



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAPEBA

ALINE FÁTIMA NASCIMENTO PEREIRA

JÉSSICA LUCIENE FERREIRA

***DOSAGEM DE PRÉ-MISTURADO A FRIO COM
INSERÇÃO DA ESCÓRIA COMO AGREGADO***

OURO BRANCO

JULHO DE 2015

ALINE FÁTIMA NASCIMENTO PEREIRA

JÉSSICA LUCIENE FERREIRA

***DOSAGEM DE PRÉ-MISTURADO A FRIO COM
INSERÇÃO DA ESCÓRIA COMO AGREGADO***

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil – Ênfase em Estruturas Metálicas, da Universidade Federal de São João Del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Tales Moreira de Oliveira

Coorientador: Leandro Neves Duarte

Coorientador: Erivelto Luís de Souza

OURO BRANCO

JULHO DE 2015

FOLHA DE APROVAÇÃO

Banca examinadora da Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil – Ênfase em Estruturas Metálicas, da Universidade Federal de São João Del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Me. Tales Moreira de Oliveira
Orientador

Prof. Dr. Leandro Neves Duarte
Coorientador

Prof. Dr. Erivelto Luís de Souza
Coorientador

Prof. Dr. Heraldo Nunes Pitanga
Membro da Banca

DEDICATÓRIA

Às nossas famílias, que sempre nos apoiaram e incentivaram a seguir em frente, dando exemplos e conselhos em cada dificuldade encontrada.

Aos amigos, Saulo, Tairine, Paula, Pâmela, Sabrina, Alanna, Denise, Raphael e Ryoko, pessoas especiais que Deus colocou em nossa caminhada.

A todos os amigos e colegas, que sempre estiveram do nosso lado, falando palavras de motivação e esperança.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Senhor supremo em nossas vidas, pois sem a Sua benção não teríamos conseguido vencer mais essa etapa.

Ao Saulo, por sua grande ajuda na realização dos ensaios presentes nesse trabalho, um verdadeiro anjo que Deus colocou no nosso caminho. Sua ajuda foi fundamental, muito obrigada.

Aos professores orientadores, Tales Moreira de Oliveira, Leandro Neves Duarte, Erivelto Luís Souza e Heraldo Nunes Pitanga, a quem agradecemos pela paciência e pelo conhecimento compartilhado.

RESUMO

Essa dissertação consolidou-se na área de pavimentação, articulando a melhor alternativa para revestimentos de pavimentos com a utilização da escória de aciaria, insumo que possui baixo custo de aquisição e alta resistência à abrasão, por meio de dosagem pré-misturada a frio. O acúmulo de resíduos industriais gerados pelas siderúrgicas torna crescente a preocupação com questões de preservação ambiental na relação com o desenvolvimento econômico sustentável. É unânime a necessidade da busca por insumos na construção da infraestrutura rodoviária devido à gradual escassez de matérias primas naturais.

Palavras-Chave: Pavimento, Pré-misturado a frio, Escória de aciaria, Agregado siderúrgico.

ABSTRACT

This thesis was consolidated in paving area, linking the best alternative floor coverings with regard to the use of aggregate for paving which is the steel slag input of road works with low cost and high abrasion resistance, through cold pre-mixed dosage. The accumulation of industrial waste generated by the steel becomes a growing concern for environmental protection issues in relation to sustainable economic development. It is unanimous the need for search for other inputs in the construction of road infrastructure due to the gradual shortage of natural raw materials.

Key words: Pavement, Cold pre-mixed, Steel Slag, Steel aggregate.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Pavimentação.....	16
3.1.1 Tipos de pavimento.....	16
3.1.2 Camadas do pavimento flexível.....	17
3.1.3 Agregado para o pavimento.....	18
3.2 Mistura Asfáltica Usinada a Frio.....	19
3.3 Resíduos Sólidos.....	20
3.4 Escória de Aciaria na Pavimentação.....	21
3.4.1 Produção do aço e a formação da escória.....	21
3.4.2 Beneficiamento.....	24
3.4.3 Propriedades.....	25
3.4.4 Aplicação.....	27

4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 MATERIAIS.....	28
4.2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	28
4.2.1 Caracterização da Emulsão Asfáltica.....	29
4.2.1.1 Ensaio de viscosidade Saybolt Furol	29
4.2.1.2 Densidade e massa específica pelo uso de picnômetro	29
4.2.1.3 Ensaio de resíduo por evaporação.....	29
4.2.2 Caracterização da Escória de Aciaria	29
4.2.2.1 Granulometria.....	29
4.2.2.2 Ensaio de massa específica do agregado miúdo	30
4.2.2.3 Ensaio de massa específica do agregado graúdo e absorção	30
4.2.3 Caracterização da mistura	30
4.2.3.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	30
4.2.3.2 Ensaio Marshall.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1 Caracterização da Emulsão Asfálticas	31
5.1.1 Ensaio de viscosidade Saybolt Furol	31
5.1.1.1 Determinação da densidade e da massa específica pelo uso de picnômetro	32

5.1.1	Ensaio de resíduo por evaporação	33
5.2	Caracterização da Escória de Aciaria.....	34
5.2.1	Granulometria	34
5.2.2	Ensaio de massa específica do agregado miúdo.....	36
5.2.3	Ensaio de massa específica e absorção do agregado gráúdo.....	37
5.3	Caracterização da Mistura.....	38
5.3.1	Ensaio Marshall	38
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
6.1	Corpo de Prova.....	41
6.2	Teor de Ligante.....	42
6.3	Mistura	42
7.	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
ANEXO A	– TABELAS OBTIDAS PELO ENSAIO DE MARSHALL.....	48
ANEXO B	– GRÁFICOS DO TEOR DE CAP ÓTIMO PARA CADA	
DADO	53	
ANEXO C	– CÁLCULO DE TEOR DO LIGANTE.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Estruturas dos Pavimentos.....	16
Figura 3.2 Camadas do Pavimento Flexível	18
Figura 3.3 Fluxo Simplificado de Produção	22
Figura 3.4 Produção da Escória de Alto Forno e da Escória de Aciaria	23
Figura 3.5 Produtos e Subprodutos Gerados na Fabricação Aço.	23
Figura 3.6 Fluxo do processo de beneficiamento da escória de aciaria	25
Figura 5.1 Ensaio de Saybolt-Furol para emulsões.....	31
Figura 5.2 Curva Granulométrica do Agregado da Mistura	35
Figura 5.2 Peneiramento dos Agregados	36
Figura 5.1 Aparelhos e Mistura.....	40
Figura 6.1 Corpo de Prova.	41
Figura B.1 Gráfico Vazios no Agregado x Teor de CAP.....	53
Figura B.2 Relação de Betume – Vazios x Teor de CAP	54
Figura B.3 Vazios x Teor de CAP.....	54
Figura B.4 Vazios Cheios de Betume x Teor de CAP	55
Figura B.5 Massa Específica Aparente x Teor de CAP	55
Figura B.6 Estabilidade x Teor de CAP	56
Figura B.7 Fluência x Teor de CAP	56



Universidade Federal de São João Del-Rei

Dosagem de Pré-Misturado a Frio com Inserção da Escória como
Agregado

Aline Fátima Nascimento Pereira

Jéssica Luciene Ferreira

Figura B.8 Tração x Teor de CAP57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades físicas da escória de aciaria	26
Tabela 3.1 - Análise química das escórias de aciaria LD e EAF.....	27
Tabela 5.1 - Viscosidade	32
Tabela 5.2 - Massa Específica e Densidade da Emulsão.....	32
Tabela 5.3 - Teor de CAP Presente na Emulsão	33
Tabela 5.4 - Faixas Granulométricas para Pré-Misturados a Frio.....	34
Tabela 5.5 - Granulometria da Amostra de Agregados.....	35
Tabela 5.6 - Massa Específica do Agregado Miúdo.....	37
Tabela 5.7 - Massa Específica e Absorção do Agregado Graúdo	38
Tabela 5.8 - Dados Médios dos Corpos de Prova	39
Tabela 5.9 - Teor Ótimo Encontrado.....	40
Tabela 5.10 - Valores encontrados para o Teor Ótimo do CAP.....	40
Tabela A.1 - Preparação do Corpo de Prova.....	48
Tabela A.2 - Alturas do Corpo de Prova	49
Tabela A.3 - Densidade Aparente.....	50
Tabela A.4 - Índices dos Corpos de Prova	51
Tabela A.5 - Estabilidade de Marshall	52
Tabela A.6 – Tração Diametral.....	52

1. INTRODUÇÃO

A escória é um resíduo siderúrgico gerado na fabricação do aço, o qual é dividido em dois tipos: de alto-forno e de aciaria. Quando a escória de aciaria recebe tratamento adequado para uso em obras civis, desde o controle da expansão até a britagem em tamanhos diversos e adequados ao uso que se pretende em obras rodoviárias, passa a ser denominada de agregado siderúrgico.

De acordo com TAVARES et al. [entre 2010 e 2014], o uso desse agregado siderúrgico é bem difundido na área da engenharia civil, sendo usado em diversas obras como: contenção de encostas, drenagem, lastro ferroviário, pavimentação rodoviária, entre outros.

O uso deste resíduo como agregado em pavimentação já vem sendo estudado por diversos pesquisadores. O seu emprego, além de reduzir a extração dos recursos naturais (brita, areia, pedregulho, etc.), garante um destino final adequado para um resíduo antes descartado de forma aleatória.

A preocupação da sociedade com relação às questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável é um importante aspecto no que diz respeito ao estudo à cerca da viabilidade de reutilização de subprodutos das indústrias siderúrgicas na pavimentação. A redução de uso dos recursos naturais, de demanda de energia para sua extração, de transporte dos mesmos e do volume disposto nos aterros sanitários e industriais possibilita uma aplicação racional e interessante dos agregados siderúrgicos, reutilizando-os e reciclando-os. (FREITAS, 2007).

Assim, a partir desse trabalho, será possível executar os procedimentos técnicos para a realização dos mesmos, buscando a melhor forma de execução. Dessa forma, o conhecimento acadêmico será expandido e a percepção da prática será ampliada.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar o estudo do resíduo siderúrgico como material alternativo na infraestrutura de pavimentos, sendo observadas suas características e propriedades.

2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a viabilidade técnica dos resíduos siderúrgicos adicionados como agregados no revestimento do tipo de misturas asfálticas usinadas a frio (PMF);

3. REFERENCIAL TEÓRICO

O mau estado das vias no país e os consequentes gastos substanciais com manutenção e reconstrução precoce tornam necessário o melhor entendimento dos materiais e dos métodos de projetos teórico - empíricos através da utilização de equipamentos de laboratório e de campo.

Por meio de tecnologias, equipamentos e métodos normatizados, é possível investigar materiais alternativos para as camadas do pavimento dentro da cadeia produtiva da pavimentação asfáltica que é constituída, principalmente, pelas universidades. É ali, no meio acadêmico, que através da formação de pessoal, de desenvolvimento aprofundado do conhecimento específico e de pesquisas de extensão por meio da prestação de serviços não convencionais é possível realizar novas buscas por soluções de problemas específicos na produção de asfalto, (BERNUCCI et al., 2006, p. 22).

3.1 Pavimentação

Conforme Senço (2008, p. 6), pavimento é a estrutura construída sobre a terraplanagem, destinada tanto técnica quanto economicamente a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los, melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança e resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

3.1.1 Tipos de pavimento

No geral, o pavimento rodoviário é classificado em dois tipos básicos: rígido e flexível. Os pavimentos rígidos ou pavimentos de concreto-cimento são pouco deformáveis, com revestimento formado por uma placa de concreto de cimento Portland. Uma vez que esse tipo de pavimento, quando sujeito a deformações, rompe por tração na flexão, sua espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço (Figura 3.1(a)).

Pavimentos flexíveis ou pavimentos asfálticos podem contar com cinco camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base, reforço do subleito e subleito (Figura 3.1(b)). Esse tipo de pavimento sofre deformação elástica e plástica, mas, devido ao carregamento e descarregamento contínuo, poderá se romper por fadiga e portanto é dimensionado à compressão e à tração na flexão.

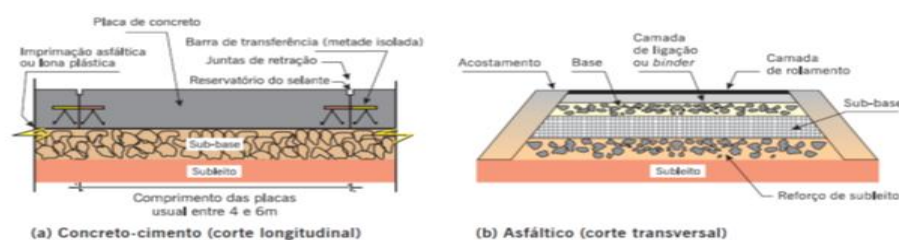


Figura 3.1 Estruturas dos Pavimentos

Fonte: Bernucci et al., 2006.

3.1.2 Camadas do pavimento flexível

As camadas que constituem a seção transversal de um pavimento-tipo são: reforço do subleito, base, sub-base e revestimento asfáltico. Tais camadas possuem espessuras e materiais determinados através do dimensionamento do pavimento (SENÇO, 2008, p. 15). A figura 3.2 exemplifica as camadas de um pavimento flexível.

- Subleito: É o terreno propriamente dito, ou seja, é a fundação do pavimento. Se a terraplenagem é recente, o subleito deverá apresentar características geométricas definitivas (SENÇO, 2008);
- Reforço do subleito: É uma camada com espessura constante e que possui características tecnológicas superiores às do subleito e com função de complementar a base ou a sub-base (SENÇO, 2008);
- Sub-base: É a camada que complementa a base, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre o reforço do subleito (SENÇO, 2008);
- Base: Camada destinada a resistir e distribuir ao subleito, os esforços verticais oriundos do tráfego e sobre a qual se construirá o revestimento (SENÇO, 2008);
- Revestimento asfáltico: É a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e é destinada a melhorar as condições do rolamento referentes à comodidade e à segurança e a resistir aos esforços horizontais atuantes. Deve ser resistente ao desgaste e deve ser o mais impermeável possível. (SENÇO, 2008).

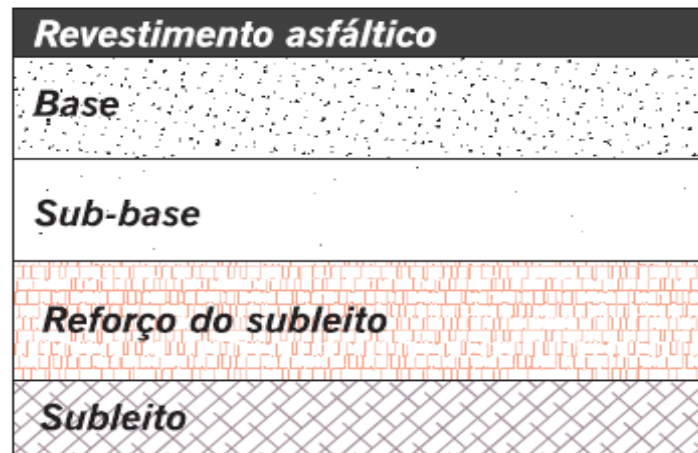


Figura 3.2 Camadas do Pavimento Flexível

Fonte: Bernucci et al., 2006

3.1.3 Agregado para o pavimento

Senço (2008, p. 264) afirma que “agregados são materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, com propriedades adequadas a compor camadas ou misturas para utilização nos mais diversos tipos de obra.”.

O agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. O desempenho das partículas de agregado é dependente da maneira como são produzidas, mantidas unidas e das condições sob as quais vão atuar. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios é utilizada para a predição do seu comportamento posterior quando em serviço. (BERNUCCI, 2006, p. 115).

O emprego dos agregados em pavimentação destina-se a misturas betuminosas, concreto de cimento, bases de calçamentos, lastros de obras e outros. Podem se apresentar, para esses fins, resultantes de rochas fragmentadas em britadores, seixos rolados encontrados nos leitos atuais dos rios e em antigos leitos, em jazidas

resultantes de alterações de rocha, de escórias de alto-forno; segundo Senço (2008).

3.2 Mistura Asfáltica Usinada a Frio

Segundo o DNIT (2006), quando os agregados e ligantes, utilizados na mistura, permitem que o seu espalhamento seja feito a temperatura ambiente, denomina-o de revestimento Pré-Misturados a Frio.

“Os pré-misturados a frio (PMF) consistem em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente.” (BERNUCCI et al., 2006).

Segundo a ABEDA (2001), as principais vantagens dessa técnica são:

- Utilização de equipamentos simples de usinagem e aplicação a frio;
- Trabalhabilidade à temperatura ambiente, sem necessidade de aquecimento dos materiais empregados;
- Possibilidade de trabalhar com agregados miúdos;
- Possibilidade de utilizar agregados britados provenientes de quase todos os tipos de rocha, devido à adesividade das emulsões catiônicas;
- Alta produtividade, possibilitando a estocagem do PMF para posterior aplicação, em serviços de tapa buracos;
- Baixo consumo de energia térmica e elétrica envolvidas durante as operações de transporte, manuseio, estocagem e aplicação dos materiais (cerca de 60% a 70% da energia total consumida pelas misturas asfálticas à quente);

- Elevada capacidade de suporte às grandes deflexões das camadas subjacentes, sem fissurar ou trincar;
- Reduzida emissão de gases tóxicos e/ou poluentes melhorando as condições de saúde, segurança e preservando o meio ambiente.

Nas últimas décadas, os PMFs vêm sendo prioritariamente utilizados para uso em revestimento de vias urbanas sujeitas a baixo volume de tráfego, camadas intermediárias de revestimento e em serviços urbanos de conservação.

3.3 Resíduos Sólidos

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são classificados em perigosos e não perigosos, sendo estes últimos subdivididos em não inerte e inerte. É possível classificar os resíduos sólidos através do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e da comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. Como base na NBR 10004 (ABNT, 2004), temos que:

- Resíduos classe I – Perigosos: Aqueles que apresentam periculosidade ou inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- Resíduos classe II - Não perigosos: Aqueles que não representam risco, como, por exemplo, resíduo de madeira, materiais têxteis, sucata de metais ferrosos e restos de alimentos;
- Resíduos classe II A - Não inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como a biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

- Resíduos classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

3.4 Escória de Aciaria na Pavimentação

3.4.1 Produção do aço e a formação da escória

A produção de aço é um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2009). A produção de aço se dá em quatro etapas principais: preparação da carga, redução, refino e laminação. A figura 3.3 mostra um fluxograma das etapas de produção.

As escórias de aciaria são resíduos provenientes da indústria siderúrgica gerados na fusão de metais ou da redução de minérios com o objetivo de obter o ferro gusa líquido e, posteriormente, o aço. (TAVARES et al., entre 2010 e 2014).

As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque (carvão mineral). (THOMAZ, 2012).

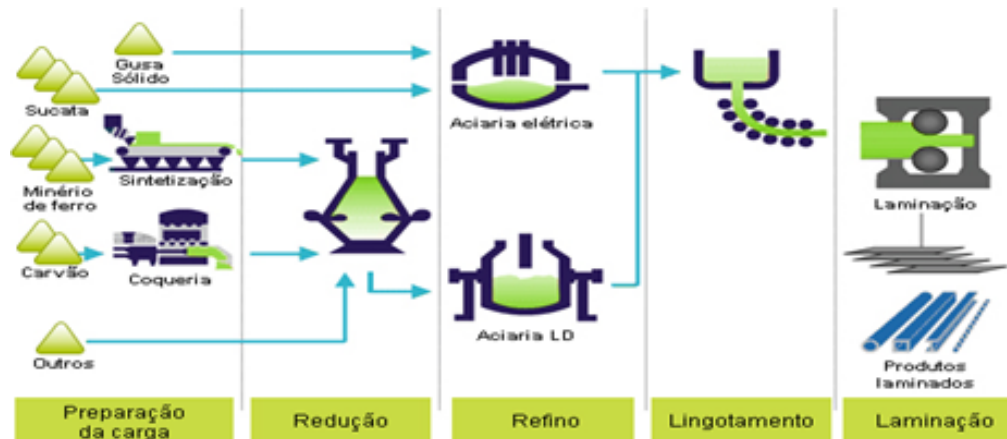


Figura 3.3 Fluxo Simplificado de Produção
Fonte: Instituto Aço Brasil, 2015.

Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidas em larga escala:

- Escória de alto-forno: resultante da fusão redutora dos minérios para produção do ferro gusa (retirado diretamente do alto forno, em geral com elevado teor de carbono e várias impurezas), sendo obtida em conversores;
- Escória de aciaria: resultante da produção do aço, sendo obtida em fornos elétricos e conversores a oxigênio, durante a conversão em aço. Estas escórias podem ser tanto oxidantes, ou seja, produzidas pela injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre, quanto redutoras, ou seja, geradas após o vazamento da escória oxidada através da adição de óxido de cálcio (CaO) e de fluorita (CaF_2), sendo que estes dois compostos são adicionados no processo com o objetivo de dessulfurar o aço líquido e adicionar elementos de liga (MACHADO, 2000).

Quando o ferro gusa passa pelo conversor LD, forno capaz diminuir os teores de Carbono e impurezas presentes no ferro gusa, produz o aço e a escória de aciaria. A figura 3.4 e figura 3.5, mostram, respectivamente, um fluxograma da produção da

escória de alto forno e da escória de aciaria e os produtos e subprodutos gerados na fabricação do aço.



Figura 3.4 Produção da Escória de Alto Forno e da Escória de Aciaria
Fonte: THOMAZ, 2012.

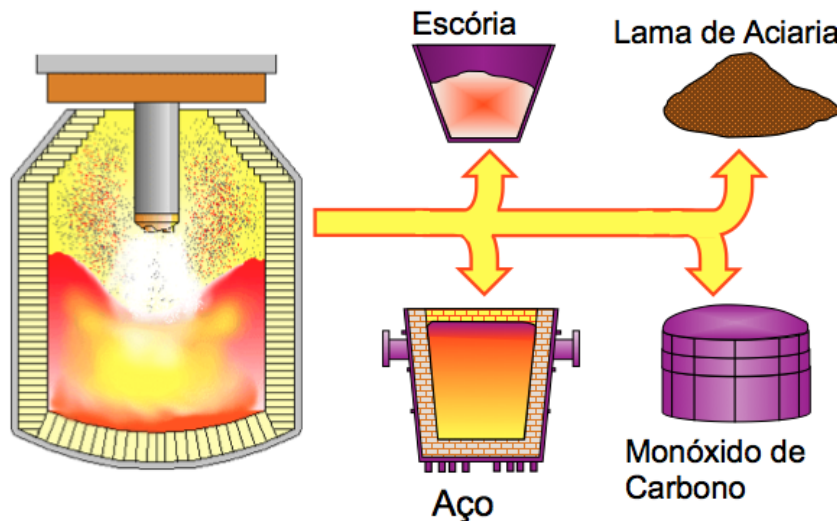


Figura 3.5 Produtos e Subprodutos Gerados na Fabricação Aço.
Fonte: SOUZA, E.L. (2006).

3.4.2 Beneficiamento

Segundo a DNER (1994 a), a escória de aciaria para ser empregada como agregado na pavimentação asfáltica deve atender aos seguintes requisitos e limites:

- Granulometria: [...] deve-se manter na proporção de 40% na faixa de até 1,27 cm (1/2") e 60% na faixa de 1,27 cm a 5,08 cm (2") de abertura nominal e deve atender à granulometria de projeto;
- Massa específica de 3 g/cm³ a 3,5 g/cm³, determinada pela ABNT MB – 2698, de 1987;

Após o resfriamento da escória de aciaria ocorre o seu beneficiamento. O primeiro passo consiste na limpeza (retirada da sucata metálica por separação magnética) e na separação, por meio de peneiramento e britagem, dos grãos finos e grossos. No segundo passo ocorre a escolha da escória de aciaria com o menor teor de óxido de cálcio e óxido de magnésio, já que esses óxidos são responsáveis pela instabilidade volumétrica. O ultimo passo corresponde à "cura" ou "envelhecimento" da escória, processo que se dá em um pátio de estocagem onde a escória será molhada por um determinado período até que sua expansão esteja completa. (RAMOS, 2008)

A figura 3.6 exemplifica o processo de beneficiamento da escória de aciaria através de um fluxograma.



Figura 3.6 Fluxo do processo de beneficiamento da escória de aciaria

Fonte: RAMOS, 2008.

3.4.3 Propriedades

De acordo com o tipo de aciaria (LD ou FEA), do controle do processo de fabricação do aço, dos procedimentos de processamento da escória após resfriamento e de sua estocagem, pode-se obter uma gama muito ampla de agregados de escória, com variações consideráveis de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Dessa forma, na utilização dos agregados obtidos, deve-se levar em consideração a origem da escória e as variáveis de processo na aciaria, (SOUZA, 2007, 22)

Segundo RAMOS (2015) as principais características do agregado siderúrgico são:

- Elevada resistência mecânica, aliada a uma textura rugosa e a uma morfologia de alta cubicidade, favorecendo resistência a maior tração e, conseqüentemente, maior atrito;

- Estrutura física caracterizada por uma elevada densidade e porosidade acentuada;
- Coloração predominante cinza clara;
- Elevada resistência a variações climáticas e à abrasão, ocasionando menor desgaste e, conseqüentemente, maior permeabilidade;
- Alta estabilidade com longa durabilidade (vida) para todas as aplicações;
- Inexistência de material orgânico, atuando como inibidor natural para a vegetação;
- Intertravamento automático, produzindo uma superfície estável (excelente tração), em virtude de seu formato cúbico;
- Alto peso específico, proporcionando elevada resistência a movimentos laterais (especialmente útil em curvas e ladeiras).

Como exemplo, pode-se citar o resultado da análise química realizada por POLESE et al. (2006), tabela 3.2 . E para as propriedades físicas da escória de aciaria, os resultados de ALVES, 2006(about MANCIO, 2001), tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas da escória de aciaria

Propriedades	Valores Típicos
Massa específica	3,2 - 3,6 (g/cm ³)
Massa unitária	1,3 - 1,9 (g/cm ³)
Absorção de água (porcentagem/massa)	< 3 %
Índice de abrasão (ASTM C131)	20 - 25 %
Ensaio de sanidade com Sulfato de sódio	< 12 %
Ângulo de atrito interno	40 - 50°
Dureza (escala Moh)	6 - 7
Índice de suporte Califórnia (CBR)	até 300 %

Fonte: ALVES, 2008.

Tabela 3.1 - Análise química das escórias de aciaria LD e EAF

Compostos/elemento determinados		Técnica	Resultados em massa	
			LD	EAF
Dióxido de silício	SiO ₂	complexometria	10,03	16,47
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	complexometria	1,19	5,76
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	complexometria	31,24	31,02
Óxido de cálcio	CaO	complexometria	39,29	37,78
Óxido de magnésio	MgO	complexometria	8,25	4,81
Anidrido sulfúrico	SO ₃	complexometria	0,19	0,34
Óxido de sódio	Na ₂ O	complexometria	0,01	0,06
Óxido de potássio	K ₂ O	complexometria	n.d.*	0,02
Anidrido fosfórico	P ₂ O ₅	colorimetria	1,92	0,76
Ferro metálico	Fe	absorçãoatômica	n.d.*	0,02
Óxido de cálcio livre	CaO	etileno-glicol	1,73	0,24

*n.d. - não

Fonte: POLESE et al., 2006

3.4.4 Aplicação

Segundo BRANCO (2004), os principais usos da escória de aciaria são:

- Matéria-prima na indústria de vidro e vitro-cerâmica, principalmente as escórias de alto forno que, após tratamento térmico;
- Produção de fertilizantes agrícolas termofosfatados, ou aditivo no cultivo de plantas e algas devido à composição química da escória;
- Estabilização de solos;
- Matéria-prima para produção de cimento;
- Nas próprias siderúrgicas, tanto como material reciclado ou como protetor do revestimento refratário dos fornos;
- Agregado na produção de concreto, por possuir alta resistência à compressão e durabilidade à abrasão;

- Construção de lastros no leito de ferrovias, por possuir alta massa específica;
- Controle na drenagem de ácidos;
- Utilização na infra e superestruturas rodoviárias, bem como em forma de cascalho em vias não pavimentadas para evitar a formação de poeira;
- Outros fins, tais como: execução de aterros, construção de peças de quebramar, contenção sendo utilizada na fabricação de gabiões, etc.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios pertencem ao laboratório de Geotecnia e Estradas da UFSJ - CAP. Dentre os materiais empregados, a escória de aciaria, agregado graúdo e miúdo, foi o agregado fornecido à universidade pela empresa Alfa e a emulsão asfáltica RR-1C também é pertencente ao laboratório.

4.2 Métodos e Procedimentos

Adiante, serão apresentados todos os métodos utilizados para a caracterização da emulsão asfáltica, assim como a caracterização da escória de aciaria. Após essas determinações, foi realizado o ensaio Marshall e de resistência à tração por compressão diametral para a obtenção dos parâmetros necessários para definir a viabilidade do agregado siderúrgico na pavimentação. Demais ensaios de caracterização não foram realizados devido à falta de equipamentos.

4.2.1 Caracterização da Emulsão Asfáltica

4.2.1.1 Ensaio de viscosidade Saybolt Furol

Esse ensaio tem por objetivo determinar a viscosidade Saybolt-Furol de materiais betuminosos através dos procedimentos detalhados pela ABNT NBR-14491/00 Emulsões asfálticas - determinação da viscosidade Saybolt-Furol.

4.2.1.2 Densidade e massa específica pelo uso de picnômetro

Para a obtenção da densidade da emulsão asfáltica, serão realizados os procedimentos descritos na norma DNER – ME 193/96 – Materiais Betuminosos Líquidos e Semi – Sólidos - Determinação da densidade e da massa específica.

4.2.1.3 Ensaio de resíduo por evaporação

Este ensaio tem por objetivo determinar a fração de ligante asfáltico contido na emulsão asfáltica e serão realizados de acordo com a ABNT NBR 14376 (2007) Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo asfáltico por evaporação - Método expedito.

4.2.2 Caracterização da Escória de Aciaria

4.2.2.1 Granulometria

A classificação da escória de aciaria foi realizada através do peneiramento seguindo as instruções da norma DNER – ME – 083/98 – Agregados - Análise granulométrica.

4.2.2.2 Ensaio de massa específica do agregado miúdo

As orientações seguidas para a realização desse ensaio encontram-se na norma DNER – ME 194/98 Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.

4.2.2.3 Ensaio de massa específica do agregado graúdo e absorção

Para a execução desse ensaio serão realizados os procedimentos descritos na norma DNER – ME 195/97 Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.

4.2.3 Caracterização da mistura

4.2.3.1 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para a obtenção da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos serão realizados os procedimentos descritos na norma DNER – ME 138/94 Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral.

4.2.3.2 Ensaio Marshall

Para o ensaio Marshall com mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica foram realizados os procedimentos descritos na norma DNER – ME 107/94 - Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica - ensaio Marshall.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da Emulsão Asfálticas

5.1.1 Ensaio de viscosidade Saybolt Furol

Através deste ensaio que mede a viscosidade é possível definir a consistência mais adequada para que o ligante asfáltico envolva a mistura com os agregados para proporcionar uma perfeita cobertura dos mesmos. Assim, para cada ligante asfáltico é obtida uma curva de viscosidade com a temperatura que permita escolher a faixa de temperatura adequada para as diversas utilizações. No caso da emulsão, a viscosidade define a trabalhabilidade da mesma e sofre influência da quantidade de asfalto presente. A figura 5.1 exemplifica a realização do ensaio.



Figura 5.1 Ensaio de Saybolt-Furol para emulsões

Fonte: Autores.

O resultado do ensaio determina o tempo, em segundos, para que 60 mL de amostra escoe em fluxo contínuo, através de um orifício de dimensões padronizadas

(orifício Furol) sob condições especificadas. A tabela 5.1 fornece o tempo gasto para o completo escoamento da emulsão a temperatura de 50°C.

Tabela 5.1 - Viscosidade

Amostra	Tempo (s)
1	7,55
2	8,25

Fonte: Autores.

O tempo marcado no ensaio está muito abaixo do estipulado pela DNIT 165/2013, que indica, para a emulsão RR-1C, o tempo de 90 segundos de viscosidade a 25°C. Essa diferença gritante nos valores dos tempos pode ser explicada devido ao tempo de estocagem da emulsão que não deve ultrapassar 30 dias.

5.1.1.1 Determinação da densidade e da massa específica pelo uso de picnômetro

A densidade, segundo a DNER 193/96, é a relação de massa de um dado volume de material a 25°C ou 15,6°C, para a de igual volume de água destilada à mesma temperatura.

A tabela 5.2 apresenta a massa específica e a densidade da emulsão asfáltica obtidas seguindo as instruções da DNER – ME 193/96.

Tabela 5.2 - Massa Específica e Densidade da Emulsão

MASSAS DO PIQNÔMETRO	1	2	MÉDIA
Massa Vazio (g)	26,330	25,330	25,830
Massa Cheio de Água (g)	55,190	52,540	53,865
Massa com 1/3 de Emulsão (g)	35,710	34,290	35,000
Massa com 1/3 de Emulsão + 2/3 de Água (g)	56,680	55,570	56,125
Densidade de Emulsão	1,189	1,511	1,350
Massa Específica (g/cm ³)	1,184	1,504	1,344
Massa Específica da Água (g/cm ³)	0,996		

Fonte: Autores.

O resultado obtido para a massa específica e para a densidade da emulsão foram maiores do que esperados, já que a temperatura de 25°C a massa específica é de aproximadamente 1 g/cm³.

5.1.1 Ensaio de resíduo por evaporação

Nele a emulsão é aquecida, de forma branda e com agitação contínua a fim de evitar a ocorrência de respingos, até a total evaporação da água (ou da água e solvente) e, no decorrer do ensaio, observa-se a formação de uma fase pastosa devido a essa evaporação. O ensaio deverá ser interrompido no momento em que esta fase pastosa se transforma em um fluido de superfície espelhada, constituído pelo resíduo asfáltico. Logo após a amostra deve ser pesada.

A tabela 5.3 mostra o valor encontrado para o teor de Cimento Asfáltico de Petróleo, CAP, contido na emulsão utilizada no estudo.

Tabela 5.3 - Teor de CAP Presente na Emulsão

Tempo (h)	Massa 1 (g)	Massa 2 (g)	Média (g)	Teor de CAP (%)
0	50,27	50,42	50,345	44,20
2	22,12	22,46	22,29	
3	22,02	22,4	22,21	
Média das Massas (g)			22,25	

Fonte: Autores.

A porcentagem de CAP presente na emulsão asfáltica em estudo está muito abaixo da estabelecida pela DNIT 165/2013, isto é, para a emulsão RR-1C o valor mínimo de CAP é de 97%.

5.2 Caracterização da Escória de Aciaria

5.2.1 Granulometria

Para o dimensionamento da granulometria foi usado à especificação técnica DER/PR ES-P 23/05. Para nosso estudo será adotado a classe C, pré-misturado a frio semi-aberto ou semi-denso, PMSD, em destaque na tabela 5.4.

Segundo a DER/PR ES-P 23/05, PMSD é a mistura asfáltico executada à temperatura ambiente, em usina apropriada, composta de agregados minerais de granulometria descontínua e emulsão asfáltica, espalhada e compactada a frio, com volume de vazios nos limites de 10 a 20%.

Tabela 5.4 - Faixas Granulométricas para Pré-Misturados a Frio

Faixas granulométricas para pré misturados a frio							
Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso					Tolerâncias da faixa de projeto
ABNT	Abertura, mm	A	B	C	D	E	
1"	25,4	100	-	100	-	-	± 7
3/4"	19,1	75-100	100	95-100	100	100	± 7
1/2"	12,7	-	75-100	-	95-100	85-100	± 7
3/8"	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	70-90	± 7
nº 4	4,8	10-35	20-40	20-40	25-45	30-60	± 5
nº 10	2,00	5-20	10-20	10-25	15-30	20-45	± 5
nº 200	0,074	0-2	0-2	0-5	0-5	2-6	± 2
Tipo PMF		PMFA		PMSD	PMFD		

Fonte: DER/PR ES-P 23/05

A análise granulometria foi realizada de acordo com a DNER – ME 083/98. Os resultados e a curva granulométrica estão apresentados, respectivamente, na tabela 5.5 e na figura 5.2.

Tabela 5.5 - Granulometria da Amostra de Agregados

Peneira		Massa (g)	% Retida	% Passa
1"	25,400	0,0	0,000	100,000
3/4"	19,100	276,0	5,979	94,021
3/8"	9,520	155,5	33,701	60,320
4	4,760	166,5	36,083	24,236
10	2,000	680,0	14,729	9,508
FUNDO	0,000	439,0	9,508	0,000
Massa Total (g):		4614		

Fonte: Autores.

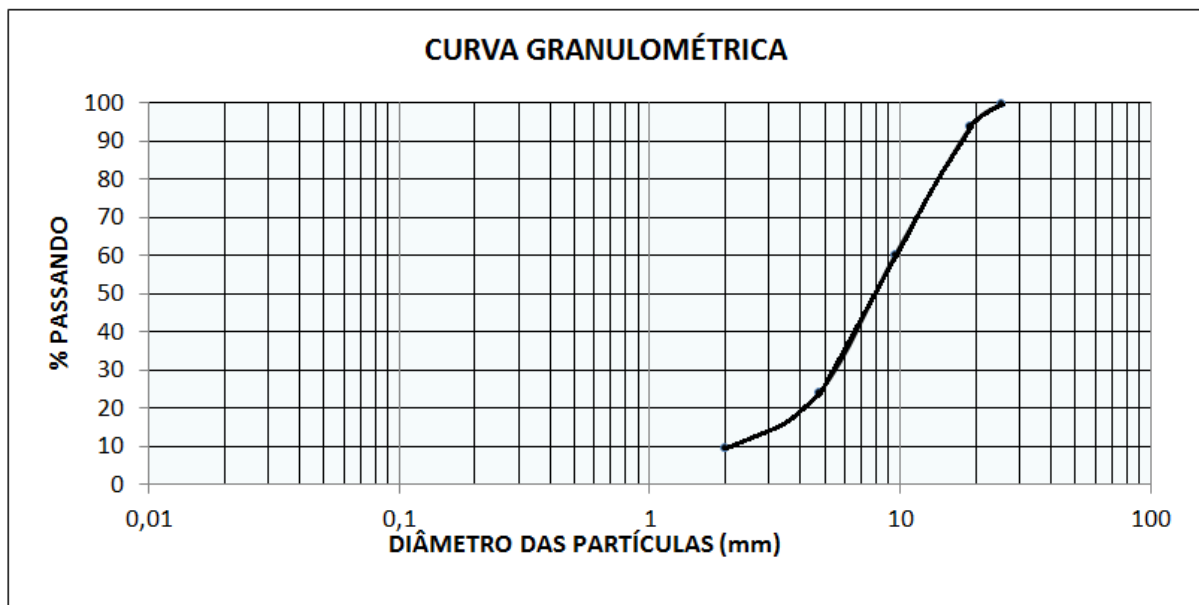


Figura 5.2 Curva Granulométrica do Agregado da Mistura

Fonte: Autores.



Figura 5.2 Peneiramento dos Agregados

Fonte: Autores.

5.2.2 Ensaio de massa específica do agregado miúdo

O agregado miúdo pode ser de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou até mesmo a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de 4,5 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm.

A massa específica do agregado miúdo é obtida através da leitura fornecida pelo frasco Chapman sendo que o volume em m³ é dado pelo conjunto água-agregado miúdo.

Com base nas etapas estabelecidas pela DNER – ME 194/98, obteve-se os seguintes resultados para a massa específica da escória de aciaria, tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Massa Específica do Agregado Miúdo

Agregado Miúdo	Frasco com Água		Massa do Agregado (g)	Volume do Conjunto (cm ³)	Massa Específica (g/cm ³)
	Volume (cm ³)	Massa (g)			
Amostra 1	300,00	556,25	487,06	435,30	3,60
Amostra 2	300,00	556,58	506,50	442,40	3,56
Massa Específica Média (g/cm ³)					3,58

Fonte: Autores.

5.2.3 Ensaio de massa específica e absorção do agregado graúdo

Por meio desses valores de massa, pode-se calcular a massa específica na condição seca e a massa específica na condição saturada com a superfície seca e a absorção que mede o aumento da massa do agregado devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como percentagem de sua massa seca.

$$\gamma = \frac{A}{B-C}, \quad \text{Eq.: 5.2}$$

γ : massa específica do agregado na condição seca, em g/cm³;

A: massa da amostra, após a secagem na estufa e resfriamento à temperatura ambiente (massa seca em estufa) em g;

B: massa da amostra na condição saturada com a superfície seca, em g;

C: massa da amostra imersa em água (massa hidrostática), em g.

Para este ensaio a norma recomenda o uso das peneiras 4,8 mm e 2,4 mm, mas se necessário podem ser utilizadas outras peneiras.

Na tabela 5.7 encontram-se os valores de massa específica e de absorção do agregado graúdo composta pela escória de aciaria. Esses resultados foram obtidos seguindo a norma.

Tabela 5.7 - Massa Específica e Absorção do Agregado Graúdo

Agregado graúdo	Massa Seca (g)	Massa Hidrostática (g)	Massa seca em estufa (g)	Massa específica seca Y (g/cm³)	Absorção (%)
1	3106,17	2152,2	3036,26	3,18	2,30
Tara do Recipiente					694,20
Recipiente + Agregado					2846,40

Fonte: Autores.

5.3 Caracterização da Mistura

5.3.1 Ensaio Marshall

Por meio de uma faixa granulométrica predefinida é escolhido um teor dito “ótimo” de ligante. De acordo com o método de dosagem pode-se variar o teor do ligante asfáltico que é função da energia de compactação, do tipo de mistura, da temperatura, dentre outros.

Através do ensaio Marshall é realizado o procedimento para a determinação da estabilidade e fluência de mistura betuminosa, usinada a frio, com emulsão asfáltica catiônica, com equipamento.

Foram confeccionados 15 corpos de provas; 3 corpos para cada um dos teores estudados. Todos os procedimentos realizados seguiram, rigorosamente, a norma DNER – ME 107/94.

Com o intuito de gerar gráficos mais realistas, anexo B, valores fora da média foram descartados, sendo esses valores destacados em vermelho nas tabelas que se encontram no anexo A.

A tabela 5.8 possui os valores médios das características dos corpos de prova para cada teor de CAP adotado. No anexo A, encontram-se as tabelas referentes a todos os dados de cada corpo de prova.

Tabela 5.8 - Dados Médios dos Corpos de Prova

DADOS DOS CORPOS DE PROVA									
Traço	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Densidade Máxima Teórica (d)	Vazios (%)	Vazios Cheios com Betume (%)	Vazios no Agregado Mineral (%)	Relação Betume -Vazios (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	Tração (kgf/cm ²)
1	2,290	3,085	25,81	5,14	30,95	16,60	339,4	5,56	3,26
2	2,340	3,070	23,63	5,92	29,55	20,04	331,7	5,16	3,05
3	2,339	3,058	24,52	6,42	30,94	21,45	391,9	5,03	3,51
4	2,320	3,044	23,73	6,97	30,70	22,75	261	5,95	2,22
5	2,350	3,032	22,34	7,60	29,94	25,37	279,8	5,56	2,36

Fonte: Autores.

Para a obtenção do teor ótimo de ligante para a mistura em análise, foi feita uma comparação entre as médias das especificações encontradas na DER/PR ES-P 23/05, como mostra a tabela 5.9, e o teor de ligante para cada valor das características serem alcançados. A partir do valor encontrado foram traçadas linhas em cada um dos gráficos para a aquisição dos dados referentes a uma mistura dimensionada para o teor ótimo de ligante. A tabela 5.10 mostra os valores coletados para cada característica da mistura e no anexo B encontram-se os gráficos.

Tabela 5.9 - Teor Ótimo Encontrado

Características	Limites	Média	Valor de Teor de Ligante Encontrado no Gráfico (%)
Vazio (%)	10 -- 20	15	-
Estabilidade (Kgf)	≥ 300		3,71
Fluência (mm)	2,0 -- 4,5	3,25	4,06
Teor Emulsão (%)	4,5 -- 6,5	5,5	-
Teor Ótimo Encontrado (%)			3,9

Fonte: Autores.

Tabela 5.10 - Valores encontrados para o Teor Ótimo do CAP

Teor Ótimo (%)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Vazios (%)	Vazios no Agregado Mineral (%)	Relação Betume -Vazios (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)	Tração (Kgf/cm ²)
3,90	2,29	24,30	31,00	21,10	339,00	5,75	3,85

Fonte: Autores.

A figura 5.1 mostra fotos de alguns passos na realização do ensaio.



Figura 5.1 Aparelhos e Mistura

Fonte: Autores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Corpo de Prova

A figura 6.2 mostra o momento da extração do corpo de prova depois de passar 24 horas na estufa e 2 horas a temperatura ambiente, como especificado em norma. Como pode-se observar, a escória não absorveu homogênea a emulsão, o que pode ser visto na figura 5.5 (c e d). Isso ocorre pelo fato da escória apresentar em sua constituição aditivos químicos capazes de retrair o ligante. Para uma conclusão concreta é recomendado à realização do ensaio de adesividade, DNER-ME 078/94 – Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso.



Figura 6.1 Corpo de Prova.

Fonte: Autores.

6.2 Teor de Ligante

O teor de ligante calculado para a realização da mistura foi muito abaixo do intervalo estabelecido na DER/PR ES-P 23/05, tabela 5.9, devido a um erro de cálculo cometido no início da preparação da mistura.

Após a obtenção do teor de CAP contido na emulsão asfáltica usada, ensaio de resíduo asfáltico por evaporação, calculou-se, anexo C, a massa necessária de emulsão para alcançar a concentração de CAP exigida na mistura, porém foi desconsiderada a massa de água presente na emulsão. Assim a massa de emulsão misturada com o agregado ficou abaixo da calculada no ensaio. Com isso, o teor ótimo encontrado no ensaio Marshall, tabela 5.10, ficou fora da faixa estabelecida pela norma, como é observado na tabela 5.9.

Na figura 6.1, é possível notar a desagregação do corpo de prova, evento que acontece devido à massa de emulsão asfáltica da mistura ter sido menor do que a mínima necessária. Fato que justifica as alturas encontradas para os corpos de prova maiores do que estipulado pela norma, que é de $\pm 63,00$ mm.

6.3 Mistura

Durante a preparação da mistura observou-se um endurecimento muito rápido da emulsão acrescentada aos agregados. Assim, para a homogeneização da mesma, fez-se necessário o uso de força durante a agitação mecânica.

Pode-se explicar esse fenômeno através do comportamento termo-viscoso do ligante asfáltico, pois a medida da viscosidade está relacionada com a força de atração das moléculas. Como a viscosidade é inversamente proporcional a temperatura, quanto maior a temperatura, menos viscoso é o líquido. Durante a execução dos ensaios a temperatura ambiente do laboratório estava baixa, por

consequência a emulsão mostrou-se mais viscosa e isso justifica o endurecimento mais rápido.

A solução para tal evento seria executar o ensaio em um local onde a temperatura ambiente pudesse ser controlada.

7. CONCLUSÕES

Devido ao erro no cálculo do teor de CAP contido na emulsão e por não ter se considerado a percentagem de água da emulsão não foi possível estabelecer um teor ótimo para a mistura satisfatório, porém pode-se dizer que não ocorreu a completa reação entre os componentes da mesma.

- Sugestão de pesquisa: utilização de dope para melhoramento da adesividade entre a escória de aciaria e a emulsão asfáltica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual Básico de Emulsões Asfáltica. Soluções para Pavimentar sua Cidade.** Rio de Janeiro. ABEDA, 2001;
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004;
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935:** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011;
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MERTALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO – Disponível em <<http://www.abmbrasil.com.br/quem-somos/historico/as-primeiras-usinas/>> Acesso em: 23 Junho de 2015;
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14376 (2007): Emulsões asfálticas – Determinação do resíduo asfáltico por evaporação (método expedito). Rio de Janeiro: ABNT, 2007;
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-14491/00** Emulsões asfálticas - determinação da viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2000;
- ALVES, J. O.; **Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lã mineral.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. 2008;

- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A.; SOARES, J.B., **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros**. 4^o Edição, Rio de Janeiro, Petrobras, 2006;
- BRANCO, V.T.F. C. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004;
- DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR – ES-P 23/05 – Pavimentação: Pré-Misturado A Frio**. 18p., 2005;
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – EM262/94 – Escória de aciaria para pavimentos rodoviários**. 1994 - a;
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 083/98 - Agregados – Análise Granulométrica**. 5p, 1998;
- DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 194/98 - Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman**, 1998;
- DNER, DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 195/97 - Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**, 1997;
- DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 193/96 – Materiais Betuminosos Líquidos e Semi – Sólidos - Determinação da densidade e da massa específica**;

- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER – ME 004/94 Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura (**ABNT-MB 517**) – b;
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER – ME 138/94 Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994;
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM.
DNER – ME 107/94 Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994;
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – EM - 165/13** - Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013;
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3^o Edição. Rio de Janeiro, 2006, p. 99;
- INSTITUTO AÇO BRASIL, 2009, Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br>>
Acesso em: 03 Maio de 2015;
- POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G. **Steel slag microstructural characterization**. Matéria, vol.11, n. 4, p. 442-452, Rio de Janeiro, Brasil, 2006;
- RAMOS F. M., **II Workshop de Sustentabilidade do Setor Siderúrgico Brasileiro**. Apresentação Multiserv; 2008;

- RAMOS F. M., **Da aciaria par o pavimento**. Portal Metalica da Construção Civil- <<http://wwwo.metalica.com.br/da-aciaria-para-o-pavimento>> acesso 25/05/2015;
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2º edição. São Paulo: PINI Ltda, 2008;
- SOUZA E. B. O., **ESCÓRIAS DE ACIARIA E RESÍDUOS DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS EM COMPONENTES DE PAVIMENTAÇÃO** - Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007;
- SOUZA, E. L., **Estudo e desenvolvimento de um processo de tratamento de resíduos siderúrgicos através da técnica de bombardeamento ultrassônico**. Dissertação apresentada ao Programa de Doutorado da Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDMAT -. Ouro Preto, 2006;
- TAVARES, D. S.; ODA, S.; MOTTA, L. M. G., **Utilização do Agregado Siderúrgico (Escória de Aciaria) em Pavimento Asfáltica**. 2010 a 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro;
- THOMAZ, E. C.S., **Escória de alto forno Parte 1 – Fabricação** - Notas de Aula, IME – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2012;

ANEXO A – TABELAS OBTIDAS PELO ENSAIO DE MARSHALL

Tabela A.1 - Preparação do Corpo de Prova

PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA						
	C.P	Teor de Ligante (%)	Massa Total do C.P. (g)	Massa do Ligante (g)	Miúdo (g)	Graúdo (g)
TRAÇO 1	1	3,03	1244,50	85,30	114,12	1086,10
	1B					
	1C					
TRAÇO 2	2	3,37	1230,55	94,90	114,13	1086,24
	2B					
	2C					
TRAÇO 3	3	3,71	1274,00	104,50	114,10	1085,95
	3B					
	3C					
TRAÇO 4	4	4,06	1245,55	114,30	114,18	1086,68
	4B					
	4C					
TRAÇO 5	5	4,41	1260,54	124,20	114,41	1088,90
	5B					
	5C					
Total			18765	1570	1713	16302

Fonte: Autores.

Tabela A.2 - Alturas do Corpo de Prova

Corpos de Prova	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Altura 3 (mm)	Altura 4 (mm)	Altura Média (mm)	Altura Média (mm)
1	62,97	64,25	61,26	65,24	63,43	65,63
1B	60,66	60,65	60,30	59,20	60,20	
1C	72,85	72,26	74,52	73,45	73,27	
2	68,75	68,39	68,43	67,49	68,27	68,62
2B	62,10	63,19	63,40	61,46	62,54	
2C	75,00	76,29	74,00	74,97	75,07	
3	65,33	65,88	66,46	67,88	66,39	70,30
3B	72,87	72,55	72,12	71,80	72,34	
3C	71,39	71,54	72,90	72,92	72,19	
4	68,00	66,48	68,58	68,07	67,78	73,98
4B	77,52	77,63	77,25	77,30	77,43	
4C	76,36	76,96	77,20	76,35	76,72	
5	70,40	70,16	70,43	70,28	70,32	74,61
5B	74,66	75,15	75,56	75,70	75,27	
5C	77,51	77,71	78,99	78,81	78,26	

Fonte: Autores.

Tabela A.3 - Densidade Aparente

DADOS DOS CORPOS DE PROVA						
	C.P	Teor de Ligante (%)	Massa do C.P.ao Ar não Parafinado (g)	Massa ao Ar Parafinado (g)	Massa Imerso e Parafinado (g)	Volume (cm ³)
TRAÇO 1	1	3,03	1128,61	1305,38	632,34	447,86
	1B		1244,65	1303,42	684,77	543,78
	1C		1243,45	1302,07	714,75	512,64
TRAÇO 2	2	3,37	1213,33	1286,93	705,50	487,67
	2B		1234,31	1293,37	691,76	526,37
	2C		1244,00	1283,88	702,34	530,74
TRAÇO 3	3	3,71	1238,33	1286,93	700,00	525,02
	3B		1248,36	1279,01	697,85	542,12
	3C		1254,99	1297,09	710,39	533,07
TRAÇO 4	4	4,06	1212,29	1309,08	655,90	529,88
	4B		1259,60	1295,96	675,84	573,80
	4C		1264,77	1289,82	720,88	537,03
TRAÇO 5	5	4,41	1255,82	1301,90	650,98	592,22
	5B		1260,97	1306,12	687,95	560,65
	5C		1264,82	1324,94	711,17	537,18

Fonte: Autores.

Tabela A.4 - Índices dos Corpos de Prova

ÍNDICES DOS CORPOS DE PROVA							
	C.P.	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Densidade Máxima Teórica (d)	Vazios (%)	Vazios Cheios com Betume (%)	Vazios no Agregado Mineral (%)	Relação Betume-Vazios (%)
TRAÇO 1	1	2,52	3,085	18,32	5,66	23,97	23,59
	1B	2,29		25,81	5,14	30,95	16,60
	1C	2,43		21,38	5,44	26,82	20,29
TRAÇO 2	2	2,49	3,070	18,95	6,28	25,23	24,90
	2B	2,34		23,61	5,92	29,53	20,05
	2C	2,34		23,64	5,92	29,56	20,02
TRAÇO 3	3	2,36	3,058	22,86	6,47	29,33	22,06
	3B	2,30		24,69	6,32	31,01	20,37
	3C	2,35		23,01	6,46	29,47	21,92
TRAÇO 4	4	2,29	3,044	24,83	6,87	31,71	21,68
	4B	2,20		27,88	6,60	34,47	19,13
	4C	2,36		22,62	7,08	29,70	23,83
TRAÇO 5	5	2,12	3,032	30,06	6,84	36,90	18,54
	5B	2,25		25,82	7,26	33,08	21,94
	5C	2,35		22,34	7,60	29,94	25,37

Fonte: Autores.

Obs.: todos os dados em vermelho não foram considerados para uma melhor análise dessa dissertação, em especial. Essa escolha foi feita analisando as médias de cada grupo sendo desconsiderado o corpo de prova que o seu valor ficasse destoante.

Tabela A.5 - Estabilidade de Marshall

ESTABILIDADE MARSHALL								
	Constante do Anel	kgf/10 ⁻³ mm		2,02424				
	C.P	Estabilidade				Fluência		
		Altura (cm)	Leitura (10 ⁻³ mm)	Correção	Estabilidade (kgf)	Fluência (1/32")	Fluência (1/100")	Fluência (mm)
TRAÇO 1	1	6,343	145	1,03	301,3	10	31,25	7,94
	1B	6,02	150	1,12	339,6	7	21,88	5,56
	1C	7,327	230	0,81	377,3	7	21,88	5,56
TRAÇO 2	2	6,827	190	0,91	350,0	6	18,75	4,76
	2B	6,254	160	1,05	340,3	7	21,88	5,56
	2C	7,507	205	0,78	323,2	6	18,75	4,76
TRAÇO 3	3	6,639	245	0,95	472,5	7	21,88	5,56
	3B	7,234	209	0,83	350,1	7	21,88	5,56
	3C	7,219	210	0,83	353,0	5	15,63	3,97
TRAÇO 4	4	6,778	140	0,92	261,0	8	25,00	6,35
	4B	7,743	170	0,74	254,7	5	15,63	3,97
	4C	7,672	205	0,75	311,9	7	21,88	5,56
TRAÇO 5	5	7,032	212	0,87	372,0	7	21,88	5,56
	5B	7,527	140	0,78	219,7	7	21,88	5,56
	5C	7,826	190	0,73	279,8	7	21,88	5,56

Fonte: Autores.
Tabela A.6 – Tração Diametral

Corpos de Prova	Altura Média (cm)	Estabilidade (kgf)	Diâmetro (cm)	Tração (kgf/cm ²)
1	6,56	339,6	10,1	3,26
2	6,86	331,7		3,05
3	7,03	391,9		3,51
4	7,40	261,0		2,22
5	7,46	279,8		2,36

Fonte: Autores.

ANEXO B – GRÁFICOS DO TEOR DE CAP ÓTIMO PARA CADA DADO

A linha preta pontilhada fornece o valor de cada dado para o teor ótimo de CAP.

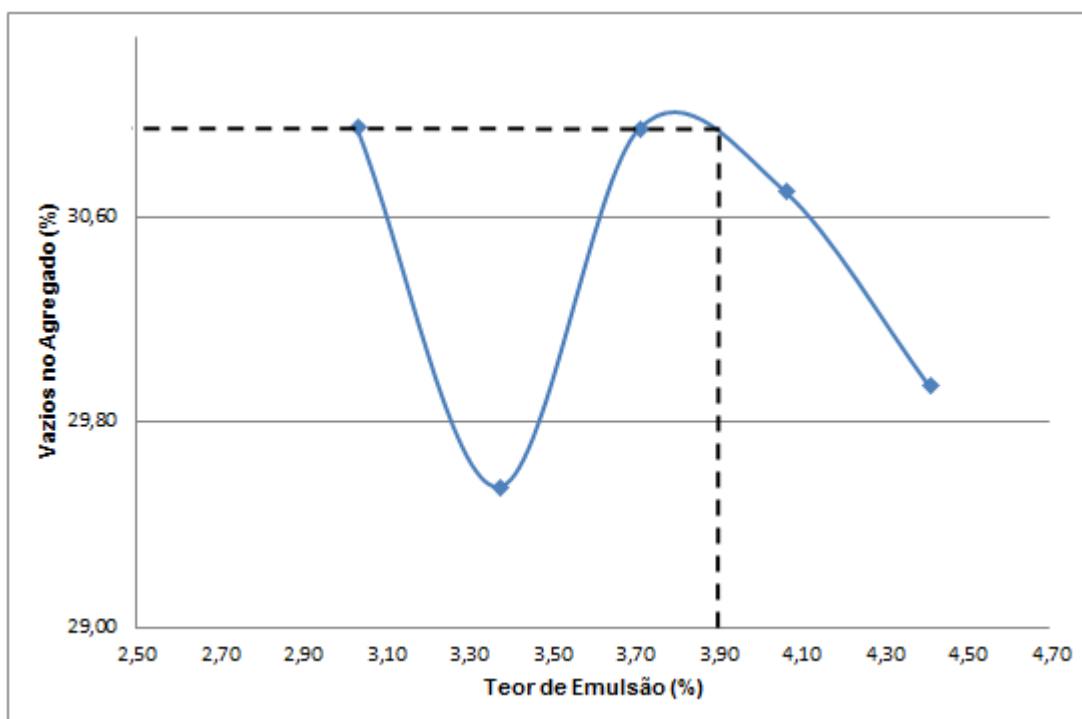


Figura B.1 Gráfico Vazios no Agregado x Teor de CAP

Fonte: Autores.

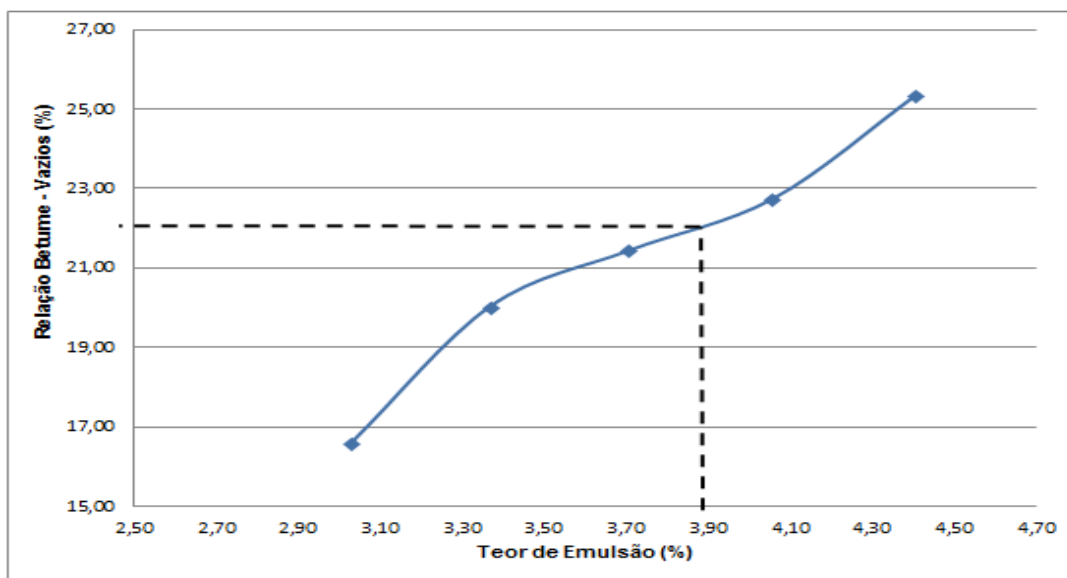


Figura B.2 Relação de Betume – Vazios x Teor de CAP

Fonte: Autores.

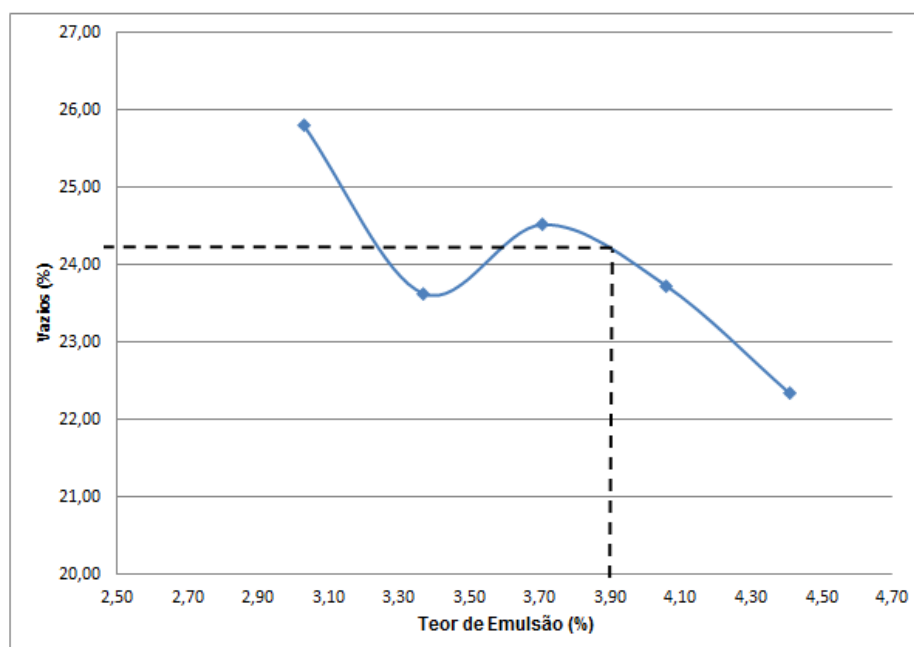


Figura B.3 Vazios x Teor de CAP

Fonte: Autores.

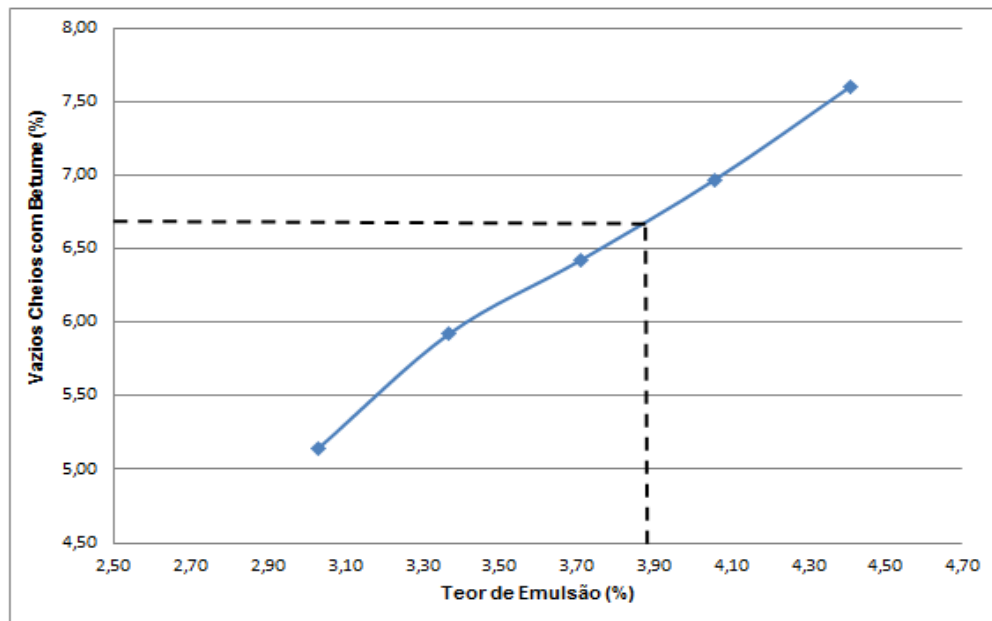


Figura B.4 Vazios Cheios de Betume x Teor de CAP

Fonte: Autores.

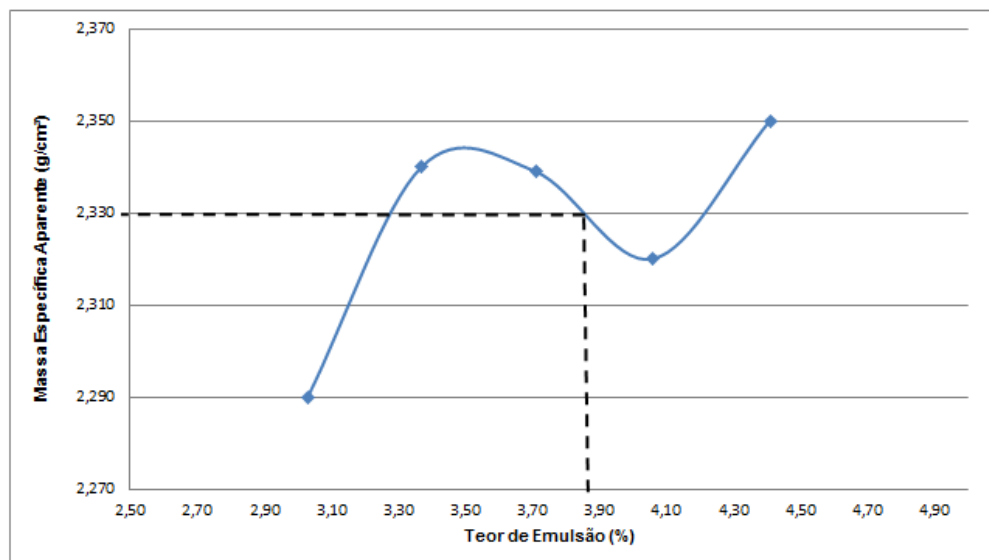


Figura B.5 Massa Específica Aparente x Teor de CAP

Fonte: Autores.

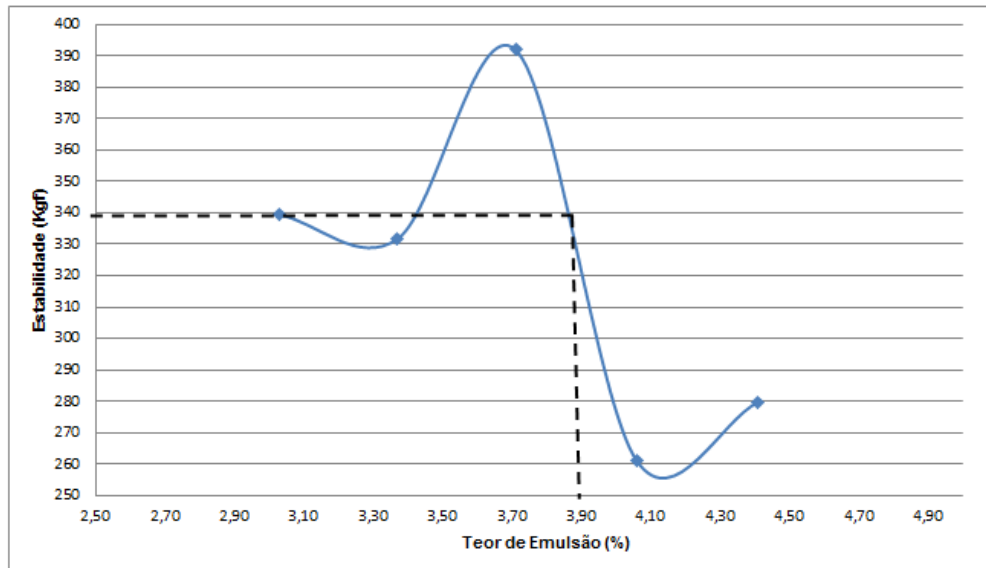


Figura B.6 Estabilidade x Teor de CAP

Fonte: Autores.

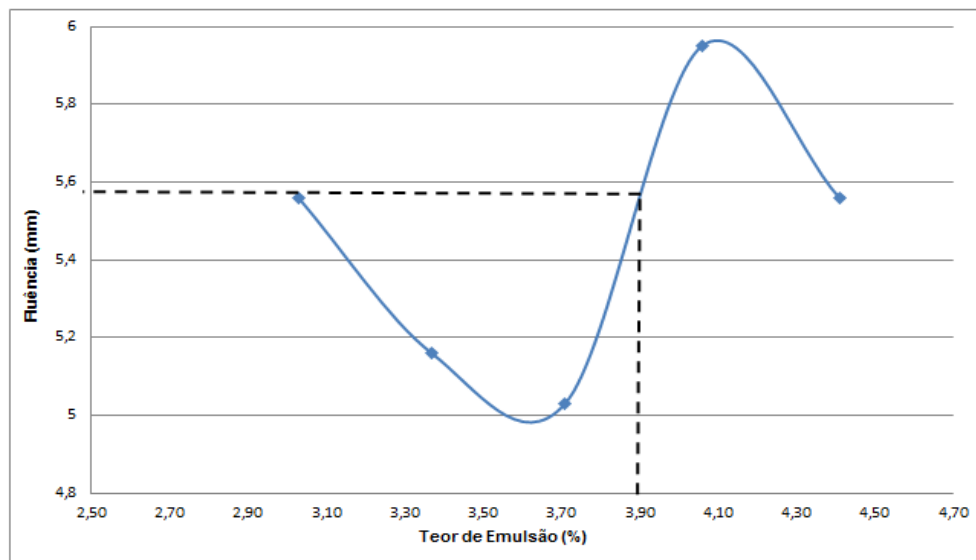


Figura B.7 Fluência x Teor de CAP

Fonte: Autores.

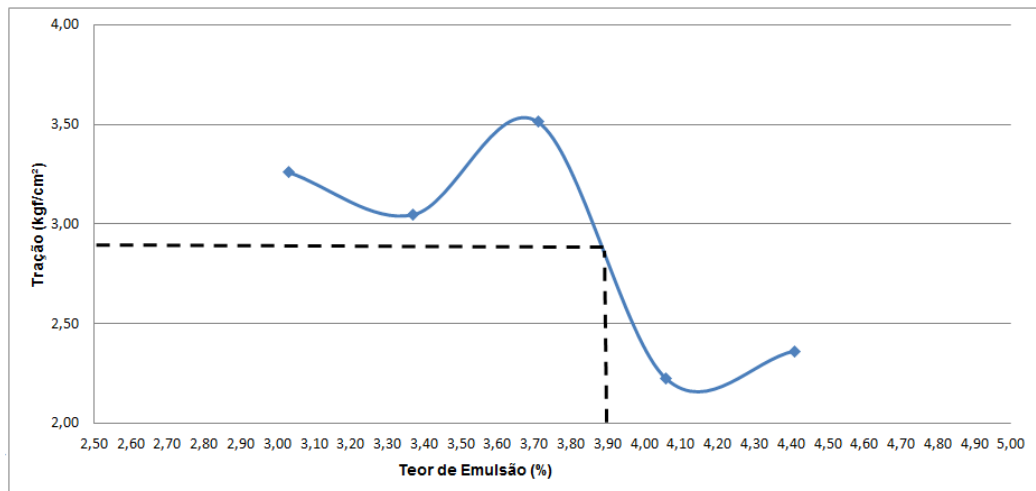


Figura B.8 Tração x Teor de CAP

Fonte: Autores.

ANEXO C – CÁLCULO DE TEOR DO LIGANTE

Segundo Bernucci et al.(2006), para a determinação da superfície específica dos agregados, utiliza-se a fórmula de Vogt (Σ), que consiste em uma adaptação da formulação de Duriez para as peneiras correspondentes às especificações brasileiras:

$$\Sigma = \frac{0,17 \times G + 0,33 \times g + 2,3 \times S_1 + 12 \times S_2 + 135 \times f}{100} \quad \text{Eq.: C.1}$$

Σ = superfície específica de agregados;

G = massa do material retido entre as peneiras 1" – 1/2";

P₂ = massa do material retido entre as peneiras 1/2" – N° 4;

S₃ = massa do material retido entre as peneiras N° 10 – N° 40;

S₂ = massa do material retido entre as peneiras N° 40 – N° 200;

F = massa do material passante na peneira N° 200.

Segundo Bernucci et al.(2006), o teor de asfalto residual (p) em relação à massa total dos agregados é calculado utilizando a expressão de Duriez:

$$p = k \times \Sigma \times 0,2$$

p = teor de asfalto residual;

k = módulo de riqueza.