Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados com as misturas completas, ou seja, com a incorporação de cimento conforme apresentado na Tabela 4 e na Tabela 5 do capítulo de materiais e métodos, e seguiram o mesmo procedimento para execução do ensaio. Os resultados do ensaio de compactação estão apresentados na Figura 23, e os resultados de umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima para cada mistura estão apresentados na Tabela 12.



Tabela 12 - Massa específica aparente seca máxima e umidade ótima das misturas.

Mieture	Umidade	Massa específica aparente
IVIISIUIA	ótima (%)	seca máxima (g/cm³)
BGTC padrão	7,3	2,41
BGTCKR10	7,6	2,33
BGTCKR20	7,9	2,34
BGTCKR30	9,2	2,27
BGTCKR40	10,5	2,30
BGTCKR20pass2mm	7,9	2,18

Fonte: Acervo pessoal.

É possível perceber que não há uma regularidade nas curvas de compactação das misturas contendo incorporação do coproduto KR. Esse fato pode ser explicado pelo comportamento apresentado pelo material quando compactado puro (Figura 18), o qual apresenta pico duplo.

Deve-se ressaltar que as duas misturas contendo 20% de coproduto mantiveram o valor da umidade ótima próximo, porém a mistura contendo somente o KR passante na peneira de 2,0 mm obteve uma redução significativa na massa específica aparente seca.

4.4.2 Compressão

4.4.2.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados de resistência à compressão axial calculados de acordo com a NBR 5.739 (ABTN, 2007) estão dispostos na Tabela 13, onde é apresentada a média da Resistência à Compressão Axial (RCA) para cada mistura nos tempos de cura de 7, 28, 56 e 224 dias.

Tabela 13 - Resistência à compressão axial.							
Traco	RCA aos 7	RCA aos 28	RCA aos 56	RCA aos 224			
naço	dias (MPa)	dias (MPa)	dias (MPa)	dias (MPa)			
BGTC 3%	4,8	6,0	6,2	6,1			
BGTC 4%	5,8	7,5	7,9	8,2			
BGTC 5%	6,6	8,5	9,6	9,9			
BGTCKR10	4,0	5,1	5,8	6,9			
BGTCKR20	4,8	5,5	6,0	7,1			
BGTCKR30	3,3	4,3	4,9	6,2			
BGTCKR40	3,0	4,3	5,0	5,7			

Fonte: Acervo pessoal.

Aos 28 dias de cura todas as misturas contendo o coproduto KR obtiveram resistência superior a 3,5 MPa, sendo que a BGTCKR20 apresenta os melhores resultados em todos os períodos de cura observados em comparação com as outras misturas com incorporação do coproduto. O BGTCKR20 obteve ainda resultado similar ao observado no traço de BGTC padrão com 3%. A Figura 24 apresenta o rompimento de corpos de prova aos 28 dias de cura, à esquerda uma mistura de BGTC padrão e, à direita, um BGTCKR40.

Os corpos de prova foram rompidos com 7, 28, 56 e 224 dias para se avaliar a influência da incorporação do coproduto KR com o tempo. A Tabela 14 mostra a evolução da RCA que as misturas atingiram em porcentagem, o cálculo foi feito comparando-se as resistências obtidas com um período de cura maior em relação à RCA obtida no período de cura imediatamente anterior.

Figura 24 - Rompimento do BGTC à esquerda e BGTCKR40 à direita aos 28 dias.



Fonte: Acervo pessoal.

É possível perceber um padrão de incremento de resistência para os CPs de BGTC padrão nos intervalos de cura onde inicialmente há um ganho elevado de resistência do 7 aos 28 dias, e após os incrementos são bem inferiores ainda que possuindo um intervalo maior de cura (de 28 a 56 dias e de 56 a 224 dias).

	Tabela 14 - Incremento da RCA com o tempo.				
	Incremento da	Incremento da	Incremento da		
Traço	RCA dos 7 aos	RCA dos 28 aos	RCA dos 56 aos		
	28 dias (%)	56 dias (%)	220 dias (%)		
BGTC 3%	26,7	2,7	-1,0		
BGTC 4%	29,1	4,2	3,7		
BGTC 5%	27,4	13,9	2,9		
BGTCKR10	27,4	12,5	20,3		
BGTCKR20	14,3	8,0	19,5		
BGTCKR30	32,9	12,7	26,7		
BGTCKR40	43,3	15,1	15,2		

Fonte: Acervo pessoal.

Para os corpos de prova contendo KR é possível notar que para a mistura com melhor desempenho de resistência inicial (BGTCKR20) houve praticamente os menores incrementos de resistência com o passar do tempo, enquanto que a mistura com o menor desempenho inicial (BGTCKR40) obteve ganhos elevados. Apesar do contraste, os valores de resistência do BGTCKR20 são bem superiores aos da mistura BGTCKR40 e são sempre superiores às outras misturas que contêm o coproduto.

A evolução da resistência é facilmente observada na Figura 25, em que o crescimento da RCA nas misturas contendo o coproduto KR ao longo do tempo é muito relevante, o que não é visto nas misturas de BGTC padrão com a mesma intensidade. É possível observar também na Figura 25 que todos os traços com KR suplantam a resistência mínima de 3,5 MPa, representada pela linha horizontal.



Em média, as misturas contendo a substituição parcial do agregado granítico aumentaram em 20,4% a RCA, enquanto que as misturas de BGTC padrão aumentaram em somente 1,9%. Esse gráfico (Figura 25) ilustra a influência da presença dos compostos identificados no ensaio de fluorescência de raios-X, como os que continham alumínio e ferro. Esses compostos podem atuar como retardadores de pega e favorecer o aumento da resistência com o tempo, devido ao encapsulamento da água presente na mistura e a liberação dela aos poucos para a hidratação do cimento presente nas amostras. Consequentemente, pode-se supor que o cimento tende a aumentar a resistência da mistura com um efeito retardado, o que não é observado nas amostras de BGTC padrão.

As curvas de Tensão vs. Deformação para os tempos de cura de 28, 56 e 224 dias estão apresentadas respectivamente na Figura 26, na Figura 27 e na Figura 28. Observa-se que no ensaio realizado com o tempo de cura de 28 dias tem-se o

comportamento das misturas de BGTC padrão apenas até a ruptura devido à falha na obtenção de dados.



Os dados mostram que os corpos de prova sofrem menores deformações até a ruptura com o passar do tempo, indicando um aumento da rigidez para todas as misturas. O comportamento das curvas mostra que as misturas contendo incorporação de coproduto KR apresentam um abaulamento da curva em torno de 85% da tensão

máxima suportada apresentando deformações muito superiores comparadas à região com tensões abaixo de 85% da tensão máxima.



Apesar de as misturas com incorporação de KR apresentarem uma resistência menor em comparação com o BGTC padrão, elas possuem uma característica mais elástica, que é positiva para fins de pavimentação. Esse comportamento é essencial no recebimento e absorção das cargas impostas pelo tráfego. Por outro lado, as curvas de BGTC padrão apresentam uma curva regular, porém, com uma ruptura brusca.

Os resultados de resistência à compressão axial refletem na fissuração do material observada nos rompimentos realizados com 224 dias de cura. A Figura 29 apresenta fotografias dos corpos de prova com os respectivos instantes de deformação em que foram tomadas, para a BGTC padrão e para a BGTCKR20.

Ambas misturas atingem o pico de resistência em torno de 0,6% de deformação axial, nesse instante não são observadas trincas ou fissuras a olho nu. Após esse instante, o corpo de prova de BGTCKR20 já apresenta uma fissura como indicado, enquanto que a BGTC padrão ainda não mostra fissura alguma. A partir daí, percebe-se a formação de fissuras maiores e a completa destruição do corpo de prova a uma deformação axial de 2,2%. Nota-se que as fissuras do CP contendo incorporação de KR são maiores se comparadas com as da BGTC padrão.

Figura 29 - Instantes do rompimento dos corpos de prova para um mesmo nível de deformação das misturas de BGTC 4% e BGTCKR20 com um período de cura de 224 dias.

BGTC 4%	BGTCKR20					
Deformaçã	ăo de 0,1%					
Deformação de 0.6%						
Deformaçã	ão de 1,6%					
Deformaçã	ão de 2,2%					

Fonte: Acervo pessoal.

4.4.2.2 Resultados das composições com variações

Os resultados alcançados a partir da compressão axial dos corpos de prova das composições com variações, foram obtidos com 7 dias de cura e estão dispostos na Tabela 15, sendo discutidos individualmente da Figura 30 até a Figura 33.

	Grupo	Sida	Malda	RCA aos 7
	Grupo	Sigia		dias (MPa)
		BGTCKR20 1%		0,5
	А	BGTCKR20 2%	Grande	1,2
		BGTCKR20 3%		2,1
	В	BGTCKR20pass2mm	Grande	4,3
		BGTC4%-w7,3		3,5
		BGTCKR10-w7,3		3,9
	С	BGTCKR20-w7,3	Pequeno	3,4
		BGTCKR30-w7,3	-	2,6
		BGTCKR40-w7,3		2,0
		BGTC4%-w7,6		3,0
	П	BGTC4%-w7,9 Bogu	Deguene	2,9
	D	BGTC4%-w9,2	requeito	-
		BGTC4%-w10,5		-
			-	

Tabela 15 - Resistência à compressão axial das composições com variações.

Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados do primeiro grupo serão comparados com a RCA da BGTC padrão e com a BGTCKR20, ambas com 4% de cimento. Essa comparação (Figura 30) visa observar se as capacidades de carga das misturas com 20% de coproduto KR incorporado na mistura com teores de cimento reduzidos (1, 2 e 3%) conseguem atender aos requisitos mínimos de RCA.



É constatado que as misturas de BGTCKR20 contendo teores de cimento abaixo de 4% apresentaram uma resistência bem inferior à BGTC padrão, de forma que a incorporação do coproduto KR não provê o aumento na resistência necessário para uma redução do uso de cimento Portland.

A Figura 31 apresenta graficamente o resultado da BGTCKR20pass2.0mm (que contém granulometria mais fina, passante na peneira de 2,0 mm) em comparação com a BGTC padrão e com a BGTCKR20. A partir dessa figura pode-se observar a influência da utilização de uma granulometria mais fina do KR na mistura, mantendo a faixa granulométrica compatível com o padrão.



A mistura BGTCKR20pass2.0mm apresenta uma resistência à compressão próxima à apresentada pelo BGTCKR20, inclusive com a resistência acima do 3,5 MPa estipulado pela NBR 12.261 (ABNT, 2013). Porém, a resistência é inferior à obtida pela mistura com o KR com a granulometria completa (de 0,0 a 9,0 mm), o que a torna não viável tecnicamente devido à necessidade de uma britagem maior ou uma separação granulométrica mais refinada para o coproduto.

A Figura 32 mostra os resultados do grupo C, com as misturas feitas na umidade ótima de BGTC padrão, para observar a influência da relação água/cimento no material. As misturas contendo KR inicialmente possuem uma umidade ótima crescente à medida que se aumenta a incorporação de KR de acordo com suas curvas de compactação,

o que leva a uma relação água/cimento também crescente. Ao se fixar a relação água/cimento para as misturas com KR é possível inferir sua influência sobre o comportamento dos traços em relação à RCA.



O comportamento apresentado pelos resultados é similar ao apresentado pelos resultados das misturas moldadas cada uma em sua umidade ótima. Deve-se ressaltar que a ordem de grandeza da resistência à compressão pode ter sido afetada pela redução do tamanho dos corpos de prova, uma vez que se utilizou moldes de 10x20 cm. A única mistura que apresentou comportamento adverso foi a mistura de BGTCKR10 com resultado superior à BGTC padrão sem incorporação de coproduto. Esse resultado também pode estar associado com a irregularidade do comportamento do coproduto KR quando compactado em diferentes teores de umidade, como o material apresenta mais de um pico na curva de compactação (Figura 18), o comportamento das misturas contendo variações de umidade acaba por apresentar resultados fora do esperado.

Os resultados do grupo D são apresentados na Figura 33, e utilizam a mesma ideia do ensaio anterior. Porém, com as moldagens executadas somente com a BGTC padrão com 4% de cimento variando a umidade. As umidades utilizadas são as umidades ótimas para as misturas de BGTCKR, sendo 7,6, 7,9, 9,2 e 10,5%. Com o aumento da relação água/cimento era esperada uma diminuição da resistência à compressão à medida que os corpos de prova fossem ensaiados.

54



Não é possível inferir sobre os resultados pois as misturas contendo 9,2 e 10,5% de água não puderam ser compactadas devido à elevada fluidez da mistura.

4.4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) foram calculados de acordo com a NBR 7.222 (ABTN, 2011) e estão dispostos na Tabela 16, onde é apresentada a média dos valores obtidos no ensaio para cada mistura nos tempos de cura de 28 e 56 dias. Figura 34 apresenta o rompimento de corpos de prova aos 28 dias de cura, à esquerda uma mistura de BGTC padrão e, à direita, um BGTCKR40.

Tabela 16 - Resistência à tração por compressão diametra					
Traco	RTCD aos 28	RTCD aos 56			
naço	dias (MPa)	dias (MPa)			
BGTC 3%	0,7	0,8			
BGTC 4%	1,0	1,2			
BGTC 5%	1,2	2,2			
BGTCKR10	0,6	0,7			
BGTCKR20	0,7	0,8			
BGTCKR30	0,6	0,6			
BGTCKR40	0,5	0,7			

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 34 - Rompimento diametral do BGTC à esquerda e BGTCKR40 à direita aos 28 dias.



Fonte: Acervo pessoal.

Não há norma brasileira que estabeleça valores mínimos de resistência à tração por compressão diametral para a Brita Graduada Tratada com Cimento, esses ensaios foram realizados a fim de conhecimento do comportamento das misturas contendo incorporação de coproduto KR em relação às misturas de BGTC padrão.

De acordo com a Figura 35 é possível perceber que as misturas contendo KR se comportaram como a BGTC com 3% de cimento, porém com uma resistência levemente inferior.



4.4.3 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência foi realizado conforme a Equação 5, e com os dados obtidos trabalhou-se com 3 modelos de equação (Equações 6) para observar o comportamento das misturas diante da influência das tensões aplicadas.

(A)
$$MR = K_1 * \sigma_3^{K_2}$$
 (6)
(B) $MR = K_1 * \sigma_d^{K_2}$
(C) $MR = K_1 * \sigma_d^{K_2} * \sigma_3^{K_3}$

O modelo A toma a tensão confinante como única influenciadora para a determinação do módulo de resiliência enquanto que o modelo B utiliza somente a tensão desvio. O modelo C é composto pelas duas variáveis e é possível ainda analisar qual das duas tem maior influência sobre o resultado de MR.

O ensaio foi realizado no Laboratório da VIA 040, em um equipamento como o da Figura 36.



Figura 36 - Realização do ensaio de módulo de resiliência.

Fonte: Acervo pessoal.
Para a obtenção dos coeficientes dos modelos A e B foram traçadas as curvas apresentadas na Figura 37 e na Figura 38 a partir dos resultados de MR.



Para a obtenção dos coeficientes do modelo C foram geradas curvas (Figura 39 a Figura 43) a partir dos resultados de MR. As curvas em três dimensões foram feitas

com o software LabFit Ajuste de curvas, desenvolvido por Wilton e Cleide Diniz Pereira da Silva, da Universidade Federal de Campina Grande.



59





A Tabela 17 apresenta os coeficientes dos modelos da Equação 6 obtidos a partir das curvas geradas com os resultados do ensaio de MR feito para os traços de BGTCKR e BGTC padrão com 4% de cimento mostrados anteriormente.

Tabela 17 - Coeficientes dos modelos de MR aplicados.					
Traço	Modelo	<i>K</i> ₁	<i>K</i> ₂	<i>K</i> ₃	R^2
	А	43391,0	0,3746	-	0,540
BGTC 4%	В	33522,0	0,3581	-	0,733
	С	30774,1	0,2049	0,0823	0,894
	А	48948,0	0,3899	-	0,375
BGTCKR10	В	44724,0	0,4518	-	0,746
	С	25158,6	0,4783	-0,2367	0,749
	А	117400,0	0,5779	-	0,530
BGTCKR20	В	84949,0	0,5869	-	0,798
	С	59652,4	0,3612	0,0301	0,728
	А	179284,0	0,7616	-	0,666
BGTCKR30	В	104953,0	0,7215	-	0,900
	С	104891,0	0,3570	0,2648	0,866
	А	4681,7	0,3040	-	0,097
BGTCKR40	В	11832,0	0,0266	-	0,001
	С	2238,6	-1,1730	0,6599	0,602
Fonte: Acenyo pessoal					

Os modelos B e C apresentaram melhor aderência aos resultados, nos quais pode-se perceber uma influência mais significativa da tensão desvio quando analisada independentemente (modelo B). As curvas criadas para o modelo C também apresentaram boa aderência e levam em consideração a influência tanto da tensão confinante quanto da desviadora. Também é possível perceber que o coeficiente K_2 , associado à tensão desvio, possui uma relevância maior em relação ao K_3 (associado à tensão confinante) na influência do Módulo resiliente das misturas.

Uma forma de se comparar os valores para o modelo C em relação aos resultados determinados no ensaio, é avaliar o comportamento do módulo de resiliência para um par de valores dados de tensão confinante (σ_3) e desvio (σ_d). A Tabela 18 apresenta valores de Módulo de Resiliência para as tensões $\sigma_3 = 0,1 MPa$ e $\sigma_d = 0,1 MPa$ para os resultados determinados no ensaio, assim como para os resultados do modelo C criado a partir dos coeficientes obtidos pelo Software LABFit Ajuste de curvas para o par de tensões indicado. Tem-se também a comparação gráfica (Figura 44) dos dois resultados apresentados.

Tabela 18 - Resultados de MR para valores dados.					
Traco	MR - Determinado	MR - Modelo C			
naço	no ensaio (MPa)	(MPa)			
BGTC 4%	17634,7	15882,8			
BGTCKR10	15682,1	14425,6			
BGTCKR20	27996,3	24228,4			
BGTCKR30	23936,1	25056,3			
BGTCKR40	9333,3	7297,1			

Fonte: Acervo pessoal.

Para o par de tensões avaliado, é possível observar que os resultados dos traços com 20 e 30% de incorporação do coproduto apresentam valores de módulo resiliente superiores aos apresentados pelo de BGTC padrão com 4% de cimento, sendo o BGTCKR20 com o melhor desempenho. Os resultados obtidos a partir do modelo C seguem a tendência observada nos resultados do ensaio realizado, porém com uma variação decorrente do ajuste da curva que é feita pelo software utilizado. As variações podem ser menores ou maiores dependendo do traço e também do par de tensões que se deseja estimar o módulo de resiliência.



Esses resultados corroboram os de resistência à compressão axial apresentados nos gráficos de Tensão-Deformação (Figura 26 à Figura 28) em que foi observado que a BGTCKR20 possui uma maior capacidade de deformação à medida que as tensões foram aplicadas em comparação com as amostras de BGTC padrão. Pode-se observar também pela curva traçada utilizando os resultados, que o modelo C está compatível com o comportamento real do material.



Figura 45 - Comparação da RCA e MR para o BGTC 4% e BGTCKR20.

A Figura 45 apresenta uma comparação entre as tensões de ruptura e do módulo de resiliência obtidas para as amostras do BGTC padrão de referência e da BGTCKR20. É possível perceber que, mesmo com uma resistência à compressão axial menor, a BGTCKR20 possui uma maior capacidade de absorver deformações em comparação com a BGTC padrão.

4.5 Caracterização microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise por meio de imagens geradas por microscópio eletrônico de varredura foi realizada com amostras extraídas do centro de corpos de prova rompidos no ensaio de compressão axial.

A Figura 46 apresenta amostras utilizadas no ensaio de microscopia, prontas para a metalização (7 pequenas amostras coladas ao Stab). O processo de metalização é uma etapa de preparação das amostras necessário para o ensaio de MEV.



Figura 46 - Amostras e equipamento de metalização.

Fonte: Acervo pessoal.

Após a metalização, as amostras foram inseridas no microscópio eletrônico Superscan SS-550 (Figura 47) utilizado na pesquisa.

Figura 47 – Equipamento Superscan SS-550 e amostras.



Fonte: Acervo pessoal.

Esse ensaio teve por objetivo avaliar a microestrutura e a influência da incorporação de KR na pasta de cimento em comparação com a BGTC padrão de referência, e suas implicações para o material como um todo. Foram feitas micrografias de todas as misturas com o tempo de cura de 7 e 90 dias em vários níveis de aproximação que serão dispostas em paralelo para efeito de comparação. Da Figura 48 a Figura 56 são apresentas as misturas de BGTC4 e do BGTCKR20, sendo essa mistura a que demonstrou os melhores desempenhos como material de substituição até o momento em comparação com a BGTC padrão de referência. As imagens das demais misturas se encontram no APÊNDICE A.





Fonte: Acervo pessoal.





Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 50 e na Figura 51 é possível observar a estrutura densa da matriz cimentícia tanto na amostra de BGTC padrão como na amostra de BGTCKR20, e a aderência da pasta aos grãos de agregado. Nessas figuras também pode-se observar a densificação da pasta com o tempo de cura ao nível de 400x de aproximação.



Figura 50 - BGTC4 - 7d esquerda, 90d à direita - ZOOM 400x.

Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 52 e na Figura 53, pode-se perceber que a zona de transição (4) apresenta aderência da matriz cimentícia aos grãos de agregado, assim como observa-se a formação de hidróxido de cálcio (1) e de C-S-H (2) nas amostras (SOARES, 2014).

Figura 51 - BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x.



Fonte: Acervo pessoal.





Fonte: Acervo pessoal.

Figura 53 - BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 1000x.



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 54 expõe para o nível de aproximação de 2000x o aparecimento de etringita (3) para um tempo de cura de 90 dias na amostra de BGTCKR20, o que não era encontrado aos 7 dias, onde também é percebido o hidróxido de cálcio (1) e C-S-H (2) (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O aparecimento de etringita tardiamente pode desencadear a manifestação de microfissuras na matriz cimentícia devido às reações expansivas, podendo levar a uma perda na capacidade de resistência do material. A formação desse composto pode ser explicada pelos resultados da fluorescência de raios-X, onde foi apresentado a ocorrência de SO₃ e MgO. Esses compostos, na presença de CaO e água, podem desencadear a formação da etringita secundária.



Figura 54 - BGTCKR20 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 2000x.

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 55 apresenta uma aproximação de 5000x e na BGTC padrão pode-se observar a ocorrência de etringita (3) com idade de 7 dias, o que é esperado em condições normais de cura de concreto, e não é mais observada aos 90 dias. A etringita formada inicialmente é consumida e convertida em monossulfato, que é o produto final da hidratação de cimentos Portland.

Na Figura 56 é possível perceber que não há ocorrência de etringita (3) na pasta com idade de 7 dias, porém aos 90 dias pode-se perceber o surgimento tardio do composto na mistura contendo o coproduto KR. O C-S-H (2) está presente em toda a pasta cimentícia e também é possível observar cristais de hidróxido de cálcio (1) na mistura contendo KR.





Fonte: Acervo pessoal.





Fonte: Acervo pessoal.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados obtidos na campanha de ensaios realizada indicam que a utilização do coproduto KR em camadas de Brita Graduada Tratada com Cimento é viável tecnicamente. A mistura com 20% do coproduto incorporado (BGTCKR20) demonstrou o melhor desempenho dentre os teores de incorporação comparados com a mistura de BGTC padrão com 4% de cimento.

A falta de normativas específicas para a utilização de coproduto KR carrega incertezas quanto aos parâmetros para sua utilização, porém ao se balizar em normas para escórias de aciaria mais conhecidas percebe-se que suas características estão dentro dos padrões de aceitação e uso. À exceção dos limites estabelecidos ficou somente a absorção de água que extrapola em pouco mais de 4 vezes o limite máximo.

Um dos itens de maior importância em pavimentação, o parâmetro de expansão das escórias de aciaria, obteve resultado abaixo do limite estabelecido pela EM 262 (DNER, 1994) de no máximo 3%, essa característica proporciona segurança em relação à sua utilização em camadas de base de rodovias.

É possível perceber que o coproduto KR possui uma capacidade pozolânica que pode ser explorada caso seja trabalhado com algum tipo de beneficiamento, como a moagem. O material como utilizado nesse trabalho, não apresentou resultados relevantes quanto à sua atividade pozolânica, mesmo tendo atingido valores próximos aos limites mínimos estabelecidos para a classificação como tal. O ensaio de difração de raios-X apresentou o KR como um material majoritariamente cristalino, de forma que ele apresenta pouca reatividade no seu estado natural.

As misturas contendo incorporação do coproduto KR demonstraram uma capacidade de ganho de resistência de até 20% com o tempo após os 56 dias de cura. Essa característica pode estar associada à presença de alumínio e ferro na composição do KR. Esses compostos podem atuar como retardadores de pega no cimento devido ao encapsulamento da água presente na mistura e a liberação dela aos poucos para a hidratação do cimento presente nas amostras. Isso faz com que o ganho de resistência com o tempo seja mais gradual, diferentemente da BGTC padrão, que

apresenta um ganho de resistência até os 56 dias elevado, mas após esse período quase não se percebe aumento na capacidade de carga.

Apesar de as misturas com incorporação de KR apresentarem uma resistência menor em comparação com o BGTC padrão, elas possuem um módulo de resiliência superior, para fins de pavimentação essa propriedade é de fundamental importância para a aplicação e durabilidade do material. A melhoria na capacidade de deformação e absorção de cargas que a incorporação do coproduto KR forneceu à mistura do BGTCKR20, é indicativo da empregabilidade desse material em camadas de base de rodovias.

A partir das análises químicas e mineralógicas foi possível entender o comportamento da incorporação do coproduto KR na BGTC através das micrografias reproduzidas no ensaio de MEV. Nas quais a presença de SO₃ e MgO no coproduto KR indica a formação de etringita secundária nas misturas com incorporação de KR, e o possível surgimento de microfissuras no material.

Os ensaios indicam também que a mistura de BGTCKR10 apresentou valor de resistência à compressão axial superior à mistura de BGTC padrão quando moldadas na umidade ótima dessa última. A diminuição relativa da relação água/cimento para a mistura BGTCKR10-w7,3 em relação à BGTCKR10 pode ser a explicação para o aumento da RCA nesse caso. Por outro lado, a moldagem de misturas contendo coproduto KR também podem estar sujeitas a uma não regularidade nos resultados quando moldadas em diferentes teores de umidade previamente estudados. A curva de compactação desse material puro apresentou um pico duplo, esse fenômeno leva a uma não regularidade no seu comportamento após moldagem quando em umidades diferentes da estimada como ótima.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Visando complementar o estudo desenvolvido nessa pesquisa, sugere-se a construção de trechos experimentais para avaliação e monitoramento do comportamento do material em condições reais de utilização.

71

Mostra-se promissor o estudo do coproduto KR pela carência de trabalhos publicados na área e o desenvolvimento de normas específicas para o material em questão. Suas características podem ser exploradas em diversas áreas do conhecimento visando sua utilização concomitantemente com o ganho ambiental criando-se, com isso, disposições adequadas para o material.

A capacidade pozolânica é uma característica que deve ser explorada no coproduto KR, há a possibilidade de o material apresentar um desempenho superior caso seja utilizado moído.

6 REFERÊNCIAS

AKINMUSURU, J., O.; Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes. **Resources, Conservation and Recycling**, Southfield, n. 5, p. 73-80, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

. NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de janeiro, 2004.

. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11803**: Materiais para sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 12262**: Execução de base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NM 45**: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

BALBO, J. T. **High Quality Cement Treated Crushed Stones for Concrete Pavement Bases**. The 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement, Indianapolis, 1997.

73

BALTAZAR, R. P. Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação. 2001. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA. 2010, 504 p.

CHO, B.; CHOI, H. Physical and chemical properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum binder. **Construction and Building Materials**. Amsterdã, n. 123, p. 436-443, 2016.

CHUMMUNEERAT, S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. **Performances of hydrated cement treated crushed rock base for Western Australian roads**. Journal of Traffic and Transportation Engineering. Vol. 01, No 06, p. 432-438, 2014.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Indústria do aço no Brasil: Encontro da indústria para a sustentabilidade. Brasília: CNI, 2012, 48 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**: Relatório gerencial. 20 Ed. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2016, 399 p.

DAVIS, K. A; WARR, L. S.; BURNS, S. E.; HOPPE, E. J. **Physical and Chemical Behavior of Four Cement-Treated Aggregates**. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 19. No 10, p. 891-897, 2007.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **RT-01.70**: Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria. Belo Horizonte, 2009.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/009_A**: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - BGTC. São Paulo, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-P 16**: Pavimentação: Brita graduada tratada com cimento. Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Manual de pavimentação. 1 Ed. Rio de Janeiro, 1996, 320 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 262**: Escória de aciaria para pavimentos rodoviários. Rio de janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 035**: Agregados – determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNER-ME 054**: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **DNER-ME 080**: Solos - Análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 086**: Agregado – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ME 089**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-PRO 263**: Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. Rio de janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de pavimentação. 3 Ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ME 134**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de janeiro, 2010.

FILHO, V. F. N. Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios-X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF). Departamento de ciências exatas/ESALQ. USP, São Paulo, 32 f, 1999.

GONÇALVES, R. M. Incorporação de coproduto de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

IABr - INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2014**. Rio de Janeiro, 2014, 93 p.

JIANG, Y. J.; FAN, L. F. An investigation of mechanical behavior of cementstabilized crushed rock material using different compaction methods. Construction and Building Materials. Vol. 48, p. 508-515, 2013.

JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. R.; SIRIPUN, K. Characterization of Hydrated Cement Treated Crushed Rock Base (HCTCRB) as a Road Base Material in Western Australia. GeoHunan International Conference, 2009.

KUO, W. T.; HUO, T. C. Engineering properties of alkali-activated binder by use of desulfurization slag and GGBFS. **Construction and Building Materials**. Amsterdã. N. 66, p. 229-234, 2014.

LIM, S.; ZOOLINGER, D. G. Estimation of the compressive strength and modulus of Elasticity of cement-treated aggregate base materials. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. DOI:10.3141/1834-04. Janeiro, 2003.

MARQUES, G. L. O. Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; Efeito da compactação por impacto e giratória. 2004. 461 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo, Pini, 1994.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slag an opportunity to save natural resources. **Waste Management**. Duisburg. N. 21, p. 285-293, 2001.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1 Ed. Vol. 1. São Paulo: Editora Pini, 1997, 746 p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1 Ed. Vol. 2. São Paulo: Editora Pini, 2001, 671 p.

SILVA, C. D. LAB Fit Curve Fitting Software. V 7.2.49. DF/CCT/UFCG, 1999.

SILVA, R. M. C; FILHO, V. F. M.; APPOLONI, C. R. **Fluorescência de raios-X por dispersão de energia**. Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, Vol. 08, nº 1, 1ª ed., Londrina, 2004. SOARES, R. B. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos
com a incorporação de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais.
2014. 163 f. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil) – Centro Tecnológico,
Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

TESSARI, C. L. Análise do comportamento de brita graduada tratada com cimento com a adição de borracha de pneus para aplicação em camadas de base de pavimentos. 2017. 92 f. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

TESSARI, C. L.; COBE, R. P. **Melhoramento de solos com incorporação de resíduos de siderurgia**. 2015. 97 f. Projeto de graduação (Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

WANG, G.; EMERY, J. **Technology of slag utilization in highway construction**. 2004. Annual conference transportation association of Canada, Québec, 2004.

WANG, G.; WANG, Y.; GAO, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. **Journal of Hazardous Materials**. Amsterdã, n. 184, p. 555-560, 2010.

XUAN, D. Cement treated recycled crushed concrete and masonry aggregates for pavements. Dissertação de mestrado (Section of road and Railway Engineering). Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Holanda, 2012.

ZHAO, J.; WANG, D.; YAN, P.; ZHANG, D.; WANG, H. Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum. **Construction and Building Materials**. n. 113, p. 835–842, 2016.

77

APÊNDICE A – MICROGRAFIAS DO MEV

Micrografias do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura dos traços BGTC3, BGTC5, BGTCKR10, BGTCKR30 e BGTCKR40.



Figura 57 – BGTC3 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x

Fonte: Acervo pessoal



Figura 58 – BGTC5 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 40x

Fonte: Acervo pessoal

Figura 59 - BGTC5 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 100x



Fonte: Acervo pessoal

 Mag
 -

Figura 60- BGTC5 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x



Figura 61 – BGTCKR10 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x

Fonte: Acervo pessoal

Figura 62 - BGTCKR10 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x



Fonte: Acervo pessoal

Figura 63- BGTCKR10 - 90d direita - ZOOM 15000x



Fonte: Acervo pessoal

Figura 64 – BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 40x



Fonte: Acervo pessoal

Figura 65 - BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 100x



Fonte: Acervo pessoal





Fonte: Acervo pessoal

Figura 67- BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x



Fonte: Acervo pessoal

Figura 68 - BGTCKR30 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 15000x



Fonte: Acervo pessoal





Fonte: Acervo pessoal

Figura 70 - BGTCKR40 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 400x



Fonte: Acervo pessoal

Figura 71 - BGTCKR40 - 7d esquerda, 90d direita - ZOOM 5000x



Fonte: Acervo pessoal





Fonte: Acervo pessoal

APÊNDICE B – CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

As Tabela 19 e na Tabela 20 foram obtidos por Gonçalves (2016) em parceria com a ArcelorMittal, empresa fornecedora do coproduto KR, e apresentam os resultados de lixiviação e solubilização em comparação com os limites estabelecidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) – Anexos G e F.

Tabela 19 - Ensaio de lixiviação e solubilização - Parâmetros orgânicos					
	Lixiviado (mg/l)		Solubilizado (mg/l)		
Parâmetros orgânicos	Pocultada	NBR 10004	Pocultada	NBR 10004	
	Resultado	(2004)	Resultado	(2004)	
Benzeno	NA	0,5	NA	NL	
Banzeno (a) pireno	NA	0,1	NA	NL	
Cloreto de Vinila	NA	0,5	NA	NL	
Clorobenzeno	NA	100,0	NA	NL	
Clorofórmio	NA	6,0	NA	NL	
1,4 - Diclorobenzeno	NA	7,5	NA	NL	
1,2 - Dicloroetano	NA	1,0	NA	NL	
1,1 - Dicloetileno	NA	3,0	NA	NL	
2,4 - Dinitrotolueno	NA	0,1	NA	NL	
Hexaclorobenzeno	NA	0,1	NA	1,0 x 10 ⁻³	
Hexaclorobutadieno	NA	0,5	NA	NL	
Nitrobenzeno	NA	2,0	NA	NL	
CC14	NA	4,0	NA	NL	
Tetracloroetileno	NA	4,0	NA	NL	
Tricloroetileno	NA	7,0	NA	NL	
Orto-Cresolo	NA	200,0	NA	NL	
(m_p) - Cresol	NA	200,0	NA	NL	
2, 4, 5 - Triclorofenol	NA	400,0	NA	NL	
2, 4, 6 - Triclorofenol	NA	20,0	NA	NL	
Piridina	NA	5,0	NA	NL	
Metiletilcetona	NA	200,0	NA	NL	
Hexacloroetileno	NA	3,0	NA	NL	

Fonte: Gonçalves (2016).

Legenda:

NA: Não analisado devido à característica da amostra.

NL: Não legislado.

Parâmotros	Lixiviado (mg/l)		Solubilizado (mg/l)	
iporgânicos	Popultada	NBR 10004	Decultada	NBR 10004
morganicos	Resultado	(2004)	Resultado	(2004)
Arsênio	< 0,01	1,0	< 0,01	0,01
Bário	1,1	70,0	< 0,01	0,7
Cadmio	< 0,05	0,5	< 0,005	0,005
Chumbo	< 0,05	1,0	< 0,01	0,01
Cromo total	< 0,05	5,0	< 0,01	0,05
Fluoreto	1,1	150,0	1,5	1,5
Mercúrio	< 0,01	0,1	< 0,001	0,05
Prata	< 0,1	5,0	< 0,01	0,05
Selênio	< 0,01	1,0	< 0,01	0,01
Alumínio	NA	NL	< 0,01	0,2
Cianeto	NA	NL	< 0,005	0,07
Cloreto	NA	NL	27,000	250
Cobre	NA	NL	< 0,008	2,0
Índice de fenóis	NA	NL	0,02	0,01
Ferro	NA	NL	< 0,01	0,3
Manganês	NA	NL	< 0,01	0,1
Nitrato	NA	NL	< 0,25	10,0
Sódio	NA	NL	< 0,2	200,0
Sulfato	NA	NL	< 3,0	250,0
Surfactantes	NA	NL	< 0,05	0,5
Zinco	NA	NL	< 0,02	5,0

Tabela 20 - Ensaio de lixiviação e solubilização - Parâmetros inorgânicos

Fonte: Gonçalves (2016).

Legenda:

NA: Não analisado devido à característica da amostra.

NL: Não legislado

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), o resíduo é considerado corrosivo caso apresente pH menor que 2 ou maior que 12,5 quando em contato com água, de forma que o coproduto não é corrosivo de acordo com os resultados apresentados na Tabela 21, dentre outras informações.

3	د د	
ltem	Informação	
Determinação da solução extratora	Solução nº 2 (NBR 10005, ABNT 2004)	
Teor de resíduo seco	87%	
pH do extrato inicial	11,3	
pH do extrato final	11,9	
Tempo total de lixiviação	16h	
Teste de corrosividade (pH 1:1)	12,1 ± 0,1	
Fonto: Co	nachuan (2016)	

Tabela 21 - Informações extras dos ensaios de lixiviação e solubilização

Fonte: Gonçalves (2016).

APENDICE C – RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Tensões de referência				
(DNIT 13	4/2010)			
σ3 (Mpa)	σd (Mpa)			
	0,0207			
0,0207	0,0414			
	0,0621			
	0,0345			
0,0345	0,0689			
	0,1029			
	0,0504			
0,0504	0,1029			
	0,1552			
	0,0689			
0,068	0,1379			
	0,2068			
	0,1029			
0,1029	0,2068			
	0,3090			
	0,1379			
0,1379	0,2747			
	0,4120			

Tabela 22 - Tensões de referência utilizadas no ensaio

Fonte: ME 134 (DNIT, 2010).

Tabela 23 - Resultados do ensaio	de MR para	o BGTC pa	adrão 4%
	ao mirepara	0 D O I O P	

Resultados do ensaio					
σ3 (Mpa)	σd (Mpa)	diferença σ3	desvio σd	εr (mm)	MR (Mpa)
0,02034	0,02033	1,79%	1,78%	4,43E-06	5017,833
0,02041	0,03981	1,42%	3,85%	4,35E-06	10116,123
0,02024	0,05969	2,27%	3,88%	4,62E-06	13906,047
0,03501	0,03497	1,47%	1,35%	3,32E-06	11334,025
0,03501	0,06953	1,49%	0,92%	4,08E-06	17909,201
0,03501	0,10434	1,48%	1,40%	7,74E-06	13918,892
0,05000	0,04974	0,81%	1,31%	4,04E-06	12508,822
0,05001	0,09948	0,78%	3,32%	7,55E-06	13288,773
0,05000	0,14914	0,80%	3,90%	8,89E-06	17029,057
0,07001	0,06978	2,95%	1,27%	4,50E-06	16166,844
0,07000	0,13916	2,94%	0,91%	8,35E-06	16789,496
0,07000	0,20849	2,94%	0,82%	1,12E-05	18945,159
0,10500	0,10443	2,04%	1,49%	6,10E-06	17634,704
0,10500	0,20847	2,04%	0,81%	1,13E-05	18661,226
0,10500	0,31250	2,04%	1,13%	1,57E-05	19966,070
0,14001	0,13915	1,53%	0,90%	8,54E-06	16337,705
0,14001	0,27772	1,53%	1,10%	1,46E-05	19171,960
0,14001	0,41504	1,53%	0,74%	1,90E-05	21916,378

Resultados do ensaio					
σ3 (Mpa)	σd (Mpa)	diferença σ3	desvio od	εr (mm)	MR (Mpa)
0,02042	0,02074	1,37%	0,20%	4,27E-06	4991,679
0,02047	0,04000	1,11%	3,39%	4,58E-06	9142,130
0,02037	0,05954	1,61%	4,13%	4,46E-06	14139,764
0,03500	0,03492	1,46%	1,22%	4,08E-06	8582,733
0,03501	0,06991	1,47%	1,47%	4,12E-06	18092,756
0,03501	0,10453	1,47%	1,58%	4,77E-06	22226,305
0,05000	0,04974	0,79%	1,32%	4,43E-06	12904,422
0,05000	0,09939	0,80%	3,41%	4,62E-06	22106,123
0,05000	0,14907	0,80%	3,95%	6,18E-06	24320,825
0,07000	0,06956	2,94%	0,96%	5,53E-06	13337,427
0,07000	0,13908	2,94%	0,86%	7,55E-06	18613,075
0,07000	0,20830	2,94%	0,73%	9,31E-06	22915,169
0,10499	0,10452	2,03%	1,57%	6,68E-06	15682,085
0,10501	0,20840	2,05%	0,77%	1,04E-05	20162,079
0,10501	0,31271	2,05%	1,20%	1,42E-05	22092,089
0,14001	0,13929	1,53%	1,01%	8,01E-06	18031,939
0,14000	0,27806	1,52%	1,22%	1,38E-05	20306,726
0,14000	0,41506	1,53%	0,74%	1,79E-05	23251,621

Tabela 24 - Resultados do ensaio de MR para o BGTCKR10

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 25 - Resultados do ensaio de MR para o BGTCKR20	

Resultados do ensaio					
σ3 (Mpa)	σd (Mpa)	diferença σ 3	desvio σd	εr (mm)	MR (Mpa)
0,02000	0,02042	3,52%	1,37%	4,50E-06	4920,527
0,02000	0,03987	3,50%	3,70%	3,01E-06	14160,843
0,02000	0,06022	3,51%	3,03%	3,59E-06	17060,307
0,03501	0,03535	1,47%	2,45%	3,13E-06	11417,508
0,03501	0,06964	1,46%	1,07%	3,81E-06	18501,818
0,03500	0,10445	1,46%	1,51%	3,89E-06	30031,198
0,04999	0,04982	0,82%	1,15%	4,01E-06	13269,948
0,05001	0,10036	0,78%	2,47%	4,20E-06	24083,742
0,05001	0,14968	0,78%	3,56%	4,54E-06	33186,755
0,06999	0,06971	2,93%	1,17%	3,55E-06	19895,168
0,07000	0,13932	2,94%	1,03%	4,23E-06	33533,350
0,06999	0,20873	2,93%	0,93%	5,84E-06	35989,887
0,10500	0,10455	2,04%	1,60%	3,81E-06	27996,307
0,10500	0,20848	2,04%	0,81%	6,10E-06	37282,450
0,10501	0,31255	2,05%	1,15%	9,31E-06	33673,809
0,14000	0,13918	1,52%	0,93%	4,31E-06	32830,176
0,14000	0,27824	1,52%	1,29%	8,51E-06	33064,196
0,14000	0,41507	1,52%	0,74%	1,37E-05	30534,530

Resultados do ensaio				
εr (mm) MR (Mpa)				
4,50E-06 4763,306				
3,85E-06 11060,734				
4,58E-06 14180,149				
4,92E-06 7269,947				
4,01E-06 17759,355				
5,23E-06 20527,523				
4,65E-06 10992,479				
4,96E-06 23958,245				
6,26E-06 24481,267				
4,16E-06 17166,088				
5,30E-06 26285,982				
6,14E-06 37661,444				
5,00E-06 23936,060				
5,57E-06 38226,222				
1,02E-05 35235,781				
5,04E-06 36991,462				
6,98E-06 40884,320				
1,12E-05 37110,246				

Tabela 26 - Resultados do ensaio de MR para o BGTCKR30

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 27 - Resultados	do ensaio de MR	para o BGTCKR40
		para o Do rora rio

Resultados do ensaio					
σ3 (Mpa)	σd (Mpa)	diferença $\sigma 3$	desvio od	εr (mm) MR (Mpa)	
0,02012	0,02091	2,88%	1,02%	4,54E-06 5072,172	
0,02020	0,03993	2,46%	3,56%	3,40E-06 12092,099	
0,02001	0,05977	3,45%	3,75%	4,88E-06 12834,256	
0,03500	0,03501	1,45%	1,47%	4,58E-06 8166,663	
0,03502	0,06965	1,51%	1,09%	4,92E-06 15078,979	
0,03502	0,10433	1,51%	1,39%	4,58E-06 23722,570	
0,05002	0,04979	0,76%	1,21%	5,19E-06 9896,057	
0,05002	0,09965	0,76%	3,16%	5,00E-06 20785,684	
0,05001	0,14909	0,79%	3,94%	6,79E-06 22450,961	
0,07000	0,06984	2,94%	1,37%	5,19E-06 14153,864	
0,06999	0,13928	2,93%	1,00%	7,13E-06 19945,381	
0,07000	0,20897	2,94%	1,05%	8,39E-06 25115,974	
0,10499	0,10457	2,03%	1,62%	1,23E-05 9333,260	
0,10500	0,20908	2,04%	1,10%	1,44E-05 14930,462	
0,10500	0,31363	2,04%	1,50%	3,90E-05 10477,550	
0,13999	0,13980	1,52%	1,38%	6,33E-05 2214,774	
0,14000	0,27898	1,52%	1,56%	6,84E-05 4154,097	
0,14000	0,41813	1,52%	1,49%	6,07E-05 6912,030	