

Jéssika Cosme
Daniel Pinto Fernandes
Gilberto Fernandes

**APLICAÇÃO DA ESCÓRIA
DE FERRONÍQUEL EM
CONCRETO ASFALTICO:
ASPECTOS TÉCNICOS, AMBIENTAIS
E DE DESEMPENHO**



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE

Jéssika Cosme
Daniel Pinto Fernandes
Gilberto Fernandes

Aplicação da Escória de Ferroníquel em Concreto Asfáltico: Aspectos técnicos, ambientais e de desempenho

1ª ed.

Goiânia-GO
Editora Conhecimento Livre

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cosme, Jéssika
C732A Aplicação da Escória de Ferroníquel em Concreto Asfáltico: Aspectos técnicos,
ambientais e de desempenho
/ Jéssika Cosme. Daniel Pinto Fernandes. Gilberto Fernandes. – Goiânia-GO

Editora Conhecimento Livre, 2026

153 f.: il

DOI: 10.37423/2026.edcl1250

ISBN: 978-65-5367-752-4

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. escória-de-ferroníquel 2. pavimentação 3. agregados I. Cosme, Jéssika II. Fernandes, Daniel Pinto
III. Fernandes, Gilberto IV. Título

CDU: 624

<https://doi.org/10.37423/2026.edcl1250>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

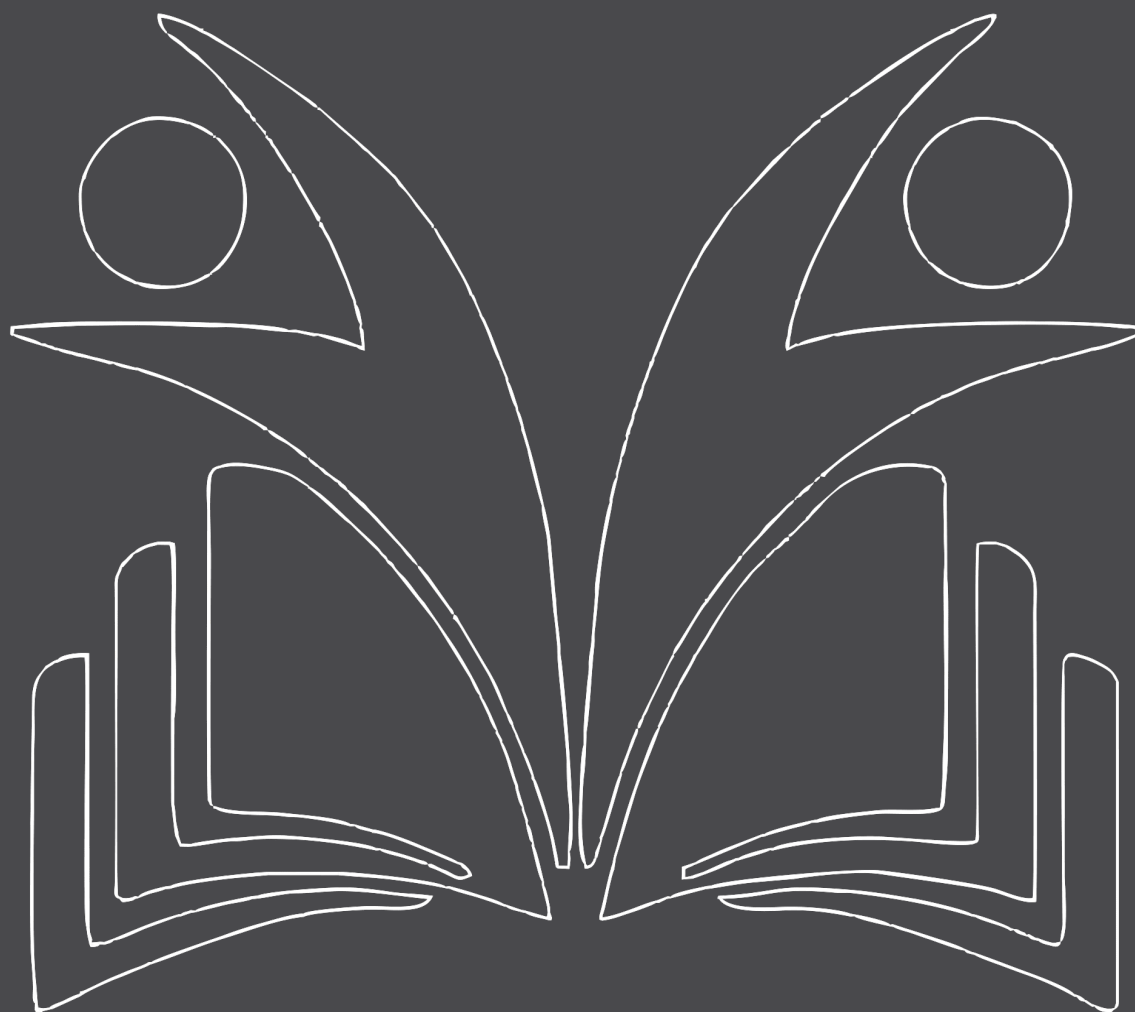
Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos



10.37423/2026.edcl1250



AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por todas as bênçãos recebidas ao longo da minha vida.

Aos meus pais Marcia e Cláudio e à minha irmã Patricia por serem fonte de amor incondicional, me dando sempre suporte e coragem para enfrentar todos os desafios durante o meu caminho.

Ao amor da minha vida, Daniel, por ser sempre mais que eu sempre sonhei, e pelo carinho, atenção e apoio dado a mim durante todo o desenvolvimento da dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilberto Fernandes, por toda paciência, estímulo e ajuda fundamental para o desenvolvimento de todas as etapas desse trabalho, sendo fonte de conhecimento e sabedoria nesse processo.

Ao Prof. Dr. Geraldo Marques pela ajuda e disponibilidade para a execução dos ensaios mecânicos das misturas no Laboratório de Pavimentação da UFJF.

Aos meus familiares e amigos, pelo carinho e pela compreensão nos períodos de estudos.

À todos do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP, em especial ao Hebert, Miguel, Márcio e Edgar pela valiosa ajuda na execução dos ensaios de laboratório.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de estudos.

À todos os professores do NUGEO fundamentais à minha formação acadêmica e profissional.

E a todos que, de alguma maneira, colaboraram para a execução desta pesquisa. O meu muito obrigada!

RESUMO

A crescente preocupação em minimizar a disposição de resíduos na natureza de forma desordenada, vem influenciando medidas que busquem dar novos fins ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis a esses materiais. A utilização de agregado siderúrgico na pavimentação rodoviária surge como alternativa à redução da estocagem desse material nos pátios siderúrgicos e ainda contribui com a diminuição dos custos da construção do pavimento rodoviário flexível em regiões onde há a disponibilidade desse material. O presente trabalho teve como objetivo verificar a viabilidade técnica do emprego da escória de ferroníquel proveniente da mina de Onça Puma no estado do Pará, como agregado na composição de concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ). Para tanto, foram executados ensaios de caracterização física, química, mineralógica e ambiental da escória de ferroníquel e também a completa caracterização do CAP 50/70. As misturas asfálticas foram dosadas em concordância com a metodologia Marshall, empregando-se a Faixa C do DNIT 031/2006 com a utilização da escória de ferroníquel nas porções granulométricas correspondentes à agregado graúdo, miúdo e fíler, além do CAP 50/70. Após a dosagem, a mistura correspondente ao teor de projeto de 6,0%, foi caracterizada mecanicamente por meio dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração estática por compressão diametral, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático). Com base nos resultados, afirma-se que a escória de ferroníquel demonstra viabilidade técnica para ser utilizada como agregado na composição de concreto betuminoso usinado à quente, cumprindo os requisitos estabelecidos pela normatização brasileira.

Palavras-chave: Escória de ferroníquel; Agregado alternativo; Pavimentação asfáltica; Metodologia Marshall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada (em km/1000km ²). Fonte: CNT, 2017....	19
Figura 1.2 - Densidade da malha rodoviária pavimentada (em km/1000km ²). Fonte: CNT, 2017....	19
Figura 1.3 - - Densidade da malha rodoviária por região. Fonte: CNT, 2017.....	20
Figura 2.1- Exportações Brasileiras de Ferroligas (MME, 2017).....	28
Figura 2.2 - Importações Brasileiras de Ferroligas (MME, 2017).....	28
Figura 2.3 - Principais reservas de Níquel do Brasil (BRASIL, 2018).....	34
Figura 2.4 - Níveis de comercialização do níquel (Carvalho et al., 2015).....	35
Figura 2.5 - Rota pirometalúrgica de processamento de níquel sulfetado (Carvalho et al., 2015)...	36
Figura 2.6 - Rotas de processamento de minérios lateríticos (Carvalho et al., 2015).....	38
Figura 2.7 – (a) Escória de ferroníquel seca ao ar (b) Escória de ferroníquel seca à água (Choi e Choi, 2015).....	40
Figura 2.8 – Processo para utilização de escórias na construção de estradas. Adaptado de Wang e Emery (2004)	44
Figura 2.9 - Patologias em pavimentos causadas pela expansão da escória: (a) trica radial;	
(b) trincas longitudinais; (c) trincas transversais e (d) deslocamento rotacional da sarjeta (Gontijo, 2006).	46
Figura 2.10 – Vista da área de processamento da escória de níquel próximo ao local da construção (A). Usina de produção de asfalto próximo ao local de construção da rodovia	
(B) (Wang, 2016).....	49
Figura 2.11 - Câmara para análise experimental de contaminação do solo (Kang et al.,2014).....	50
Figura 2.12 – Corpos de prova submetidos a temperaturas variando de 600 °C a 1000 °C. Fonte: Lima e Zampieron (2009).....	51

Figura 2.13 - Detalhes das matérias-primas utilizadas na fabricação de telhas (Innocentini et al., 2016).....	53
Figura 2.14 – Seção típica de um pavimento rígido (Bernucci et al., 2008).....	54
Figura 2.15 - Seção típica de um pavimento flexível (Bernucci et al., 2008).....	55
Figura 3.1 – Metodologia utilizada para o desenvolvimento da dissertação.....	63
Figura 3.2 - Vista geral da Mineração Onça Puma. Fonte: http://revistamineracao.com.br/2017/09/15/trf-paralisa-atividade-da-mineracao-onca-puma/ . Acesso em: 18/03/2018.....	64
Figura 3.3 - Processo de beneficiamento de ferroníquel pelo processo RKEF. Adaptado de: HORIZONTE MINERALS. Disponível em: http://horizonteminerals.com/br/pt/processo/	65
Figura 3.4 – Escória de ferroníquel recebida no Laboratório de Ferrovias e Asfalto.	66
Figura 3.5 – Peneirador mecânico utilizado para o ensaio de granulometria.....	67
Figura 3.6 - Equipamento utilizado para o ensaio de Abrasão Los Angeles.....	68
Figura 3.7 - Equipamento “Treton” utilizado no ensaio.....	71
Figura 3.8 - Difratorômetro de Raio-X utilizado na pesquisa.....	78
Figura 3.9 – Espectrômetro de Raio-X.....	74
Figura 3.10 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) na UFOP	75
Figura 3.11 – Detalhe das pastilhas preparadas para ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura.....	76
Figura 3.12 - Ensaio de Lixiviação.....	79
Figura 3.13 - Ensaio de Solubilização.	79
Figura 3.14 – CP’s com teores de asfalto de 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5 %	82

Figura 3.15 – Preparação da mistura	82
Figura 3.16 – Corpos de prova após compactação.....	84
Figura 3.17 – Compactação do corpo de prova.....	83
Figura 3.18 – Obtenção da massa seca e da massa submersa em água dos CP's.....	84
Figura 3.19 – Escória de ferroníquel separada por frações granulométricas.....	86
Figura 3.20 - Ensaio de Estabilidade.....	90
Figura 3.21 - Leitura da Fluência.....	91
Figura 3.22 - Exemplo de obtenção do Teor de Projeto (SANTOS, 2010).....	92
Figura 3.23 - Ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral.....	93
Figura 3.24 - Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência.....	95
Figura 3.25 - Obtenção direta do MR através de software	96
Figura 4.1 – Curvas granulométricas da escória de ferroníquel.....	101
Figura 4.2 - Padrão de difração de raios-x da escória ferroníquel.....	105
Figura 4.3 - Indicação dos pontos encontrados na morfologia típica da escória de ferroníquel pulverizada.....	106
Figura 4.4 - Morfologia típica encontrada na escória de ferroníquel pulverizada.....	108
Figura 5.1 – Curva granulométrica da escória de ferroníquel na Faixa C do DNIT 031/2006.....	114
Figura 5.2 – Gráfico viscosidade Brookfield (°C) versus Temperatura (°C).....	114
Figura 5.3 – Curva de determinação do Teor de Projeto da mistura.....	117
Figura 5.4 – Aspecto dos corpos de prova após moldagem.	117
Figura 5.5 – Gráfico de vida de fadiga da mistura.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção brasileira de ferroligas (MME, 2017).....	29
Tabela 2.2 - Propriedades conferidas pelas ligas aos aços (FEAM, 2010).....	31
Tabela 2.3 – Produção das minas de níquel em toneladas (USGS, 2018).....	33
Tabela 2.4 – Produção bruta de níquel nos estados brasileiros produtores (BRASIL, 2018).....	34
Tabela 2.5 – Tipos de produtos e Aplicações (Carvalho et al., 2015).....	35
Tabela 2.6 – Rotas para minérios lateríticos (Carvalho et al., 2015).....	37
Tabela 2.7 - Características físicas de diversas escórias de ferroníquel (Saha et al., 2018).....	41
Tabela 2.8 – Características químicas de diversas escórias de ferroníquel (Saha et al., 2018).....	41
Tabela 2.9- Composição química da escória de níquel (%) (Wang, 2016).....	42
Tabela 2.10 - Propriedades básicas do agregado de escória de ferroníquel (adaptado de Wang, 2016).....	43
Tabela 2.11 - Produtos formados na oxidação e corrosão do ferro (Machado, 2000).....	47
Tabela 2.12 – Faixas de composição do Concreto Asfáltico (DNIT, 2006a).....	59
Tabela 3.1 - Especificações e Caracterização do CAP 50/70 REGAP/PETROBRAS.....	80
Tabela 3.2 – Ensaio de Viscosidade CAP 50/70.....	80
Tabela 3.3 – Ensaio de caracterização do CAP 50/70.....	81
Tabela 3.4 - Especificação Faixa C DNIT.....	85
Tabela 3.5 – Requisitos de dosagem de concreto asfáltico pelo DNIT 031/2006.....	92
Tabela 4.1 – Granulometria em % de peso passante dos agregados.....	101
Tabela 4.2 – Resultado dos ensaios de Abrasão Los Angeles.....	102

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de densidade e absorção da escória de ferroníquel.....	103
Tabela 4.4 - Espécies químicas e suas porcentagens em massa.....	105
Tabela 4.5 - Resultados da análise quantitativa do MEV.....	107
Tabela 4.6 - Resultados da análise quantitativa realizada.....	108
Tabela 4.7 - Ensaio de lixiviação para parâmetros inorgânicos da escória de ferroníquel.....	109
Tabela 4.8 - Ensaio de solubilização para parâmetros orgânicos e inorgânicos para a escória de ferroníquel.....	110
Tabela 4.9 - Especificações e Caracterização do CAP 50/70 REGAP/PETROBRAS.....	111
Tabela 4.10 - Ensaio de Viscosidade CAP 50/70.....	111
Tabela 4.11 – Ensaio de caracterização do CAP 50/70.....	111
Tabela 5.1 – Enquadramento granulométrico do agregado de escória de ferroníquel na Faixa C do DNIT.....	113
Tabela 5.2 – Resultado das DMTs calculadas para cada teor de ligante.....	115
Tabela 5.3 – Parâmetros volumétricos da mistura com diversos teores de asfalto.....	116
Tabela 5.4 – Resultado dos ensaios de estabilidade e fluência para o teor de projeto de 6,0%.....	118
Tabela 5.5 – Resultado de Requisitos de dosagem de concreto asfáltico pelo DNIT 031/2006.....	118
Tabela 5.6 - Valores obtidos de módulo de resiliência para as misturas à 25°C.....	119
Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração Estático por Compressão Diametral.....	120
Tabela 5.8 - Número de aplicações e tensões obtidos nos ensaios de Vida de Fadiga. 106	
Tabela 5.9 - Parâmetros da curva de fadiga.....	121

Tabela 5.9 - Parâmetros da curva de fadiga.....122

Tabela 5.10 – Deformações Plásticas Específicas obtidas no ensaio de Creep Estático.....123

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIações

% – Porcentagem

%a – Porcentagem de asfalto

%ag– Porcentagem de agregado graúdo

%am – Porcentagem de agregado miúdo

%cap – Porcentagem de CAP na mistura

%f– Porcentagem de fíler

ASTM – American Society of Testing Materials

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

BOF – Blast Oxygen Furnace

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBR – California Bearing Ratio

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CIS - Commonwealth of Independent States

CNT – Confederação Nacional do Transporte

cP – Centipoise

CP – Corpo de prova

Dcap – Densidade do CAP

DMT – Densidade máxima teórica

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DP – Desvio Padrão

EA – Equivalente de areia

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

ES – Especificação

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

Gmb – massa específica aparente da mistura

HPAL – High pressure acid lixiviation

IABR – Instituto Aço Brasil

LD – Linz-Donawitz ME – Método de Ensaio

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MME – Ministério de Minas e Energia

MR – Módulo de Resiliência

Ms – massa seca do corpo de prova

Msub – massa submersa em água do corpo de prova

MVA - Megavoltamper

N – Vida de fadiga

NPI– nickel pig iron

NUGEO – Núcleo de Geotecnica

PRO – Procedimento

RBV – Relação

RT – Resistência à Tração

RTFOT – Rolling Thin ;Film Oven Test

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavements

UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

USGS - United States Geological Survey

V – Volume da Mistura

VAM – Vazios no Agregado Mineral

VCB – Vazios cheios de betume

Vv – % de vazios

XRD – Difração de Raios-X

$\Delta\sigma$ – Diferença de tensões ϵ – Deformação

σ – Tensão atuante

ϵ_{ht} – Deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento

ϵ_{vc} – Deformação vertical de compressão no topo do subleito

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2 JUSTIFICATIVA	21
1.3 OBJETIVOS	23
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	24
2.1 FERROLIGAS	26
2.1.1. Tipos de ferroligas	29
2.1.2 Ferroligas de níquel.....	31
2.2 ESCÓRIAS FERROSAS E NÃO-FERROSAS.....	39
2.3 ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL	40
2.4 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA PAVIMENTAÇÃO.....	43
2.5 PATOLOGIAS ESTRUTURAIS NO PAVIMENTO GERADOS PELA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS	45
2.6 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL NA PAVIMENTAÇÃO E CONSTRUÇÃO CIVIL	48
2.7 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	54
2.7.1 Camadas do pavimento	55
2.7.2 Misturas asfálticas.....	57
2.7.3 Concreto asfáltico.....	58
2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS	59
2.8.1 Método de dosagem Marshall	60

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1	MATERIAIS	64
3.1.1	Escória de ferroníquel.....	64
3.1.2	Ligante asfáltico	67
3.2	MÉTODOS	67
3.2.1	Caracterização física da escória de ferroníquel.....	67
3.2.2	Caracterização química da escória de ferroníquel	71
3.2.3	Caracterização ambiental da escória de ferroníquel	76
3.2.4	Caracterização ligante asfáltico.....	80
3.2.5	Projeto de misturas asfálticas	81
3.2.6	Ensaio mecânicos.....	92
4	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL E DO CAP 50/70	100
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL	100
4.1.1	Análise granulométrica.....	100
4.1.2	Abrasão Los Angeles.....	102
4.1.3	Equivalente de areia	102
4.1.4	Forma das partículas	103
4.1.5	Durabilidade	103
4.1.6	Densidade e absorção dos agregados.....	103
4.1.7	Adesividade	104
4.1.8	Determinação da perda ao choque no aparelho Treton.....	104

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL.....	104
4.2.1 Fluorescência de Raio-X.....	104
4.2.2 Difração de Raio-X.....	105
4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	106
4.3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL.....	108
4.3.1 Ensaios de lixiviação e solubilização.....	108
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO CAP 50/70.....	110
5 RESULTADOS DO PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS E ENSAIOS MECÂNICOS.....	113
5.1 RESULTADOS DO PROJETO DE MISTURAS ÁSFÁLTICAS	113
5.1.1 Composição Granulométrica.....	113
5.1.2 Temperatura de mistura e compactação.....	114
5.1.3 Densidade Máxima Teórica (DMT)	115
5.1.4 Teor de Projeto (TP)	116
5.2 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS MECÂNICOS	119
5.2.1 Módulo de resiliência	119
5.2.2 Resistência à tração estática por compressão diametral.....	120
5.2.3 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada.....	121
5.2.4 Deformação permanente por compressão axial (Creep estático).....	123
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	124
6.1 CONCLUSÕES.....	124
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	126

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS127

APÊNDICE I135

APÊNDICE II136

APÊNDICE III138

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

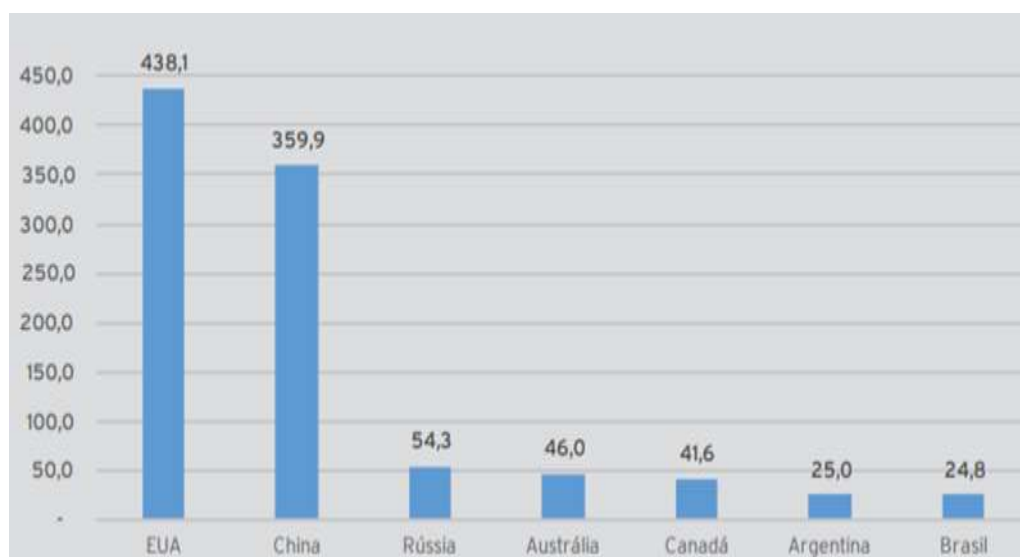
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil é um país de dimensões continentais, e possui como principal modal de transporte, o sistema rodoviário, responsável por mais de 61% da matriz de transporte de cargas e de 95% na de passageiros. A infraestrutura de transportes tem um papel fundamental no processo de desenvolvimento econômico de uma nação, podendo influenciar até mesmo sua produtividade e relações exteriores por meio das atividades de importações e exportações que estão diretamente ligadas à situação da infraestrutura de transporte do país.

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (2017) os maiores investimentos públicos federais em infraestrutura de transporte em relação ao produto interno bruto (PIB) ocorreram na década de 1970. O investimento em rodovias tem tido uma tendência de queda desde o ano de 2010 quando foi registrado um total de 0,26% do PIB. No ano de 2015, o total investido foi equivalente ao ano 2004, com apenas 0,10% do PIB investido em infraestrutura rodoviária.

A malha rodoviária brasileira é composta por 1.735.621 km de rodovias, dos quais somente 212.886 km são pavimentados, representando 12,3% da extensão total. A expansão da malha rodoviária pavimentada também não acompanha o ritmo de crescimento da frota veicular.

Nos últimos dez anos a frota cresceu 110,4%, enquanto a extensão das rodovias federais cresceu somente 11,7%. A densidade de infraestrutura rodoviária no Brasil é de 24,8 km por 1.000 km² de área, valor que quando comparado aos demais 138 países avaliados, deixou o Brasil na 111ª posição. A Figura 1.1 mostra a comparação entre densidade da malha rodoviária pavimentada de alguns países.

Figura 1.2 - Densidade da malha rodoviária pavimentada (em km/1000km²).

Fonte: CNT, 2017.

A partir da avaliação de 100,0% das rodovias federais pavimentadas e as principais rodovias estaduais do país, abrangendo um total de 105.814 quilômetros de rodovias têm-se que, 61,8% apresentaram problemas (33,6% em estado Regular, 20,1% Ruim e 8,1% Péssimo) no Pavimento, na Sinalização ou na Geometria da Via, o que afeta diretamente o desempenho operacional e a segurança dos usuários. O estado geral das rodovias analisadas é mostrado na Figura 1.2, abaixo.

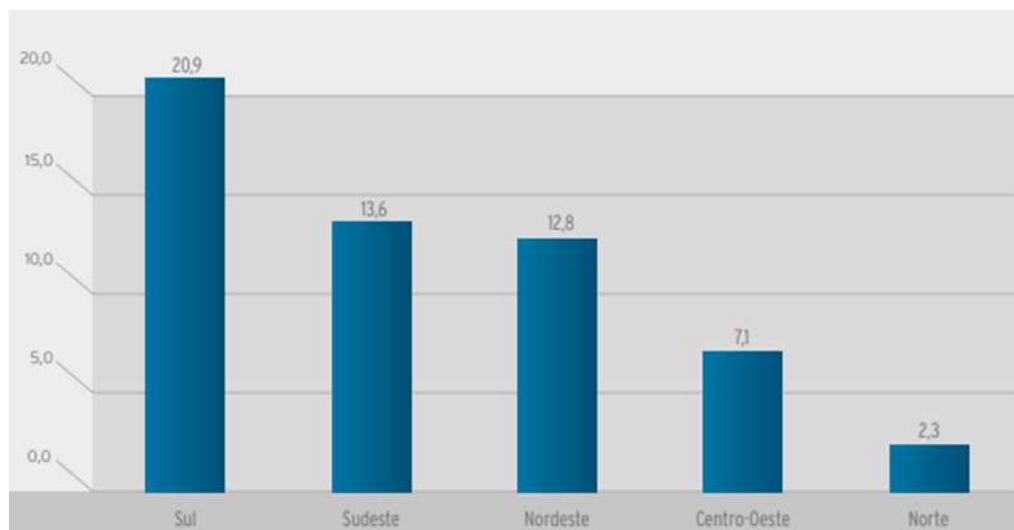
Figura 1.1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada (em km/1000km²).

Fonte: CNT, 2017.

Em termos de caráter regional, destaca-se a região Nordeste como a região que possui a maior extensão de rodovias federais pavimentadas, com 19.864,8 km, representando 30,6% do total nacional, seguida das regiões Sudeste e Sul, onde estão concentrados 12.565,1 km e 12.039,2 km, representando respectivamente, 19,4% e 18,6% das rodovias federais pavimentadas. No entanto, ao

se analisar a densidade da malha por região, mesmo a maior extensão estando na região Nordeste, a maior concentração está localizada na região Sul, conforme apresentado no Figura 1.3, cujo resultado confirma a desigualdade na distribuição dessa infraestrutura entre as regiões do país.

Figura 1.3 - Densidade da malha rodoviária por região.



Fonte: CNT, 2017.

Dentro desse contexto, o estado do Pará onde está localizada a unidade operacional de Onça Puma, que produz a escória de ferroníquel objeto deste estudo, possui aproximadamente, 11.754km de rodovias, sendo 6.718 km estaduais (57%) e 5.036 km federais (43%). Do universo total foram percorridos 3.892 km pela CNT, dentre eles, 86,5% foram classificadas como péssimas, ruins ou regulares, apenas 13,5% foram consideradas como ótimas ou bom (CNT, 2017).

O uso de agregados naturais na construção sofre cada vez mais restrições ambientais pela proximidade com os grandes centros consumidores, pelas políticas deficientes de uso e ocupação do solo e, principalmente, pelos recursos naturais serem finitos.

Segundo Castelo Branco (2004), a construção de estradas representa um terço da demanda por agregados. Por esse motivo, o emprego de resíduos na pavimentação se mostra uma aplicação interessante e racional.

A definição de resíduos pode ser dada como: todos os rejeitos gerados dentro do processo de produção ou consumo de um outro produto, independente do seu valor comercial (John, 1997).

Para John (1997), do ponto de vista ambiental, o principal objetivo é a transformação de um resíduo em um subproduto por meio da reciclagem, diminuindo assim, o consumo energético na produção de

novos produtos, e ainda contribuir com a menor dispersão de compostos contaminantes, fato que não ocorre quando há a deposição desses resíduos.

IABR (2016) define coprodutos como os materiais resultantes do processo siderúrgico juntamente com o aço, e que a partir de processamentos tecnológicos podem ser utilizados de forma ambientalmente adequada, como matéria-prima ou fonte de energia na própria atividade geradora ou por terceiros.

Com base na Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o conceito de reciclagem é “o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos os novos produtos [...]”. Da mesma forma, a reutilização é descrita como o “processo de aproveitamento dos resíduos sólidos m sua transformação biológica, física ou físico-química [...]” (BRASIL, 2012)

O uso desse material em substituição ao agregado pétreo natural na camada de revestimento de uma rodovia surge como uma nova alternativa de disposição final desses resíduos.

Dentre os benefícios pode-se citar a redução do uso de recursos naturais, muitas vezes escasso, a redução de material estocado nos pátios industriais, diminuindo assim os passivos ambientais, e ainda, do ponto de vista econômico, a viabilidade está atrelada ao fato do baixo custo do coproduto aliado a grande quantidade disponível e principalmente a proximidade dos estaques e a sua aplicação, propiciando um grande ganho econômico na construção de rodovias, muitas vezes dependentes de agregados naturais escassos e com grandes custos de extração e transporte envolvidos.

Sendo assim, a busca por materiais alternativos na pavimentação rodoviária associada à necessidade das empresas em dar uma destinação correta a esses resíduos, serve como grande incentivo ao desenvolvimento de pesquisas relacionadas à área.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para a expansão e atualização da matriz de transportes em âmbito nacional é necessário o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para compensar a escassez de recursos, típica de um país em desenvolvimento e com situação econômica instável.

As técnicas de engenharia correntemente utilizadas nos projetos rodoviários, assim como os métodos aplicados no dimensionamento de pavimentos flexíveis, seguem as chamadas “prescrições gerais” determinadas pelas normalizações específicas criadas em países da Europa ou nos Estados Unidos. As citadas normas privilegiam o emprego de materiais granulares e pétreos para emprego na camada de revestimento. Tais materiais utilizados (britas de granito e basalto) possuem alto custo e provocam impactos ambientais associados em todas as fases de obtenção.

Nesse sentido, a alta demanda por agregados naturais nos projetos de pavimentos e ainda o alto custo associado a este produto, tem feito com que pesquisadores de todo mundo busquem por materiais alternativos que possuam características físicas, mecânicas e ambientais iguais ou superiores aos agregados convencionais.

Para Castelo Branco (2004) o agregado siderúrgico possui diversas vantagens em relação às suas propriedades técnicas, podendo citar a maior resistência à derrapagem e ao desgaste natural, baixo custo e maior aderência ao betume se comparado à brita convencional.

O uso de agregados siderúrgicos traz uma série de vantagens em relação aos agregados naturais. Pode-se citar a redução do consumo de recursos naturais não renováveis, substituindo materiais oriundos de imploração de jazidas e da mineração de rochas e ainda possibilita a reciclagem de um resíduo industrial, que dará origem a um coproduto para utilização em obras de infraestrutura, reduzindo a necessidade de aterros de resíduos industriais. (IABR, 2010).

Nesse contexto, insere-se a necessidade de continuar a busca por novos materiais que além de mitigar os danos causados ao meio ambiente oferecem uma redução significativa no custo de uma obra de pavimentação. A partir do exposto, destaca-se as reservas mundiais de níquel estimadas em 78.000.000 t, com uma produção no ano de 2016 de

2.250.000 t. O Brasil possui a terceira maior reserva de níquel do mundo, com reservas estimadas em 10.000.000 de t e produção no ano de 2016 de 142.000t. (USGS, 2017).

O complexo mineral de Onça Puma, que é responsável pela mineração de reservas de níquel laterítico localizadas nas serras do Onça e do Puma, se estendendo pelos municípios de Ourilândia do Norte, São Félix do Xingu e Parauapebas, no estado do Pará, foi projetado para processar três megatoneladas por ano de minério concentrado, com teor médio de 1,7% de níquel, o que permiti uma produção de

58 mil toneladas por ano de níquel contido em ferroníquel, produto final destinado prioritariamente ao mercado externo (Carvalho et al., 2015).

Com a quantidade de escória de ferroníquel gerada e armazenada ao longo dos anos pelas mineradoras, surge a necessidade de estudos voltados à destinação adequada desse subproduto.

A aplicação da escória de ferroníquel na camada de revestimento de um pavimento, é uma alternativa que além de reduzir os danos ambientais que estão atrelados à sua estocagem, ainda torna-se uma excelente opção do ponto de vista econômico, ao ser uma substituta direta do agregado pétreo convencional, sendo ainda uma possibilidade para locais que não possuem agregados naturais a serem utilizados em pavimentação.

Este trabalho está inserido em uma linha de pesquisa dentro dos objetivos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFOP, por meio do NUGEO (Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas) em pesquisar e viabilizar o uso de novos materiais empregados na construção civil e pavimentação rodoviária.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade técnica da escória de ferroníquel da Unidade Operacional de Onça Puma, para utilização desse coproduto como substituto do agregado pétreo natural na composição do concreto betuminoso usinado a quente nas frações graúda, miúda e fíler, visando atender as conformidades referentes às normas brasileiras.

Os objetivos específicos são:

- Revisão bibliográfica sobre a escória de ferroníquel, suas características e possíveis utilização desse material na composição de um pavimento.
- Caracterização física da escória por meio dos ensaios de granulometria, densidade real, densidade aparente, absorção, equivalente de areia, índice de forma, treton, durabilidade, adesividade e abrasão Los Angeles.
- Caracterização química por meio dos ensaios de Difração de Raio-X, Fluorescência de Raio-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);

- Caracterização ambiental por meio dos ensaios de Lixiviação e Solubilidade;
- Caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70 através de ensaios de massa específica real, viscosidade, ponto de amolecimento, ductilidade e penetração;
- Realização da dosagem das misturas asfálticas em acordo a metodologia Marshall.
- Avaliação do comportamento mecânico dos traços através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático);
- Análises e discussões acerca dos estudos e resultados obtidos no presente trabalho de pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O desenvolvimento da dissertação foi estruturado em 6 capítulos, sendo que:

O **Capítulo 1** apresenta uma introdução sobre tema estudado, abordando principalmente as características da malha rodoviária brasileira bem como investimentos no setor. Além disso, destaca aspectos relevantes sobre a viabilidade de utilização de escórias na pavimentação, tanto do ponto de vista econômico quanto do ambiental. Nesse capítulo, também estão expostos os objetivos da pesquisa, a justificativa do tema proposto e a estrutura da mesma.

O **Capítulo 2** diz respeito a revisão bibliográfica, abordando conceitos a respeito de ferroligas, principalmente ferroligas de níquel, e seus processos produtivos. O capítulo ainda traz a distinção de escórias ferrosas e não ferrosas enfatizando a escória de ferroníquel que é objeto de estudo nessa pesquisa, oferecendo levantamentos acerca de suas principais características, sua utilização em pavimentação e também aspectos que passam impossibilitar sua aplicação. Ainda é apresentado uma breve conceituação de pavimentos e dos métodos de dosagem de misturas asfálticas.

O **Capítulo 3** traz os materiais utilizados na pesquisa e também a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho. Aborda os ensaios que compõem a caracterização do ligante asfáltico, a caracterização física, química e ambiental da escória de ferroníquel, a metodologia de dosagem das misturas asfálticas pela método Marshall e também os ensaios de avaliação mecânica da mistura.

O **Capítulo 4** dessa dissertação, evidencia todos os resultados obtidos na caracterização do ligante asfáltico e da escória de ferroníquel, ensaios estes, que foram orientados a partir do estado da arte sobre o tema e da metodologia empregada.

O **Capítulo 5** traz os resultados da dosagem das misturas asfálticas pela metodologia Marshall e também dos ensaios mecânicos realizados nos corpos de prova do teor de projeto encontrado.

O **Capítulo 6** trata da apresentação das considerações finais sobre a pesquisa, as respectivas conclusões sobre o tema e ainda traz algumas sugestões para estudos futuros com relação ao assunto proposto nesta pesquisa. Para finalizar, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

CAPÍTULO 2

2.1 FERROLIGAS

As ferroligas são ligas de ferro combinadas a um ou mais elementos químicos, tais como níquel, silício, manganês, magnésio, nióbio e cálcio, onde a proporção do elemento na composição da ferroliga é sempre superior a do ferro. Sua utilização, ocorre principalmente em processos metalúrgicos para adição de propriedades aos materiais e destinam-se, sobretudo à produção de aço, tornando-se um importante insumo para aumento da qualidade dos produtos siderúrgicos (FEAM, 2010).

As primeiras experiências brasileiras na fabricação de ferroligas ocorreram no século XVIII, mas só se concretizaram em 1906, em um pequeno laboratório da Escola de Minas, na cidade de Ouro Preto, Minas Gerais, onde, pela primeira vez foi produzido ferro manganês (MME, 2009).

O primeiro experimento foi em um forno de potência equivalente a seis chuveiros elétricos. A partir daí, foi implementada uma nova instalação equipada com um forno de maior capacidade capaz de produzir ferro manganês para as oficinas da rede ferroviária, por ocasião da Primeira Guerra Mundial, quando houve desabastecimento de material importado. Em 1919, porém, as experiências em fornos elétricos foram canceladas e a Usina da Escola de Minas foi desativada.

Ainda segundo MME (2009) um período de estagnação se sucedeu, perdurando até a década de trinta, quando surgiram as primeiras iniciativas de produção industrial de ferroligas.

Nessa época, as necessidades brasileiras eram supridas, quase que exclusivamente por importações, pois a produção estava limitada principalmente pela baixa disponibilidade de energia elétrica, além da baixa demanda pelo mercado interno, até metade do século XX.

A pioneira na produção de ferroligas em escala industrial no país foi a Companhia Níquel do Brasil, que entrou em operação em 1935, com o incentivo do governo federal. No ano

de 1966, seis empresas já eram atuantes no mercado nacional: Companhia Brasileira de Carbureto de Cálcio (CBCC), Paulista de Ferroligas, Mineração Geral do Brasil, Alumínio Minas Gerais, Companhia de Ferro Ligas da Bahia (FERBASA) e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), as quais totalizavam uma produção de 51 mil t/ano, aproximadamente. Favorecida pelo desenvolvimento da siderurgia

brasileira, a indústria de ferroligas teve uma grande expansão na década de 70, quando a produção saltou de 127 mil t (1972) para 552 mil t (1980) (FEAM, 2010).

Após a segunda crise do petróleo, em 1979, a produção de eletrointensivos passou a ser transferida, de forma gradativa, das nações desenvolvidas – que revisavam suas matrizes energéticas e eram alvos de pressões ambientais – para regiões com mais favoráveis do ponto de vista de insumos, especialmente, minério e energia, como a África do Sul, a Austrália e o Brasil. Neste momento, o governo brasileiro, também em função da crise energética, buscava formas para substituir o petróleo importado por energéticos nacionais, apoiando, por meio de programas como o CONSERVE, sua substituição por energia elétrica.

De acordo com FEAM (2010), o CONSERVE foi criado em 1981 pelo então Ministério da Indústria e do Comércio, com o intuito de possibilitar a realização de diagnósticos energéticos em empreendimentos industriais, identificando o potencial de conservação de energia caso a caso, sem ônus para o empreendedor. Com incentivos à implantação e ao desenvolvimento de investimentos voltados à produção em larga escala de eletrointensivos, especialmente alumínio, metais não-ferrosos e ferroligas, a potência do setor passou de 626 MVA (megavoltamperes), no início da década de 80, para 1.200 MVA em 1990, com a capacidade de produção movendo-se do patamar de 500 mil t/ano para cerca de 1.130 mil t/ano no mesmo período. Nos primórdios dos anos 90, após significativa expansão do setor, o Brasil ocupava o quarto lugar em produção e o terceiro em exportação, entre os países produtores de ferroligas do mundo ocidental, sendo responsável por aproximadamente 7% das trocas internacionais do setor.

No final dos anos 80, a indústria nacional de ferroligas sofreu um forte desaquecimento, reduzindo aproximadamente 1/4 de sua produção e 1/3 de suas exportações. Na década de 90, a queda da demanda siderúrgica mundial e a redução no consumo específico contribuíram para o encolhimento do mercado mundial de ferroligas, tornando-o super ofertante. As volumosas exportações da China e dos países do Leste Europeu também favoreceram a queda acentuada dos preços internacionais e o acirramento do protecionismo por parte dos importadores tradicionais, agravando a situação do mercado ocidental e afetando negativamente o parque brasileiro (FEAM, 2010).

A categoria ferroligas posiciona-se entre duas importantes atividades econômicas: a mineração e a siderurgia. Sendo essas, insumos essenciais na indústria siderúrgica, afinal são indispensáveis na

fabricação de todos os tipos de aço, cerca de 85 % da produção destinada ao setor siderúrgico e o restante para os demais setores como o químico, o farmacêutico, etc (Andrade et al., 1999).

No Brasil, esse setor é fortemente voltado para o mercado externo, que consome aproximadamente 56% do volume produzido, o que corresponde a 73% do seu faturamento. Segundo MME (2017), o Japão, Estados Unidos e alguns países europeus, como Reino Unido e Alemanha, são os principais importadores mundiais de ferroligas. A Figura 2.1 e a Figura 2.2 a seguir, mostram respectivamente os valores das exportações e importações realizadas pelo Brasil, em milhões de dólares.

Figura 2.1- Exportações Brasileiras de Ferroligas (MME, 2017).

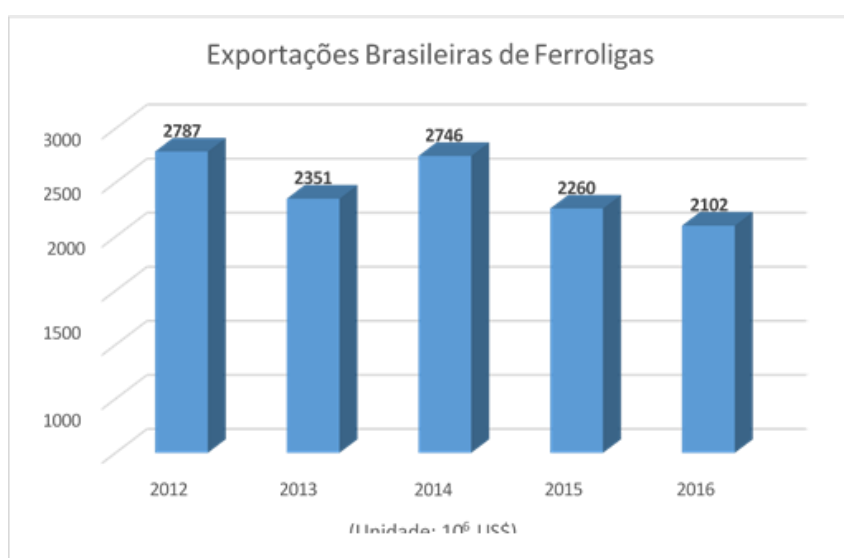
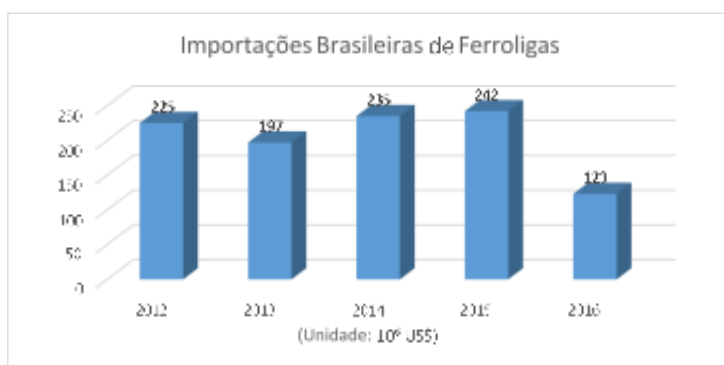


Figura 2.2 - Importações Brasileiras de Ferroligas (MME, 2017).



O mercado de ferroligas é segmentado pelo tipo de substância utilizada para a produção da liga. Os segmentos de maior representatividade, bem como os respectivos percentuais de produção em relação à produção mundial, são (FEAM, 2010):

- a) ligas de manganês, correspondendo a 39%;
- b) ligas de silício (incluindo silício metálico), que correspondem a 27%;
- c) ligas de cromo, com 26%;
- d) ligas de níquel, com 5%.

No ano de 2011, a produção brasileira de ferroligas foi em torno de 854 mil t, sofrendo uma diminuição, em torno de 8%, em relação ao ano anterior (MME, 2017). A Tabela 2.1 retrata a produção em toneladas de ferroligas entre os anos 2012 e 2016.

Tabela 2.1 – Produção brasileira de ferroligas (MME, 2017).

FERROLIGAS	2012	2013	2014	2015	2016
Ferroligas à base de	330.419	311.000	303.000	129.000	124.000
Ferroligas à base de	181.425	174.180	188.682	173.467	150.240
Ferroligas à base de	31.343	21.000	19.823	212.286	-
Ferroligas especiais (t)	80.187	71.600	51.737	52.000	-

2.1.1. Tipos de ferroligas

As ferroligas podem ser divididas em dois grupos: ferroligas de cromo, manganês e silício e as ferroligas especiais, constituídas de cobalto, molibdênio, nióbio, níquel, tungstênio e vanádio.

A produção de ferroligas pode ser realizada como um processo primário ou secundário, dependendo da matéria-prima que é utilizada (primárias ou secundárias). As principais reações químicas de ambos os processos podem ser apresentadas da seguinte forma (FEAM, 2010).

- Processos primários

Minério de óxido de metal + óxido de ferro/sucata de ferro + redutor $\rightarrow$ ferroliga + óxido redutor + escória

- Processos secundários

Sucata de metal + sucata de ferro $\rightarrow$ ferroligas

Segundo FEAM (2010), ferroligas primárias são produzidas, principalmente, por redução metalotérmica ou carbotérmica de óxidos de minérios e concentrados, onde a etapa mais importante é a carboredução, em que carbono na forma de coque (coque metalúrgico), carvão mineral ou carvão vegetal é normalmente utilizado como agente redutor.

A redução metalotérmica é realizada, principalmente, com sílica ou alumínio como agente redutor. As equações químicas a seguir mostram os princípios básicos das rotas carbo e metalotérmica de redução.

- Redução carbotérmica: Metal-óxido + Carbono $\rightarrow$ Metal + Monóxido de Carbono
- Redução silicotérmica: Metal-óxido + Silício $\leftrightarrow$ Metal + Óxido de Silício
- Redução aluminotérmica: Metal-óxido + Alumínio $\rightarrow$ Metal + Óxido de Alumínio (IPPC).

Segundo FEAM (2010), na produção de ferroligas uma das tecnologias mais usadas é a do forno elétrico de abertura superior a arco submerso. Nesse método, o aquecimento ocorre através de corrente que passa por eletrodos de grafite suspensos sobre uma cuba de aço recoberta de refratários, em formato de xícara. A redução de carbono dos óxidos metálicos se dá no momento em que tanto o coque ou carvão vegetal ou ainda os eletrodos de grafite, são consumidos. No decorrer da fusão das ferroligas, a reação de redução ocorre em alta temperatura. O carbono captura o oxigênio dos óxidos metálicos para formar CO₂, ao mesmo tempo que os minerais são reduzidos a metais básicos derretidos, desse modo, os metais presentes combinam-se na solução. A Tabela 2.2 descreve as propriedades conferidas pelas ligas aos aços.

Tabela 2.2 - Propriedades conferidas pelas ligas aos aços (FEAM, 2010).

Elemento de Liga	Influência na Estrutura	Influência nas Propriedades	Aplicações	Produtos
Níquel	Refina o grão e diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço	Aumento da resistência à tração e alta ductilidade	Aço para construção mecânica, aço inoxidável e aço resistente a altas temperaturas	Automóveis, utensílios domésticos e caixas para tratamento térmico
Manganês	Estabiliza os carbonetos, ajuda a criar microestrutura dura por meio de têmpera e diminui a velocidade de resfriamento	Aumento da resistência mecânica e temperabilidade da peça e a resistência ao choque.	Aço para construção mecânica	Automóveis e uso geral em engenharia mecânica
Cromo	Forma carbonetos e acelera o crescimento dos grãos.	Aumento da resistência à corrosão e a oxidação e a aumento da resistência a altas temperaturas	Aços para construção mecânica, aços-ferramenta e aços inoxidáveis	Indústria química, talheres, válvulas e peças para fornos e ferramentas de corte.
Silício	Auxilia na desoxidação, auxilia na grafitação e aumenta a fluidez.	Aumento da resistência à oxidação em temperaturas elevadas e melhora da temperabilidade e da resistência à tração.	Aços com alto teor de carbono e aços para fundição em areia.	Peças fundidas.
Vanádio	Inibe o crescimento dos grãos e forma carbonetos	Maior resistência mecânica, maior tenacidade e temperabilidade e resistência à fadiga e à abrasão.	Aços cromo-vanádio	Ferramentas de corte.
Tungstênio	Forma carbonetos muito duros.	Aumento da dureza, aumento da resistência a altas temperaturas.	Aços rápidos e a aços ferramentas.	Ferramentas de corte.
Cobalto	Forma carbonetos (fracamente) e desloca a curva TTT para esquerda.	Aumento da dureza, aumento da resistência à tração e resistência à corrosão e à erosão.	Aços rápidos e elementos de liga em aços magnéticos.	Lâminas de turbina de motores a jato.
Nióbio	Promove estabilização nos aços austeníticos, impedindo o empobrecimento de cromo via precipitação em forma de carbonetos	Aumenta a resistência à corrosão e capacidade de solda de aço e aço inoxidável.	Indústrias de construção civil, automotiva, naval, aeronáutica e espacial.	Tubulações (grades, estruturas, gasodutos e oleodutos) e ferramentas de alta precisão.

2.1.2 Ferroligas de níquel

O metal níquel tem sua utilização em diversos segmentos da indústria e na construção civil, por apresentar alta resistência à corrosão e às variações de temperatura, além de aparência e adequação na produção de ligas especiais. Essas características tornam a demanda pelo metal muito atrativa para

uma grande variedade de indústrias, sendo a de aço inoxidável a mais representativa (Carvalho et al., 2015).

As ligas de ferroníquel representam uma das alternativas de recuperação do metal de minérios lateríticos. A seleção desta rota depende de uma série de fatores, com destaque da natureza e concentração dos diversos componentes constituintes do minério. São denominados ferroníquel as ligas com teor do metal acima de 20%, abaixo desse valor, o produto é denominado gusa níquelífero (MME, 2009).

Estima-se que aproximadamente 12 a 14 t de escória de níquel sejam produzidos na produção de uma tonelada de liga de níquel (Saha e Sarker, 2016).

O níquel é o quinto elemento mais abundante em peso no mundo, atrás apenas do ferro, oxigênio, magnésio e silício (Cempel e Nickel, 2006).

Segundo BNDES (2000), o metal níquel possui reservas e depósitos mundiais conhecidos, suficientes para a exploração por mais de 100 anos. O minério pode ser classificado em dois tipos principais, segundo sua composição: o sulfetado e o laterítico.

Os minérios sulfetados apresentam em sua composição, além do níquel, sulfetos de cobre, cobalto e ferro, alguns metais valiosos (platina, prata e ouro) e enxofre, para a produção de ácido sulfúrico. São encontrados em camadas subterrâneas abaixo da região saprolítica, e representam cerca de 20% das reservas de níquel do ocidente, sendo principalmente encontrados na Austrália e CIS, seguidos por Canadá, China, África do Sul e Zimbábue. Cerca de 55% da produção total de níquel é oriunda dos minérios sulfetados (BNDES, 2000).

O minério laterítico, sua ocorrência se dá numa região mais superficial, mais especificamente a saprolítica. Seus depósitos, situados principalmente no Brasil, Cuba, Austrália, Indonésia, Nova Caledônia e Filipinas, possuem teores médios de níquel em torno de 1,95% e teores de óxido de ferro acima de 24%, além da presença de cobalto e magnésio. A região do pacífico asiático dispõe de extensos depósitos de minério laterítico, com teores de médio a alto. Nesta região, aproximadamente 70% da produção de níquel refinado é oriunda de minérios lateríticos, sendo os 30% restantes originados de minérios sulfetados.

O Brasil possui a segunda maior reserva mundial de níquel com 12.000.000 toneladas de minério e é o 7º produtor de níquel, com uma produção de 142.000 toneladas em 2017. A Indonésia passou a ser a maior produtora com produção de 400.000 toneladas, seguida pelas Filipinas (230.000 t), Canadá e Nova Caledônia (210.000 t) (USGS, 2018), como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Produção das minas de níquel em toneladas (USGS, 2018).

Países	Produção das minas de níquel (t)		Reservas Estimadas
	2016	2017	
Indonésia	199.000	400.000	4.500.000
Filipinas	347.000	230.000	4.800.000
Canadá	236.000	210.000	2.700.000
Nova Caledônia	207.000	210.000	-
Austrália	204.000	190.000	19.000.000
Rússia	222.000	180.000	7.600.000
Brasil	160.000	140.000	12.000.000
China	98.000	98.000	2.900.000
Guatemala	54.000	68.000	1.800.000
Cuba	51.600	51.000	5.500.000
África do Sul	49.000	49.000	3.700.000
Colômbia	41.600	49.000	1.100.000
Madagascar	49.000	45.000	1.600.000
Estados Unidos	24.100	23.000	130.000
Outros países	150.000	150.000	6.500.000
Total	2.092.300	2.093.000	73.830.000

A queda na produção de países como Austrália, Brasil, Canadá e Filipinas foi compensada pelo aumento na Indonésia, permitindo que a produção global se mantivesse constante. O aumento da produção na Indonésia se deve principalmente pelo fim da proibição das exportações de minério no país, enquanto a queda da produção nas Filipinas está atrelada ao não atendimento dos padrões ambientais.

Do total de recursos mundiais de níquel, cerca de 60% são de depósitos lateríticos. Os 40% restantes são de sulfetados (USGS, 2018). No Brasil, a maioria das reservas de níquel é do tipo laterítico.

A produção bruta de minério de níquel no Brasil no ano de 2016, se deve aos estados de Goiás (68,8%), Pará (19,9%) e Bahia (11,3%), como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Produção bruta de níquel nos estados brasileiros produtores (BRASIL, 2018)

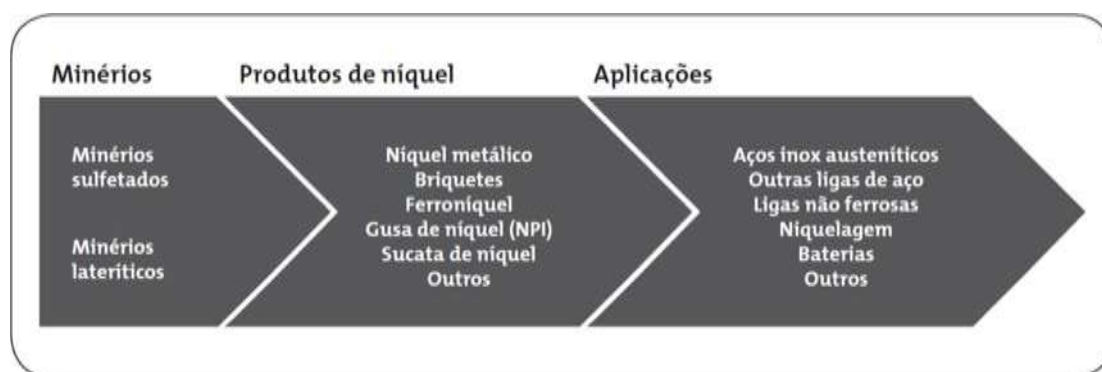
Estados	Quantidade (t)	Contido (t)	Teor Médio (%)
	Níquel (Ni)		
Goiás	5.900.006	94.607	1,60
Pará	1.710.450	34.993	2,05
Bahia	966.406	4.928	0,51
Total	8.576.862	134.528	1,57

As principais minas detentoras das reservas de níquel do Brasil estão apresentadas na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Principais reservas de Níquel do Brasil (BRASIL, 2018).

- Processos produtivos

O comércio de níquel abrange o mercado do minério de níquel bruto ou concentrado, dos produtos acabados de níquel, bem como dos bens e serviços derivados da aplicação do níquel, como pode ser observado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Níveis de comercialização do níquel (Carvalho et al., 2015).

O níquel é comercializado principalmente na forma de níquel metálico, óxido de níquel ou ferroníquel. As especificações e aplicações estão apresentadas na Tabela 2.5, a seguir.

Tabela 2.5 – Tipos de produtos e Aplicações (Carvalho *et al.*, 2015).

TIPO	ESPECIFICAÇÃO	APLICAÇÕES
NÍQUEL METÁLICO	NI 99,8% MÍNIMO	AÇO INOXIDÁVEL, LIGAS, SUPERLIGAS, QUÍMICOS, BATERIAS E PÓ METALÚRGICO
ÓXIDO DE NÍQUEL	NI 70%-99%	AÇO INOXIDÁVEL
FERRONÍQUEL	NI 18%-40%	AÇO INOXIDÁVEL

Além dos produtos tradicionalmente comercializados apresentados, o mercado observa nos últimos anos o crescimento da produção e utilização do chamado nickel pig iron (NPI) ou ferro-gusa de níquel, que foi desenvolvido na China, único país produtor até 2012. O ferro-gusa de níquel é produzido através do processo de redução de minérios lateríticos. Com o aumento da necessidade chinesa por níquel, entre 2004 e 2005, houve uma ascensão no preço do níquel, atingindo o ápice em 2007, fazendo com que a China, buscasse uma rota alternativa de produção, utilizando o minério de níquel praticamente em sua forma bruta (CRU, 2015). A entrada de grande quantidade desse novo produto no mercado, influenciou na queda nos preços do níquel em 2015.

A produção de níquel pode acontecer pelo processamento direto dos minérios sulfetados e lateríticos, chamado níquel primário, ou pela reciclagem de sucata de níquel, denominado níquel secundário (Carvalho et al, 2015).

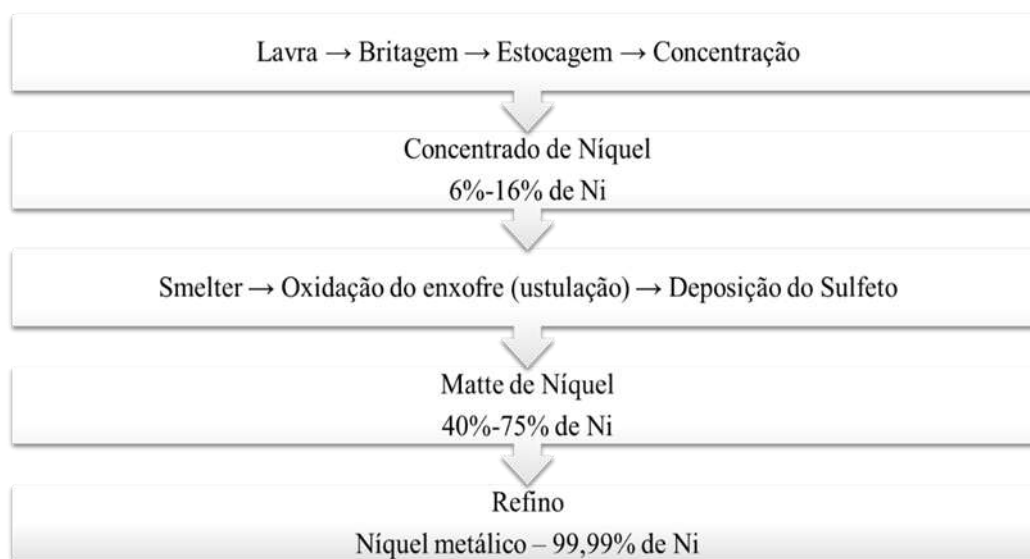
Segundo Carvalho et al. (2015), o níquel secundário é recuperado principalmente a partir do aço inoxidável austenítico ou de outros materiais reciclados contendo níquel. Vale ressaltar que o níquel é infinitamente reciclável, sendo assim, não perde suas propriedades nos processos de recuperação.

Na produção de níquel primário, as características geológicas das jazidas são fundamentais para a escolha da rota do processo a que serão submetidos os minérios, sendo diferentes para os minérios sulfetados e lateríticos.

- Processamento de minérios sulfetados

A tecnologia utilizada no beneficiamento do minério sulfetado é a mais difundida, apesar da alteração no perfil do processamento, recentemente observada, em virtude do crescimento mais acelerado do uso de minerais lateríticos. O processo é mostrado pela Figura 2.5.

Figura 2.5 - Rota pirometalúrgica de processamento de níquel sulfetado (Carvalho et al., 2015).



Segundo Carvalho et al. (2015), o processo inicia-se com a lavra, britagem, estocagem e concentração a fim de obter o concentrado de níquel, cujo teor varia de 6% a 16% de Ni.

Através da rota pirometalúrgica, o material é enviado a um smelter (fundição), onde se realiza a ustulação (oxidação do enxofre) e deposição do sulfeto, obtendo-se o matte de níquel (liga metálica com enxofre de no máximo 20%), resultando em uma concentração de Ni variando de 40% a 75%. Nessa etapa, no concentrado, ainda existem outros metais a serem separados, como o cobalto.

Por fim, a etapa do refino, surge para separar o metal, resultado em níquel metálico com teor de pureza de 99,99%.

A rota pirometalúrgica possui altos custos de processamento, exigindo teores de Ni superiores a 2%, além de ser um processo altamente poluente. Por esses motivos, pode-se utilizar a rota hidrometalúrgica, que usa a lixiviação ácida para a concentração (Carvalho et al., 2015).

- Processamento de minérios lateríticos

Carvalho et al. (2015) afirma que os depósitos de níquel laterítico são predominantemente superficiais, o que facilita a lavra do mineral a céu aberto. Esses depósitos apresentam, devido a variação de sua composição química, pelo menos dois tipos distintos de minérios, que são:

- o limonítico (elevados teores de ferro, alumínio e sílica, com baixos percentuais de magnésio), que é processado pela rota high pressure acid leaching (HPAL – lixiviação sob pressão);
- o saprolítico (baixos teores de ferro – até 20% – e alumínio, com elevados percentuais de magnésio e sílica), que é processado em rota pirometalúrgica, resultando no ferroníquel, produto utilizado para a fabricação de aços inoxidáveis.

O processamento de minérios lateríticos pode ser realizado por rota pirometalúrgica ou hidrometalúrgica, de acordo com o teor apresentado na composição do minério, como mostra a Tabela 2.6, a seguir.

Tabela 2.6 – Rotas para minérios lateríticos (Carvalho et al., 2015)

Composição	Processo (%)			
	HPAL	HPAL/Lixiviação Amoníaca	HPAL/lixiviação Amoníaca	Pirometalurgia
Fe	>38	17-38	10-17	<10
Mg	1	5	12	16-18
Ni	1,2	1,5	1,7	1,6-1,7
Co	>0,1	0,07-0,1	0,03-0,1	<0,03

A rota pirometalúrgica (Fe-Ni) é adequada para minérios com elevados teores de níquel (>2%) e magnésio (>10%). O minérios após lavrado, é enviado para secadores para a remoção da umidade, e após, direcionado ao forno onde é formado o concentrado de ferroníquel, com produção de escória.

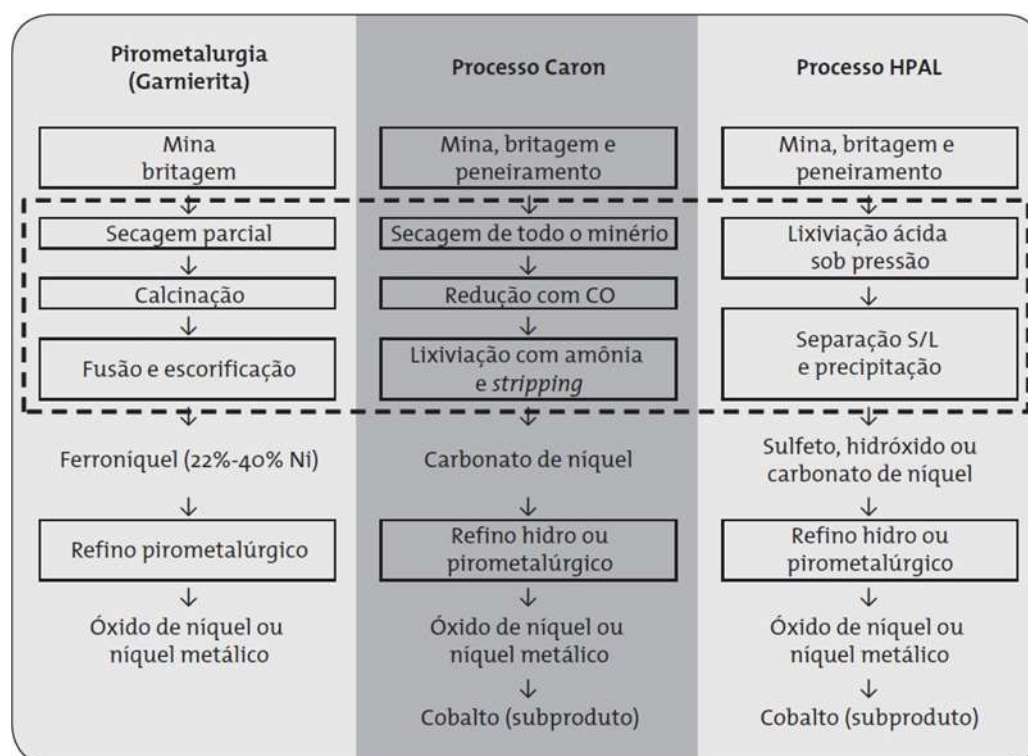
O concentrado tem teor de aproximadamente 23% de níquel e é destinado à indústria de aço inoxidável (Carvalho et al., 2015).

Segundo Carvalho et al. (2015), a rota hidrometalúrgica (HPAL) é utilizada em minérios com menor teor de níquel (<2%) e teores de magnésio de no máximo 8%. Nesse processo, o minério, inicialmente, passa por um beneficiamento físico, onde há a remoção de sílica. A seguir, em uma autoclave, o minério é misturado com ácido sulfúrico, para que o níquel, cobalto e outras impurezas sejam dissolvidos. A solução resultante contendo níquel é separada do rejeito e levada a etapas sucessivas de precipitação e refino, dando origem a soluções purificadas de níquel e de cobalto, que através de eletrólise, geram níquel e cobalto metálicos.

O Processo Caron, aplicável a minérios com teores acima de 1,5%, é uma combinação dos processos piro e hidrometalurgia. Nele, o minério é seco e ustulado, e lixiviado com a utilização de amônia. Após a lixiviação, etapas de refino semelhantes às descritas anteriormente são também utilizadas para a produção de metais. O processo Caron, foi idealizado no Brasil pela Votorantim, tem baixa aplicabilidade devido aos seus custos mais elevados por tonelada de níquel produzido, quando comparado aos processos pirometalúrgicos e HPAL, (Carvalho et al., 2015).

A Figura 2.6 demonstra, de forma simplificada, as rotas para o processamento de minérios lateríticos.

Figura 2.6 - Rotas de processamento de minérios lateríticos (Carvalho et al., 2015).



2.2 ESCÓRIAS FERROSAS E NÃO-FERROSAS

A escória é um resíduo gerado através do processamento pirometalúrgico de vários minérios. Seu uso não é recente, já que a escória foi utilizada na construção de estradas e muros durante o império romano (Yusof, 2005). No início do século XIX, a escória começou a ser utilizada na produção de cimento, construção de estradas, como lastro ferroviário e também na construção de pontes (Lee, 1974).

De acordo com Yusof (2005), a escória pode ser dividida em escória não ferrosa e ferrosa. Os vários tipos de escória possuem diferentes propriedades e características, que dependem de como são processadas durante a produção dos insumos principais.

A escória ferrosa é produzida durante o refino de metal ferroso tal como ferro e aço. A escória de alto forno surge durante a produção de ferro enquanto a escória de aciaria é produzida durante a produção de aço. Tanto a escória de alto forno quanto a de aciaria podem ser produzidas na forma granulada, peletizada ou resfriada a ar. Escória de alto forno tem sido usado por muitos anos e em muitas áreas. Por exemplo, a escória de alto forno é usada como um material de alta qualidade na indústria de cimento, na fabricação de vidro, fabricação de blocos de concreto e como agregados em pavimentação (Baldwin et al., 1997).

Já a escória de aciaria é utilizada como agregado na composição de lastros ferroviários e como material de base, sub-base e revestimento em pavimentos rodoviários pavimentação (Baldwin et al., 1997).

A escória não ferrosa é produzida durante a recuperação e processamento de metais não ferrosos a partir do minério natural. A escória é um subproduto fundido de processos de alta temperatura que é utilizado principalmente para separar os constituintes metálicos e não metálicos contidos na minério. Após resfriada, a escória fundida torna-se um material semelhante a uma rocha ou granular. Exemplos de escórias não-ferrosas são as de níquel, cobre, estanho, chumbo, zinco e fósforo pavimentação (Baldwin et al., 1997).

O forma de resfriamento em que a escória líquida é submetida interfere em sua formação e características. Ao passar por um processo de resfriamento lento, seus componentes formam diferentes fases cristalinas, perdendo parcialmente seu poder de aglomerante hidráulico. Por outro

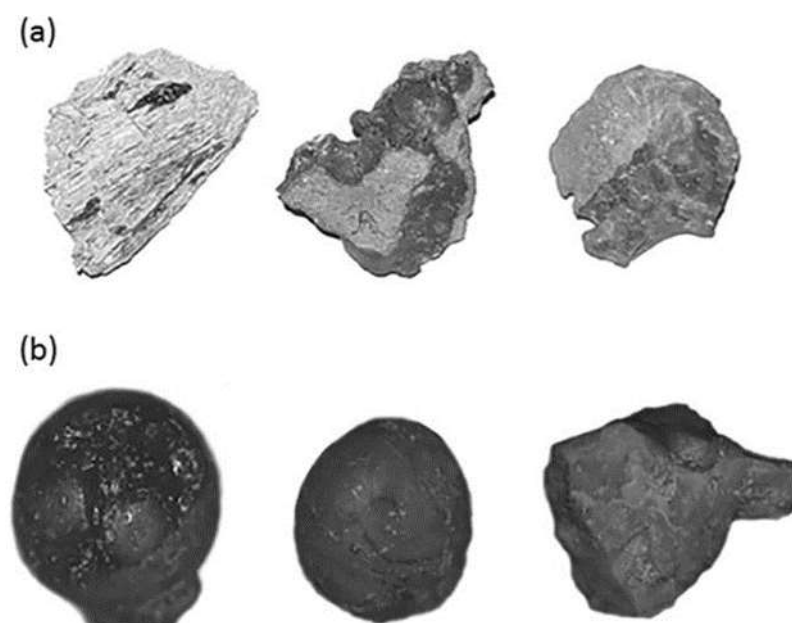
lado, se o resfriamento ocorrer de forma rápida seu potencial hidráulico, propriedade de endurecer-se quando em contato com a água, é mantido, pois a escória granula, passando a ficar vitrificada (Silva et al., 1988).

Na indústria de transporte, as escórias são usadas para a construção e manutenção de estradas como um agregado alternativo. As escórias também são amplamente usadas como agregados para concreto a base de cimento de alto-forno de Portland, em jateamento de areia e como lastro ferroviário (Yusof, 2005).

2.3 ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL

A escória de ferroníquel é um coproduto gerado a partir do processo de produção de ligas de ferroníquel que são usualmente utilizadas na fabricação de aços inoxidáveis e de ligas de ferro. Pode ser classificada em dois tipos diferentes, de acordo com o método de resfriamento, podendo ser escória resfriada ao ar ou escória resfriada a água (granulada). A escória resfriada a ar é lentamente resfriada ao ar livre em um poço aberto, enquanto a escória resfriada a água é rapidamente resfriada usando água, como mostrado na Figura 2.7 (Choi e Choi, 2015; Saha et al., 2018).

Figura 2.7 – (a) Escória de ferroníquel seca ao ar (b) Escória de ferroníquel seca à água (Choi e Choi, 2015).



Como pode ser observado na Figura 2.7, a escória de ferroníquel resfriada ao ar é de cor cinza clara e de natureza frágil. Por outro lado, a escória resfriada a água (granulada) é de cor escura, de tamanho esférico com estrutura oca e superfície lisa (Saha *et al.*, 2018).

Algumas características físicas da escória de ferroníquel obtidas por diferentes pesquisadores estão apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Características físicas de diversas escórias de ferroníquel (Saha *et al.*, 2018).

Autor	Choi e Choi (2015)	Choi e Choi, (2015)	Saha e Sarker, (2017)	Sato <i>et al.</i> (2011)	Sato <i>et al.</i> (2011)	Sakoi <i>et al.</i> (2013)	Shoya <i>et al.</i> (1999)	Togawa <i>et al.</i> (1996)	Togawa <i>et al.</i> (1996)
Resfriamento	Ar	Água	Água	Ar	Água	Água	Água	Ar	Água
País de origem	Japão	Japão	Grécia	Grécia	Grécia	Coréia do Sul	Coréia do Sul	Nova Caledônia	-
Massa específica (g/cm ³)	3,11	2,81	2,85	2,93	3,08	2,84	2,97	3,02	2,84
Absorção	1,64	0,71	0,42	1,87	0,13	1,98	1,2	2,2	0,73

Pela tabela é possível observar que geralmente a escória resfriada ao ar apresenta a densidade e absorção superiores as da escória resfriada a água (Saha *et al.*, 2018).

A Tabela 2.8 mostra a composição química de diversas escórias de ferroníquel estudadas por diferentes pesquisadores.

Tabela 2.8 – Características químicas de diversas escórias de ferroníquel (Saha *et al.*, 2018).

Autor	Choi e Choi (2015)	Choi e Choi, (2015)	Saha e Sarker, (2017)	Sato <i>et al.</i> (2011)	Sato <i>et al.</i> (2011)	Sakoi <i>et al.</i> (2013)	Shoya <i>et al.</i> (1999)	Togawa <i>et al.</i> (1996)	Togawa <i>et al.</i> (1996)
Resfriamento	Ar	Água	Água	Ar	Água	Água	Água	Ar	Água
Tipo de Minério	-	-	Laterita	Laterita	-	-	-	Garnierita	-
SiO ₂	55,6	52,7	32,74	40,29	41,18	62,8	58,1	53,29	19,8
Al ₂ O ₃	-	-	8,32	10,11	5,98	1,95	2,29	2,67	12,25
Fe ₂ O ₃	7,57	6,7	43,83	37,69	40,02	7,13	11,10	11,9	17,62
MgO	27,8	34,0	2,76	5,43	7,79	24,70	26,50	31,6	9,66
SO ₃	0,06	0,04	0,18	-	0,64	0,03	0,04	-	0,87
CaO	5,18	2,3	3,73	3,65	4,12	2,07	0,29	0,42	4,48
Na ₂ O	-	-	-	-	0,09	0,13	0,09	0,11	0,33
K ₂ O	-	-	-	-	0,37	0,02	0,09	-	0,04
Cr ₂ O ₃	-	-	3,07	2,58	2,75	-	-	1,08	2,48
NiO	-	-	0,1	0,09	0,13	-	-	0,1	0,30
Co ₃ O ₄	-	-	0,02	-	0,02	-	-	0,01	0,14

Nota-se que a escória de ferroníquel resfriada ao ar possui alta concentração de SiO_2 , baixo teor de MgO e presença significativa de CaO em comparação com a escória de ferroníquel resfriada a água (Saha et al., 2018).

Ainda de acordo com Saha e Sarker (2016), a composição química da escória de ferroníquel consiste principalmente de SiO_2 , MgO e Fe_2O_3 . Este material é formado por sílica amorfa, bem como minerais cristalinos, como enstatita, forsterita e dropsied. As composições químicas da escória podem ser diferentes dependendo de sua fonte, processamento e método de resfriamento (Lemonis et al., 2015; Maragkos et al., 2009; Komnitsas et al., 2007; Saha e Sarker, 2016).

É importante salientar as propriedades da escória de ferroníquel não obedecem a uma regra geral, portanto, para cada nova jazida devem ser determinadas suas propriedades pois elas podem variar dependendo da origem e do método de processamento do minério (Saha et al., 2018).

Já nos estudos realizados por Wang (2016) com a finalidade de aplicação da escória na pavimentação, no que se refere a composição química, a escória de ferroníquel mostra-se silicosa, com concentração de sílica variando de 50-55% e com alto teor de magnésio. A composição química da escória de ferroníquel é apresentada na Tabela 2.9 a seguir.

Tabela 2.9- Composição química da escória de níquel (%) (Wang, 2016).

Fe(total)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	S	P_2O_5	Ni
20,7-53,06	29-50,5	<0,10	1,8-3,96	1,56-26,7	0,35-0,36	0,03	0,03	0,36	0,002-0,003	0,16-0,17

Devido ao baixo teor de cal e alumina presente na escória, ao ser hidratada não há geração de silicatos, cal hidratada e alumina hidratada, que são os principais responsáveis pelas propriedades hidráulicas das escórias (Wang, 2016).

Ochida (1984) relatou que a escória de níquel possui baixa atividade hidráulica até mesmo com a introdução de um agente catalisador ou ativador, como óxido de cálcio.

No que se fere as propriedades mineralógicas, a escória de ferroníquel, é composta principalmente por uma grande fase vítrea concentrada nas partículas menores e de uma pequena faixa cristalina

presente nas partículas maiores. Não há presença de óxidos livres em sua composição e fase cristalina existente é composta principalmente de enstatita e forsterita (Ochida, 1984; Wang, 2016).

A escória é, portanto, vítreo, o que torna muito abrasivo e não muito friável. Esta fase vítrea é potencialmente composta de enstatitos (silicatos de cadeia - MgSiO_2), o que o torna muito diferente da composição mineralógica potencial da escória de ferro comum (Ochida, 1984; Wang, 2016).

A escória de ferroníquel resfriado ao ar apresenta estrutura maciça, textura amorfa, e seu peso unitário é de aproximadamente 3500kg/m^3 , possui baixa absorção, isto é, em torno de 0,37%. O peso unitário de escória de ferroníquel é um pouco maior que a do agregado convencional (Chesner et al., 1998; Wang, 2016).

A Tabela 2.10 apresenta as propriedades básicas mecânicas e físicas do agregado de escória de ferroníquel.

Tabela 2.10 - Propriedades básicas do agregado de escória de ferroníquel (adaptado de Wang, 2016).

Densidade específica	3,16-3,31
Absorção (%)	0,73-1,25
Abrasão Los Angeles (% perda)	13,3-22,0
Perda de resistência à sulfato de magnésio (%)	0,5-1,5

No que se refere a escória de ferroníquel granulada (resfriada à água), ela é angular, de cor preta, vítrea "areia" com a maioria das partículas na faixa de 2mm (#10) a 0,150mm (#100). É mais porosa, com menor peso unitário e maior absorção, do que a escória de níquel resfriada ao ar. A escória de ferroníquel é muito abrasiva e não se presta bem à moagem. As propriedades físicas e mecânicas básicas da escória de níquel conferem um alto potencial a ser usado como um agregado (Wang, 2016).

2.4 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIAS NA PAVIMENTAÇÃO

Segundo Wang e Emery (2004) atividades de pesquisa sobre a utilização e aplicação de escórias são essenciais para o aumento do uso tanto de escórias ferrosas quanto de não ferrosas na construção civil, rodoviária e ferroviária. Diferentemente da escória de alto forno, que é volumetricamente estável, a escória de aciaria contém óxidos instáveis, que se hidratados, podem resultar em instabilidade

volumétrica. Por isso, esse material deve ser tratado adequadamente, passando por testes e controle de qualidade para garantir seu uso na construção de rodovias.

O uso efetivo da escória de ferroníquel na pavimentação baseia-se principalmente na experiência prática na República Dominicana com esse material, onde foi estudado em laboratório e também através de um trecho experimental, que essa escória pode ser um excelente agregado em base granular, material de enchimento e misturas betuminosas à quente (Wang e Emery, 2004).

Wang e Emery (2004) afirmam que utilização de escória na construção de estradas é um processo geral que inclui várias etapas desde a produção de escória até os usos finais. Para que a utilização seja bem sucedida o material passa por diversos estágios como mostrado na Figura 2.8, sendo que qualquer pode afetar o uso final da escória para a construção de rodovias.

Figura 2.8 – Processo para utilização de escórias na construção de estradas. Adaptado de Wang e Emery (2004).



Os estágios incluem: pré ou pós-tratamento da escória; caracterização química e física (principalmente no que se refere ao potencial de expansão e componentes deletérios); e ainda a avaliação do potencial de desempenho de campo. As principais aplicações da escória, são como material granular ou como agregado em misturas betuminosas à quente, uso em agregado para concreto de cimento Portland e também em aplicações cimentícias (cimentos de escória).

Assim, para o uso correto de qualquer escória, é fundamental o conhecimento de sua composição química e mineral que podem trazer quaisquer propriedades negativas (como por exemplo, a expansão volumétrica na escória de aciaria) e como essas propriedades negativas podem afetar o desempenho dos produtos finais. É necessário tratar e modificar as propriedades da escória e fazer um correto controle de qualidade durante todo o processo. Uma vez que as propriedades físicas e mecânicas atendam aos requisitos dos produtos finais, a utilização se torna viável (Wang e Thonson, 2011).

2.5 PATOLOGIAS ESTRUTURAIS NO PAVIMENTO GERADOS PELA EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS

O uso de escórias em obras de infraestruturas e superestruturas de rodovias e ferrovias exige cuidados, pelo fato de as escórias, em geral, possuírem características expansivas ocasionadas, principalmente, pela hidratação de cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à corrosão e oxidação do ferro metálico residual, produzindo tensões internas que originam trincas e até acarretam na fragmentação do material, ou seja, numa expansão destrutiva (Alexandre e Raguin, 1984; Ângulo et al., 1996; Fernandes, 2010; Geiseler et al., 1999; Gumiere, 2002; Machado, 2000; Motz e Geiseler, 1998; Sahay et al., 2000; Torres, 2018).

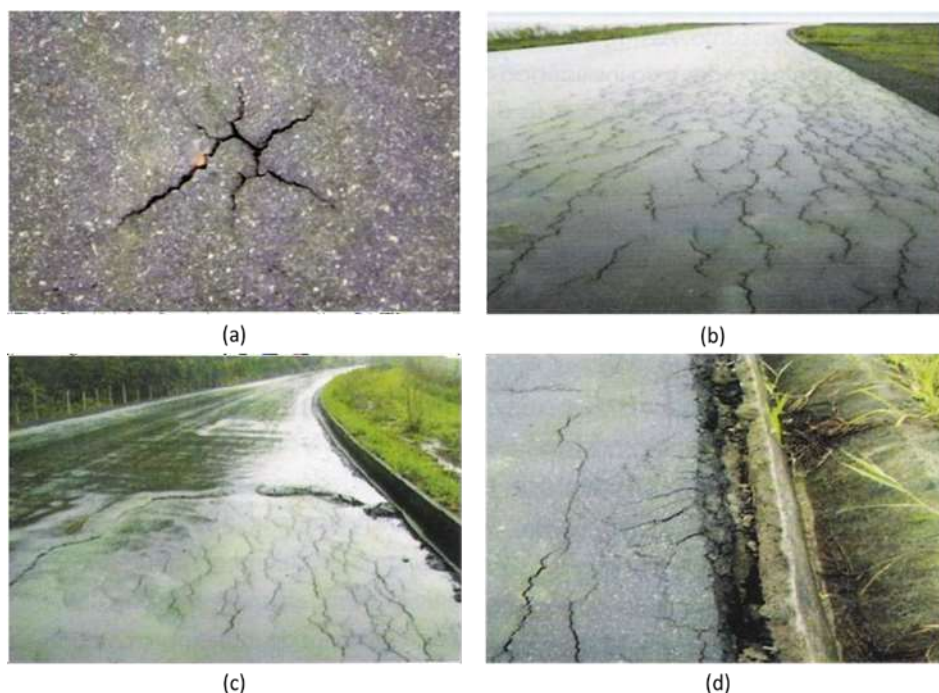
A escória é utilizada em concreto asfáltico no Japão desde 1979, entretanto, houve a necessidade de criação de uma normatização que especifica a produção de escórias para pavimentação através de diferentes formas de estabilização e com diferentes granulometrias, para empregos em camadas de pavimentos, misturas asfálticas, entre outros. A norma afirma que não há perda de resistência no pavimento desde que a expansão seja inferior a 2,5% (Filev, 2013; Santos 2013).

As patologias causadas na estrutura do pavimento pela expansão da escória podem ocorrer com sua utilização tanto em camadas de base, sub-base ou no revestimento asfáltico. Ao ser usada no revestimento, o desgaste sofrido pelo mesmo devido a ação do tráfego, pode ocasionar a remoção da

película de ligante que envolve a escória e ao entrar em contato com a água expandem, devido as reações de hidratação (Silva et al., 2003; Castelo Branco, 2004; Silva, 2010).

Dependendo do processo de expansão dos grãos e desenvolvimento das fissuras no revestimento causadas pela expansão da escória associado a outros fatores, as trincas podem se apresentar de variadas formas (Figura 2.9), tais como: fissuras denominadas “vulcãozinho” (trincas radiais), “quebra-molas” (trincas transversais) ou trincas longitudinais (Gontijo, 2006; Freitas, 2007).

Figura 2.9 - Patologias em pavimentos causadas pela expansão da escória: (a) trica radial; (b) trincas longitudinais; (c) trincas transversais e (d) deslocamento rotacional da sarjeta (Gontijo, 2006).

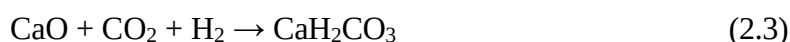


A expansibilidade da escória de aciaria ocorre, principalmente, através das reações de hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO) que são os maiores responsáveis pela expansão, desintegração e enfraquecimento por diferença de volume durante as suas reações.

Após 15 anos de pesquisa, Silva et al. (2003) concluíram que a cinética da reação de hidratação do MgO é muito lenta. O MgO pode estar presente na escória na forma de wustite, isto é, Fe (Mn, Mg, Ca) O , em estado vítreo, ou em solução sólida principalmente com FeO e MnO . A forma livre de MgO (periclásio), volumetricamente instável, é formada em condições de baixa basicidade. Nas escórias, por possuírem alta basicidade, há geralmente a formação de uma solução sólida de MgO (Wang et al., 2010).

A expansão também é causada, em menor intensidade, pela corrosão e oxidação do ferro metálico residual e pela transformação alotrópica do C2S no resfriamento lento das escórias (Kandahal e Hoffman, 1998; Silva, 2010).

Segundo Castelo Branco (2004) a cal livre quando hidratada forma o composto Ca(OH)_2 , tendo sua reação expressa pela Equação 2.1. O MgO , ao entrar em contato com a água, reage gerando hidróxido de magnésio ou brucita (Mg(OH)_2) (Equação 2.2). A expansão do material também pode ocorrer pelo reação de carbonatação, que é mostrada na Equação 2.3.



Em menor intensidade, a expansão da escória ocorre devido a corrosão do ferro metálico (Fe_0) que é ocasionado pela diferença de volume molar dos produtos de oxidação e corrosão. Os compostos formados através desse processo estão mostrados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Produtos formados na oxidação e corrosão do ferro (Machado, 2000).

Reações	Formação	Produto
Oxidação	$\text{Fe}_0 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	Wustita
	$2 \text{Fe}_0 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
	$3 \text{Fe}_0 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	Magnetita
Corrosão	$\text{Fe}^{+2} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe(OH)}_2$	Hidróxido Ferroso
	$4 \text{Fe(OH)}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Fe(OH)}_3$	Hidróxido Férrico

Além disso, a escória pode sofrer expansão por mudanças nas formas alotrópicas do 2CaO-SiO_2 de β (larnita) para γ (calcolivina) durante o resfriamento lento da escória a, aproximadamente, 725°C , causando uma alta expansão volumétrica (da ordem de 11,0%) ocasionando o esfarelamento da mesma.

Segundo Fernandes (2010), os problemas decorrentes da expansibilidade das escórias podem ser extintos por meio de um tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos mediante um período de estabilização química, ou cura, dessas escórias na forma sólida, ou por meio de

tratamento de escórias líquidas, fazendo alterações no processo de resfriamento aplicado nas escórias, ou ainda, adicionando-se agentes redutores e estabilizantes, visando a estabilização e a melhoria das propriedades das escórias a serem empregadas. A cura da escória se dá com o fim das reações de hidratação e carbonatação das substâncias expansivas por meio da exposição da escória ao processo de umectação.

2.6 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL NA PAVIMENTAÇÃO E CONSTRUÇÃO CIVIL

Emery (1982) cita a utilização da escória de níquel como agregado para base granular em uma estrada no interior de uma mina onde essa escória foi produzida. O pavimento demonstrou um desempenho satisfatório considerando condições de tráfego e operação elevados. A escória de níquel tem sido usada como base granular e materiais de aterro, substitutos de agregados naturais em concreto asfáltico, material de aterro de mina, material de lastro ferroviário e também na fabricação de cimentos

Huang et al. (2013) buscaram investigar a viabilidade de reutilização da escória de ferroníquel como material de adição para melhoramento do solo, substituindo os materiais de construção convencionais, como areia e pedregulhos, na camada de sub-base e base de um pavimento. Foram realizados ensaios de caracterização física, ambiental e também CBR. Ao adicionar a escória de ferroníquel ao solo, o ensaio de CBR mostrou um ganho de resistência na mistura e ainda mostrou baixos valores de expansão, por possuir baixa capacidade de absorção de água. O ensaio ambiental mostrou que o material pode ser classificado como resíduo não perigoso. Os autores concluíram que é viável a utilização da escória de níquel com a substituição do material variando de 30% a 50% do total da amostra.

Wang (2016) relata a reconstrução e ampliação de 140 km da Rodovia Duarte, localizada na República Dominicana, entre os anos de 1994 e 1996, com o uso da escória de ferroníquel na camada de sub-base e também como agregado para concreto asfáltico. O material é proveniente da mineração Falcondo, no estado de Bonao, que produz ferroníquel a partir de minério laterítico, Figura 2.10.

Figura 2.10 – Vista da área de processamento da escória de níquel próximo ao local da construção
(A). Usina de produção de asfalto próximo ao local de construção da rodovia (B) (Wang, 2016).



As amostras passaram por ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas, exames petrográficos, e também projetos de mistura asfáltica pelas metodologias Marshall e Superpave. Testes adicionais incluíram ensaio de autoclave para determinação do teor de cal e magnésio livres, análises químicas e mineralógicas.

O teor de projeto encontrado pela metodologia Marshall foi de 5,2% de ligante asfáltico, com Vv (volume de vazios) de 4%, estabilidade Marshall de 16.691 N, VAM (vazios no agregado mineral) de 14,5. Os resultados permitiram a aprovação total da escória de níquel como material para sub-base granular e também como agregado para concreto asfáltico. O monitoramento ao longo dos anos mostrou um desempenho satisfatório além do ganho ambiental, por ter substituído milhões de toneladas de agregado natural (Wang, 2016). A Figura 2.11, mostra a construção da rodovia, e a mesma, 5 anos após o fim da construção.

Figura 2.11 - Rodovia Duarte, República Dominicana: (A) Pavimento de concreto asfáltico contendo agregado de escória de níquel. (B) Rodovia 5 anos após sua construção.



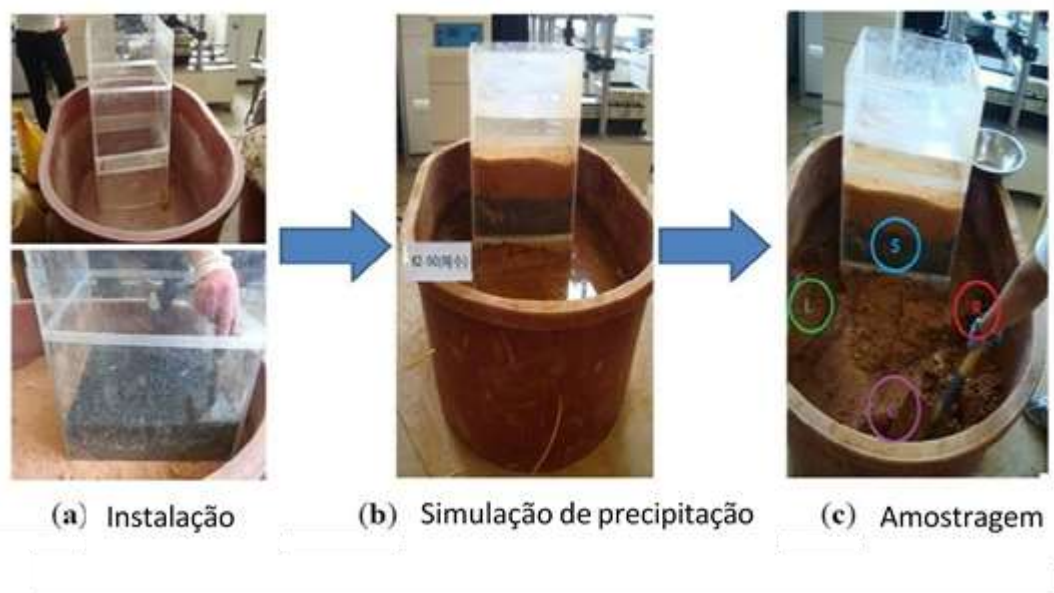
Kang et al. (2014), analisaram o potencial de contaminação do solo em três áreas distintas onde foram utilizados a escória de ferroníquel como material de construção. No Complexo Industrial de Gwangyang e na Suncheon Lakehills Front Plaza utilizou-se escória de ferroníquel na construção de drenos horizontais, já no Píer Yeosu Oil and Chemical a escória foi utilizada na construção de calçadas. Os três locais estão próximos uns dos outros (cerca de 50 quilômetros de distância) e estão localizados na parte sul da Coréia do Sul, Figura 2.12.

Figura 2.12 - (A) Dreno horizontal no Complexo Industrial de Gwangyang; (B) Construção de calçada no Píer Yeosu Oil and Chemical e (C) Dreno horizontal na Suncheon Lakehills Front Plaza.



A análise de contaminação foi feita nessas amostras através de uma série de testes de laboratório e também através de uma câmara de solo experimental (Figura 2.13) que reproduziu as condições semelhantes às dos locais onde as amostras foram retiradas.

Figura 2.11 - Câmara para análise experimental de contaminação do solo (Kang et al.,2014).



Nos testes de laboratório, foram utilizados três agentes de lixiviação, que foram água doce, água ácida e água do mar. Após a simulação de lixiviação além do solo, o pH do efluente liberado da câmara experimental também foi analisado. Tanto as análises de contaminação das amostras dos solos retirados das 3 áreas selecionadas, quanto dos solos analisado na câmara experimental, revelaram que os metais pesados detectados estavam dentro dos limites permitidos. Portanto, não há preocupação

quanto à contaminação por metais pesados no solo circundante às áreas onde foram utilizadas a escória de níquel (Kang et al., 2014).

Samnur et al. (2016), analisaram a possibilidade da utilização do pó da escória de ferroníquel proveniente do alto forno como geopolímero. Para isso, as amostras passaram por análises de suas propriedades físico-químicas com base nos dados de ensaios de Difração de Raios-X (XRD), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). O resultado de XRD indicou uma formação identificada como quartzo (SiO_2). Os resultados do SEM mostraram que o tamanho médio dos grãos das amostras, variam de 1 μm a 4 μm . Com base no resultado de EDS, os principais elementos constituintes são Si 32,86%, Mg 19,40% e Fe 32,03%. A presença dos elementos Si e Al com raios maiores que 8, torna possível a utilização da escória de ferroníquel como matéria-prima para a síntese de um geopolímero.

Lima e Zampieron (2009) caracterizam uma escória de níquel para ser utilizada como matéria prima em pigmento cerâmico. Foram realizados ensaios de caracterização granulométrica, caracterizações por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de raios-X, a fim de caracterizar sua morfologia e composição química. As amostras foram moldados em forma de pastilhas, Figura 2.14, que foram submetidas aos pares à temperaturas de 600, 700, 800, 900 e 1000°C.

Figura 2.12 – Corpos de prova submetidos a temperaturas variando de 600 °C a 1000 °C. Fonte: Lima e Zampieron (2009)



Os autores observaram que as partículas possuíam forma irregular e os elementos predominantes foram Si, Fe e O. Na temperatura de 600 °C foi evidenciada a fase Olivina de composição (Mg.FeO.SiO_4), que, em temperaturas superiores a 700 °C desaparece, portanto, é possível utilizá-la em pigmento cerâmico até a temperatura de 600°C. Já a fase de magnetita e hematita de composição (Fe_3O_4 ;

Fe2O3), está presente em todas as temperaturas trabalhadas possibilitando um pigmento estável em temperaturas elevadas. Nas análises de difração de raios-X verificou baixos índices de metais pesados, o que se deve à sua provável lixiviação ocorrido nos depósitos de descartes. Sendo assim, possibilidade do reaproveitamento da escoria de níquel é uma alternativa viável (Lima e Zampieron, 2009).

Innocentini et al. (2016), utilizaram a escória de níquel como matéria prima na fabricação de telhas cerâmicas. Para a fabricação das telhas, eram comumente utilizadas 3 tipos de argilas, a Mutuca Preta, a Mata Santa e a Vermelha Jacir. Para a caracterização dos materiais foram realizados ensaios prévios de análise granulométrica, difração de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial, sinterização por dilatômetro óptico além de ensaios de lixiviação e solubilização. Foram preparadas 6 misturas com diferentes proporções entre as matérias-primas, como pode ser observado na Figura 2.15.

Figura 2.13 - Detalhes das matérias-primas utilizadas na fabricação de telhas (Innocentini et al., 2016).

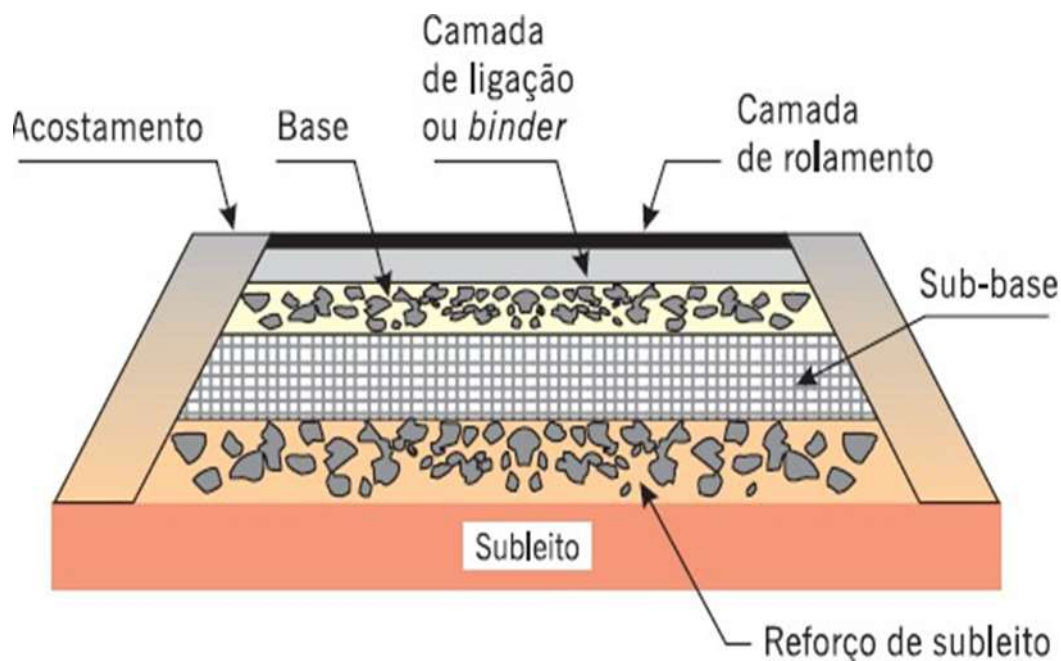


Segundo os autores, os resultados indicaram melhora na densidade, na porosidade e nas propriedades mecânicas de telhas cerâmicas após a incorporação da escória de níquel. A melhor proporção encontrada foi a de 75% de argila Jacir e 25% de escória.

Santos (2013), buscou a aplicação da escória de ferroníquel como agregado alternativo em pavimentação rodoviária de baixo custo com vários traços de misturas asfálticas e como emprego para base e sub-base. Para isso, realizou a caracterização física, química e mineralógica da escória de ferroníquel através de ensaios de Difração de Raio-X, Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) e AIMS. Definiu o traço da mistura

- O semirrígido caracteriza-se pela presença de base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.
- O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas, quando submetidas a carregamentos, sofrem deformação elástica significativa, com a distribuição da carga aplicada distribuindo-se em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Sua estrutura geralmente é constituída por um revestimento que pode ser betuminoso ou de calçamento em pedras irregulares ou blocos regulares, assentes sobre base e sub-base flexíveis estabilizadas granulometricamente, ou por meio de adição de aditivos como cimento, cal e betume, sobre subleito ou reforço de subleito construído, como mostra a Figura 2.17 abaixo.

Figura 2.15 - Seção típica de um pavimento flexível (Bernucci et al., 2008).



2.7.1 Camadas do pavimento

A principal finalidade das camadas de pavimento é oferecer proteção ao subleito. Os primeiros projetos de pavimento eram baseados em estudo empíricos, com observações isoladas e locais e foram inicialmente propostos por Hogentogler e Terzaghi, em 1929. Neste mesmo ano, o Departamento de

Estradas da Califórnia, iniciavam pesquisas para relacionar a espessura das camadas do pavimento com o ensaio de CBR (Huang, 2004 apud Santos, 2013).

A partir de 1970, surgiram as primeiras análises do comportamento estrutural dos pavimentos baseadas no cálculo de tensões e deformações por meio da utilização de programas computacionais que facilitaram a análise mecânica dos sistemas em camadas. No ano de 1966 o professor Murilo Lopes de Souza introduziu no Brasil o método para o dimensionamento de pavimentos baseado no ensaio California Bearing Ratio (CBR) (Medina, 1997; Soares, 2000; Motta, 2002; Castelo Branco, 2004).

O subleito é a camada de fundação do pavimento. No caso de camada infinita, deve ser considerado subleito somente a camada mais próxima da superfície, pois quanto maior a profundidade no solo, menor é a pressão recebida, chegando ao ponto de se tornar desprezível (Senço, 2008).

Segundo Balbo (2007), o reforço de subleito é uma camada com propriedades mecânicas melhores que o subleito, com a finalidade de reduzir as pressões que chegariam no subleito. Sua execução não é obrigatória, pois em caso de maior espessura nas camadas acima, a pressão também seria reduzida até chegar ao subleito.

A sub-base, deve possuir boa capacidade de suporte e prevenir o bombeamento do solo do subleito para a camada de base.

A camada de base deve oferecer suporte estrutural, suportando as cargas verticais do tráfego e distribuindo-as para as camadas inferiores.

A imprimação é uma camada de material que é aplicada sobre a base, após esta estar concluída, e antes da aplicação do revestimento. Sua principal função é de impermeabilização, e ainda aumentar coesão superficial permitindo uma maior aderência do revestimento com a base.

Segundo Silva (2008) as principais funções do revestimento é impermeabilizar o pavimento, aumentar sua resistência a possíveis derrapagens, garantir conforto aos usuários e suportar as cargas oriundas do tráfego e das intempéries climáticas.

O revestimento asfáltico é a camada superior da superestrutura rodoviária capaz de resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores. Tem a função de impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento, oferecendo conforto

e segurança ao usuário. O revestimento é constituído basicamente por agregados e ligantes asfálticos (Bernucci et al., 2006).

Segundo Bernucci et al. (2006) a impermeabilização, a grande união dos agregados e resistência à maioria dos ácidos, são características que fazem com que o que o asfalto seja a opção mais utilizada na pavimentação. Dados da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (Abeda) mostram que mais de 90% das estradas pavimentadas nacionais são de revestimento asfáltico.

2.7.2 Misturas asfálticas

A mistura entre agregados e ligante é realizada em usina estacionária e posteriormente transportada para a pista, onde é lançada e compactada ao ponto de alcançar um grau de compressão tal que resulte num arranjo estrutural estável e resistente, em relação às deformações permanentes e às deformações elásticas repetidas da passagem do tráfego. As misturas podem ser à quente onde se diferenciam pela granulometria dos agregados, às exigências de características mecânicas e em função da aplicação a que se destina, ou podem ser pré-misturadas a frio, onde se faz uso de emulsões asfálticas como ligante para envolver os agregados (Bernucci et al., 2006).

- Misturas asfálticas à quente

As misturas asfálticas a quente podem ser divididas em três tipos dependendo da graduação dos agregados e fíler, são elas (Bernucci et al., 2006):

- Graduação densa: curva granulométrica bem-graduada com os agregados de tamanho menor ocupando os vazios dos maiores, formando assim uma estrutura com baixo índice de vazios. Ex.: concreto asfáltico – CA.
- Graduação aberta: curva granulométrica uniforme, com agregados basicamente de um mesmo tamanho e deficiência de finos, formando um material com alto volume de vazios, permitindo a percolação da água na mistura asfáltica. Ex.: camada porosa de atrito – CPA.
- Graduação descontínua: a mistura possui maior número de grãos de dimensões maiores em relação aos de dimensões intermediárias, e pouca quantidade de finos, formando um

esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente com o maior número de contatos entre os agregados graúdos. Ex.: matriz pétreo asfáltica (SMA).

- Misturas asfálticas usinadas à frio

As misturas pré-misturadas a frio (PMF) consistem em misturas usinadas à temperatura ambiente de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, juntamente com emulsão asfáltica de petróleo (EAP). O PMF pode ser usado em revestimentos de ruas e estradas de baixo volume de tráfego, e também como camada intermediária (com CA superposto) e em operações de conservação e manutenção. São subdivididos em (Bernucci et al., 2006):

- Denso – graduação contínua e bem-graduado, com baixo volume de vazios;
- Aberto – graduação aberta, com elevado volume de vazios.

2.7.3 Concreto asfáltico

Um dos principais tipos de revestimento utilizado no Brasil é o concreto asfáltico (CA) também conhecido como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), que é resultado da mistura previamente quantificada de agregados com diversas granulometrias e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente determinadas. No Brasil, os cimentos asfálticos de petróleo mais empregados são do tipo CAP 30/45, CAP 50/70 ou CAP 85/100.

Segundo Bernucci et al. (2006), graças ao arranjo de partículas bem graduadas, o teor de ligante asfáltico necessário para cobrir as partículas e ajudar a preencher os vazios não pode ser muito elevada, pois após a compactação a mistura precisa conter cerca de 3 a 5% de vazios com ar. Se a mistura não apresentar esses vazios, elas podem deixar de serem estáveis ao tráfego e, por fluência, sofrerem significativas deformações.

O teor de asfalto em peso varia normalmente entre 4,5 a 6,0%, dependendo da forma dos agregados, massa específica dos mesmos, da viscosidade e do tipo do ligante, podendo sofrer variações em torno desses valores. Para o teor de projeto, a relação betume-vazios deve se enquadrar na faixa de 75 a 82% para camada de rolamento (Bernucci et al., 2006).

A composição do concreto asfáltico deve satisfazer aos requisitos da Tabela 2.12, com as respectivas tolerâncias no que diz respeito à granulometria e aos percentuais do ligante asfáltico determinados pelo projeto da mistura.

Tabela 2.12 – Faixas de composição do Concreto Asfáltico (DNIT, 2006a).

Peneiras		% em massa, passando			
#	mm	A	B	C	Tolerância
2"	50,8	100	-	-	
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	±7
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	±7
1/2"	12,7	-	-	80-100	±7
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7
nº4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5
nº 10	2	20-40	20-45	22-50	±5
nº 40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5
nº 80	0,18	5-20	8-20	4-16	±3
nº 200	0,074	1-8	3-8	2-10	±2
Asfalto solúvel no CS2(+)(%)		4,0-7,0 Camada de ligação	4,5-7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5-9,0 Camada de rolamento	±0,3

2.8 MÉTODOS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Os métodos de dosagem de misturas asfálticas têm o propósito de estimar a seleção de materiais que proporcionam ao revestimento um comportamento mecânico capaz de resistir as solicitações de carregamento impostas pelo tráfego (Silva, 2010).

A finalidade da dosagem de misturas asfálticas é determinar as proporções de agregados e ligantes, para que quando misturados atendam aos requisitos estabelecidos pelas especificações, proporcionando ao revestimento um comportamento mecânico resistente às solicitações de carregamento impostas pelo tráfego. Com isso, diversas metodologias foram desenvolvidas em todo o mundo para dosagem de misturas asfálticas, sendo que cada uma apresenta critérios próprios estabelecidos das relações entre os resultados de ensaios de laboratórios e os obtidos em campo (Wesseling, 2005).

Os principais métodos de dosagem de concreto asfáltico são : (a) o método Hubbard- Field, (b) Método Hveem, (c) método Marshall, que utiliza a compactação por impacto e estabelece o teor ótimo de ligante baseado em propriedades volumétricas e medidas de Estabilidade e Fluência; (d) método Superpave, sendo uma metodologia que estima o teor de projeto baseada no volume de vazios e no conhecimento da granulometria dos agregados, com utilização de um dispositivo mecânico, denominado compactador giratório Superpave (SGC), para a modelagem dos corpos-de-prova (Bernucci et al., 2006). No Brasil, o método Marshall ainda é o mais utilizado, enquanto o Superpave vem sendo mais aplicado em pesquisas acadêmicas.

2.8.1 Método de dosagem Marshall

O método Marshall foi desenvolvido na década de 1940 pelo Engenheiro Bruce Marshall, do Departamento de Estradas de Rodagem do estado do Mississippi, nos EUA, com a finalidade determinar a proporção de ligante e agregados capazes de resistir a solicitações de carga e pressão de pneus de aeronaves militares (Bernucci et al., 2006). Por se tratar de um ensaio que faz uso de equipamentos simples, de baixo custo e ainda ser relativamente mais rápido que outros métodos, o procedimento Marshall rapidamente se difundiu para a maioria dos Estados Americanos e para outros países.

Em 1995, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) oficializou o método de ensaio Marshall para misturas betuminosas a quente, que está normatizado pela norma DNER-ME 43/95.

Com o passar do tempo, sofreu alterações para adaptar-se à realidade do aumento de carga e da pressão dos pneus dos veículos e, onde, novos critérios para a determinação da quantidade ótima de ligante foram sugeridos, para que os valores fossem mais próximos dos correspondentes à estabilidade e densidade aparente máxima, além dos outros parâmetros, como porcentagem de vazios, relação betume vazios, estabilidade e fluência, terem tido seus valores modificados para a nova realidade (Amaral, 2000; Silva, 2016)

Segundo NCHRP (2001) o método caracteriza-se pela seleção do ligante asfáltico e do agregado de modo a atender a determinadas especificações de projeto. A compactação é feita por impacto através de soquete padrão em corpos de prova cilíndricos e que devem respeitar limites pré-estabelecidos de volume de vazios, vazios no agregado mineral e, em alguns casos, também à relação betume-vazios.

Além disso, algumas agências estabelecem limites também quanto aos valores de estabilidade e de fluência (NCHRP, 2001).

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado todo o programa experimental adotado, a fim de caracterizar e avaliar a viabilidade técnica da utilização da escória de ferroníquel como agregado na composição de concreto betuminoso usinado à quente.

A escória de ferroníquel utilizada nessa pesquisa é proveniente da Mineração Onça Puma, em Ourilândia do Norte, localizada no estado do Pará.

O material foi amostrado e transportado para o Laboratório de Ferrovias e Asfalto, na UFOP, onde realizou-se a maior parte dos ensaios.

A campanha de ensaios da escória de ferroníquel e das misturas asfálticas foi dividida em três etapas.

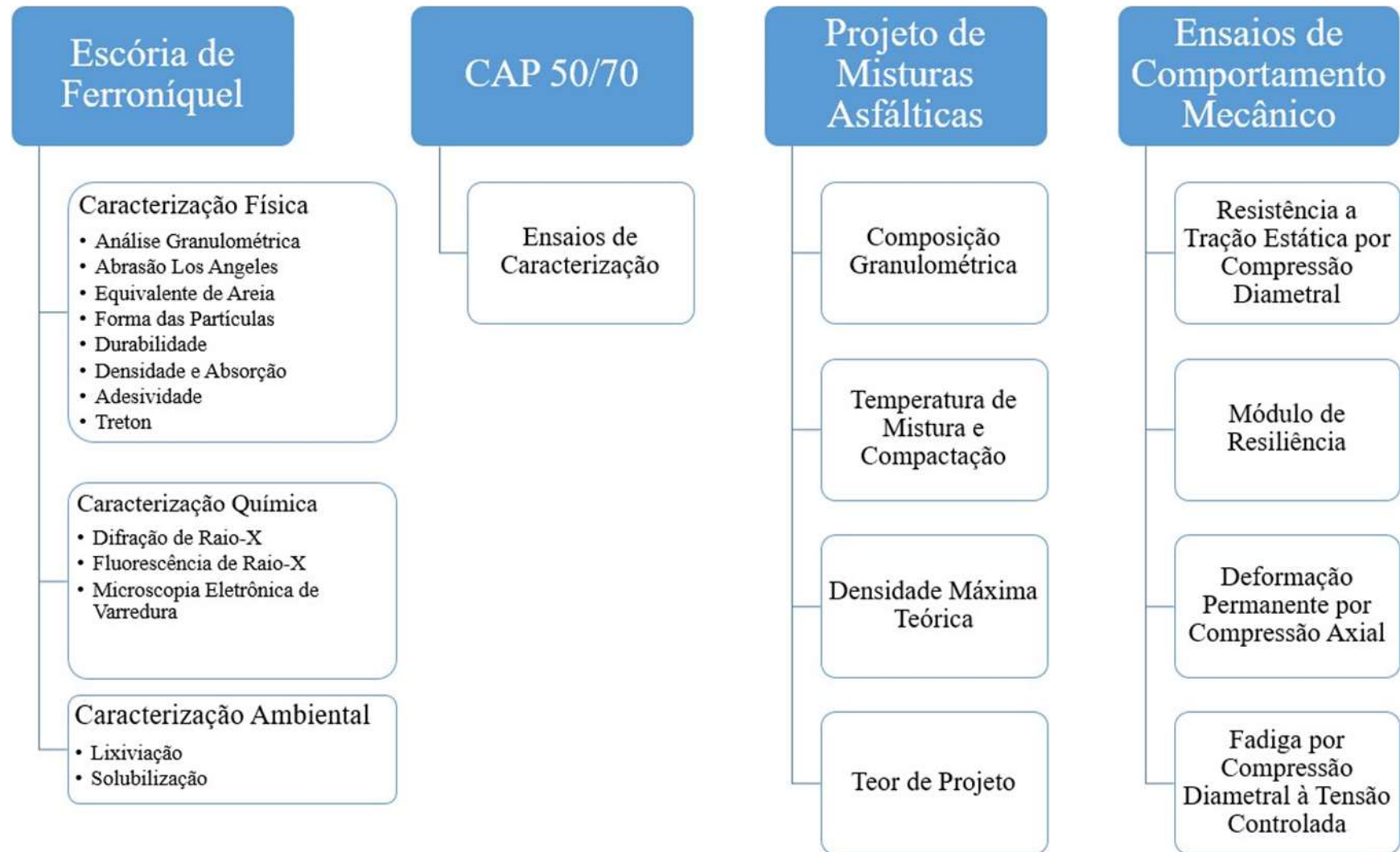
A primeira é relativa a caracterização física, química e ambiental da escória de ferroníquel, e também, a caracterização do ligante asfáltico CAP 50/70 utilizado na pesquisa.

Na segunda etapa foi realizado a dosagem das misturas asfálticas em acordo com a metodologia Marshall a fim de determinar o teor de projeto para a mistura contendo escória de ferroníquel.

Por fim, na terceira etapa, foi avaliado o comportamento mecânico das misturas referentes ao teor de projeto, através dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático);

Na Figura 3.1 a seguir, é apresentado o fluxograma detalhado que ilustra o processo metodológico para o desenvolvimento da dissertação.

Figura 3.1 – Metodologia utilizada para o desenvolvimento da dissertação.



3.1 MATERIAIS

3.1.1 Escória de ferroníquel

A escória de ferroníquel utilizada na pesquisa é proveniente do projeto Onça Puma (Figura 3.2), que abrange os municípios de Ourilândia do Norte, São Félix do Xingu (Serra do Onça), Parauapebas (Serra do Puma) e em Tucum no mesmo estado. O material foi utilizado na forma de agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, ou seja, 100% dos agregados que compõe o concreto betuminoso.

Figura 3.2 - Vista geral da Mineração Onça Puma.



Fonte: <http://revistamineracao.com.br/2017/09/15/trf-paralisa-atividade-da-mineracao-onca-puma/>.

Acesso em: 18/03/2018.

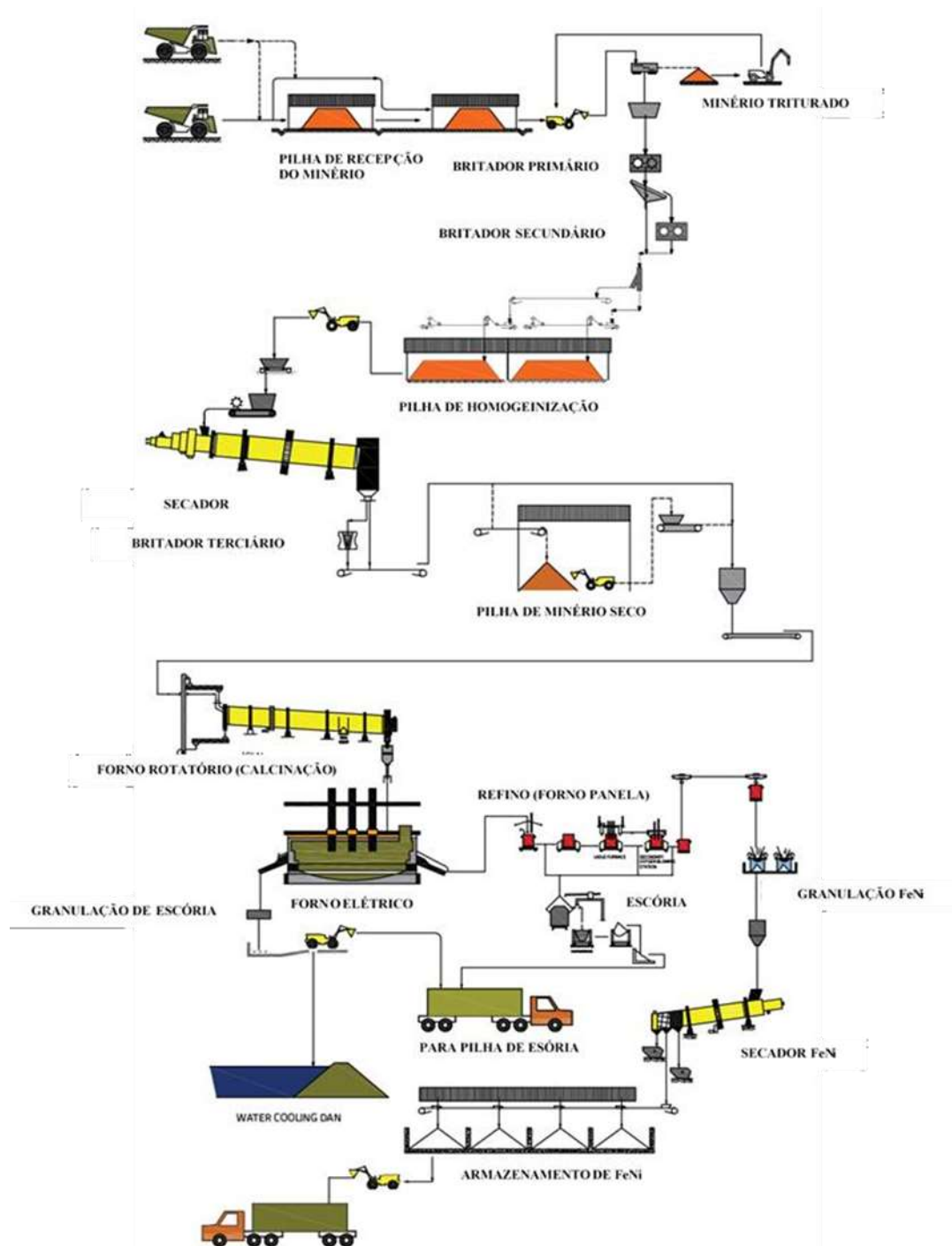
A Mineração Onça Puma está localizada sobre uma jazida de níquel laterítico de minério de laterita saprolítico. A operação produz ferroníquel através do processo de forno elétrico rotativo, operando com uma única linha, com uma capacidade nominal estimada em 27.000 toneladas métricas por ano (VALE, 2018).

Na unidade de Onça Puma, são desenvolvidas atividades de extração e beneficiamento do minério de níquel por meio do processo pirometalúrgico, tendo como produto final, o ferroníquel granulado.

O minério é lavrado a céu aberto em bancadas, utilizando escavadeiras de médio porte e eventualmente fazendo uso de explosivos.

Para o beneficiamento do minério é empregado o processo denominado RKEF (Rotary Kiln – Electric Furnace) que consiste em um processo pirometalúrgico utilizado para tratamento de minérios oxidados de níquel, como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3 - Processo de beneficiamento de ferroníquel pelo processo RKEF.



Adaptado de: HORIZONTE MINERALS. Disponível em: <http://horizonteminerals.com/br/pt/processo/>

O processo de beneficiamento inicia-se com a britagem primária e secundária do minério, que após britados, são levados por meio de correias transportadoras para um pátio de homogeneização. Do pátio de homogeneização, o minério passa por um processo de secagem por meio de secadores rotativos, por uma terceira britagem e então é estocado em pilhas. Os demais processos para a obtenção do ferroníquel são: calcinação do minério no forno rotativo do tipo Kiln e a pré-redução com carvão, redução do minério no forno elétrico de redução, refino em fornos panela e granulação da liga de ferroníquel.

Tanto no processo de redução quanto no processo de refino há geração de resíduos. O resíduo gerado no forno elétrico de redução é denominado escória de redução de níquel, já o gerado nos fornos panela é denominado de escória de refino. A escória a ser utilizado no desenvolvimento deste trabalho é a escória gerada no processo de redução, que será chamada de escória de ferroníquel.

A escória foi transportada e estocada no Laboratório de Ferrovias e Asfalto – LFA da Universidade Federal de Ouro Preto, onde o mesmo foi homogeneizado manualmente. A redução das amostras de campo para o laboratório foi realizada em acordo com os procedimentos da norma DNER-PRO 199/96 (Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de Laboratório) pelo método de quarteamento para obtenção da quantidade apropriada para a execução dos ensaios laboratoriais.

A Figura 3.4 mostra parte do material recebido no LFA/UFOP.

Figura 3.4 – Escória de ferroníquel recebida no Laboratório de Ferrovias e Asfalto.



3.1.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70, proveniente da Refinaria Gabriel Passos (REGAP), que está localizada em Betim, na região metropolitana de Belo Horizonte.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização física da escória de ferroníquel

- **Análise granulométrica**

A análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdos é utilizada para a determinação da percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total da amostra. Através desses valores, é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, fundamental para a classificação do material. Nesta pesquisa, o ensaio foi realizado em acordo com a metodologia DNER-ME 083/98 com o auxílio de um agitador mecânico convencional e com a série normal de peneiras padronizadas pela metodologia da referida norma. A Figura 3.5 apresenta o peneirador mecânico utilizado para os ensaios.

- **Abrasão Los Angeles**

Figura 3.5 – Peneirador mecânico utilizado para o ensaio de granulometria.



O ensaio abrasão Los Angeles tem por finalidade avaliar a resistência a abrasão e a degradação dos agregados graúdos. Para a execução do ensaio, uma amostra do agregado de aproximadamente 5.000g

é submetida a 500 ou 1.000 ciclos no interior do cilindro de um equipamento padronizado (Figura 3.6), com um determinado número de esferas de aço, gerando impactos nas partículas durante as suas revoluções. O ensaio é preconizado pela norma do DNER-ME 035/98. O índice de Abrasão Los Angeles, A_n é obtido pela redução de massa dos agregados retidos na peneira de no 12 (1,7mm) em relação à massa inicial da amostra especificada, conforme mostrado pela Equação 3.1 a seguir:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (3.1)$$

Sendo:

m_n = a massa total seca colocada no tambor do equipamento padrão;

m'_n = a massa da amostra lavada na peneira de 1,7mm e seca após o ensaio.

O ensaio foi realizado na amostra correspondente à Brita 1.

Figura 3.6 - Equipamento utilizado para o ensaio de Abrasão Los Angeles.



- **Equivalente de areia**

O ensaio de equivalente de areia determina a quantidade finos e de possíveis impurezas em uma amostra de agregado miúdo a partir de uma relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior do agregado sedimentado e a altura do nível superior da suspensão argilosa

de uma determinada quantidade da amostra, numa proveta, em condições estabelecidas pelo método DNER-ME 054/97.

O ensaio consiste em adicionar uma amostra de agregado em uma proveta contendo solução floculante. Em seguida, agita-se o conjunto na horizontal por 30 segundos e, após completa-se a proveta com a solução até um nível predeterminado, deixando em repouso por 20 minutos. Com o fim do tempo de repouso, realiza-se a leitura da altura do nível superior da argila em suspensão e da altura do nível superior do agregado. O equivalente de areia (EA) é calculado através da Equação 3.2:

$$EA = \frac{L_2}{L_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

L1 = leitura no topo do agregado;

L2 = leitura no topo da argila em suspensão.

- **Forma das partículas**

O ensaio de índice de forma das partículas foi realizado segundo o método de ensaio estabelecido pelo DNER-ME 086/94, fazendo o uso de um conjunto de crivos circulares e crivos redutores.

- **Durabilidade**

O ensaio de durabilidade determina a resistência à desintegração dos agregados sujeitos à ação do tempo. A avaliação da resistência a desintegração química dos agregados foi realizada através do método de ensaio DNER-ME 089/94. As amostras de escória de ferroníquel foram imersas em solução de sulfato de sódio (NaSO₄) durante um período de 16 horas e seca em estufa à 110°C. O processo foi realizado por cinco ciclos de imersão e secagem em estufa. A perda de massa medida, foi definida como a porcentagem em peso de cada fração da amostra que após o ensaio passou na peneira na qual originalmente era retida.

- **Densidade e absorção dos agregados**

A determinação da densidade e absorção dos agregados graúdos (material retido na peneira de 4,8 mm) foram realizadas segundo o método de ensaio DNER-ME 081/98. Para o agregado miúdo, foi utilizado o método do DNER-ME 084/95 para determinar a densidade real. Já para o material de enchimento (fíler) foi utilizado o método DNER- ME 085/94.

- **Adesividade**

Para avaliar a adesividade dos agregados ao ligante asfáltico foi utilizado o método DNER-ME 078/94. Após preparo prévio da amostra, o agregado foi envolto por ligante do tipo CAP 50/70 a uma temperatura determinada, e após resfriado, a mistura foi submersa em água destilada e colocada na estufa a 40 °C por um período de 72 horas. Após esse tempo analisou-se visualmente se houve ou não o deslocamento da película de ligante.

- **Determinação da perda ao choque no aparelho Treton**

A norma DNER-ME 399/99 se refere a determinação da perda ao choque em material de uma amostra de agregado, pelo emprego do aparelho Treton, obedecendo a uma faixa granulométrica padronizada.

A amostra com partículas de dimensões entre 19 e 16 mm é colocado no interior de um cilindro oco e é submetida a 10 golpes de um martelo cilíndrico padronizado. Após os golpes, o material é retirado e passado na peneira de abertura 1,7 mm.

A resistência ao choque é determinada pela Equação 3.3, a seguir:

$$T = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.3)$$

Sendo:

M1 = Massa original da amostra (g)

M2 = Massa retida na # de 1,7 mm de abertura;

T = Perda ao choque no aparelho Treton, em %.

O aparelho Treton utilizado na execução do ensaio é mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Equipamento “Treton” utilizado no ensaio.



3.2.2 Caracterização química da escória de ferroníquel

- Difração de Raio-X

O ensaio por difração de raios-X permite a identificação dos minerais constituintes da amostra através de sua estrutura cristalina. As células cristalinas são compostas por planos definidos, diretamente associados com o raio atômico de cada um dos átomos e seus tipos de ligação.

Os picos exibidos no difratograma são as distâncias interplanares característica dos minerais presentes. A deficiência desta técnica acontece para materiais isomorfos, ou seja, com mesma estrutura atômica, e para minerais com distâncias atômicas similares ou muito heterogêneas.

Na execução do ensaio, uma radiação monocromática de raios-X foi imposta às amostras, sob diversos ângulos de incidência. A dispersão dos diferentes comprimentos de onda obedece à lei de Bragg que é apresentada pela Equação 3.4, a seguir:

$$n.\lambda = 2d.\text{sen}\theta \quad (3.4)$$

Sendo:

n = número inteiro;

λ = comprimento da onda do tubo do aparelho; θ = ângulo de incidência;

d = distância (espaçamento) interplanar.

Nas análises realizadas, empregou-se um difratômetro da marca Shimadzu, (Figura 3.8), do Laboratório de Difractometria de Raios-X do ICEB/UFOP, com tubo de ferro e intervalo de varredura de 5 a 80° e radiação de 40 kV e 30 μ A.

Figura 3.8 - Difratômetro de Raio-X utilizado na pesquisa.



A velocidade aplicada no ensaio foi de 2 graus/minutos. A análise dos resultados é dada por meio de um software computacional específico (MDI Jade 9), que analisa o pico da incidência de elétrons e compara com um banco de dados disponíveis para caracterização dos minerais constituintes.

Os resultados das análises são apresentados em formas de gráficos, chamados de difratograma, que exibem picos característicos referentes aos os resultados do processo de difração de raios-X em planos cristalográficos dos materiais analisados, tendo como variáveis o ângulo 2θ versus a intensidade dos

picos difratados (eixo vertical). Os picos são mostrados a medida que, para um dado valor de θ , um dado plano atômico possui distância interplanar (d) que corresponda a lei de Bragg.

- **Fluorescência de Raio-X**

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica não destrutiva que possibilita a identificação dos elementos presentes em uma amostra e também sua respectiva concentração.

Para a realização do ensaio faz-se uso de um espectrômetro de fluorescência de raios-X, que é um equipamento com a capacidade de quantificar os elementos obtidos em uma amostra por meio da exposição de raios-X na superfície do material e a posterior avaliação dos raios fluorescentes emitidos. Por se tratar de uma técnica não-destrutiva, é frequentemente empregada para o estudo e controle de qualidade de diversos tipos de materiais.

A técnica consiste na emissão de raios X por uma fonte de radiação, que provoca a excitação dos átomos do material em estudo. O átomo em seu estado fundamental, ao ser submetido a uma fonte externa de energia, absorve esta energia, promovendo os elétrons a níveis mais energéticos, passando a ter um comportamento instável, por estar em seu “estado excitado”. Ao retornar ao seu estado fundamental há liberação de energia, que quando absorvida, revela características específicas de cada elemento químico, permitindo a sua identificação e correspondente quantificação.

De maneira geral, a análise por fluorescência de raios-X baseia-se em três etapas: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios-X emitidos.

No ensaio foi utilizado um espectrômetro de Raios-X, modelo EDS-720 da marca Shimadzu (Figura 3.9), do Nanolab Laboratório de Microscopia Eletrônica, da Redemat, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Figura 3.9 – Espectrômetro de Raio-X.

- **Microscopia eletrônica de varredura**

A análise de elementos por microscopia eletrônica de varredura permite a obtenção de informações estruturais e químicas de amostras diversas. O microscópio eletrônico de varredura (MEV), utilizado para a análise, é um instrumento versátil e usado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos, que, apesar da complexidade dos mecanismos para a obtenção da imagem, fornece como resultados, imagens de fácil interpretação

Um feixe fino de elétrons de alta energia atinge a superfície da amostra onde, ocorrendo uma interação, onde parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte este sinal em imagem de BSE (ou ERE) - imagem de elétrons retroespalhados – ou, a amostra emite elétrons produzindo a chamada imagem de ES (elétrons secundários).

Também há emissão de raios-X, que fornece a composição química dos elementos de um ponto ou região da superfície, possibilitando a identificação de, praticamente, qualquer elemento presente.

Os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários varre a superfície da amostra, estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície.

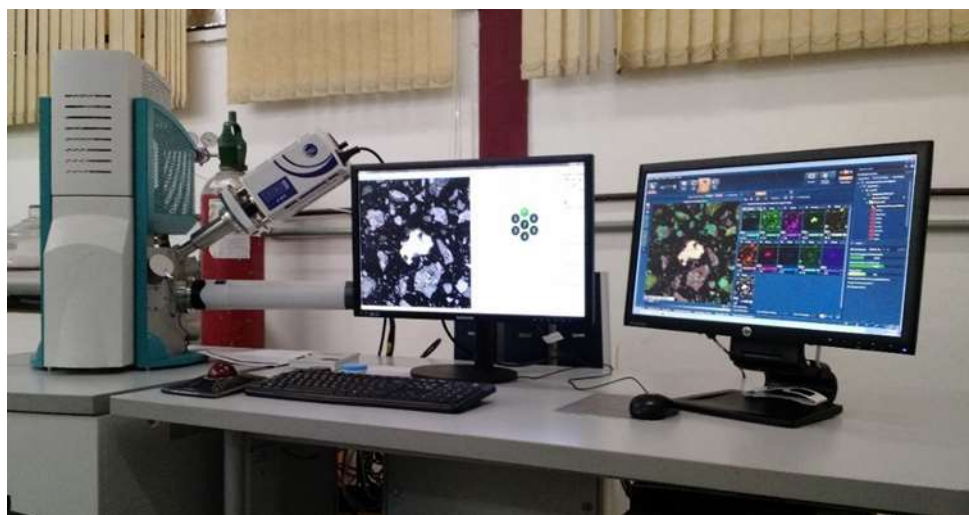
Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição.

A imagem formada no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV é consequência da passagem de contraste que acontece quando um feixe de elétrons varre a superfície da amostra em análise ponto a ponto.

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Nanolab Laboratório de Microscopia Eletrônica, da Redemat, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

A Figura 3.10 apresenta o equipamento usado nos referidos ensaios.

Figura 3.10 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) na UFOP.



O funcionamento do microscópio eletrônico de varredura baseia-se em uma coluna de alto vácuo, onde os elétrons gerados a partir de um filamento de tungstênio, por efeito termiônico, são acelerados por uma diferença de potencial entre cátodo e ânodo. O feixe gerado passa por lentes condensadoras que diminuem o seu diâmetro e por uma lente objetiva que o focaliza sobre a amostra. Logo acima da lente objetiva, existem dois estágios de bobinas eletromagnéticas responsáveis pela varredura do feixe sobre a amostra.

O feixe interage com a região de incidência da amostra até uma profundidade que pode variar de 1 μm a 6 μm , dependendo da natureza da amostra. Esta região é conhecida por volume de interação, o qual gera os sinais que são detectados e utilizados para a formação da imagem e para microanálise.

Para formação da imagem, o fluxo de informação do microscópio para o computador consiste na localização dos pontos de varredura no plano x,y com o conjunto de intensidades correspondentes, originadas pelo detector de elétrons retroespalhados ou pelo detector de elétrons secundários, que estão localizados dentro da câmara de vácuo. Quando a amostra é varrida, a tela do display é varrida simultaneamente com correspondência de posições, utilizando as intensidades dos detectores para cada ponto.

Para o correto desenvolvimento do ensaio, é fundamental que as amostras sejam condutoras em presença de carbono, por isso, são submetidas a um processo chamado de metalização. Nesse processo, as amostras são preparadas sob a condição de monocamadas em peças cilíndricas metálicas, revestidas de grafite por uma fita de dupla face e, imediatamente, colocadas em um evaporador de vácuo por um período de cerca de 1 hora. Após esse tempo, faz-se a vaporização dos eletrodos de grafite por cerca de 10 minutos. Ao fim do processo, a amostra passa a ser condutora. A Figura 3.11 evidencia as pastilhas já preparadas

Figura 3.11 – Detalhe das pastilhas preparadas para ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura.



Com a pastilha preparada, a mesma é posicionada na câmara do microscópio, fazendo-se um vácuo de cerca de 3 (três) minutos. Assim, as amostras são submetidas a processos de bombardeamento de elétrons e então, realizadas fotomicrografias. Nesta análise, os aumentos empregados foram de 50x, 200x, 250x nas amostras.

3.2.3 Caracterização ambiental da escória de ferroníquel

- **Legislação e classificação ambiental**

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a), os resíduos sólidos são todos os resíduos nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Estão incluídos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de

água e/ou gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, além de líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento nos esgotos e corpos d'água.

A preocupação com o manuseio e a utilização dos resíduos sólidos industriais tem sido um ponto de grande destaque por parte das empresas e dos órgãos ambientais. Todo destaque dado, é no sentido de observar as disposições legais pertinentes de forma a se impedir possíveis riscos de problemas e eventuais punições previstas na Lei de Crimes Ambientais – Lei nº.9.605, de 12 de fevereiro de 1998.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) editou algumas normas técnicas para a definição e classificação de resíduos sólidos industriais (ABNT NBR 10004, 2004; ABNT NBR 10005, 2004 e ABNT NBR 10006, 2004). Estas normas caracterizam tais resíduos, no estado sólido e semissólido, como resultado de atividades industriais como, por exemplo, a siderurgia na produção do aço.

As deliberações técnicas e econômicas tomadas em todas as fases do gerenciamento dos resíduos sólidos industriais precisam estar fundamentadas na classificação ambiental dos mesmos e considerar o seu potencial de contaminação ao meio ambiente, tanto a curto, quanto a médio e longo prazo.

A classificação dos resíduos sólidos em conformidade com a NBR 10004 envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com os resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente são conhecidos. Assim, ainda segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), os resíduos podem ser classificados da seguinte maneira:

- Resíduos Classe I – Perigosos: são resíduos que, em função de suas propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem oferecer riscos à saúde pública, contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos danosos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de maneira inadequada.
- Resíduos classe II – Não perigosos:
- Resíduos Classe II A – Não inertes - são aqueles que, não se enquadram na Classe I ou na Classe IIB. Possuem propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Resíduos classe II B – Inertes - resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspectos como cor, turbidez, dureza e sabor.

Grande parte dos resíduos tóxicos, característicos de determinado processo produtivo, estão listados em anexo dentro da norma NBR 10004 (ABNT, 2004a). No caso do resíduo não estar, é possível analisá-lo e determinar sua classificação. A amostragem dos resíduos é descrita na norma NBR 10007 (ABNT, 2004d). A propriedade de toxicidade é medida através do teste de lixiviação definido pela norma NBR 10005 (ABNT, 2004b), as características que definem inflamabilidade, corrosividade e reatividade são descritas na norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), já o teste de solubilização é descrito na norma NBR 10006 (ABNT, 2004c).

- **Ensaio de lixiviação**

O ensaio de lixiviação, preconizado pela NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos (ABNT, 2004b), caracterizam os resíduos como perigosos quando, apresentarem valores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões constantes na listagem nº 07 anexa à norma.

O teste é realizado em 100 g de amostra, com frações granulométricas abaixo da peneira de 9,5 mm, que é transferida a um frasco de lixiviação, onde mistura-se com a solução de ácido acético glacial ou solução de ácido acético e hidróxido de sódio. Logo após, o frasco é mantido sob agitação durante 18 horas à temperatura de 25º C, com rotação de 30 vezes por minuto em agitador rotatório. Depois desse período, realiza-se a filtração do produto e o extrato lixiviado é analisado. O teste de lixiviação foi realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto. A Figura 3.12 apresenta o equipamento utilizado no ensaio de lixiviação para caracterização ambiental.

Figura 3.12 - Ensaio de Lixiviação.

- **Ensaio de solubilização**

O teste de solubilização realizado de acordo com a norma NBR 10006 – Solubilização de Resíduos (ABNT, 2004c), diz respeito a solubilidade dos compostos presentes nas amostras estudadas na pesquisa. O ensaio consiste em misturar 250 g de amostra, triturada abaixo da peneira de 9,5mm e com 1000 ml de água destilada, sem correção do pH. A mistura permanece em repouso, sendo agitada manualmente de tempos em tempos, durante um período 7 dias. Logo após esse período, a amostra é filtrada e o material analisado. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Universidade Federal de Ouro Preto. A Figura 3.13 apresenta o ensaio de solubilização sendo executado.

Figura 3.13 - Ensaio de Solubilização.

De acordo com a NBR 10004/2004 para classificação de resíduos, este ensaio é adotado para diferenciar um resíduo inerte (Classe IIB) de um não inerte (Classe IIA). A análise do filtrado foi conduzida em conformidade com a metodologia proposta pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

3.2.4 Caracterização ligante asfáltico

O CAP 50/70 usado nesta pesquisa, proveniente da Refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada em Betim/MG, foi caracterizado em conformidade com as especificações mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações e Caracterização do CAP 50/70 REGAP/PETROBRAS.

Característica	Método	Especificação
Penetração	D 5	50 a 70
Ponto de Amolecimento	D 36	46 mín.
Ductilidade a 25 °C	D 113	60 mín.
Viscosidade Brookfield - 135 °C (20RPM)	D 4402	274 mín.
Viscosidade Brookfield - 150 °C	D 4402	112 mín.
Viscosidade Brookfield - 177 °C	D 4402	57 a 285
RTFOT Penetração Retida	D 5	55 mín.
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	8 máx.
RTFOT - Ductilidade a 25 °C	D 113	20 mín.
RTFOT - Variação em % massa	D 2972	0,5 máx.
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5 mín.
Ponto de Fulgor	D 92	235 mín.
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-0,5 a 1,7
Aquecimento a 177 °C	X 215	Não espuma

Os ensaios de viscosidade realizados com amostras do CAP 50/70 utilizado nesta pesquisa e seus métodos de ensaios estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Ensaios de Viscosidade CAP 50/70.

Característica	Método
Viscosidade Brookfiel - 135 °C (20RPM)	ASTM D 4402
Viscosidade Brookfiel - 150 °C	ASTM D 4402
Viscosidade Brookfiel - 177 °C	ASTM D 4402

No Laboratório de Ferrovias e Asfalto (LFA) da Universidade Federal de Ouro Preto foram realizados os ensaios mostrados na Tabela 3.3, a seguir.

Tabela 3.3 – Ensaios de caracterização do CAP 50/70.

Característica	Método
Penetração	DNIT ME 003/99
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/85
Ductilidade a 25 °C	DNIT ME 163/98
Densidade a 25 °C	DNIT ME 193/94

3.2.5 Projeto de misturas asfálticas

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na escolha, através de procedimentos experimentais, de um teor ótimo de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida.

Através do ensaio também é possível obter a estabilidade, que é a resistência máxima do corpo de prova à compressão radial, expressa em newton, e a fluência, que corresponde à deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em milímetros.

A moldagem dos corpos de prova foi executada seguindo método de dosagem Marshall, por ainda ser o método mais utilizado por órgãos rodoviários brasileiros.

Para as misturas, foram adotados teores de asfalto com 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5 %. Foram confeccionados 3 corpos de prova para cada teor de mistura betuminosa. Após a definição em massa, em que os agregados e o ligante asfáltico serão misturados, foi calculada o peso de cada um deles para a produção de um corpo de prova com $63,5 \pm 1,3$ mm de altura. Os corpos de prova moldados estão mostrados na Figura 3.14.

Figura 3.14 – CP's com teores de asfalto de 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5 %.



Os agregados foram secos em estufa entre 105 a 110°C até massa constante e separados em frações de ½" até a de #200. Após secos, foram separados de acordo com a granulometria de cada traço, para um corpo de prova de cada vez, em recipientes individuais. O mesmo procedimento foi realizado todos os corpos de prova.

A seguir, colocaram-se os agregados em estufa até atingir a temperatura de aproximadamente 10°C a 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante estabelecida pela curva viscosidade x temperatura, não ultrapassando a temperatura de 177 °C.

Após aquecidos, efetuou-se a mistura dos agregados de cada recipiente, com o ligante, por um período de 2 a 3 minutos, como pode ser observado na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Preparação da mistura.



Após a mistura, iniciou-se o processo de compactação dos corpos de prova. O molde de compactação e a base do soquete foram limpos e aquecidos em estufa de 90 a 150°C. A seguir, o molde foi posicionado no suporte de compactação e colocado em seu interior uma folha de papel-filtro, cortado conforme a seção do molde.

A mistura, foi introduzida de uma só vez e acomodada com 15 golpes de espátula no interior e ao redor do molde e 10 no centro da massa. Então, colocou-se o anel superior e com o soquete, aplicou-se 75 golpes em cada face, para simular um volume de tráfego pesado.

A Figura 3.16 mostra a compactação de um corpo de prova pela prensa Marshall.

Figura 3.17 – Compactação do corpo de prova.



Após a compactação, o corpo de prova é retirado do anel inferior e deixado numa superfície lisa e plana por no mínimo 12 h, à temperatura ambiente (Figura 3.17).

Figura 3.16 – Corpos de prova após compactação.

Após resfriado o corpo de prova era extraído do molde com o auxílio de um extrator. Já desmoldados foi realizado as medidas de altura e diâmetro dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro, a qual devia ser obtida em quatro posições diametralmente opostas, adotando-se como valor final, a média aritmética das quatro leituras.

Além disso, também são obtidas para cada CP, os valores de massa seca (MS) e massa submersa em água (MSsub) (Figura 3.18).

Figura 3.18 – Obtenção da massa seca e da massa submersa em água dos CP's.

A partir desses valores calcula-se a massa específica aparente dos CP's (Gmb), que, por comparação com a densidade máxima teórica (DMT), permite a obtenção das relações volumétricas típicas da dosagem.

Nos itens a seguir, constam os procedimentos de determinação dos parâmetros gerados numa dosagem Marshall para concreto asfáltico usado em camada de rolamento.

- **Composição granulométrica**

A seleção da faixa granulométrica a ser utilizada se enquadra dentro dos limites da faixa C do DNIT para concreto asfáltico, que é especificada pelo DNIT-ES 031/2006. A Tabela 3.4 mostra o intervalo de enquadramento granulométrico da faixa.

Tabela 3.4 - Especificação Faixa C DNIT-ES 031/2006.

Peneiras		FAIXA C (DNIT)		
#	mm	Lim. inferior	Lim. superior	Variação permitida
11/2"	38,1	100	100	±7
1"	25,4	100	100	±7
3/4"	19,1	100	100	±7
1/2"	12,7	80	100	±7
3/8"	9,5	70	90	±7
nº4	4,8	44	72	±5
nº 10	2	22	50	±5
nº 40	0,42	8	26	±5
nº 80	0,18	4	16	±3
nº 200	0,074	2	10	±2

Para a composição adequada da faixa C, os agregados foram fracionados peneira a peneira através de um peneirador mecânico e armazenados separadamente em recipientes plásticos para facilitar a

adequação as misturas na granulometria de projeto e respeitando as tolerâncias estabelecidas pelo DNIT. A Figura 3.19 mostra os agregados de escória de ferroníquel armazenados separadamente.

Figura 3.19 – Escória de ferroníquel separada por frações granulométricas.



- **Temperatura da mistura e de compactação**

A escolha das temperaturas de mistura e de compactação, se deu em função da curva viscosidade-temperatura do ligante a partir dos resultados apresentados quanto à viscosidade Brookfield para as temperaturas de 135, 150 e 177 °C. Ao ser misturado, a temperatura do ligante deve ser aquela em que sua viscosidade seja de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, com a temperatura do ligante podendo variar de 107°C a 177°C. A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177°C. A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s.

- **Densidade Máxima Teórica**

A densidade máxima teórica (DMT) é um parâmetro utilizado para determinar o percentual de vazios das misturas asfálticas, visto que, no Brasil a estimativa do teor de projeto é baseado em parâmetros volumétricos.

A determinação da DMT é realizada através de uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que compõem a mistura. O ensaio de massa específica (correspondente numericamente à densidade) nesses agregados é feito segundo as normas do DNER para agregado graúdo (DNER-ME 81/98) e agregado miúdo (DNER-ME 84/95), conforme mostrado no item 3.1.1.1.

De posse das massas específicas reais de todos os materiais e suas respectivas proporções, faz-se uma ponderação para a determinação da DMT da mistura para os diferentes percentuais de ligante. A Equação 3.5, a seguir, apresenta o cálculo da DMT.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad (3.5)$$

Onde:

%a : porcentagem de asfalto;

%Ag, %Am e %f: porcentagens do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente, em relação à massa tal da mistura.

G_a, G_{Ag}, G_{Am}, e G_f: massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente.

- **Teor de Projeto (TP)**

De acordo com Roberts et al. (1996), é importante salientar que o projeto de mistura asfáltica é um processo volumétrico que tem como finalidade determinar o volume de asfalto e agregado necessário para produzir a mistura com as propriedades projetadas. Mas, o trabalho com medidas do volume de agregados e asfalto tanto em laboratório quanto em campo são muito difíceis. Por essa razão, para simplificar o problema de medidas, massas são usadas no lugar de volumes e a massa específica é usada para converter massa para volume.

Os teores de projeto adotados neste trabalho para todas as misturas foram baseados em dois parâmetros volumétricos (V_v e RBV).

Os parâmetros de dosagem, Volume da Mistura (V) e Massa Específica Aparente da Mistura (G_{mb}), mostrados pelas Equações 3.6 e 3.7 também são necessários para o cálculo da dosagem de cada CP.

$$V = M_s - M_{ssub} \quad (3.6)$$

$$Gmb = \frac{M_s}{V} \quad (3.7)$$

Onde:

Ms = massa seca do corpo de prova;

Mssub = massa submersa em água do corpo de prova.

O volume de vazios no agregado mineral (VAM), que representa o que não é agregado numa mistura, ou seja, vazios com ar e asfalto efetivo é calculado pela Equação 3.8. Já o Vazios Cheios de Betume (VCB) é calculado pela Equação 3.9.

$$VAM = V_v + VCB \quad (3.8)$$

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%_{CAP}}{D_{CAP}} \quad (3.9)$$

Onde:

%cap = porcentagem de CAP na mistura; Dcap = Densidade do CAP.

O volume de vazios (Vv) e a relação betume-vazios (RBV) são determinados a partir das Equações 3.10 e 3.11, respectivamente.

$$V_v = \frac{DMT - Gmb}{DMT} \quad (3.10)$$

$$RBV = 100 \times \left(\frac{VAM - V_v}{VAM} \right) \quad (3.11)$$

Onde:

DMT = Densidade Máxima Teórica

Gmb = Massa específica aparente da mistura

VAM = Vazios no Agregado Mineral

Os parâmetros volumétricos devem ser sempre calculados com valores de Gmb médio de três corpos de prova.

A determinação da densidade aparente dos corpos de prova (Gmb) foi baseada na metodologia DNER-ME 117/94, onde o peso seco do CP foi determinado através de uma balança eletrônica de precisão, e a pesagem hidrostática realizada com os CP's submersos por 3 minutos em água destilada.

Após a determinação das medidas volumétricas e a escolha do teor de projeto, foi obtido através da prensa Marshall os parâmetros mecânicos de estabilidade e fluência da mistura para o teor de projeto. Foram utilizados três corpos de provas, sendo o resultado, a média dos valores.

A estabilidade é definida como carga máxima a qual o corpo de prova resiste antes da ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregado de modo a causar diminuição na carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8mm/s).

A fluência corresponde ao deslocamento na vertical apresentado pelo corpo-de-prova correspondente à aplicação da carga máxima.

Para obter os valores da estabilidade e fluência, os corpos de prova foram imersos em banho-maria a $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$ por um período de 40 minutos.

Em seguida, cada corpo de prova foi colocado em um molde de compressão, que estava com sua temperatura entre 21 e 38°C. O molde de compressão, contendo o corpo de prova, foi posicionado na prensa segundo a geratriz e o medidor de fluência colocado e ajustado na posição de ensaio.

A prensa aplica carga sobre o corpo de prova de tal modo que seu êmbolo se eleva-se a uma velocidade de 5 cm/min, até o rompimento do mesmo. A leitura deste ponto de rompimento é então anotada e convertida em newton, pelo gráfico de calibração do anel dinamométrico.

O ensaio de estabilidade é mostrado na Figura 3.20, a seguir.

Figura 3.20 - Ensaio de Estabilidade.



O valor anotado da carga após o rompimento do corpo de prova foi chamado de “estabilidade lida”. Para tanto, é necessário efetuar a correção desse valor, de acordo com a espessura do corpo de prova ensaiado, através da Equação 3.12, a seguir.

$$f = 927,23 h^{-1,64} \quad (3.12)$$

Onde,

f= fator;

h= espessura do corpo de prova.

O resultado da multiplicação da estabilidade lida pelo fator (f) calculado, é o valor da estabilidade Marshall.

A fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade. Durante a aplicação da carga, a luva-guia do medidor da fluência é firmado, com a mão, contra o topo do segmento superior do molde de

compressão, diretamente sobre um dos pinos guia. A pressão da mão sobre a luva do medidor de fluência era então relaxada, no momento em que se dava o rompimento do corpo de prova, ocasião em que era feito a leitura e anotado o valor da fluência, como mostra a Figura 3.21.

Figura 3.21 - Leitura da Fluência.

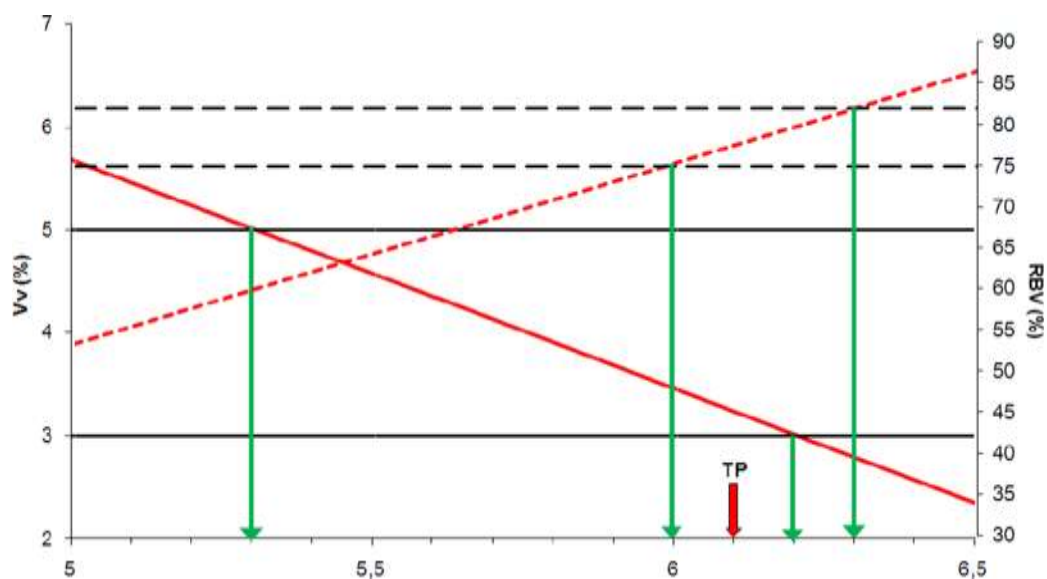


A estabilidade foi obtida pela carga média, em newton, e a fluência assim com a estabilidade, se obtinha da média dos valores dos 3 corpos de prova, expressa em milímetros.

Com todos os valores dos parâmetros volumétricos e mecânicos determinados, são plotadas seis curvas que relacionam massa específica aparente, massa específica máxima teórica, volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação betume vazios e estabilidade, todas em função do teor de asfalto, que podem ser usadas na definição do teor de projeto.

Para o cálculo do teor de projeto, traça-se um gráfico com valores na abscissa de teor de ligante da mistura e nas ordenadas os valores de Vv e RBV.

Através da especificação dos limites determinados pelo DNIT para esses parâmetros avaliados (Vv entre 3% a 5% e RBV entre 75% a 82%), são obtidos quatro valores de teor de ligante asfáltico através de retas verticais originadas da especificação. O teor de projeto é calculado como sendo a média dos dois valores centrais de CAP, conforme demonstrado no exemplo da Figura 3.22.

Figura 3.22 - Exemplo de obtenção do Teor de Projeto (SANTOS, 2010).

Os valores limites são preconizados pela especificação de serviço DNIT 031/2006 – ES, cujos valores são especificados na Tabela 3.5, a seguir:

Tabela 3.5 – Requisitos de dosagem de concreto asfáltico pelo DNIT 031/2006.

Características	Método de Ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 - 82	65 - 72
Estabilidade mínima (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima	DNER-ME 138	0,65	0,65

3.2.6 Ensaios mecânicos

A avaliação do desempenho mecânico das misturas betuminosas foi realizado através dos ensaios de Resistência a Tração estática por compressão diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), fadiga por compressão diametral à tensão controlada e compressão uniaxial.

- **Resistência a tração estática por compressão diametral**

O ensaio de compressão diametral para determinação indireta da resistência a tração estática foi desenvolvido em 1943 pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para corpos de prova em concreto de cimento Portland, e ficou conhecido no mundo inteiro como “ensaio brasileiro”. O método consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

Desde 1972, o ensaio tem sido adotado para a caracterização de misturas asfálticas, porém com a aplicação das forças através de frisos de carga no corpo de prova cilíndrico Marshall convencional (Bernucci et al., 2008).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Pavimentação da UFJF, em acordo com as especificações do método de ensaio DNER-ME 138/94 à uma temperatura de 25°C. Após retirar suas dimensões, os corpos de prova foram colocados horizontalmente em uma prensa Marshall (Figura 3.23) e submetidas a uma compressão diametral progressiva, com uma velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que ocorra a ruptura por separação das duas metades, segundo o plano diametral vertical.

Figura 3.23 - Ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral.



O valor da carga de ruptura (F) é obtido e utilizado para o cálculo da resistência a tração indireta (RT), através da Equação 3.13.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3.13)$$

Onde:

σ_R : Resistência à tração, kgf/cm²;

F: Carga de ruptura, kgf;

D: Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H: Altura do corpo de prova, em cm.

A expressão mostrada, assume que a ruptura do corpo de prova ao longo do diâmetro ocorre exclusivamente devido às tensões de tração uniformes geradas, admitindo o comportamento unicamente elástico durante o ensaio, desconsiderando assim, a influência dos frisos no cálculo da resistência à tração.

- **Módulo de resiliência**

O comportamento Resiliente de materiais usados na pavimentação começaram a ser estudados no início da década de 1930 com Francis Hveem, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Francis definiu o termo “resiliência”, como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. O nome módulo de resiliência (resilient modulus em inglês) foi criado para que não fosse confundido com o módulo de Young, determinado estaticamente (Bernucci et al., 2008).

Conceitualmente, o módulo resiliente (MR) pode ser definido como a relação entre a tensão de tração (σ_t) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a correspondente deformação específica vertical resiliente ou recuperável (ϵ_r) a uma dada temperatura (T), conforme mostrado pela Equação 3.14.

$$MR = \left(\frac{\sigma_T}{\varepsilon_T} \right) \quad (3.14)$$

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no país pela DNIT 135/2010-ME. A aparelhagem necessária para a execução do ensaio é formada por uma prensa com estrutura de suporte metálica, sistema pneumático com controle automatizado composto de regulador de pressão para aplicação da carga vertical repetida, válvula de transmissão da carga vertical, cilindro de pressão e pistão de carga, dispositivo mecânico digital timer para controle do tempo de abertura da válvula e frequência de aplicação da carga vertical, além de um sistema de medição de deformação das amostras constituído por um transdutor do tipo LVD (Linear Variable Differential Transducer) e um quadro-suporte para fixação do transdutor no corpo de prova e um sistema informatizado de controle e aquisição de dados.

A campanha de ensaios de módulo de resiliência foi realizada no Laboratório de Pavimentação da UFJF. Três corpos de prova, com diâmetros entre 10 cm $\pm$ 0,20 cm e alturas entre 6,35 cm $\pm$ 0,13 cm, foram submetidos a compressão diametral distribuída ao longo de duas geratrizes opostas por meio de frisos curvos de carga, com aplicação de carga dinâmica durante 0,1 s e repouso de 0,9 s (frequência de 1 Hz para aplicação das cargas). O carregamento dinâmico tem como objetivo simular a passagem da roda dos veículos no revestimento asfáltico. A Figura 3.24 mostra um equipamento semelhante ao utilizado no ensaio de Módulo de Resiliência.

Figura 3.24 - Equipamento para ensaio de Módulo de Resiliência.



Segundo DNIT 135/2010-ME, após o fim do ensaio, o módulo de resiliência pode ser calculado pela Equação 3.15.

$$MR = \frac{F}{100 \cdot \Delta \cdot H} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3.15)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa;

F = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo de prova, N;

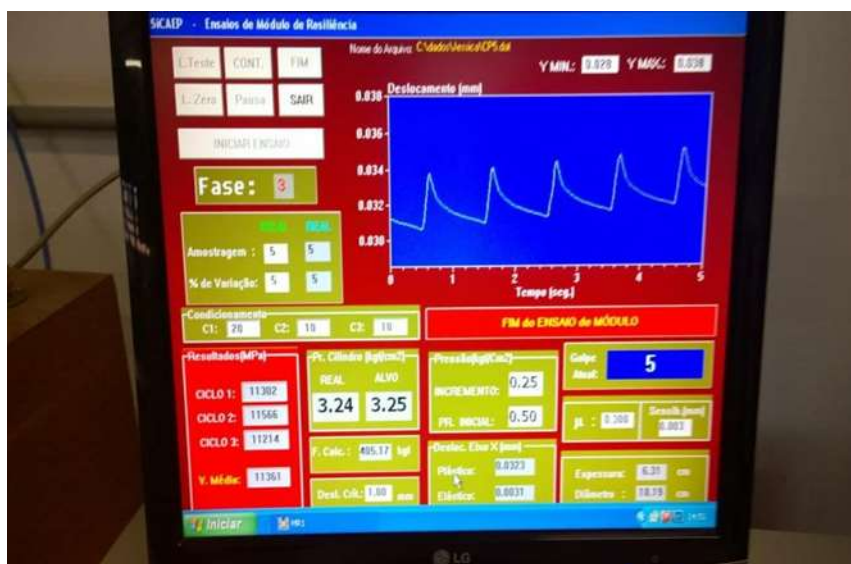
Δ = deformação resiliente medida ao longo do diâmetro horizontal;

H = altura do corpo de prova;

μ = coeficiente de Poisson (o valor adotado foi 0,3).

Na presente pesquisa, o software utilizado fornece o valor já calculado de MR para cada corpo de prova ensaiado, conforme mostra a Figura 3.25.

Figura 3.25 - Obtenção direta do MR através de software.



Os ensaios realizados com os corpos-de-prova não levaram em consideração os valores de RT, pois o equipamento utilizado só registra o valor do MR quando o deslocamento é superior a um valor mínimo dependente da sensibilidade dos LVDTs. Durante a execução dos ensaios essa sensibilidade foi de 0,003 mm.

- **Deformação permanente por compressão axial (creep estático)**

O ensaio de deformação permanente por compressão axial (creep estático) não possui padronização no Brasil. A análise de deformação permanente das misturas betuminosas desta pesquisa, foi executado no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia/UFJF. O ensaio consiste da aplicação ao longo do tempo de uma carga de compressão estática e contínua no corpo de prova no sentido axial (vertical).

Os corpos de prova, dosados e moldados pela metodologia, Marshall permanecem em estufa a temperatura de 40 °C por no mínimo um período de 4 horas. Posteriormente, aplica-se um carregamento de compressão contínuo e estático, no valor de 0,1 MPa, durante uma hora (3600 s), seguido de uma fase de descarregamento com duração de 15 minutos (900 s) com objetivo de estabilizar as deformações viscosas.

O registro da deformação permanente é feita por dois transdutores do tipo LVDT colocados em alças fixadas no corpo-de-prova e ligados a um computador para aquisição automática de dados.

Com a aplicação da carga estática, o corpo de prova deforma até se estabilizar ou romper. Nem sempre a ruptura é visível, podendo-se estabelecer critérios para defini-la como, por exemplo, se deformação relativa de for superior a 0,008mm/mm, ao final de 1 hora, então a mistura asfáltica não é adequada para resistir às deformações permanentes. Em relação ao resultado obtido no ensaio de creep, é obtido o histórico de deformação ao longo do período de ensaio, ou seja, $\epsilon(t)$.

- **Fadiga por compressão diametral à tensão controlada**

O ensaio de fadiga à tensão controlada caracteriza-se por uma tensão gerada por um carregamento pneumático, hidráulico ou eletromagnético que solicita um corpo de prova cilíndrico ou prismático. (Huang, 1993). O ensaio tem como finalidade simular a passagem da roda dos veículos sobre o pavimento, pois a maioria dos danos na camada de revestimento está ligada diretamente ao fenômeno de fadiga, que enfraquece e reduz o desempenho global do pavimento (Pinto, 1991; Medina e Motta, 2005).

O ensaio laboratorial de vida de fadiga tradicionalmente realizado no Brasil é feito por compressão diametral à tensão controlada (TC), sendo a carga aplicada numa frequência de 1 Hz através de equipamento pneumático.

O ensaio em compressão diametral gera um estado biaxial de tensão em um corpo de prova cilíndrico Marshall convencional (Pinto, 1991). No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo da amostra.

No Brasil, o procedimento de ensaio é designado pelo DNIT 184/2018-ME.

Na solicitação a carga controlada, o material é submetido a cargas repetidas e as deformações resultantes aumentam progressivamente até a fase de fratura completa do corpo de prova. Portanto, a vida de fadiga (N) do material pode ser definida como sendo o número total de aplicações de carga suficiente para levar a amostra a um colapso estrutural (Pinto, 1991; Pinto e Preussler, 2002), podendo ser expressa mediante as Equações 3.17 e 3.18.

$$N = K \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (3.17)$$

$$N = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{K_2} \quad (3.18)$$

Onde:

N = vida de fadiga (número de aplicações de carga);

$\Delta\sigma$ = diferença entre as tensões de compressão e tração no centro do corpo de prova;

ε_i = deformação específica resiliente inicial;

K e n = constantes obtidas laboratorialmente laboratório, em escalas logarítmicas.

De acordo com Loureiro (2003), a diferença entre as tensões de compressão e tração na parte inferior do revestimento ($\Delta\sigma$) é a principal causa do aparecimento de trincas e fissuras no revestimento do pavimento.

Para a execução do ensaio os corpos de prova foram preparados em laboratório e moldados em compactador Marshall, em conformidade com a norma DNER-ME 043/95.

Os corpos de provas foram posicionados sobre a base da prensa apoiando-o entre os frisos curvos metálicos e com o pistão de carga sobre o friso superior diametralmente oposto ao friso inferior.

Aplica-se uma carga (F), com frequência de aplicação de 1 Hz (0,1 s de carregamento e 0,9 s de descarregamento), para induzir tensões de tração horizontais com valores entre 10% a 45% da RT pré-determinada até o rompimento completo do corpo de prova e dada pela Equação 3.19.

$$F = \frac{\pi \cdot D \cdot H}{2} \cdot (\%RT) \quad (3.19)$$

Para obtenção da curva de vida de fadiga da mistura, ao fim do ensaio, plota-se um gráfico do tipo log-log entre o número de aplicações de carga (N) e a diferença entre a tensão máxima horizontal e vertical no centro do corpo de prova ($\Delta\sigma$), como mostra a Equação 3.20.

$$\Delta\sigma = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (3.20)$$

A curva de vida de fadiga também pode ser representada em função da deformação específica resiliente inicial (ε_i) versus o número de repetições de carga (N), conforme Equação 3.21.

$$\varepsilon_i = \frac{\%RT}{MR} \quad (3.21)$$

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL E DO CAP 50/70

Neste capítulo estão apresentados todos os resultados dos ensaios de caracterização da escória de ferroníquel e do CAP 50/70.

Primeiramente são apresentados os resultados de caracterização física englobando os ensaios de análise granulométrica, abrasão Los Angeles, equivalente de areia, forma das partículas, durabilidade, densidade e absorção, durabilidade e Treton.

A seguir, a caracterização química da escória através dos ensaios de difração de Raio-X, fluorescência de Raio-X e microscopia eletrônica de varredura. Para finalizar, os resultados da caracterização ambiental por meio dos ensaios de lixiviação e solubilidade.

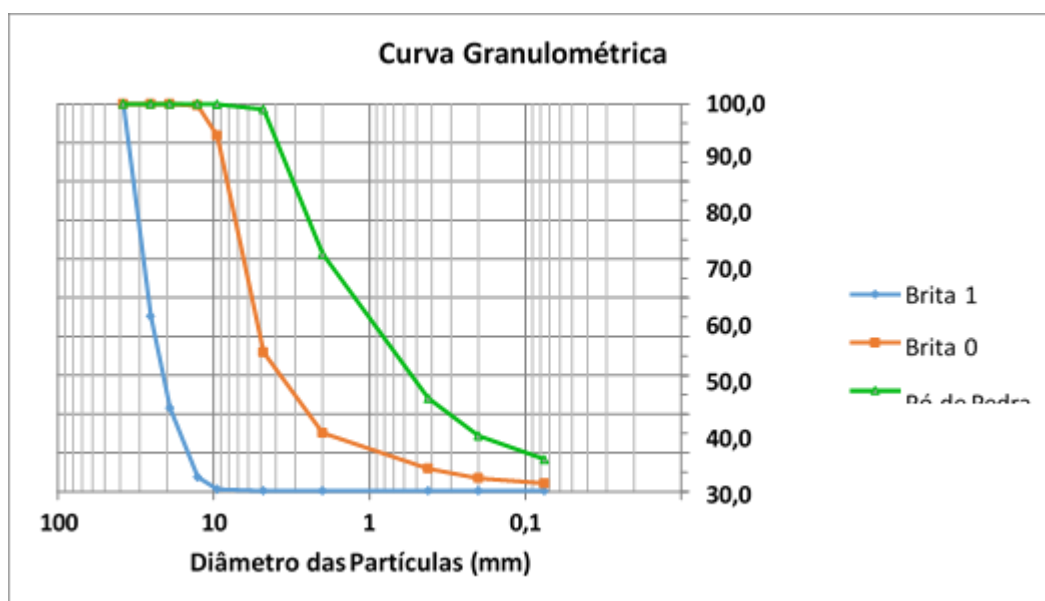
A caracterização completa do CAP 50/70 também será apresentada nesse capítulo.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL

4.1.1 Análise granulométrica

A seguir estão apresentadas as curvas referentes as análises granulométricas do agregado graúdo, miúdo e fíler, executados em conformidade com a metodologia DNER-ME 083/98.

Foram executados 3 peneiramentos para cada gradação da escória de ferroníquel, sendo que as curvas apresentadas na Figura 4.1, representam o valor médio correspondente aos 3 ensaios de granulometria para cada uma

Figura 4.1 – Curvas granulométricas da escória de ferroníquel.

Como pode ser observado na figura acima, as porções de pó de pedra e brita 0 apresentam suas curvas granulométricas bem graduadas. Já a curva da brita 1 é uniforme com praticamente a totalidade de seus grãos na faixa correspondente à pedregulho grosso.

A partir das curvas granulométricas obtidas foi possível ponderar e adequar a granulometria das misturas de escória de ferroníquel, para que a mesma se enquadrassem nos limites estabelecidos pela faixa C do DNIT 031/2006.

A Tabela 4.1 mostrada a seguir, mostra a porcentagem passante dos agregados em cada peneira.

Tabela 4.1 – Granulometria em % de peso passante dos agregados.

Peneiras		% Passante		
Número	mm	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra
1 1/2"	38,1	100,0	100,0	100,0
1"	25,4	45,3	100,0	100,0
3/4"	19,1	21,6	100,0	100,0
1/2"	12,7	3,7	99,5	100,0
3/8"	9,5	0,6	91,8	100,0
4	4,8	0,2	35,9	98,7
10	2,0	0,2	15,1	61,4
40	0,4	0,2	5,9	24,0
80	0,2	0,2	3,4	14,4
200	0,1	0,2	2,1	8,3
Prato		0,0	0,0	0,0

4.1.2 Abrasão Los Angeles

Os valores de abrasão Los Angeles para a amostra de brita 1 da escória de ferroníquel, são apresentados como sendo a média aritmética de três ensaios utilizando aproximadamente 5000 g de material em cada ensaio. A graduação que mais se adequou à granulometria da amostra foi a C utilizando, então, 8 esferas para a execução do ensaio.

A Tabela 4.2 mostra o resultado do ensaio de abrasão Los Angeles da amostra de brita 1 da escória de ferroníquel para a graduação C.

Tabela 4.2 – Resultado dos ensaios de Abrasão Los Angeles

Amostra	Graduação da Amostra	Número de Esferas	Número de rotações	Desgaste (%)
Brita 1	C	8	500	47,9

A norma DNIT 031/2006 estipula como valor máximo de desgaste, 50% para agregados. Como pode ser observado acima, o valor do desgaste obtido no ensaio foi de 47,9%, logo, a escória de ferroníquel obedece ao limite estabelecido pelo DNIT.

De acordo com Marques (2001), em algumas regiões do país, como por exemplo a região do município do Rio de Janeiro, alguns materiais apresentam o valor da abrasão Los Angeles muito acima de 55%, chegando até 65%, devido à escassez de agregados que atendam aos parâmetros exigidos, muitas rodovias foram pavimentadas usando os agregados da região, mesmo que esses estivessem em desacordo com a especificação vigente, mas com a devida autorização do DNER ou órgão regional competente para tal procedimento.

4.1.3 Equivalente de areia

O equivalente de areia (EA) encontrado foi de 73,32%, valor médio de 3 ensaios para o agregado miúdo. O valor estabelecido pelo DNIT 031/2006 é de no mínimo 55%, resultado comprova a pequena presença de frações argilosas na escoria de ferroníquel.

4.1.4 Forma das partículas

O índice de forma das partículas da escória de ferroníquel foi determinado segundo a graduação D, que é a que melhor se adequou a graduação da escória utilizada na pesquisa. O valor encontrado foi de 0,72, superior ao limite mínimo de 0,5 estabelecido pelo DNIT 031/2006.

4.1.5 Durabilidade

O valor encontrado no ensaio de durabilidade foi de 0,77%. O valor de perda máxima permitida pelo DNIT 031/2006 é de 12%, logo a durabilidade da escória de ferroníquel é elevada ao ser comparada com o limite máximo estabelecido.

4.1.6 Densidade e absorção dos agregados

Os resultados dos ensaios de densidade e absorção da escória de ferroníquel estão apresentados Tabela 4.3, a seguir.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de densidade e absorção da escória de ferroníquel.

Densidade real - agregado miúdo	3,340
Densidade real - agregado graúdo	3,199
Densidade real – fíler	3,256
Densidade aparente - agregado graúdo	2,975
Absorção - agregado graúdo	2,300

Como foi observado, os valores da densidade da escória de ferroníquel apresentados são superiores aos valores para agregados convencionais que geralmente variam de 2,5 a 2,6. Isso ocorre principalmente pela presença do ferro que é encontrada em sua composição química, assim como Balbo (2007), Silva (2010) e Santos (2013) também atribuíram o valor mais elevado da densidade da escória ao fato de haver ferro na composição agregado.

Segundo Wang (2016), os valores da densidade aparente da escória de ferroníquel usada em sua pesquisa variaram de 3,16 a 3,31 e os valores de absorção ficaram em 0,73% e 1,15%.

O resultado do ensaio de absorção para o agregado graúdo foi de 2,30%, ligeiramente superior aos 2% recomendados pelo DNER-EM 262/94 que trata do uso de escórias de aciaria para aplicação em pavimentos rodoviários.

É importante ressaltar que a composição do minério utilizado para a produção da liga de níquel, o processamento e o método de resfriamento interferem diretamente nas propriedades da escória gerada no processo.

4.1.7 Adesividade

O ensaio de adesividade na escória de ferroníquel apresentou resultado satisfatório, por não apresentar deslocamento da película de CAP durante sua realização.

4.1.8 Determinação da perda ao choque no aparelho Treton

O resultado encontrado no ensaio de resistência ao choque foi de 21,9 %, o que demonstra que a escória de ferroníquel apresenta resistência ao choque em conformidade com o limite máximo de 60% estabelecido pelo IPR (1998).

4.2 *CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL*

4.2.1 Fluorescência de Raio-X

O resultado da análise química quantitativa por fluorescência de Raio-X realizada na amostra de escória ferroníquel, está exibido na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Espécies químicas e suas porcentagens em massa.

Material	Espécies químicas (% e m massa)						
	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MnO
Escória de	47,77	30,75	17,31	2,00	1,14	0,47	0,41

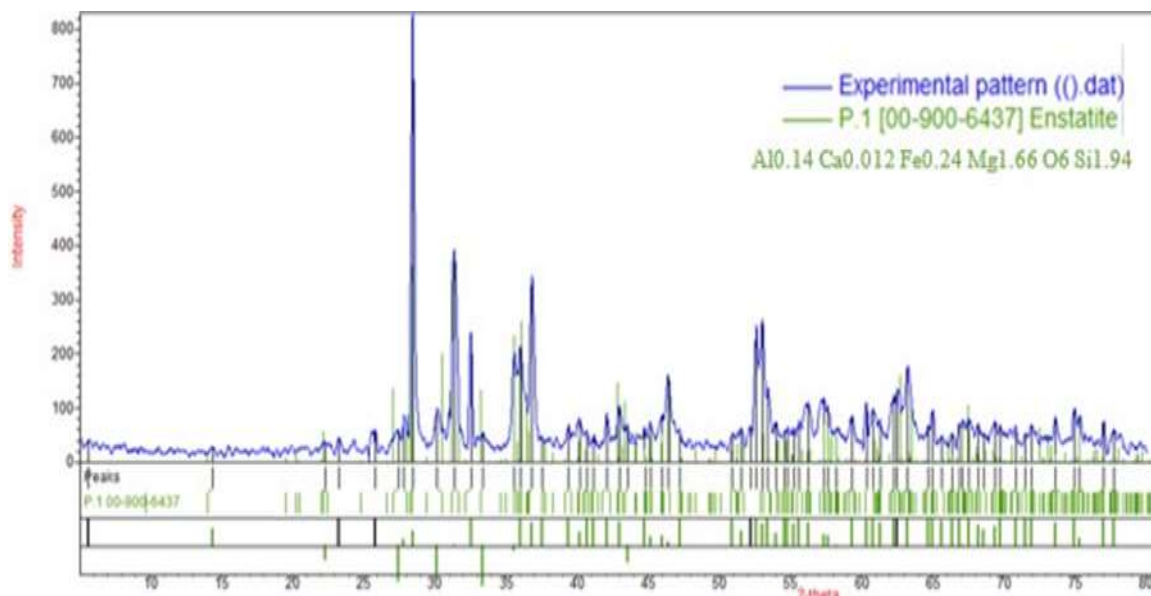
É possível observar que a composição química da escória ferroníquel estudada é composta principalmente por SiO₂ (sílica), MgO (óxido de magnésio) e Fe₂O₃ (óxido de ferro), que são os mesmos componentes encontrados por Santos (2013), Wang (2016) e Saha e Sarker (2016).

Os principais causadores da instabilidade volumétrica são os óxidos livres MgO (periclásio) e CaO (cal livre), que quando presentes sofrem hidratação, provocando reações que causam expansão volumétrica da escória. A alta concentração de MgO (30,75%) presente na escória de ferroníquel só a torna volumetricamente instável, em sua forma livre, ou seja, em forma de periclásio. O teor CaO encontrado, por ser muito baixo (0,47%), faz com que o agregado não apresente potencial de expansão.

4.2.2 Difração de Raio-X

Os resultados obtidos para o ensaio de difração de raio-X, para a escória ferroníquel encontram-se apresentados na Figura 4.2 e representam a ocorrência das fases mineralógicas dos padrões difratométricos.

Figura 4.2 - Padrão de difração de raios-x da escória ferroníquel.



O difratograma de raio-X obtido para a amostra de escória de ferroníquel revela uma grande incidência de picos, indicando que a estrutura da escória é predominantemente cristalina. O difratograma mostra a presença do mineral Enstatita ($\text{Al}_{0.14} \text{Ca}_{0.012} \text{Mg}_{1.66} \text{O}_6 \text{Si}_{1.94}$) que possui fórmula química $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$, composto de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de magnésio (MgO). Sua dureza é de aproximadamente 5,5 e sua densidade varia de 3,26 a 3,28.

Conforme diversos autores, a escória de ferroníquel consiste basicamente em sílica amorfa, bem como minerais cristalinos, como enstatita (Lemonis et al., 2015; Maragkos et al., 2009; Komnitsas et al., 2007).

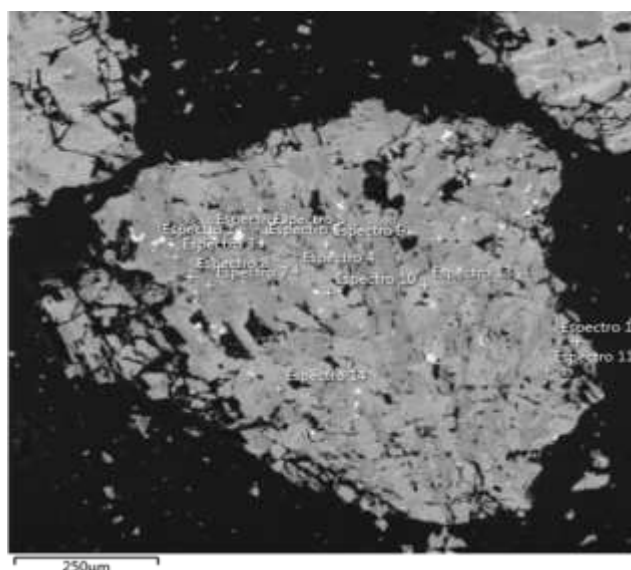
Conforme Wang (2016), não há óxidos livres na composição da escória de ferroníquel e a fase de cristalina é composta principalmente de por enstatitas, o que o torna muito diferente da composição mineralógica potencial da escória de ferro comum.

Portanto, a alta concentração do MgO presente na escória de ferroníquel é proveniente do mineral enstatita, que conforme diversos autores já citados, não apresenta potencial de expansão.

4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 4.3 mostra a distribuição morfológica obtida na análise do pó da amostra de escória de ferroníquel.

Figura 4.3 - Indicação dos pontos encontrados na morfologia típica da escória de ferroníquel pulverizada



É possível observar a heterogeneidade dos finos da amostra pelo diferente contraste na coloração das partículas, observação que pode ser confirmada pela análise de sua composição química realizada neste mesmo ensaio.

Para a análise química qualitativa, foram selecionados pontos específicos em cada região da amostra, que estão mostrados na Figura 4.3.

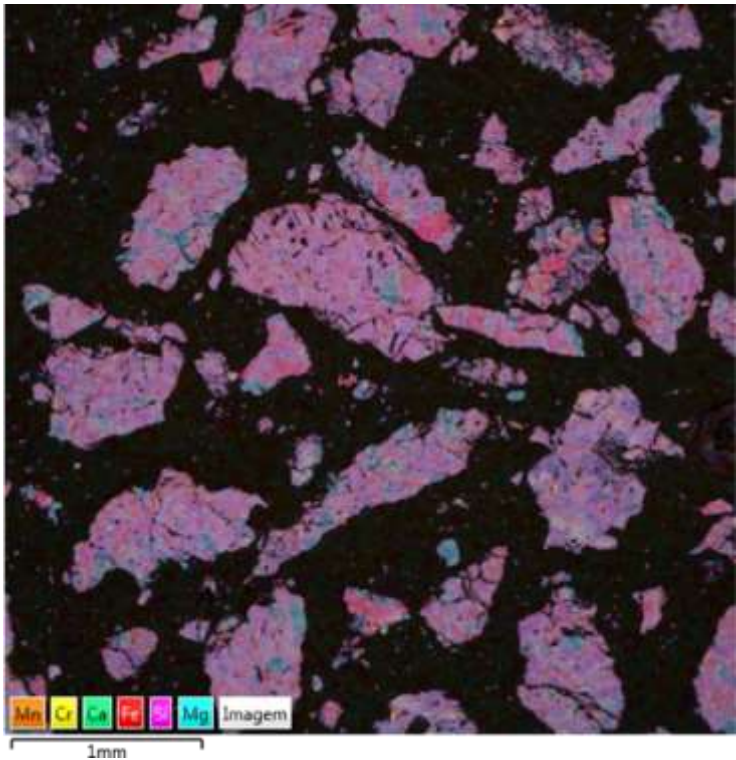
A composição dos elementos químicos encontrados e suas respectivas porcentagens estão dispostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados da análise quantitativa do MEV

Escoria de ferroníquel	Espécies químicas (% em teor de óxidos)									
	Si	Cr	Fe	Mg	Al	Ti	V	Mn	Ca	Ta
Pt.1	0,7	68,3	18,5	8,2	4,3	-	-	-	-	-
Pt.2	0,5	59,5	23,1	7,4	8,3	0,7	0,5	-	-	-
Pt.3	56,7	2	7,1	34,2	-	-	-	-	-	-
Pt.4	54	0,9	15,8	27,3	1,9	-	-	-	-	-
Pt.5	55,1	1,1	12,5	30,4	1	-	-	-	-	-
Pt.6	3,8	62,3	18,5	11,2	4,2	-	-	-	-	-
Pt.7	56,8	1,8	7,1	34,3	-	-	-	-	-	-
Pt.8	55	1,3	16,2	24,8	1,7	-	-	-	-	1
Pt.9	1,2	44,3	23,6	8,5	20,1	1,2	0,3	0,7	-	-
Pt.10	53,6	1	15,4	27,6	2,4	-	-	-	-	-
Pt.11	56,6	1,9	7,5	34	-	-	-	-	-	-
Pt.12	54,2	1,3	16,7	26,4	1,4	-	-	-	-	-
Pt.13	50,3	1,2	14,8	25,3	7,1	0,5	-	-	0,9	-

A Figura 4.4, a seguir, mostra a composição química da escória de ferroníquel considerando todo o mapa, e não apenas pontualmente.

Figura 4.4 - Morfologia típica encontrada na escória de ferroníquel pulverizada.



Na Tabela 4.6 encontra-se o resultado da análise quantitativa por microscopia considerando a amostra por completo.

Tabela 4.6 - Resultados da análise quantitativa realizada.

Escória de ferroníquel	Espécies químicas (% em teor de óxidos)						
	Si	Mg	Fe	Al	Cr	Ca	Mn
Soma dos mapas	51,3	29,3	13,4	3,5	1,7	0,4	0,4

Os resultados da análise quantitativa por microscopia de varredura eletrônica realizados na escória de ferroníquel foram bem próximos aos resultados encontrados na análise quantitativa realizada por fluorescência de Raios-X, reafirmando os compostos encontrados anteriormente.

4.3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL

4.3.1 Ensaios de lixiviação e solubilização

O resultado do ensaio de lixiviação para parâmetros inorgânicos da escória de ferroníquel encontra-se apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Ensaio de lixiviação para parâmetros inorgânicos da escória de ferroníquel.

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L)
Arsênio	1,0	<0,004
Bário	70	0,12
Cádmio	0,5	<0,001
Chumbo	1,0	<0,01
Cromo Total	5,0	<0,01
Fluoretos	150,0	1,4
Mercúrio	0,1	<0,0002
Prata	5,0	<0,005
Selênio	1,0	<0,01

O ensaio de lixiviação mostra que não há presença de elementos lixiviados acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004/2004 para a escória de ferroníquel.

O resultado do ensaio de solubilização dos parâmetros orgânicos e inorgânicos da escória de ferroníquel estão mostrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Ensaio de solubilização para parâmetros orgânicos e inorgânicos para a escória de ferroníquel.

Parâmetro	Valor Máximo Permitido (mg/L)	Concentração no Resíduo Solubilizado Amostra (mg/L)	Concentração no Resíduo Solubilizado Duplicata (mg/L)
Inorgânicos			
Alumínio (mg Al/L)	0,02	<0,05	<0,05
Arsênio (mg As/L)	0,01	<0,004	<0,004
Bário (mg Ba/L)	0,7	<0,01	<0,01
Cádmio (mg Cd/L)	0,005	<0,001	<0,001
Chumbo (mg Pb/L)	0,01	<0,01	<0,01
Cianeto (mg CN/L)	0,07	<0,01	<0,01
Cloreto (mg Cl/L)	250,0	1,92	2,0
Cobre (mg Cu/L)	2	<0,009	<0,009
Cromo Total (mg Cr/L)	0,05	0,02	0,02
Ferro (mg Fe/L)	0,3	<0,1	<0,1
Fluoretos (mg F/L)	1,5	0,43	0,40
Manganês (mg Mn/L)	0,1	<0,025	<0,025
Mercúrio (mg Hg/L)	0,001	<0,0002	<0,0002
Nitrato (mg N/L)	10,0	<0,02	<0,02
Prata (mg Ag/L)	0,05	<0,005	<0,005
Selênio (mg Se/L)	0,01	<0,01	<0,01
Sódio (mg Na/L)	200,0	6,47	6,54
Sulfato (mg SO ₄ -2/L)	250,0	42,6	42,4
Zinco (mg Zn/L)	5,0	<0,1	<0,1
Orgânicos			
Surfactantes (mg MBAS/L)	0,5	<0,30	<0,30
Fenóis Totais (MgC ₆ H ₅ OH/L)	0,01	<0,002	<0,002

O ensaio de solubilização não mostrou a presença de elementos lixiviados acima dos limites estabelecidos pela NBR 10004/2004.

De acordo com as prescrições das normas NBR 10004/2004, 10005/2004 e 10006/2004, pode-se ressaltar que a escória de ferroníquel é classificada como material de Classe IIB (Não Perigoso – Inerte) por não possuir nenhum parâmetro na amostra solubilizada em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água. E ainda pode-se considerar que a amostra não é corrosiva e também não é reativa por não apresentar as características que indicam tal propriedade.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO CAP 50/70

A Tabela 4.9 apresenta os resultados da caracterização do CAP 50/70.

Tabela 4.9 - Especificações e Caracterização do CAP 50/70 REGAP/PETROBRAS.

Característica	Método	Especificação	Resultado
Penetração	D 5	50 a 70	5,3 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	46 mín.	48,5 °C
Ductilidade a 25 °C	D 113	60 mín.	> 150cm
Viscosidade Brookfield - 135 °C (20RPM)	D 4402	274 mín.	334 cP
Viscosidade Brookfield - 150 °C	D 4402	112 mín.	170 cP
Viscosidade Brookfield - 177 °C	D 4402	57 a 285	64 cP
RTFOT Penetração Retida	D 5	55 mín.	74%
RTFOT - Aumento do Ponto de Amolecimento	D 36	8 máx.	3,4 °C
RTFOT - Ductilidade a 25 °C	D 113	20 mín.	>150 cm
RTFOT - Variação em % massa	D 2972	0,5 máx.	-0,04%
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,5 mín.	99,9% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 mín.	250 °C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-0,5 a 1,7	-1,4
Aquecimento a 177 °C	X 215	Não espuma	Não espuma

O resultado dos ensaios de viscosidade realizados com amostras do CAP 50/70 utilizado nesta pesquisa são mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Ensaios de Viscosidade CAP 50/70.

Característica	Método	Resultado (cP)
Viscosidade Brookfiel - 135 °C (20RPM)	ASTM D 4402	327
Viscosidade Brookfiel - 150 °C	ASTM D 4402	166
Viscosidade Brookfiel - 177 °C	ASTM D 4402	66

A caracterização realizada no Laboratório de Ferrovias e Asfalto (LFA) da Universidade Federal de Ouro Preto estão apresentados na Tabela 4.11, a seguir.

Tabela 4.11 – Ensaios de caracterização do CAP 50/70.

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ME 003/99	50 a 70	51	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	NBR 6560/85	40 mín.	48	°C

Ductilidade a 25 °C	ME 163/98	60 mín.	> 150	cm
Densidade a 25 °C	ME 193/94	-	1,002	-

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS DO PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS E ENSAIOS MECÂNICOS

5.1 RESULTADOS DO PROJETO DE MISTURAS ÁSFÁLTICAS

5.1.1 Composição Granulométrica

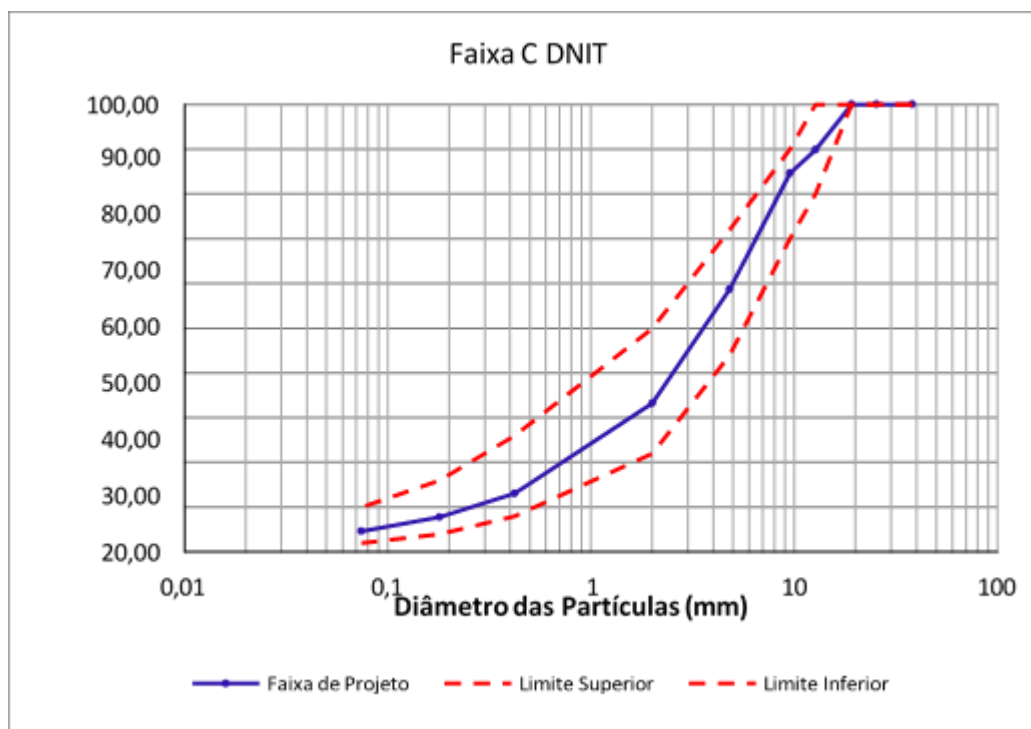
A Tabela 5.1 apresenta as frações obtidas após o fracionamento com as respectivas nomenclaturas e ainda a distribuição granulométrica final de projeto em acordo com a Faixa C do DNIT.

Tabela 5.1 – Enquadramento granulométrico do agregado de escória de ferroníquel na Faixa C do DNIT.

Peneiras		% por peneira			FAIXA C (DNIT 031/2006)		Faixa de Projeto	
Número	mm	Pó	Pedra	Brita 0	Brita 1	Lim. inf.	Lim. sup.	% Passa
1 1/2"	37,5	0,0		0,0	0,0	100	100	100,0
1"	25,4	0,0		0,0	0,0	100	100	100,0
3/4"	19,1	0,0		0,0	0,0	100	100	100,0
1/2"	12,7	97,9		2,1	0,0	80	100	89,8
3/8"	9,5	33,2		66,6	0,1	70	90	84,6
4	4,8	0,9		96,9	2,2	44	72	58,7
10	2	0,0		36,9	63,1	22	50	33,3
40	0,42	0,0		20,5	79,5	8	26	13,1
80	0,2	0,0		21,4	78,6	4	16	7,8
200	0,075	0,0		18,0	82,0	2	10	4,6
Fundo		0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

A curva granulométrica obtida após a adequação da escória de ferroníquel à granulometria da Faixa C, pode ser observada na Figura 5.1.

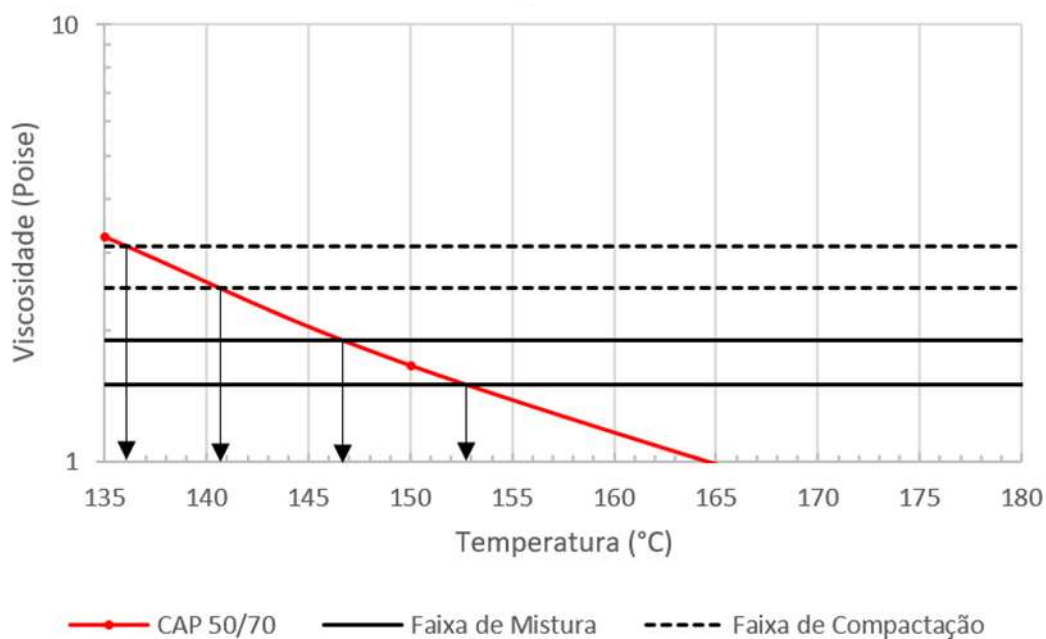
Figura 5.1 – Curva granulométrica da escória de ferroníquel na Faixa C do DNIT 031/2006.



5.1.2 Temperatura de mistura e compactação

A partir da curva de viscosidade-temperatura, mostrada na Figura 5.2, foram determinadas as temperaturas de mistura e compactação dos materiais.

Figura 5.2 – Gráfico viscosidade Brookfield (°C) versus Temperatura (°C)



A temperatura de usinagem adotada para o CAP 50/70 foi aquela em que a viscosidade do ligante estivesse na faixa de 170 ± 20 cP. A temperatura do agregado foi definida como 130°C acima da temperatura de usinagem do ligante. A temperatura de compactação e, conseqüentemente de envelhecimento em estufa por duas horas, foi aquela em que a viscosidade do ligante estivesse na faixa entre 280 ± 20 cP.

Assim, pelo gráfico foi possível definir que para a realização das misturas, a temperatura do ligante asfáltico deveria estar entre 147 °C a 153 °C e a compactação com temperaturas entre 136 °C e 141 °C.

5.1.3 Densidade Máxima Teórica (DMT)

Os valores das DMTs calculadas para cada teor de ligante da pesquisa, estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultado das DMTs calculadas para cada teor de ligante.

Misturas com escória de ferroníquel						
Densidade Máxima Teórica (DMT)	2,999	2,969	2,939	2,909	2,881	2,852
Teor de ligante (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5

Os valores obtidos das DMTs para a escória de ferroníquel nos traços com teor de CAP de 4,0% a 6,5% variaram de 2,999 a 2,852. Esses valores foram utilizados para o cálculo do teor de projeto.

Para misturas com agregado convencional, Silva (2010) encontrou valores para a DMT variando de 2,422 a 2,498. Os valores obtidos por Torres (2018) para misturas convencionais variaram de 2,378 a 2,449.

Por possuir massa específica maior que agregados convencionais, o valor da densidade máxima teórica da escória de ferroníquel também é superior aos valores para agregados convencionais.

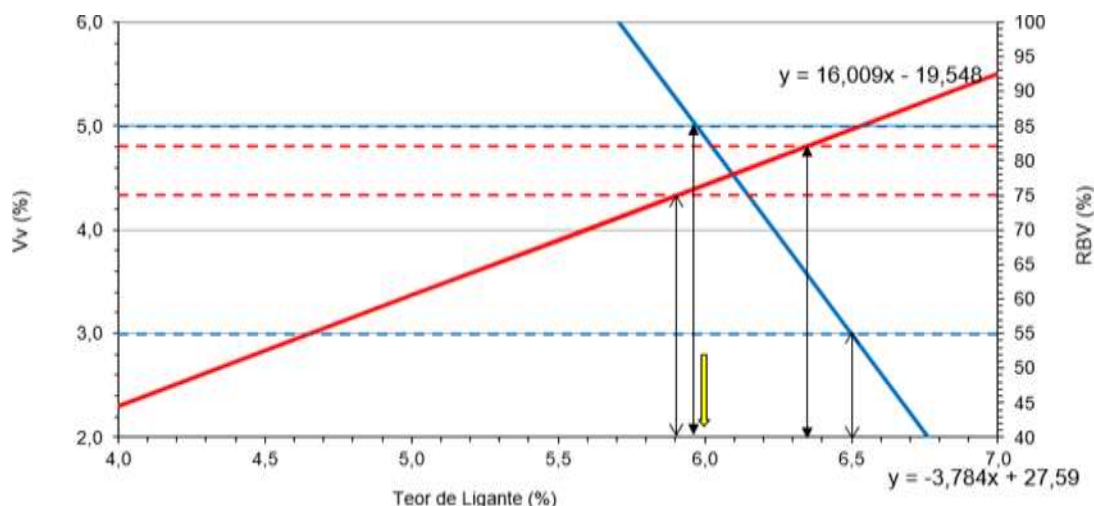
5.1.4 Teor de Projeto (TP)

Para a determinação do teor de projeto da pesquisa, foram calculados todos os parâmetros volumétricos das misturas com teores de asfalto de 4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5 %. Os valores calculados estão apresentados na Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3 – Parâmetros volumétricos da mistura com diversos teores de asfalto.

Nº do CP	Mistura	Teor de ligante (%)	Altura média	Diâmetro médio	VCB	VAM	RBV	Vv
1	NIQ	4,0	6,373	10,190	10,425	22,807	45,714	12,382
2	NIQ	4,0	6,390	10,185				
3	NIQ	4,0	6,348	10,180				
1	NIQ	4,5	6,388	10,178	11,840	22,491	52,655	10,651
2	NIQ	4,5	6,273	10,183				
3	NIQ	4,5	6,293	10,190				
1	NIQ	5,0	6,333	10,175	13,203	22,617	58,386	9,413
2	NIQ	5,0	6,345	10,173				
3	NIQ	5,0	6,383	10,183				
1	NIQ	5,5	6,280	10,170	14,758	21,763	67,810	7,006
2	NIQ	5,5	6,255	10,160				
3	NIQ	5,5	6,223	10,175				
1	NIQ	6,0	6,278	10,188	16,330	21,087	77,443	4,757
2	NIQ	6,0	6,323	10,165				
3	NIQ	6,0	6,290	10,178				
1	NIQ	6,5	6,238	10,185	17,809	20,955	84,986	3,146
2	NIQ	6,5	6,248	10,178				
3	NIQ	6,5	6,250	10,193				

Com a determinação dos parâmetros volumétricos Vv e RBV para cada corpo de prova, foi possível a construção de um gráfico com a abscissa representada pelo percentual de ligante da mistura e as ordenadas sendo os valores de Vv e RBV, como mostra a Figura 5.3.

Figura 5.3 – Curva de determinação do Teor de Projeto da mistura.

A partir desse gráfico, foi definido o Teor de Projeto da mistura de concreto asfáltico com agregado de escória de ferroníquel, sendo que o valor escolhido deveria estar entre os valores centrais de CAP. Logo, o teor ótimo definido para a mistura foi 6,0% de teor de CAP. A Figura 5.4, mostra o aspecto dos corpos de prova para cada teor de ligante da pesquisa.

Figura 5.4 – Aspecto dos corpos de prova após moldagem.

Foi possível observar que as misturas com teores de 4,0% a 5,5% apresentavam certa falta de ligante para agregar completamente os grãos de escória. Com o teor de 6,0% o corpo de prova mostrou-se mais homogêneo. Para o teor de 6,5%, após a desmoldagem foi observado o excesso de ligante em alguns pontos. O maior consumo de CAP na presente pesquisa, está diretamente ligado a porosidade da escória de ferroníquel. O maior consumo de ligante na presente pesquisa, pode estar ligado ao valor ligeiramente elevado de absorção da escória que foi de 2,3%, enquanto para Wang (2016) esses valores ficaram na faixa de 0,73% e 1,25% e Santos (2013) encontrou 0,1% de absorção para a de escória de ferroníquel.

Após a determinação das medidas volumétricas e a escolha do teor de projeto, foi obtido através da prensa Marshall os parâmetros mecânicos de estabilidade e fluência para o Teor de Projeto de 6,0%, que são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultado dos ensaios de estabilidade e fluência para o teor de projeto de 6,0%.

Teor de Projeto (%)	Estabilidade Corrigido (kgf)	Estabilidade Corrigido (kN)	Fluência (mm)
6,0	2165,12	21,23	5,6

O valor da estabilidade Marshall encontrado foi de 2165,12 kgf, superior ao valor mínimo de 500 kgf estabelecido pelo DNIT 031/2006. Já para a fluência, não há normatizações vigentes no país estabelecendo limites para esse parâmetro. O valor obtido pelo ensaio foi de 5,6 mm.

A Tabela 5.5 traz os limites impostos pelo DNIT 031/2006, assim como os resultados encontrados nessa pesquisa.

Tabela 5.5 – Resultado de Requisitos de dosagem de concreto asfáltico pelo DNIT 031/2006.

TEOR DE PROJETO 6,0%			
Características	Método de Ensaio	Valores Obtidos	Limites
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	4,76	3 a 5
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	77,44	75 - 82
Estabilidade mínima (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	2165,12	500
Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, mínima (MPa)	DNER-ME 138	1,62 (item 5.2.2)	0,65

A partir dos resultados dos parâmetros volumétricos obtidos para a mistura de concreto asfáltico com adição de agregado de escória de ferroníquel, é possível afirmar que a mistura é adequada para a execução por se enquadrar em todos os parâmetros preconizados pela norma DNIT 031/2006.

5.2 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR), resistência a tração estática por compressão diametral (RT), fadiga por compressão diametral a tensão controlada e deformação permanente por compressão axial (creep estático) realizados nos corpos de prova para o teor de projeto de 6,0%.

5.2.1 Módulo de resiliência

Na Tabela 5.6 estão apresentados os resultados do ensaio de módulo de resiliência para o teor de projeto de 6,0% bem como o desvio padrão (DP) para a mistura. O relatório completo do ensaio consta no Apêndice I.

Tabela 5.6 - Valores obtidos de módulo de resiliência para as misturas à 25°C.

Corpo de Prova	Módulo de Resiliência (MPa)	Módulo de Resiliência Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
1	6274	5835	501	8,6
2	6096			
3	5134			

CV: Coeficiente de Variação = desvio padrão/média.

O valor médio de MR encontrado para a mistura com teor de CAP de 6,0% foi de 5835 MPa.

Segundo Bernucci et al. (2008), os valores típicos de MR encontrados para concretos asfálticos ensaiados na temperatura de 25°C variam de 2.000 a 8.000 MPa, sendo que maiores valores são obtidos para misturas com CAP mais consistentes.

Castelo Branco (2004) encontrou os valores de módulo resiliente para a mistura asfáltica tipo C.A.U.Q. contendo 40% de escória de aciaria com MR igual a 2.276 MPa, para a mistura contendo 60% de escória com MR igual a 1.836 MPa e M3 contendo 80% de escória com MR igual a 2.188 MPa.

Freitas (2007) obteve resultados de módulo resiliente igual a 9173 MPa para a mistura asfáltica tipo C.A.U.Q. com 97% de escória de aciaria utilizando o CAP 30/45 com Sasobit (melhorador da performance de asfalto e mais utilizado em misturas mornas).

Silva (2010) encontrou valores de módulo de resiliência para misturas convencionais com CAP 50/70 à temperatura de 25°C variando de 4500 a 4800 MPa. Já em mistura usando 80% de escória os valores de MR variaram de 4000 a 7200 MPa.

Rossato (2015) analisando as misturas convencionais com CAP 50/70 para temperatura de ensaio igual a 25°C, encontrou resultados de MR em torno de 4000 MPa.

Portanto, o valor encontrado na presente pesquisa encontra-se compatível com aqueles encontrados na bibliografia técnica.

É importante considerar que a variação do comportamento mecânico da mistura asfáltica está diretamente ligado a variação da forma, textura, angularidade do agregado, o teor e o tipo de ligante.

5.2.2 Resistência à tração estática por compressão diametral

Foram realizados três ensaios para o teor de projeto de 6,0%. Na Tabela 5.7, estão apresentados os resultados de resistência a tração indireta por compressão diametral (RT) bem como o valor médio e também a relação MR/RT obtida para o traço. O relatório completo do ensaio está apresentado no Apêndice I.

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração Estático por Compressão Diametral.

Corpo de Prova	RT (MPa)	RT médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Módulo de Resiliência Médio (MPa)	MR/RT
1	1,55	1,62	0,05	5835	3609
2	1,65				
3	1,65				

$$\frac{MR}{RT} = 3609$$

O valor médio de resistência à tração (RT) obtido no ensaio foi de 1,62 MPa com relação de

A relação entre MR/RT é um parâmetro que indica a compatibilidade entre a rigidez e a resistência à tração da mistura asfáltica. De acordo com Bernucci et al. (2008), a relação MR/RT tem sido utilizada como um indicador de vida de fadiga de misturas asfálticas, sendo mais desejável um valor pequeno da razão, já que, com frequência, busca-se, baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento precoce do revestimento, e alta resistência a tração que é associada a uma maior resistência à fadiga

Segundo Leite et al. (2000), valores próximos a 3000 caracterizam misturas com boa flexibilidade e resistência à tração.

Motta e Pinto (1994) obtiveram a relação $MR = 4283RT$, já o procedimento DNER PRO 269/94 usado em projetos de reabilitação de pavimentos estima a relação em $MR = 5000RT$ (Motta, 1998).

Silva (2010) encontrou valores de RT para misturas tipo C.A.U.Q com 80% de escória de aciaria variando entre 0,93 MPa e 1,54 MPa para diversos teores de ligantes.

Santos (2013) encontrou valores de RT iguais a 1,44 MPa para mistura de C.A.U.Q. com o uso de 60% de escória de ferroníquel, 30% brita 1, 7% pedrisco, 3% cimento (faixa C).

Rossato (2015) encontrou para mistura convencional com CAP 50/70 o valor de RT à 25°C de 1,07 MPa.

Com isso, pode-se afirmar que o valor de RT encontrado nesta pesquisa está condizente com os valores encontrados na literatura, e a ainda, a relação MR/RT indica um bom comportamento mecânico da mistura.

5.2.3 Fadiga por compressão diametral à tensão controlada

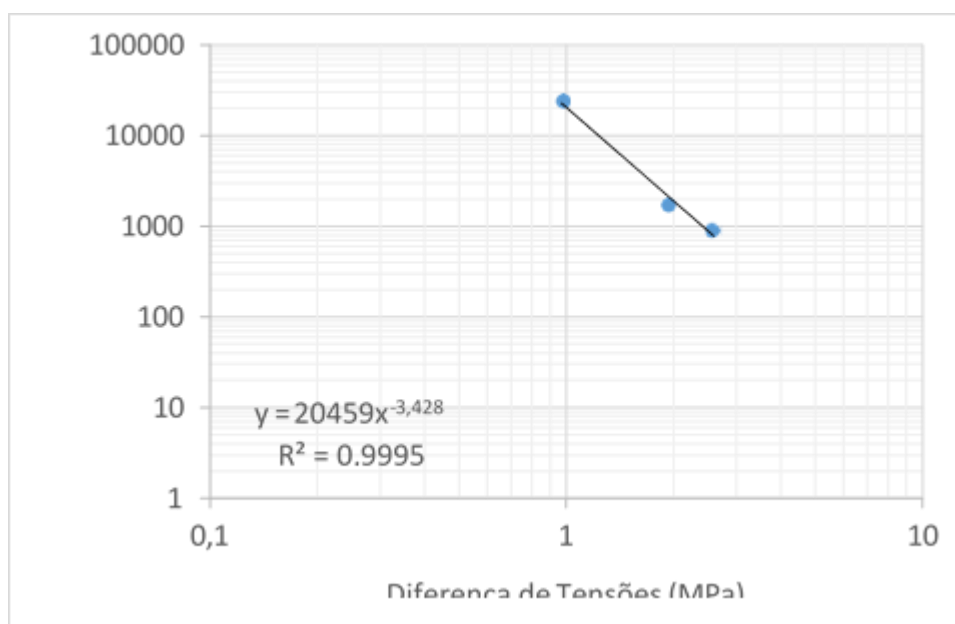
Os ensaios realizados para a determinação da vida de fadiga da mistura estão mostrados a seguir. O relatório completo encontra-se no Apêndice II.

As amostras foram submetidas a um nível de tensão que variou de 40 a 15% do valor da RT. A Tabela 5.8 mostra os resultados dos ensaios de vida de fadiga.

Tabela 5.8 - Número de aplicações e tensões obtidos nos ensaios de Vida de Fadiga.

Nº de Aplicações (N)	Nível de Tensão	Diferença de Tensões (MPa)	Deformação Específica Resiliente (ϵ)
24088	15%	0,970	4,16E-5
1727	30%	1,940	8,33E-5
902	45%	2,590	11,11E-5

O gráfico da Figura 5.5 exibe a curva de vida de fadiga gerada para a mistura ensaiada, através do número de aplicações versus diferença de tensões.

Figura 5.5 – Gráfico de vida de fadiga da mistura.

Com base na Tabela 5.8, e no gráfico da Figura 4.24 observou-se que a mistura possui bom comportamento para os tensões abaixo de 2,0 MPa.

A Tabela 5.9 exhibe as constantes “K” e “n”, o coeficiente de regressão linear (R^2) bem como o modelo de fadiga obtido para a curva de fadiga, da mistura analisada.

Tabela 5.9 - Parâmetros da curva de fadiga.

K	n	R^2
20459,2	-3,4285	0,9895
Vida de Fadiga		$N=20459 \Delta\sigma^{-3,4285}$

O equação de vida de fadiga da mistura encontrada assemelha-se àquela obtida por Silva (2010) na mistura com 80% de escória e 6% de rejeito de minério de ferro, onde $N=20795 \Delta\sigma^{-3,32}$.

É importante salientar que a avaliação do desempenho a fadiga das misturas deve ser feito pela análise do sistema de camadas que compõem determinado pavimento e não apenas pela curva de fadiga obtida para as misturas, pois as diferenças de tensões geradas estão ligadas ao comportamento da estrutura do pavimento como um todo e do valor da rigidez (MR) de suas respectivas camadas (Medina e Motta, 2005).

5.2.4 Deformação permanente por compressão axial (Creep estático)

A Tabela 5.10 mostra as deformações plásticas específicas finais e máximas obtidas após o descarregamento. O Apêndice III mostra os resultados obtidos em laboratório.

Tabela 5.10 – Deformações Plásticas Específicas obtidas no ensaio de Creep Estático.

Escória de ferroníquel – TP 6,0%	CP	Altura do CP (mm)	Deformação Plástica Específica	Deformação
				Plástica Específica
				Máxima
	1	63,2	0,001823	0,0022299
	2	63,2	0,003126	0,0038880
	3	63,2	0,002943	0,0035109
	Média		0,002631	0,0032069

Segundo Medina e Motta (2005), quanto maior o volume de vazios da mistura e menos consistente for o ligante asfáltico, menor será a resistência a deformação permanente. No presente estudo não foi possível realizar tal verificação para a mistura com escória de ferroníquel, pois a metodologia proposta baseou-se em realizar os ensaios apenas para o teor de projeto.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

São apresentadas neste capítulo as principais conclusões obtidas por meio da realização da presente dissertação, e ainda algumas recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Tais conclusões são limitadas ao programa experimental realizado e sua respectiva análise.

6.1 CONCLUSÕES

Após a realização de todos os ensaios propostos para o desenvolvimento dessa pesquisa é possível afirmar que há viabilidade na utilização da escória de ferroníquel como agregado em misturas betuminosas usinadas à quente.

A caracterização física da escória de ferroníquel mostrou que todos os parâmetros e limites preconizados pelo DNIT 031/2016 (Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço) foram atendidos. Já em relação à absorção da escória de ferroníquel, o valor encontrado foi de 2,3% valor superior aos 2% recomendados pelo DNER-EM 262/94 que trata do uso de escórias de aciaria para aplicação em pavimentos rodoviários.

Quanto a caracterização química, o ensaio de Fluorescência de Raios-X mostrou a presença predominante de SiO₂ (sílica), MgO (óxido de magnésio) e Fe₂O₃ (óxido de ferro). A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura a presença de elementos já encontrados na análise quantitativa realizada por Fluorescência de Raios-X. No ensaio de Difração e Raios-X o difratograma mostrou a presença do mineral Enstatita, em sua forma cristalina, composto de dióxido de silício (SiO₂) e óxido de magnésio (MgO), mostrando assim que a alta concentração do MgO presente na escória de ferroníquel não possui potencial de expansão.

A caracterização ambiental da escória de ferroníquel, através dos ensaios de Lixiviação e Solubilização foi possível classificá-la como material de Classe IIB (Não Perigoso – Inerte) por não possuir nenhum parâmetro na amostra solubilizada em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, por não ser corrosiva e também não reativa.

A caracterização do ligante CAP 50/70 atendeu aos limites estabelecidos de cada ensaio.

Em relação ao projeto de misturas asfálticas a curva granulométrica obtida após a adequação da escória de ferroníquel à granulometria da Faixa C do DNIT 031/2006-ES enquadrou-se em todos os limites estabelecidos pela faixa.

Os resultados das densidades máximas teóricas da escória de ferroníquel são superiores aos de agregados convencionais, devido a maior massa específica da escória.

A partir dos resultados dos parâmetros volumétricos obtidos para a mistura de concreto betuminoso usinado à quente com adição de agregado de escória de ferroníquel foi obtido um teor de projeto (TP) para a mistura de 6,0%.

Sob o ponto de vista técnico-econômico, o maior consumo de ligante por parte da escória de ferroníquel em relação à agregados convencionais, pode ser compensado pelo menor custo que esse agregado possui em relação ao agregado natural. Isso se deve pela escória de ferroníquel ser um subproduto da produção de ferroligas de níquel, enquanto que o agregado natural demanda de onerosos processos de extração, além dos prejuízos ambientais causados para a obtenção desse insumo.

Os valores de V_v , RBV, estabilidade Marshall e resistência à tração por compressão diametral mostraram-se compatíveis com àqueles requeridos pelo DNIT 031/2006-ES. A partir disso, a mistura atendeu a todas as características e propriedades prescritas para a dosagem de misturas asfálticas pela metodologia Marshall.

Através da caracterização mecânica da mistura foi possível verificar que os valores de MR e RT bem como a relação MR/RT estão de acordo com aqueles apresentados pela literatura e mostram o bom comportamento mecânico atingido pela mistura. No ensaio de creep estático, a mistura apresentou pequenas deformações permanentes específicas. Já pelo ensaio de fadiga foi observado que a mistura possui bom comportamento mecânico quando submetida à baixos níveis de tensões.

A pesquisa mostrou a viabilidade técnica do uso da escória de ferroníquel como agregado na composição de concreto betuminoso usinado à quente, cumprindo os requisitos estabelecidos pela normatização brasileira. Além disso, contribuiu com informações importantes acerca das características físicas, químicas, ambientais e mecânicas do material, mostrando que a escória de

ferroníquel apresenta grande potencial de substituição do agregado pétreo natural em misturas asfálticas. Do ponto de vista ambiental os ganhos são grandes, por dar utilidade a um material que quando estocado torna-se um passivo ambiental, e ainda traz vantagens econômicas por se tratar do reuso de um resíduo que antes seria descartado e não possuía nenhum valor agregado.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Construção e instrumentação de um trecho rodoviário experimental para a aplicação e avaliação do desempenho mecânico da mistura desenvolvida em laboratório.
- Realizar a dosagem através da metodologia Superpave, para efeito de comparação dos resultados com a dosagem Marshall, destacando a possível alteração nos teores de projetos entre as duas metodologias.
- Avaliação econômica da aplicação da escória de ferroníquel como agregado alternativo em pavimentação rodoviária por meio de uma aprofundada análise de custos.
- Caracterização tecnológica da escória de ferroníquel para uso em pavimentação nas camadas de base, sub-base e reforço do subleito.
- Caracterização tecnológica da escória de ferroníquel como agregado para a construção de pavimento rígido intertravado e também como agregado para concreto.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7207. Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10004. Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 71p, 2004a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10005. Lixiviação de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro, 16p, 2004b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10006. Solubilização de Resíduos - Procedimento. Rio de Janeiro, 3p, 2004c.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 21p, 2004d.

ALEXANDRE, J.; RAGUIN, J. Beneficiation of blast furnace slag and converter slag in the french iron and steel industry. In: Committee on environmental affair. Utilisation of blast furnace and BOF slag. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute, section A2, 1984.

AMARAL, S. C. Estudos de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP 40) e asfalto modificado com polímero SBS 73 (BETUFLEX B 65/60). Dissertação (Mestrado). 147p. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2000.

ANDRADE, M. L. A., CUNHA, L. M. S., GANDRA, G. T. Panorama da Indústria Mundial de Ferroligas, n.º 10, Rio de Janeiro, 1999.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JONH, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. CT206 – IBRACON, 2001, São Paulo, Anais... São Paulo, 2001.

BALBO, J.T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo. Oficina de Textos, 2007.

BALDWIN, G., ADDIS, R., CLARK, J., ROSEVEAR, A. Use of industrial by-products in road construction: water quality effects. London: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), 1997.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Petrobras, Abeda, 2006.

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. Níquel -Novos Parâmetros de Desenvolvimento. BNDES, Brasília, 2000.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. Coord. Geral Wagner Fernandes Pinheiro, Osvaldo Barbosa Ferreira Filho, Carlos Augusto Ramos Neves; Equipe Técnica por Marina Dalla Costa... [et. Al.]; – Brasília: DNPM, 2018. 33 p.: il.

BRASIL. [Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010]. Política nacional de resíduos sólidos [recurso eletrônico]. – 2. ed. – Brasília : Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de et al. Panorama e tendências do mercado de níquel. Estudo realizado em junho de 2015. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 42 , p. [245]-295, set. 2015.

CASTELO BRANCO, V. T. F. Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

CEMPEL, M.; NIKEL, G. Nickel: a review of its sources and environmental toxicology. Polish Journal of Environmental Studies has been selected. Olsztyn, n. 3, p. 375-382, 2006.

CERATTI, J.A.P.; REIS, R.M.M. Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico. Oficina de Textos. São Paulo, 2011.

CHOI, Y.C., CHOI, S. Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferronickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions. Cons. Build. Mater. 99, 279–287. 2015.

CHESNER, W. H., COLLINS, R. J., & MACKAY, M. H. User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction. FHWA-RD-97-148. Washington, DC. 1998.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de Rodovias 2017.

Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br>>. Acesso em: 01 mar. 2018. CRU. Nickel market outlook. April 2015. London, 2015.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). EM 262, Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 078, Agregado Graúdo – Adesividade a Ligante Betuminoso. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 085, Material Finamente Pulverizado – Determinação da Massa Específica Real. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 086, Agregado –Determinação do índice de Forma. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 089, Agregados – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 117, Mistura Betuminosa – Determinação da Densidade Aparente. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 133, Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 138, Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 193, Materiais Betuminosos Líquidos e Sólidos – Determinação da Densidade. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995). ME 085, Agregado miúdo – Determinação da Densidade Real. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995). ME 043, Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1996). PRO 199, Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). EM 367, Material de Enchimento para Misturas Betuminosas. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). ME 054, Equivalente de Areia. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997). PRO 120, Coleta de Amostras de Agregados. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 035, Agregados

– Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 081, Agregados

– Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 083, Agregados

– Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1998). ME 163, Materiais Betuminosos – Determinação da Ductilidade. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). ME 003, Material Betuminoso – Determinação da Penetração. Rio de Janeiro.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999). ME 399, Agregados – Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton. Rio de Janeiro.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031-ES: Pavimentos flexíveis -Concreto asfáltico. Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 135/2010-ME: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 274 p. DNIT, 2006b.

EMERY, J. J. Slag utilization in pavement construction. Extending Aggregate Resources, ASTM STP 774. American Society for Testing and Materials, 1982. Pp 95- 118.

FERNANDES, G. Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos. Brasília: Tese de doutorado. UnB, 2005. 253 p.

FERNANDES, D.P. Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. UFOP, 2010.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no estado de minas gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade. Relatório técnico. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais, 2010.

FILEV, R. M. Escória de Aciaria. Ficha técnica. Disponível em:

<http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm>. Acesso em: 28 abril. 2018.

FREITAS, H. B. Misturas asfálticas de módulo elevado com uso de escória de Aciaria como agregado. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

GEISELER, J.; DRISSEN, P.; KUEHN, M.; SCHREY, H. Liquid slag treatment guarantees high product quality of steel slags. Iron and Steel Slags - Properties and utilization – Reports, 1999.

GONTIJO, P. R. A. Pavimentos compostos com escorias de aciaria. Revista Pavimentação, ano 1, n.3, 2006.

GUMIERE, A. G. Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD em Materiais de Construção Civil. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 226p, 2002.

HUANG, Y.H. Pavement Analysis and Design. New Jersey, Prentice Hall Inc. 1993.

HUANG, D., CHEN, S.H., HNIN MON, H. The Preliminary Study on Re-Utilization of Ferrous-Nickel Slag to Replace Conventional Construction Material for Road Construction (Sub-Grade Layer Improvement). Advanced Materials Research. 723. 694-702. 2013.

IABR – Instituto Aço Brasil. Panorama de Escória de Aciaria no Brasil. Seminário Internacional de Aplicação da Escória de Aciaria. Belo Horizonte/MG – Brasil – nov 2010.

IABR – Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade 2016. Disponível em:

<<http://www.acobrasil.org.br/site2015/relatorios.asp>>. Acesso em: 23 mar.2018.

IABR – Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade 2018. Disponível em:

<<http://www.acobrasil.org.br/site2015/relatorios.asp>>. Acesso em: 10 out.2018.

INNOCENTINI, M.D.M., KALLAS, F.P.E., MONTEDO, O.R.K. Utilização da escória gerada na produção de níquel como matéria-prima para produção de telhas cerâmicas. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica 15 a 18 de maio de 2016, Águas de Lindóia, SP. 2016

JOHN, V.M. Pesquisa e desenvolvimento de mercado para resíduos. In: Workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil, São Paulo, 1997.

IPR – INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Estudos e pesquisas de rochas de pedreiras para estabelecimento de critérios de qualidade frente às normas e procedimentos existentes e sua aceitação. Relatório final. ECL – Engenharia, Consultoria e Economia S.A. Rio de Janeiro, 1998.

KANDHAL, P. S., HOFFMAN, G. L. Evaluation of Steel Slag Fine Aggregate in Hot- mix Asphalt Mixtures. Transportation Research Record, Washington, D.C, n. 1583, p. 28-36. 1998.

KANG, S. S., PARK, K., KIM, D. Potential Soil Contamination in Areas Where Ferronickel Slag Is Used for Reclamation Work. Materials (Basel, Switzerland), 7(10), 7157–7172. 2014.

KIM, P.S. The study on performance evaluation of eco-friendly concrete using ferro nickel slag for fine aggregate. Master Thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, 2013.

KOMNITSAS, K., ZAHARAKI, D., PERDIKATIS, V. Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags. J. Mater. Sci. 42 (9), 3073–3082. 2007.

LEE, A.R. Blastfurnace and steel slag – production, properties and uses. 1st ed. London. Edward Arnold, 1974.

LEITE, L.F.M., MOTTA, L. M. G., BERNUCCI, L.B., SOARES, J. B. Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. In: ASPHALT RUBBER – THE PAVEMENT MATERIAL OF THE 21st Century – Proceedings, 2000. Vilamoura, Portugal. Pp. 309 – 318, 2000.

LEMONIS, N., TSAKIRIDIS, P.E., KATSIOTIS, N.S., ANTIOHOS, S., PAPAGEORGIOU, D., KATSIOTIS, M.S., BEAZI-KATSIOTI, M. Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan. Constr. Build. Mater. 81, 130–139. 2015.

LIMA, R.L.; ZAMPIERON, J.V. Avaliação da escória de níquel como possível matéria-prima para pigmento cerâmico. Ciência et Praxis v. 2, n. 4, 2009.

LOUREIRO, T.G. Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 98fl, 2003.

MACHADO, A. T. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 135p, 2000.

MARAGKOS, I., GIANNOPOULOU, I.P., PANIAS, D. Synthesis of ferronickel slag- based geopolymers. Minerals. Eng. 22 (2), 196–203. 2009.

MARQUES, G.L.O. Procedimentos de avaliação e caracterização de agregados minerais usados na pavimentação asfáltica. Seminário de qualificação ao doutoramento – Coordenação 156 Pavimentação

asfáltica: formação básica para engenheiros dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MEDINA, J. Mecânica dos Pavimentos. 1ª ed., Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. 2a edicao, Editora Imagemaker Interactive. Rio de Janeiro, 2005.

MME, Ministério de Minas e Energia. Produto 34: Cadeia de Ferroligas. Consultor. Paulo Von Kruger. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia. Relatório Técnico 60 - Perfil de Ferroligas. Agosto, 2009.

MME- Ministério de Minas e Energia. Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 1995 – Brasília: SGM, 2017.

MOTTA, L. M. G., PINTO, S. O Uso de Ensaio Estáticos na Definição de Parâmetros de Comportamento das Misturas asfálticas. In: 12º ENCONTRO DE ASFALTO, INSTITUTO BRASILEIRO DO PETRÓLEO - IBP, 1994, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro, 1994.

MOTTA, L.M.G. Noções básicas de pavimentação. Rio de Janeiro, RJ, 2002,

MOTZ, H.; GEISELER, J. The steel slags - characteristics, properties and quality assurance. Iron and Steel Slags - Properties and utilization – Reports, 1998.

NCHRP – NACTIONAL COOPERATIVE HIGWAY RESEARCH PROGRAM. A manual for desing of hot mix asphalt with commentary. Washington, D. C, 2001.

OCHIDA, D. Use of nickel slag from New Caledonia in civil engineering applications. PhD Thesis. National School of Bridge and Roads (École nationale des ponts et chaussées), Paris. 1984.

PINTO, S. Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.

PINTO, S., PREUSSLER, E.S. Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 2.ed., Copiarte, 2002.

ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D-Y.; KENNEDY, T.W. Hotmix asphalt materials, mixture, design, and construction. 2. ed. Lanham: Napa Education Foundation, 1996.

ROSSATO, F. P. Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas. Dissertação de Mestrado. UFSM, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2015.

SAHA, A.K., SARKER, P.K. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars. Cons. Build. Mater. 123, 135–142, 2016.

SAHA, A. K., KHAN, M. N. N., SARKER, P. K. Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: A review. Resources, Conservation and Recycling, 134, 2018.

SAHAY, J. S.; NAGPAL, O. P.; PRASAD, S. Waste management of steel slag. In: Steel times international, 2000.

Sakoi, Y., Aba, M., Tsukinaga, Y., & Nagataki, S. Properties of Concrete used in Ferronickel Slag Aggregate. Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Tokyo, Japan. 2013.

SAMNUR, S., HUSAIN, H., ZULFI, A., SUJIONO, E. H. Study on physical-chemical properties of furnace-nickel-slag powder for geopolymer application. Jurnal Pendidikan Fisika. Indonesia, 2016

SANTOS, G.P.P. Um Estudo Sobre a Utilização da Escória de Ferroníquel em Pavimentação Rodoviária. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia. Dissertação de mestrado. 2013.

Sato, T., Watanabe, K., Ota, A., Aba, M., & Sakoi, Y. Influence of excessive bleeding on frost susceptibility of concrete incorporating ferronickel slag as aggregates. Proceedings of the 36th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore. 2011.

SENÇO, W. Manual de técnicas de pavimentação. 2. ed. ampl. São Paulo: PINI, 2008.

Shoya, M., Sugita, S., Tsukinaga, Y., Aba, M., & Tokuhasi, K. Properties of selfcompacting concrete with slag fine aggregates. Exploiting Wastes in Concrete. 121-130. Thomas Telford Publishing. 1999.

SILVA, G. et al. Escórias Siderúrgicas-Material de Múltiplas Aplicações.

DNER/IPR/Divisão de Pesquisas. 1988.

SILVA, E. A., MENDONÇA, R. L., DOBELE, C. H. M., SIQUEIRA, M., SOARES, J.

B. Uma experiência Inédita: Uso da Escória de Aciaria LD em Todas as Camadas do Pavimento. In: Reunião Anual de Pavimentação, 34., Campinas. Anal...Campinas: ABPv, 2003. p. 238-244.

SILVA, P.F.A. Manual de patologia e manutenção de pavimentos. 2. ed. rev. São Paulo: PINI, 2008.

SILVA, R.G.O. Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. UFOP, 2010.

SILVA, N.A.B. Estudo do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio e a quente modificadas por ligantes poliméricos. Dissertação de Mestrado. UFV. Viçosa, MG, 2016.

SOARES, J.B. Curso em Tecnologia dos Pavimentos. Lubnor/Petrobras, Fortaleza, 2000.

TAIRA, C. Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60). Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, 2001.

TORRES, A. M. A. Utilização de escória de Ferro Silício-Manganês como agregado em misturas asfálticas dosadas pela metodologia SUPERPAVE. Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. UFOP, 2018.

USGS - United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2017: U.S. Geological Survey. 202p. 2018.

VALE. Relatório Form 20-F 2017. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: < <http://www.vale.com/brasil/pt/investors/>> Acesso em:05 ago. 2018

YUSOF, M. A. W. Investigating the Potential for Incorporating Tin Slag in Road Pavements. March 2005. University of Nottingham.

WANG, G. C. The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction. Woodhead Publishing. 1st Edition. 442p. 2016

WANG, G., EMERY, J. Technology of slag utilization in highway construction. Environmental Benefits of In-Situ Material Recycling and Strengthening Session, Annual Conference of Transportation Association of Canada, September 19-22, Québec City, Québec. 2004.

WANG, G. C. THOMPSON, R. Slag Use in Highway Construction – the Philosophy and Technology of its Utilization. International Journal of Pavement Research and Technology, Vol 4. Mar. 2011.

WANG, G. WANG, Y., GAOB, Z. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. Journal of Hazardous Materials. Volume 184, Issues 1–3, 15 December 2010, Pages 555-560.

WESSELING, D. H. Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 143p, 2005.

APÊNDICE I

ENSAIOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL



LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO
FACULDADE DE ENGENHARIA - UFJF



INTERESSADO:	Jéssika Cosme
MATERIAL:	Concreto asfáltico
ORIGEM:	Moldado na UFOP
DATA:	05/10/2018

MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Norma DNIT 135/2017 - ME

CP N°	CP N° Laboratório	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Módulo de Resiliência (Mpa)	Módulo de Resiliência Médio (Mpa)
CP 01	2000	6,34	10,19	6274	5835
CP 02	2001	6,31	10,19	6096	
CP 03	2002	6,33	10,18	5134	

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Norma DNIT 136/2017 - ME

CP N°	CP N° Laboratório	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Resistência à Tração (Mpa)	Resistência à Tração Médio (Mpa)
CP 01	2000	6,34	10,19	1,55	1,62
CP 02	2001	6,31	10,19	1,65	
CP 03	2002	6,33	10,18	1,65	

OBS.: Os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral foram realizados após o ensaio de Módulo de Resiliência

Responsável : Prof. Geraldo Luciano de Oliveira Marques :

APÊNDICE II

ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\FAD06.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: CP06	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente médio: 5835 MPa	Interess.: Jéssika Cosme	Est/Km: -
Tensão de tração estática Máxima: 1.62 MPa		Data: 06/10/2018
Origem: Mestrado UFOP	Rodovia: -	Trecho: UFV
Observações:		

TABELA DE RESULTADOS

Num. C.P.	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	N.T (%)	Força (Kgf)	D.E.R.	Dif.Tensões (MPa)	Número de Aplicações
2003	6.34	10.19	15	251.46	0.0000416	0.970	24088
2004	6.35	10.17	30	502.72	0.0000833	1.940	1727
2005	6.38	10.17	40	673.46	0.0001111	2.590	902

RELATÓRIO DE ENSAIO DE FADIGA

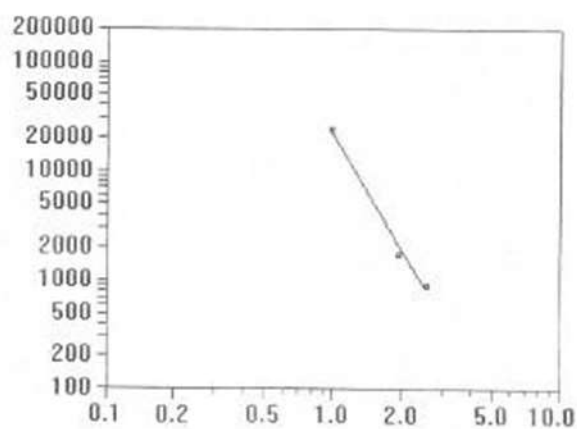
Nome do Arquivo: C:\dados\Jessika\FAD06.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: CP06	Temperatura: 25 °C	Operador: Vitor
Módulo resiliente médio: 5835 MPa	Interess.: Jéssika Cosme	Est/Km: -
Tensão de tração estática Máxima: 1.62 MPa		Data: 06/10/2018
Origem: Mestrado UFOP	Rodovia: -	Trecho: UFV
Observações:		

RESULTADOS

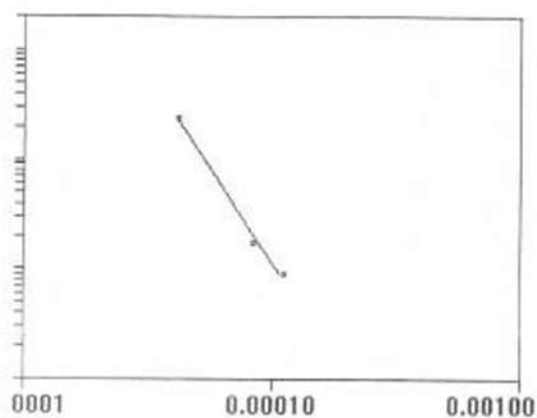
Diferença de Tensões x Vida de Fadiga



$$Y = 20459.2 X^{-3.4285}$$

$$R^2 = 0.9895$$

Def. Especifica Resiliente x Vida de Fadiga



$$Y = 2.1E-011 X^{-3.4326}$$

$$R^2 = 0.9897$$

APÊNDICE III

ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

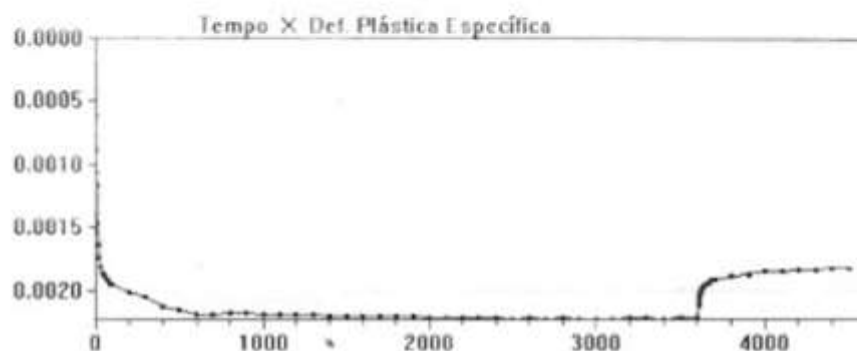
RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2194.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 2	Origem: Mestrado UFV	C.P. No: 2194
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Vitor	Interess: Jéssika Cosme	Data: 08/01/2019
Diâmetro C.P. (cm): 10.16	Temperatura: 40 °C	Altura C.P. (cm): 6.32
força(Kgf): 81.07	Pr Apl. (Kg/cm2): 1.000	Altura Ref. (cm): 4.6
Observações:		

RESULTADOS



Tempo Final: 4500 segundos.

Def. Plástica Máxima: 0.10199 mm.

Def. Plástica Específica Máxima: 0.0022299

Def. Plástica Final: 0.08399 mm.

Def. Plástica Específica Final: 0.0018230

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\UE2194.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 2	Origem: Mestrado UFV	C.P. No.: 2194
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Vitor	Interess.: Jéssika Cosme	Data: 08/01/2019
Diâmetro C.P. (cm): 10.16	Temperatura: 40.0°C	Altura C.P. (cm): 6.32
força(Kgf): 81.07	Pr.Apl.(Kg/cm ²): 1.000	Altura Ref.(cm): 4.6
Observações:		

TABELA DE RESULTADOS

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def.Pl.Espec.
1	-0.002	-0.000049
2	0.028	0.000608
3	0.041	0.000900
4	0.049	0.001065
5	0.054	0.001167
10	0.067	0.001464
15	0.075	0.001838
20	0.079	0.001730
30	0.083	0.001810
40	0.085	0.001857
50	0.086	0.001874
60	0.087	0.001890
70	0.088	0.001911
80	0.089	0.001928
90	0.089	0.001946
100	0.090	0.001956
200	0.093	0.002016
300	0.094	0.002058
400	0.098	0.002132
500	0.099	0.002149
600	0.100	0.002186
700	0.101	0.002192
800	0.100	0.002183
900	0.100	0.002185
1000	0.101	0.002191
1100	0.101	0.002195

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2194.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 2

TABELA DE RESULTADOS (Continuação)

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def. Pl. Espec.
1200	0.101	0.002192
1300	0.101	0.002196
1400	0.101	0.002202
1500	0.101	0.002200
1600	0.101	0.002205
1700	0.101	0.002206
1800	0.101	0.002201
1900	0.101	0.002202
2000	0.102	0.002215
2100	0.102	0.002218
2200	0.102	0.002217
2300	0.102	0.002217
2400	0.102	0.002218
2500	0.102	0.002225
2600	0.102	0.002223
2700	0.102	0.002224
2800	0.102	0.002221
2900	0.102	0.002229
3000	0.102	0.002224
3100	0.102	0.002229
3200	0.102	0.002218
3300	0.102	0.002219
3400	0.102	0.002230
3500	0.102	0.002219
3600	0.102	0.002221
3601	0.097	0.002122
3602	0.096	0.002096
3603	0.095	0.002080
3604	0.095	0.002069
3605	0.095	0.002061
3606	0.094	0.002053
3607	0.094	0.002047
3608	0.094	0.002041
3609	0.093	0.002035
3610	0.093	0.002030
3611	0.093	0.002026

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2194.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 2

TABELA DE RESULTADOS (Continuação)

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def.PI.Espec.
3612	0.093	0.002020
3613	0.093	0.002015
3614	0.092	0.002010
3615	0.092	0.002006
3616	0.092	0.002001
3617	0.092	0.001999
3618	0.092	0.001996
3619	0.092	0.001993
3620	0.091	0.001990
3620	0.091	0.001988
3622	0.091	0.001985
3623	0.091	0.001983
3624	0.091	0.001980
3624	0.091	0.001979
3626	0.091	0.001976
3626	0.091	0.001975
3628	0.091	0.001973
3629	0.091	0.001972
3630	0.090	0.001969
3640	0.090	0.001956
3650	0.089	0.001945
3660	0.089	0.001935
3670	0.088	0.001926
3680	0.088	0.001919
3690	0.088	0.001914
3700	0.088	0.001911
3800	0.086	0.001884
3900	0.086	0.001872
4000	0.085	0.001854
4100	0.085	0.001847
4200	0.084	0.001839
4300	0.084	0.001835
4400	0.084	0.001826
4500	0.084	0.001823

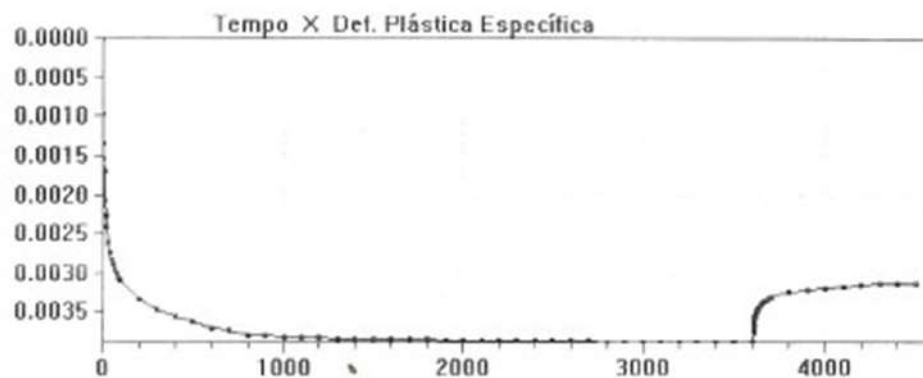
RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2196.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 4	Origem: Mestrado UFV	C.P. No.: 2196
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Vitor	Interess.: Jessika Cosme	Data: 08/01/2019
Diâmetro C.P.(cm): 10.16	Temperatura: 40 °C	Altura C.P.(cm): 6.37
força(Kgf): 81.07	Pr.Apl.(Kgf/cm2): 1.000	Altura Ref.(cm): 4.6
Observações:		

RESULTADOS



Tempo Final: 4500 segundos

Def. Plástica Máxima: 0.17800 mm

Def. Plástica Específica Máxima: 0.0038880

Def. Plástica Final: 0.14300 mm

Def. Plástica Específica Final: 0.0031260

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2196.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 4	Origem: Mestrado UFV	C.P. No.: 2196
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Vitor	Interess: Jéssika Cosme	Data: 08/01/2019
Diâmetro C.P.(cm): 10.16	Temperatura: 40 °C	Altura C.P.(cm): 6.37
força(Kgf): 81.07	Pr.Apl.(Kgf/cm ²): 1.000	Altura Ref.(cm): 4.6
Observações		

TABELA DE RESULTADOS

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def. Pl. Espec.
1	-0.000	-0.000009
2	0.045	0.000977
3	0.061	0.001338
4	0.071	0.001546
5	0.078	0.001696
10	0.095	0.002072
15	0.105	0.002277
20	0.111	0.002416
30	0.119	0.002601
40	0.125	0.002729
50	0.130	0.002826
60	0.133	0.002901
70	0.136	0.002964
80	0.138	0.003014
90	0.140	0.003061
100	0.142	0.003092
200	0.153	0.003341
300	0.159	0.003470
400	0.163	0.003547
500	0.166	0.003630
600	0.170	0.003717
700	0.171	0.003733
800	0.174	0.003795
900	0.175	0.003810
1000	0.175	0.003820
1100	0.175	0.003823

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2196.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 4

TABELA DE RESULTADOS (Continuação)

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def. Pl. Espec.
1200	0.175	0.003829
1300	0.176	0.003833
1400	0.176	0.003838
1500	0.176	0.003843
1600	0.176	0.003844
1700	0.176	0.003848
1800	0.176	0.003851
1900	0.177	0.003856
2000	0.177	0.003862
2100	0.177	0.003863
2200	0.177	0.003866
2300	0.177	0.003868
2400	0.177	0.003869
2500	0.177	0.003872
2600	0.178	0.003874
2700	0.178	0.003874
2800	0.178	0.003880
2900	0.178	0.003881
3000	0.178	0.003880
3100	0.178	0.003882
3200	0.178	0.003885
3300	0.178	0.003885
3400	0.178	0.003885
3500	0.178	0.003888
3600	0.178	0.003887
3601	0.172	0.003757
3602	0.170	0.003707
3603	0.168	0.003675
3604	0.167	0.003650
3605	0.166	0.003630
3606	0.166	0.003613
3607	0.165	0.003598
3608	0.164	0.003585
3609	0.164	0.003574
3610	0.163	0.003563
3611	0.163	0.003553

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2196.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 4

TABELA DE RESULTADOS (Continuação)

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def. Pl. Espec
3612	0.162	0.003544
3613	0.162	0.003536
3614	0.162	0.003528
3615	0.161	0.003520
3616	0.161	0.003514
3617	0.161	0.003507
3618	0.160	0.003501
3619	0.160	0.003494
3620	0.160	0.003488
3621	0.160	0.003482
3622	0.159	0.003477
3623	0.159	0.003471
3624	0.159	0.003467
3625	0.159	0.003462
3626	0.158	0.003457
3627	0.158	0.003453
3628	0.158	0.003449
3629	0.158	0.003445
3630	0.158	0.003441
3640	0.156	0.003409
3650	0.155	0.003385
3660	0.154	0.003364
3670	0.154	0.003348
3680	0.153	0.003338
3690	0.152	0.003324
3700	0.152	0.003313
3800	0.149	0.003254
3900	0.147	0.003216
4000	0.146	0.003195
4100	0.146	0.003177
4200	0.145	0.003162
4300	0.144	0.003146
4400	0.144	0.003135
4500	0.143	0.003126

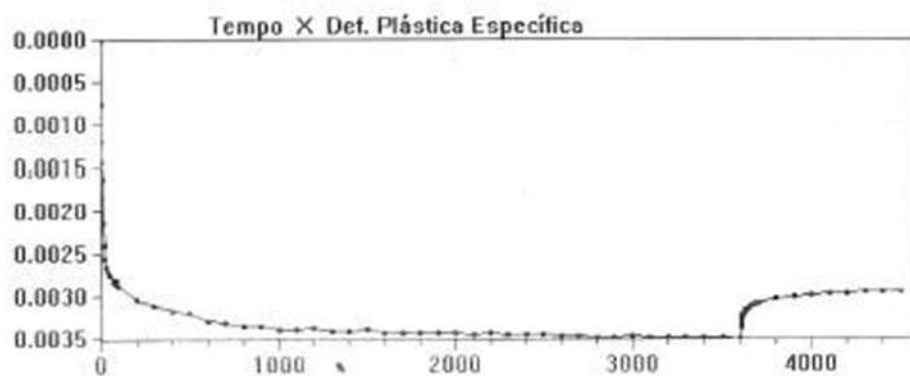
RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jéssika\CE2197.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 5	Origem: Mestrado UFV	C.P. No.: 2197
Rodovia:	ITR050:	ES/KIII
Operador: Vitor	Interess.: Jéssika Cosme	Data: 08/01/2019
Diâmetro C.P.(cm): 10.16	Temperatura: 40 °C	Altura C.P.(cm): 6.32
força(Kgf): 81.07	Pr Apl (Kg/cm ²): 1.000	Altura Rét (cm): 4.6
Observações:		

RESULTADOS



Tempo Final: 4000 segundos

Def. Plástica Máxima: 0.16099 mm

Def. Plástica Específica Máxima: 0.0035109

Def. Plástica Final: 0.13500 mm

Def. Plástica Específica Final: 0.0029430

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2197.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 5	Origem: Mestrado UFV	C.P. No.: 2197
Rodovia:	Trecho:	Est/Km:
Operador: Vitor	Interess.: Jéssika Cosme	Data: 08/01/2019
Diâmetro C.P. (cm): 10.16	Temperatura: 40 °C	Altura C.P. (cm): 6.32
força(Kgf): 81.07	Pr.Apl.(Kgf/cm2): 1.000	Altura Ref.(cm): 4.6
Observações:		

TABELA DE RESULTADOS

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def. Pl. Espec.
1	-0.000	-0.000007
2	0.035	0.000753
3	0.055	0.001189
4	0.066	0.001438
5	0.075	0.001625
10	0.098	0.002143
15	0.110	0.002394
20	0.117	0.002545
30	0.122	0.002655
40	0.124	0.002714
50	0.126	0.002752
60	0.128	0.002789
70	0.129	0.002817
80	0.130	0.002838
90	0.131	0.002856
100	0.132	0.002874
200	0.139	0.003025
300	0.143	0.003116
400	0.145	0.003169
500	0.147	0.003201
600	0.151	0.003283
700	0.152	0.003308
800	0.154	0.003355
900	0.154	0.003356
1000	0.155	0.003386
1100	0.155	0.003389

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\Jessika\CE2197.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 5

TABELA DE RESULTADOS (Continuação)

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def Pl.Espec.
1200	0.155	0.003379
1300	0.156	0.003405
1400	0.156	0.003402
1500	0.156	0.003394
1600	0.157	0.003425
1700	0.157	0.003426
1800	0.157	0.003422
1900	0.157	0.003434
2000	0.158	0.003441
2100	0.158	0.003444
2200	0.158	0.003440
2300	0.158	0.003451
2400	0.158	0.003448
2500	0.158	0.003449
2600	0.159	0.003463
2700	0.159	0.003474
2800	0.160	0.003484
2900	0.160	0.003485
3000	0.159	0.003479
3100	0.160	0.003482
3200	0.160	0.003498
3300	0.160	0.003496
3400	0.160	0.003486
3500	0.160	0.003492
3600	0.161	0.003511
3601	0.154	0.003366
3602	0.153	0.003334
3603	0.152	0.003313
3604	0.151	0.003296
3605	0.151	0.003285
3606	0.150	0.003273
3607	0.150	0.003263
3608	0.149	0.003255
3609	0.149	0.003248
3610	0.149	0.003240
3611	0.148	0.003235

RELATÓRIO DE ENSAIO DE CREEP ESTÁTICO

Nome do Arquivo: C:\dados\jessika\CE2197.dat

DADOS DO ENSAIO

Amostra: 5

TABELA DE RESULTADOS (Continuação)

Tempo (seg.)	Def. Plástica (mm)	Def. Pl. Espec.
3612	0.148	0.003228
3613	0.148	0.003224
3614	0.148	0.003220
3615	0.148	0.003217
3616	0.147	0.003214
3617	0.147	0.003210
3618	0.147	0.003207
3619	0.147	0.003204
3620	0.147	0.003199
3621	0.147	0.003195
3622	0.146	0.003191
3623	0.146	0.003188
3624	0.146	0.003184
3625	0.146	0.003182
3626	0.146	0.003181
3627	0.146	0.003178
3628	0.146	0.003177
3629	0.146	0.003174
3630	0.145	0.003171
3640	0.144	0.003151
3650	0.144	0.003135
3660	0.143	0.003121
3670	0.143	0.003108
3680	0.142	0.003097
3690	0.142	0.003091
3700	0.141	0.003084
3800	0.139	0.003037
3900	0.138	0.003007
4000	0.137	0.002994
4100	0.137	0.002979
4200	0.136	0.002967
4300	0.136	0.002955
4400	0.135	0.002948
4500	0.135	0.002943

Jéssika Cosme
Daniel Pinto Fernandes
Gilberto Fernandes

APLICAÇÃO DA ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL EM CONCRETO ASFALTICO: ASPECTOS TÉCNICOS, AMBIENTAIS E DE DESEMPENHO



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)



EDITORA CONHECIMENTO LIVRE