

Francisco das Chagas da Costa Filho

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS
ORIUNDOS DO BENEFICIAMENTO DE SCHEELITA NA
COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS**

Natal - RN

2017

Francisco das Chagas da Costa Filho

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS
ORIUNDOS DO BENEFICIAMENTO DE SCHEELITA NA
COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria del Pilar Durante Ingunza
Co-orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim

Natal - RN

2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Sistema de Bibliotecas – SISBI
Catalogação da Publicação na Fonte - Biblioteca Central Zila Mamede

Costa Filho, Francisco das Chagas da.

Estudo de viabilidade técnica do uso de resíduos oriundos do beneficiamento de scheelita na composição de concretos asfálticos / Francisco das Chagas da Costa Filho. - 2017.

148 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Maria del Pilar Durante Ingunza.

Coorientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim.

1. Scheelita – Resíduos - Dissertação. 2. Resíduos de mineração - Dissertação. 3. Pavimentos - Dissertação. 4. Concreto asfáltico - Dissertação. 5. Mina Brejuí (RN) - Dissertação. I. Ingunza, Maria del Pilar Durante. II. Amorim, Enio Fernandes. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.012.45

FRANCISCO DAS CHAGAS DA COSTA FILHO

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS
ORIUNDOS DO BENEFICIAMENTO DE SCHEELITA NA
COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria del Pilar Durante Ingunza – Orientadora (UFRN)

Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim - Co-orientador (IFRN)

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior - Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Luís Fernando Martins Ribeiro - Examinador Externo (UNB)

Natal, 03 de fevereiro de 2017.

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS ORIUNDOS DO BENEFICIAMENTO DE SCHEELITA NA COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS

Francisco das Chagas da Costa Filho

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria del Pilar Durante Ingunza
Co-orientador: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim

RESUMO

A produção mineral brasileira é uma atividade de suma importância para a economia do país, visto que além de contribuir para o produto interno bruto - PIB, é responsável pela geração de muitos empregos diretos e indiretos. Neste cenário, a mineração Tomaz Salustino S/A (Mina Brejuí) é uma grande representante nordestina deste setor. Dados de 2012 demonstram que a produção da Mina Brejuí era em torno de 20 toneladas mensais (MACHADO 2012), representando mais de 300 empregos gerados, além do desenvolvimento do município de Currais Novos, onde a empresa está situada. Entretanto, devido ao beneficiamento do minério (scheelita), desde 1943, foram geradas toneladas de resíduos, e, atualmente, estima-se que no entorno da mineração existe cerca de 7 milhões de toneladas (4,5 milhões de fração grossa e 2,5 milhões de fração fina), dispostos em pilhas e bacias de resíduos, gerando diversos impactos ambientais, como a modificação da paisagem local. Em vista deste grande estoque de resíduo, aliado a necessidade de extração de matéria prima natural para compor as camadas usuais de um pavimento, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica dos resíduos provenientes da Mina Brejuí na composição de concretos asfálticos, em substituição ao agregado miúdo natural, pela fração grossa do resíduo, e, do fíler convencional, pela fração fina do resíduo. Para isto, realizaram-se ensaios de caracterização física, química e mineralógica das frações do resíduo e dos agregados naturais utilizados na pesquisa, além de dosagens Marshall em

composições de concretos asfálticos para analisar os parâmetros volumétricos e a estabilidade dos materiais quanto a utilização em obras viárias. A partir do programa experimental proposto, pode-se verificar que a fração grossa do resíduo do beneficiamento da scheelita apresentou um potencial elevado para ser utilizado *in natura* como agregado miúdo, pois os corpos de prova analisados demonstraram bom desempenho com relação aos parâmetros volumétricos e a estabilidade Marshall. A fração fina também se mostrou viável para ser utilizada como filer artificial, porém, para tal aplicação, se faz necessário processos de melhoramento de qualidade para que a fração do resíduo se enquadre como material de enchimento de misturas asfálticas, visto que *in natura*, a mesma não apresentou os 65% de material passante na peneira de 0,075 mm requisitado pela norma DNER - EM 367/97 (DNER, 1997a).

Palavras-chave: Resíduos de Mineração. Scheelita. Pavimentos. Concreto Asfáltico. Mina Brejuí.

TECHNICAL FEASIBILITY STUDY OF USING WASTE FROM SCHEELITE PROCESSING IN COMPOSITION OF ASPHALTIC CONCRETES

Francisco das Chagas da Costa Filho

Adviser: Prof. Dr^a. Maria del Pilar Durante Ingunza
Co-adviser: Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim

ABSTRACT

The Brazilian mineral production is an extremely important activity for the country's economy, since in addition to contributing to gross national product - PIB, it is responsible for the generation of many direct and indirect jobs. Therefore, the Tomaz Salustino Corporation Mining (Brejuí Mine) is a important northeastern representative of this sector. Data for 2012 show that the production of the Brejuí Mine was around 20 tons per month (MACHADO 2012), representing more than 300 jobs generated, in addition to the development of the municipality of Currais Novos. However, due to the ore (scheelite) processing, since 1943, tons of waste have been generated, and it is currently estimated around 7 million tons (4.5 million thick fractions and 2.5 million fine fractions), disposed in piles and waste basins, generating several environmental impacts, such as the modification of the local landscape. Due of this large stock of waste, jointly with the need for extraction of natural raw material to compose the usual layers of a pavement, the present study evaluated the technical feasibility of the residues from the Brejuí Mine in the composition of asphaltic concretes, replacing the natural small aggregate by the thick fractions of the residue, and the conventional filler by the fine fractions of the residue. For this, chemical and mineralogical characterization of fractions of the residue and of the natural aggregates used in the research, besides Marshall dosages in compositions of asphaltic concretes was

carried out to analyze the volumetric parameters and the stability of the materials as for the use in road works. From the proposed experimental program, it can be verified that the thick fractions of the scheelite processing residue presented a high potential to be used in natura as a small aggregate, because the analyzed specimens showed good performance in relation to the volumetric parameters and the Marshall stability. The fine fraction has also proved feasible to be used as an artificial filler, however, for this application, it is necessary to improve the quality for that the fraction of the residue fits as asphalt mixtures filling material since, in natura, it did not present the 65% passing material in the 0.075 mm sieve required by DNER - EM 367/97 (DNER, 1997a).

Key-words: Mining Wastes. Scheelite. Floors. Asphaltic concrete. Brejuí Mine.

Aos meus pais que sempre me apoiaram na busca dos meus sonhos e sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, coragem, sabedoria, paciência e fé para concretizar esse sonho;

Aos meus pais, por todo apoio e incentivo, por sempre estarem do meu lado, me apoiando nas minhas decisões e acreditando que sou capaz de conseguir tudo que almejo, escrevendo a minha própria história. Por serem os mediadores financeiros, mesmo nos períodos em que tudo e todos diziam que nada daria certo. Aos senhores, que me deram o maior bem que eu poderia ter recebido, o conhecimento, a sabedoria, e o gosto pela área acadêmica. A vós, o meu eterno agradecimento e admiração;

A toda minha família, em especial as minhas irmãs Fernanda e Fabiana Costa, pelo apoio e incentivo, por tentarem me ajudar de todas as formas possíveis, e pelas as vezes que entoaram as seguintes palavras: “vai dar tudo certo...”. A vocês minha gratidão e meu carinho;

A Madson Freitas e a Mauriceia Medeiros, que além de amigos, são irmãos que Deus em sua imensa bondade colocou em meu caminho. A vocês eu agradeço de todo o coração, pelas vezes em que estiveram do meu lado, pelo apoio e palavras de incentivo para que eu seguisse em busca dos meus objetivos; por estenderem as mãos em diversas formas; pelos conselhos, e por aturar os meus devaneios em horas difíceis. A vocês a minha eterna amizade e companheirismo;

A todos os meus amigos, em especial a Adriana Sales, Lucas Pinheiro, Márcia Aratusa, Alcio Farias, Jackson Fernandes, Thales Henrique, Cristiane Nascimento, Hudson Toscano, Savanna Cristina, Rudna Angélica, Estevan Serafim, Renata Ádila, Ana Paula Caldas, Solange Dombroski, Andréia Santos, Paulo Nobrega, Daniel Luna, Anne Medeiros e Letícia Furtado, que contribuíram de forma particular com sua amizade, apoio e companheirismo;

Aos Mestres, que me auxiliaram na construção do conhecimento científico necessário para o desenvolvimento do curso e para minha futura vida como docente;

Aos meus colegas de mestrado, Ivanildo Silva e Túlio Costa, por contribuírem na construção do conhecimento científico e pela amizade a mim ofertada;

A Prof.^a Dr.^a Maria del Pilar Durante Ingunza, por aceitar a me orientar e me deixar em ótimas mãos, durante o seu ano sabático;

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Enio Fernandes Amorim, por aceitar a orientação do projeto de dissertação, mesmo não sendo da instituição. Pela amizade, companheirismo, incentivo, paciência e dedicação que foram a mim ofertado durante o período de desenvolvimento da pesquisa. Por acreditar que eu seria capaz e confiar que eu chegaria a concluir esta etapa da minha vida acadêmica com êxito. Por todo o conhecimento transferido, e principalmente pela humildade que demonstrou durante a orientação, esclarecendo dúvidas e me conduzindo ao caminho certo;

A Rafaella Xavier, pela amizade, paciência, conselhos e todos os serviços prestados enquanto ocupava o cargo de assistente administrativo do programa de pós-graduação em Engenharia Civil;

A Viviane Sena, pela disponibilidade e prestação de serviço como assistente administrativa do programa de pós-graduação em Engenharia Civil;

A Deborah Paiva, João Júnior Souza, Abraão Menezes e Rafael Medeiros, pela amizade, companheirismo, dedicação, e pela imensa contribuição na pesquisa. A vocês dedico cada linha deste trabalho, pois sem vocês eu não teria conseguido concluir o cronograma proposto. Meus sinceros agradecimentos, obrigado!

A Mineração Tomaz Salustino S/A e ao Britador Caicó, pelo fornecimento dos materiais para a realização desta pesquisa;

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Campus Natal Central, pelos materiais e laboratórios fornecidos para a realização dos ensaios necessários para a concretização da pesquisa;

A Pró-reitoria de Assuntos Estudantis da UFRN, pelo ótimo atendimento ofertado pelos servidores da instituição e pelo auxílio fornecido durante o desenvolvimento do curso de Mestrado, visto que foi essencial para minha permanência no município de Natal e para a execução do meu projeto de dissertação;

A banca de qualificação e defesa, pela disponibilidade e contribuições que deram ao meu trabalho.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xviii
Lista de Equações.....	xx
Lista de Siglas e Abreviaturas.....	xxi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos da pesquisa.....	3
1.1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1 O contexto atual da Mineração Brasileira.....	5
2.1.1 A mineração no Nordeste Brasileiro.....	11
2.1.2 A mineração do Rio Grande do Norte.....	16
2.1.3 Mineração Tomaz Salustino S/A - MINA BREJUÍ.....	18
2.1.3.1 A scheelita e seu beneficiamento.....	20
2.1.4 Mineração: geração de resíduos e impactos ambientais.....	28
2.2 Pavimentação e misturas asfálticas.....	34
2.2.1 Estrutura dos pavimentos flexíveis.....	37
2.2.1.1 Revestimento.....	38
2.2.1.2 Subleito.....	39
2.2.1.3 Reforço de subleito.....	39
2.2.1.4 Bases e sub-bases.....	40
2.2.2 Tipos de revestimentos.....	40
2.2.2.1 Revestimentos Betuminosos.....	41
2.2.2.2 Revestimento por calçamento.....	42
2.2.3 Concreto asfáltico e suas propriedades.....	43

2.2.4	Aplicação de resíduos na construção civil	48
2.2.4.1	Estudos Nacionais e Internacionais.....	48
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....		63
3.1	Procedimentos experimentais.....	66
3.1.1	Ensaio de caracterização física dos agregados.....	71
3.1.2	Ensaio de caracterização química, térmica e mineralógica dos agregados.....	73
3.1.3	Ensaio de caracterização física do material asfáltico.....	76
3.1.4	Ensaio com a mistura asfáltica	79
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES		88
4.1	Resultados da caracterização das frações do resíduo	88
4.2	Resultados da caracterização dos agregados naturais	97
4.3	Resultados da caracterização do material asfáltico	108
4.4	Resultados dos estudos das misturas asfálticas.....	109
4.4.1	Estabilidade Marshall.....	110
4.4.2	Volume de Vazios.....	114
4.4.3	Relação betume/vazios	116
4.4.4	Massa específica aparente da mistura compactada - Gmb.....	119
4.4.5	Estabilidade x %Vv	121
4.4.6	Estabilidade x %RBV.....	124
4.4.7	Relações entre estabilidades máximas e %CAP, %Vv e %RBV	127
4.4.8	Retrospectiva dos resultados, dosagens ótimas e fluência Marshall.....	129
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		137
5.1	Conclusões e Considerações Finais.....	137
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	141
Referências Bibliográficas		143

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição das minas brasileiras por tamanho (produção anual).....	9
Figura 2.2 - Evolução da participação (%) das exportações brasileiras por categoria de uso	9
Figura 2.3 - Evolução da participação (%) das importações brasileiras por categoria de uso.	10
Figura 2.4 - Composição das exportações dos bens minerais primários	10
Figura 2.5 - Composição das exportações dos outros países correspondentes a 59,75% dos produtos minerais brasileiros.....	11
Figura 2.6 - Localização do Estado do Rio Grande do Norte no mapa do Brasil	16
Figura 2.7 - Localização do município de Currais Novos no Rio Grande do Norte ...	18
Figura 2.8 - Instalações da Mina Brejuí: (a) Museu; (b) Entrada da Mina Brejuí.....	19
Figura 2.9 - Vista do entorno da Mineração Tomaz Salustino S/A.....	20
Figura 2.10 - Fluxograma simplificado da Mineração Acauã (Mina Barra Verde)	22
Figura 2.11 - Fluxograma de beneficiamento da Mina Brejuí	23
Figura 2.12 - Fluxograma de beneficiamento da Mina Bodó.....	23
Figura 2.13 - Fluxograma da Mina Brejuí atualizado.....	24
Figura 2.14 - Equipamento da Mina Brejuí. (a) Grelha; (b) Britador	24
Figura 2.15 - Silos da Mina Brejuí. (a) Silo Azul; (b) Silo Amarelo.	25
Figura 2.16 - Equipamentos do beneficiamento da Mina Brejuí. (a) Moinho de martelos; (b) Vista externa do jigüe.....	25
Figura 2.17 - Beneficiamento: (a) mesas; (b) separação das frações.....	26
Figura 2.18 - Espaçador da Mina Brejuí.....	27
Figura 2.19 - Produtos do beneficiamento da Scheelita na mina Brejuí. (a): Scheelita queimada (GERAB, 2014); (b) Pilha de rejeito - fração grossa (AUTORIA PRÓPRIA, 2015)	28

Figura 2.20 - Área impactada (a) imediatamente à jusante da barragem de Santarém. Barragem de Fundão após o rompimento; (b) Rio Doce no município de Baixo Guandu/ES.....	30
Figura 2.21 - Áreas impactadas: (a) Distrito de Bento Rodrigues após o desastre; (b) Barra longa após o desastre	30
Figura 2.22 - Os estudos de casos dos impactos da extração mineral no Brasil, classificados pelas diferentes regiões.....	31
Figura 2.23 - Corte longitudinal de um pavimento Concreto-cimento.....	36
Figura 2.24 - Corte transversal de um pavimento asfáltico	36
Figura 2.25 - Constituição da estrutura de um pavimento asfálticos	37
Figura 2.26 - Classificação dos revestimentos flexíveis	41
Figura 2.27 - Correlação entre a curva granulométrica do agregado britado e a faixa granulométrica de mistura C (DNIT 031/2006 - ES).....	54
Figura 2.28 - Correlação entre a curva granulométrica do agregado reciclado e a faixa granulométrica de mistura C	55
Figura 2.29 - Curva granulométrica das misturas.....	56
Figura 2.30 - Resultados dos testes de Estabilidade Marshall.....	58
Figura 2.31 - Curvas de tensão-deformação das misturas asfálticas.....	61
Figura 3.1 - Deposito de resíduo: (a) Fração grossa; (b) Fração fina.....	64
Figura 3.2 - Materiais de pesquisa depositado no laboratório de pavimentação do IFRN, Campus Natal Central: (a) brita 1; (b) pó de pedra; (c) resíduo - fração grossa; (d) areia; (e) brita 0; (f) resíduo - fração fina; (g) cimento Portland CP IV.	65
Figura 3.3 - Resumo das análises das pesquisas por etapa.....	66
Figura 3.4 - Densidade real dos grãos: (a) fração fina do resíduo (b) brita 1	71
Figura 3.5 - Análise granulométrica: (a) Fração grossa do resíduo; (b) Fração fina do resíduo	72
Figura 3.6 - Ensaio: (a) Abrasão <i>Los Angeles</i> ; (b) Índice de forma	72

Figura 3.7 - Difratorômetro BRUKER, D2 PHASER do laboratório LAMMEN: (a) equipamento Bruker; (b) Tudo de Raio X e detector interno; (c) Porta amostra.....	73
Figura 3.8 - Equipamento EDX 720/800HS: (a) Equipamento; (b) abertura para a inserção da amostra; (c) porta amostra e filme de polipropileno.....	74
Figura 3.9 - Equipamentos utilizados para a realização do ensaio de MEV e EDS: (a) <i>Hitachi Tabletop Microscope TM-3000</i> ; (b) suporte com fita de carbono e amostras ensaiadas; (c) <i>Swift ED3000</i> fabricado pela <i>Oxford Instruments</i>	75
Figura 3.10 - Equipamentos utilizados a análise de termogravimetria	76
Figura 3.11 - Ensaio de ponto de amolecimento: (a) preparação; (b) Momento em que as esferas tocam o suporte	76
Figura 3.12 - Ensaio de Ponto de Fulgor.....	77
Figura 3.13 - Viscosímetro <i>Saybolt-Furol</i>	78
Figura 3.14 - Ensaio de Densidade de ligante asfáltico: (a) Picnômetros com água; (b) Picnômetros com CAP	78
Figura 3.15 - Enquadramentos dos traços de CBUQ com agregados naturais.....	81
Figura 3.16 - Enquadramentos dos traços de CBUQ com agregado artificial	81
Figura 3.17 - Enquadramentos dos traços de CBUQ com o fíler artificial	82
Figura 3.18 - Materiais para execução de corpos de provas de CBUQ: (a) - separação; (b) - capsulas com material em estufa a 177° C.....	83
Figura 3.19 - Preparação para mistura: (a) pesagem pós estufa; (b) inserção do CAP aos componentes da mistura	83
Figura 3.20 - Realização mistura betuminosa: (a) agregados e ligante ao fogo; (b) mistura betuminosa completa.....	84
Figura 3.21 - Preparação do corpo de prova: (a) mistura de agregados e ligante no corpo de prova; (b) inserção do papel filtro; (c) compactação do corpo de prova	84
Figura 3.22 - Corpo de prova de CBUQ: (a) corpo de prova nomeado; (b) extração do protótipo de CBUQ; (c) aferição das espessuras	85
Figura 3.23 - Aferição das massas do protótipo: (a) massa seca; (b) massa com parafina; (c) massa hidrostática	85

Figura 3.24 - Corpos de prova de CBUQ em banho d'água a 60 ± 1 °C	86
Figura 3.25 - Rompimento do corpo-de-prova na Prensa Marshall Elétrica.....	86
Figura 3.26 - Corpos de provas de concreto asfáltico produzido na pesquisa: (a) vista frontal; (b) vista superior.....	87
Figura 4.1 - Análise granulométrica da fração grossa do resíduo	88
Figura 4.2 - Análise granulométrica da fração fina do resíduo	89
Figura 4.3 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) fração grossa do resíduo x120; (b) fração grossa do resíduo x1.0k.....	90
Figura 4.4 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) fração fina do resíduo x120; (b) fração fina do resíduo x500	91
Figura 4.5 - Difração de Raio-X: fração grossa do resíduo	94
Figura 4.6 - Difração de Raio-X: fração fina do resíduo	95
Figura 4.7 - Análise térmica da fração grossa do resíduo	96
Figura 4.8 - Análise térmica da fração fina do resíduo	96
Figura 4.9 - Análise granulométrica da areia natural.....	97
Figura 4.10 - Análise granulométrica das areias natural e artificial	98
Figura 4.11 - Análises granulométricas do pó de pedra original e combinado	99
Figura 4.12 - Análises granulométricas da brita 0	100
Figura 4.13 - Análises granulométricas da brita 1	100
Figura 4.14 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) areia natura x120; (b) areia natural x1,0k.....	102
Figura 4.15 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) pó de pedra original x120; (b) pó de pedra original x1,0k	103
Figura 4.16 - Difração de Raio-X: areia natural	105
Figura 4.17 - Difração de Raio-X: pó pedra original	106
Figura 4.18 - Análise térmica da areia natural.....	107
Figura 4.19 - Análise térmica do pó de pedra original	108

Figura 4.20 - Estabilidade Marshall das dosagens com agregados naturais	110
Figura 4.21 - Curvas de estabilidade Marshall versus percentagem de CAP dos corpos de prova com a substituição da areia pela fração grossa do resíduo.....	111
Figura 4.22 - Curvas de estabilidade Marshall versus percentagem de CAP dos corpos de prova do terceiro traço.....	113
Figura 4.23 - Curvas de volume de vazios - agregados naturais	114
Figura 4.24 - Curvas de volume de vazios - com a fração grossa do resíduo.....	115
Figura 4.25 - Curvas de %Vv referentes aos terceiros traços ensaiados.....	116
Figura 4.26 - Relação betume/vazios - com agregados naturais	117
Figura 4.27 - Relação betume/vazios dos corpos de prova com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo.....	118
Figura 4.28 - Relação betume/vazios dos corpos de prova dos terceiros traços executados.....	119
Figura 4.29 - GMB dos corpos de prova com agregados naturais	120
Figura 4.30 - Gmb dos corpos de prova com a substituição do agregado miúdo pela fração grossa do resíduo.....	120
Figura 4.31 - GMB dos corpos de prova dos terceiros traços executados.....	121
Figura 4.32 - Estabilidade versus %Vv - com agregados naturais	122
Figura 4.33 - Estabilidade versus %Vv - com a fração grossa do resíduo	123
Figura 4.34 - Estabilidade versus %Vv - corpos de prova dos terceiros traços.....	124
Figura 4.35 - Estabilidade versus %RBV - com agregados naturais	125
Figura 4.36 - Estabilidade versus %RBV - com a fração grossa do resíduo	126
Figura 4.37 - Estabilidade versus %RBV - corpos de prova dos terceiros traços....	126
Figura 4.38 - Estabilidade versus %CAP	127
Figura 4.39 - Estabilidade versus %Vv.....	128
Figura 4.40 - Estabilidade versus %RBV	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais reservas minerais do Brasil e participação mundial - 2013.....	6
Tabela 2.2 - Produção beneficiada das principais substâncias minerais no Brasil.....	7
Tabela 2.3 - Ranking por substância - Produção anual em toneladas (ROM) - Ano base 2013	13
Tabela 2.4 - Ranking dos estudos de caso dos impactos humanos, socioambientais e econômicos por cada Unidade da Federação do Brasil	32
Tabela 2.5 - Principais impactos ambientais da mineração no brasil	32
Tabela 2.6 - Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico	39
Tabela 2.7 - Variáveis que afetam as propriedades das misturas asfálticas	44
Tabela 2.8 - Gradação de pó de mármore após a lavagem	58
Tabela 2.9 - Resultados - Propriedades Marshall (Adaptado).....	59
Tabela 2.10 - Composição das misturas estudadas.....	60
Tabela 2.11 - As propriedades volumétricas das misturas asfálticas	62
Tabela 3.1 - Georreferenciamento dos pontos de coleta de material	65
Tabela 3.2 - Etapas da pesquisa com seus respectivos ensaios e normas	68
Tabela 3.3 - Composição dos traços de CBUQ.....	80
Tabela 4.1 - Análise de EDS da fração grossa do resíduo.....	91
Tabela 4.2 - Análise de EDS da fração fina do resíduo.....	92
Tabela 4.3 - Fluorescência de Raio-X das frações do resíduo.....	92
Tabela 4.4 - Características físicas dos agregados utilizados na pesquisa	101
Tabela 4.5 - Análise de EDS da areia natural	103
Tabela 4.6 - Sistema de energia dispersiva da areia natural.....	104
Tabela 4.7 - Fluorescência de Raio-X da areia natural e pó de pedra original.....	104
Tabela 4.8 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo	108

Tabela 4.9 - Síntese dos resultados da quarta etapa da pesquisa: estudo da mistura asfáltica	133
Tabela 4.10 - Síntese dos resultados das estabilidades médias com agregados naturais, com a incorporação da fração grossa e a incorporação das duas frações do resíduo	135

LISTA DE EQUAÇÕES

(2.1).....	45
(2.2).....	46
(2.3).....	46
(2.4).....	47
(2.5).....	47
(2.6).....	48

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível;
- AM - Amazonas;
- AP - Amapá;
- ARC - Agregado reciclado de concreto;
- BA - Bahia
- bbl/dia - Barril dia;
- BR - Brasil;
- CAP - Cimento asfáltico de petróleo;
- CaWO₄ - Tungstato de Cálcio;
- CBUQ - Concreto betuminoso usinado à quente;
- CE - Ceará;
- DMT - Densidade máxima da mistura sem vazios;
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral;
- DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
- DRX - Difração de Raio X;
- EDS - Espectrometria de energia dispersiva;
- EM - Estabilidade Marshall;
- EME - *Enrobé a module élevé*;
- ES - Espírito Santo;
- (Fe,Mn)WO₄ - Wolframita;
- FRX - Fluorescência de Raio X;
- Gmb - Massa específica aparente da mistura compactada;
- GPS - *Global Positioning System*;
- IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração;
- IFRN - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte;
- ISC - Índice de suporte Califórnia;
- LAMMEN - Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica;

LATEL - Laboratório de Análises Térmicas e Eletroanalítica;
MA - Maranhão;
MEV - Microscopia eletrônica de varredura;
MF - Módulo de finura;
MG - Minas Gerais;
Mm³/d - Metros cúbicos diários
MT - Mato Grosso;
NBR - Norma Brasileira;
NE - Nordeste;
NM - Norma Mercosul;
PA - Pará;
PB - Paraíba;
PE - Pernambuco;
PEC - Pós-graduação em Engenharia Civil;
pH - Potencial Hidrogeniônico;
PIB - Produto interno bruto;
RBV - Relação betume/vazios;
RCS - Resistência à compressão simples;
RJ - Rio de Janeiro;
RN - Rio Grande do Norte;
RO - Roraima;
ROM - Produção anual em toneladas;
S/A - Sociedade Anônima;
SC - Santa Catarina
SE - Sergipe
SEDEC - Secretaria do Desenvolvimento Econômico;
SP - São Paulo;
SSF - Segundos *Saybolt-Furoi*;
TG - Termogravimetria;
TMN - Tamanho máximo nominal;
UF - Unidade da Federação
UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte;
UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido;

US\$ - Dólar Americano;

VAM - Vazios de agregado mineral;

Vv - Volume de Vazios;

W - Tungstênio;

WGS 84 - *World Geodetic System*.

CAPÍTULO 1

Introdução

A mineração é uma atividade de grande impacto na economia brasileira, responsável no ano de 2014 por US\$ 40 bilhões, o que representa uma parcela de 5% do PIB industrial (IBRAM, 2015). Além disso, esta atividade, torna-se indispensável para o desenvolvimento do país, pois é a responsável pela extração e beneficiamento de diversas matérias-primas que abastecem vários setores da economia, como por exemplo a construção civil.

A construção civil é uma das indústrias que mais consome recursos minerais. Um exemplo de suas aplicações é a produção de estrutura de pavimentos, que de acordo com Souza, Sousa e Kato (2015), 75% do volume e até 96% do peso de uma mistura betuminosa é ocupado por agregado mineral.

Além do grande volume de recursos naturais extraídos, tem-se a geração impactante de resíduos de mineração, pois nem todo material coletado do meio ambiente para o beneficiamento do minério é efetivamente aproveitado. Os impactos das atividades minerais se tornam mais relevantes quando não existe uma destinação adequada para os resíduos, podendo gerar contaminação do solo, da água e do ar, destruição da paisagem, entre outros. Um exemplo disso, é a extração e o beneficiamento da scheelita pela Mina Brejuí, no Rio Grande do Norte; de todo material extraído, apenas 0,8% é constituído pelo minério almejado, e 99,2% retorna ao meio ambiente como resíduos em pilhas e bacias de deposição (GERAB, 2014).

Os impactos ambientais nem sempre foram motivos de grande importância para questionamentos entre os governantes e empresários, porém com a visibilidade de suas consequências, tornou-se um dos pontos mais discutidos na atualidade, tais como os gerados em Minas Gerais e Espírito Santo pelo rompimento da barragem de rejeito do beneficiamento do minério de ferro, em novembro de 2015.

Em vista da minimização dos impactos ambientais gerados pela destinação incorreta dos resíduos e para promover a diminuição da extração de matérias-primas, estudos estão sendo realizados com o intuito de utilizar estes resíduos na composição de novos materiais e desenvolvimento de técnicas mais sustentáveis, principalmente para indústrias de grande consumo como a construção civil.

A utilização desses rejeitos, permite a prática da sustentabilidade, visto que além de produzir materiais de boa qualidade, permite a diminuição da extração de matéria-prima da natureza e propõe uma destinação correta para diversos resíduos produzidos pelos setores da economia, minimizando os impactos ambientais ocasionados pela má gestão existente.

Machado (2012) considera que o efeito prejudicial ao meio ambiente pelo processo produtivo da indústria da mineração está distribuído em toda as etapas da atividade, que se inicia com a abertura da cava, o uso de explosivo no desmonte da rocha, o transporte e finalmente o beneficiamento do minério explorado. Tais atividades contribuem para a geração de consequências para o meio ambiente, como a retirada da vegetação, movimentação de terra, modificação da paisagem, produção de poeira, ruído, emissão de gases, entre outros.

A mineração no Brasil teve diversas fases de exploração, e um exemplo muito importante para o desenvolvimento do setor foi o beneficiamento da scheelita (CaWO_4) no Seridó brasileiro, no Rio Grande do Norte e Paraíba, potencializada em decorrência da segunda guerra mundial, para posterior obtenção do metal de transição tungstênio (W), e abastecimento da indústria bélica.

Além das aplicações clássicas do tungstênio, como lâmpadas incandescentes, tubos de Raio X e superligas, Fernandes (2011) acrescenta outros usos deste metal, como componente para endurecimento na manufatura do aço de ferramentas de altas velocidades, molas e válvulas, limas e formões.

As primeiras minas de scheelita no Brasil surgiram no ano de 1942 em Santa Luzia, na Paraíba, e, posteriormente, em São João do Sabugi e Santana do Seridó, no Rio Grande do Norte (RN). Já no ano de 1943 surgiram as minas Brejuí, Barra Verde e Malhada Limpa, no município de Currais Novos, no RN. A produção em 2012 deste minério no RN chegou a 40 toneladas por mês, mas essa produção é insignificante quando comparada com os primórdios do seu beneficiamento no Estado

e também pelo fato que o RN é detentor da maior reserva brasileira de scheelita (MACHADO, 2012).

A exportação de scheelita beneficiada no nordeste do Brasil foi amplamente representada pela Mineração Tomaz Salustino S/A (Mina Brejui), e devido ao processo de exploração e beneficiamento, estima-se que há um acúmulo de cerca de 7 milhões de toneladas de resíduos, sendo de 4,5 milhões de toneladas representadas pela fração grossa e 2,5 milhões de toneladas pela fração fina, depositadas no entorno das instalações da Mineradora (GERAB, 2014).

Em vista dessa vasta produção de resíduo e pelo acúmulo já gerado, além da grande necessidade de agregados em diversos setores da economia, este estudo avaliou o potencial de aproveitamento do resíduo fino e grosso oriundos do beneficiamento da scheelita da empresa Mineração Tomaz Salustino S/A na composição de concretos asfálticos, possibilitando, assim, uma alternativa aos agregados, além dos convencionalmente utilizados, de modo a minimizar, os impactos decorrentes da má gestão dos resíduos, promovendo a preservação da flora, fauna, dos corpos d'água, do lençol freático e do solo.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aproveitamento do resíduo fino e grosso oriundos do beneficiamento da scheelita, da empresa Mineração Tomaz Salustino S/A, na composição de concretos asfálticos, possibilitando, assim, uma alternativa de viabilidade técnica empregando materiais residuais da indústria da mineração em obras de pavimentação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Propor uma destinação ambientalmente adequada aos resíduos gerados pela Mineração Tomaz Salustino S/A;
- Analisar se há efeito prejudicial para os agregados utilizados com a elevação da temperatura, visto que o concreto asfáltico é uma mistura betuminosa usinada a quente;
- Caracterizar as frações dos resíduos e os agregados naturais de forma física, química e mineralógica.

CAPÍTULO 2

Referencial Teórico

2.1 O contexto atual da Mineração Brasileira

A mineração é a atividade que extrai matéria prima do meio natural por meio de diversos processos de beneficiamento, e com isso possibilita o abastecimento de outros setores da economia, como por exemplo a construção civil. Esta atividade está diretamente relacionada com o desenvolvimento da economia do país, de acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2015), em 2014 o setor contribuiu para o PIB industrial em torno de 5,0%, representado em US\$ 40 bilhões.

Araújo, Olivieri e Fernandes (2014) consideram que o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de minério do mundo, sendo estes produtos compostos por 72 substanciais minerais (23 metálicas, 45 não-metálicas e 4 energéticas); estes valores também são citados pelo IBRAM (2015). Ainda de acordo Araújo, Olivieri e Fernandes (2014), a indústria mineradora vem crescendo de forma satisfatória desde o início do século XXI, aumentando a sua produção em 550% nos últimos 10 anos, além de uma estimativa de investimentos programados de 2012 a 2016 de US\$ 75 bilhões.

O Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (2014) apresentou as principais reservas de substâncias minerais brasileiras e as suas relevâncias em porcentagem diante das reservas mundiais, enfatizando que o Brasil é detentor de 98,2% das reservas de Nióbio lavráveis, ou seja, economicamente viáveis para serem extraídas. Além de ter a maior reserva de Nióbio do mundo, também é o maior produtor deste mesmo minério (92,8% da produção mundial) e em 2013, passou a ser o maior produtor de tântalo (29,1% da oferta mundial). A Tabela 2.1 apresenta as reservas minerais brasileiras expostas pelo DNPM.

Tabela 2.1 - Principais reservas minerais do Brasil e participação mundial - 2013

Principais Reservas Minerais do Brasil - 2013			
Substância	Unidade	Brasil	(%) Mundo
Alumínio ¹	10 ⁶ t	714	2,8
Barita ²	10 ³ t	433.00	53,3
Bentonita ¹	10 ³ t	35.704	nd
Berílio ²	t	6.000	7,0
Calcário Agrícola ¹	10 ³ t	nd	nd
Carvão Mineral ¹	10 ⁶ t	3.232	0,4
Caulim ¹	10 ⁶ t	7.068	nd
Chumbo ²	10 ³ t	163	0,1
Cobalto ²	t	77.500	1,1
Cobre ²	10 ³ t	11.145	1,6
Crisotila ¹	10 ³ t	10.167	nd
Cromo ²	10 ³ t	504	0,1
Diamente ¹	10 ⁶ ct	13,5	1,8
Diatomita ¹	10 ³ t	1.940	0,5
Estanho ²	t	441.917	10,0
Felspato ⁶	10 ⁶ t	317	nd
Ferro ¹	10 ⁶ t	23.126	13,6
Fluorita ²	10 ³ t	2.086	0,9
Fosfato ⁴	10 ³ t	315.000	0,5
Gipsita ¹	10 ³ t	291.807	nd
Grafita Natural ¹	10 ³ t	72.064	50,7
Lítio ²	10 ³ t	48	0,4
Magnesita ¹	10 ³ t	235.400	9,5
Manganês ⁶	10 ³ t	50.029	8,8
Metais do Grupo Platina (Pt+Pd) ³	kg	3.700	0,01
Nióbio ²	t	10.693.520	98,2
Níquel ²	10 ³ t	10.371	13,7
Ouro ²	t	2.400	4,4
Potássio ⁴	10 ³ t	12.979	2,5
Prata ²	t	3.890	0,7
Rochas Ornamentais ¹	10 ³ t	nd	nd
Sal ⁷	10 ³ t	21.630	nd
Talco e Pirofilita ¹	10 ³ t	44.010	11,8
Tântalo ²	t	35.387	36,3
Terras Raras ²	10 ³ t	22.000	16,1
Titânio ⁵	10 ³ t	2.600	0,4
Tungstênio ²	t	23.804	0,7
Vanádio ²	10 ³ t	175	1,3
Vermiculita ¹	10 ³ t	6.300	10,2
Zinco ²	10 ³ t	1.783	0,7
Zircônio ¹	10 ³ t	2.566	3,8

Fonte: DNPM / DIPLAM, USGS (DNPM, 2014).

Nota: 1 - Reserva lavrável de minério; 2 - Reserva lavrável em metal contido; 3 - Reserva lavrável em metal contido de Pt + Pd; 4 - Reserva lavrável em equivalente P₂O₅ ou K₂O; 5 - Reserva lavrável de ilmenita + rutilo, em metal contido; 6 - Reserva medida em metal contido; 7 - Reserva medida + indicada; nd - dado não disponível.

O DNPM (2014) ainda acrescenta dados relativos a porcentagem do beneficiamento dos produtos minerais no Brasil em relação ao beneficiamento mundial. Além do maior produtor de Nióbio e Tântalo como já mencionado, o Brasil ainda se mantém como 3ª maior produtor em vermiculita (15,6%), crisotila (15%), ferro (13,1%), alumínio - bauxita (12,7%), talco e pirofilita (7,9%), grafita natural (7,8%) e bentonita (4,3%), além de ser o 4ª produtor em rochas ornamentais e de revestimento, e o 5ª em Magnesita, estanho, caulim e cal. A Tabela 2.2 apresenta a produção beneficiada das principais substâncias minerais no Brasil no período de 2011 a 2013.

Tabela 2.2 - Produção beneficiada das principais substâncias minerais no Brasil

Produção Beneficiada					
Substância	Unid.	2011 ^(r)	2012 ^(p)	2013 ^(p)	(%) Mundo 2013
Aço bruto	(t)	35.162.000	34.682.000	34.163.000	2,1
Água Mineral ^{1,r}	10 ³	10.079.331	10.484.626	11.051.191	Nd
Alumínio – Bauxita	(t)	31.768.000	33.260.000	32.867.000	12,7
Alumínio ²	(t)	1.680.000	1.666.000	1.512.000	Nd
Areia para Construção	(t)	346.772.000	368.957.000	377.247.785	Nd
Barita (contido) ^{22,r}	(t)	7.039	3.025	0	0,4
Bentonita ³	(t)	566.267	512.975	434.000	4,3
Brita e Cascalho	(t)	267.987.000	287.040.000	293.526.805	Nd
Cal	(t)	8.235.000	8.313.000	8.419.000	2,4
Calcário Agrícola	(t)	28.718.000	33.077.000	33.131.000	Nd
Carvão Mineral ⁴ (carvão Benef. Energ. + Outros Finos), r	(t)	5.613.582	6.635.125	7.407.175	0,1
Caulim ^r	(t)	1.927.000	2.388.000	2.139.000	5,8
Chumbo ⁵	(t)	8.545	8.922	9.124	0,1
Cimento ^r	(t)	64.093.000	69.323.000	69.975.000	1,7
Cobalto ⁶	(t)	1.614	1.750	1.871	2,9
Cobre ^{2,r}	(t)	245.350	210.700	261.950	1,5
Crisotila ⁷	(t)	306.320	304.568	290.825	15,1
Cromo ⁸	(t)	542.512	472.501	485.951	1,9
Diamante ^r	ct	45.536	49.234	49.166	0,04
Diatomita ²²	(t)	4.224	1.987	2.475	Nd
Enxofre ^r	(t)	510.000	519.000	560.000	0,8
Estanho ⁶	(t)	9.382	11.955	14.721	7,1
Felspatos ²²	(t)	333.352	247.152	294.357	1,2
Ferro	(t)	398.130.813	400.822.000	386.270.053	13,1
Fluorita ⁹	(t)	25.040	24.148	27.712	0,4
Fosfato ¹⁰	(t)	6.738.000	6.740.000	6.715.000	3,0
Gipsita ¹¹	(t)	3.228.931	3.749.860	3.332.991	2,1
Grafita Natural ¹⁰	(t)	105.188	88.110	91.908	7,8
Lítio ¹⁰	(t)	7.820	7.084	7.982	1,2
Magnesita	(t)	476.805	479.304	557.431	8,7
Manganês ^{10,r}	(t)	2.738.000	2.796.000	2.833.000	7,2
Mica ¹¹	(t)	6.193	522	9.728	Nd

Produção Beneficiada					
Substância	Unid.	2011 ^(r)	2012 ^(p)	2013 ^(p)	(%) Mundo 2013
Molibdênio ¹²	(t)	263	nd	nd	nd
Nióbio ⁵	(t)	64.657	82.214	73.668	92,8
Níquel ¹³	(t)	50.974	67.124	65.965	nd
Ouro	(kg)	65.209	66.773	79.563	2,8
Potássio ¹⁴	(t)	395.002	346.509	310.892	0,9
Prata ²	(kg)	71.600	71.900	72.500	nd
Quartzo	(t)	17.657	16.254	10.696	nd
Rochas Ornamentais e de Revestimento	(t)	9.000.000	9.300.000	10.500.000	7,5
Sal ¹⁵	(t)	6.164.729	7.481.871	7.275.453	2,8
Talco e Pirofilita ¹¹	(t)	443.533	459.469	592.844	7,9
Tântalo ^{5,r}	(t)	136	118	185	29,1
Terras Raras ¹⁶	(t)	290	206	600	0,5
Titânio ¹⁷	(t)	71.154	70.952	80.285	1,1
Tungstênio ⁵	(t)	244	381	494	0,7
Vermiculita	(t)	54.970	51.986	68.014	15,6
Zinco ⁶	(t)	284.770	246.526	242.000	nd
Zircônio ¹⁰	(t)	23.283	20.425	21.154	1,5

Fonte: DNPM (2014).

Notas: r - valor revisado; p - valor preliminar; nd - dado não disponível; 1 - Água Engarrafada + Ing. Fonte + Prod. Ind.; 2 - Metal Primário + Secundário; 3 - Bentonita Moída Seca + Ativada; 4 - Carvão Energético + Metalúrgico; 5 - Metal Contido no Concentrado; 6 - Metal Primário; 7 - Fibras; 8 - Minério Lump + concentrado de cromita; 9 - Fluorita Grau Ácido + Grau Metalúrgico; 10 - Concentrado; 11 - Minério Bruto (ROM); 12 - Ferro-Molibdênio; 13 - Ni contido no Matte + Liga FeNi + Eletrolítico; 14 - Equivalente K₂O; 15 - Sal-gema + Sal marinho; 16 - Monazita; 17 - Concentrado de Ilmenita + Rutilo; 18 - Produção Bruta + Beneficiada; 19 - % mundial do tântalo contido nas ligas; 20 - % mundial do titânio contido em ilmenita; 21 - % mundial do concentrado de zinco; 22 - Produção Beneficiada; 23 - Metal contido no minério.

De acordo com os dados apurados pelo o DNPM em 2013 e posteriormente publicados pelo IBRAM (2015), o Brasil possuía na data da pesquisa 8.870 companhias Mineradoras, sendo composta predominantemente por micro e pequenas empresas. Deste número, 1.075 encontram-se no Centro-Oeste, 1.606 no Nordeste, 515 no Norte, 3.609 no Sudeste e 2.065 no Sul do Brasil. Este número de mineradoras foi citado por Araújo, Olivieri e Fernandes (2014), acrescentando que das 8.870 companhias mineradoras, parte está em regime de concessão de lavra e parte em regime de licenciamento.

O DNPM (2015 apud IBRAM, 2015) classifica as minas brasileiras de acordo com a produção anual. Na Figura 2.1, pode-se perceber a classificação das 8.400 minas brasileiras de acordo com o tamanho da produção das mesmas.

Figura 2.1 - Distribuição das minas brasileiras por tamanho (produção anual)



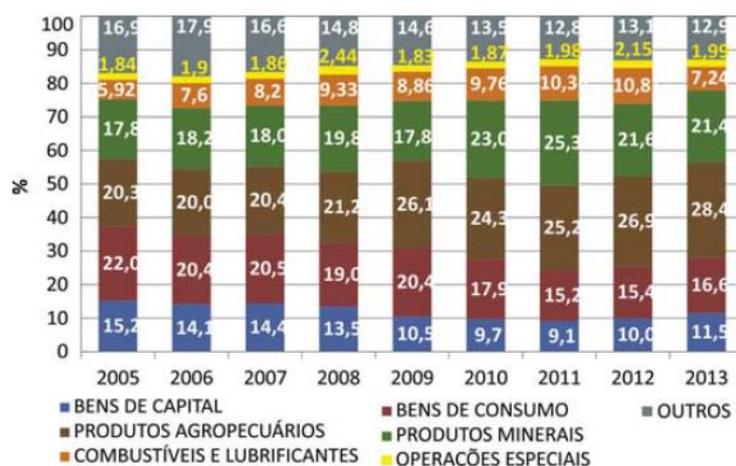
Fonte: DNPM (2015 apud IBRAM, 2015).

A Figura 2.1 afirma que a produção nacional se dá mais efetivamente em micro e pequenas minas, visto que juntas representam 82,4% do total.

Levando em consideração a participação da mineração no mercado internacional (Figura 2.2), de acordo com o DNPM (2014) as exportações brasileiras deste setor têm sofrido variações, porém de 2005 a 2011 mostram-se um relativo crescimento com queda em 2012 e 2013. Analisando as importações, houve uma variação que oscilava de 7% a 10%, com um decréscimo de 2010 a 2013.

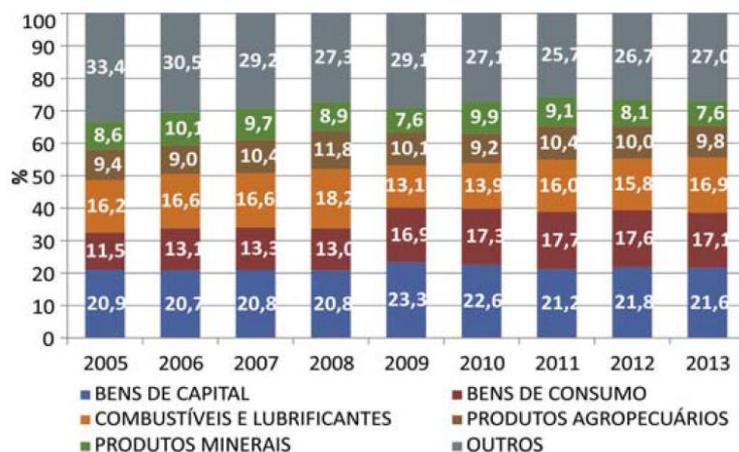
Nas Figuras 2.2 e 2.3 apresentam-se respectivamente a evolução da participação brasileira em exportação e importação por categoria de uso, e a Figura 2.4, a composição das exportações dos bens minerais primários em 2013.

Figura 2.2 - Evolução da participação (%) das exportações brasileiras por categoria de uso



Fonte: MDIC/SECEX; DNPM/DIPLAN (DNPM, 2014).

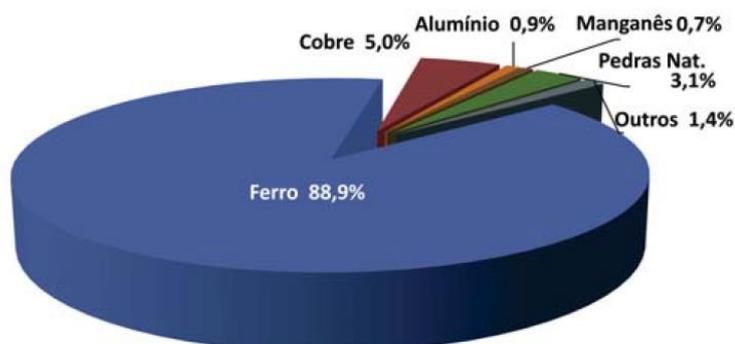
Figura 2.3 - Evolução da participação (%) das importações brasileiras por categoria de uso.



Fonte: MDIC/SECEX; DNPM/DIPLAN (DNPM, 2014).

Analisando as Figuras 2.2 a 2.4 é perceptível a importância da mineração para economia brasileira, tendo em vista que em 2013 o setor obteve uma participação de 21,4% das exportações. Além disso, observa-se que os produtos minerais exportados são predominantemente bens primários, sendo o minério de ferro (88,9%) o mais representativo.

Figura 2.4 - Composição das exportações dos bens minerais primários

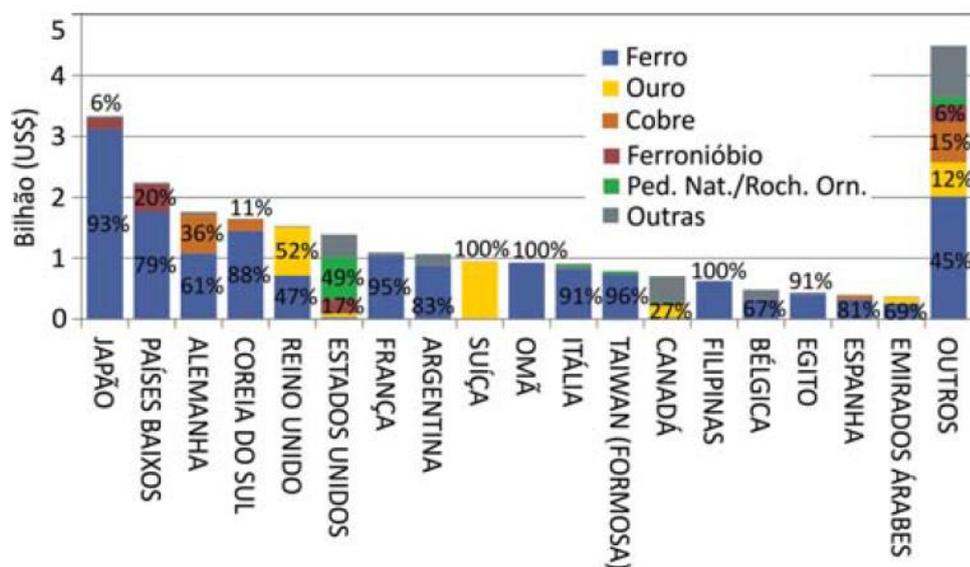


Fonte: MDIC/SECEX; DNPM/DIPLAN (DNPM, 2014).

O DNPM (2014) comenta que somente a China importa 40,25% dos produtos do setor da mineração brasileira e o restante (59,75%, ver Figura 2.5) se distribuem nos outros países que o Brasil exporta, sendo o Japão o segundo maior contribuinte nas importações dos produtos brasileiros, correspondendo a 7,4%. Vale ressaltar que

nenhum país sozinho (além da China) ultrapassa a porcentagem de importação do Japão.

Figura 2.5 - Composição das exportações dos outros países correspondentes a 59,75% dos produtos minerais brasileiros



Fonte: DNPM (2014).

2.1.1 A mineração no Nordeste Brasileiro

A mineração é uma atividade muito atuante no Nordeste Brasileiro, detentora de 1.606 companhias mineradoras (IBRAM, 2015). De acordo com Souza *et al.* (2014), mais de 50% das empresas existente no nordeste brasileiro possuem mais de 20 anos de funcionamento. Além disso, o Nordeste - NE detém grandes representantes na mineração brasileira, pois algumas minas do NE se classificam como as 200 maiores do Brasil; “entre elas, as de ouro, em Jacobina (BA), de urânio, em Caetité (BA), de potássio, em Rosário do Catete (SE), de talco, em Brumado (BA), e de cobre, em Jaguarari (BA)” (MINÉRIOS & MINERALES, 2012 apud SOUZA *et al.*, 2014, p. 117).

Souza *et al.* (2014) relatam que a abertura de minas de ferro na Bahia, deixará o estado numa posição privilegiada no Brasil, em relação ao setor minerador. A mina mencionada está localizada em Caetité, e trará para o município diversos benefícios, como avanço econômico, abertura de novos postos de emprego, atração de capitais e o desenvolvendo toda a região.

Com relação aos minérios explorados no Nordeste Brasileiro, pode-se citar o calcário, caulim, cobre, cromita, gipsita, ilemita, scheelita, ouro e outros. A revista *Minério e Minerale*s (2014) elaborou um ranking por substância, levando em consideração a produção anual em toneladas no ano de 2013, onde pode-se observar o mineral beneficiado, a mineradora, a produção em 2013 e a estimada para 2014. A Tabela 2.3 mostra os dados do ranking da região nordeste.

Através dos dados expostos na Tabela 2.3, percebe-se que a maior produção no ano de 2013 se deu com o beneficiamento da Ilemita na Paraíba, com um valor de 12.649.436 toneladas do minério. Além disso, observa-se uma produção relevante para o Níquel (BA), Calcário (CE), Ouro (BA), Cobre (BA) e a Cromita (BA).

Tabela 2.3 - Ranking por substância - Produção anual em toneladas (ROM) - Ano base 2013

Posição	Nome da Mina	Local	Mineradora	Produto Principal	ROM (T) / Ano 2013	Produção (ROM) estimada 2014	Produção (ROM) estimada 2015
ARGILA (Clay)							
127	Poty	Paulista/PB	Votorantim Cimentos N/NE	Argila	578.360,93	544.527,00	-
BENTONITA (Bentonite)							
164	Mineração Juá	Boa Vista/PB	Bentonit União Nordeste	Bentonita	107.300,00	-	-
169	Projeto Primavera	Boa Vista/PB	Bentonit União Nordeste	Bentonita	72.500,00	-	-
179	201	Boa Vista/PB	Bentonit União Nordeste	Bentonita	33.000,00	-	-
CALCÁRIO (Limestone)							
61	Usina Rica	Sobral/CE	Votoratim Cimentos N/NE	Calcário	2.300.000,00	2.300.000,00	-
66	Miramar	Caaporã/PB	Lafarge Brasil	Calcário	1.950.000,00	1.900.000,00	1.900.000,00
CAULIM (Kaolim)							
184	Fazenda vale verde Walmor	Prado/BA	Mineração de Caulim Monte Pacoal	Caulim	22.000,00	25.000,00	27.000,00
COBRE (Copper)							
83	Surubim (5)	Jaguarari/BA	Mineração Vale do Curaçá	Cobre	1.384.373,00	2.918.966,00	3.037.023,00
116	Caraíba Subterrânea	Jaguarari/BA	Mineração Vale do Curaçá	Cobre	765.770,00	-	-
134	Angico	Jaguarari/BA	Mineração Vale do Curaçá	Cobre	497.430,00	-	-

Posição	Nome da Mina	Local	Mineradora	Produto Principal	ROM (T) / Ano 2013	Produção (ROM) estimada 2014	Produção (ROM) estimada 2015
CROMITA (Chromium)							
103	Ipueira	Andorinha/BA	Companhia de Ferro Ligas da Bahia (Ferbasa)	Cromita	1.010.982,00	1.100.000,00	-
149	Coitezeiro	Campo Formoso/BA	Companhia de Ferro Ligas da Bahia (Ferbasa)	Cromita	321.777,00	354.500,00	354.000,00
FOSFATO (Phosphate)							
132	Angico dos Dias	Campo Alegre de Lourdes/BA	Galvani Industria Comércio e Serviços	Fosfato	514.975,00	518.435,00	521.895,00
GIPSITA (Gypsum)							
137	São Jorge Fazenda	Ouricuri/PE	Mineração São Jorge	Gipsita	457.497,29	700.000,00	800.000,00
151	Casa de Pedra	Ouricuri/PE	Votorantim Cimentos N/NE	Gipsita	282.062,00	193.322,00	-
GRANITO ORNAMENTAL (Ornamental Granite)							
191	Verde Gaya	Jaguarari/BA	Marbrasa Norte Mineradora	Granito Ornamental	3.240,00	-	-
ILEMENITA (Ilmenite)							
17	Guaju	Mataraca/PB	Cristal Mineração do Brasil	Ilemenita	12.649.436,00	12.515.412,00	12.515.412,00
NÍQUEL (Nickel)							
29	Santa Rita	Itagibá/BA	Mirabela Mineração	Níquel	6.595.240,00	14.000,00	-
OURO (Gold)							
74	Jacobina	Jacobina/BA	Jacobina Mineração e Comércio (Yamana)	Ouro	1.575.628,00	1.428.644,64	1.666.100,83
102	Fazenda Brasileiro	Barrocas - BA	Mineração Fazenda Brasileiro (Yamana)	Ouro	1.036.744,00	1.153.726,00	1.200.000,00

Posição	Nome da Mina	Local	Mineradora	Produto Principal	ROM (T) / Ano 2013	Produção (ROM) estimada 2014	Produção (ROM) estimada 2015
PEDRA BRITADA (Crushed stone)							
109	Granja Ferreira Torto	Macaíba/RN	Votorantim Cimentos	Pedra Britada (Granodiorito)	909.015,00	960.000,00	-
123	Engenho do Buraco	Salvador/BA	Pedreiras Valéria	Pedra Britada (Gnaise)	607.262,00	-	-
124	Civil Mineração	Salvador/BA	Civil Indústria e Comercial	Pedra Britada (Granulito)	597.869,40	650.000,00	770.000,00
130	Pedreira São Luis	Rosário/MA	Serveng Mineração	Pedra Britada (Tonalito)	533.000,00	750.000,00	-
SCHEELITA (Scheelite)							
182	Brejuí	Currais Novos/RN	Mineração Tomaz Salustino	Scheelita	28.829,00	30.000,00	30.000,00
TALCO (Talc)							
159	Olho D'água dos Coqueiros	Brumado/BA	Xilolite	Talco	158.094,00	180.000,00	190.000,00
URÂNIO (Uranium)							
163	Cachoeira	Caelité/BA	Indústria Nucleares do Brasil (INB)	Urânio	116.909,34	20.938,55	-

Fonte: Minérios e Minerales (2014)

Nota: ROM - Minério bruto obtido da mina, sem sofrer beneficiamento (Run of Mine).

2.1.2 A mineração do Rio Grande do Norte

De acordo com IBGE (2015), o Rio Grande do Norte - RN é um Estado localizado no Nordeste brasileiro e possui uma área de 52.811,110 km². No último censo demográfico, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, o RN obteve uma população de 3.168.027 habitantes, e uma população estimada para o ano de 2016 de 3.474.998 habitantes. O RN possui 167 municípios, e a capital do estado se localiza no município de Natal. A Figura 2.6 apresenta a localização do Estado do Rio Grande do Norte no mapa do Brasil.

Figura 2.6 - Localização do Estado do Rio Grande do Norte no mapa do Brasil



Fonte: MOURA (2014). Disponível em: <<http://jbmoura.com/rn-trampolim-do-crescimento/>>.

Segundo a Secretaria do Desenvolvimento Econômico - SEDEC (2014), o RN é destaque no setor minerador brasileiro, possuindo mais de 2.000 jazidas minerais, que permite o desenvolvimento do estado e a geração de emprego e renda.

Ainda de acordo com a SEDEC (2014), atualmente o RN possui em torno de 60 bens minerais que são explorados. Dentre esses bens minerais, pode-se citar a produção de cimento, cal, ferro, rochas ornamentais, ouro, scheelita, feldspato,

caulim, entre outros. A seguir são descritos alguns dados relevantes sobre os bens minerais do Rio Grande do Norte citados por SEDEC (2014).

- Minério de Ferro: a exploração é realizada na região do Seridó do RN e seu produto é exportado para China.
- Cimento: a exploração é realizada na região oeste do RN, especificamente nos municípios de Baraúnas, Mossoró e Currais Novos.
- Cal: também se encontra na região oeste do RN, no município de Baraúnas; produzindo principalmente a cal virgem e hidratada.
- Ouro: encontrado em pelo menos 10 município do RN, porém apenas Lajes e Currais Novos apresentam-se em destaque pela sua exploração.
- Scheelita: explorada nas minas da região Seridó do RN, para posterior obtenção do Tungstênio.
- Rochas Ornamentais: atualmente existem 26 concessões de lavra de rochas ornamentais no Estado.
- Sal marinho: o Estado do RN é o maior produtor de sal no Brasil, abastecendo todo o país, e em 2012 faturou R\$ 1,2 bilhões de reais/ano.
- Petróleo e Gás Natural: a produção de petróleo e gás natural no Estado do RN iniciou desde a década de 80. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível - ANP (ANP, 2015), em dezembro de 2014 o RN produziu 56.488 bbl/dia de petróleo e 1.296 Mm³/d de gás natural e essa produção se dá em 82 campos produtores.
- Cerâmica vermelha: a produção de cerâmica vermelha no RN ocorre em 186 empresas, tendo um faturamento de 210 milhões de reais/ano.
- Cerâmica Branca: o estado do Rio Grande do Norte é um dos principais fornecedores de matérias-primas para a produção deste tipo de cerâmica, destacando o feldspato e caulim;
- Água Mineral: atualmente o RN possui 19 empresas de água mineral funcionando em oito dos seus municípios.

2.1.3 Mineração Tomaz Salustino S/A - MINA BREJUÍ

Consiste de uma grande representante das mineradoras que exploram a província scheelitífera do Nordeste brasileiro, sendo considerada a maior mina de scheelita da América do Sul. De acordo com a Mina Brejuí (2014), a descoberta do minério de scheelita se deu em 1943 e no mesmo período iniciou-se a sua exploração; porém, a constituição como empresa só ocorreu em 1954, concessionada pelo Desembargador Tomaz Salustino Gomes de Melo. A descoberta do minério se deu de forma inesperada; um funcionário do Desembargador Tomaz Salustino, o vaqueiro José Dias, aboiava nas propriedades do seu chefe, quando encontrou uma pedra brilhante, a qual foi entregue ao proprietário das terras e posteriormente direcionada para análises no Rio de Janeiro, para aferir a sua composição.

A Mina Brejuí se localiza no município de Currais Novos, Rio Grande do Norte. De acordo com o IBGE (2015a), Currais Novos possui uma população de 42.652 habitantes (censo de 2010) e uma estimativa de 45.060 habitantes para o ano de 2016; além disso, possui área territorial de 864,349 km² e pertence ao bioma Caatinga. Observe na Figura 2.7 a localização do município de Currais Novos - RN.

Figura 2.7 - Localização do município de Currais Novos no Rio Grande do Norte



Fonte: Fernandes e Silva (S. A.).

O beneficiamento da scheelita na mina Brejuí, teve seu auge no período da Segunda Guerra Mundial, visto que existia a necessidade de reposição da matéria prima na indústria de aço e bélica: o Tungstênio. Devido a essa necessidade, a Mina Brejuí exportou toneladas de minério, e como consequência, houve um

desenvolvimento do município, expresso em diversas construções, como o Tungstênio Hotel, cinema, emissora de rádio, estádio de futebol, campo de pouso, colégios, hospital, casa de idosos entre outros empreendimentos (MINA BREJUÍ, 2013).

Ainda de acordo com a Mina Brejuí (2013), houve um declínio na produção da scheelita a partir da década de 80, reduzindo conseqüentemente a extração mineral, ocasionado pela diminuição dos preços internacionais do minério; porém a partir do final dos anos 90 a mineração foi retomada gerando emprego e renda para o município. Veja nas Figuras 2.8 e 2.9 algumas imagens da Mineração Tomaz Salustino S/A.

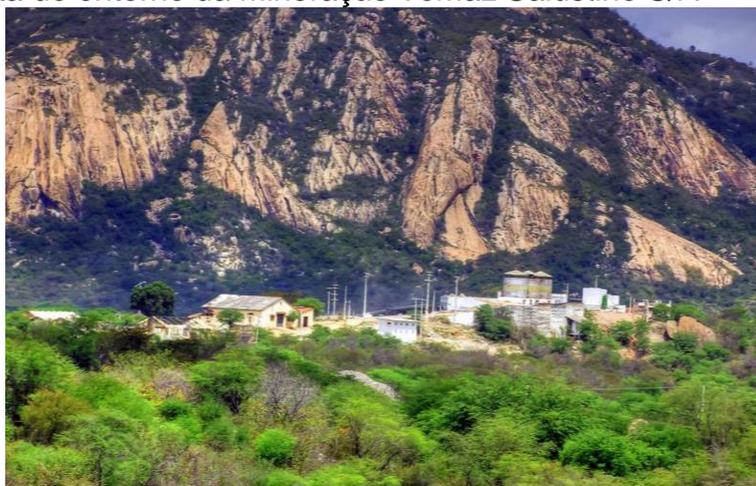
Figura 2.8 - Instalações da Mina Brejuí: (a) Museu; (b) Entrada da Mina Brejuí



Na Figura 2.8a observa-se o Museu da Mineração Tomaz Salustino S/A, criado para atender os turistas que visitam a Mina Brejuí, conhecida atualmente como o maior parque temático do Rio Grande do Norte. De acordo com a Mina Brejuí (2013), o Parque já recebeu mais de 20 mil turistas nos últimos anos, incluindo discentes e docentes de instituições brasileiras e visitantes estrangeiros.

A Figura 2.9 apresenta uma imagem do entorno da Mina Brejuí e as instalações da Mineração Tomaz Salustino S/A.

Figura 2.9 - Vista do entorno da Mineração Tomaz Salustino S/A



Fonte: Wallace Moura (2011). Disponível em: <<http://wallacemoura.com.br/fotografia.php>>.

2.1.3.1 A scheelita e seu beneficiamento

Dantas (2007) relata que no Brasil a scheelita é encontrada no Rio Grande do Norte, Paraíba, Ceará, Rondônia e em Santa Catarina. Segundo a Mina Brejuí (2014), a scheelita é um minério de grande importância para diversas indústrias, visto que é uma grande fonte do Tungstênio (W); A scheelita é classificada como um tungstato de cálcio (CaWO_4), apresenta alto ponto de fusão (4.500°C), alta densidade e boa condutividade elétrica.

Esta definição da scheelita como tungstato de cálcio foi descrita na literatura técnica por Dana (1969), e posteriormente citada nos trabalhos de Godeiro *et al.* (2010) e por Gerab (2014). Dana (1969) diz que a scheelita é composta por: CaWO_4 (Ca 19,4% e WO_3 80,6%); e que possivelmente o Molibdênio se apresente na constituição, substituindo de forma parcial o Tungstênio. Além disso, esse nome dado ao minério foi em homenagem ao descobridor do Tungstênio, Karl Wilhelm Schelle.

Dana (1969) cita algumas características da scheelita, como clivagem alta; brilho vítreo a adamantino; variações de cores como branco, amarelo, verde e castanho; possui algumas espécies translúcidas; possui alta densidade relativa e apresenta-se na forma cristalina. A scheelita é encontrada em pegmatitos graníticos, em depósitos metamórficos de contato, além de filões de minérios de alta temperatura associadas a rochas graníticas. Também é encontrada em conjunto com outro minério de importância, o ouro.

O DNPM (2014), diz que os depósitos naturais de scheelita no Brasil, são formados em skarns (rochas metamórficas) no Nordeste, no Sul e ao Norte do país, em jazidas de veios de quartzos e depósitos secundários (aluvionares e eluvionares), onde a wolframita $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$ é encontrada associada à cassiterita.

O beneficiamento da scheelita é realizado para possibilitar a posterior extração do Tungstênio, que é aplicada em diversas indústrias e produtos, tais como: canetas, ligas metálicas, motores, metralhadoras, lâmpadas, etc. A Mina Brejuí (2013a) descreve as seguintes aplicações industriais para o Tungstênio:

- Metalúrgica: ligas metálicas, aços, e metal duro;
- Elétrica: filamentos de lâmpadas, contatos elétricos para fornos de altas temperaturas e equipamentos de raio-x;
- Indústria mecânica: brocas, ferramentas de cortes e perfurações, material abrasivo;
- Indústria de canetas: usado na produção canetas esferográficas;
- Indústria Aeroespacial: motores de foguetes, turbinas de aviões e revestimentos de mísseis;
- Indústria Bélica: projeteis, canhões e metralhadoras;
- Indústria Petrolífera: Ferramenta de perfuração de rocha.

O processo de beneficiamento é descrito através de informações obtidas diretamente na Mineração Tomaz Salustino S/A, como também de análises dos trabalhos de Gerab (2014), Fernandes (2011), Machado (2012) e Paiva (2013).

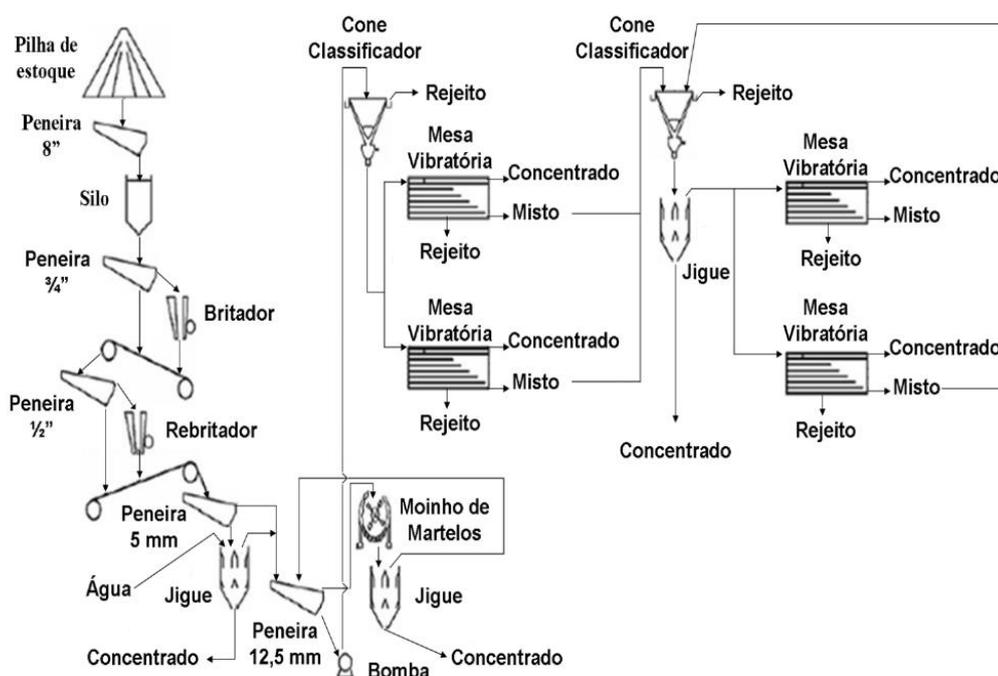
Para o beneficiamento da scheelita é necessário diversos equipamentos e um uso extenso de água para a separação do minério e dos possíveis resíduos. O processo de beneficiamento utiliza basicamente as características físicas do minério, principalmente a massa específica (densidade). Os equipamentos utilizados são basicamente jigues, mesas vibratórias, esteiras para direcionamento do material e silos para estocagem.

O processo de beneficiamento inicia-se após a retirada dos fragmentos de rochas que contém o minério e a diminuição do tamanho de suas partículas. Fernandes (2011) diz que é extremamente importante que na etapa de cominuição (britagem e moagem) se tenha um controle maior, pois a má execução desta etapa implicará em uma exagerada produção de fino, que prejudica a eficiência do processo

de concentração gravimétrica. Fernandes (2011) ainda acrescenta que os jigues e as mesas vibratórias não possuem eficiência suficiente para tratar os finos não concentrados, e que estes farão parte do rejeito final do beneficiamento. A seguir são descritos os processos de beneficiamento das principais minas da província schelitífera do Nordeste brasileiro por meio de fluxogramas presentes em literatura técnica.

O fluxograma representado na Figura 2.10 descreve de forma sucinta o beneficiamento das minas na província scheelitífera (RN e PB) no período de alta produção. Nesta imagem, observa-se que o controle granulométrico é fundamental para atingir alta eficiência nos demais processos, e que o conjunto é formado por britadores, peneiras, jigues, classificadores, concentradores e mesas vibratórias.

Figura 2.10 - Fluxograma simplificado da Mineração Acauã (Mina Barra Verde)

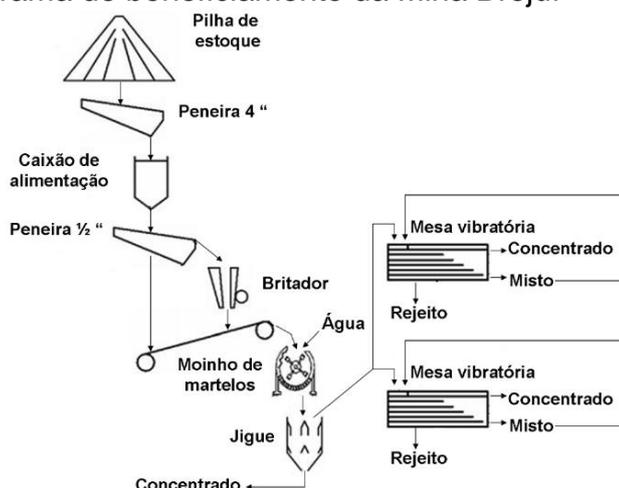


Fonte: DNPM (1984 apud FERNADES, 2011).

Com a baixa dos preços internacionais da scheelita em meados de 1980, houve um decréscimo e até paralização da produção em algumas minas do RN e PB. Com isso, grande parte dos equipamentos existentes no período da alta produção, foi vendido ou sucateado. Leite (2007) apresenta um fluxograma da Mina Brejuí depois da sua reativação. A Figura 2.11 mostra os equipamentos existentes na produção atual.

Fernandes (2011) diz que a nova configuração da Mina Brejuí se aproxima da forma com a qual a Mina Bodó executa o beneficiamento, diferenciando-se pelo acréscimo de mais mesas vibratórias na mina Bodó e por uma classificação prévia da granulometria realizada pela Brejuí. A Figura 2.12 apresenta o fluxograma da Mina Bodó.

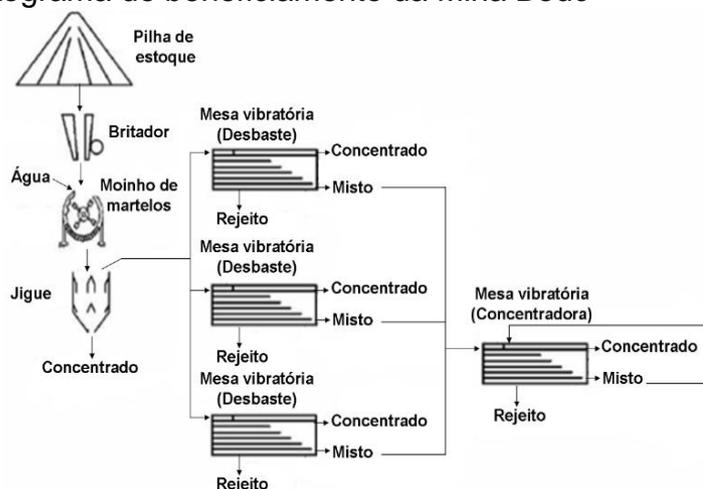
Figura 2.11 - Fluxograma de beneficiamento da Mina Brejuí



Fonte: Leite (2007).

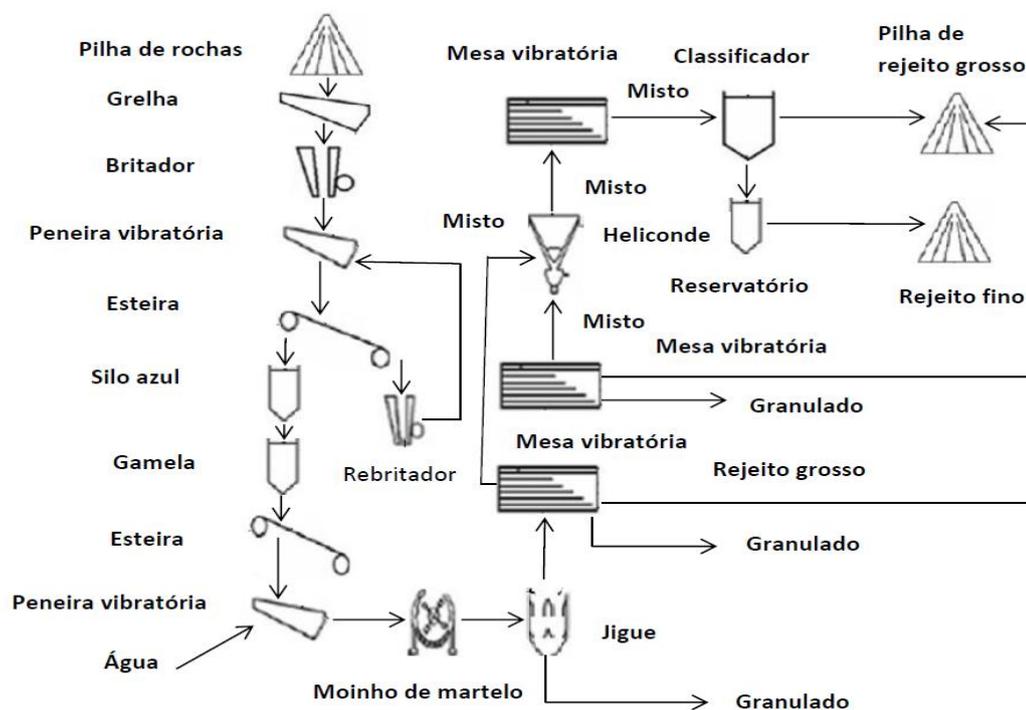
Gerab (2014) em seu trabalho, expôs uma atualização do fluxograma da Mina Brejuí, na qual apresenta outros equipamentos constituintes como silos, mesas e peneiras vibratórias. A apresentação do beneficiamento neste trabalho levou em consideração esta atualização, visto que foi verificado *in loco* a existência dessa modificação em relação ao modelo apresentado por Leite (2007). A Figura 2.13 apresenta o fluxograma da Mina Brejuí atualizado.

Figura 2.12 - Fluxograma de beneficiamento da Mina Bodó



Fonte: Leite (2007 apud FERNANDES, 2011).

Figura 2.13 - Fluxograma da Mina Brejuí atualizado.



Fonte: Gerab (2014).

Dando continuidade ao beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí, após o ato de desmonte, o material é levado ao setor produtivo por caminhões basculantes; e, posteriormente, passa-se o material por uma grelha inicial que serve para triagem de tamanho, e este, é encaminhado por esteiras para o primeiro britador. Veja na Figura 2.14 a grelha e o britador da Mina Brejuí.

Figura 2.14 - Equipamento da Mina Brejuí. (a) Grelha; (b) Britador



Fonte: Gerab (2014).

Após esse processo, Gerab (2014) diz que esse material de granulometria relativamente menor é encaminhado para peneiras vibratórias que tem como função

básica separar as partículas arenosas do material que ainda irá passar pelo segundo processo de britagem.

Depois da rebritagem, os dois materiais, o britado inicialmente e o rebitado, são encaminhados para um primeiro silo de cor azul. Após esta etapa, através de esteiras, o material que se encontra no silo azul é encaminhado para um silo de cor amarela, conhecido como gamela; esses silos tem a função básica de estocar o material britado. Na Figura 2.15, podem ser visualizados os silos azul e amarelo da Mina Brejuí, que serve para estocar o material depois da britagem.

Figura 2.15 - Silos da Mina Brejuí. (a) Silo Azul; (b) Silo Amarelo.



Após esta etapa, o material que se encontra no silo amarelo é encaminhado para a esteira de alimentação, que direciona o material para as peneiras vibratórias. Posteriormente, é encaminhado para moinho de martelos e ao sair deste equipamento, é direcionado para o jigge. A Figura 2.16, apresenta o moinho e o jigge da mina Brejuí.

Figura 2.16 - Equipamentos do beneficiamento da Mina Brejuí. (a) Moinho de martelos; (b) Vista externa do jigge



Fonte: Gerab (2014).

O processo de jigagem é utilizado para promover a separação hidráulica das partículas existentes no beneficiamento. Sampaio e Tavares (2005, apud GERAB, 2014, p.19), explica esse processo da seguinte forma: “ocorrem repetidas expansões e contrações verticais de um leito de partículas pelo movimento de pulsação da água. Como resultado, tem-se a separação das partículas em 20 camadas de densidades diferentes, na qual as partículas de maior densidade se depositam no fundo”.

Depois do processo de jigagem, o material com o concentrado de scheelita decanta para fundo do jigue, e é coletado na parte inferior do equipamento. Depois disso, esse material é direcionado para a mesa vibratória, onde ocorre a separação por fração, sendo elas: scheelita, fração grossa do resíduo e misto.

Sampaio e Tavares (2005, apud FERNANDES, 2011; GERAB, 2014) descreve as mesas vibratórias da seguinte forma: superfície plana de formato retangular, denominado deque, e este é composto por rifles (total ou parcialmente), apresentando um movimento diferencial na direção desses. Na superfície da mesa é formada uma película de água oriunda do deque, junto à alimentação, e esta água de lavagem possui um escoamento perpendicular aos rifles, na direção transversal do deque, que juntamente com o movimento oscilatório da mesa, permite a separação do material granular por densidade. Este material granular é distribuído na mesa por intermédio de um caixão que se encontra na extremidade da mesa.

Na etapa das mesas vibratórias, é o momento em que se coleta a scheelita beneficiada, faixa branca vista na Figura 2.17b. A fração mista é encaminhado para ser reaproveitada e o resíduo, denominado fração grossa é descartado nas pilhas no entorno da mina. O próximo passo do beneficiamento é o encaminhamento do misto para um depósito em forma de cone, denominado heliconde.

Figura 2.17 - Beneficiamento: (a) mesas; (b) separação das frações



Depois do helicónde, o misto é direcionado às mesas de concentração em cotas topográficas inferiores às cotas das mesas vibratórias iniciais. A separação da scheelita ocorre novamente e o misto retorna ao helicónde para ser encaminhado novamente as mesas de concentração e minimizar o desperdício de scheelita junto ao resíduo.

Posteriormente as sucessivas passagens do misto na mesa vibratória e a percepção de que não há mais beneficiamento da scheelita que viabilize outro retorno do misto para as mesas, esse material é encaminhado para o classificador para que auxilie na separação dos constituintes da lama e das partículas classificadas com resíduo grosso. Ao término da separação, o resíduo granular grosso é depositado nas pilhas de rejeito no entorno da Mina.

A lama é direcionada para o espaçador, que se utiliza da decantação para diminuir a turbidez, melhorando a qualidade da água para ser reaproveitada no sistema de beneficiamento. A Figura 2.18 apresenta o espaçador utilizado na mina Brejuí.

O material que decantou no fundo do espaçador, ainda se constitui uma lama, porém com finos mais concentrados. Este, é direcionado para as bacias de deposição no entorno da mina, e ao secar, denomina-se resíduo fino do beneficiamento da scheelita.

Figura 2.18 - Espaçador da Mina Brejuí



Após todo o processo de beneficiamento, Gerab (2014) diz que a scheelita é seca ao ar livre, estocada em depósitos e depois incinerada em fornos. Ao término

dessas atividades, a mesma apresenta uma cor mais escura, devido ao processo de queima e é direcionada para a retirada das impurezas através do eletroímã. Entre as impurezas presentes na scheelita, é muito comum a presença de ferro. Depois disso, a scheelita é encaminhada para ser ensacada e vendida.

Machado (2012) diz que com a reativação da Mina Brejuí, houve a geração de mais de 300 empregos, e que a produção passou a ser 20 toneladas mensais; e para cada tonelada de material retirado do meio ambiente, correspondiam a 250kg de concentrado de scheelita e 750 kg de rejeito mineral. Já Gerab (2014), comenta que o aproveitamento do material extraído pela Mina Brejuí é cerca de 0,8% do total, correspondendo assim 99,2% de resíduo; contudo, as duas estimativas relatam altos valores de produção de resíduo. A Figura 2.19 apresenta alguns dos produtos finais gerados no beneficiamento da scheelita na mina Brejuí.

Figura 2.19 - Produtos do beneficiamento da Scheelita na mina Brejuí. (a): Scheelita queimada (GERAB, 2014); (b) Pilha de rejeito - fração grossa (AUTORIA PRÓPRIA, 2015)



2.1.4 Mineração: geração de resíduos e impactos ambientais

Partindo do conceito de impacto ambientais como a modificação do meio, estes podem ser positivos ou negativos. Entre os impactos positivos gerados pelo setor da mineração, pode-se citar a modificação do entorno da região onde existe o beneficiamento do minério, a partir da infraestrutura criada para dar subsídio a atividade mineradora, desenvolvendo assim o município o qual está situado.

Currais Novos no Rio Grande do Norte, possui alguns exemplos de impactos positivos devido ao beneficiamento da scheelita. Houve a abertura de vias, construção de casas, hotel, museu e outras edificações que surgiram para dar suporte a mão de

obra da mineração. Contudo, também existe impactos negativos, e esses são diversos, tais como a poluição do ar, da água subterrânea, do solo, modificação da paisagem, geração de ruídos, entre outros.

Um exemplo atual de geração de impactos negativos foi a contaminação do rio Doce que banha os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, ocasionado pelo rompimento da barragem do Fundão da empresa Samarco, que era utilizada para a deposição dos rejeitos da mineração de ferro. De acordo com o relatório preliminar escrito pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2015), o desastre gerado pelo rompimento da barragem é classificado como de nível IV, ou seja, de grande porte conforme a classificação elaborada pela Defesa Civil.

Ainda de acordo com o respectivo relatório (IBAMA, 2015), a barragem rompida pertencia ao complexo minerário de Germano, em Mariana/MG. Esta barragem era utilizada para deposição de resíduo não perigoso e não inerte, como os resíduos de ferro e manganês. O IBAMA (2015) relatou que na barragem de fundão continha cerca de 50 milhões de m³, e desses, 34 milhões de m³ foram lançados no meio ambiente e 16 milhões de m³ estão sendo carreados pelos corpos de água em direção ao mar.

O IBAMA (2015) descreve o percurso realizado pelo rejeito de mineração de ferro após o rompimento da barragem da seguinte forma:

Inicialmente, esse rejeito atingiu a barragem de Santarém logo a jusante, causando seu galgamento e forçando a passagem de uma onda de lama por 55km no rio Gualaxo do Norte até desaguar no rio do Carmo. Neste, os rejeitos percorreram outros 22 km até seu encontro com o rio Doce. Através do curso deste, foram carreados até a foz no Oceano Atlântico, chegando ao município de Linhares, no estado do Espírito Santo, em 21/11/2015, totalizando 663,2 km de corpos hídricos diretamente impactados (IBAMA, 2015, p.3).

Ainda de acordo com o relatório, foram detectados *in loco* os seguintes impactos ambientais:

- Mortes de funcionários da empresa e moradores da região afetada;
- Desalojamento da população residente na área afetada;
- Destruição da paisagem e desagregação de vínculos sociais;
- Destruição de imóveis públicos e privados, e infraestrutura pública;
- Destruição de áreas agrícolas

- Interrupção na geração de energia pelas usinas hidrelétricas;
- Destruição da vegetação local, além de áreas de preservação ambiental;
- Mortandade da fauna terrestre e da biodiversidade aquática;
- Assoreamento dos cursos d'água gerado pelo transporte de material;
- Interrupção da atividade pesqueira e do abastecimento de água;
- Interrupção da atividade turística;
- Alteração dos padrões de qualidade da água;

As Figuras 2.20 e 2.21 apresentam as áreas impactadas pelo desastre ocorrido em novembro de 2015.

Figura 2.20 - Área impactada (a) imediatamente à jusante da barragem de Santarém. Barragem de Fundão após o rompimento; (b) Rio Doce no município de Baixo Guandu/ES



Fonte: IBAMA (2015).

Figura 2.21 - Áreas impactadas: (a) Distrito de Bento Rodrigues após o desastre; (b) Barra longa após o desastre

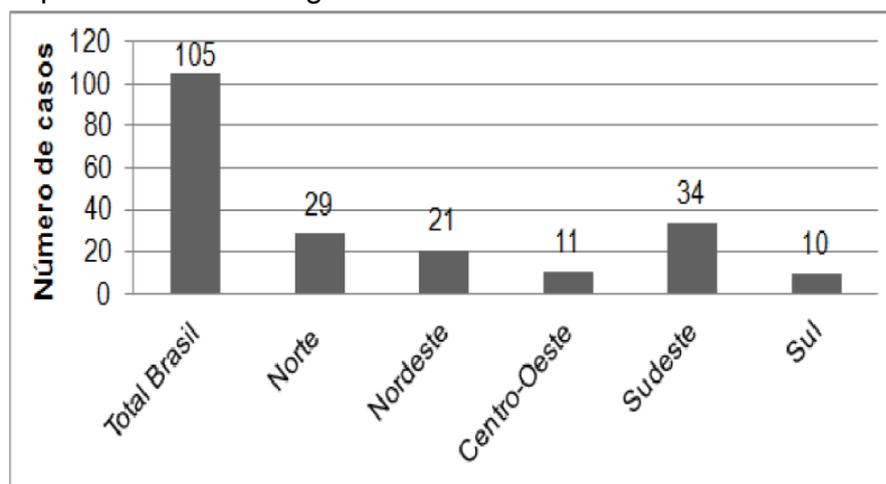


Fonte: IBAMA (2015).

Araujo, Olivieri e Fernandes (2014) dizem que a atividade mineradora é uma das práticas humanas que causam muitos impactos ambientais negativos. Os efeitos dos impactos estão relacionados com todas as etapas mineradoras, da abertura da cava até o transporte do minério beneficiado; além disso, pode-se estender até o fechamento da mina. “A mineração altera de forma substancial o meio físico, provocando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem, do solo, além de comprometer a fauna e a flora” (ARAUJO; OLIVIERI; FERNANDES, 2014, p. 2). Esses autores citam municípios em que existem casos de passivos ambientais, tais como: Boquira (BA), Caldas (MG), Serra do Navio (AP), Poços de Caldas (MG) e Santo Amaro (BA).

Araujo, Olivieri e Fernandes (2014) comentam que a maior concentração de impactos ambientais estudados no livro Recursos Minerais e Comunidade: Impactos Humanos, Socioambientais e Econômicos, se encontra na região Sudeste, e que possivelmente se justifica pelo fato que a história da mineração brasileira se iniciou nesta região com a exploração de ouro no Estado de Minas Gerais. A Figura 2.22 mostra a distribuição dos 105 casos estudados por regiões brasileiras.

Figura 2.22 - Os estudos de casos dos impactos da extração mineral no Brasil, classificados pelas diferentes regiões



Fonte: Araujo, Olivieri e Fernandes (2014).

Pode-se observar que a região que mais concentra casos de impactos ambientais dos 105 estudos é realmente a região Sudeste, totalizando 34 casos. A Tabela 2.4 apresenta a distribuição dos casos por estado, e sua respectiva porcentagem.

Tabela 2.4 - Ranking dos estudos de caso dos impactos humanos, socioambientais e econômicos por cada Unidade da Federação do Brasil

Ranking	UF	%	Ranking	UF	%
1º	Minas Gerais	19,0		Ceará	2,9
2º	Pará	11,4	12º	Maranhão	2,9
3º	Bahia	10,5		Mato Grosso	2,9
4º	Rio de Janeiro	8,6		Piauí	1,9
5º	Goiás	6,7	15	Rio Grande do Norte	1,9
6º	Amapá	5,7		Roraima	1,9
7º	Paraná	4,8		Espirito Santo	1,0
	Amazonas	3,8		Mato Grosso	1,0
	Rondônia	3,8	18º	Santa Catarina	1,0
8º	Rio Grande do Sul	3,8		Sergipe	1,0
	São Paulo	3,8	-	-	-

Fonte: Araujo, Olivieri e Fernandes (2014)

Nota: Banco de dados do Livro

Farias (2002) reafirma o que foi dito no início deste tópico, que os principais impactos ambientais negativos produzidos pela mineração estão relacionados com a poluição do ar, da água, poluição sonora e subsidência do terreno.

Farias (2002) apresenta uma síntese dos impactos negativos da mineração brasileira (Tabela 2.5) associados aos respectivos minerais beneficiados. Vale salientar que tais impactos apresentados pelo autor são relativos ao período do respectivo estudo; devido a isso, pode existir modificações significativas atualmente, visto que o setor da mineração vem se desenvolvendo ao passar dos anos e modificando os processos de beneficiamento.

Tabela 2.5 - Principais impactos ambientais da mineração no Brasil

Substância Mineral	Estado	Principais problemas	Ações Preventivas e/ou Corretivas
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção, poluição de águas superficiais	Cadastramento das principais barragens de decantação em atividade e as abandonadas; Caracterização das barragens quanto a estabilidade; Preparação de estudos para estabilização

Substância Mineral	Estado	Principais problemas	Ações Preventivas e/ou Corretivas
Ouro	PA	Utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; aumento da turbidez, principalmente na região de Tapajós	Divulgação de técnicas menos impactantes; monitoramento de rios onde houve maior uso de mercúrio
	MG	Rejeitos ricos em arsênio; aumento da turbidez	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
	MT	Emissão de mercúrio na queima de amálgama	Divulgação de técnicas menos impactantes
Chumbo, Zinco e Prata	SP	Rejeitos ricos em arsênio	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
Chumbo	BA	Rejeitos ricos em arsênio	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
Zinco	RJ	Barragem de contenção de rejeito, de antiga metalurgia, em péssimo estado de conservação	Realização das obras sugeridas no estudo contratado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro
Carvão	SC	Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida provenientes de antigos depósitos de rejeitos	Atendimento às sugestões contidas no Projeto Conceitual para Recuperação da Bacia Carbonífera Sul Catarinense
Agregados para construção civil	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometida devido a criação desordenada de áreas alagadas	Disciplinamento da atividade; Estudos de alternativas de abastecimento
	SP	Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição de mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do solo, acidentes nas rodovias causados pelos transportes	Disciplinamento da atividade; Estudos de alternativas de abastecimento e de transporte
	RJ e SP	Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando: vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflito com uso e ocupação do solo	Aplicação de técnicas menos impactantes; Estudos de alternativas de abastecimento
Calcário	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico	Melhor disciplinamento da atividade através da revisão da Resolução Conama nº 5 de 06/08/1987
Gipsita	PE	Desmatamento da região do Araripe devido a utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita	Utilização de outros tipos de combustível e incentivo ao reflorestamento com espécies nativas
Cassiterita	RO e AM	Destruição de Florestas e leitos de rios	Racionalização da atividade para minimizar os impactos

Fonte: Farias (2002).

2.2 Pavimentação e misturas asfálticas

Bernucci *et al.* (2006) define pavimento com uma estrutura formada por camadas de diversas espessuras, resistente o suficiente para suportar os esforços provenientes do tráfego de veículos e de mudanças climáticas. Os autores ressaltam que o pavimento é construído sobre a superfície final de terraplanagem e deve oferecer boas condições de rolamento, conforto, além de ser economicamente viável e seguro.

Balbo (2006) relata que o ato de pavimentar está intrinsicamente ligado a intenção de tornar uma via de deslocamento mais regular, reafirmando o que foi citado por Bernucci *et al.* (2006), pois através desta preocupação em fornecer a via boas condições de rolamento, tende a garantir o conforto necessário para a circulação de veículos, além torná-la mais segura e mais aderentes, minimizando as derrapagens em pistas úmidas ou molhadas.

Ainda de acordo com Balbo (2006) quando se executa pavimentos com boas condições de rolamento, conseqüentemente proporciona aos seus usuários menores custos com a manutenção dos veículos, visto que a má condição do pavimento reflete diretamente na probabilidade de desgaste do veículo; além disso, as boas condições de rolamento reduzem o tempo de viagem, pois aumenta a velocidade de deslocamento. Balbo (2006), ainda acrescenta que além dessas funções citadas, o pavimento deve primordialmente suportar as cargas provenientes do tráfego e das ações climáticas, ou seja, a estrutura de pavimento deve demonstrar suporte adequado as solicitações externamente impostas, sem se deteriorar precocemente.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2006, p. 95), descreve pavimento de uma rodovia da seguinte forma: “é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito - a infra-estrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito”. Esta definição do DNIT reafirma o que Bernucci *et al.* (2006) descreveu sobre pavimentos.

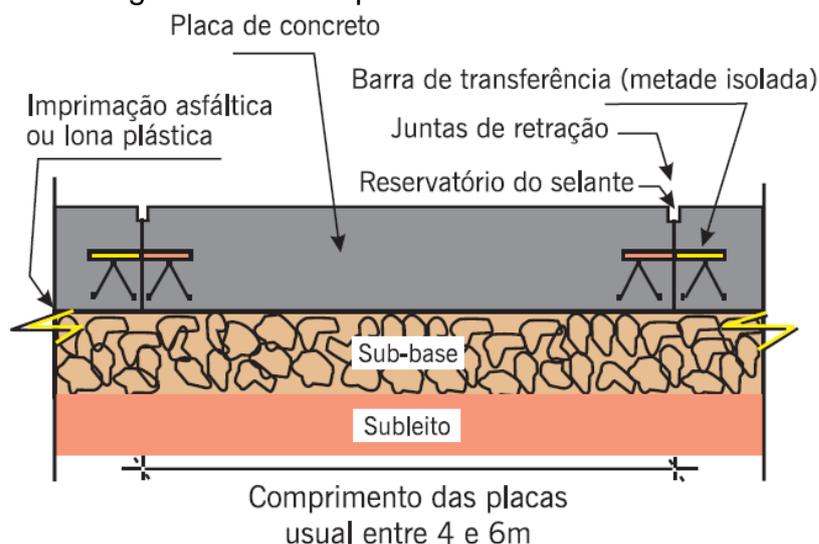
O DNIT (2006) classifica os pavimentos existentes em 3 categorias. São eles:

- Flexíveis: pavimentos que ao receber ações de cargas externas sofrem em todas as suas camadas deformações significativas do tipo elástica, além de distribuir as cargas em partes relativamente iguais entre as camadas.
- Semi-rígido: pavimento formado por duas camadas, uma base constituída por uma camada cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias e outra camada constituída por revestimento asfáltico.
- Rígido: pavimento que possui revestimento de alta rigidez, quando comparado com as outras camadas constituintes; ocasionando a absorção de todas as tensões geradas por cargas externas.

Bernucci *et al.* (2006) consideram a classificação dos pavimentos rodoviários em dois tipos básicos, os pavimentos flexíveis e os rígidos; além disso, complementa que atualmente esses pavimentos podem ser encontrados com as seguintes nomenclaturas: pavimentos asfálticos e pavimentos de cimento Portland respectivamente; e esta nomenclatura dos pavimentos são para enfatizar o tipo de revestimento aplicado. Esses autores, afirmam que os revestimentos dos pavimentos de cimento Portland (ou concreto-cimento), são formados por placas de concreto que podem possuir barras de aço ou não, e o dimensionado das espessuras dessas placas é realizado a partir das resistências a flexão das placas e das outras camadas constituintes. Comumente uma das subcamadas é classificada como sub-base, visto que a qualidade do material utilizado para a sua produção é equivalente à base dos pavimentos asfálticos.

Já os pavimentos asfálticos possuem o revestimento formado basicamente por uma mistura asfáltica composta por ligantes e agregados. E, este tipo de pavimento possui basicamente quatro camadas, sendo elas: reforço do subleito, sub-base, base e revestimento asfáltico. Bernucci *et al.* (2006) salientam, que essas camadas não necessariamente estariam representadas em todos os pavimentos asfálticos, pois dependendo dos materiais disponíveis e do tráfego do local pode ser dispensada alguma dessas camadas. As Figuras 2.23 e 2.24 mostram cortes de pavimentos de concreto de cimento Portland e asfáltico, respectivamente.

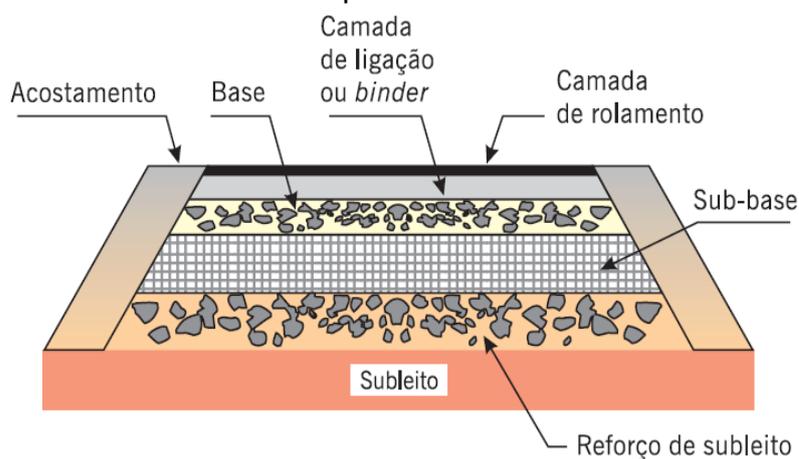
Figura 2.23 - Corte longitudinal de um pavimento Concreto-cimento



Fonte: Bernucci et al. (2006)

Na Figura 2.23 são representadas as camadas dos pavimentos de Concreto de cimento Portland composta pela camada de revestimento (placas de concreto), a sub-base e o subleito. Além disso, percebe-se outros elementos que auxiliam este tipo de pavimento como: as juntas de retração, o reservatório do selante, a imprimação asfáltica e as barras de aço.

Figura 2.24 - Corte transversal de um pavimento asfáltico



Fonte: Bernucci et al. (2006)

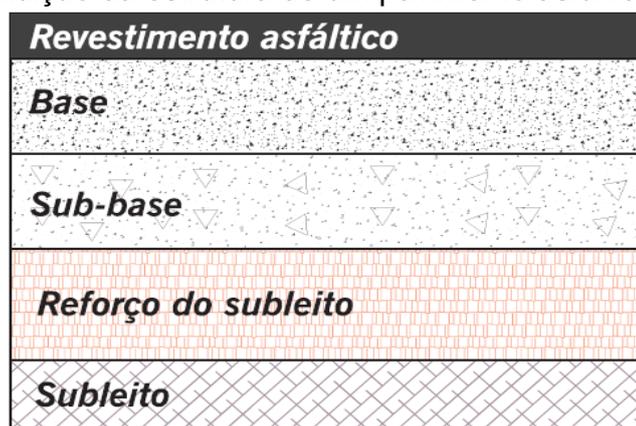
A Figura 2.24, apresenta as camadas do pavimento asfáltico. Nela observam-se a camada de rolamento ou *binder*, a camada de ligação, a base, a sub-base, o reforço de subleito e o subleito. Bernucci (2006) ainda acrescenta que a camada de ligação e a camada de rolamento são subpartes do revestimento asfáltico. Além disso,

afirma que o revestimento asfáltico além de receber e transmitir os esforços para as camadas inferiores, também impermeabiliza o pavimento.

2.2.1 Estrutura dos pavimentos flexíveis

A estrutura dos pavimentos asfálticos é formada por camadas e seu comportamento depende de algumas características individuais, como a espessura, a rigidez dos constituintes e a qualidade do subleito, além da interação entre essas camadas. Em conjunto, formam um sistema disposto sobre uma fundação, o subleito (BERNUCCI *et al.*,2006). A Figura 2.25 mostra a constituição de uma estrutura de um pavimento asfáltico.

Figura 2.25 - Constituição da estrutura de um pavimento asfálticos



Fonte: Bernucci et al. (2006)

A camada de revestimento do pavimento comumente está submetida a esforços de tração e compressão devidos à flexão, e o restante da estrutura do pavimento submetidos principalmente a compressão. Em alguns casos, pode-se realizar uma estabilização química de uma camada subjacente ao revestimento; e devido a isso, ela passará a ter uma melhor resistência aos esforços de tração, pois aumentará a coesão e a rigidez desta camada (BERNUCCI *et al.*,2006).

Bernucci *et al.* (2006) comentam que alguns estudiosos da área de pavimentação, tem classificado alguns pavimentos como semi-rígidos, e explica que essa nomenclatura se dá para os pavimentos que possuam o revestimento asfáltico e tenha em sua base ou sub-base materiais cimentados, que comumente são solicitados à tração. Diferentemente do pavimento de concreto-cimento, o pavimento

asfáltico não possui uma rigidez tão expressiva na camada de revestimento, fazendo com que as tensões recebidas de cargas externas sejam transferidas para as camadas subjacentes, proporcionalmente a sua rigidez. Além disso, as deformações que a estrutura está sujeita depende principalmente da espessura da camada analisada e da rigidez dos materiais que o forma. Bernucci *et al.* (2006), ainda enfatizam que os principais danos ocasionados pelas cargas externas são as deformações permanentes e a fadiga.

Para haver um bom dimensionamento dos pavimentos se faz necessário o conhecimento dos materiais que irão ser utilizados, bem como as suas propriedades, como a resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade, frente as ações provenientes dos efeitos do clima e repetições de cargas. (BERNUCCI *et al.*, 2006),

2.2.1.1 Revestimento

Balbo (2006) comenta que o revestimento deve receber as cargas estáticas e dinâmicas, sem sofrer deformações expressivas elásticas ou plásticas, nem a desagregação de seus componentes e perda de compactação; além disso, essas cargas devem ser transferidas para as camadas subjacentes. Os materiais deste tipo de pavimento devem ser escolhidos de forma que ofereça uma aglutinação ou que sejam dispostos a evitar movimentos horizontais. Tais materiais podem ser por exemplo: “pedras cortadas justapostas (caso dos pavimentos romanos), paralelepípedos, blocos pré-moldados de concreto, placas de concreto, concreto compactado com rolo, tratamento superficial betuminoso e misturas asfálticas em geral” (BALBO, 2006, p.36).

Os revestimentos asfálticos comumente são subdivididos em camadas para facilitar os processos construtivos, além de razão técnicas e econômica. A Tabela 2.6, demonstra as subdivisões do revestimento, juntamente com a definição e associações.

Tabela 2.6 - Termos aplicáveis a camadas de revestimento asfáltico

Designação do revestimento	Definição	Associações
Camada de rolamento	É a camada superficial do pavimento, diretamente em contato com as cargas e com ações ambientais	Camada de desgaste, capa de rolamento, revestimento
Camada de ligação	É a camada intermediária, também em mistura asfáltica, entre a camada de rolamento e a base do pavimento.	Camada de <i>binder</i> ou simplesmente <i>binder</i>
Camada de nivelamento	Em geral, é a primeira camada de mistura asfáltica empregada na execução de reforços (recapeamento), cuja função é corrigir os desníveis em pista, afundamentos localizados, enfim, nivelar o perfil do greide para posterior execução da nova camada de rolamento	Camada de reperfilagem ou simplesmente reperfilagem
Camada de reforço	Nova camada de rolamento, após anos de uso do pavimento existente, executada por razões funcionais, estruturais ou ambas	“Recape” e recapeamento são termos populares (usa-se também e expressão “pano asfáltico”, que muitas vezes parece comprometer menos)

Fonte: Balbo (2006)

2.2.1.2 Subleito

Constituído por materiais naturais, consolidado e compactado. Os esforços recebidos das camadas superiores serão aliviados em sua profundidade, comumente no primeiro metro (BALBO, 2006). Gerab (2014) define o subleito como o terreno de fundação do pavimento.

2.2.1.3 Reforço de subleito

Camada de melhor qualidade que servirá de reforço quando o subleito é formado por solos com baixa capacidade de suporte aos esforços verticais (cisalhamento). A principal função deste reforço é receber os esforços das camadas superiores e transferir somente a parcela a qual a fundação subjacente é capaz de suportar, ou seja, compatível com a sua resistência.

A utilização desta camada também está aliada a questões econômicas, visto que um subleito de baixa qualidade exigiria camadas de base e sub-base com espessuras maiores; executando-se o reforço, este realizará parcialmente a função do subleito e exigirá camadas de base e sub-base com espessuras menores, sendo comumente menos oneroso a execução de um reforço de subleito do que execução de espessuras maiores nas camadas superiores (BALBO, 2006).

2.2.1.4 Bases e sub-bases

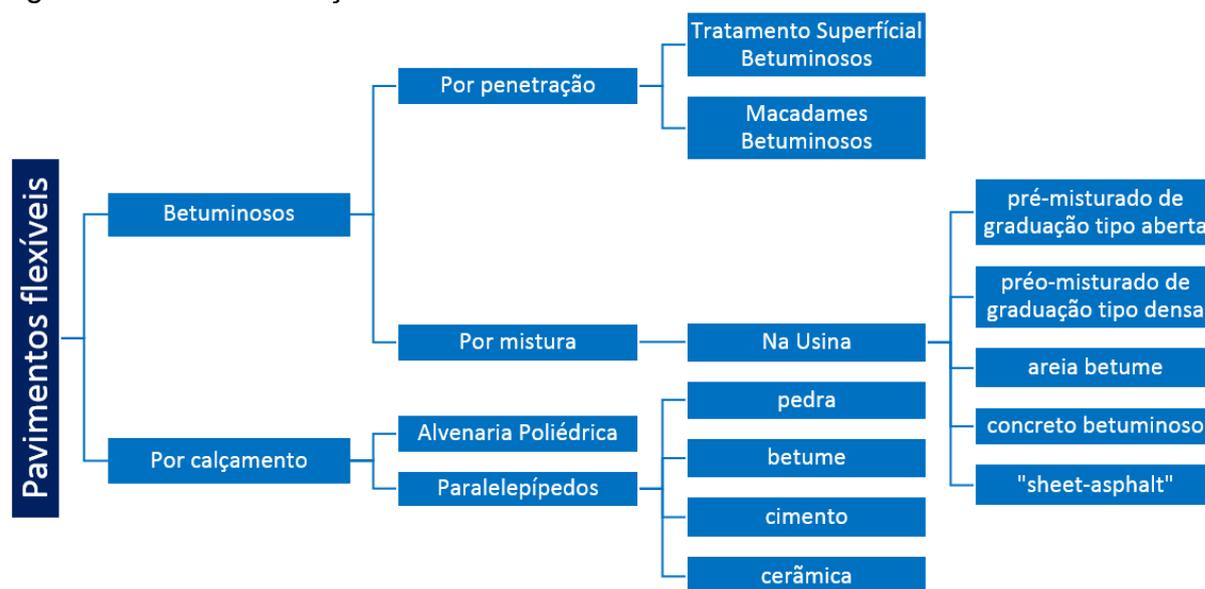
A base é responsável em receber os esforços transmitido do revestimento e repassar para a fundação; porém, para viabilidade técnica e econômica, costuma-se dividir essa camada do pavimento em duas, base e sub-base; sendo a sub-base uma camada de menor custo, quando comparada a execução de uma base com espessura suficiente a resistir os esforços oriundos do revestimento; além de transmissão dos esforços, essas camadas também executam papéis importantes na drenagem sub-superficial dos pavimentos (BALBO, 2006).

Balbo (2006) cita alguns materiais que comumente são utilizados para compor as bases de pavimentos. São eles: mistura de solo e brita, brita graduada, brita graduada tratada com cimento, concretos, solos quimicamente estabilizados com ligantes hidráulicos ou asfálticos, entre outros. A composição da sub-base pode ser realizada com os mesmos materiais citados para as bases.

2.2.2 Tipos de revestimentos

O DNIT (2006) classifica os revestimentos flexíveis em betuminosos ou por calçamento, além dessa divisão, o departamento apresenta algumas subdivisões que podem ser observadas na Figura 2.26.

Figura 2.26 - Classificação dos revestimentos flexíveis



Fonte: DNIT (2006).

2.2.2.1 Revestimentos Betuminosos

Os revestimentos betuminosos são formados por uma associação entre material betuminoso e agregados. O DNIT (2006) apresenta duas maneiras clássicas para realização desta associação entre agregado e material betuminoso. São eles:

- Revestimento por penetração

Nesta modalidade, a associação pode ocorrer por penetração invertida e por penetração direta.

- Revestimento betuminoso por penetração invertida: neste tipo de associação aplica-se mais de um material betuminoso, e posteriormente executa-se operações idênticas de espalhamento e compressão de camadas de agregados com granulometria adequada. Dependendo do número de camadas, apresenta-se o tratamento superficial simples, duplo ou triplo.
- Revestimento betuminoso por penetração direta: neste tipo de associação o revestimento é executado pelo espalhamento e compactação de camadas de agregados com granulometria adequada. Ao término da compactação de cada

camada é aplicado material betuminoso, e posteriormente aplica-se a última camada e uma aplicação final de agregado miúdo.

- Revestimento por mistura

Neste tipo de execução de revestimentos, os agregados são previamente envolvidos por um material betuminoso e posteriormente comprimido. Esse processo de prévio de envolvimento dos agregados, pode ser do tipo pré-misturados propriamente ditos (que é realizada através de uma usina) ou pré-misturados na pista (*road mixes*) que é realizando *in loco*, na própria pista que será aplicado. Além disso, existe a separação de acordo com a temperatura de aplicação. Temos o pré-misturado a frio (agregados e ligantes permitem que o espalhamento seja feito a frio, ou seja, em temperatura ambiente), e o pré-misturado a quente (a mistura dos materiais e seu espalhamento é realizado ainda quente).

Os revestimentos pré-misturados propriamente ditos e os pré-misturados em pista ainda pode ser classificado como graduação aberta ou densa; as densas comumente não requerem capa selante, requisito esse obrigatório em graduação aberta. O Concreto Betuminoso Usinado à Quente - CBUQ ou também denominado de Concreto Asfáltico é um exemplo para um revestimento flexível por mistura, pré-misturado propriamente dito, a quente e com a graduação densa.

2.2.2.2 Revestimento por calçamento

O revestimento por calçamento tem como elemento principal a pedra, porém pode ser subdividido em dois, o revestimento por alvenaria poliédrica e o revestimento por paralelepípedo. Atualmente esse tipo de revestimento é pouco usual em rodovias, pois houve um aumento na utilização dos pavimentos asfálticos e de concreto, sendo executados em ruas secundárias, pátios e alguns acessos viários. Este tipo de pavimento pode ser classificado em dois tipos. São eles (DNIT, 2006):

- Alvenaria Poliédrica

Revestimento formado por camadas de pedras irregulares (dentro da tolerância permitida) que são assentadas e comprimidas sobre a camada de regularização; as juntas são constituídas por lascas de pedras e com o próprio material da regularização.

- Por paralelepípedo

Diferentemente do revestimento de alvenaria poliédrica esse tipo de revestimento é formado por blocos regulares que são assentados sobre a regularização (material granular apropriado). Neste tipo de revestimento, tem-se mais possibilidades de materiais para a elaboração das juntas, podendo ser do material do próprio colchão de regularização, pedrisco, argamassas de cimento Portland ou misturas betuminosas. Comumente os blocos de paralelepípedos são feitos das seguintes rochas: granito, gnaisse ou basalto.

2.2.3 Concreto asfáltico e suas propriedades

Concreto betuminoso usinado a quente é uma mistura asfáltica a quente constituída por agregados (graúdo e miúdo), material de enchimento, quando necessário, e ligante betuminoso, realizado em usina adequada. Tal mistura deve ser feita, espalhada e compactada a temperatura adequada (DNIT, 2006a).

O concreto asfáltico pode ser utilizado em várias partes da estrutura do pavimento, tais como: revestimento, base, regularização, camada de ligação (*binder*) e reforço do pavimento. Para a sua execução é indispensável que a temperatura ambiente esteja superior a 10° C e que não esteja chovendo. (DNIT, 2006a).

De acordo com o DNIT (DNIT, 2006a) podem ser utilizados os seguintes materiais para a constituição do concreto asfáltico:

- Cimento Asfáltico: CAP - 30/45; CAP - 50/70 e CAP - 85/100;
- Agregado graúdo: agregados com desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50% (DNER, 1995), podendo ser utilizados agregados com valores superiores a 50% desde que seja comprovado desempenho satisfatório em utilizações anteriores; índice de forma acima a 0,5 (DNER, 1994) e que ofereça durabilidade, ou seja, perda inferior a 12% (DNER, 1994b);
- Agregado miúdo: podem ser utilizados areia, pó de pedra ou a mistura dos dois. Deve apresentar-se livre de torrões de argila e substâncias nocivas, e suas partículas devem demonstrar resistência. Além disso, deve apresentar equivalente de areia igual ou acima de 55% (DNER, 1997);
- Material de enchimento: o material escolhido deve ser finamente dividido e isento de grupos; quando forem utilizados devem estar secos. Pode se utilizar o cimento Portland, cinzas volantes, pós-calcários, cal, entre outros (DNER, 1997a)

Além dos materiais anteriormente citados, podem ser utilizados melhoradores de adesividade, quando especificado no projeto.

Wesseling (2005) relata que existe diversas variáveis que afetam as propriedades das misturas asfálticas, sendo algumas dessas especificadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Variáveis que afetam as propriedades das misturas asfálticas

Propriedade	Definição	Exemplo de variáveis de mistura que têm influência
Rigidez	Relação entre tensão e deformação à determinada temperatura e tempo de carregamento	Granulometria; rigidez do asfalto. Grau de compactação; sensibilidade à água; teor de ligante
Estabilidade	Resistência à deformação permanente (geralmente a altas temperaturas e longos tempos de carregamento)	Textura superficial do agregado; granulometria; rigidez do asfalto; grau de compactação; sensibilidade à água; teor de ligante
Durabilidade	Resistência ao intemperismo (ar, água) e a ação abrasiva do tráfego	Teor de ligante; granulometria; grau de compactação; sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Habilidade da mistura deformar sob carregamento repetido sem romper	Granulometria; teor de ligante; grau de compactação; rigidez do asfalto; sensibilidade à água

Propriedade	Definição	Exemplo de variáveis de mistura que têm influência
Características de fratura	Resistência da mistura sobre aplicação de carga	Granulometria; tipo de agregado; teor de ligante; grau de compactação; rigidez do asfalto; sensibilidade à água
Atrito	Habilidade da mistura de prover adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	Textura do agregado e resistência ao polimento; granulometria; teor de ligante
Permeabilidade	Habilidade do ar, água e vapor d'água mover-se através da mistura	Granulometria; teor de ligante; grau de compactação

Fonte: Monismith *et al* (1989 apud Wesseling, 2005).

No Brasil a dosagem de misturas asfálticas é comumente realizada pelo método Marshall. Este método, considera alguns parâmetros para melhorar o desempenho da mistura. A seguir serão descritos os parâmetros segundo Marinho (2011) e seu equacionamento de acordo com Stefenon (2003):

- Granulometria: a sua dosagem deve ser realizada de tal forma que fique próxima a máxima densidade: Isto é realizado para garantir melhor estabilidade;
- Densidade aparente: parâmetro que considera os vazios com ar;
- Densidade máxima teórica da mistura - DMT: densidade sem a presença do ar nos vazios da mistura. A densidade máxima teórica é calculada de acordo com a Equação 2.1.

$$"DMT" = \frac{100}{\frac{100 - "%asfalto"}{"densidade efetiva"} + \frac{"%asfalto"}{"densidade do asfalto"}} \quad (2.1)$$

Onde:

- “DMT” = densidade máxima da mistura sem vazios;
- “%asfalto” = porcentagem de ligante a ser adicionada na confecção do corpo-de prova;
- “Densidade do asfalto” = densidade do ligante, considerada 1,02;
- “Densidade efetiva” = massa específica efetiva do agregado da mistura (em g/cm³) dividida pela massa específica da água (considerada 1,00 g/cm³).

- Volume de vazios da mistura (V_v): é o parâmetro que relaciona o volume de ar existente numa mistura compactada com o volume total. Para camadas de rolamento, esta relação deve variar de 3% a 5%, e para camadas de ligação (*binder*) de 4% a 6%. “Este volume de vazios assegura que não ocorrerá afluência do ligante à superfície da mistura, devido à expansão decorrente do aumento da temperatura de serviço” (MARINHO, 2011, p. 69). Ainda de acordo com esse autor, o elevado volume de vazios na mistura poderá ocasionar a deterioração prematura, gerado pelo rápido endurecimento, desintegrando o revestimento. O volume de vazios é calculado de acordo com a Equação 2.2.

$$V_v\% = \frac{\text{"densidade máxima teórica"} - \text{"densidade aparente da mistura"}}{\text{"densidade máxima teórica"}} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

- $V_v\%$ = volume de vazios da mistura ocupado pelo ar, em %;
 - “Densidade máxima teórica” = densidade máxima da mistura sem vazios;
 - “Densidade aparente da mistura” = densidade do corpo de prova.
- Vazios de agregado mineral ($VAM\%$): parâmetro que descreve a relação entre os vazios intergranulares da mistura compactada, que inclui o volume de ar e de asfalto, em relação ao volume total. Esta relação é influenciada pelo tamanho máximo nominal - TMN do agregado, pois quanto maior o TMN menor o $VAM\%$. Para o DNIT (DNIT, 2006) esta relação deve variar de 13% a 18%. Calcula-se o VAM através da Equação 2.3.

$$VAM\% = V_v\% + \frac{\text{"%asfalto"} \times \text{"densidade aparente da mistura"}}{\text{"densidade do asfalto"}} \quad (2.3)$$

Onde:

- $VAM\%$ = volume total de vazios formado pelo agregado, em %;
- $V_v\%$ = Volume de vazios da mistura ocupada pelo ar, em %;

- “%asfalto” = porcentagem de ligante a ser adicionada na confecção do corpo de prova;
 - “Densidade aparente da mistura” = densidade do corpo de prova;
 - “Densidade do asfalto” = densidade do ligante, considerada 1,02.
- Relação betume/vazios (RBV%): retrata a porcentagem de vazios do agregado mineral que são ocupados pelo cimento asfáltico. Este parâmetro é importante visto que valores baixos de RBV% acarretará a diminuição da durabilidade, e valores altos afetará diretamente a estabilidade da mistura. Marinho (2011) diz que o RBV% deve variar de 75% a 82% para camadas de rolamento e 65% a 72% para de ligação. A relação betume/vazios é calculada pela Equação 2.4.

$$RBV\% = \frac{VAM\% - Vv\%}{VAM\%} \quad (2.4)$$

Onde:

- RBV% = porcentagem de vazios do agregado mineral preenchido com ligante;
 - VAM% = volume total de vazios formado pelo agregado, em %
 - Vv% = volume de vazios da mistura ocupada pelo ar, em %.
- Fluência Marshall: Deformação total apresentada pelos corpos de provas ensaiados, desde a aplicação da carga inicial (nula) até a carga máxima suportada pelo mesmo. Esta propriedade é expressa em décimos de milímetros (centésimos de polegada). A fluência Marshall é calculada com a Equação 2.5.

$$\text{"Fluência"} = \text{"leitura do extensômetro"} \times \text{"fator de conversão"} \quad (2.5)$$

Onde:

- Fluência” = deformação máxima que sofre o corpo de prova até a ruptura, em 1/100;
- “Leitura do extensômetro” = deformação máxima na ruptura em milímetros;

- “Fator de conversão” = constante mm/centésimo de polegada = 1,00/0,254.
- Estabilidade Marshall - EM: Propriedade correspondente a compressão radial, apresentada por corpos de provas ensaiados segundo as recomendações da DNER – ME 043/95 (DNER, 1995), e expressa em N ou kgf, calculada a partir da Equação 2.6.

$$EM = \text{"leitura extensômetro"} \times \text{"constante anel"} \times \text{"fator correção"} \quad (2.6)$$

Onde:

- EM = carga de ruptura do corpo de prova, expressa em kgf ou N;
- “Constante do anel” = constante do anel dinamométrico;
- “Fator de correção” = correção da estabilidade em função da altura ou do volume do corpo de prova conforme o DNER.

2.2.4 Aplicação de resíduos na construção civil

Devido ao grande volume de resíduos gerados nos diversos setores produtivos no Brasil e no mundo, aliados aos impactos ambientais ocasionados pela disposição incorreta dos mesmos, pesquisas estão sendo desenvolvidas para avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso desses resíduos na construção civil; visto que se aplicados, reduzem a extração de matérias-primas e minimizam a problemática da disposição inadequada. A seguir serão descritos alguns dos estudos nacionais e internacionais que foram realizados com as finalidades anteriormente citadas.

2.2.4.1 Estudos Nacionais e Internacionais

Menezes *et al.* (2007) utilizaram o resíduo do beneficiamento do caulim e a serragem do granito na produção de blocos e telhas cerâmicas. Os resíduos foram provenientes de indústrias de beneficiamento do Estado da Paraíba/PB; para a realização da pesquisa, também foi utilizada a argila vermelha. Foram feitos ensaios

de caracterização física, química e mineralógica. Os autores fizeram corpos de provas com a incorporação dos resíduos, nas seguintes porcentagem em massa para ambos os resíduos: 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, 20% e 25%. Analisou-se os corpos de prova tanto com os dois resíduos, como somente com a incorporação do caulim. Os corpos foram submetidos a ensaios de absorção e ruptura a flexão.

Menezes *et al.* (2007) concluíram que a composição do resíduo de caulim é basicamente caulinita, quartzo e mica; já o granito é composto por calcita, mica, albita e quartzo. Além disso, os corpos de provas com os dois resíduos apresentaram absorção crescente com o aumento dos teores de resíduos, porém apresentaram valores de absorção inferiores aos corpos de provas somente com o a incorporação do caulim. Com relação ao módulo de ruptura, observou-se valores maiores para as amostras com os dois resíduos, mas com o aumento dos teores de resíduos, este módulo diminui. Após a queima, os módulos de ruptura são afetados pela incorporação dos dois resíduos, visto que a queima a temperatura de 800°C para os dois resíduos, foram alcançados valores de módulos somente atingidos pelo resíduo do caulim isoladamente a 1000° C. Além disso, os autores afirmam que existe viabilidade para a produção de tijolos furados e maciço, e telhas com os resíduos, desde que não ultrapasse 50% de adição.

Menezes *et al.* (2007a) utilizaram o resíduo do beneficiamento do caulim para a produção de blocos e tijolos cerâmicos, com teores de incorporação de resíduo de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40% e 50% em peso do resíduo, em conjunto com a argila vermelha. Os autores realizaram ensaios de caracterização física, química, mineralógica e térmica.

Os corpos de provas da pesquisa foram analisados através de ensaios de absorção de água e módulo de ruptura à flexão. Após as análises, os autores observaram que o resíduo utilizado possui como principais minerais o quartzo, a mica e a caulinita, e que a incorporação do resíduo para este tipo de produção se torna válido até 50% incorporação.

Menezes *et al.* (2007b) utilizaram o resíduo do beneficiamento de caulim e a alumina para a produção de corpos mulíticos. De acordo com os autores, corpos mulíticos apresentam diversas aplicações devido as suas propriedades. A mulita é termodinamicamente estável, sendo a única fase cristalina apresentada pelo sistema $Al_2O_3 - SiO_2$. Entre as suas características e propriedades, pode-se citar ponto de

fusão em torno de 1800° C, baixo coeficiente de expansão térmica, elevada resistência mecânica e ao choque, baixa densidade entre outras características que elevam o valor dos múltiplos entre os materiais cerâmicos.

Esses autores realizaram formulações com os dois materiais utilizados e homogeneizaram por mistura via úmida. Para o resíduo do caulim e a alumina foram utilizadas as seguintes porcentagens em massa consecutivamente: 54, 50, 46, 42 e 38%; 46, 50, 54, 58 e 62%. Os corpos de provas foram moldados e sintetizados com as seguintes especificações: taxa de aquecimento de 5° C/min, patamar de 2h e temperaturas de 1450, 1500, 1550 e 1600 °C. Depois da queima, realizou-se ensaios de DRX, densidade aparente, módulo de ruptura a flexão, retração de queima e absorção de água.

Menezes *et al.* (2007b) concluíram que é possível a utilização do resíduo do beneficiamento do caulim com a alumina neste tipo de aplicação, porém para formulações superiores a 40%. Além disso, enfatizaram que é possível compor corpos múltiplos sem quartzo ou alumina residuais, mas para isso, é necessário adequar as combinações das matérias-primas. Através da pesquisa, também se concluiu que as amostras que possuíam maiores teores de alumina apresentaram maiores resistências mecânica à flexão, cerca de 75 MPa.

Freitas e Motta (2008) realizaram um estudo sobre o uso de escória de aciaria em misturas asfálticas e módulo elevado. As autoras enfatizaram que a utilização dessas escórias é de suma importância no contexto ambiental, visto que ao utilizá-las como agregados em obras rodoviárias, contribui-se para a manutenção das jazidas, e a redução de custos. Além disso, acrescentam que essa utilização reduz a busca por novas jazidas de materiais de construção e reduzem as pilhas de depósitos nos pátios das siderúrgicas. As autoras comentam que além do estudo que elas desenvolveram, Castelo Branco (2004) e Nóbrega (2007) tiveram sucesso em análises com o mesmo material.

A técnica de módulo elevado (*enrobé a module élevé - EME*) foi desenvolvida na França desde a década de 80, e permite a construção de pavimentos com maior rigidez e bom comportamento em relação a vida de fadiga quando comparado aos pavimentos convencionais de concreto asfálticos, e este método é utilizado em camadas de base ou ligamentos de pavimentos. A rigidez obtida no método do EME se dá pela aplicação de ligantes asfálticos de baixa penetração, dando-lhes boas

características mecânicas e menor espessura do que os convencionais. Uma das principais preocupações no uso de escória de aciaria em pavimentos é o seu potencial expansivo, que comumente é causado pela existência de CaO e MgO (FREITAS; MOTA, 2008).

Freitas e Motta (2008) também analisaram as misturas asfálticas com a escória de aciaria através do Módulo de Resiliência, Resistência à tração estática por compressão diametral, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e compressão axial estática. As autoras, em seu estudo, concluíram que a escória utilizada se apresentou uma boa alternativa como agregado em EME, obtendo propriedades físicas e mecânicas tão boas quanto as dos agregados convencionais utilizados.

Resende *et al.* (2008) utilizaram o resíduo do beneficiamento do caulim da Paraíba (PB) como matéria-prima alternativa na fabricação de blocos de vedação. Realizou-se ensaios de caracterização física e química do resíduo, além da sua classificação com a sua periculosidade ambiental. Fabricou-se blocos utilizando cimento e areia, e para atestar a viabilidade do resíduo para este fim, substituiu-se a areia pelo resíduo e realizou-se ensaios de resistência e absorção. Com a pesquisa, concluiu-se que o resíduo não é perigoso, nem inerte, e que a substituição de até 70% da areia pelo resíduo do beneficiamento de caulim é viável para a produção de blocos cerâmicos de vedação.

Martins e Santos (2012) realizaram a caracterização física, química e mecânicas de resíduos oriundos de beneficiamento de feldspato e quartzo, com o intuito de aplica-los em pavimentação. Neste estudo, os autores concluíram que no ponto de vista químico o resíduo é classificado como de Classe II A, ou seja, um resíduo do tipo não inerte e não perigoso. Com relação as características físicas e mecânicas, o material apresentou-se com elevados valores de Índice de Suporte Califórnia - ISC, comparado com os ISCs de solos de formação Palermo. Além disso, o estudo comprova bons valores de Resistência à Compressão Simples - RCS com 4% de cimento.

Os autores, acrescentaram que o resíduo estudado apresentou boas condições para ser aplicado em pavimentação, e que os melhores resultados foram encontrados a 2% abaixo da umidade ótima; sendo o valor máximo de adição de 4%, pois valores mais elevados podem modificar o Potencial Hidrogeniônico - pH, tornando-o corrosivo.

Os autores ainda ressaltam que mesmo com a adição de cimento, as amostras apresentaram a concentração de Alumínio superior ao limite máximo estabelecido pela NBR 10004/2004 (ABNT, 1994).

Linhares e Silva (2014) estudaram a aplicação do rejeito proveniente do beneficiamento da scheelita da Mina Brejuí - Currais Novos/RN, em camadas granulares de pavimentos. Os autores realizaram ensaios granulométricos, determinação da plasticidade e liquidez, ensaios de compactação e índice de suporte Califórnia; e para isso, além do resíduo analisado, coletou-se solo na própria universidade em que se desenvolveu o estudo, a UFRSA.

Inicialmente, realizaram uma mistura de solo/rejeito de 60% e 40% respectivamente em massa e concluíram que a incorporação do resíduo do beneficiamento da scheelita no solo utilizado, não apresentou resultados satisfatório com relação ao aumento da capacidade de suporte do solo, impossibilitando o seu uso como material estabilizante; porém, os autores realizaram ensaios com o rejeito puro e com o rejeito com a adição de 1% de cimento em massa, o que favoreceu a utilização deste resíduo em camadas de pavimentos, apresentando valores de capacidade de suporte viáveis para camadas de sub-base e base.

Fontes *et al.* (2014), em um estudo sobre resíduo de mineração de ferro como matéria-prima alternativa no desenvolvimento de argamassas de revestimento e assentamento, visaram basicamente viabilizar a utilização desse material para produção de argamassas e assim diminuir a extração de matéria-prima, além de minimizar os impactos que esses rejeitos ocasionam ao meio ambiente. Para isso, realizaram ensaios de caracterização física e químico-ambiental do rejeito do beneficiamento do minério de ferro, que permitiu a determinação da composição do material, o qual é composto basicamente por Fe, Si e Al; a massa específica real e aparente apresentaram valores relativamente altos quando comparados com os agregados naturais. Além disso, pelas análises ambientais, pode-se classificar o rejeito como classe II A - não perigoso e não inerte.

Os corpos de provas de argamassas foram moldados com a proporção de 1:3, sendo constituída por cimento, cal hidratada, areia natural e o resíduo. A substituição da cal pelo resíduo variava em 0%, 10%, 20%, 50% e 100% e o agregado natural com traços de 100% de substituição. Os autores concluíram que é possível utilizar este rejeito como matéria-prima de argamassas, pois as mesmas tiveram resultados

satisfatórios, como por exemplo a mesma trabalhabilidade para as argamassas com agregados naturais e reciclados, e desempenho mecânico superior para a composição contendo o rejeito estudado; além disso, a utilização desse rejeito minimiza os impactos ambientais e custos com a manutenção das barragens de contenção.

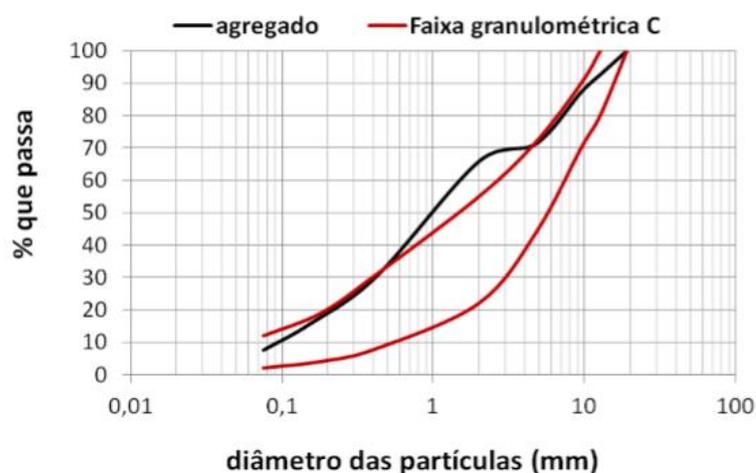
Toffolo *et al.* (2014) desenvolveram um estudo sobre a viabilidade técnica da utilização do resíduo do beneficiamento do minério de ferro como agregado na construção civil, para a fabricação de blocos de concretos para pavimentação. O resíduo foi coletado e utilizado *in natura*, ou seja, não passou por um processamento para retirar a fração metálica existente. Realizaram-se análises de caracterização física, química e mineralógica, e ensaios mecânicos para avaliar a viabilidade do produto fabricado. As dosagens do resíduo nos traços foram de 10%, 50%, e 80%. Os autores observaram que a composição do resíduo era basicamente de Si₂O (63,88%), Fe₂O₃ (34,81%), SO₃ (1,15%) e CaO (0,15%). Os principais constituintes minerais da amostra utilizada na pesquisa foram Fe₂O₃ (Hematita) e SiO₂ (Quartzo), ocasionando respectivamente o elevado peso específico e o arcabouço sólido da matriz cimentícia. Além disso, pode-se concluir que o resíduo é da classe II A - não perigoso e não inerte.

Os blocos produzidos com o resíduo apresentaram menos poros do que os blocos padrões, e atenderam aos limites normativos, porém para tempos de cura elevados. As amostras aos 70 dias de curas, atingiram o limite de resistência exigido por normas, com exceção dos corpos de provas que continham 80% do resíduo do beneficiamento do minério de ferro, atingindo 48,9 MPa. Diante das análises, os autores concluíram que é possível utilizar o referido resíduo em blocos intertravados de concreto para pavimentação.

Tapahuasco *et al.* (2014) utilizaram o resíduo do beneficiamento de pedras ornamentais e do corte de granito, consecutivamente como agregado artificial e fíler para concreto asfáltico. O referido estudo, teve como objetivo viabilizar o uso do resíduo produzido pela pedreira do município de Colatina/ES. O resíduo foi coletado e submetido a diminuição das partículas através de um britador. Depois disso, realizou-se ensaios físicos e de caracterização do ligante, e por fim, ensaios de estabilidade utilizando a prensa Marshall, com traço semelhante ao da recuperação de trechos da BR - 116.

Com a análise granulométrica (Figura 2.27) foi possível perceber que o resíduo britado não estava dentro dos limites da norma do DNIT 031/2006 (DNIT, 2006a) para a produção de camadas de rolamento, porém o mesmo enfatiza que apesar de não estar completamente na faixa, o mesmo apresentava comportamento quase semelhante ao exigido.

Figura 2.27 - Correlação entre a curva granulométrica do agregado britado e a faixa granulométrica de mistura C (DNIT 031/2006 - ES)



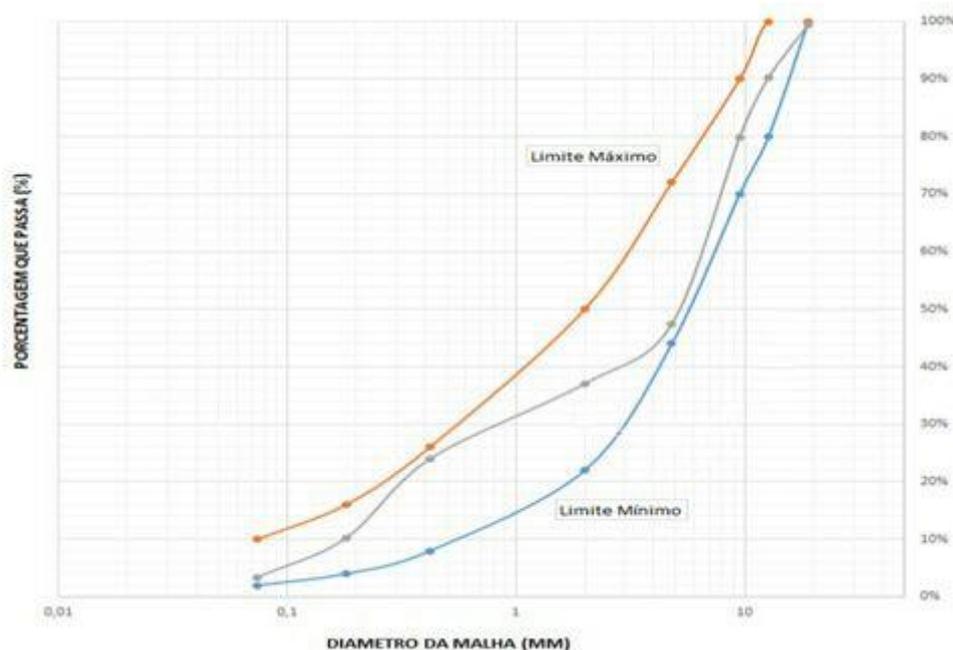
Fonte: Tapahuasco *et al.* (2014)

Com o estudo, foi possível concluir que os agregados possuem um formato cúbico, e esta característica é ótima para os agregados que compõe a pavimentação asfáltica, pois permite um melhor intertravamento entre os agregados durante a compactação. Os agregados demonstraram baixa absorção e resistência a abrasão *Los Angeles* de 37%. As massas específicas reais dos agregados graúdo e miúdo em condição seca foram respectivamente: 2,89 e 2,84 g/cm³. Os ensaios com o ligante demonstraram-se dentro dos limites requisitados por norma para a produção de misturas asfálticas (TAPAHUASCO *et al.*, 2014).

Com relação aos resultados de fluência e estabilidade Marshall, as amostras obtiveram respectivamente 6,25 mm para uma camada de 61 mm e 11.554,34 N ou 1.155,4 Kgf. Os autores concluíram que é possível a utilização destes resíduos em pavimentação asfáltica e que o pavimento projetado com os resíduos apresentou fluência menor e estabilidade maior quando comparado a recuperação realizada em um dos trechos da BR - 116, que foram respectivamente: 730,0 Kgf, e a fluência de 7,2 mm.

Lourenço e Cavalcante (2014) aplicaram o agregado reciclado de resíduo da construção e demolição em camadas de rolamento de pavimento, com o objetivo de verificar a sua viabilidade técnica para esse tipo de aplicação. Os autores realizaram a caracterização física do agregado e do ligante utilizado. A classe do agregado escolhido foi a C (Figura 2.28), a mesma selecionada por Tapahuasco *et al.* (2014).

Figura 2.28 - Correlação entre a curva granulométrica do agregado reciclado e a faixa granulométrica de mistura C



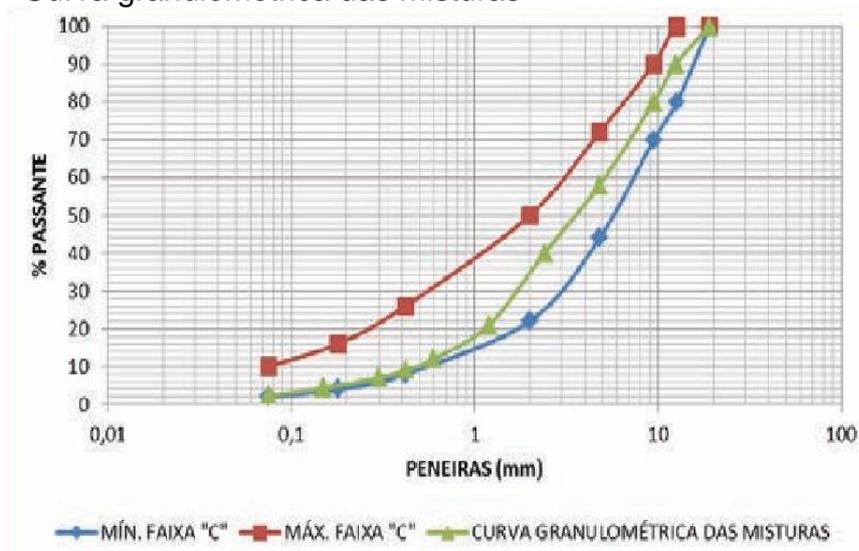
Fonte: Lourenço e Cavalcante (2014)

De acordo com os autores, o agregado utilizado possui índice de forma igual a 2,4 satisfazendo as exigências da norma NBR 15116 para obter melhor intertravamento dos agregados na mistura. Os valores de absorção e massas específicas reais dos agregados graúdos e intermediários foram respectivamente: 8,69% e 2,50 g/cm³, 10,07% e 2,56 g/cm³. Ainda na caracterização do agregado, a resistência a abrasão foi de 41,29%, estando dentro o limite estipulado pelo DNIT. Lourenço e Cavalcante (2014) concluíram que a adesividade do ligante foi satisfatória e que através dos resultados prévios da pesquisa, os agregados reciclados utilizados apresentaram as condições necessárias para a aplicação em pavimentação asfáltica.

Lobo, Motter e Miranda (2015) estudaram a utilização do agregado reciclado de concreto (ARC) em CBUQ. Os autores comentam que o uso deste resíduo em estrutura de pavimentos já é feito no Brasil, principalmente em camadas de base, sub-

base e reforço do subleito de baixo volume de tráfego. Lobo, Motter e Miranda (2015), realizaram dosagem Marshall com substituição de 50% e 100% de ARC, sendo que os resíduos utilizados para a produção dos agregados oriundos de concretos com resistência mecânica variando de 30 a 40 MPa. Neste estudo, também foi adotado a composição C do DNIT, apresentando a curva granulométrica da mistura dentro dos limites máximo e mínimo, como observa-se na Figura 2.29.

Figura 2.29 - Curva granulométrica das misturas



Fonte: Lobo, Motter e Miranda (2015)

As dosagens de ligante das misturas contendo o agregado reciclado de concreto foram as seguintes: 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% e 7,0%; já para a mistura de referência, a dosagem do ligante variou de 4% a 6%. O CAP utilizado foi o 50/70. Além da caracterização dos materiais utilizados (reciclado e natural), foram analisadas as propriedades volumétricas da mistura, estabilidade e fluência Marshall. Com a referida pesquisa, os autores encontraram os teores ótimos de ligantes para cada composição de mistura, sendo estes variando entre 4,9 a 6,9%. As resistências médias à tração estática por compressão diametral, variaram de 1,38 a 1,54 MPa, aumentando com a substituição dos agregados.

Através dos resultados obtidos pelo ensaio de dano por umidade, foi observado que a utilização do agregado ARC melhorou a adesividade dos corpos de prova, quando comparados com os corpos de prova com agregados naturais, sendo satisfatório com a substituição de 100% dos agregados miúdos, e insatisfatório para

a mistura de 100% do graúdo. Os módulos de resiliência variaram de 3.464 Mpa a 4.373 MPa, sendo o maior valor apresentado pela amostra de referência, concluindo assim que a mesma possui maior capacidade de suporte.

Souza, Sousa e Kato (2015) realizaram ensaios com o resíduo do beneficiamento do cobre, em substituição do agregado fino natural (a areia), em misturas asfálticas. O conhecimento das características do agregado utilizado é de suma importância para compreender o comportamento futuro das misturas asfálticas contendo agregado mineral, visto que de acordo com Souza, Sousa e Kato (2015), o agregado mineral comumente ocupa 75% do volume e 88 a 96% em peso da mistura betuminosa, se tornando um dos principais responsáveis pelas propriedades futuras apresentadas pela mistura, além de ser o principal agente a suportar as cargas externas oriundas do tráfego.

Ainda segundo os autores, algumas características dos materiais utilizados têm grande influência nas propriedades da mistura; a granulometria do agregado por exemplo, pode causar alterações significativas nos ensaios de tração, fluência, resiliência, e deformação permanente da mistura. Além da granulometria do agregado, a forma e a textura do grão também terá a sua parcela de influência nas propriedades, visto que estas características estão diretamente relacionadas com a adesão do ligante a superfície do agregado.

As porcentagens de substituições por rejeito foram 0%, 10%, 20% e 25%. As dosagens ótimas de ligante resultantes para os corpos de prova variaram de 5,80% a 6,98%. Foi observado que a dosagem de ligante diminui quando o teor do rejeito fica entre 8 e 10, oferecendo maior resistência a massa e durabilidade. Também foi observado a redução da relação betume/vazio, além da porcentagem de vazios da massa asfáltica, características essas, importantes para aumentar a durabilidade, visto que reduz a possibilidade de penetração de agentes agressivos. A pesquisa com a adição do rejeito melhorou todas as características Marshall, apresentando estabilidades com valores superiores a 500 kgf; contudo a porcentagem de substituição que se mostrou mais viável foi a de 10%, visto que apresentou melhor contribuição para as propriedades.

Karashin e Terzi (2007) avaliaram a viabilidade do uso do resíduo do corte de mármore na produção de concretos asfálticos. Além deste material, os autores utilizaram o pó de calcário para realizar as devidas comparações. O pó de mármore

foi obtido úmido, depois lavado, e posteriormente passado pelo crivo 200, uma vez que o resíduo se apresentava bem heterogêneo na sua granulometria. A Tabela 2.8 apresenta a graduação de pó de mármore após a lavagem.

Tabela 2.8 - Gradação de pó de mármore após a lavagem

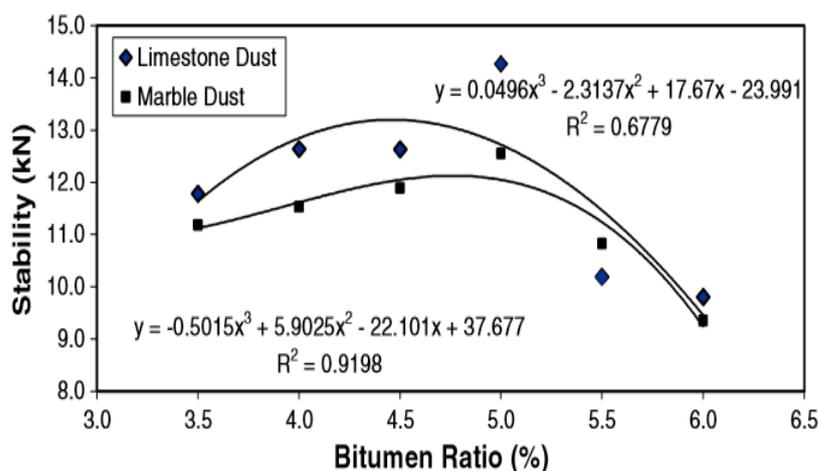
Abertura da peneira	% passante (por lavagem)
2,000 mm (Nº 10)	100
0,600 mm (Nº 30)	99,40
0,300 mm (Nº 50)	95,10
0,075 mm (Nº 200)	91,20

Fonte: Karasahin e Terzi (2007).

O procedimento experimental de estabilidade Marshall, demonstraram melhores resultado com a utilização do pó de calcário, apresentando valores maiores quando comparados com a do pó de mármore. A dosagem ótima de ligante observada para a composição contendo o pó de calcário foi de 4,7%. A Figura 2.30 apresentam os resultados dos testes de estabilidade Marshall realizado na pesquisa.

Por meio da Figura 2.30, pode-se perceber que os corpos de provas que continham o pó de calcário apresentaram maiores valores de estabilidade Marshall quando comparados com os que possuíam o pó de mármore. Os resultados encontrados pelos autores, demonstram que a deformação plástica dos corpos de prova com o resíduo de mármore se apresentaram entre os limites inferior e superior. Com base em todos os ensaios realizados, os autores concluíram que o resíduo de mármore pode ser utilizado como material de enchimento nas regiões em que este material está disponível e que possua baixo custo de transporte.

Figura 2.30 - Resultados dos testes de Estabilidade Marshall



Fonte: Karasahin e Terzi (2007).

Ahmedzade e Sengoz (2009) avaliaram a utilização da escória de aço como agregado graúdo em concreto betuminoso usinado a quente. Os autores utilizaram dois cimentos de asfalto, denominados pelo autor de AC-10 e AC-5, agregados de calcário e escórias de aço. Com o ensaio de microscopia eletrônica de varredura, os autores observaram que a textura da superfície da escória de aço é mais áspera do que o calcário, e enfatizam que é uma característica que afeta a capacidade de adesão da superfície com o cimento asfáltico. Ainda através do ensaio, pôde-se perceber que a escória de aço utilizada possuía uma abundância de poros. As amostras foram preparadas com os cimentos asfálticos citados, e em suas nomenclaturas foram adicionados LS para as amostras de controle e SS para as amostras com incorporação da escória de aço. Os resultados das propriedades Marshall das amostras são mostrados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Resultados - Propriedades Marshall (Adaptado)

Propriedade	Tipo de Mistura			
	AC-10/LS	AC-5/LS	AC-10/SS	AC-5/SS
Teor ótimo de ligante	5	4,85	5,8	5,2
Densidade do agregado (g/cm ³)	2,634	2,634	2,760	2,760
Vazio de ar (%)	2,53	2,97	2,93	3,29
Vazios no agregado mineral (%)	13,51	13,65	15,92	15,05
Estabilidade Marshall (kN)	17,46	16,50	20,19	19,54

Fonte: Ahmedzade e Sengoz (2009)

Com a Tabela 2.9 pode-se perceber que as amostras que possuíam a escória de aço apresentaram maiores valores de Estabilidade Marshall, sendo AC-10/SS a que apresentou melhor desempenho em questão.

Arabani e Azarhoosh (2012), analisaram o efeito dos agregados reciclados de concreto e da escória de aço sobre as propriedades dinâmicas de misturas asfálticas. De acordo com os autores, as misturas asfálticas contem cerca de 90% a 95% em peso e 75% a 85% em volume de agregado mineral, e que as propriedades dos agregados (miúdo e graúdo) tem influência significativa na performance do pavimento. Tais propriedades físicas são: durabilidade, resistência, forma das partículas, limpeza, absorção, graduação, entre outras.

Kandhal e Hoffman (2000 apud ARABANI; AZARHOOSH, 2012), disseram que é aconselhável utilizar a escória de aço somente como agregado fino, visto que a sua utilização universal como agregado pode gerar misturas susceptíveis a vazios de ar e

os seus efeitos de volume, que é ocasionado pela forma angular do agregado de escória.

Jegel (1993 apud ARABANI; AZARHOOSH, 2012) acrescenta que não são todos os tipos de escórias que podem ser utilizados em misturas asfálticas, visto que as mesmas podem conter quantidades significativas de magnésio e cal livre, podendo-se hidratar em ambiente húmidos, expandir e gerar rachaduras. Arabani e Azarhoosh (2012), utilizaram além dos agregados citados anteriormente, o dacito para a compor a mistura de controle, além de ser utilizado como fíler em todas as combinações.

Com os ensaios os autores concluíram que o teor de ligante ótimo para as combinações realizadas variaram de 5,1% a 6,5% e a estabilidade Marshall de 16,97KN (controle) à 22,81 KN (escória de aço - 57%, agregado reciclado de concreto - 37%, dacite - 6%, respectivamente: agregado grosso, fino e fíler). Esta última, apresentou maior estabilidade, maior teor de ligante ótimo, menor fluência dinâmica (4745 $\mu\text{m}/\text{m}$, 40% menor que a mistura de controle) e maior módulo de elasticidade (2.228 MPa). Com os resultados os autores concluíram que a mistura ideal das que foram analisadas possuem agregados finos reciclados de concreto, agregados grossos de escória e dacito como material de enchimento.

Modarres e Rahmanzadeh (2014) estudaram o efeito da aplicação do resíduo do carvão como fíler em misturas asfálticas a quente. Além do resíduo em pó, também foi utilizado as cinzas do resíduo, que foi obtido através de um processo de incineração do resíduo em pó a 450°, 750°, 950° e 1200° C, com o objetivo de reduzir o teor de carvão existente no resíduo. As composições das misturas analisadas no estudo são demonstradas na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Composição das misturas estudadas

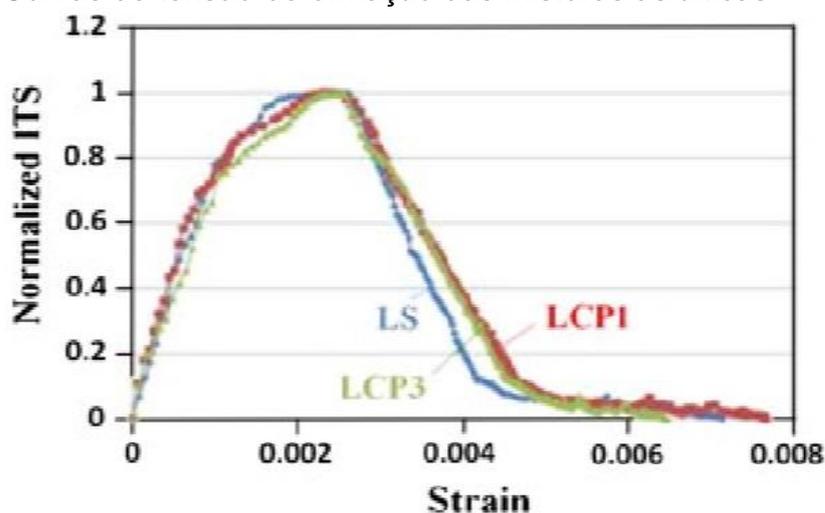
Nº da Mistura	Combinação do Fíler	Tipo de Mistura
1	100% de calcário	LS
2	75% de pó de resíduo de carvão, 25% de calcário	LCP1
3	50% de pó de resíduos de carvão, 50% de calcário	LCP2
4	25% de pó de resíduos de carvão, 75% de calcário	LCP3
5	100% de pó de resíduos de carvão	CP
6	100% de cinzas dos resíduos de carvão	CA

Fonte: Modarres e Rahmanzadeh (2014)

Os resultados obtidos para as estabilidades Marshall seguindo a ordem apresentado na Tabela 2.10, foram consecutivamente: 875, 891, 941, 1010, 1020 kgf,

sendo o maior valor alcançado pela mistura composta por 100% de cinzas dos resíduos de carvão. Através do ensaio de resistência a tração, os autores traçaram as curvas de tensão-deformação das misturas estudadas, como podem ser vistas na Figura 2.31.

Figura 2.31 - Curvas de tensão-deformação das misturas asfálticas



Fonte: Modarres e Rahmanzadeh (2014)

Modarres e Rahmanzadeh (2014) comentam que através da Figura 2.31, pode-se perceber que as curvas estudadas até um certo ponto possuíam o pico de tensão semelhante, porém, o ponto de ruptura foi diferente para cada mistura. Os módulos de elasticidade das misturas segundo a ordem da Tabela 2.10, foram consecutivamente: 1697, 1711, 1821, 2141 e 1980 MPa, sendo o maior valor alcançado pela amostra contendo 25% de pó de resíduos de carvão, 75% de calcário. Além disso, os autores concluíram que todas as amostras apresentaram resistências satisfatórias a umidade, e que todas que continham as cinzas dos resíduos do carvão apresentaram maiores valores de estabilidade e rigidez, comparados com os outros aditivos.

Chen *et al.* (2015), realizaram um estudo que buscava demonstrar a viabilidade técnica da utilização em conjunto do agregado graúdo de gnaiss e a escória de aço como agregado fino em misturas asfálticas. Foram utilizados três tipos de agregados finos, o de calcário, a escória de aço original e a escória de aço modificada por processos para melhoramento da qualidade (basicamente formado por peneiras e jatos de água).

A caracterização das escórias por meio da Fluorescência de Raio X - FRX possibilitou a classificação de ambas como de alcalinidade intermediária, estando na faixa de alcalinidade entre 1,8 e 2,5. Além disso, com os dados obtidos com a caracterização dos poros, foi observado que as escórias eram de material poroso e que essa característica está diretamente relacionada com a absorção de asfalto pelo material; a escória original se mostrou com um pouco mais de poros devido a camada de impurezas que nela continha.

Nos ensaios com o material asfáltico, os autores mostraram que os corpos de provas que continham a escória original apresentaram um consumo maior de ligante, quando comparado com a mistura com o calcário, e esse aumento foi em torno de 0,5%. Já as amostras com a escória modificada, apresentaram teores com 0,3% a mais do que a mistura comum (com o calcário). A Tabela 2.11 apresenta as propriedades volumétricas da mistura asfáltica.

Tabela 2.11 - As propriedades volumétricas das misturas asfálticas

Parâmetro	G1	G2	G3
Tipo de mistura	WSFA Original	WSFA modificado	Calcário
Teor de asfalto ótimo (%)	5,6	5,4	5,1
Vazios de ar (%)	4	4	4
Vazios no agregado mineral (%)	15,68	14,92	14,32
Vazios preenchidos com asfalto (%)	74,49	73,19	72,07

Fonte: Chen *et al.* (2015).

Nota: WSFA - escória

Com o ensaio de estabilidade Marshall, pode-se observar que as amostras com a escória modificada apresentaram valores superiores aos outros corpos de prova com materiais diferentes, chegando a valores de estabilidade de 14 kN. Chen *et al.* (2015) salientam que a estabilidade Marshall reflete a capacidade de suporte do asfalto. Além dos resultados comentados anteriormente, os autores concluíram que as amostras que possuíam a escória modificada alcançaram maior resistência coesiva.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

Esse trabalho refere-se a um estudo de viabilidade técnica para a utilização das frações do resíduo oriundo do beneficiamento da scheelita da Mineração Tomaz Salustino S/A, localizada no município de Currais Novos, Rio Grande do Norte.

O estudo buscou avaliar o uso das frações dos resíduos como agregados miúdos e fíler, em substituição ao agregado natural e fíler convencional na composição de concretos asfálticos, viabilizando a destinação dos resíduos produzidos pela empresa de mineração, visto que atualmente não existe uma destinação adequada, e estima-se de acordo com Gerab (2014) que existe no entorno da Mineração 4,5 milhões de toneladas de uma fração grossa do resíduo e cerca de 2,5 milhões de toneladas de uma fração fina.

Neste contexto, para o presente trabalho a substituição foi realizada da seguinte forma: o agregado miúdo natural foi substituído pela fração grossa do resíduo, e o cimento Portland (fíler convencional) foi substituído pela fração fina do resíduo, em composições de concretos asfálticos a serem definidos adiante. O estudo foi desenvolvido em quatro etapas, conforme descrito a seguir: a primeira consistiu na caracterização do resíduo do beneficiamento da scheelita; a segunda, na caracterização dos agregados naturais; a terceira, na caracterização do material asfáltico; e a quarta, na avaliação de composições de concretos asfálticos com incorporação dos resíduos do beneficiamento da scheelita e agregados naturais.

Os ensaios de caracterização (com exceção da caracterização química, mineralógica e térmica), conforme detalhes adiante, e o estudo com a incorporação dos resíduos na composição de concretos asfálticos foram realizados nos laboratórios de materiais de construção e pavimentação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN, campus Natal Central. Os ensaios de difração de raio X - DRX foram realizados no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica - LAMMEN, da Escola de Ciência e Tecnologia da UFRN,

os de Fluorescência de Raio X - FRX, Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV e Espectrometria de Energia Dispersiva - EDS foram realizados no Laboratório de Caracterização Estrutural dos Materiais, e, as análises térmicas por Termogravimetria - TG, foram realizadas no Laboratório de Análises Térmicas e Eletroanalítica - LATEL, ambos na UFRN.

As frações dos resíduos do beneficiamento da scheelita, bem como os agregados graúdos e o pó de pedra, foram coletados no dia 22 de setembro de 2015, consecutivamente na Mina Brejuí em Currais Novos/RN, e, no Britador Caicó, no município de Caicó/RN. O cimento asfáltico de petróleo, o cimento Portland CP IV e a areia natural foram cedidos pelo IFRN (Campus Central). A Figura 3.1 apresenta as duas frações dos resíduos estudados dispostas nos entornos da Mina Brejuí.

Figura 3.1 - Deposito de resíduo: (a) Fração grossa; (b) Fração fina.



Para coletar a fração grossa nas pilhas de resíduos, abriu-se uma cavidade em torno de 30 cm para remover o material superficial existente. Isto foi realizado na base, no meio e no topo da pilha recém-formada. O resíduo foi coletado e acondicionado em sacos de nylon com capacidade para 50 kg.

A coleta da fração fina do resíduo se fez nas bacias existentes no entorno da Mina Brejuí. O procedimento foi similar ao da fração grossa, ou seja, abriu-se uma cavidade na bacia em torno de 30 cm (Figura 3.1b) para remover o material superficial e as raízes existentes; depois disso, o resíduo foi acondicionado em sacos de nylon para facilitar o transporte e a estocagem no laboratório. O pó de pedra e as britas graníticas com graduações 0 e 1 também foram armazenadas em sacos de nylon com a mesma capacidade (50kg).

Para efeito de demarcação do espaço em que foi coletado o material da pesquisa, foram obtidos os dados de georreferenciamento a partir do *World Geodetic System - WGS 84* e pelo *Global Positioning System - GPS*. A Tabela 3.1 apresenta os dados de localização de coleta dos materiais.

Tabela 3.1 - Georreferenciamento dos pontos de coleta de material

Materiais	WGS 84		GPS
	Leste (m)	Norte (m)	Lat. e long.
Fração grossa do resíduo do benef. scheelita	771.590,22	9.300.380,99	6°19'25,01" S 36°32'42,66" W
Fração fina do resíduo do benef. scheelita	771.378,76	9.300.213,92	6°19'30,48" S 36°32'49,51" W
Pó de pedra	714.273,12	9.286.422,73	6°27'07,20" S 37°03'45,19" W
Brita com graduação 0	714.305,50	9.286.415,42	06°27'07,43" S 37°03'44,13" W
Brita com graduação 1	714.324,88	9.286.447,98	06°27'06,37" S 37°03'43,51" W

O material coletado foi devidamente identificado e acondicionado no laboratório de pavimentação do IFRN. A Figura 3.2 mostra os materiais utilizados na pesquisa, com exceção do cimento asfáltico de petróleo (CAP).

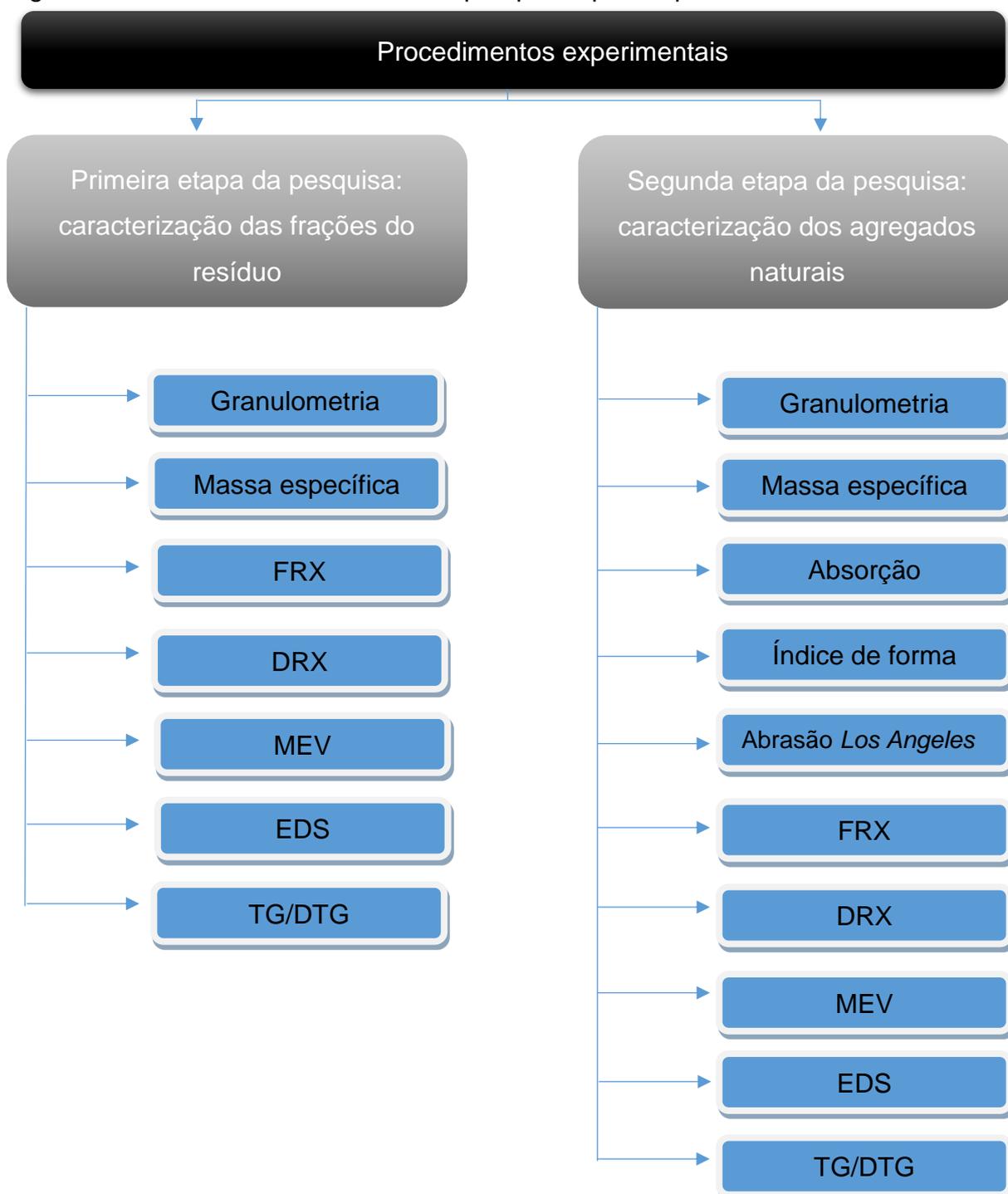
Figura 3.2 - Materiais de pesquisa depositado no laboratório de pavimentação do IFRN, Campus Natal Central: (a) brita 1; (b) pó de pedra; (c) resíduo - fração grossa; (d) areia; (e) brita 0; (f) resíduo - fração fina; (g) cimento Portland CP IV.

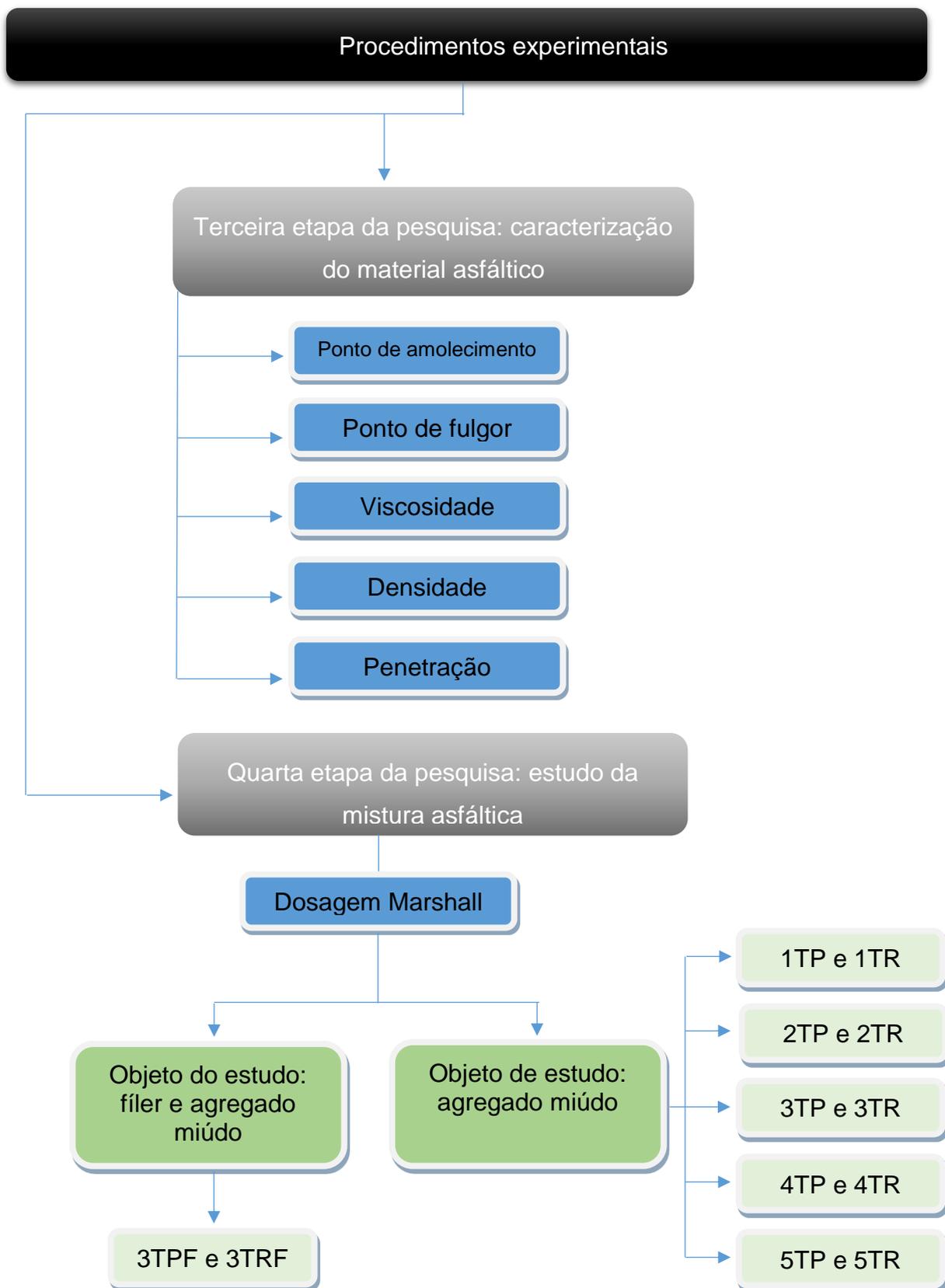


3.1 Procedimentos experimentais

As etapas da pesquisa, com os respectivos ensaios podem ser visualizadas na Figura 3.3. Diferentemente da Tabela 3.2 o fluxograma não apresenta o quantitativo dos ensaios e as normas que foram utilizadas. A função da Figura 3.3 é mostrar um panorama geral dos ensaios.

Figura 3.3 - Resumo das análises das pesquisas por etapa





Nota: 1TP - primeiro traço padrão; 2TP - segundo traço padrão; 3TP - terceiro traço padrão; 4TP - quarto traço padrão; 5TP - quinto traço padrão; 1TR - primeiro traço com resíduo; 2TR - segundo traço com resíduo; 3TR - terceiro traço com resíduo; 4TR - quarto traço com resíduo; 5TR - quinto traço com resíduo; 3TPF - terceiro traço padrão com fíler artificial; 3TRF - terceiro traço com resíduo e fíler artificial.

Tabela 3.2 - Etapas da pesquisa com seus respectivos ensaios e normas

Etapas	Ensaios	Quant. de Ensaios	Quant. Ensaios / Materiais		Normas
Caracterização das frações do resíduo do beneficiamento da scheelita	Granulometria	6	3 - Fração grossa	3 - Fração fina	NBR NM 248/03 (ABNT, 2003)
	Determinação da Massa Específica	6	3 - Fração grossa	3 - Fração fina	NBR 9776/87 (ABNT, 1987) NM 23/00 (ABNT, 2000)
	Difração de Raio X – DRX	2	1 - Fração grossa	1 - Fração fina	-
	Fluorescência de Raio X – FRN	4	2 - Fração grossa	2 - Fração fina	-
	Espectroscopia de energia dispersiva - EDS	2	1 - Fração grossa	1 - Fração fina	-
	Microscopia eletrônica de varredura - MEV	2	1 - Fração grossa	1 - Fração fina	-
	Análise Térmica - TG	2	1 - Fração grossa	1 - Fração fina	-

Etapas	Ensaio	Quant. de Ensaio	Quant. Ensaio / Materiais		Normas
Caracterização dos agregados naturais	Análise Granulométrica	15	3 - Areia média	3 - Brita 0	NBR NM 248/03 (ABNT, 2003)
			3 - Brita 1	3 - Pó de pedra original	
			3 - Pó de pedra combinado		
	Massa Específica	15	3 - Areia	3 - Pó de pedra	NBR 9776/87 (ABNT, 1987); NBR NM 23/00 (ABNT, 2000) NBR NM 53/03 (ABNT, 2003)
			3 - Brita 0	3 - Brita 1	
			3 - Cimento Portland		
	Índice de forma	1	1 - Brita 1		DNER-ME 086/94 (DNER, 1994)
	Abração Los Angeles	1	1 - Brita 1		NBR NM 051/01 (ABNT, 2001)
	Determinação da absorção	6	3 - Brita 0	3 - Brita 1	NBR NM 53/03 (ABNT, 2003a)
	Difração de Raio X – DRX	2	1 - Pó de pedra	1 – Areia	-
Fluorescência de Raio X – FRN	2	1 - Pó de pedra	1 – Areia	-	
Espectroscopia de energia dispersiva - EDS	2	1 - Pó de pedra	1 – Areia	-	
Microscopia eletrônica de varredura - MEV	2	1 - Pó de pedra	1 – Areia	-	
Termogravimetria - TG	2	1 - Pó de pedra	1 – Areia	-	

Etapas	Ensaio	Quant. de Ensaio	Quant. Ensaio / Materiais		Normas	
Caracterização do material asfáltico	Ponto de amolecimento	3	3 - Cimento asfáltico de petróleo - CAP		DNIT 131/10 - ME (DNIT, 2010)	
	Ponto de fulgor	2	2 - Cimento asfáltico de petróleo - CAP		DNER-ME 148/94 (DNER, 1994a)	
	Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i>	2	2 - Cimento asfáltico de petróleo - CAP		DNER-ME 004/94 (DNER, 1994c)	
	Densidade	3	3 - Cimento asfáltico de petróleo - CAP		DNER-ME 193/96 (DNER, 1996)	
	Penetração	2	2 - Cimento asfáltico de petróleo - CAP		NBR-6576/07 (ABNT, 2007)	
Estudo da Mistura Asfáltica	Dosagem Marshall com a incorporação da fração grossa do resíduo - DNER - ME 043/95 (DNER, 1995)	Quant. de Ensaio		Descrição dos traços		
		Padrão	Objeto de análise	Nomenclatura Padrão / objeto	% constituintes	Material substituído
		12	12	1TP / 1TR	15% - b1, 35% - b0, 40% - pó, 6% - am e 4% - f	am - pela fração grossa do resíduo
		12	12	2TP / 2TR	15% - b1, 35% - b0, 36% - pó, 10% - am e 4% - f	am - pela fração grossa do resíduo
		12	12	3TP / 3TR	15% - b1, 35% - b0, 32% - pó, 14% - am e 4% - f	am - pela fração grossa do resíduo
		12	12	4TP / 4TR	15% - b1, 31% - b0, 32% - pó, 18% - am e 4% - f	am - pela fração grossa do resíduo
	12	12	5TP / 5TR	15% - b1, 30% - b0, 29% - pó, 22% - am e 4% - f	am - pela fração grossa do resíduo	
Dosagem Marshall com a incorporação das duas frações do resíduo - DNER - ME 043/95 (DNER, 1995)	12	12	3TPF / 3TRF	15% - b1, 35% - b0, 32% - pó, 14% - am e 4% - f	am - pela fração grossa do resíduo; f - pela fração fina do resíduo	

Nota: b1 – brita 1; b0 – brita 0; pó – pó de pedra; am – agregado miúdo; f – filer; 1TP – primeiro traço padrão; 2TP – segundo traço padrão; 3TP – terceiro traço padrão; 4TP – quarto traço padrão; 5TP – quinto traço padrão; 1TR – primeiro traço com resíduo; 2TR – segundo traço com resíduo; 3TR – terceiro traço com resíduo; 4TR – quarto traço com resíduo; 5TR – quinto traço com resíduo; 3TPF – terceiro traço padrão com filer artificial; 3TRF – terceiro traço com resíduo e filer artificial.

3.1.1 Ensaios de caracterização física dos agregados

Os ensaios de caracterização física foram realizados para as frações dos resíduos do beneficiamento da scheelita, agregados naturais e fíler convencional. Inicialmente realizou-se os ensaios de densidade real dos grãos (massas específicas), relação entre o peso da amostra sólida e o seu volume, ou seja, não levando em consideração os seus vazios.

A realização destes ensaios para agregados miúdos e fíler seguiram as recomendações das normas NBR 9776/87 (ABNT, 1987) e a NM 23/00 (ABNT, 2000, respectivamente. Para a realização das massas específicas dos agregados graúdos e absorção, foi utilizado o método normatizado pela NBR NM 53/03 (ABNT, 2003a). A Figura 3.4 mostra detalhes do ensaio de densidade real dos grãos realizados para a fração fina do resíduo e para a brita com graduação 1.

Figura 3.4 - Densidade real dos grãos: (a) fração fina do resíduo (b) brita 1



Com os ensaios de análise granulométrica se obtém informações sobre a porcentagem de partículas passantes em diversas malhas, além da dimensão máxima característica. Com a análise granulométrica, foi possível classificar as frações do resíduo, fíler convencional e agregado miúdo de acordo com seu módulo de finura. As análises granulométricas foram realizadas obedecendo as recomendações da NBR NM 248/03 (ABNT, 2003). A Figura 3.5, mostram as frações retidas no conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de análise granulométrica para as duas frações do resíduo.

Figura 3.5 - Análise granulométrica: (a) Fração grossa do resíduo; (b) Fração fina do resíduo



Ainda para os agregados graúdos, foram realizados ensaios de índice de forma de acordo com a DNER-ME 086/94 (DNER, 1994) e o ensaio de abrasão *Los Angeles* - NBR NM 051/01 (DNER, 2001) para a brita 1. Esses ensaios visaram, respectivamente, classificar o agregado graúdo de acordo com o seu formato e avaliar o desgaste superficial do agregado quando da submissão de um carregamento. A Figura 3.6 mostra partes da execução dos ensaios de abrasão *Los Angeles* e índice de forma com a brita 1 utilizada na pesquisa.

Figura 3.6 - Ensaios: (a) Abrasão *Los Angeles*; (b) Índice de forma



Para o cimento Portland, além da massa específica, foram realizadas análises granulométricas, a qual permitiu calcular o módulo de finura. Este ensaio se torna importante para realizar a comparação entre o cimento (fíler convencional) e a fração fina resíduo.

3.1.2 Ensaios de caracterização química, térmica e mineralógica dos agregados

Para a caracterização química e mineralógica das frações do resíduo, e, dos agregados naturais (areia e pó de pedra) foram realizados ensaios de Difração de Raio X - DRX, Fluorescência de Raios X - FRX e o Espectrometria de Energia Dispersiva - EDS, onde, este último foi realizado para auxiliar nas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV. Estes ensaios se tornam indispensáveis para identificação dos constituintes dos materiais utilizados (resíduos ou agregados), além disso, através do MEV, pode-se visualizar a superfície e formatos dos grãos.

Para essas análises, o material foi coletado, seco em estufa, peneirado na malha 100, e posteriormente quarteado e submetida aos ensaios. A seguir, são apresentados os equipamentos utilizados e algumas especificações técnicas pertinentes.

Para a realização da Difração de Raio X foi utilizado o seguinte equipamento: Difratorômetro BRUKER, modelo D2 PHASER (Figura 3.7). Os espectros foram obtidos sob as seguintes condições: varredura (2θ): 3° a 70° ; Passo angular: $0,02^\circ$.

Figura 3.7 - Difratorômetro BRUKER, D2 PHASER do laboratório LAMMEN: (a) equipamento Bruker; (b) Tudo de Raio X e detector interno; (c) Porta amostra



As amostras utilizadas para a realização deste ensaio, foram colocadas no centro de um porta amostra de acrílico (Figura 3.7c) e posteriormente levada para o equipamento onde foi submetida a incidência de Raio-X para a varredura

determinada. A quantidade de amostra para a realização deste ensaio não é normatizada, sendo necessário o preenchimento do centro vazado do porta amostra. Após esse procedimento, realiza-se a identificação das fases cristalinas pertencentes aos difratogramas, através de bancos de dados e literatura científica.

Para a realização da fluorescência de Raio-X, foi utilizado o instrumento EDX-720/800HS, atmosfera: vácuo, colimador de 10 (mm) e sem rotação. Para a execução deste ensaio, a amostra é colocada em um porta amostra (Figura 3.8c), e envolvido por um filme de polipropileno para evitar perdas dentro do equipamento, visto que o porta amostra é vazado em ambas as extremidades; depois disso, o porta amostra é direcionado ao equipamento para a execução das leituras dos óxidos constituintes. O ensaio também não é normatizado, e a quantidade de amostra necessária para a realização do mesmo não é fixo, desde que seja o suficiente para preencher toda a área interna do porta amostra utilizado.

Figura 3.8 - Equipamento EDX 720/800HS: (a) Equipamento; (b) abertura para a inserção da amostra; (c) porta amostra e filme de polipropileno



Para a microscopia eletrônica de varredura foi utilizado o equipamento com as seguintes especificações técnicas: modelo - *Hitachi Tabletop Microscope TM-3000*; fabricante: *Hitachi*; *accelerating voltage*: 5kV, 15kV; *magnification*: 15 to 30000x (digital zoom 2x, 4x); *detector*: *High-sensitivity semiconductor backscattered electron detector*; *recording pixels*: 1280x960 pixels; *frequency*: 50/60Hz e *main unit power supply*: AC 100 to 240V, 500VA.

Para o ensaio de Espectrometria de Energia Dispersiva - EDS, o detector utilizado foi o *Swift ED3000* fabricado pela *Oxford Instruments*. O EDS é acoplado ao equipamento do MEV, utilizando-se das mesmas amostras para a realização da varredura química. As amostras são colocadas através de pinça em uma fita de carbono previamente disposta no porta amostra do equipamento (Figura 3.9b), que serve para a atração dos elétrons para formação das imagens. O ensaio também não é normatizado e a quantidade de amostra é mínima, em torno de poucos miligramas.

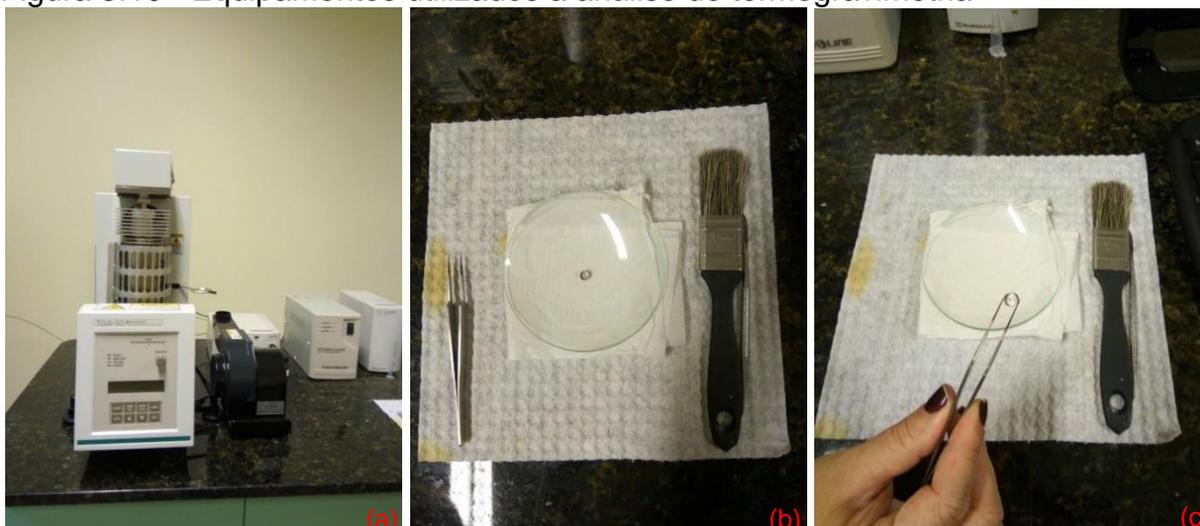
Figura 3.9 - Equipamentos utilizados para a realização do ensaio de MEV e EDS: (a) *Hitachi Tabletop Microscope TM-3000*; (b) suporte com fita de carbono e amostras ensaiadas; (c) *Swift ED3000* fabricado pela *Oxford Instruments*



A termogravimetria foi realizada com o aparelho TGA 50/SHIMADZU, que é composto por uma balança e um forno, e possui as seguintes especificações: atmosfera - nitrogênio (gás inerte), taxa de aquecimento: 10° C/min e o limite de temperatura de 300° C. Para a realização deste ensaio, utilizou-se o cadinho apresentado na Figura 3.10, para tarar a balança e armazenar a amostra.

O procedimento iniciou-se tarando a balança com o cadinho, depois retirou-se o cadinho e colocou-se a amostra através de uma pinça, em torno de $2/3$ do espaço interno do cadinho. Não é aconselhável que passe da quantidade suportada pelos $2/3$ da área do recipiente, para não haver trepidações do material, gerando resultados errôneos. Após esse procedimento, os gráficos foram plotados e calculou-se a perda de massa gerada pela elevação de temperatura.

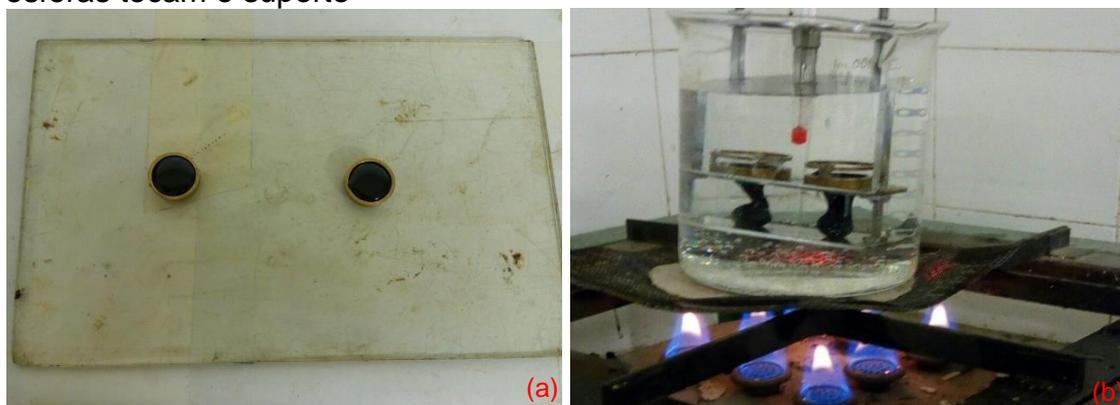
Figura 3.10 - Equipamentos utilizados a análise de termogravimetria



3.1.3 Ensaios de caracterização física do material asfáltico

As informações descritas neste item basearam-se no trabalho de Bernucci *et al.* (2006) e nas normas dos respectivos ensaios. A importância do ensaio do ponto de amolecimento normatizado pelo DNIT 131/10 – ME (DNIT, 2010), se dá pelo fato que tenta descrever empiricamente a temperatura que o asfalto sob condições específicas, atinge o amolecimento e determinadas condições de escoamento, ou seja, a suscetibilidade térmica do asfalto; esta medida é uma referência que se assemelha ao ponto de fusão Europeu. A Figura 3.11 mostra os aparelhos utilizados na execução do ensaio.

Figura 3.11 - Ensaio de ponto de amolecimento: (a) preparação; (b) Momento em que as esferas tocam o suporte



O ensaio de ponto de fulgor normatizado pela DNER-ME 148/94 (DNER, 1994a), busca determinar o parâmetro que está diretamente relacionado com a segurança do operador durante a manipulação do material asfáltico, nas etapas de transporte, estocagem e usinagem, visto que ele indica a menor temperatura na qual os vapores emanados durante a etapa do aquecimento se inflamam ao entrar em contato com uma chama padronizada. Comumente o CAP apresenta valores de ponto de fulgor acima de 230° C. A Figura 3.12 mostra a execução do ensaio em laboratório.

Figura 3.12 - Ensaio de Ponto de Fulgor



O ensaio de viscosidade é para verificar a consistência do cimento asfáltico que é aferida através da resistência ao escoamento e normatizada pelo DNER-ME 004/94 (DNER, 1994c). O método de ensaio executado por meio do *Saybolt-Furol* é realizado com um viscosímetro para uso em campo, de modo que o mesmo mensura a viscosidade de forma empírica. A unidade de viscosidade medido por esse equipamento é descrita em segundos *Saybolt-Furol* - SSF, a uma dada temperatura de ensaio.

A verificação da viscosidade em ligantes asfálticos é importante para analisar a sua consistência, visto que quando é realizado a mistura com os agregados, o ligante terá que cobri-los perfeitamente. Além disso, com este ensaio é possível a construção de uma curva que relaciona a viscosidade com a temperatura, o que

permite escolher a faixa de temperatura adequada para diversas aplicações do ligante estudado. A Figura 3.13 mostra o viscosímetro utilizado nesta pesquisa.

Figura 3.13 - Viscosímetro *Saybolt-Furol*



A massa específica do ligante asfáltico é definida como a relação entre a sua massa e o seu volume. Com a massa específica do ligante, pode-se calcular a densidade por meio da relação entre a massa específica do ligante e a massa específica da água a 4º C. Essas características físicas são necessárias para se realizar a dosagem das misturas, visto que é necessário converter massas em volumes durante o cálculo do teor ótimo de ligante. O ensaio para determinação da densidade do ligante é regido pela DNER-ME 193/96 (DNER, 1996) e demonstrado na da Figura 3.14.

Figura 3.14 - Ensaio de Densidade de ligante asfáltico: (a) Picnômetros com água; (b) Picnômetros com CAP



O ensaio de penetração é utilizado para verificar a consistência do CAP, pois quanto menor for a penetração da agulha na amostra, maior será a consistência da mesma. Este ensaio é normatizado pela NBR-6576/2007 e serve para a classificação do CAP a temperatura de 25° C. (BERNUCCI *et al.*, 2006).

No Brasil, antes da publicação do regulamento técnico da ANP de N° 03/2005 (ANP, 2005), a classificação do CAP era feita da seguinte forma: por viscosidade os CAPs se classificavam em: CAP 7, CAP 20 e CAP 40; essas especificações eram referentes ao início da faixa de viscosidade. Por penetração, tenham-se: CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200, sendo essa numeração referente a faixa de penetração de cada classe obtida em ensaio. Hoje a classificação é feita com base na penetração e outros parâmetros ensaiados e apresentados no regulamento técnico da ANP (2005), para as seguintes faixas de penetração: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200 (BERNUCCI *et al.*, 2006).

3.1.4 Ensaios com a mistura asfáltica

Para analisar a mistura asfáltica com agregados naturais e com a adição das frações dos resíduos, foram executados ensaios de dosagem Marshall, seguindo as diretrizes da norma rodoviária DNER - ME 043/95 (DNER, 1995). Para este ensaio, foram realizados traços padrões com agregados naturais e traços para análises (traços objeto de estudo), com as frações dos resíduos.

As composições utilizadas são apresentadas na Tabela 3.3. Optou-se em deixar pelo menos 45% da composição dos materiais representados pelos agregados graúdos, pois em uma mistura betuminosa como o CBUQ, quem dará a capacidade de suporte com maior efetividade é o agregado graúdo.

Além disso, optou-se em fixar a quantidade de fíler em 4% para não gerar problemas como o preenchimento excessivo de vazios, que deixa o pavimento mais rígido. As porcentagens de agregado miúdo variaram de 6% a 22% do total dos constituintes minerais (ver a Tabela 3.3); tais valores foram definidos com as curvas granulométricas das misturas, que possibilitaram o melhor enquadramento nos limites da curva C da norma 031/2006 do DNIT (2006a) e a maior proximidade da curva ideal, ou seja, as curvas que possivelmente ofereceria os melhores valores de estabilidade

e parâmetros volumétricos. As Figuras 3.15 a 3.17 mostram os enquadramentos dos traços propostos dentro dos limites máximo e mínimo da curva C.

Para a verificação da viabilidade da utilização da fração fina do resíduo como filer artificial, optou-se por escolher o traço que alcançasse o maior valor de estabilidade nos corpos de prova com a substituição do agregado miúdo pela fração grossa do resíduo; logo, com os resultados deste parâmetro, definiu-se o terceiro traço para analisar a substituição dos 4% do cimento Portland pela fração fina do resíduo do beneficiamento da scheelita.

Além disso, era imprescindível que o traço escolhido não oferecesse uma discrepância alta nas porcentagens dos seus materiais constituintes com relação aos outros traços estudados, visto que foi realizado somente dois traços com o filer artificial (3TPF e 3TRF), pois tal análise não foi o foco principal desta pesquisa, e sim a análise da substituição da areia pela fração grossa do resíduo. Sendo assim, o terceiro traço foi mais indicado para esta etapa da pesquisa.

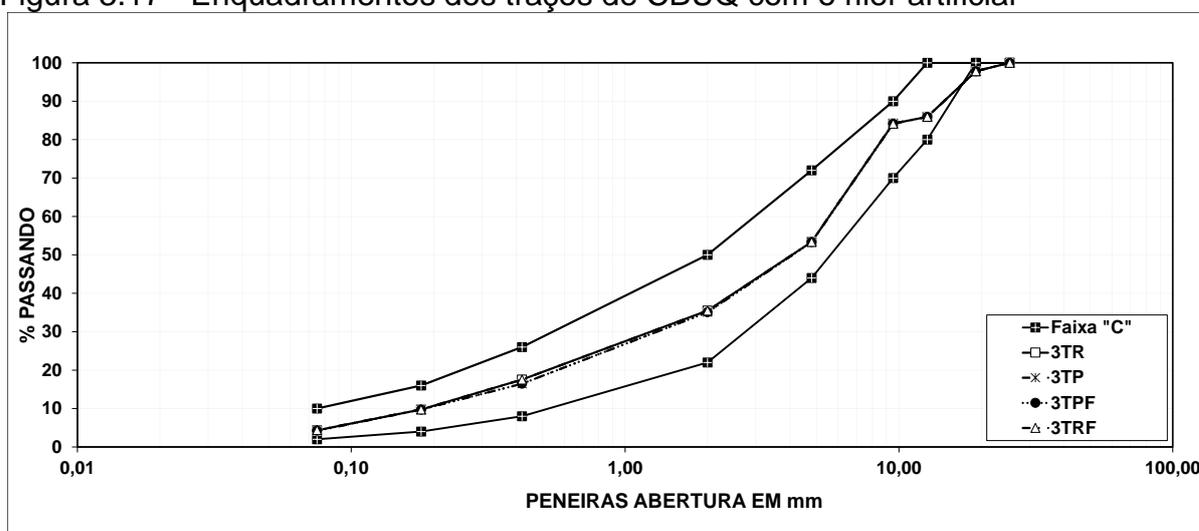
Tabela 3.3 - Composição dos traços de CBUQ

Traços com agregados naturais						
Materiais	1TP	2TP	3TP	4TP	5TP	
Brita 1	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Brita 0	35%	35%	35%	31%	30%	30%
Pó de pedra	40%	36%	32%	32%	29%	29%
Areia	6%	10%	14%	18%	22%	22%
Cimento	4%	4%	4%	4%	4%	4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Traços com a incorporação da fração grossa do resíduo						
Materiais	1TR	2TR	3TR	4TR	5TR	
Brita 1	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Brita 0	35%	35%	35%	31%	30%	30%
Pó de pedra	40%	36%	32%	32%	29%	29%
Fração grossa	6%	10%	14%	18%	22%	22%
Cimento	4%	4%	4%	4%	4%	4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Traços com a incorporação da fração fina do resíduo						
Traço	Materiais					
3TPF	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Areia natural	Fração Fina	
	15%	35%	32%	14%	4%	
Traço	Materiais					
3TRF	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Fração Grossa	Fração Fina	
	15%	35%	32%	14%	4%	

Nota: 1TP - primeiro traço padrão; 2TP - segundo traço padrão; 3TP - terceiro traço padrão; 4TP - quarto traço padrão; 5TP - quinto traço padrão; 1TR - primeiro traço com resíduo; 2TR - segundo traço com resíduo; 3TR - terceiro traço com resíduo; 4TR - quarto traço com resíduo; 5TR - quinto traço com resíduo; 3TPF - terceiro traço padrão com filer artificial; 3TRF - terceiro traço com resíduo e filer artificial.

Levando em consideração a substituição do fíler convencional pelo artificial na composição do terceiro traço, não foi observado variações significantes no enquadramento das curvas, visto que os 4% do fíler, tanto convencional quanto o artificial, foram produzidos passando o cimento e a fração fina do resíduo pela peneira de 0,075 mm, não tendo diferenças significativas em sua graduação. A Figura 3.17 mostra os enquadramentos das curvas constituídas com a composição do terceiro traço, variando o fíler e o agregado miúdo utilizado.

Figura 3.17 - Enquadramentos dos traços de CBUQ com o fíler artificial



O processo da dosagem Marshall normatizado pela norma DNER - ME 043/95 (DNER, 1995) inicia-se com a separação dos constituintes de acordo com a composição dos traços. A Figura 3.18 apresenta as cápsulas utilizadas para a realização do ensaio com os agregados previamente separados, e, posteriormente colocados em estufa por 24h a temperatura padronizada de 177° C.

Figura 3.18 - Materiais para execução de corpos de provas de CBUQ: (a) - separação; (b) - capsulas com material em estufa a 177° C



Após 24 horas, as cápsulas foram retiradas para a aferição de massa e preparação da mistura. A Figuras 3.19 e 3.20 mostram consecutivamente as etapas de aferição de massas dos componentes da mistura (agregados e ligante) e a execução da combinação dos componentes ao fogo.

Figura 3.19 - Preparação para mistura: (a) pesagem pós estufa; (b) inserção do CAP aos componentes da mistura



Figura 3.20 - Realização mistura betuminosa: (a) agregados e ligante ao fogo; (b) mistura betuminosa completa



Ao término das etapas de aferição de massa e a realização da mistura betuminosa ao fogo, iniciou-se a moldagem dos corpos de provas. As Figuras 3.21 e 3.22, demonstram os passos de moldagem e compactação, e posterior extração e aferição das espessuras dos copos de prova de concreto asfáltico.

Para a realização da compactação do material utilizou-se um soquete com peso padronizado, que era liberado 75 vezes (golpes) de cada lado do corpo de prova de concreto asfáltico. Utilizou-se também um papel filtro para evitar o espalhamento do ligante asfáltico e a possível fixação no suporte de compactação.

Figura 3.21 - Preparação do corpo de prova: (a) mistura de agregados e ligante no corpo de prova; (b) inserção do papel filtro; (c) compactação do corpo de prova



Figura 3.22 - Corpo de prova de CBUQ: (a) corpo de prova nomeado; (b) extração do protótipo de CBUQ; (c) aferição das espessuras



Após a etapa de aferição das espessuras, realizou-se a aferição das massas dos corpos de provas da seguinte ordem: corpo de prova seco, corpo de prova com uma camada de parafina e corpo de prova imerso em água (massa hidrostática). A Figura 3.23 mostra a sequência das aferições e equipamentos utilizados.

Figura 3.23 - Aferição das massas do protótipo: (a) massa seca; (b) massa com parafina; (c) massa hidrostática



Após a aferição das massas, iniciou-se a preparação dos corpos de provas para o rompimento na prensa Marshall. Inicialmente os protótipos foram colocados em banho Maria a $60 \pm 1^\circ \text{C}$, como pode-se observar na Figura 3.24. Depois disso,

realizou-se o rompimento para a aferição dos dados para o cálculo de estabilidade e fluência. A prensa utilizada neste procedimento é apresentada na Figura 3.25.

Figura 3.24 - Corpos de prova de CBUQ em banho d'água a 60 ± 1 °C



Figura 3.25 - Rompimento do corpo-de-prova na Prensa Marshall Elétrica



Os procedimentos apresentados nas Figuras 3.18 a 3.25, foram realizados para os 60 corpos de provas com agregados naturais (traços padrões), 60 corpos de provas com a substituição do agregado miúdo natural pela fração grossa do resíduo, e 24 corpos de prova com a substituição do filer convencional pela fração fina do resíduo do beneficiamento da scheelita. Os corpos de provas executados nesta pesquisa podem ser visualizados através da Figura 3.26.

Figura 3.26 - Corpos de provas de concreto asfáltico produzido na pesquisa: (a) vista frontal; (b) vista superior



Balbo (2006) descreve a dosagem de uma mistura de concreto asfáltico como um processo que busca combinar agregados de granulometrias específicas com o cimento asfáltico de petróleo - CAP; depois da realização desta mistura, faz-se a compactação do material a temperaturas normatizadas. Esse processo é feito para que o material desenvolvido ofereça condições mecânicas adequadas a suportar as mudanças climáticas e as cargas que venham solicitar o pavimento após a aplicação do concreto asfáltico como revestimento. O autor ainda acrescenta que a dosagem de uma mistura asfáltica é realizada para alcançar os seguintes objetivos:

- Desenvolver uma mistura adequadamente trabalhável em todas as etapas do processo de produção e execução;
- Ser estável quando submetidas às cargas dinâmicas e estáticas;
- Ter uma boa durabilidade;
- Possuir a quantidade de ligante adequada para garantir uma boa adesividade que impeça a desagregação dos materiais e infiltração de água;
- Possuir níveis aceitáveis de ruído;
- Que sofra baixas deformações permanentes e pouca suscetibilidade à fissuração por fadiga durante sua vida útil;
- Que possua o número suficiente de vazios preenchidos por ar, além da adequada textura superficial;
- Que seja de fácil manutenção e viável economicamente.

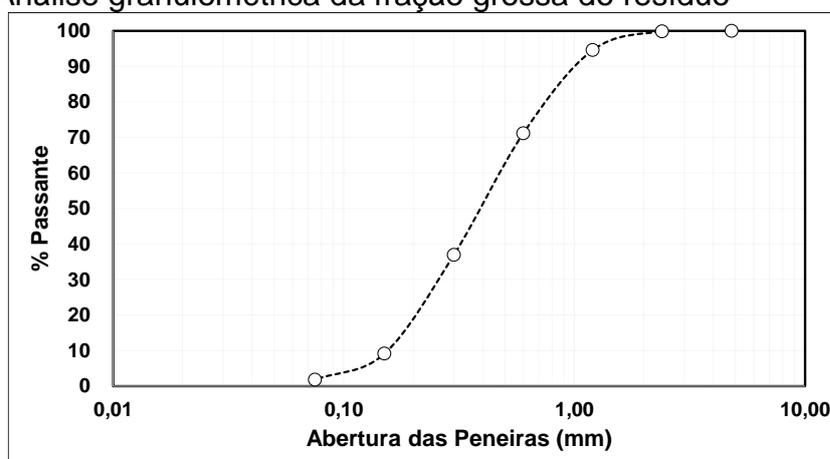
CAPÍTULO 4

Resultados e Discussões

4.1 Resultados da caracterização das frações do resíduo

Para a caracterização física, foram realizadas as análises granulométricas e massas específicas das frações dos resíduos, além das análises da superfície e forma do grão através da microscopia eletrônica de varredura; esta, associada a análise química realizada por EDS. A Figura 4.1 mostra a análise granulométrica da fração grossa do resíduo do beneficiamento da scheelita.

Figura 4.1 - Análise granulométrica da fração grossa do resíduo



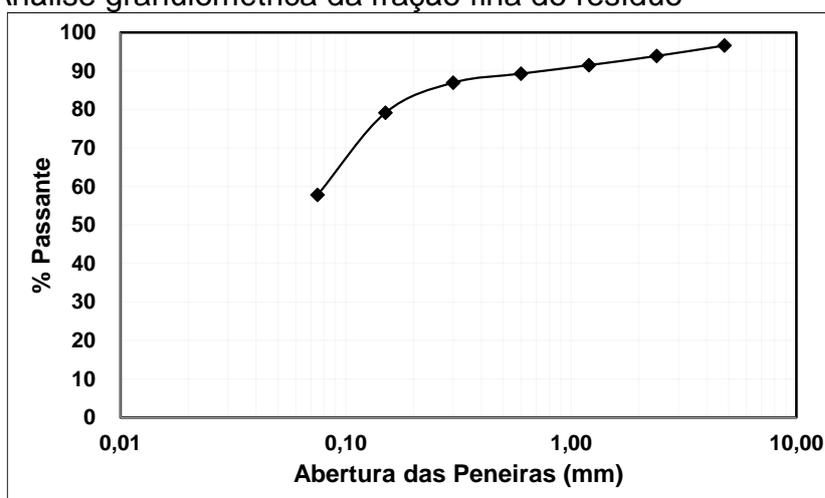
Com base nos dados obtidos pela análise granulométrica, pode-se classificar a fração grossa de acordo com sua finura. Carneiro (1999) diz que as areias podem ser classificadas em finas ($MF < 2,0$), médias ($3,0 \geq MF \geq 2,0$) ou grossas ($MF > 3,0$). Fazendo esta análise para a fração grossa do resíduo, pode-se classificá-la como uma areia artificial média, visto que seu módulo de finura resultou em 2,9. Além disso, através dessa análise, observou-se que o diâmetro máximo característico do da fração analisada foi de 2,4 mm.

Paiva (2013) realizou análises granulométricas com a fração grossa do resíduo do beneficiamento da scheelita, e concluiu que o resíduo analisado possuía diâmetro máximo característico de 1,2 mm e módulo de finura de 1,83, classificando-o como areia fina.

Toffolo (2014) trabalhou com resíduo de minério de ferro e o mesmo observou que a dimensão máxima característica do resíduo foi de 2,4 mm e a massa específica de 3,55 g/cm³. Fontes *et al.* (2014) também trabalhou com o resíduo do minério de ferro e observou que a sua dimensão máxima foi de 2,4 mm, módulo de finura de 0,61 mm e massa específica um pouco mais alto quando comparada ao observado por Toffolo (2014), visto que resultou em 3,88 g/cm³, sendo esta massa 31,7% maior que a massa específica da areia natural utilizada na pesquisa, que foi de 2,65 g/cm³.

Tendo em foco a fração fina do resíduo, a Figura 4.2 mostra a análise granulométrica desta fração, e, por meio dela, observou-se que a sua dimensão máxima característica foi de 4,8 mm e módulo de finura igual a 1,0, classificando-se como areia artificial fina (MF < 2,0). Apesar do módulo de finura ser baixo, a dimensão máxima característica atingiu o valor máximo, devido as placas lamelares formadas com o passar do tempo, após deposição do resíduo húmido nas bacias de rejeito. Vale salientar que para a realização do ensaio em questão, o material foi destorroado com almofariz, e mesmo assim apresentou tais placas.

Figura 4.2 - Análise granulométrica da fração fina do resíduo



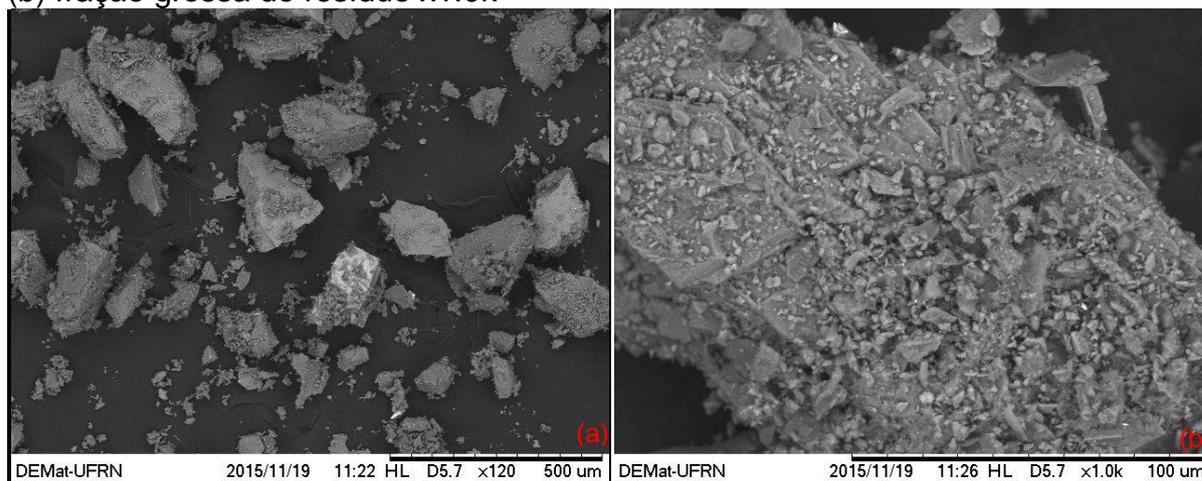
Com relação as massas específicas do resíduo, as frações grossa e fina obtiveram valores médios de 2,98 g/cm³ e 2,90 g/cm³ respectivamente; tais valores

são maiores que a massa específica do agregado miúdo natural e fíler convencional utilizado nesta pesquisa (respectivamente $2,62 \text{ g/cm}^3$ e $2,82 \text{ g/cm}^3$). Isto, provavelmente é devido aos minerais constituintes nas frações dos resíduos, visto que com a cominuição da rocha no beneficiamento, ocorre uma geração de resíduo com diversos constituintes. Além disso, observou-se que em ambas as frações existiam a presença de metais pesados como demonstra nos resultados da caracterização química do material.

Paiva (2013) e Gerab (2014) realizaram ensaios de massas específicas na fração grossa do resíduo do beneficiamento da scheelita, resultando nos seguintes valores consecutivamente: $2,89 \text{ g/cm}^3$ e $2,84 \text{ g/cm}^3$.

Analisando o formato do grão, através da microscopia eletrônica de varredura (Figura 4.3), percebeu-se que os grãos apresentaram formatos diversos, porém com arestas bem definidas com superfície aparentemente porosa quando comparadas com as superfícies dos grãos da areia natural. Paiva (2013) realizou ensaios de MEV e verificou que o resíduo do beneficiamento da scheelita tem grãos com formação laminar e em formato de cubos. Com o auxílio do EDS (Tabela 4.1), em análise de área, observou-se que o cálcio e silício são os representantes mais significativos da amostra, superando os 70% dos constituintes.

Figura 4.3 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) fração grossa do resíduo x120; (b) fração grossa do resíduo x1.0k

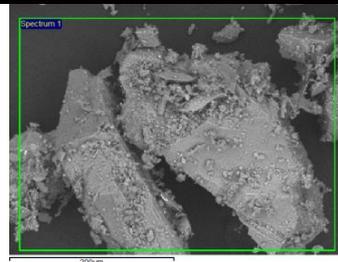


Com relação aos resultados da Tabela 4.1 observa-se ainda a presença do metal de transição, Tungstênio, apesar de possuir a segunda menor porcentagem do conjunto, o que enfatiza, que mesmo com retornos consecutivos para a mesa de

beneficiamento, esse processo ainda não é o suficiente para a retirada de todo o minério de scheelita contido no material retirado da natureza.

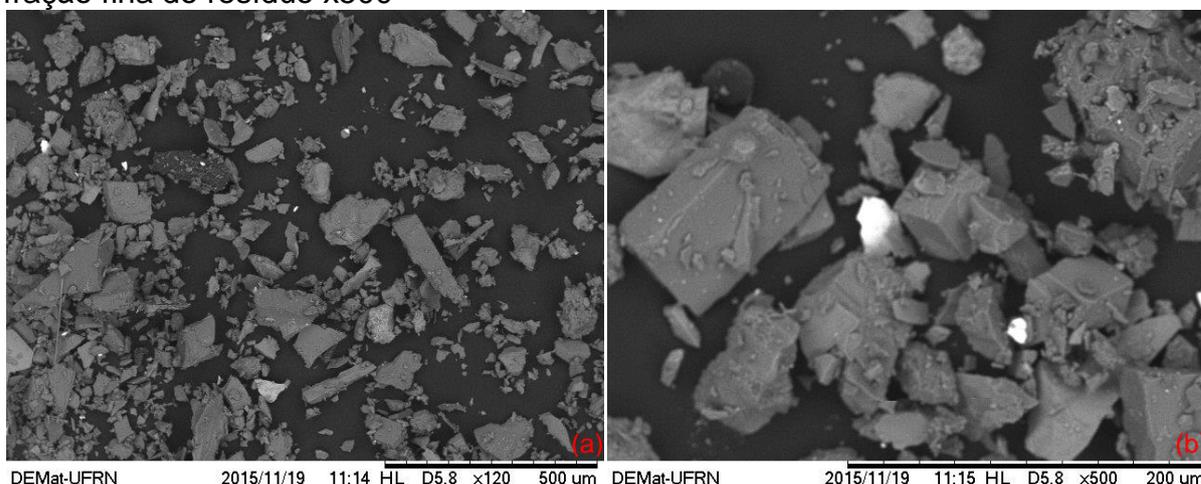
Tabela 4.1 - Análise de EDS da fração grossa do resíduo

Elementos	% em massa
Alumínio	9,83
Silício	21,35
Potássio	2,80
Cálcio	50,32
Ferro	10,68
Tungstênio	5,02



Os grãos da fração fina também apresentaram formatos diversos; algumas partículas alongadas e outras cúbicas (esta última característica, melhora o intertravamento das partículas) com arestas bem definidas, sem indícios efetivos de poros, fato este, que não maximiza o consumo do ligante. A Figura 4.4 apresenta a microscopia eletrônica de varredura da fração fina do resíduo do beneficiamento da scheelita.

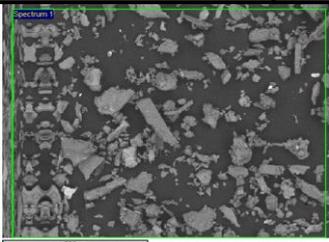
Figura 4.4 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) fração fina do resíduo x120; (b) fração fina do resíduo x500



Ainda analisando a Figura 4.4, observou-se pontos claros nas imagens, e acredita-se que esta característica peculiar seja devido a maior presença do tungstênio nesta fração, visto que não foram observados nas imagens de MEV realizadas para a fração grossa do resíduo.

Através da análise de EDS (Tabela 4.2), observou-se que a fração fina apresentou os mesmos elementos químicos encontrados na fração grossa, com exceção do Potássio. Além disso, apresentou um aumento na porcentagem de Tungstênio (12,49%), corroborando com a fluorescência de Raio-X (Tabela 4.3), que deixa explícito que a presença desse elemento é mais representativa na fração fina do resíduo. A Tabela 4.2 apresenta os elementos encontrados na fração fina do resíduo analisada através do EDS.

Tabela 4.2 - Análise de EDS da fração fina do resíduo

	Elemento	%
	Alumínio	9,58
	Silício	24,36
	Cálcio	37,34
	Ferro	16,24
	Tungstênio	12,49

As análises químicas das frações dos resíduos através da fluorescência de Raio-X, mostraram uma variabilidade na composição dos óxidos constituintes, porém ambas possuem como principais representantes de óxidos, o CaO, SiO₂ e Fe₂O₃, e a presença do ferro na constituição das frações ressalta a hipótese de que as massas específicas reais estão elevadas devido à presença de metais na composição. A Tabela 4.3 apresenta valores dos óxidos das frações dos resíduos.

Tabela 4.3 - Fluorescência de Raio-X das frações do resíduo

Fração Grossa do Resíduo				Fração Fina do Resíduo			
Primeira Análise		Segunda Análise		Primeira Análise		Segunda Análise	
Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%
CaO	50.82	CaO	43.27	CaO	47.46	CaO	36.12
SiO ₂	21.17	SiO ₂	24.98	SiO ₂	19.12	SiO ₂	27.03
Fe ₂ O ₃	11.79	Fe ₂ O ₃	13.27	Fe ₂ O ₃	18.94	Fe ₂ O ₃	17.64
Al ₂ O ₃	8.26	Al ₂ O ₃	9.65	Al ₂ O ₃	5.70	Al ₂ O ₃	11.08
MgO	3.07	MgO	3.78	MgO	2.36	MgO	2.90
SrO	1.67	SrO	1.47	SrO	1.67	K ₂ O	1.19
K ₂ O	1.05	K ₂ O	1.01	SO ₃	1.09	SrO	1.03
MnO	0.70	MnO	0.79	MnO	0.98	MnO	0.79
SO ₃	0.49	WO ₃	0.54	WO ₃	0.91	WO ₃	0.66
TiO ₂	0.44	TiO ₂	0.40	K ₂ O	0.81	TiO ₂	0.56
WO ₃	0.28	MoO ₃	0.32	TiO ₂	0.54	MoO ₃	0.27
ZrO ₂	0.20	BaO	0.21	ZrO ₂	0.35	ZrO ₂	0.24
ZnO	0.06	ZrO ₂	0.21	ZnO	0.08	CuO	0.22
-	-	Rb ₂ O	0.06	-	-	BaO	0.11
-	-	ZnO	0.06	-	-	Rb ₂ O	0.08
-	-	-	-	-	-	ZnO	0.07
-	-	-	-	-	-	Au ₂ O	0.04

Com Tabela 4.3, percebeu-se também que ainda existe presença do WO_3 na composição dos resíduos, corroborando com os dados do EDS.

Godeiro *et al.* (2010) realizou ensaio de fluorescência de Raio-X em amostra de resíduo do beneficiamento da scheelita da Mina Brejuí, e verificou em sua composição como óxidos principais o CaO (50,27%) e SiO_2 (25,9), Fe_2O_3 (7,47%), além da presença de Al_2O_3 (9,57%), K_2O (1,77%), TiO_2 (0,62%), WO_3 (0,11%) entre outros elementos (4,33%). Estes resultados de Godeiro *et al.* (2010) corroboram com os valores alcançados nesta pesquisa, visto que os principais óxidos foram praticamente os mesmos.

Gerab (2014) também realizou ensaios com o resíduo do beneficiamento da scheelita da Mina Brejuí, porém a porcentagem de SiO_2 (30,97%) foi maior que a de CaO (28,99%), e Fe_2O_3 atingiu valor relativamente baixo (3,53%), fato este que pode ser explicado pela diversidade de minerais que são retirados durante o desmonte no meio natural. Paiva (2013), já observou valores mais altos, como CaO (40,33%), SiO_2 (30,91%) e Fe_2O_3 (11,59%); assim como Machado (2012), CaO (41,34%), SiO_2 (19,05) e Fe_2O_3 (4,46%). Fernandes (2011) também teve como principais óxidos o CaO (51,4%), SiO_2 (21,53%) e o Fe_2O_3 (12,96%), representando aproximadamente 86% do total.

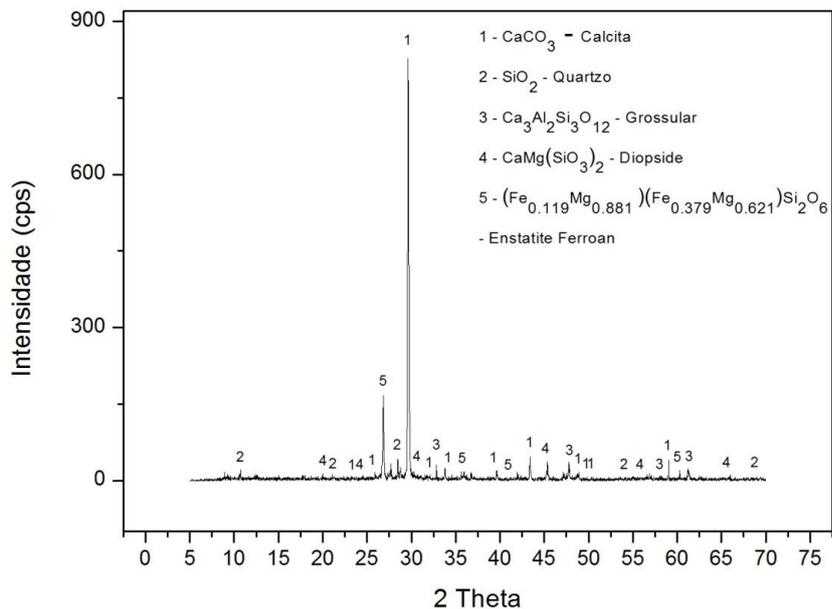
Em todas as análises apresentadas verificou-se o alto teor de óxido de cálcio nas amostras, e, segundo Fernandes (2011), isso é reflexo do tipo de rocha que se encontra na Mina Brejuí, o calcário cristalino, sendo a calcita representada por mais de 95% do volume da rocha.

Toffolo (2014) caracterizou o resíduo do minério de ferro através da FRX, que teve como resultado da composição química os seguintes óxidos: Si_2O (63,88%), Fe_2O_3 (34,81%) SO_3 (1,15%) e CaO (0,15%), mostrando ser rico em Si_2O e relativamente pobre em CaO, diferentemente do resíduo do beneficiamento da scheelita, que possui altos teores de CaO.

Analisando as características mineralógicas dos resíduos através da difração de Raio-X, percebeu-se que a fração grossa (Figura 4.5) apresentou-se com picos mais elevados que a fração fina, e com a presença significativa da calcita e do quartzo, minerais representativos na composição de areais naturais. Além disso, observou-se a existência da *Enstatite Ferroan*, que é constituído por ferro, corroborando com as

hipóteses relatadas anteriormente para a elevação das massas específicas das frações do resíduo, quando comparadas com a areia natural.

Figura 4.5 - Difração de Raio-X: fração grossa do resíduo

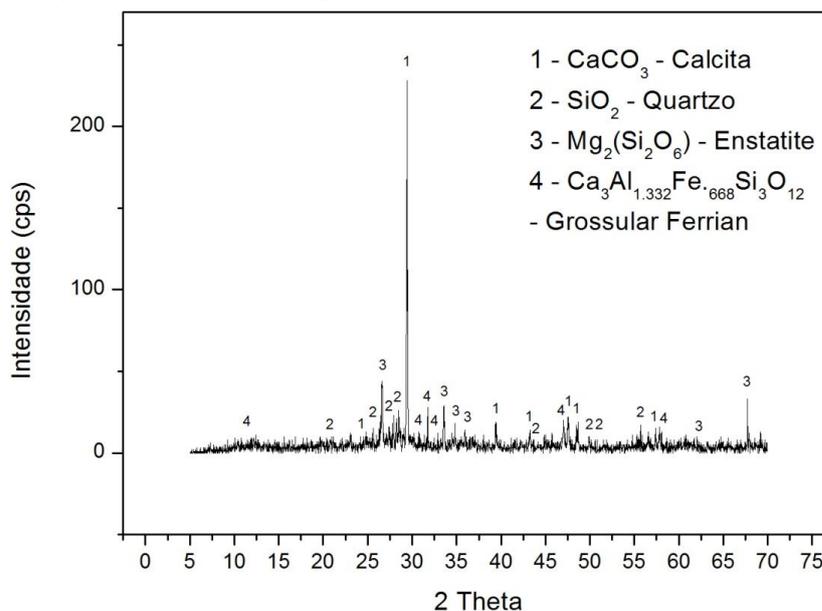


Alguns estudos apresentaram composições mineralógicas diferentes, porém, isso se dá pelo fato, que no momento do desmonte, uma grande variedade de rochas com composições diferentes são retiradas. A seguir, mostram-se alguns trabalhos com suas respectivas composições mineralógicas:

- Gerab (2014): observou a presença da calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2), micas [muscovita $(\text{K,Ca})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ e phlogopita $(\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$], silicatos do grupo dos piroxênios [diopsida ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) e enstatita $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$] e silicatos do grupo de granada [grossular ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$)].
- Paiva (2013), observou os seguintes minerais: predominância de calcita e quartzo, além da presença da augita $[\text{Ca}(\text{Fe,Mg})\text{Si}_2\text{O}_6]$, grossular ($\text{Ca}_3\text{Al}_{1.332}\text{Fe}_{0.668}\text{Si}_3\text{O}_{12}$), enstatita $[\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)]$ e ilita $[\text{K}_{0.7}\text{Al}_{2.1}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$.
- Machado (2012), observou os seguintes minerais: calcita, quartzo, diopside e flogopita $[\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}\text{F}_2]$.
- Fernandes (2011) observou a seguinte composição mineralógica: quartzo, calcita, albita, biotita $(\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2])$, anortita ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$), epidoto $[\text{Ca}_2(\text{Fe,Al})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})]$, grossulário $[\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3]$.

A difração de Raios-X da fração fina, também apresentou como principais constituintes a calcita e o quartzo. Além desses, a fração fina possui em seus constituintes minerais o *grossular ferrian*, que tem em sua composição o ferro. Também observou-se pequenas ranhuras na base do gráfico (Figura 4.6), e acredita-se que esse fato, seja característico de materiais amorfos.

Figura 4.6 - Difração de Raio-X: fração fina do resíduo



Toffolo (2014) realizou a difração de Raio-X com o resíduo do minério de ferro e observou que a sua composição era basicamente constituída por Fe_2O_3 (hematita) e SiO_2 (quartzo), e ressalva que a elevação do valor da massa específica do resíduo de $3,55 \text{ g/cm}^3$, quando comparado com a massa específica do agregado miúdo natural ($2,65 \text{ g/cm}^3$), se deu pelo fato que sua composição possui a presença da hematita, mineral este, que tem o ferro na constituição; sendo este fato, o mesmo argumento utilizado para justificar os valores alcançados pela massa específica do resíduo do beneficiamento da scheelita ($2,98 \text{ g/cm}^3$ para fração grossa e $2,90 \text{ g/cm}^3$ para fração fina).

Analisando as características térmicas das frações do resíduo do beneficiamento da scheelita, através das Figuras 4.7 e 4.8, percebeu-se que a perda ocasionada pela elevação de temperatura é insignificante. Na temperatura máxima de trabalho (177°C) a perda foi de $0,195 \text{ mg}$ e $0,560 \text{ mg}$ consecutivamente para a fração grossa e fina do resíduo.

Verificou-se também a perda de massa a 300° C para estudar o comportamento das frações do resíduo, se caso continuasse a elevação da temperatura, e percebeu-se que as perdas de massas foram 0,157 mg e 0,635 mg consecutivamente para a fração grossa e fina, o que leva a concluir que possivelmente a fração grossa tenha adsorvido a atmosfera do ensaio, visto que a sua perda de 0 a 300° C foi menor do que de 0 a 177° C, como pode ser observado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Análise térmica da fração grossa do resíduo

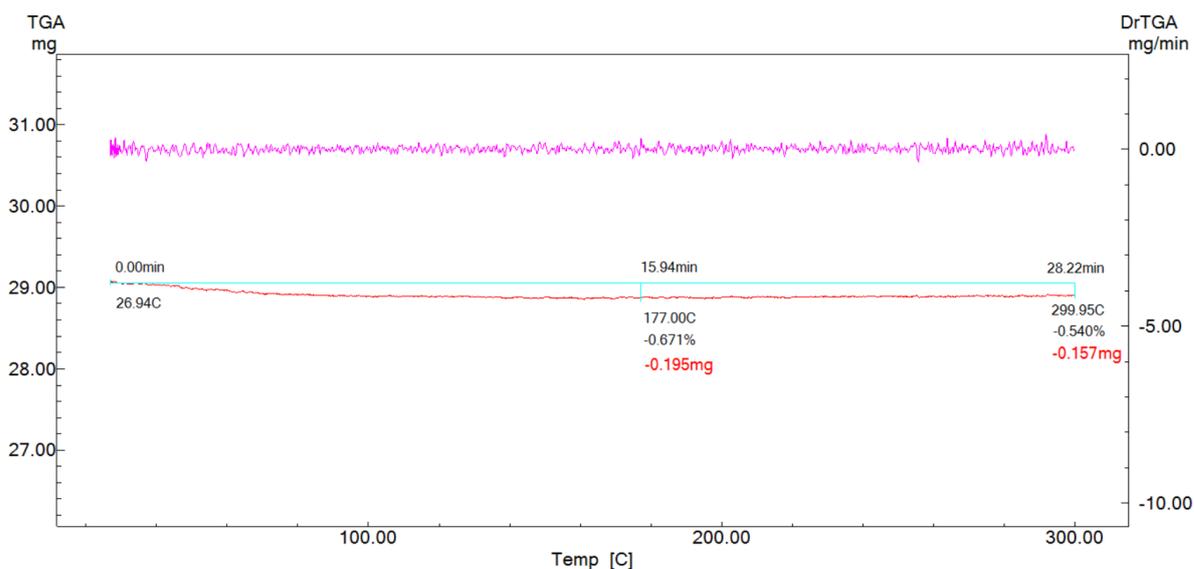
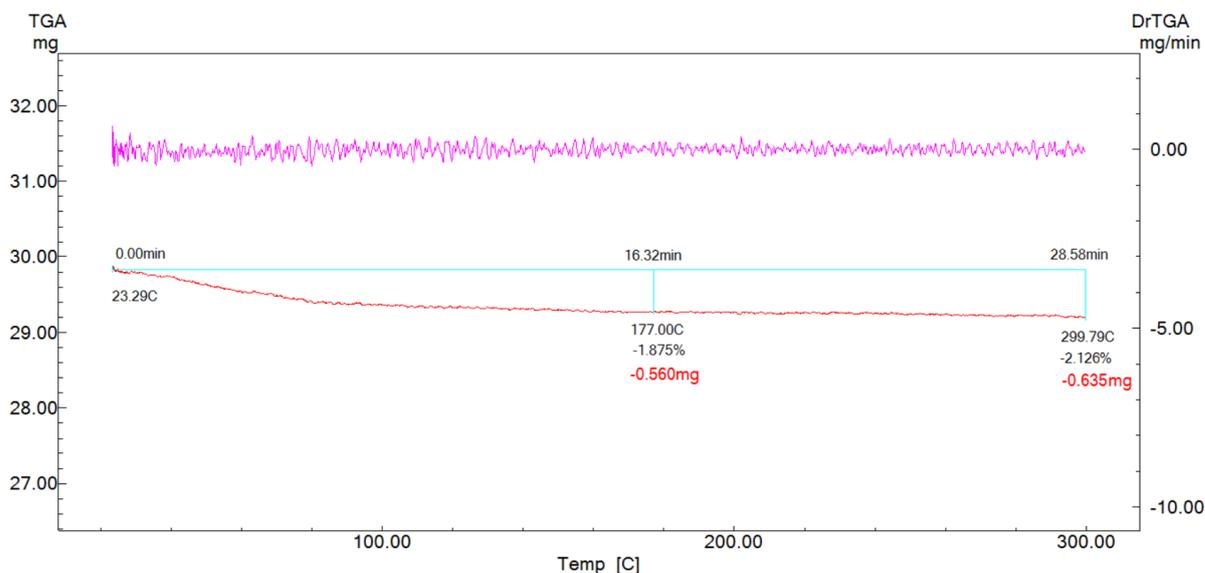


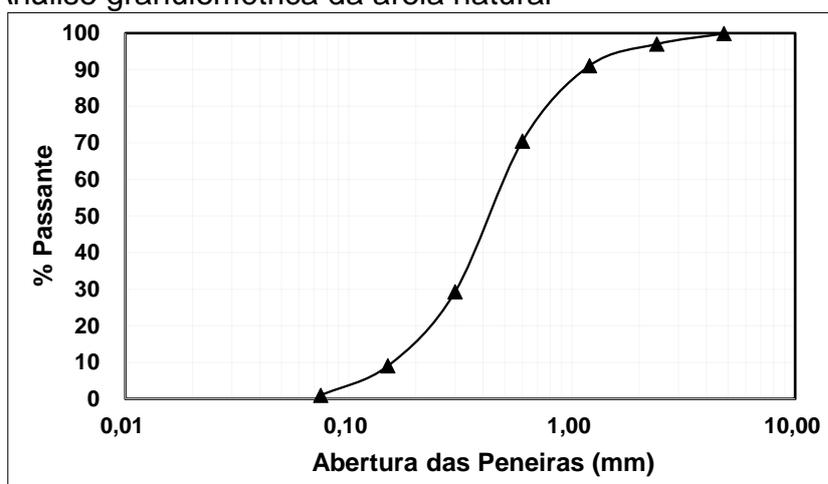
Figura 4.8 - Análise térmica da fração fina do resíduo



4.2 Resultados da caracterização dos agregados naturais

A análise granulométrica da areia natural utilizada nesta pesquisa está representada na Figura 4.9. A partir da curva, pode-se classificá-la de acordo com a sua finura, sendo o seu $MF = 2,0$, em uma areia média ($3,0 \geq MF \geq 2,0$). Além disso, observou-se que a sua dimensão máxima característica foi de 2,4 mm.

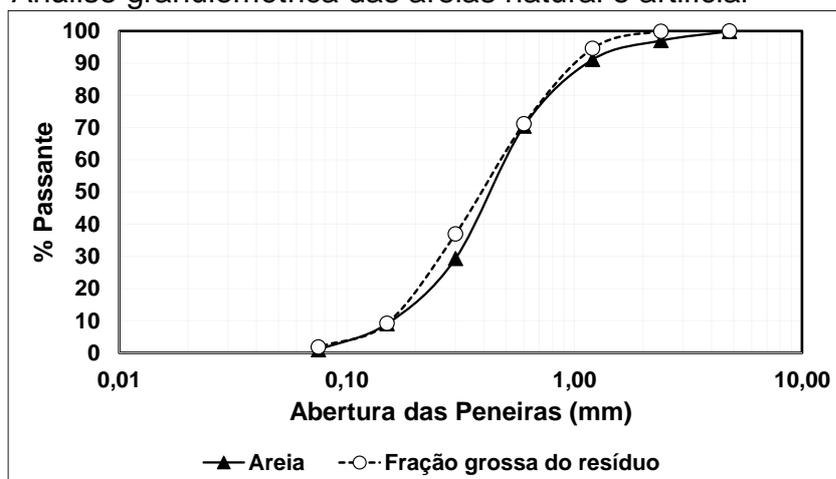
Figura 4.9 - Análise granulométrica da areia natural



Paiva (2013), observou os seguintes resultados através da análise granulométrica da areia natural utilizada em sua pesquisa: dimensão máxima característica de 2,4 mm e módulo de finura de 2,11 mm. Além disso, aferiu-se a massa específica, que resultou em $2,63 \text{ g/cm}^3$.

Em vista de analisar a configuração granulométrica dos agregados miúdos que foram utilizados na pesquisa, plotou-se a curva granulométrica da areia em conjunto com a da fração grossa do resíduo; com isso, pode-se observar que a distribuição em termos de frações granulométricas são semelhantes, dimensão máxima características iguais (2,4 mm) e classificação pelo módulo de finura iguais (areia média), diferenciando-se somente os seus constituintes minerais, formatos dos grãos e massa específica, visto que a da areia natural resultou em valor médio de $2,62 \text{ g/cm}^3$ e o da fração grossa $2,98 \text{ g/cm}^3$. A Figura 4.10 mostra as curvas granulométricas da areia e da fração grossa sobrepostas.

Figura 4.10 - Análise granulométrica das areias natural e artificial



Também foram realizadas análises granulométricas e massas específicas para o pó de pedra, brita com graduação 0 e 1, além da absorção e índice de forma para a brita 1.

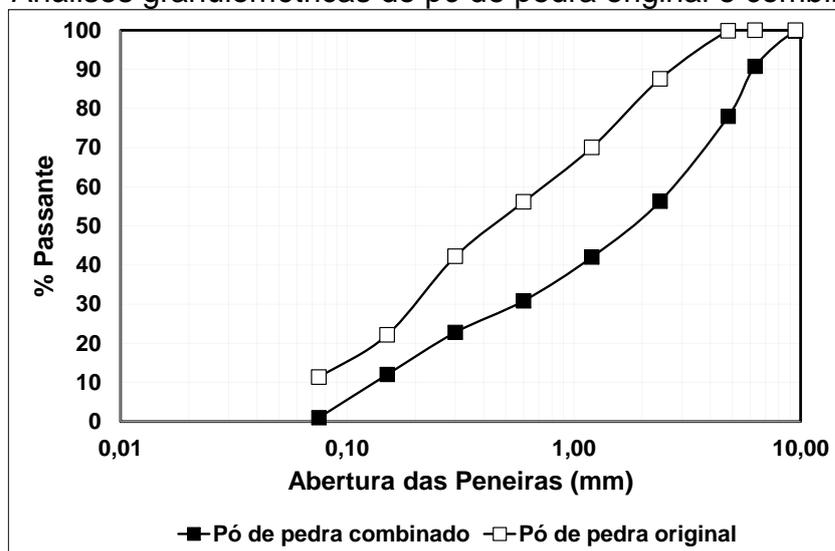
Para o pó de pedra foi realizado uma intervenção em sua granulometria, visto que no pó de pedra original existia uma porcentagem média de finos de 11,33% (passando na #200), e isto seria prejudicial na produção de concretos asfálticos, pois a existência de finos poderia resultar na ocupação dos vazios necessários para que o revestimento trabalhasse de forma flexível, acarretando em possíveis fissuras quando o revestimento recebesse as cargas oriundas do tráfego.

Devido a isto, realizou-se o inicialmente peneiramento de 100 kg do pó de pedra original na #200 para a retirada de finos, além de uma posterior mistura com a brita 0 na proporção consecutivamente de 60/40% em massa. Tal mistura foi realizada para melhorar o comportamento mecânico dos corpos de provas de CBUQ produzidos com o pó de pedra combinado, visto que ao misturar o pó de pedra original com a brita 0, houve o aumento da porcentagem de material graúdo na constituição, o que aumentará a capacidade de suporte dos corpos de prova CBUQ produzidos.

Através da Figura 4.11, observa-se que com o processo de melhoramento do pó de pedra, houve uma diminuição de finos de 11,33% para 1,02% além do aumento das porcentagens retidas nas peneiras superiores, melhorando assim a distribuição das frações e conseqüentemente a resistência, visto que quanto maior a porcentagem

de partículas graúdas, maior será a resistência do concreto produzido, pois aumenta a capacidade de suporte do material.

Figura 4.11 - Análises granulométricas do pó de pedra original e combinado

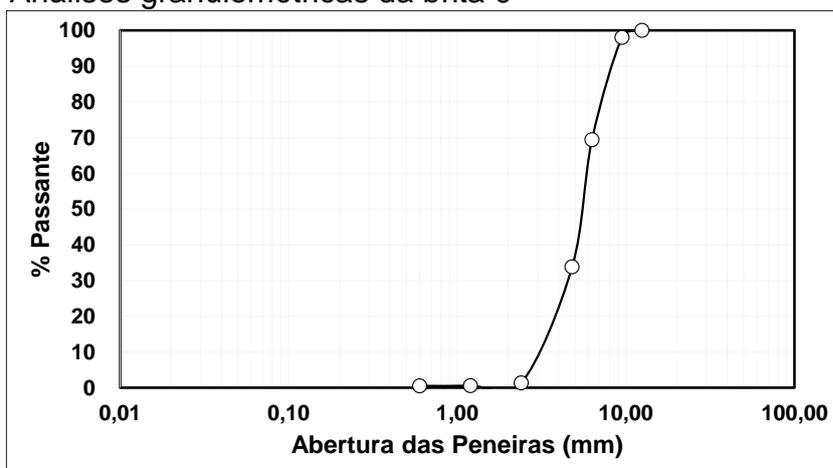


A classificação de acordo com o módulo de finura de ambos os pós de pedra foi de um material grosso, visto que $MF > 3,0$ (3,1 para o original e 4,6 para o combinado). A dimensão máxima característica para o pó original e combinado foram de 4,8 mm e 9,5 mm consecutivamente. A massa específica média do pó de pedra resultou em $2,78 \text{ g/cm}^3$.

O fíler convencional, o cimento Portland CP IV, obedeceu aos requisitos do DNIT para se classificar como material de enchimento, visto que possuía a quantidade de finos recomendada pela DNER-EM 367/97 - Materiais de enchimento para misturas betuminosas (DNER, 1997a), pois apresentou mais de 65% de material passante pela peneira de 0,075 mm de malha quadrada. Com as análises de granulometria, observou-se que a porcentagem de finos passante na peneira de 0,075 mm foi de 98,85%, a dimensão máxima característica 0,075 mm e o $MF = 0,012$, classificando-se como um material fino. Além disso, calculou-se a massa específica que resultou em $2,82 \text{ g/cm}^3$, um pouco inferior ao apresentado na fração fina do resíduo, $2,90 \text{ g/cm}^3$.

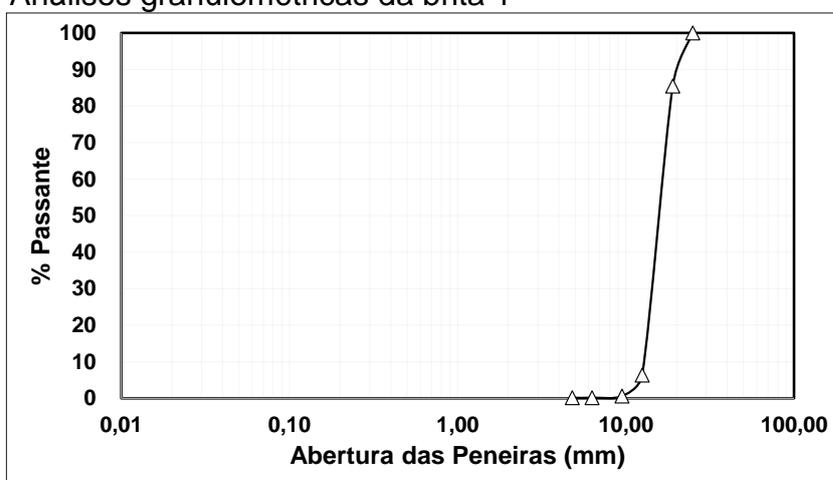
Para os agregados graúdos, brita 0 e 1, também foram realizadas análises granulométricas, como demonstradas nas Figuras 4.12 e 4.13.

Figura 4.12 - Análises granulométricas da brita 0



A brita 0 apresentou-se com dimensão máxima característica igual a 9,5 mm, e com massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturada superfície seca, massa específica aparente e absorção respectivamente: 2,58 g/cm³, 2,64 g/cm³, 2,75 g/cm³ e 2,29%.

Figura 4.13 - Análises granulométricas da brita 1



A brita 1 apresentou-se com dimensão máxima característica igual a 25 mm, massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, massa específica aparente e absorção respectivamente de: 2,61 g/cm³, 2,67 g/cm³, 2,77 g/cm³ e 2,15%.

Lourenço e Cavalcante (2014) realizaram ensaios de absorção em agregados artificiais de concreto para aplica-los em pavimentação, na qual obteve-se valores de 8,69% e 10,07%, valores estes, superiores ao observado nesta pesquisa (2,15%).

Também foi realizado o ensaio de abrasão *Los Angeles* com a brita 1, e observou-se que sua perda por abrasão foi de 62,51%, valor este, superior ao recomendado pela norma 031/06 do DNIT (2006) (abrasão $\leq 50\%$); porém, no mesmo documento, é relatado que são aceitos excepcionalmente materiais que tenham tido resultados de abrasão *Los Angeles* superiores a 50% e tenham demonstrado desempenho satisfatório ao serem aplicados em pavimentação; fato este comprovado em rodovias da região do Rio Grande do Norte com o agregado utilizado nesta pesquisa em trechos localizados em periferias próximas a cidade de Natal-RN.

Bernucci *et al.* (2006) diz que a forma da partícula do agregado possui influência significativa em propriedades como a resistência ao cisalhamento e trabalhabilidade de misturas asfálticas, além de mudar a energia de compactação necessária para alcançar uma determinada densidade. Em vista disso, classificou-se a brita 1 de acordo com seu índice de forma, a qual resultou em 0,91, classificando-a cúbica, visto que de acordo com Bernucci *et al.* (2006), quando mais próximo de 1, mais cúbica será a partícula, e quando mais próximo de 0 mais lamelar será; sendo 0,5 o índice mínimo aceitável para utilização do agregado em misturas asfáltica.

Diante dos resultados da caracterização física dos agregados utilizados nesta pesquisa e exposta até o momento, elaborou-se a Tabela 4.4 que permite a visualização geral dos parâmetros analisados e a comparação entre as frações do resíduo com o agregado natural e fíler convencional.

Tabela 4.4 - Características físicas dos agregados utilizados na pesquisa

Caracterização dos Agregados				
Parâmetros	Fração Grossa	Fração Fina	Areia	Cimento
DMC	2,4 mm	4,8 mm	2,4 mm	0,075 mm
MF	2,9	1,0	2,0	0,012
Massa específica	2,98 g/cm ³	2,90 g/cm ³	2,62 g/cm ³	2,82 g/cm ³
Parâmetros	Pó de Pedra	Pó de combinado	Brita 0	Brita 1
DMC	4,8 mm	9,5 mm	9,5 mm	25 mm
% de finos	11,33%	1,02%	-	-
Massa específica	2,78 g/cm ³	2,78 g/cm ³	2,58 g/cm ³	2,61 g/cm ³
Absorção	-	-	2,29%	2,15%
Abrasão <i>Los Angeles</i>	-	-	-	62,51%
Índice de Forma	-	-	-	0,91

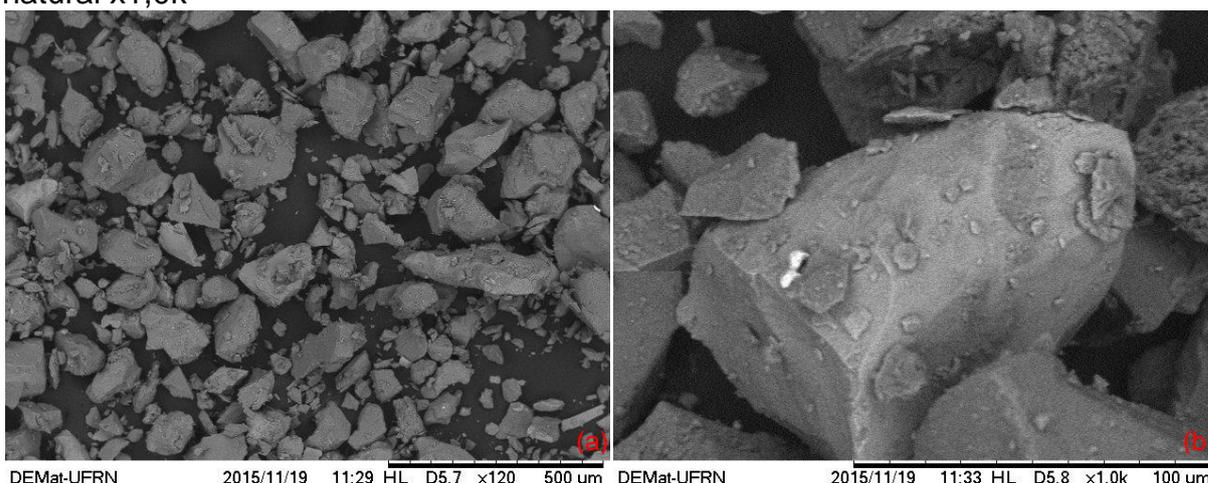
Nota: DMC - Dimensão máxima característica; MF - Módulo de Finura

Por meio da Tabela 4.4, pode-se observar que a fração grossa do resíduo e a areia natural obtiveram DMC e classificação através do módulo de finura semelhantes (ambas areias médias). A fração fina do resíduo e o cimento, classificaram-se como finos, porém o DMC desta fração do resíduo foi superior ao do cimento, fato este, devido as placas lamelares existentes no resíduo. Percebeu-se também que as massas específicas dos resíduos resultaram em valores maiores que os agregados naturais e isto provavelmente se deu pela composição mineralógica dos mesmos.

Ainda de acordo com a Tabela 4.4, percebeu-se uma redução significativa da quantidade de finos existente no pó de pedra após o tratamento por peneiramento, além do aumento do DMC posteriormente a mistura realizada com a brita 0. Observou-se absorção relativamente baixa quando comparadas com outros agregados na literatura, além de um bom índice de forma, que fornece ótimas condições para o intertravamento das partículas.

Ainda analisando a forma do grão, percebeu-se através da Figura 4.14 que os grãos das areias também não apresentaram um formato regular, possuindo partículas aproximadas a um formato cúbico com arestas bem definidas, e algumas partículas mais lamelares. Além disso, são perceptíveis alguns poros na superfície de alguns grãos.

Figura 4.14 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) areia natural x120; (b) areia natural x1,0k

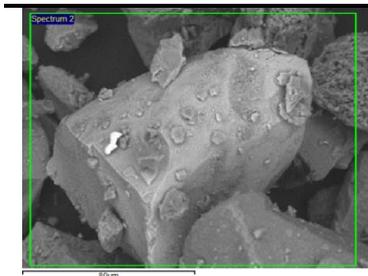


Em vista de analisar a composição química da areia natural nas imagens apresentadas, também realizou-se análise de EDS em área, como pode ser

observado na Tabela 4.5. A área natural apresentou-se com uma grande concentração de silício e cálcio, contribuindo para a formação dos minerais apresentados na Difração de Raio-X.

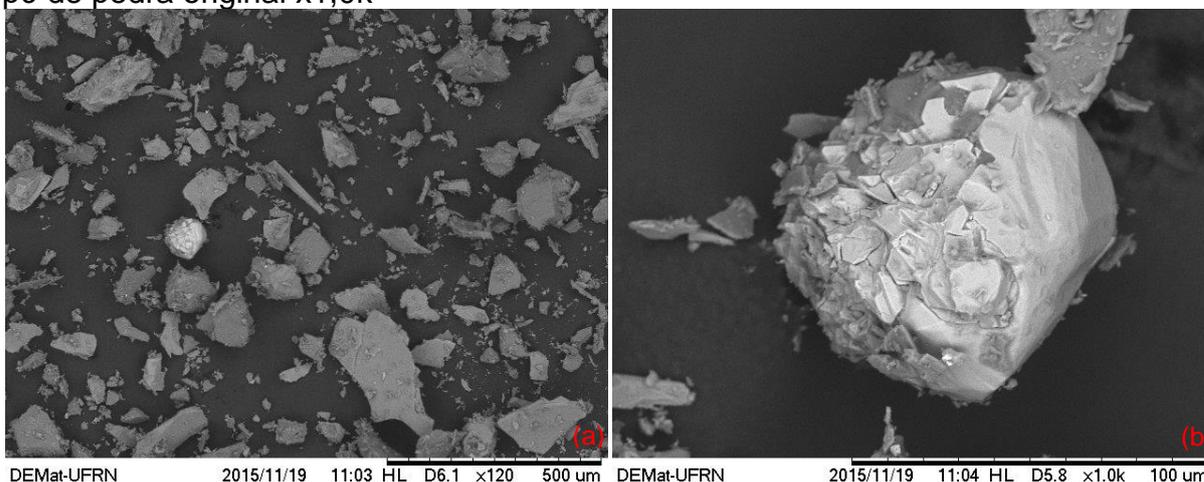
Tabela 4.5 - Análise de EDS da areia natural

Elemento	% em massa
Sódio	6.01
Alumínio	10.66
Silício	41.30
Potássio	2.00
Cálcio	19.24
Titânio	16.22
Ferro	4.58



Fazendo a mesma análise para o pó de pedra, percebeu-se formatos diversos, sem muita regularidade, como pode ser observada na Figura 4.15. Além disso, observou-se grãos de cor mais clara e formato mais esférico, diferenciando-se dos demais; em vista disso, analisou-se o grão através do EDS em área, e os resultados foram apresentados na Tabela 4.6.

Figura 4.15 - Microscopia eletrônica de varredura: (a) pó de pedra original x120; (b) pó de pedra original x1,0k



Com os resultados do EDS, pode-se aferir que o grão analisado tem grande probabilidade de ter esse formato e coloração diferenciada pela alta concentração de ferro (65.16%). Porém, a amostra analisada também apresenta outros elementos químicos, como alumínio, silício, potássio e enxofre, como pode ser observado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Sistema de energia dispersiva da areia natural

Elementos	% em massa
Alumínio	7.66
Silício	15.94
Enxofre	8.97
Potássio	2.27
Ferro	65.16

Através da Fluorescência de Raio-X (Tabela 4.7), percebeu-se que em ambos os agregados naturais, areia e pó de pedra, possuem como óxidos principais o SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e CaO , porém em concentração diferenciadas, sendo os dois, ricos em SiO_2 (45,09% à 48,20% para areia e 42,15% a 43,77% para o pó de pedra).

Tabela 4.7 - Fluorescência de Raio-X da areia natural e pó de pedra original

Areia Natural				Pó de Pedra			
Primeira Análise	Segunda Análise						
Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%	Óxidos	%
SiO_2	45.09	SiO_2	48.20	SiO_2	43.77	SiO_2	42.15
Al_2O_3	15.73	Al_2O_3	16.77	Fe_2O_3	23.10	Fe_2O_3	24.57
Fe_2O_3	14.45	Fe_2O_3	11.97	Al_2O_3	14.37	Al_2O_3	14.86
CaO	6.91	CaO	5.78	CaO	6.58	CaO	5.22
ZrO_2	5.47	ZrO_2	5.55	K_2O	3.82	MgO	4.58
K_2O	4.35	K_2O	4.15	MgO	3.30	K_2O	4.42
SrO	2.60	Na_2O	2.03	TiO_2	1.97	TiO_2	1.43
Na_2O	2.36	SrO	1.95	ZrO_2	1.19	ZrO_2	0.66
TiO_2	1.38	MgO	1.30	SrO	0.91	SrO	0.62
MgO	1.04	TiO_2	1.14	P_2O_5	0.45	P_2O_5	0.48
SO_3	0.36	BaO	0.39	MnO	0.26	BaO	0.38
MnO	0.22	P_2O_5	0.24	SO_3	0.18	MnO	0.27
ZnO	0.04	MnO	0.18	Cr_2O_3	0.05	Rb_2O	0.21
-	-	Rb_2O	0.17	ZnO	0.05	Y_2O_3	0.05
-	-	Y_2O_3	0.14	-	-	Cr_2O_3	0.05
-	-	ZnO	0.04	-	-	ZnO	0.04
-	-	-	-	-	-	-	-

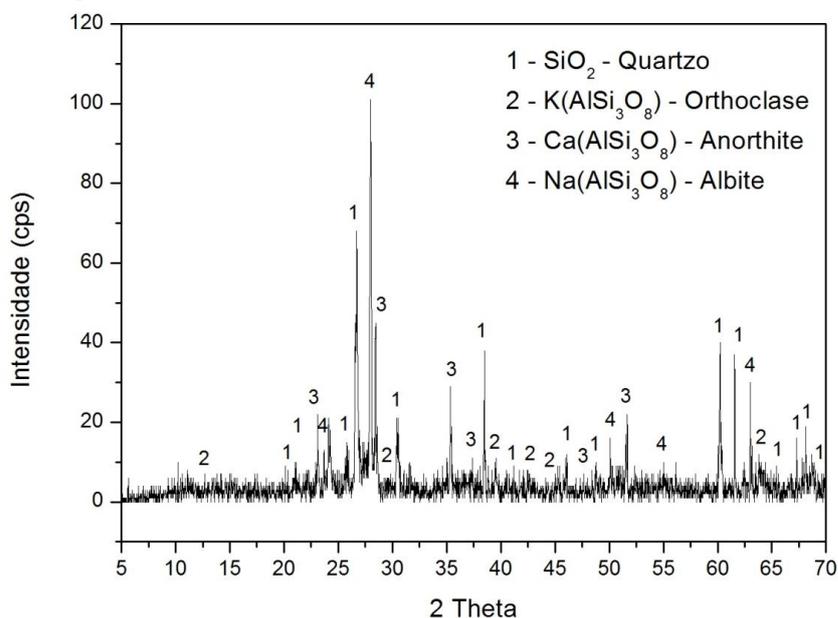
Manhães e Holanda (2008) e Ribeiro (2013) analisaram a composição química de resíduo de corte de rochas graníticas, e perceberam que os resíduos apresentaram consecutivamente as seguintes composições químicas em termos de óxidos: SiO_2

(72,17%), Al_2O_3 (10,80%), Fe_2O_3 (5,04%), CaO (2,33%), Na_2O (2,34%) e K_2O (3,87%); CaO (11,58%), SiO_2 (61,50%), Fe_2O_3 (2,59%), Al_2O_3 (15,33%) e K_2O (6,69%);

Paiva (2013) realizou FRX de areia natural, e constatou que o dióxido de silício e óxido de alumínio, juntamente apresentavam 90% da composição. Entre os principais óxidos, citam-se: SiO_2 (69,86%), Al_2O_3 (22,07%), Na_2O (3,13%) e K_2O (3,12%).

Considerando as características mineralógicas, através da difração de Raio-X percebeu-se que a areia natural utilizada é composta basicamente de quartzo e minerais do grupo dos feldspato, a orthoclase – $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, anorthite – $\text{Ca}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ e albite $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$. Composição mineralógica semelhante foi encontrada por Paiva (2013), apresentando como minerais, o quartzo, e os feldespato: orthoclase e albite. Além disso, por meio da Figura 4.16, acredita-se que assim como a fração fina, a areia possui resquícios de características amorfas, apesar de possuir picos bem acentuados.

Figura 4.16 - Difração de Raio-X: areia natural

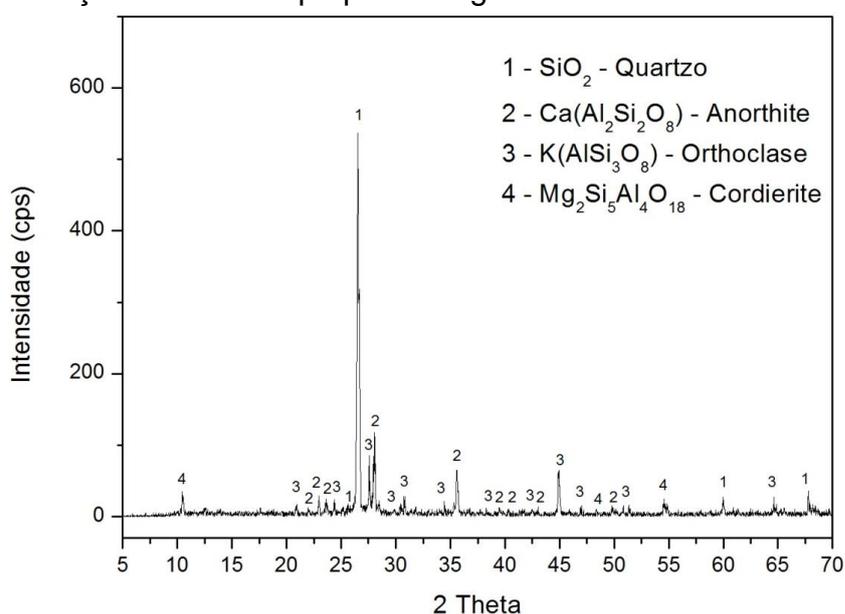


Assim como a areia natural, o pó de pedra apresentou o quartzo (SiO_2), e dois componentes do grupo do feldespato como os principais minerais da composição do material, a orthoclase – $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ e a anorthite – $\text{Ca}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$; porém, devido ser oriunda de uma rocha granítica, apresentou-se também com a cordierite, que possui

o magnésio na sua composição química ($Mg_2Si_5Al_4O_{18}$), como pode ser observada na Figura 4.17.

Ribeiro (2013) realizou DRX de resíduo de cortes de rochas graníticas ornamentais, onde apresentaram como principais minerais o quartzo (SiO_2), mica muscovita [$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$], hematita (Fe_2O_3), Calcita ($CaCO_3$) e feldspato potássico ($KAlSi_3O_8$). Já Manhães e Holanda (2008), trabalhando com o mesmo tipo de resíduo, encontrou o quartzo, albita ($NaAlSi_3O_8$, feldspato sódico), calcita, microlina ($KAlSi_3O_8$, feldspato potássico) e hematita.

Figura 4.17 - Difração de Raio-X: pó pedra original



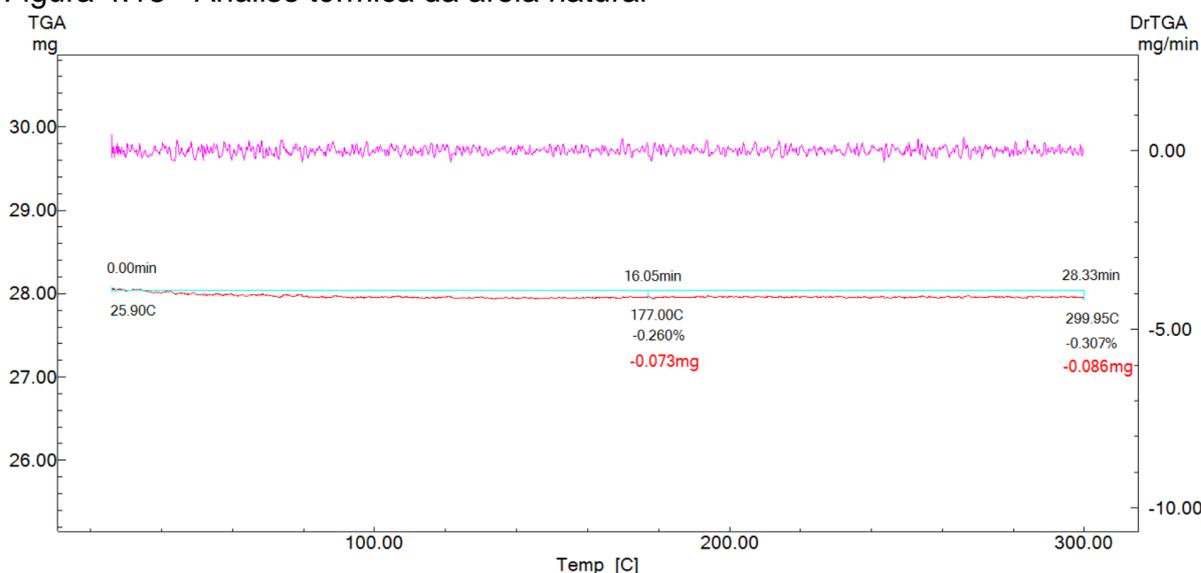
Ainda de acordo com Manhães e Holanda (2008), os resultados demonstram que o resíduo é oriundo de gnaiss, rocha metamórfica, pois apresentou-se rica em quartzo e feldspato; além disso, acrescentam que a presença de calcita e hematita, é devido ao processo de corte/serragem, ao adicionar granada e óxido de cálcio como abrasivo e lubrificante.

Minerais semelhantes foram encontrados por Menezes *et al.* (2007), ao trabalhar com serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicas; foram eles: calcita, mica, albita e quartzo. Tais resultados apresentados pelos autores, corroboram com os demonstrados na Figura 4.17, visto que o pó de pedra tem origem de rocha granítica e apresentou o quartzo e feldspatos como principais minerais de sua composição.

Além da composição mineralógica da amostra do pó de pedra, com a Figura 4.17, pode-se observar que diferentemente da areia e da fração fina do resíduo, o pó de pedra não se demonstrou com características amorfas, ou seja, com as ranhuras em maiores proporções na base do gráfico.

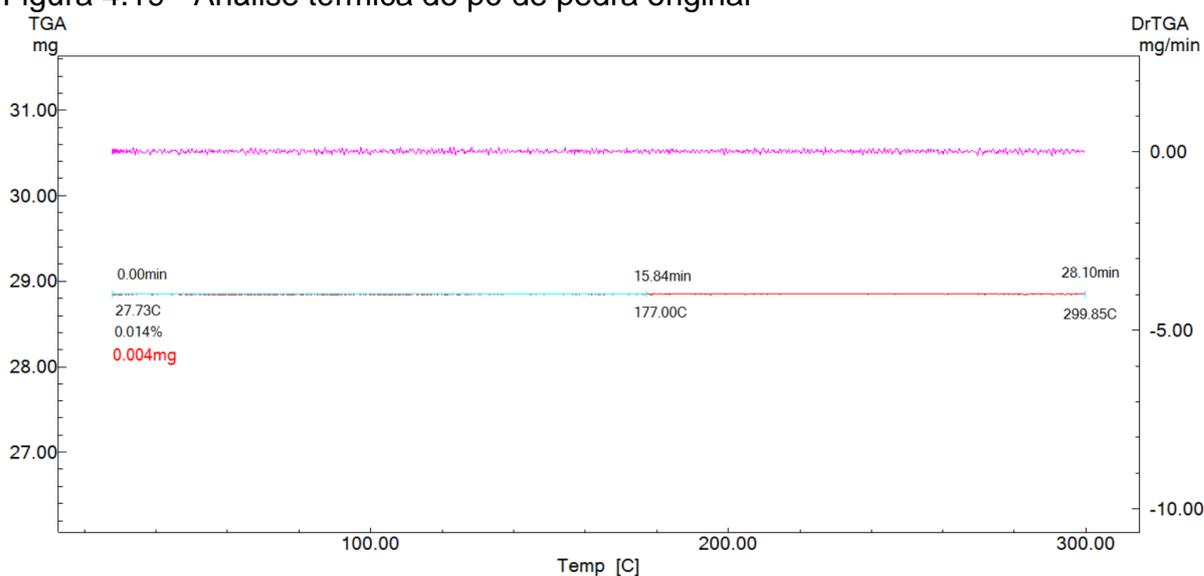
Analisando as características térmicas dos agregados naturais (Figura 4.18 e 4.19), percebeu-se também que a perda de massa da areia e do pó de pedra foram insignificantes. Na temperatura máxima de trabalho (177° C) para concretos asfálticos, a areia teve perda de 0,073 mg e extrapolando a temperatura para 300° C para verificar o comportamento do material, percebeu-se que a perda aumentou para 0,086 mg.

Figura 4.18 - Análise térmica da areia natural



O pó de pedra teve um comportamento diferenciado no âmbito de suas propriedades térmicas, quando comparado com os outros materiais utilizados nesta pesquisa, visto que a perda de massa originada pela elevação da temperatura se deu somente no início do ensaio, possivelmente relacionado a umidade do material, demonstrando que seus constituintes minerais são mais resistentes a elevação de temperatura do que os outros já analisados. Como pode ser visto na Figura 4.19 a perda de massa referente a análise térmica do pó de pedra foi de 0,004 mg.

Figura 4.19 - Análise térmica do pó de pedra original



4.3 Resultados da caracterização do material asfáltico

O cimento asfáltico de petróleo utilizado nesta pesquisa foi classificado através de dados obtidos pelo o ensaio de penetração e outros parâmetros descritos no regulamento técnico nº 03/05 (ANP, 2005). Os resultados dos ensaios realizados estão descritos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo

Parâmetros	Resultados		
	135° C	150° C	177° C
Viscosidade	148 SSF	70 SSF	38 SSF
Penetração	57 - CAP 50/70		
Massa Específica	1,02 g/cm ³		
Ponto de Fulgor	325° C		
Ponto de Amolecimento	59° C		

Com a caracterização do material asfáltico, verificou-se que a penetração por uma agulha padronizada de 100g, a 25° C no CAP, em um período de 5 segundos, foi de 57 dmm, localizando-se na faixa de penetração 50/70. Também foram observados os seguintes resultados para os outros parâmetros analisados: massa específica de 1,02 g/cm³, o ponto de fulgor de 325°C, o ponto de amolecimento de 59° C e viscosidade Saybolt-Furol para as temperaturas de 135° C, 150° C e 177° C de 148 SSF, 70 SSF e 38 SSF, respectivamente. Diante dos valores obtidos para os

parâmetros mencionados, ressalta-se que os mesmos corroboram com o regulamento técnico Nº 03/05 da ANP (2005).

4.4 Resultados dos estudos das misturas asfálticas

Para os estudos com as misturas asfálticas compostas pelos agregados miúdos na condição natural e artificial foram realizados cinco traços de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) em cada umas das condições, onde, para cada traço, foram empregados quatro teores de ligantes, para cada teor, foram confeccionados três corpos de prova, totalizando 12 corpos de provas por traço e 120 corpos de provas no total.

Para analisar a viabilidade da utilização da fração fina do resíduo como fíler artificial, foram executados mais 24 corpos de provas, sendo 12 empregando agregado miúdo natural e fíler artificial e 12 utilizando agregado miúdo e fíler artificiais. Diante dos resultados que serão apresentados, o terceiro traço foi escolhido para esta análise por ser o intermediário entre os estudados, como também por ter sido o que atingiu o maior valor de estabilidade com o resíduo na composição (845,44 kgf), e a maior porcentagem de aumento de estabilidade quando comparado com a amostra padrão (94,44%, ver a Tabela 4.10).

Para verificar a viabilidade técnica da substituição do fíler convencional pela fração fina do resíduo, inicialmente realizou-se análises granulométricas para verificar o comportamento da curva e a porcentagem de materiais finos contida no resíduo. Através das análises citadas, verificou-se que a quantidade de material passante pela peneira de 0,075 mm foi de 57,81% (Figura 4.2). Este resultado descarta a possibilidade da utilização desta fração do resíduo *in natura*, ou seja, sem tratamento prévio; visto que segundo a DNER - EM 367/97 (DNER, 1997a), o material de enchimento para misturas asfálticas deve possuir pelo menos 65% de material passante na peneira de abertura de 0,075 mm de malha quadrada, além de ser inerte.

Diante disso, realizou-se um tratamento prévio para melhorar a qualidade do material. Passou-se a fração fina na peneira de 0,075 mm e recolheu a quantidade necessária do material passante para a fabricação dos corpos de provas de concreto asfáltico.

A seguir, serão descritos os resultados das dosagens com agregados naturais, com a substituição do agregado miúdo, pela fração grossa do resíduo, e do fíler, pela fração fina do resíduo.

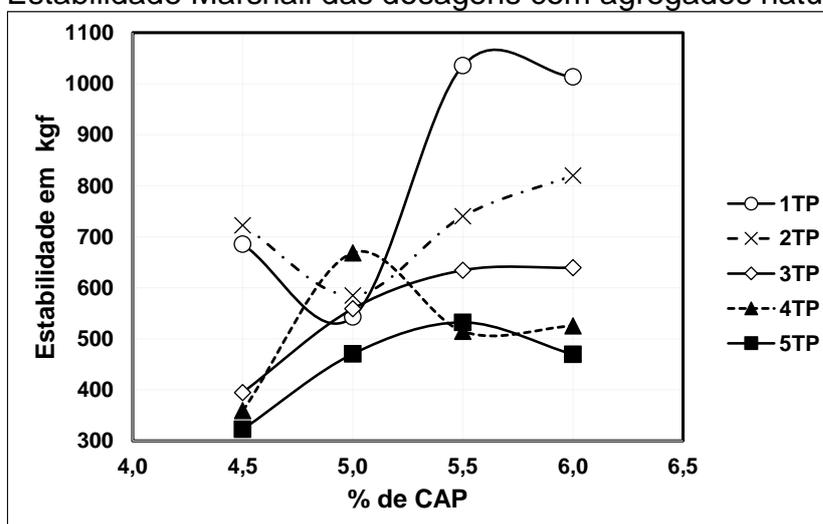
4.4.1 Estabilidade Marshall

No tocante das propriedades mecânicas analisadas neste trabalho, obteve-se curvas para as misturas constituídas com agregados naturais, com a substituição do agregado miúdo, pela fração grossa do resíduo e com a substituição do fíler, pela fração fina do resíduo.

Tendo como foco as estabilidades alcançadas por corpos de provas constituídos somente por agregados naturais e fíler convencional, a Figura 4.20 apresenta as curvas formadas pelos resultados de estabilidade versus a porcentagem de CAP dos cinco traços de concreto asfáltico proposto.

Na Figura 4.20 observa-se que os maiores valores de estabilidade alcançados foram atingidos para os corpos de prova do 1TP, possivelmente por conter menor quantidade de areia na constituição dos mesmos, visto que a porcentagem de agregado miúdo do primeiro traço (1TP) foi de 6%. Contrária a essa situação, os valores atingidos pelo traço 5TP com 22% de areia, apresentou uma menor capacidade de suporte, pois houve uma redução significativa da quantidade de agregados graúdos e intermediário, passando de 35% de brita 0 no traço 1TP para 30% no traço 5TP, e 40% de pó de pedra no primeiro traço para 29% no 5TP.

Figura 4.20 - Estabilidade Marshall das dosagens com agregados naturais

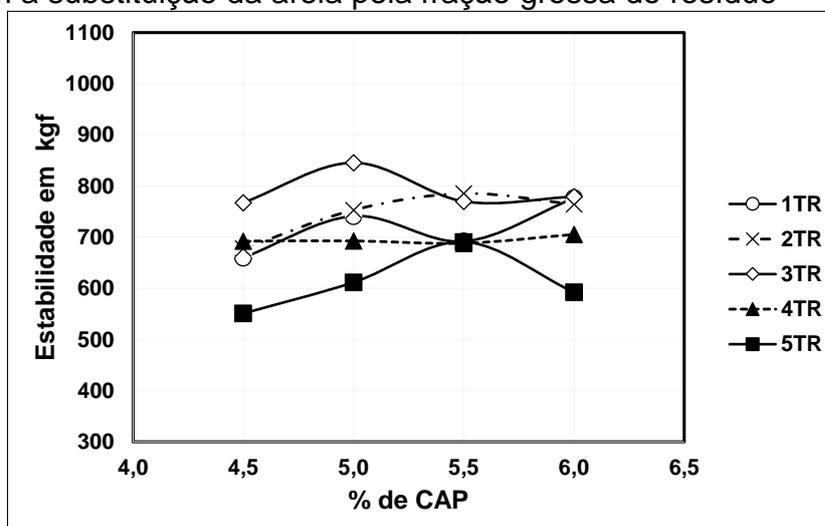


Analisando-se a Figura 4.20 observa-se também que em todos os traços de CBUQ, em seu ponto de pico, foram obtidos valores de estabilidade acima de 500 kgf, atendendo ao requisito recomendado pela norma 031/2006 do DNIT (2006a), para camadas de rolamento de pavimentos asfálticos.

Para os traços constituídos com a fração grossa do resíduo na condição de agregado miúdo artificial, observou-se pela Figura 4.21 que as curvas de estabilidade versus porcentagem de CAP não apresentam um comportamento muito disperso como ocorrido com os agregados naturais, e isto, provavelmente pode ter sido devido a maior estabilidade apresentada pelos grãos da fração grossa do resíduo, como também por uma compactação mais eficiente para todos os traços.

Analisando a viabilidade da utilização da fração grossa somente pela estabilidade, observou-se que todos os traços atingiram valores de estabilidade acima do recomendado pelo DNIT, 500 kgf (DNIT, 2006a); isto, para todas as dosagens avaliadas.

Figura 4.21 - Curvas de estabilidade Marshall versus porcentagem de CAP dos corpos de prova com a substituição da areia pela fração grossa do resíduo



Ainda de acordo com a Figura 4.21, constatou-se que o traço que apresentou os melhores valores de estabilidade foi o traço intermediário, 3TR, com 14% da fração grossa do resíduo do beneficiamento da scheelita, e, posteriormente, o segundo traço com 10% da mesma fração do resíduo. Tal comportamento pode ser explicado provavelmente por um melhor empacotamento dos grãos da composição granulométrica da fração do resíduo e também pela presença de minerais mais

resistentes na sua composição. Além disso, no traço 3TR, só houve a redução do agregado intermediário (pó de pedra) e o aumento do agregado miúdo artificial, mantendo as mesmas porcentagens para os agregados graúdos da composição.

Assim como constatado nos traços padrões, o quinto traço com a substituição do agregado miúdo (5TR) também atingiu os menores valores de estabilidade, que também se explica pelo aumento da fração do resíduo e diminuição da porcentagem do agregado graúdo.

Outra característica interessante apresentada pelos corpos de prova contendo a fração grossa do resíduo, foi o comportamento da curva gerada pelas estabilidades do traço 4TR, visto que a mesma se apresentou relativamente linear e com valores em torno de 700 kgf. Tal comportamento pode ter sido gerado a partir de uma compactação eficientemente no processo de moldagem dos corpos de prova, atribuindo-lhes capacidades de suporte semelhantes.

Além disso, através das Figuras 4.20 e 4.21, observou-se que o traço 1TR mostrou estabilidades menores do que o 1TP nas dosagens de CAP de 4,5%, 5,5% e 6,0%, e valor maior a 5,0% de CAP. Analisando os traços 2TR e 2TP, observou-se que ambos foram acima de 500 kgf, porém o traço com a areia natural ainda apresentou maior estabilidade média (820,03 kgf para 6,0% de CAP).

O 3TR superou todas as estabilidades do 1TR, e parcialmente o 2TR, visto que a 5,5% de CAP, o 2TR atingiu 785,18 kgf e o 3TR, 769,93 kgf. Tendo em consideração o traço padrão (3TP) percebeu-se que todas as estabilidades alcançadas nos corpos de prova com o resíduo obtiveram valores superiores, visto que as estabilidades contendo 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% de CAP obtiveram os seguintes valores consecutivamente: 394,74 kgf, 558,99 kgf, 634,39 kgf e 639,52 kgf, como pode ser observado através das curvas nas Figuras 4.20 e 4.21.

Confrontando os resultados das estabilidades do traço 4TR com o 4TP, observa-se que todos os valores alcançados com a incorporação do resíduo foram superiores aos alcançados com o agregado natural. A partir dessas análises, infere-se que isto pode ter ocorrido por vários fatores, como a incidência de uma compactação mais eficiente e/ou um melhor empacotamento dos grãos dos resíduos e seus constituintes minerais.

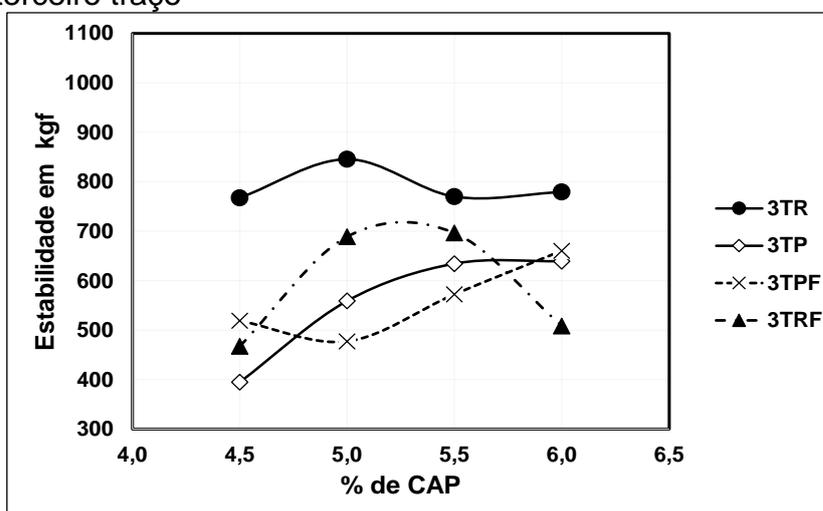
Ainda realizando as análises comparativas entre traços, percebeu-se que mesmo com o aumento do resíduo de 6% (1TR) para 22% (5TR), todas as estabilidades apresentaram-se acima do limite mínimo do DNIT (500 kgf). Este fato mostra que mesmo em porcentagens altas, o uso deste resíduo se torna viável quando se analisa somente a estabilidade, visto que no 5TP, somente a dosagem de 5,5% de CAP obteve estabilidade acima de 500 kgf (532,19 kgf).

Tendo como foco de análise a substituição do fíler convencional, pelo artificial nos traços intermediários, a Figura 4.22 apresenta as curvas dos traços padrão, com a substituição do agregado miúdo, com agregado natural e substituição do fíler convencional e com a substituição do agregado miúdo e fíler convencional.

Com a Figura 4.22 é possível observar que das quatro curvas referentes as porcentagens do terceiro traço, a que atingiu melhores valores de estabilidade foi a 3TR, o terceiro traço com o agregado miúdo artificial, e o que atingiu menor valor foi o constituído por agregados naturais, o 3TP; isto possivelmente por uma melhor compactação na 3TR, pela presença de minerais resistentes e melhor empacotamento dos grãos.

Com relação a substituição do fíler, observou-se que os corpos de provas que continham as duas frações do resíduo alcançaram melhores estabilidade, porém para as dosagens intermediárias de CAP, demonstrada na curva 3TRF. A 3TPF apresentou uma tendência ao crescimento a partir da dosagem de CAP de 5,0% e tal característica fez com que atingisse valor de estabilidade superior a 3TP e a 3TRF a 6,0% de CAP.

Figura 4.22 - Curvas de estabilidade Marshall versus porcentagem de CAP dos corpos de prova do terceiro traço

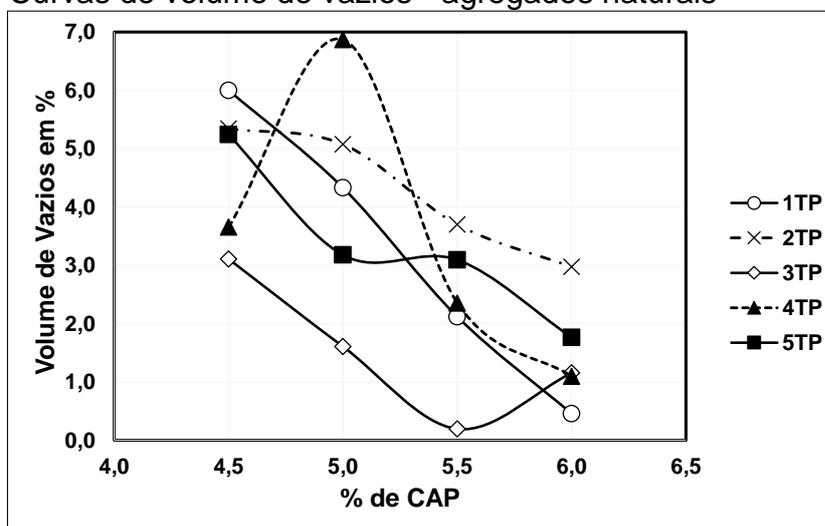


4.4.2 Volume de Vazios

Outro parâmetro importante a analisar em uma mistura betuminosa é o volume de vazios - V_v , pois através da aferição de sua porcentagem, pode-se prever alguns comportamentos que o pavimento flexível terá quando for solicitado.

A Figura 4.23 mostra as curvas referentes a $\%V_v$ versus a $\%CAP$ dos cinco traços executados com agregados naturais. Na da referida figura, é possível perceber que somente o traço 3TP não alcançou o limite superior para o $\%V_v$ determinados pela norma do DNIT 031/06 (DNIT, 2006a). Isto provavelmente tenha ocorrido devido a maior presença de material com graduação miúda na composição quando comparado com os traços 1TP e 2TP, e conseqüentemente maior preenchimento dos vazios. Este fato se torna prejudicial para camadas de rolamento, pois quando o pavimento for solicitado, não terá vazios suficientes para se deformar e aliviar as tensões, ou seja, se comportará de forma rígida, podendo gerar fissuras, e vim a prejudicar a durabilidade do mesmo.

Figura 4.23 - Curvas de volume de vazios - agregados naturais



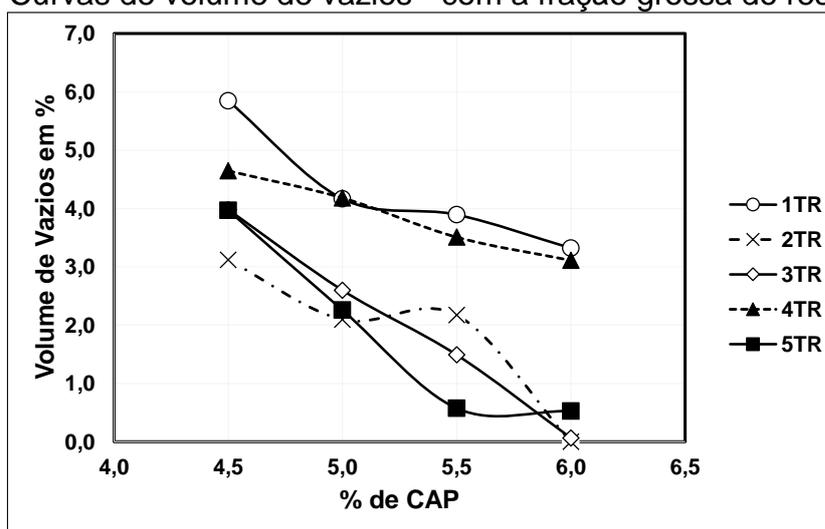
Ainda de acordo com a Figura 4.23, comportamento contrário ao traço 3TP pode ser observado na curva do traço 4TP, visto que os corpos de provas a 5,0% de CAP atingiram valor médio de $\%V_v$ próximo a 7,0%; tal característica também se torna prejudicial a camadas de rolamento por possuir muitos vazios, o que pode possibilitar deformações plásticas, além de ficar susceptível a percolação de água e desagregação dos materiais. Além disso, a diferença da $\%V_v$ entre o 3TP e 4TP, pode

ter ocorrido devido a angulação dos agregados graúdos, gerando mais vazios, além de uma compactação menos eficiente do que a ocorrida com o 3TP

Analisando as curvas geradas pelos corpos de provas com a substituição do agregado miúdo pela fração grossa do resíduo na Figura 4.24, é perceptível que o traço que possui menor quantidade da fração do resíduo (1TR), foi o que alcançou as maiores porcentagens de volume de vazios, e isto provavelmente foi gerado pela menor quantidade de material miúdo para preenchimento de vazios dos corpos de prova. Além disso, é perceptível que o valor de %Vv alcançado pelo 1TR a 4,5% de CAP foi muito próximo ao valor atingido pelo 1TP na mesma porcentagem de ligante.

Além disso, observou-se que o 2TR apresentou somente o limite mínimo do DNIT (3,0%), provavelmente acarretando em um revestimento com comportamento mais rígido do que os outros que se apresentaram dentro da faixa de $3,0\% \leq \%Vv \leq 5,0\%$. Para esse traço específico, percebeu-se que os corpos de prova de 6,0% de CAP tenderam 0% de volume de vazios, isso pode ter ocorrido por uma compactação mais efetiva, por um bom empacotamento dos grãos na mistura, além da massa específica aparente da mistura compactada ter sido semelhante a densidade máxima teórica; tal comportamento também foi observado no 3TR.

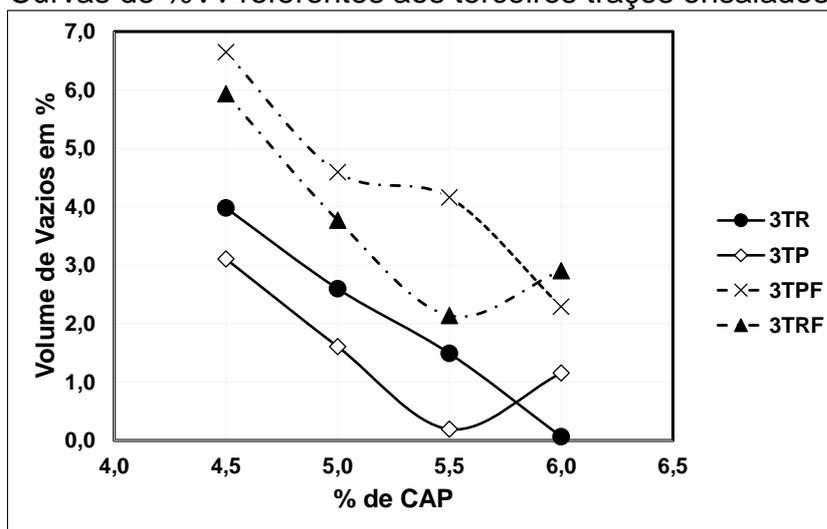
Figura 4.24 - Curvas de volume de vazios - com a fração grossa do resíduo



Comparando os resultados do 3TR com o traço padrão 3TP (Figura 4.25), observou-se que os corpos de prova com a fração grossa do resíduo obtiveram melhores resultados, visto que tenderam a 4,0% de %Vv enquanto os corpos de prova com a areia natural atingiram como valor máximo 3,11%, também a 4,5% de CAP.

Com o aumento da porcentagem da fração grossa do resíduo, a partir do segundo traço (Figuras 4.24), com exceção do 4TR, observou-se uma tendência a baixos valores de %Vv, próximos a valores nulos, devido a um maior preenchimento dos vazios.

Figura 4.25 - Curvas de %Vv referentes aos terceiros traços ensaiados



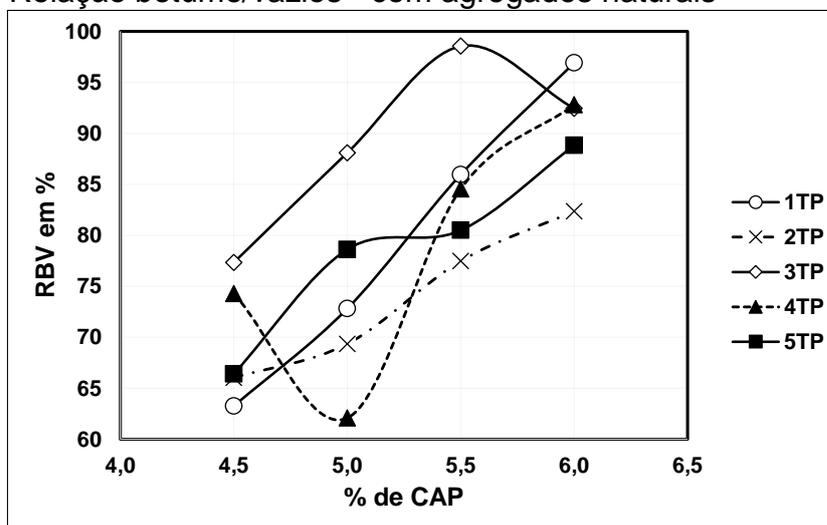
Analisando o mesmo parâmetro para os traços com a substituição do fíler pela fração fina do resíduo (Figura 4.25), observou-se que os traços com a fração fina atingiram valores de %Vv mais altos, alcançando valores acima de 6,5% para os corpos de prova com areia natural e a fração fina do resíduo, e acima de 5,0% de Vv para os corpos de provas com das duas frações do resíduo. Contudo, quando se analisa somente esse parâmetro volumétrico, os dois traços contendo a fração fina do resíduo são viáveis, pois contemplam faixas entre 3,0% e 5,0% de volume de vazios para as dosagens de CAP analisadas.

4.4.3 Relação betume/vazios

Analisando a relação betume vazios - RBV, percebeu-se pela Figura 4.26 que todas as curvas apresentaram uma tendência ao aumento da %RBV com o aumento do teor de ligante, com exceção para o traço 3TP a 5,5% de CAP e 4TP a 5,0% de CAP. Também foi observado que o traço 3TP a 5,5% de CAP alcançou %RBV próximo a 100%; tal fato pode ter ocorrido por uma compactação menos eficiente, deixando mais vazios para serem preenchidos com betume, além da utilização de agregados

menos porosos e mais angulares, possibilitando mais vazios entre os agregados e menos absorção pelos constituintes minerais, de modo a maximizar o valor de RBV.

Figura 4.26 - Relação betume/vazios - com agregados naturais



Ainda analisando a Figura 4.26, também é perceptível que os menores valores de RBV se deu na dosagem mais baixa de ligante, 4,5% de CAP, com exceção do 4TP, que teve seu menor valor a 5,0% de ligante asfáltico. Valores baixos de %RBV pode gerar pavimentos susceptíveis a infiltração de água e a possíveis desagregação dos materiais, prejudicando a durabilidade da estrutura do pavimento. De forma análoga, observou-se nas curvas de %RBV versus %CAP que os maiores valores de %RBV se deu em dosagens mais altas, a 5,5% e 6,0% de CAP; tal característica pode ter ocorrido devido a maior quantidade de ligante na mistura asfáltica ou menores valores de %Vv, ocasionado por uma compactação mais eficiente ou pela utilização de agregados menos angulosos.

Para os valores de RBV obtidos infere-se que as curvas dos traços estudados ultrapassaram o limite superior recomendado pelo DNIT (82%), fato este muito relevante, visto que grandes valores de %RBV como os alcançados pelo primeiro traço com agregados naturais (98,83%) podem gerar problemas ao revestimento, pois segundo Bernucci *et al* (2006) o concreto asfáltico é muito sensível a variação do teor de ligante, e estes, se forem utilizados em altas doses, podem ocasionar deformações permanentes por fluência e/ou exsudação.

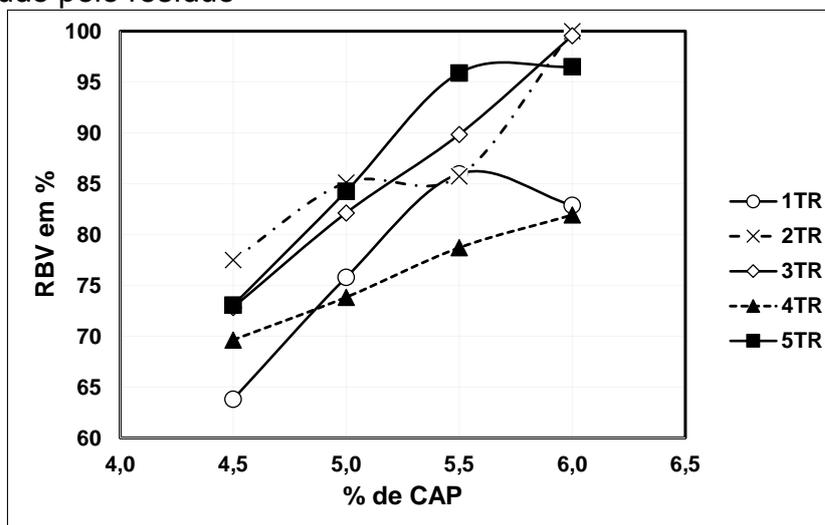
Ainda de acordo com o Bernucci *et al.* (2006), valores baixos de teor de ligante também tem suas consequências negativas no concreto asfáltico, pois podem

ocasionar o enfraquecimento da mistura e a diminuição da sua resistência a formação de trincas, devido ao efeito prejudicial na resistência à tração e redução da vida de fadiga.

Analisando as curvas de %RBV versus %CAP dos traços constituídos por agregado miúdo artificial (Figura 4.27), percebeu-se a mesma tendência apresentada pelas curvas de %RBV x %CAP dos corpos de prova com agregados naturais, ou seja, a um aumento da porcentagem de RBV com o aumento da dosagem de ligante, sendo os maiores valores de %RBV a 6,0% de CAP, com exceção do traço 1TR, a 5,5% de CAP.

Devido a densidade máxima teórica ter se igualado a massa específica aparente da mistura compactada, os vazios de agregados minerais e os vazios com betume atingiram o mesmo valor (14,50%), fazendo com que a relação betume vazio atingisse a porcentagem de 100% e conseqüentemente a porcentagem de volume de vazios igual a 0% para os traços 2TR e 3TR, fato esse, que impossibilita a produção de um pavimento de boa qualidade a 6,0% de CAP, pois pode gerar deformações por fluência e/ou exsudação.

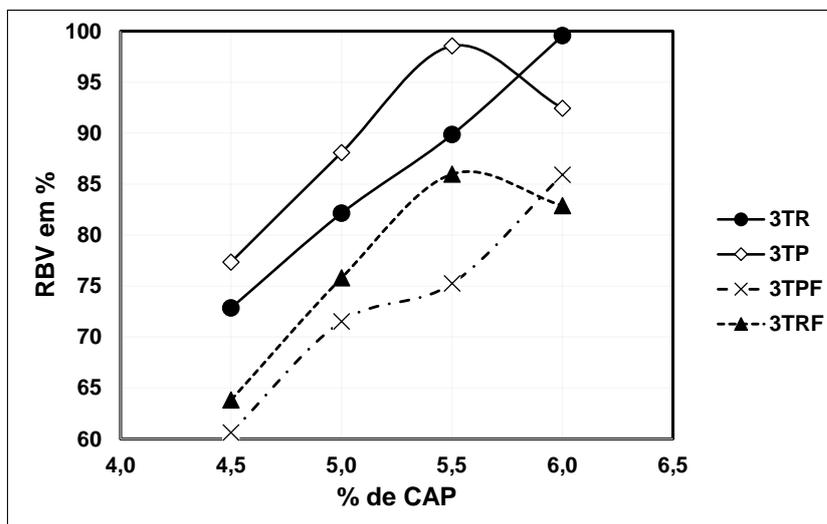
Figura 4.27 - Relação betume/vazios dos corpos de prova com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo



Fazendo a mesma análise para os corpos de provas com a substituição do fíler convencional pela fração fina do resíduo (Figura 4.28), observou-se que as curvas dos traços 3TFR e 3TP; 3TFP e 3TR apresentaram comportamentos semelhantes. Porém, os traços constituídos com fíler convencional obtiveram valores de RBV maiores, de modo a se inferir que a fração fina do resíduo do beneficiamento da scheelita possuem

grãos com tamanhos mais variados, possibilitando um preenchimento mais eficiente dos vazios entre os constituintes minerais dos corpos de prova de CBUQ, e, como consequência, provendo a diminuição da relação betume/vazios.

Figura 4.28 - Relação betume/vazios dos corpos de prova dos terceiros traços executados



Ainda é possível observar que todas as curvas obtiveram os menores valores de RBV à 4,5% de CAP, enfatizando que há uma tendência a aumento do valor da %RBV com o aumento da porcentagem de ligante; porém, esta previsão se torna difícil, pois a quantidade de vazios na amostra depende de diversos fatores como angulosidade, energia de compactação e influencias operacionais do executor.

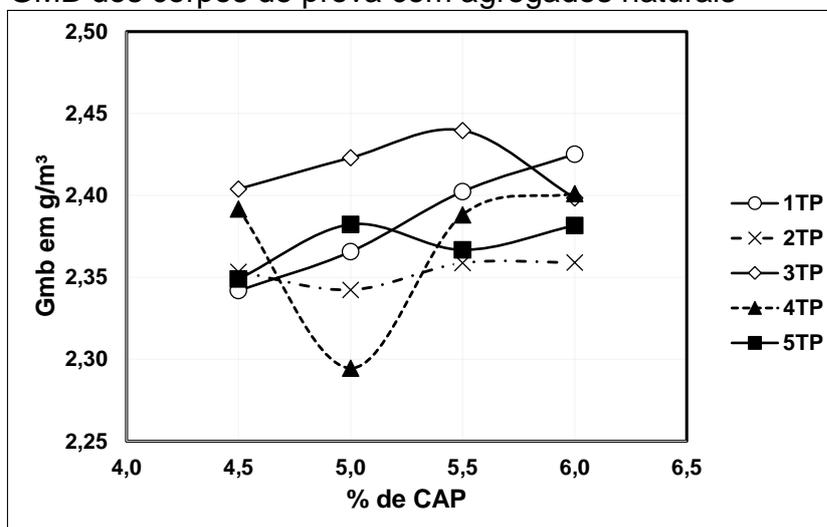
4.4.4 Massa específica aparente da mistura compactada - Gmb

Com relação as massas específicas aparentes da mistura compactada com agregados naturais, observou-se poucas variações nos valores obtidos pelos traços, porém com uma tendência ao aumento de valor em dosagens altas de CAP, com exceção do traço 3TP, visto que se inicia o crescimento a 4,5% até 5,5% de ligante, com posterior decréscimo.

Além disso, é perceptível que a %Vv afeta diretamente o Gmb, pois quanto menor a %Vv maior será o Gmb. Tal fato pode ser observado no traço 4TP a 5,0% de CAP, pois apresentou o menor valor de Gmb das curvas mostradas na Figura 4.29, e o maior valor de %Vv conforme a Figura 4.23. De forma análoga, o 3TP a 5,5% de

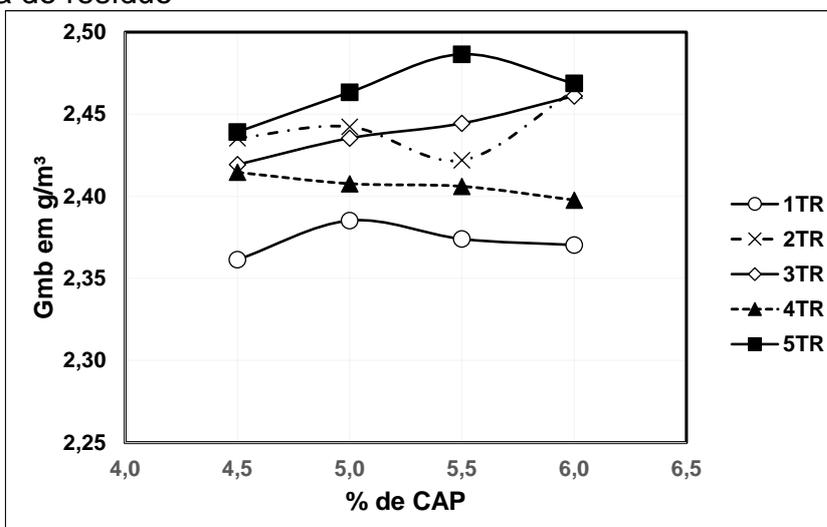
CAP apresentou maior valor de Gmb e menor valor de %Vv, conforme as figuras citadas.

Figura 4.29 - GMB dos corpos de prova com agregados naturais



Da mesma forma, pode-se analisar as curvas de massas específicas das misturas compactadas com agregados miúdo artificial. Pela Figura 4.30 é perceptível que a curva que atingiu maior valor de Gmb foi a 5TR e a menor a 1TR e através da Figura 4.24, que se refere a porcentagem de volume de vazios, percebeu-se que o traço 1TR obteve a maior %Vv e o 5TR tendeu a 0%

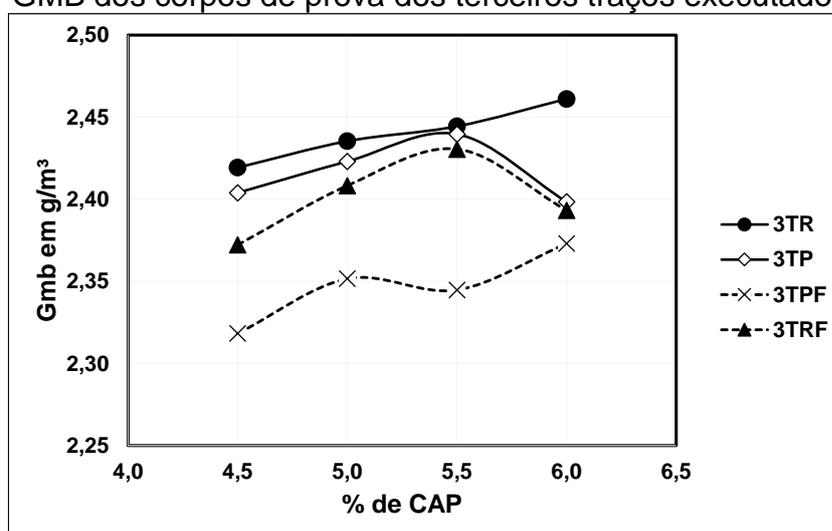
Figura 4.30 - Gmb dos corpos de prova com a substituição do agregado miúdo pela fração grossa do resíduo



Ainda observando as curvas, o traço 1TR alcançou os menores valores em todas as porcentagens de CAP e o traço 4TP apresentou tendências a decréscimo de forma pontual e em seguida tendeu ao crescimento dos valores de Gmb, enquanto o 4TR teve um leve decréscimo nos valores, porém de forma linear.

A Figura 4.31 apresenta as curvas relativas as relações entre os valores das massas específicas aparentes das misturas compactadas dos corpos de prova constituídos pela composição do terceiro traço versus as porcentagens de ligante asfálticos estudadas.

Figura 4.31 - GMB dos corpos de prova dos terceiros traços executados



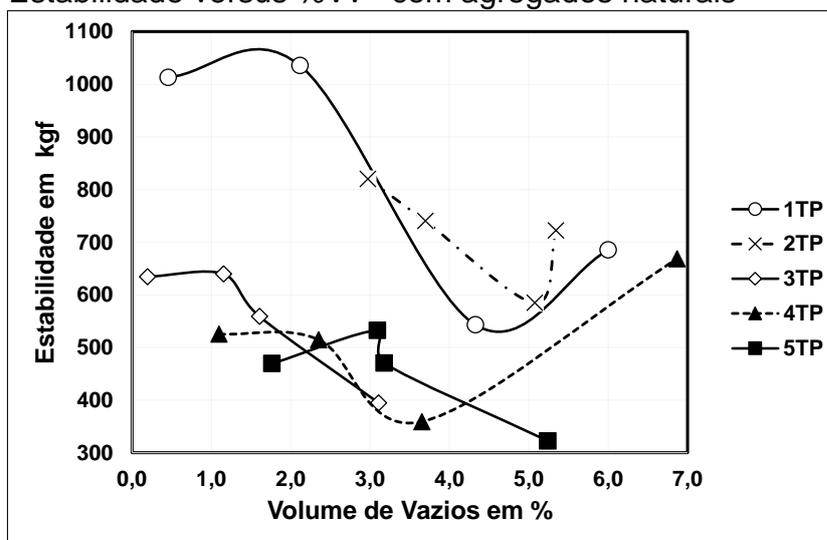
Com relação as curvas de Gmb dos corpos de prova com a substituição do fíler convencional pela artificial (Figura 4.31), observou-se que ao substituir somente o fíler, os corpos de provas obtiveram os menores valores de Gmb para todas as dosagens de CAP, e, conseqüentemente, os maiores valores de %Vv, conforme pode ser visto na Figura 4.25. Além disso, foi possível observar que os dois traços executados com o fíler artificial foram os que obtiveram menores valores de Gmb. Contudo o traço 3TRF teve comportamento semelhante ao 3TP.

4.4.5 Estabilidade x %Vv

Ainda no tocante aos parâmetros volumétricos, analisou-se qual seria a influência da porcentagem de volume de vazios com a propriedade mecânica analisada neste trabalho, a estabilidade de pavimentos asfálticos. A Figura 4.32

descreve o comportamento de curvas que relaciona a estabilidade com a porcentagem de volume de vazios dos corpos de provas contendo agregados naturais, onde, observa-se que para alguns traços analisados como o 1TP, 2TP, 3TP, e, parcialmente, o 4TP e 5TP, verifica-se uma tendência a valores maiores de estabilidade em baixas porcentagens de volume de vazios e um decréscimo acentuado de estabilidade com o aumento da %Vv.

Figura 4.32 - Estabilidade versus %Vv - com agregados naturais

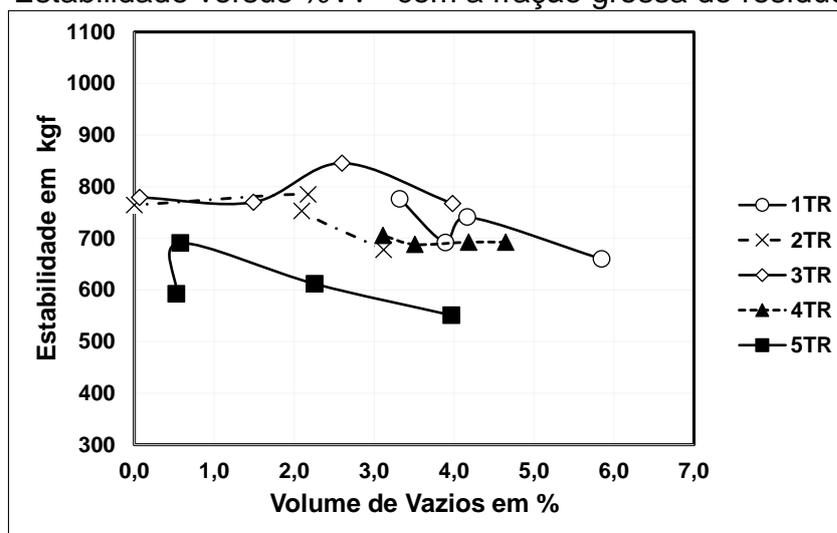


Tal característica exposta pela Figura 4.32, se dá pelo fato de que quanto menor o número de vazios em um corpo de prova, mais resistente será o mesmo, porém com maior facilidade de sofrer deformações como trincas, visto que não se comportará adequadamente como um pavimento flexível, pois não terá vazios suficiente para ocorrer as deformações elásticas quando o pavimento for solicitado por carregamentos externos. Além disso, contribuem para este comportamento, o tipo, o tamanho e a angulosidade dos grãos da mistura.

Com os dados expostos, pode-se perceber que os traços que obedecem às recomendações da norma do DNIT 031/06 (DNIT, 2006a) com relação a estabilidade e a %Vv, de no mínimo 500 kgf e $3,0\% \leq \%Vv \leq 5,0\%$, respectivamente, foram: 1TP, 2TP, e 5TP, ressalvando que o 5TP não atingiu os 4,0% para a determinação do teor ótimo de ligante acima dos 500 kgf; para tais traços, analisando somente a estabilidade acima de 500 kgf e %Vv de 4,0%, o mais viável a produção de pavimentos seria o 2TR, visto que oferece maior estabilidade as cargas solicitantes e %Vv adequado.

Realizando a mesma análise crítica com os corpos de prova com a substituição do agregado miúdo pela fração grossa do resíduo, observou-se através da Figura 4.33 que também é perceptível a tendência a decréscimo de estabilidade com o aumento da %Vv. No entanto, todas as curvas apresentaram estabilidade acima de 500 kgf, mas nenhum dos traços apresentam a faixa completa dos limites para %Vv estabelecido pelo DNIT ($3,0 \leq \%Vv \leq 5,0$).

Figura 4.33 - Estabilidade versus %Vv - com a fração grossa do resíduo

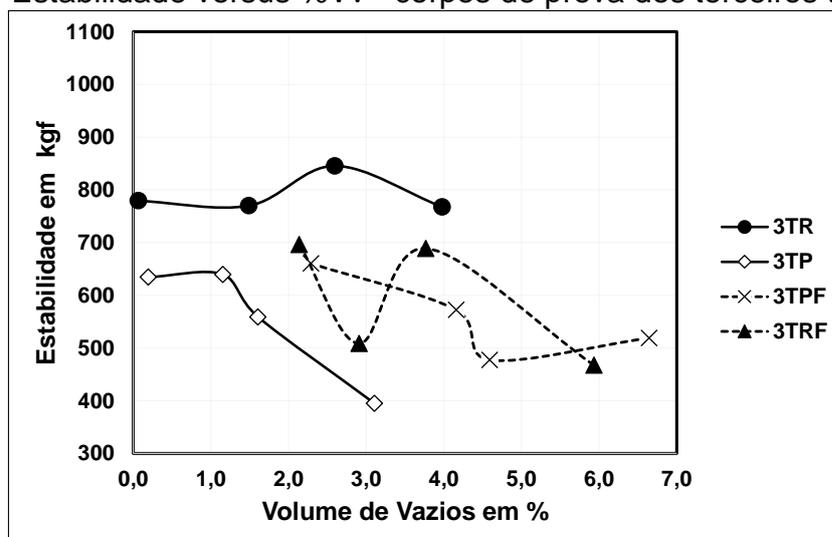


Para tais composições, os traços que são recomendados para a produção de pavimentos por possuir estabilidade acima de 500 kgf e %Vv = 4,0% são: 1TR, 3TR, 4TR, e 5TR, sendo o mais indicado o 3TR, visto que a 4,0% foi a que obteve maior estabilidade.

A Figura 4.34 mostra a relação entre estabilidade e %Vv das curvas dos terceiros traços realizados nesta pesquisa. Para os corpos de prova produzidos com o fíler artificial, também foi observado uma tendência a diminuição de estabilidade com o aumento da %Vv, porém o que apresentou melhor desempenho mecânico foi o 3TRF, podendo ter ocorrido devido a um melhor empacotamento das frações dos resíduos, além da resistência dos seus materiais constituintes.

Vale salientar que essa tendência a diminuição de estabilidade com o aumento de %Vv para o 3TRF foi de forma pontual, visto que também apresentou valores baixos de estabilidade com valores baixos de %Vv, porém acima de 500 kgf.

Figura 4.34 - Estabilidade versus %Vv - corpos de prova dos terceiros traços



Analisando somente os parâmetros de estabilidade e volume de vazios, dos terceiros traços relatados na Figura 4.34, o mais recomendado para a produção de camadas de rolamento por obedecer às recomendações do DNIT quanto a estabilidade e a faixa média de %Vv é o traço 3TR a 4,5% de ligante.

4.4.6 Estabilidade x %RBV

Outra relação muito importante a ser analisada é a interação entre a estabilidade e a porcentagem da relação betume/vazios, visto que se a quantidade de ligante em uma mistura asfálticas não for bem dimensionada, ela pode gerar diversos problemas. Teores altos de ligante pode provocar deformações permanentes por fluência e/ou exsudação; já teores baixos podem diminuir a durabilidade do pavimento, gerar enfraquecimento da mistura realizada e a minimização da resistência à formação de trincas, pois tanto a resistência a tração quanto a vida de fadiga são diretamente afetadas. (BERNUCCI *et al.*, 2006)

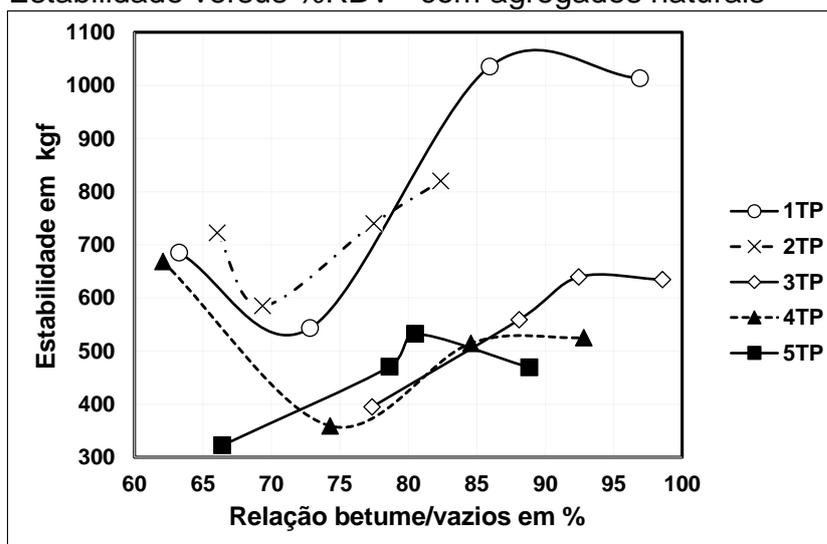
A Figura 4.35 mostra as curvas que relaciona a estabilidade com a %RBV dos corpos de prova com agregados naturais. Com base nas informações de Bernucci *et al.* (2006) anteriormente citadas, percebe-se que os possíveis traços que poderão ter problemas devido ao excesso de ligante nos vazios são: 1TP, 3TP, 4TP e 5TP; isto com base nas recomendações da norma do DNIT 031/2006 (DNIT, 2006a), onde a relação betume/vazios deve estar entre o intervalo 75% - 82% para camadas de

rolamento. Diante desses resultados, os pavimentos projetados com tais traços, poderão sofrer deformações permanentes por fluência e/ou exsudação caso não for levando em consideração a dosagem ótima de ligante.

A mesma análise pode ser feita com relação a baixas porcentagens de ligante nos corpos de prova; os traços 1TP, 2TP, 4TP e 5TP poderão ter a durabilidade afetada e conseqüentemente serão susceptíveis a trincas. Vale salientar que tais análises estão sendo feitas para trechos específicos do gráfico.

Observou-se também que houve uma tendência ao aumento de estabilidade com o aumento da relação betume/vazios, principalmente nos limites estipulados pelo DNIT ($75\% \leq RBV \leq 82\%$), visto que quanto mais ligante houver na mistura asfáltica, mais vazios serão preenchidos e conseqüentemente mais rígido será o pavimento.

Figura 4.35 - Estabilidade versus %RBV - com agregados naturais



Ainda é perceptível através da Figura 4.35 que as estabilidades dos traços 1TP, 3TP, 4TP e 5TP tiveram um decréscimo de estabilidade em certos trechos acima do limite superior da %RBV recomendada pelo DNIT (82%); e que valores baixos da %RBV também afetam diretamente a estabilidade, como pode ser observado na curva do traço 5TP.

Fazendo a mesma relação para os corpos de provas constituídos com a substituição do agregado miúdo pela fração grossa do resíduo, percebeu-se a mesma tendência ao aumento dos valores de estabilidade com o aumento da porcentagem da relação betume/vazios como pode ser visualizada na Figura 4.36. Além disso, da

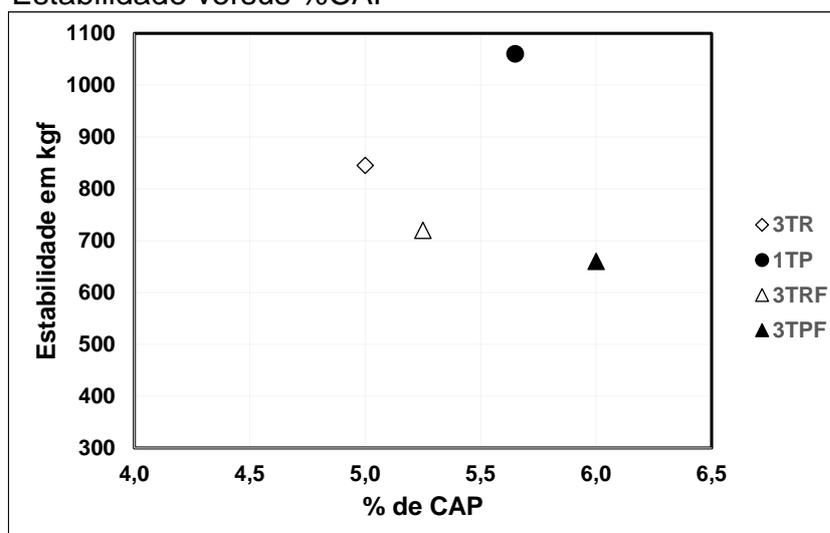
Além disso, observou-se a mesma tendência ao aumento de estabilidade com o aumento da %RBV, mais especificamente dentro dos limites recomendados pelo DNIT ($75\% \leq \%RBV \leq 82\%$) para a curva com o fíler artificial e agregado miúdo natural (3TPF). Ainda foi observado que os corpos de prova que possuíam a fração grossa do resíduo, obtiveram maiores valores de estabilidade quando comparados com os corpos de prova com agregado miúdo natural.

4.4.7 Relações entre estabilidades máximas e %CAP, %Vv e %RBV

Considerando as estabilidades máximas versus a porcentagem de ligante (Figura 4.38), observou-se que a composição do terceiro traço foi a que mais se destacou, visto que alcançou o maiores valores de estabilidade no traço com agregado miúdo artificial (3TR), com agregado miúdo e fíler artificiais (3TRF) e com agregado natural e fíler artificial (3TPF); porém o máximo valor entre todos os traços foi alcançado pelo 1TP, provavelmente por conter maior quantidade de agregados graúdos e possivelmente uma melhor compactação.

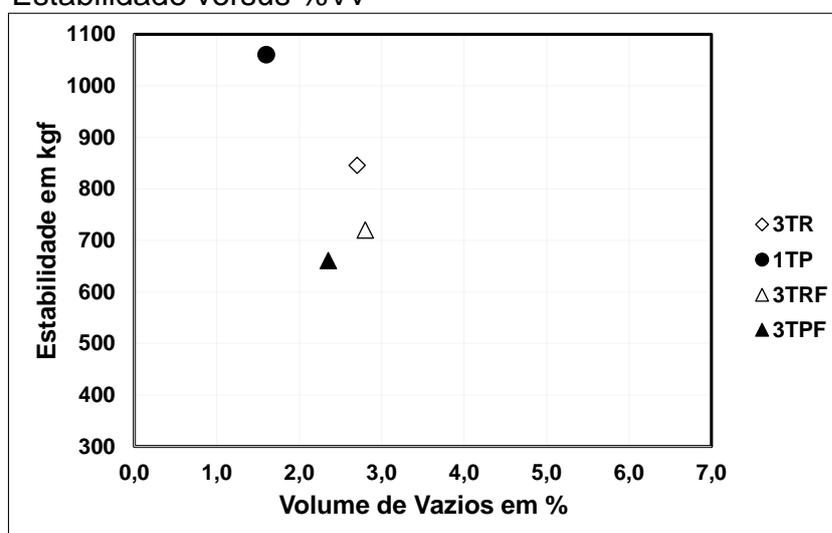
Além disso, foi observado que as maiores estabilidades variaram de 5,0% a 6,0% de ligante, com máxima em 5,53%, como pode ser observada através da Figura 4.38.

Figura 4.38 - Estabilidade versus %CAP



Para a relação entre estabilidade e porcentagem de vazios (Figura 4.39), percebeu-se que os maiores valores de estabilidade variaram no intervalo de $1,7\% \leq V_v \leq 2,8\%$, tal fato pode ser explicado pela menor quantidade de vazios na mistura, tornando o pavimento projetado mais rígido. Porém, tais revestimentos produzidos por estes traços, possivelmente estarão mais susceptíveis a trincas por não conseguir aliviar as tensões recebidas pelos carregamentos externos devido a porcentagem de volume de vazios insuficiente, impossibilitando que o pavimento trabalhe com deformações elásticas.

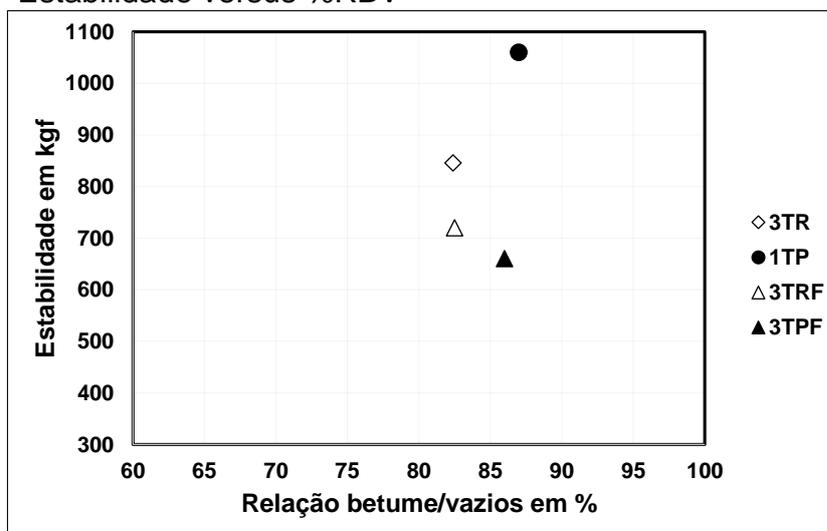
Figura 4.39 - Estabilidade versus %Vv



Considerando a %RBV observou-se, através da Figura 4.40, que os maiores valores de estabilidade se deram a altas porcentagens de relação betume/vazios, o que corrobora com o gráfico da Figura 4.39, visto que tais estabilidade se deram a baixas porcentagem de volume de vazios, visto que possivelmente, tais vazios estavam preenchidos por ligantes. Neste caso, é oportuno destacar que altas %RBV podem gerar deformações por fluência e/ou exsudação.

De uma maneira geral, analisando-se as Figuras 4.39 e 4.40 pode-se verificar que os traços 3TR e 3TRF obtiveram estabilidades satisfatórias, porém com %Vv abaixo do recomendado pela norma do DNIT 031/2006 (DNIT, 2006a) e porcentagens de RBV bem próximas ao limite máximo (82%).

Figura 4.40 - Estabilidade versus %RBV



4.4.8 Retrospectiva dos resultados, dosagens ótimas e fluência Marshall

Em vista de uma visão geral dos resultados, elaborou-se tabelas resumos (Tabela 4.9 e 4.10) onde apresentam-se alguns resultados dos traços com agregados naturais e com a incorporação das frações do resíduo do beneficiamento da scheelita.

Através da Tabela 4.9, na parte intitulada como resumo dos resultados dos traços com agregados naturais, percebeu-se que a maior estabilidade alcançada foi de 1035,40 kgf (1TP) e a menor e 532,19 kgf (5TP), ambas a 5,50% de CAP. Vale salientar que esses resultados de estabilidade se refere as máximas alcançadas em cada dosagem exata de ligante utilizado e não pelo comportamento da curva, e que o valor de 532,19 kgf foi o menor entre as máximas alcançadas com os agregados naturais.

Analisando a massa específica aparente da mistura compactada, percebeu-se que a variação foi de 2,36 g/m³ a 2,44 g/m³. Para a %Vv, observou-se que quase todos os traços obtiveram os valores médios dos limites recomendados pelo DNIT para camadas de rolamento, com exceção para o traço 3TP, visto que não apresentou %Vv de 4,00%, adotando-se o valor mais alto alcançado, 3,11% de volume de vazios para 4,53% de CAP.

Para os traços com agregados naturais em ordem crescente, observou-se consecutivamente os seguintes teores ótimos de ligante: 5,45%, 5,74%, 5,15%, 5,23%

e 5,06%; sendo a maior dosagem de 5,74% e a menor 5,06% relacionada consecutivamente aos traços 2TR e 5TR.

Tendo como objeto de análise as fluências apresentadas pelos corpos de provas de concreto asfálticos com agregados naturais, pode-se perceber pela Tabela 4.9, que os valores máximos por traço em ordem crescente foram: 1,55 mm (5,00% de CAP), 0,79 mm (5,50% de CAP), 0,89 mm (5,50% de CAP), 0,77 mm (5,50% de CAP) e 0,81 mm (5,50% de CAP).

Vale salientar que as análises desses dados são importantes não em termos de determinação de traços, mas sim na qualidade apresentada pelo pavimento projetado, pois comumente recomenda-se para efeito qualitativo de projeto uma fluência máxima de 2 mm. Além disso, é importante também que o revestimento não apresente fluências baixas, visto que nessa situação, o revestimento estará sujeito a fissuras, pois não estará aliviando as tensões corretamente, ou seja, o pavimento não estará trabalhando de forma flexível.

Analisando a parte intitulada de resumo dos resultados dos traços com a incorporação da fração grossa do resíduo, observou-se que assim como os traços com agregados naturais, todos os traços com a incorporação atingiram valores máximos de estabilidade acima do recomendado pelo DNIT (500 kgf), sendo 845,44 kgf (5,00% CAP) o maior valor alcançado e 690,63 kgf (5,50% de CAP) o menor valor, associados respectivamente ao 3TR e ao 5TR.

Com relação a massa específica aparente da mistura compactada, apresentaram-se valores máximos variando de 2,39 g/m³ a 2,49 g/m³. Analisando a %RBV, alcançou-se o valor médio dos limites do DNIT de 78,50% para todos os traços. Para a %Vv, o 2TR, 3TR e o 5TR apresentaram valores abaixo dos 4,00%; tais valores são respectivamente: 3,00% de %Vv a 4,55% de CAP, 3,98% de %Vv a 4,50% de CAP e 3,97% de %Vv a 4,50% de CAP.

Para os traços com a incorporação da fração grossa do resíduo, apresentaram consecutivamente em ordem crescente de traço, os seguintes valores de teores ótimos de ligantes: 5,46%, 5,16%, 5,07%, 5,27% e 5,06%, sendo o maior valor (5,46%) associado ao traço 1TR e o menor (5,06%) ao 5TR.

Lobo, Motter e Miranda (2015), utilizaram agregados artificiais de concreto para a produção de CBUQ, e observaram que o teor de ligante ótimo em sua pesquisa com a incorporação destes agregados, variaram de 4,9% a 6,9%.

Souza, Sousa e Kato (2015), observaram que para os corpos de provas de CBUQ ensaiados em sua pesquisa, com a incorporação do resíduo do beneficiamento do cobre, em substituição do agregado fino natural, tiveram os resultados das dosagens ótimas de ligantes valores variando entre 5,80% a 6,98%.

Karashahin e Terzi (2007) verificou que a dosagem ótima de ligante para corpos de provas ensaiados na prensa Marshall, com a incorporação do pó de calcário foi de 4,7%, para traços específicos estudados pelos autores.

As fluências apresentadas nos corpos de provas com a incorporação da fração grossa do resíduo, também apresentaram valores médios abaixo de 2 mm, tendo como valores máximos por traço em ordem crescente os seguintes resultados: 0,97mm (5,50% de CAP), 0,68 mm (4,50% de CAP), 1,12 mm (5,00% de CAP), 1,40 mm (5,50% de CAP) e 0,98 mm (5,50% de CAP).

Analisando a incorporação da fração fina do resíduo como fíler artificial na composição do terceiro traço, tanto com os agregados naturais como com a incorporação da fração grossa do resíduo, percebeu-se que a máxima estabilidade obtida foi com a incorporação dos dois resíduos, sendo este valor igual a 696,35 kgf para 5,5% de CAP. O maior valor para a composição contendo somente a fração fina do resíduo foi de 660,31 kgf para 6,0% de CAP. Ambos os traços apresentaram valores médios dos limites recomendados pelo DNIT de %RBV (78,50%) e %Vv (4,00%), utilizados para a determinação do teor ótimo de ligante.

Para o traço com a incorporação da fração fina do resíduo, o maior valor de fluência média apresentada foi de 0,95 mm para 6,00% de CAP e para a incorporação dos dois resíduos o valor máximo da fluência média foi de 1,21 mm para 5,50% de CAP.

A Tabela 4.10 apresenta um panorama geral das estabilidades médias atingidas em todos os traços, com agregados naturais, com a incorporação da fração grossa do resíduo, com a incorporação somente da fração fina como fíler artificial e com a incorporação das duas frações dos resíduos como agregado e fíler artificiais. Através dos resultados expostos, percebeu-se que dos 24 resultados médios

apresentados, 17 obtiveram aumento na estabilidade dos corpos de provas com a incorporação do resíduo estudado, e destes alguns com valores bem significativos como: 51,25% para 5,00% de CAP para o terceiro traço, 70,80% para 4,5% de CAP para o quinto traço, 75,37% para 4,5% de CAP no quarto traço e 94,44% para 4,50% de CAP na composição do terceiro traço.

Tabela 4.9 - Síntese dos resultados da quarta etapa da pesquisa: estudo da mistura asfáltica

RESUMO DOS RESULTADOS DOS TRAÇOS COM AGREGADOS NATURAIS										
Parâmetros	1ª traço		2ª traço		3ª traço		4ª traço		5ª traço	
	Resultados	% CAP								
Estabilidade X % CAP	1035,40 kgf	5,50	820,03 kgf	6,00	639,52 kgf	6,00	668,47 kgf	5,00	532,19 kgf	5,50
GMB X % de CAP	2,43 g/m ³	6,00	2,36 g/m ³	6,00	2,44 g/m ³	5,50	2,40 g/m ³	6,00	2,38 g/m ³	5,00
RBV X % CAP	78,50%	5,22	78,50%	5,58	78,50%	4,57	78,50%	5,37	78,50%	4,98
VV x % CAP	4,00%	5,07	4,00%	5,37	3,11%	4,53	4,00%	4,55	4,00%	4,76
Teor ótimo de ligante	5,45%		5,74%		5,15%		5,23%		5,06%	
RESUMO DOS RESULTADOS DOS TRAÇOS COM A INCORPORAÇÃO DA FRAÇÃO GROSSA DO RESÍDUO										
Parâmetros	1ª traço		2ª traço		3ª traço		4ª traço		5ª traço	
	Resultados	% CAP								
Estabilidade X % CAP	776,28 kgf	6,00	785,18 kgf	5,50	845,44 kgf	5,00	705,48 kgf	6,00	690,63 kgf	5,50
GMB X % de CAP	2,39 g/m ³	5,00	2,46 g/m ³	6,00	2,46 g/m ³	6,00	2,41 g/m ³	4,50	2,49 g/m ³	5,50
RBV X % CAP	78,50%	5,70	78,50%	4,58	78,50%	4,80	78,50%	5,47	78,50%	4,76
VV x % CAP	4,00%	5,15	3,00%	4,55	3,98%	4,50	4,00%	5,13	3,97%	4,50
Teor ótimo de ligante	5,46%		5,16%		5,07%		5,27%		5,06%	
RESULTADOS DOS TRAÇOS COM AGREGADOS NATURAIS – ESTABILIDADES E FLUÊNCIAS										
Teor de CAP	1ª traço		2ª traço		3ª traço		4ª traço		5ª traço	
	Estabilidade	Fluência								
4,5	685,29 kgf	0,71 mm	722,40 kgf	0,49 mm	394,74 kgf	0,51 mm	359,04 kgf	0,16 mm	322,48 kgf	0,48 mm
5,0	542,91 kgf	1,55 mm	584,97 kgf	0,76 mm	558,99 kgf	0,48 mm	668,47 kgf	0,48 mm	470,44 kgf	0,51 mm
5,5	1035,40 kgf	1,26 mm	740,21 kgf	0,79 mm	634,39 kgf	0,89 mm	514,54 kgf	0,77 mm	532,19 kgf	0,81 mm
6,0	1013,16 kgf	0,78 mm	820,03 kgf	0,59 mm	639,52 kgf	0,65 mm	525,39 kgf	0,70 mm	469,29 kgf	0,75 mm

RESULTADOS DOS TRAÇOS COM A INCORPORAÇÃO DA FRAÇÃO GROSSA DO RESÍDUO – ESTABILIDADES E FLUÊNCIAS										
Teor de CAP	1ª traço		2ª traço		3ª traço		4ª traço		5ª traço	
	Estabilidade	Fluência	Estabilidade	Fluência	Estabilidade	Fluência	Estabilidade	Fluência	Estabilidade	Fluência
4,5	659,84 kgf	0,44 mm	677,73 kgf	0,68 mm	767,54 kgf	0,98 mm	692,27 kgf	1,11 mm	550,80 kgf	0,87 mm
5,0	741,13 kgf	0,73 mm	752,99 kgf	0,53 mm	845,44 kgf	1,12 mm	692,65 kgf	1,34 mm	611,66 kgf	0,68 mm
5,5	691,76 kgf	0,97 mm	785,18 kgf	0,52 mm	769,93 kgf	0,99 mm	688,12 kgf	1,40 mm	690,63 kgf	0,98 mm
6,0	776,28 kgf	0,53 mm	764,24 kgf	0,43 mm	779,29 kgf	1,04 mm	705,48 kgf	0,77 mm	592,23 kgf	0,49 mm
RESUMO DOS RESULTADOS DOS TRAÇOS COM A INCORPORAÇÃO DA FRAÇÃO FINA DO RESÍDUO COMO FILER ARTIFICIAL										
Parâmetros	Com agregados naturais e filer artificial		Com a incorporação dos dois resíduos		Com agregados naturais e filer artificial			Com a incorporação dos dois resíduos		
	Resultados	% CAP	Resultados	% CAP	Teor de CAP	Estabilidade	Fluência	Teor de CAP	Estabilidade	Fluência
Estabilidade X % CAP	660,31 kgf	6,0	696,35 kgf	5,5	4,5	519,03 kgf	0,78 mm	4,5	467,31 kgf	0,98 mm
GMB X % de CAP	2,37 g/m ³	6,0	2,43 g/m ³	5,5	5,0	477,37 kgf	0,79 mm	5,0	688,87 kgf	1,19 mm
RBV X % CAP	78,50%	5,7	78,50%	5,1	5,5	572,28 kgf	0,80 mm	5,5	696,35 kgf	1,21 mm
VV x % CAP	4,00%	5,55	4,00%	4,94	6,0	660,31 kgf	0,95 mm	6,0	508,53 kgf	0,80 mm
Teor ótimo de ligante	5,81%		5,26%		ESTABILIDADE E FLUÊNCIAS					

Tabela 4.10 - Síntese dos resultados das estabilidades médias com agregados naturais, com a incorporação da fração grossa e a incorporação das duas frações do resíduo

Traços	Teor de CAP	Estabilidade Areia	Estabilidade Resíduo	% ganho/perda
1º traço	4,50	685,29 kgf	659,84 kgf	-3,71 %
	5,00	542,91 kgf	741,13 kgf	36,51 %
	5,50	1035,40 kgf	691,76 kgf	-33,19 %
	6,00	1013,16 kgf	776,28 kgf	-23,38 %
2º traço	4,50	722,40 kgf	677,73 kgf	-6,18 %
	5,00	584,97 kgf	752,99 kgf	28,72 %
	5,50	740,21 kgf	785,18 kgf	6,08 %
	6,00	820,03 kgf	764,24 kgf	-6,80 %
3º traço	4,50	394,74 kgf	767,54 kgf	94,44 %
	5,00	558,99 kgf	845,44 kgf	51,25 %
	5,50	634,39 kgf	769,93 kgf	21,37 %
	6,00	639,52 kgf	779,29 kgf	21,85 %
4º traço	4,50	394,74 kgf	692,27 kgf	75,37 %
	5,00	558,99 kgf	692,65 kgf	23,91 %
	5,50	634,39 kgf	688,12 kgf	8,47 %
	6,00	639,52 kgf	705,48 kgf	10,31 %
5º traço	4,50	322,48 kgf	550,80 kgf	70,80 %
	5,00	470,44 kgf	611,66 kgf	30,02 %
	5,50	532,19 kgf	690,63 kgf	29,77 %
	6,00	469,29 kgf	592,23 kgf	26,20 %
3º traço - filer	4,50	519,03 kgf	467,31 kgf	-9,96 %
	5,00	477,37 kgf	688,87 kgf	44,31 %
	5,50	572,28 kgf	696,35 kgf	21,68 %
	6,00	660,31 kgf	508,53 kgf	-22,99 %

Através da Tabela 4.10, percebeu-se que a maior estabilidade alcançada com a incorporação do resíduo do beneficiamento da scheelita foi de 845,44 kgf, que correspondeu a um aumento de 51,25 % de estabilidade em relação ao mesmo traço com agregados naturais.

Tapahuasco *et al.* (2014) utilizaram o resíduo do beneficiamento de pedras ornamentais e do corte de granito em misturas asfálticas e verificaram que a maior estabilidade média alcançada com incorporação do resíduo estudado foi de 1155,4 kgf, porém gerando uma fluência média de 6,25 mm.

Ahmedzade e Sengoz (2009) também chegou a resultados de estabilidade satisfatórios com a incorporação de resíduos em concreto asfáltico. Neste caso, a estabilidade passou de 1746 kgf (mistura de controle) para 2019 kgf, com a incorporação da escória de aço.

Modarres e Rahmanzadeh (2014) observaram valores de estabilidade na ordem de 1020 kgf, em corpos de provas contendo substituição de 100% do fíler por cinzas dos resíduos de carvão, enquanto que a estabilidade da mistura de controle foi de 875 kgf.

Também pode ser observado que os resultados das estabilidades correspondentes as amostras com a incorporações dos resíduos, demonstrados na Tabela 4.10, mostraram-se acima do valor recomendado pelo DNIT (2006), de 500 kgf, com exceção da estabilidade média do traço constituído com as duas frações do resíduo e com 4,5% de CAP (467,31 kgf). Comportamento semelhante e também positivo, foi visto por Souza, Sousa e Kato (2015), visto que os corpos de provas ensaiados com a incorporação do resíduo do beneficiamento do cobre, atingiram valores superiores ao mínimo recomendado pelo DNIT e com uma tendência ao crescimento com a incorporação do rejeito.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões e Considerações Finais

No tocante da caracterização das frações do resíduo do beneficiamento da scheelita, pode-se aferir as seguintes considerações:

- A fração grossa do resíduo possui módulo de finura igual a 2,9, classificando-se como uma areia artificial média; a fração fina do resíduo possui módulo de finura igual a 1,0, classificando-se como um material fino, porém com apenas 57,81% passante na peneira de 0,075 mm de abertura quadrada, inviabilizando sua utilização *in natura* como filer artificial, visto que por norma, recomenda-se pelo menos 65% passante na referida peneira;
- As massas específicas das frações não diferiram muito entre si; 2,98 g/cm³ e 2,90 g/cm³ respectivamente para a fração grossa e fina; porém apresenta-se maiores que alguns valores encontrados na literatura para areia natural, e isto provavelmente pode ser explicada pela presença de minerais como o ferro na composição, elevando a sua massa;
- A superfície da fração grossa, apresentou-se aparentemente mais porosa que a fração fina, fato este que pode aumentar o consumo de ligante em misturas asfálticas;
- Os principais óxidos encontrados nas frações foram CaO, SiO₂ e Fe₂O₃; representando 83,78% e 85,52% da composição dada para a fração grossa e fina do resíduo do beneficiamento da scheelita, respectivamente;
- Os minerais mais representativos nas amostras das frações do resíduo foram a calcita e o quartzo, minerais estes geralmente encontrados em areais naturais. Além desses, observaram-se a enstatite ferroan, diopside e o

grossular, na fração grossa do resíduo, e a enstatite e o grossular ferrian na fração fina do resíduo.

- As perdas de massa dos resíduos na temperatura limite de trabalho (177 °C) foram de 0,195 mg para fração grossa e 0,560 mg para fração fina do resíduo.

Com relação a caracterização dos agregados naturais e fíler convencional, pode-se chegar as seguintes considerações:

- A areia natural classifica-se como areia média, com módulo de finura igual a 2,0, dimensão máxima característica de 2,4 mm e massa específica de 2,62 g/cm³
- Com o processo de melhoria de qualidade executado no pó de pedra original, o pó de pedra combinado passou a ter 1,02% de finos, no lugar de 11,33%. O pó de pedra combinado classificou-se de acordo com o módulo de finura como grossa, pois possui MF > 3,0 (MF = 3,1), dimensão máxima característica de 9,5 mm e massa específica 2,78 g/cm³.
- O cimento Portland classificou-se como fino, MF = 0,012, com 98,85% passante na peneira de malha de 0,075 mm e massa específica de 2,82 g/cm³.
- A brita 0 obteve dimensão máxima característica de 9,5 mm, massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturada superfície seca, massa específica aparente e absorção respectivamente de: 2,58 g/cm³, 2,64 g/cm³, 2,75 g/cm³ e 2,29%.
- A brita 1 obteve dimensão máxima característica de 25 mm e classificou-se como cúbica devido ao índice de forma resultar em 0,91. Massa específica do agregado seco, massa específica do agregado na condição saturada superfície seca, massa específica aparente e absorção respectivamente de: 2,61 g/cm³, 2,67 g/cm³, 2,77 g/cm³ e 2,15%. Perda a abrasão de 62,51%, valor este, superior ao recomendado pela norma 031/2006 do DNIT (abrasão ≤ 50%); porém aceita, pois o material já foi utilizado em rodovias do RN e demonstrou desempenho satisfatório.
- Por meio do MEV observou-se que o grão de areia possui um formato regular, aproximadamente cúbico com arestas bem definidas e algumas partículas aparentemente lamelares; tais partículas com indicações de superfície porosa. Através do EDS em análise de área, as partículas apresentaram grande

concentrações de silício (41,299%) e cálcio (19,238%), o que corrobora com os principais óxidos obtidos na segunda análise de FRX, SiO₂ (48.199%), Al₂O₃ (16.773%), Fe₂O₃ (11.966%), resultando em 76,94% do total.

- Com o MEV observou-se que o pó de pedra possui formatos diversos e sem regularidade. Em análise de área por EDS em um grão específico, observou-se altas concentrações de ferro (65,159%) e silício (15,935%), corroborando com os resultados atingidos na segunda análise de FRX, visto que apresentou como principais óxidos o SiO₂ (43.769%), Fe₂O₃ (23.101%), Al₂O₃ (14.374%), resultando em 81,58%.
- A areia natural apresentou como principais constituintes o quartzo e minerais do grupo dos feldspato, a orthoclase - k(AlSi₃O₈), anorthite - Ca(AlSi₃O₈) e albite Na(AlSi₃O₈). Já o pó de pedra apresentou o quartzo (SiO₂), e dois componentes do grupo do feldspato, a orthoclase - k(AlSi₃O₈) e a anorthite - Ca(AlSi₃O₈), e a cordierite (Mg₂Si₅Al₄O₁₈).
- Com relação a perda de massa na temperatura máxima de trabalho (177° C) para concretos asfálticos, a areia teve perda de 0,073 mg e 0,004 mg para o pó de pedra.

Para o cimento asfáltico de petróleo utilizado na pesquisa, pode-se realizar as seguintes considerações:

- O cimento asfáltico de petróleo utilizado nesta pesquisa possui características satisfatória para a realização de concreto asfálticos, corroborando com os dados expostos pelo regulamento técnico N° 03/2005 da ANP (2005). As características levantadas foram: penetração de 57 dmm, classificando-se como 50/70; massa específica de 1,02 g/cm³; ponto de fulgor de 325° C; ponto de amolecimento igual 58,88° C; e viscosidade Saybolt-Furol para as temperaturas de 135° C, 150° C e 177° C respectivamente de: 148 SSF, 70 SSF e 38 SSF;

No tocante das dosagens de concreto asfáltico, lista-se as seguintes considerações:

- Com relação a estabilidade, todos os traços com agregados naturais apresentaram-se viáveis para a produção de CBUQ, visto que alcançaram

valores acima de 500 kgf; porém, deve-se verificar a dosagem ótima de ligante para atingir melhor desempenho e alcançar as propriedades desejadas para o pavimento projetado;

- Os traços contendo a fração grossa de resíduo como agregado miúdo apresentaram-se com boa eficiência no quesito de estabilidade, visto que todas as curvas, para as dosagens de ligantes propostos, apresentaram valores de estabilidade acima de 500 kgf, tornando-se viáveis para produção de CBUQ.
- Os traços 3TRF e 3TPF apresentaram boas estabilidades, porém com restrições consecutivamente à 4,5% e 5,0% de CAP (analisando dosagens exatas de ligante);
- Considerando a porcentagem de volume de vazios, todos os traços apresentaram-se na faixa permitida pelo DNIT, tornando-se viáveis para produção de CBUQ; porém, os traços 3TP, 2TR alcançaram somente o mínimo estabelecido pela norma 031/2006 do DNIT (2006a);
- Em relação a porcentagem da relação betume vazios, todos os traços apresentaram-se viáveis para a produção de CBUQ; contudo, se faz necessário verificar a dosagem de ligante utilizada, visto que os traços 2TR, 3TR, 5TR, 3TP e 1TP alcançaram valores altos de RBV para dosagens de CAP específicas, estão os mesmos susceptíveis a deformações por fluência e/ou exsudação.
- Tendo como foco as correlações entre os parâmetros volumétricos e estabilidade, verificou-se uma tendência para o aumento de estabilidade a baixos valores de porcentagem de volume de vazios, corroborando com as observações feitas na relação entre estabilidade versus %RBV, visto que as curvas apresentaram uma tendência ao aumento de estabilidade com o aumento da %RBV, devido a ocupação dos vazios pelo ligante asfáltico.
- As massas específicas aparentes das misturas compactadas com agregado naturais variaram de 2,36 g/m³ a 2,44 g/m³, com agregado miúdo artificial de 2,39 g/m³ a 2,49 g/m³; com fíler artificial 2,37 g/m³ e 2,43 g/m³ para a incorporação dos dois resíduos.
- Com relação aos teores ótimos de ligantes, observaram-se os seguintes valores: para os traços com agregados naturais em ordem crescente: 5,45%, 5,74%, 5,15%, 5,23% e 5,06%; para os traços com a incorporação da fração

grossa do resíduo: 5,46%, 5,16%, 5,07%, 5,27% e 5,06%; 5,81% para o 3TPF e 5,26% para o 3TRF.

- No que diz respeito a fluência Marshall, todas os traços estudados apresentaram fluência abaixo de 2 mm, tanto com agregados naturais quando com artificiais.

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que para os ensaios realizados, a fração grossa do resíduo do beneficiamento da scheelita *in natura* apresentou-se viável para ser utilizada como agregado miúdo artificial em concreto betuminoso usinado a quente, para os traços analisados e expostos neste trabalho.

Para a fração fina do resíduo, foi verificado a viabilidade para a aplicação como fíler artificial, porém depois da realização de processos para melhoramento de qualidade através de peneiramento, visto que esta fração *in natura* do resíduo não possui os 65% passante na peneira de 0,075 mm para se classificar como material de enchimento de misturas asfálticas de acordo com a norma DNER - EM 367/97 (DNER, 1997a).

Contudo, vale enfatizar que apesar dos resultados positivos observados nesta pesquisa, para realmente afirmar que as frações do resíduo estudado possuem viabilidade técnica para a produção de CBUQ, se faz necessário a realização de outros ensaios mecânicos.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Considerando a complexidade em efetivamente afirmar que as frações do resíduo do beneficiamento da scheelita podem ser utilizadas como agregado miúdo e fíler artificiais, são listados a seguir, ensaios e estudos necessários para embasar as considerações sobre a viabilidade técnica e econômica para que tais resíduos possam ser componentes minerais de concreto betuminoso usinado a quente.

- i. Ensaio de módulo de resiliência;
- ii. Ensaio de resistência à tração estática;
- iii. Ensaio de vida de fadiga;

- iv. Ensaio de *creep* e cântabro;
- v. Ensaio de porosimetria
- vi. Ensaio de campo em uma via experimental
- vii. Caracterização física, química, mineralógico e térmica de amostras com idades e locais de deposição diferentes;
- viii. Estudo de viabilidade econômica para o reprocessamento da fração fina do resíduo, visto que *in natura*, tal fração não se enquadra como fíler artificial para misturas asfálticas.
- ix. Estudo de mercado, com intuito de analisar a absorção deste material no município de Currais Novos e região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. *Cimentos asfálticos de petróleo*: Resolução Nº 19 de 11 de julho de 2005 da ANP - Regulamento Técnico ANP Nº 03/2005. 2005.

_____. *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural*. 2015.

AHMEDZADE, Perviz; SENGOZ, Burak. *Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete*. Journal of Hazardous Materials, 165 (2009), 300-305.

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

_____. *NM 23/2000*: cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NM 51/2001*: Agregado graúdo - ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NM 10004/2004*: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. *NBR NM 248/2003*: Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NM 53/2003a*: Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 6576/2007*: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

ARABANI, M.; AZARHOOSH, A. R. *The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures*. Construction and Building Materials, 35 (2012), 1-7.

ARAUJO, Eliane Rocha; OLIVIERI, Renata Damico; FERNANDES, Francisco Rego Chaves. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. In: LIS, Fernando A. Freitas. *Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos*. Francisco Rego Chaves Fernandes, Renata de Carvalho Jimenez Alamino, Eliane Araujo (Eds.). Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. p. 1-12

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. *Pavimentação Asfáltica*: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER; MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES - MT. *DNER - ME 086/94*. Agregado - determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

_____. *DNER - ME 148/94*: Material betuminoso - determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland). Rio de Janeiro, 1994a.

_____. *DNER-ME 089/94*: Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994b.

_____. *DNER - ME 004/94*: Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada. Rio de Janeiro, 1994c.

_____. *DNER - ME 043/95*: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

_____. *DNER - ME 193/96*: Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e da massa específica. Rio de Janeiro, 1996.

_____. *DNER-ME 054/97*: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____. *DNER-ME 367/97*: Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997a.

_____. *DNER-ME 035/98*: Agregados - determinação de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT; DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA; COORDENAÇÃO GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA; INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIÁRIAS. *Manual de Pavimentação*. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. *Norma DNIT 031/2006 - ES*: Pavimentos flexíveis, concreto asfáltico, especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. *DNIT 131/2010 - ME*: Materiais asfálticos - determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. *Sumário Mineral*: 2014. Coordenadores: Thiers Munis Lima, Carlos Augusto Ramos Neves, Brasília: DNPB, 2014. 141 p. ISSN 0101 2053.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Estados @*: Rio Grande do Norte. 2015. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=rn>>. Último Acesso: 07 fev. 2016.

_____. *Cidades @*: Currais Novos. 2015a. Disponível em <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=24&search=rio-grande-do-norte>>. Último Acesso: 07 fev. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. *Informações sobre a economia mineral brasileira 2015*. Brasília, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. *Lauda Técnico Preliminar: impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*. Novembro, 2015

BALBO, José Tadeu. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. ISBN: 978-85-86238-56-7.

CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. *Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas*. Tese (doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

CHEN, Zongwu; WU, Shaopeng; WEN, Jin; ZHAO, Meiling; YI, Mingwei; WAN, Jiuming. *Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture*. *Construction and Building Materials*, 93 (2015), 911 - 918.

DANA, James D. *Manual de Mineralogia*. Rio de Janeiro: Editora da Universidade de São Paulo, 1969. v.2.

DANTAS, Gildo da Costa. *Mina Brejuí: a maior produtora de scheelita do Brasil*. Natal, 2007. 134f.

FARIAS, Carlos Eugênio Gomes. *Mineração e meio ambiente no Brasil: PNUD - Contrato 2002/001604. Relatório - Destinado ao Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, 2002.*

FERNANDES, Bruno Rodrigo Borges. *Aproveitamento dos finos de Scheelita utilizando concentração centrífuga e lixiviação ácida*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal do Pernambuco. Recife, 2011.

FONTES, Wanna Carvalho; JANUZZI, Rafael Vital; BORGES, Rodrigo de Araújo; CURY, Alexandre Abrahão; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. *Resíduo da mineração de ferro como matéria-prima alternativa no desenvolvimento de argamassas de revestimento e assentamento*. *Anais do 56º Congresso Brasileiro de Concreto - CBC, 2014*. ISSN 2175-8182.

FREITAS, Hérica Braga de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. *Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado*. *Transportes*, v. XVI, n. 2, p. 5-12, 2008.

GERAB, André Tabosa Fernandes de Santa Cruz. *Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014.

GODEIRO, Maria Luiza da Silva; BORGES JÚNIOR, Jadilson Pinheiro; FERNANDES, Bruno Rodrigo Borges; LEITE, José Yvan Pereira. *Caracterização de pré-concentrado*

do rejeito de scheelita da mina Brejuí em concentrador centrífugo. HOLOS, Ano 26, Vol. 5. 2010. ISSN 1807-1600.

KARASAHIN, Mustafa; TERZI, Serdal. *Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete*. Construction and Building Materials, 21 (2007), 616 - 620.

LEITE, José Yvan Pereira. *Relatório Preliminar: cooperação CEFET-RN e Mineração Tomaz Salustino*. Natal, 2007.

LINHARES, Adriel de Sá; SILVA, Bruno Tiago Angelo. *Aplicação do rejeito da scheelita em camadas granulares de pavimentos*. COBRAMSEG 2014. Goiana, 2014.

LOBO, Adriana Verchai de Lima; MOTTER, Janaina Setin; MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosembach. *Avaliação da utilização de agregado reciclado de concreto na fabricação de concreto betuminoso usinado a quente*. Revista Sodebras, v. 10, Nº 110, Fevereiro, 2015. ISSN 1809-3957

LOURENÇO, Victor Manuel de Queiroz; CAVALCANTE, Erinaldo Hilário. *O uso do agregado oriundo da reciclagem do resíduo de construção e demolição em misturas asfálticas*. XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte – AMPET. Curitiba, 2014. ISBN 987-85-87893-17-8.

MACHADO, Tércio Graciano. *Estudo da adição de resíduo de scheelita em Matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2012.

MANHÃES, João Paulo Vargas Tavares; HOLANDA, José Nilson França de. *Caracterização e classificação de resíduo sólido "pó de rocha granítica" gerado na indústria de rochas ornamentais*. Quim. Nova, Vol. 31, Nº 6, 1301-1304, 2008.

MARINHO, Marília Neves. *Análise do desempenho mecânico de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pernambuco, Recife/PE, 2011.

MARTINS, Thabata de Aguiar; SANTOS, Adailton Antonio do. *Caracterização física, química e mecânica de resíduo de beneficiamento de feldspato e quartzo, visando aplicação em pavimentação*. Artigo (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, 2012.

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R. de; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. *Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicas*. Cerâmica 53 (2007), 192-199.

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R. de; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. *Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicas*. Revista Matéria, v. 12, n.1, pp. 226-236, 2007a. ISSN 1517-7076.

MENEZES, R. R.; OVILEIRA, M. F.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. *Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim para a produção de corpos múltiplos*. Cerâmica 53 (2007b), 388-395.

MINA BREJUI. *História*. 2013. Disponível em: <<http://minabrejui.com.br/site/historia/>> Último Acesso: 09 nov. 2015.

_____. *Produtos*. 2013a. Disponível em: <<http://minabrejui.com.br/site/produtos/>> Último Acesso: 09 nov. 2015.

_____. *Mineração Tomaz Salustino: valor histórico e geológico para o Rio Grande do Norte*. 2014. Disponível em: <<http://minabrejui.com.br/site/mineracao-tomaz-salustino-valor-historico-e-geologico-para-o-rio-grande-do-norte/>> Último Acesso: 09 nov. 2014.

MINÉRIO E MINERALES. *200 maiores minas brasileiras: ranking por substância*. 2014.

MODARRES, Amir; RAHMANZADEH, Morteza. *Application of coal waste poder as filler in hot mix asphalt*. Construction and Building Materials, 66 (2014), 476 - 483.

PAIVA, Emanuel Henrique Gomes. *Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

REZENDE, Maria Luiza de S.; MENEZES, Romualdo R.; NEVES, Gelmires de Araújo; NASCIMENTO, José Wallace B. LEAL, Antonio Farias. *Utilização do resíduo de caulim em blocos de vedação*. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 61 (3): 285-290, jul. set. 2008

RIBEIRO, Simone Valéria. *Reutilização de resíduo de rocha ornamental na produção de tijolo solo-cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Rio de Janeiro, 2013.

SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. *Mineração*. 2014. Disponível em <<http://www.sedec.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=15440&ACT=null&PAGE=0&PARM=null&LBL=Minera%C3%A7%C3%A3o>>. Último Acesso: 10 nov. 2015. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 61 (3): 285-290, jul. set. 2008.

STEFENON, Fernando. *Incorporação de resíduos industriais em concreto betuminoso usinado à quente*. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2003.

SOUZA, Keila Valente de; VERDE, Rodrigo Braga da Rocha Villa; ALAMINO, Renata de Carvalho Jimenez; FERNANDES, Francisco Rego Chaves. *Mineração na Região Nordeste do Brasil: quadro atual e perspectivas*. In: LIS, Fernando A. Freitas. *Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos*. Francisco Rego Chaves Fernandes, Renata de Carvalho Jimenez Alamino, Eliane Araujo (Eds.). Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014. p. 117-123.

SOUZA, José Antônio; SOUSA, João Mota; KATO, Ricardo Bentes. *Análise do desempenho de concreto betuminoso usinado à quente com adição de rejeito da mineração do cobre segundo os parâmetros Marshall*. E&S - Engineering and Science, v. 2, ed. 4, 2015. ISSN: 2358-5390.

TAPAHUASCO, Wilber Feliciano Chambi; SILVA, Sidygleison Oliveira; PINTO, Enéias Antônio. *Utilização de resíduos oriundos do corte de rochas graníticas como agregado mineral em misturas de concreto asfáltico*. Anais. COBRAMSEG, 2014.

TOFFOLO, Rodrigo Vicente Machado; SANT'ANA FILHO, Joaquim Nery de; BATISTA, Júnio Oliveira dos Santos; SILVA, Sidney Nicodemos da; CURY, Alexandre Abrahão; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. *Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro*. Anais do 56º Congresso brasileiro do Concreto - CBC 2014. Natal, 2014.

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