



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAPEBA

**RUY BARBOSA LEMOS NETO**

**THALES ADRIANO SPURI**

***DOSAGEM DE PRÉ-MISTURADO A QUENTE  
COM INSERÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA  
COMO AGREGADO VIA MARSHALL  
CORRELACIONADO COM A COMPACTAÇÃO  
SUPERPAVE***

OURO BRANCO

JULHO DE 2016

**RUY BARBOSA LEMOS NETO**

**THALES ADRIANO SPURI**

***DOSAGEM DE PRÉ-MISTURADO A QUENTE  
COM INSERÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA  
COMO AGREGADO VIA SUPERPAVE***

Trabalho de conclusão de apresentado à coordenação em Engenharia Civil – Ênfase em Estruturas Metálicas, da Universidade Federal de São João Del – Rei, Cappus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil

**Orientador:** Me. Paulo Roberto Borges

**Coorientador:** Me. Tales Moreira de Oliveira

**OURO BRANCO**

**JULHO DE 2016**

---

## **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. Paulo Roberto Borges  
Orientador

---

Prof. Dr. Erivelto Luís de Souza  
Membro da Banca

---

Prof. Dr. Leandro Neves Duarte  
Membro da Banca



**Universidade Federal de São João Del-Rei**

Dosagem de Pré-Misturado a Quente com Inserção da Escória Aciaria como Agregado via *Marshall* Correlacionado com a Compactação Via *Superpave*

*Ruy Barbosa Lemos Neto*

*Thales Adriano Spuri*

---

## **DEDICATÓRIA**

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

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.

Aos professores orientadores, Paulo Roberto Borges, Tales Moreira de Oliveira e Leandro Neves Duarte, a quem agradecemos pela paciência e pelo conhecimento compartilhado.

Ao Giovani Levi Sant'Anna e a todos os membros do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa que forneceram todo o suporte para realização deste trabalho.

## RESUMO

Esse trabalho 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 quente via *Marshall* correlacionando com a compactação via *Superpave*. 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 quente, Escória de Aciaria, Agregado Siderúrgico, *Superpave*.

## **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 Hot Mix Asphalt by Marshall correlated to the compaction by Superpave. 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, Hot Mix Asphalt, Steel Slag, Steel aggregate, Superpave.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>13</b>
2.1. Objetivo Geral .....	13
2.2. Objetivos Específicos .....	13
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
3.1. Pavimentação .....	15
3.1.1. Tipos de pavimento .....	15
3.1.2. Camadas do pavimento flexível .....	16
3.1.3. Agregado para o pavimento .....	18
3.2. Mistura Asfáltica Usinada a Quente .....	18
3.3. Resíduos Sólidos .....	19
3.3.1. Escória de Aciaria na Pavimentação .....	20
<b>3.3.1.2. Beneficiamento</b> .....	<b>23</b>
3.4. Dosagem Superpave.....	27
3.5. Correlação .....	28
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1. Materiais .....	29
4.2. Métodos e Procedimentos .....	29
4.2.1. Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) .....	29
4.2.2. Caracterização da Escória de Aciaria.....	31
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>33</b>
5.1. Caracterização do cimento asfáltico de petróleo .....	33
5.2. Caracterização da Escória de Aciaria.....	34
<b>5.2.1. Granulometria</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2.2. Ensaio de massa específica aparente do agregado miúdo</b> .....	<b>36</b>
<b>5.2.3. Ensaio de massa específica aparente e absorção do agregado graúdo</b> .....	<b>37</b>
<b>5.2.4. Ensaio de determinação do índice de forma</b> .....	<b>38</b>
5.3. Caracterização da Mistura.....	39

---





## Universidade Federal de São João Del-Rei

Dosagem de Pré-Misturado a Quente com Inserção da Escória Aciaria como Agregado via *Marshall* Correlacionado com a Compactação Via *Superpave*  
*Ruy Barbosa Lemos Neto*  
*Thales Adriano Spuri*

---

<b>5.3.1. Ensaio Marshall</b> .....	<b>39</b>
<b>5.3.2. Correlação</b> .....	<b>42</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>45</b>
<b>APÊNDICE A – TABELAS OBTIDAS PELO ENSAIO DE MARSHALL</b> .....	<b>49</b>
<b>APÊNDICE B – CURVAS DO TEOR DE CAP ÓTIMO PARA CADA DADO</b> .....	<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Estruturas dos Pavimentos.....	16
<b>Figura 2</b> Camadas do Pavimento Flexível .....	17
<b>Figura 3</b> Fluxo Simplificado de Produção .....	21
<b>Figura 4</b> Produção da Escória de Alto Forno e da Escória de Aciaria .....	22
<b>Figura 5</b> Produtos e Subprodutos Gerados na Fabricação Aço.....	23
<b>Figura 6</b> Fluxo do processo de beneficiamento da escória de aciaria .....	24
<b>Figura 7</b> Curva Granulométrica do Agregado da Mistura.....	35
<b>Figura 8</b> Peneiramento dos Agregados .....	36
<b>Figura 9</b> Aparelhos e Mistura .....	41
<b>Figura 10</b> Relação volume de vazios x número de giros .....	42
<b>Figura 11</b> Gráfico Vazios no Agregado x Teor de CAP.....	54
<b>Figura 12</b> Relação de Betume – Vazios x Teor de CAP .....	55
<b>Figura 13</b> Volumes de Vazios x Teor de CAP.....	55
<b>Figura 14</b> Massa Específica Aparente x Teor de CAP .....	56
<b>Figura 15</b> Estabilidade x Teor de CAP.....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Propriedades físicas da escória de aciaria .....	26
<b>Tabela 2</b> Análise química das escórias de aciaria LD e EAF .....	26
<b>Tabela 3</b> Resultados dos ensaios de caracterização do ligante .....	33
<b>Tabela 4</b> Faixas Granulométricas para Pré-Misturados a quente .....	34
<b>Tabela 5</b> Massa Específica Aparente do Agregado Miúdo.....	37
<b>Tabela 6</b> Massa Específica e Absorção do Agregado Graúdo .....	38
<b>Tabela 7</b> Determinação do índice de forma. ....	39
<b>Tabela 8</b> Dados Médios dos Corpos de Prova .....	40
<b>Tabela 9</b> Teor Ótimo Encontrado .....	40
<b>Tabela 10</b> Valores encontrados para o Teor Ótimo do CAP .....	41
<b>Tabela 11</b> Resultados obtidos da correlação .....	43
<b>Tabela 12</b> Preparação dos Corpos de Prova .....	49
<b>Tabela 13</b> Alturas dos Corpos de Prova.....	50
<b>Tabela 14</b> Diâmetros dos Corpos de Prova .....	51
<b>Tabela 15</b> Massa Específica Aparente .....	52
<b>Tabela 16</b> Índices dos Corpos de Prova .....	53
<b>Tabela 17</b> Índices dos Corpos de Prova .....	53

## 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.

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.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar o estudo do comportamento da mistura asfáltica utilizando como material alternativo a escória de aciaria, correlacionando a compactação *Marshall* com a compactação via *Superpave*.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Verificar a viabilidade técnica dos resíduos siderúrgicos adicionados como agregados no revestimento do tipo de misturas asfálticas Pré Usinadas a Quente (PMQ) via *Marshall*;
- Correlacionar a compactação de mistura asfáltica *Marshall* com a compactação via *Superpave* utilizando como agregado, escória de aciaria.

### **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).

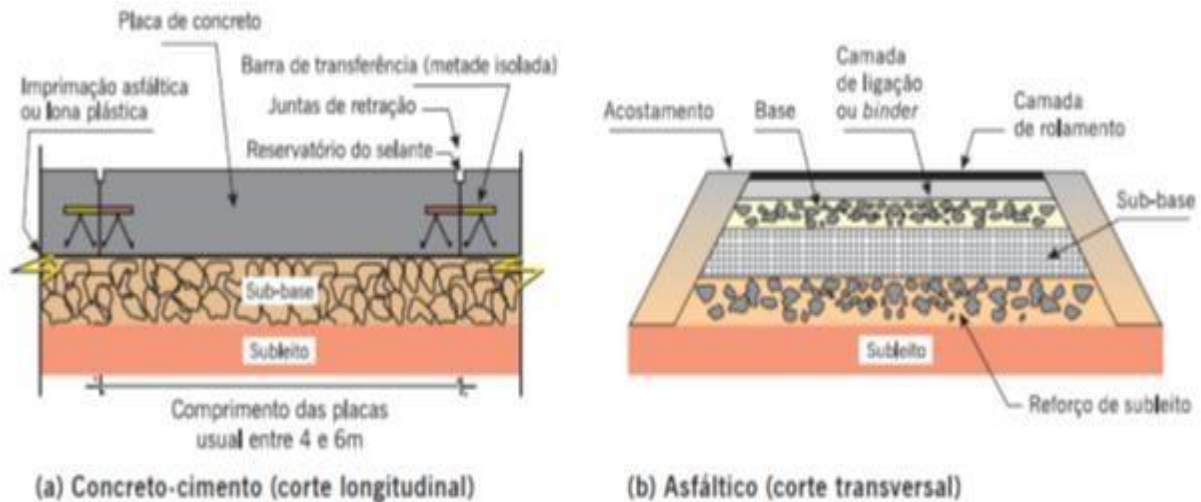
### **3.1. Pavimentação**

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 1). 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 1** - Estruturas dos Pavimentos.  
*Fonte Bernucci et al, 2006*

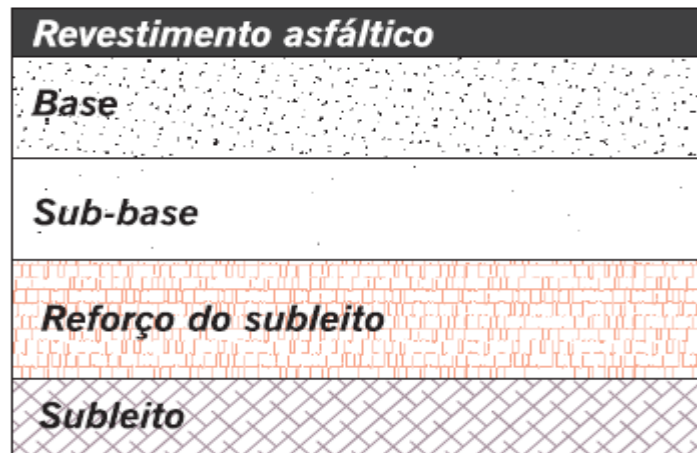
### 3.1.2. Camadas do pavimento flexível

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 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 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 Quente**

Segundo o DNIT (2006), quando os agregados e ligantes são misturados e espalhados na pista ainda quentes, denomina-o de revestimento Pré-Misturados a Quente.

O pré-misturado a quente é a combinação dos agregados aquecidos a uma temperatura relativamente alta e misturados com asfalto à quente acima de 100°C, o a mistura ainda tem a vantagem de que logo depois de compactada e fria, esta já pode ser submetida imediatamente ao tráfego.

As misturas asfálticas a quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e fíler (material de enchimento).

“O Concreto asfáltico de graduação densa possui curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar uma composição com poucos vazios. Os concretos asfálticos densos são as misturas asfálticas usinadas a quente mais utilizadas como revestimentos asfálticos de pavimentos no Brasil. Suas propriedades, no entanto, são muito sensíveis à variação do teor de ligante asfáltico. Em excesso ou em falta, o ligante pode gerar problemas de deformação permanente e de perda de resistência, levando à formação de trincas.” (BERNUCCI et al., 2006).

### **3.3. Resíduos Sólidos**

Segundo a ABNT NBR 10004:2004, 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 ABNT NBR 10004:2004, 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 10007:2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006:2004, não tiverem nenhum

---

de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

### **3.3.1. Escória de Aciaria na Pavimentação**

#### **3.3.1.1. 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 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).

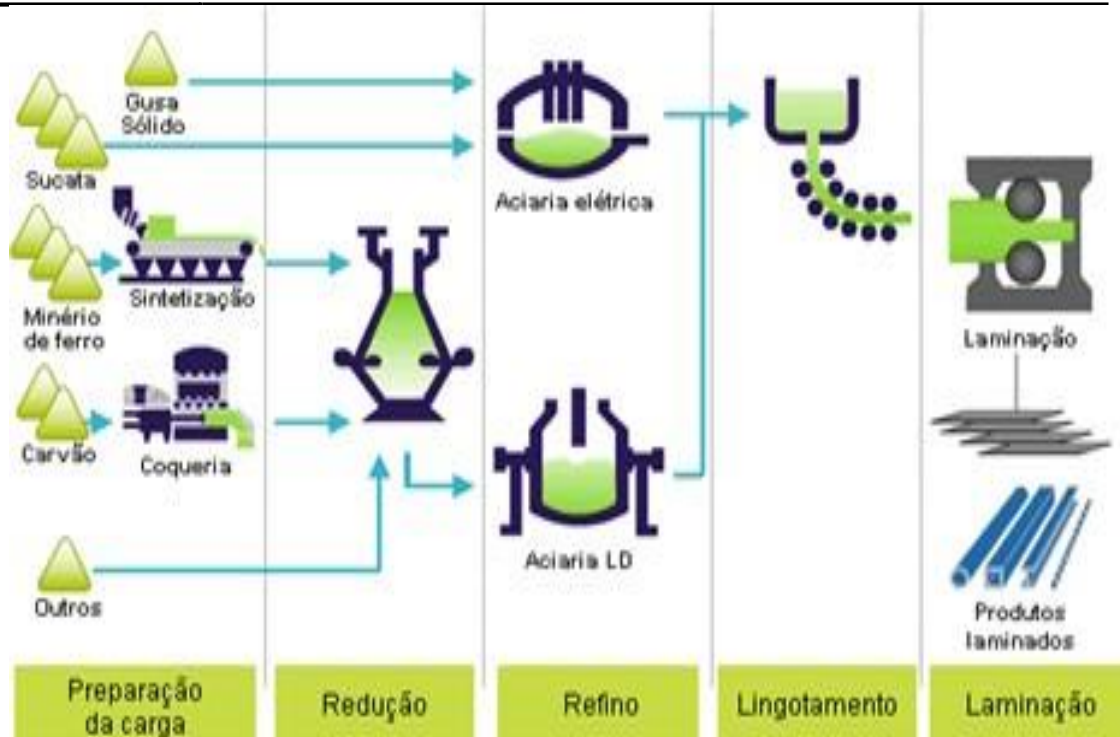


Figura 3 Fluxo Simplificado de Produção  
Fonte: Instituto Aço Brasil, 2015.

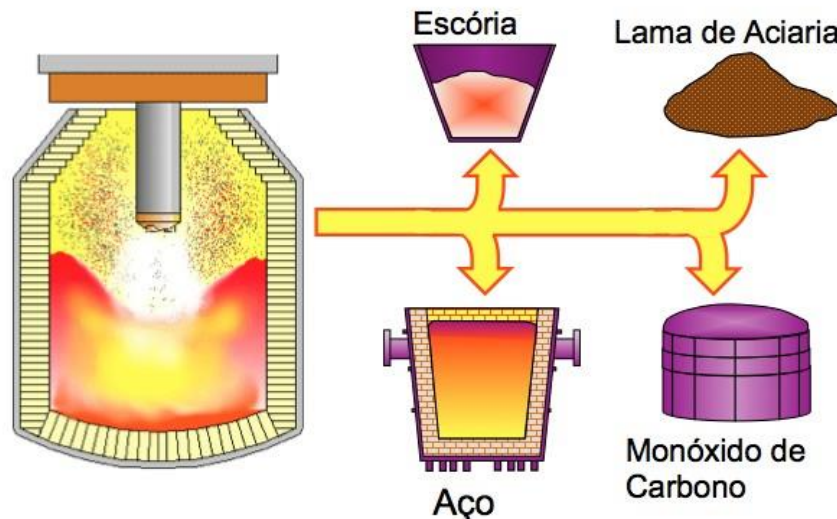
Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidas em larga escala:

- 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<sub>2</sub>), 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 (Linz Donawitz), forno capaz diminuir os teores de Carbono e impurezas presentes no ferro gusa, produz o aço e a escória de aciaria. A figura 4 e figura 5, mostram, respectivamente, um fluxograma da produção da escória de alto forno e da escória de aciaria.



**Figura 4** Produção da Escória de Alto Forno e da Escória de Aciaria  
*Fonte: THOMAZ, 2012.*



**Figura 5** Produtos e Subprodutos Gerados na Fabricação Aço.  
*Fonte: SOUZA, E.L. (2006).*

### 3.3.1.2. Beneficiamento

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 último 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 6 exemplifica o processo de beneficiamento da escória de aciaria através de um fluxograma.





**Figura 6** Fluxo do processo de beneficiamento da escória de aciaria  
*Fonte: RAMOS, 2008.*

### 3.3.1.3. Propriedades

“De acordo com o tipo de aciaria (LD), 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 2. E para as propriedades físicas da escória de aciaria, os resultados de ALVES, 2006(about MANCIO, 2001), tabela 1.

**Tabela 1** Propriedades físicas da escória de aciaria

Propriedades	Valores Típicos
Massa específica	3,2 - 3,6 (g/cm <sup>3</sup> )
Massa unitária	1,3 - 1,9 (g/cm <sup>3</sup> )
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 2** Análise química das escórias de aciaria LD e EAF

Compostos/elemento determinados		Técnica	Resultados em massa	
			LD	EAF
Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	complexometria	10,03	16,47
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	complexometria	1,19	5,76
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>3</sub>	complexometria	0,19	0,34
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	complexometria	0,01	0,06
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	complexometria	n.d.*	0,02
Anidrido fosfórico	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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

### 3.3.1.4. 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 aciaria;
- 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.

### **3.4. Dosagem Superpave**

A maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos Estados Unidos entre 1940 e 1990 foi dosada utilizando a metodologia Marshall ou Hveem (Roberts et al., 1996).

Desde 1993, porém, as universidades e departamentos de transporte norte-americanos vêm utilizando a metodologia Superpave, ainda em fase de testes no Brasil. Na pesquisa SHRP várias mudanças foram realizadas. Foi proposta uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis.

A maior diferença entre este novo procedimento e o Marshall é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros).

“O primeiro passo do procedimento Superpave consiste na escolha de três composições granulométricas com os materiais à disposição. O passo seguinte é a compactação de corpos-de-prova (CGS) com um teor de tentativa para cada mistura (dois corpos-de prova por mistura), obtido por meio de estimativas usando-se a massa específica efetiva” (BERNUCCI et al., 2006, p. 229).

### **3.5. Correlação**

Para este trabalho utilizou-se a dosagem e o volume de vazios obtidos na metodologia Marshall para correlacionar a equivalência entre a quantidade de golpes da metodologia Marshall e o número de giros obtido na compactação via *Superpave* com a finalidade de obter os mesmos parâmetros nos dois métodos de compactação.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Materiais**

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios pertencem ao laboratório de Geotecnia e Estradas da UFSJ – Campus Alto Paraopeba e ao Laboratório de Asfalto da Universidade Federal de Viçosa. Dentre os materiais empregados, a escória de aciaria e o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) asfáltica pertencentes ao laboratório.

### **4.2. Métodos e Procedimentos**

Adiante, serão apresentados todos os métodos utilizados para a caracterização do CAP, assim como a caracterização da escória de aciaria. Após essas determinações, foi realizado o ensaio Marshall seguido do ensaio Superpave para a obtenção dos parâmetros necessários para definir a viabilidade do agregado siderúrgico na pavimentação.

#### **4.2.1. Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

##### **4.2.1.1. Ensaio de determinação da penetração**

Este ensaio tem por objetivo determinar a penetração de materiais asfáltico sólidos e semi-sólidos através dos procedimentos detalhados pela norma DNIT 155/2010- ME Material Asfáltico – Determinação da Penetração – Método de ensaio.

---

#### **4.2.1.2. Densidade e massa específica pelo uso de picnômetro**

Para a obtenção da densidade do Cimento Asfáltico de Petróleo, 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 determinação da viscosidade Saybolt Furol**

Este ensaio tem por objetivo determinar a viscosidade Saybolt-Furol de materiais betuminosos através dos procedimentos detalhados pela norma DNER ME- 004/94- Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada.

#### **4.2.1.4. Ensaio de determinação do ponto de amolecimento**

Este ensaio tem por objetivo determinar a evolução da consistência com o aumento da temperatura de acordo com a norma DNIT 131/2010 – ME Materiais Asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola – Método de ensaio.

#### **4.2.1.5. Ensaio de determinação dos pontos de fulgor e de combustão**

Este ensaio tem por objetivo determinar o ponto de fulgor e de combustão dos derivados de petróleo presentes nos materiais betuminosos de acordo com a norma DNER – ME 148/94 – Material Betuminoso - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland).

## **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 aparente 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 aparente 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.

### **4.2.2.4. Ensaio de índice de forma**

Para a determinação do índice de forma serão realizados os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 7809 (2005). Agregados graúdos – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio.

### **4.2.2.5. Ensaio de determinação da abrasão**

Para a determinação da abrasão do agregado serão realizados os procedimentos descritos na norma DNER – ME – 035/98 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”.

---

#### **4.2.2.6. Ensaio de determinação da resistência ao esmagamento**

Para a determinação da resistência ao esmagamento serão realizados os procedimentos descritos na norma DNER – ME 197/97 – Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos.

#### **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 043/95 - Mistura betuminosa a quente - ensaio Marshall.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Caracterização do cimento asfáltico de petróleo

Todos os ensaios de caracterização do CAP, citados acima, foram realizados no laboratório de asfalto da Universidade Federal de Viçosa (UFV), portanto neste trabalho serão apenas citados os resultados conforme a tabela 3.

**Tabela 3** Resultados dos ensaios de caracterização do ligante

Material	Ensaio	Norma	Resultado
Ligante asfáltico CAP 50/70	Penetração	NBR 06576/1998 - ME 155 (DNIT, 2010a)	56,93
	Viscosidade Saybolt-Furol	NBR 14950/2003 -ME 004(DNER,1994)	Primeiro ensaio: 170 segundos e 34 milésimos
			Segundo ensaio: 133 segundos e 57 milésimos
	Ponto de amolecimento	NBR 06560/2008 - ME 131 (DNIT,2010b)	51 °C
	Ponto de fulgor	ME 148 (DNER,1994d)	343 °C
	Ponto de combustão	ME 148 (DNER,1994d)	365 °C
	Massa específica	ME 193 (DNER,1996a)	1,01 g/cm <sup>3</sup>
	Densidade relativa	ME 193 (DNER,1996a)	1,006 g/cm <sup>3</sup>

*Fonte: Autores*

Com os resultados dos ensaios obtidos da tabela acima, e, consultando as exigências necessárias a caracterização do ligante na ET – DE – P00/026, observa-se que o ligante adotado se enquadra na ET.

## 5.2. Caracterização da Escória de Aciaria

### 5.2.1. Granulometria

Para o dimensionamento da granulometria foi usado à especificação técnica DER/SP ET-DE-POO/026. Para o estudo será adotado a classe III (objetivo desse trabalho) pré-misturado quente, em destaque na tabela 4.

Segundo a ET-DE-POO/026, Pré-misturado a quente, PMQ, é uma mistura executada a quente em usina apropriada composta de agregado graduado, cimento asfáltico e, se necessário, melhorador de adesividade, espalhada e compactada a quente, com volume de vazios maior do que 12%. O pré-misturado a quente pode ser empregado como camada de regularização, de ligação, *binder* ou base.

**Tabela 4** Faixas Granulométricas para Pré-Misturados a quente

Peneira de Malha Quadrada		Designação				Tolerâncias
ASTM	mm	% em Massa, Passando				
		I	II	III	IV	
1½"	37,5	100				
1"	25,0	95 - 100	100		100	± 7%
¾"	19,0	-	-	100	95-100	± 7%
½"	12,5	25 - 60	45 - 75	65 - 95	-	± 7%
3/8"	9,5	-	-	-	45 - 70	± 7%
Nº 4	4,75	0 - 10	5 - 30	5 - 35	20 - 40	± 5%
Nº 10	2,0	0 - 4	0 - 6	0 - 10	10 - 25	± 5%
Nº 200	0,075	0 - 2	0 - 2	0 - 2	0 - 8	± 2%

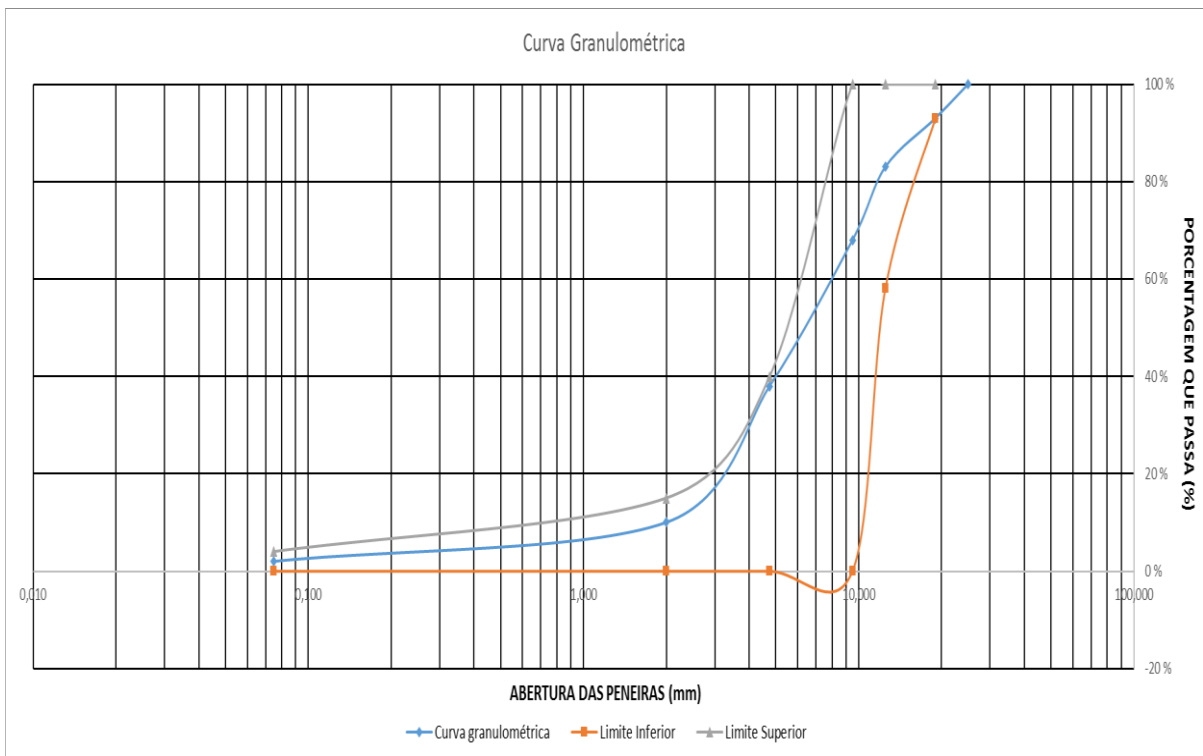
Fonte: DER/SP ET-DE-P00/026

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 7. A figura 8 mostra o peneirador mecânico utilizado nesse ensaio.

**Tabela 5.5 - Granulometria da Amostra de Agregados**

Peneira de malha quadrada		Massa (g)	% retida	% passando
ASTM	mm			
1"	25,0	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	4200,00	7,00	93,00
1/2"	12,5	6000,00	10,00	83,00
3/8"	9,5	9000,00	15,00	68,00
Nº 4	4,75	18000,00	30,00	38,00
Nº 10	2,0	16800,00	28,00	10,00
Nº 200	0,0075	4800,00	8,00	2,00
<b>MASSA TOTAL (g)</b>		<b>60000</b>		

Fonte: Autores.



**Figura 7 Curva Granulométrica do Agregado da Mistura**  
 Fonte: Autores.



**Figura 8** Peneiramento dos Agregados  
*Fonte: Autores.*

### **5.2.2. Ensaio de massa específica aparente 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 aparente do agregado miúdo é obtida através da leitura fornecida pelo frasco Chapman sendo que o volume em m<sup>3</sup> 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.

**Tabela 5** Massa Específica Aparente do Agregado Miúdo

Agregado Miúdo	Massa do Aregado (g)	Volume de água deslocado (cm <sup>3</sup> )	Volume de água no frasco (cm <sup>3</sup> )	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Amostra 1</b>	600,06	382	200	3,30
<b>Amostra 2</b>	600,04	383	200	3,28
<b>Amostra 3</b>	600,08	382	200	3,30
<b>Massa Específica Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>				<b>3,29</b>

*Fonte: Autores.*

Através dos resultados das três amostras de massa específica aparente do agregado miúdo, obteve-se um valor médio de 3,29 g/cm<sup>3</sup>, se enquadrando dentro das exigências da ET.

### **5.2.3. Ensaio de massa específica aparente 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.

$$ms = \frac{A}{B-C} , a (\%) = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad \text{Eq.: 5.2}$$

ms: massa específica do agregado na condição seca, em g/cm<sup>3</sup>;

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

**Tabela 6** Massa Específica e Absorção do Agregado Graúdo

<b>Agregado Graúdo</b>	<b>Massa seca (g)</b>	<b>Massa úmida (g)</b>	<b>Massa Hidrostática (g)</b>	<b>Massa específica</b>
<b>Amostra 1</b>	3973,6	4054,27	2857,42	3,32
<b>Amostra 2</b>	3972,8	4059,41	2850,35	3,29
<b>Amostra 3</b>	3978,6	4058,03	2862,19	3,23
<b>Massa específica do agregado graúdo (g/cm<sup>3</sup>)</b>				3,31
<b>Absorção (%)</b>				2,07

*Fonte: Autores.*

Através dos resultados das três amostras de massa específica aparente do agregado graúdo e absorção, obteve-se um valor médio de 3,31 g/cm<sup>3</sup> para massa específica do agregado graúdo e 2,07% de absorção, se enquadrando dentro das exigências da ET.

#### **5.2.4. Ensaio de determinação do índice de forma**

A forma do agregado pode influenciar na resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e modificar a energia de compactação aplicada para se alcançar uma determinada densidade de compactação.

Tal característica pode ser obtida medindo-se os grãos de uma determinada faixa granulométrica utilizando o paquímetro, o índice de forma se dá pela relação entre comprimento (C) e espessura (e).

Para determinação do índice de forma foram seguidas as etapas estabelecidas pela ABNT NBR 7809:2005, obtendo os seguintes resultados conforme a tabela 7 abaixo:

**Tabela 7** Determinação do índice de forma.

Número de grãos	$\Sigma$ comprimento (mm)	$\Sigma$ espessura (mm)	Índice de forma
63	1627,34	942,61	1,80

*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, com CAP

Foram confeccionados 15 corpos de provas; 3 corpos para cada um dos teores estudados. Todos os procedimentos realizados seguiram, rigorosamente, a norma DNER – ME 043/95.



A tabela 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 8** Dados Médios dos Corpos de Prova

Traço	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade Máxima Teórica (d)	Vazios (%)	Vazios no Agregado Mineral (%)	Relação Betume -Vazios (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
1	2,887	3,032	4,78	15,92	70,17	367,6	4,08
2	2,903	3,001	3,25	14,46	77,62	442,6	3,90
3	2,882	2,970	2,98	14,11	78,90	412,5	4,50
4	2,846	2,940	3,20	14,19	77,60	600,9	5,84
5	2,790	2,911	4,16	14,93	72,20	517,3	5,06

*Fonte: Autores.*

Para a obtenção do teor ótimo de ligante para a mistura em análise, foi feita uma média entre três parâmetros definidos como mostra a tabela 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 10 mostra os valores coletados para cada característica da mistura e no apêndice B encontram-se as curvas.

**Tabela 9** Teor Ótimo Encontrado

Característica	Parâmetro	Valor de Teor de Ligante Encontrado no Gráfico (%)
Vazios (%)	4%	4,12
Estabilidade (Kgf)	Valor máximo	5,4
Relação betume com vazios (%)	78,5%	4,52
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Valor máximo	4,4
<b>Teor ótimo encontrado (%)</b>		<b>4,61</b>

*Fonte: Autores.*



**Tabela 10** Valores encontrados para o Teor Ótimo do CAP

Teor Ótimo (%)	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Vazios (%)	Vazios no Agregado Mineral (%)	Relação Betume - Vazios (%)	Estabilidade (Kgf)	D.M.T (mm)
4,61	2,89	2,99	14,1	78,5	499,00	2,99

Fonte: Autores.

A figura 9 mostra fotos de alguns passos na realização do ensaio.



**Figura 9** Aparelhos e Mistura  
Fonte: Autores.

### 5.3.2. Correlação

Após a compactação de um corpo de prova via Superpave estipulada em 160 giros, gerou-se um gráfico que relaciona número de giros e volume de vazios. Entrando com o valor de volume de vazios obtido através da metodologia Marshall no gráfico gerado pelos 160 giros, obteve-se a correlação entre número de giros via Superpave e os 75 golpes da compactação via Marshall. Correlação esta expressada através da figura 10 abaixo.

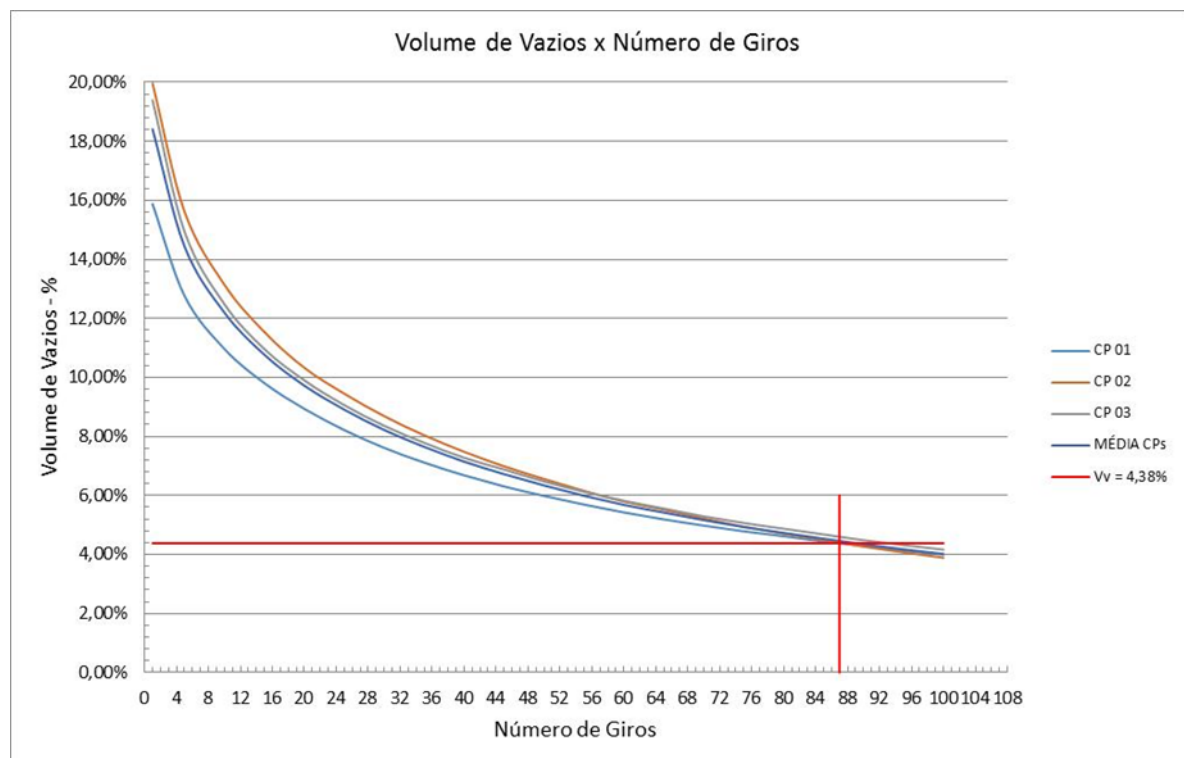


Figura 10 Relação volume de vazios x número de giros  
Fonte: Autores.

A partir do gráfico volume de vazios x número de giros e com o valor de 4,38% de volume de vazios encontrado via Marshall, obteve-se que o valor de 87 giros no CGS (Compactador Giratório Superpave) se relaciona aos 75 golpes da metodologia de compactação Marshall.

Depois desta etapa foram compactados mais 6 corpos de prova com 87 giros, e, desses corpos de prova, 3 submetidos ao ensaio de estabilidade Marshall e 3 submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT). A tabela 11 a seguir compara os valores obtidos com os corpos de prova compactados no CMM (Compactador Mecânico Marshall) e os compactados no CGS.

**Tabela 11** Resultados obtidos da correlação

<b>Faixa III – 4,6% Ligante</b>		
	<b>Compactador Mecânico Marshall</b>	<b>Compactador Superpave (CGS)</b>
<b>Número golpes / giros (nº)</b>	75	87
<b>Estabilidade (Kgf)</b>	271	189
<b>RT (MPa)</b>	0,62	0,54

*Fonte: Autores.*

## 6. CONCLUSÕES

O estudo referente a correlação das compactações via Marshall e via Superpave mostrou-se satisfatório, pois os valores de estabilidade e tração a compressão diametral se aproximaram, podendo assim concluir que os 87 giros do CGS correspondem aos 75 golpes do CMM de forma equivalente.

Em relação ao comportamento da escória de aciaria na mistura asfáltica, notou-se que nos dois métodos analisados os resultados mecânicos não foram aceitáveis pois esses apresentaram valores inferiores ao estabelecido por norma. Tal insucesso pode ter ocorrido pelo déficit de estudo da interação química entre a escória e o ligante asfáltico utilizado, ou, pela falta de agregados finos na composição da mistura asfáltica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 7809 (2005): Agregados graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2005;
- 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<sup>o</sup> 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/SP - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **ET-DE-P00/026** – Pavimentação: Pré-Misturado A Quente. 34p., 2006;
- 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 043/95** – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. 1995
- 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 035/98** Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998;
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 197/97** Agregados – determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Rio de Janeiro, 1997;
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 148/94** Material Betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e de combustão. Rio de Janeiro, 1994;
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3<sup>o</sup> Edição. Rio de Janeiro, 2006, p. 99;
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA 155/2010 – ME** – Material asfático – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.
- DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA 131/2010 – ME** – Material asfático – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.
- 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.metlica.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 REFROTÁRIOS 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;



---

## APÊNDICE A – TABELAS OBTIDAS PELO ENSAIO DE MARSHALL

**Tabela 12** Preparação dos Corpos de Prova

Corpo de prova	Porcentagem de ligante (%)	Massa de Agregado (g)	Massa de ligante (g)
1		1204,40	48,9
2	3,9	1203,90	48,9
3		1205,70	48,9
4		1201,40	55,3
5	4,4	1205,10	55,5
6		1204,40	55,4
7		1201,50	61,9
8	4,9	1202,50	62,0
9		1203,00	62,0
10		1202,80	68,7
11	5,4	1202,70	68,7
12		1203,40	68,7
13		1202,80	75,4
14	5,9	1203,00	75,4
15		1203,80	75,5

*Fonte: Autores.*

**Tabela 13** Alturas dos Corpos de Prova

<b>Corpos de Prova</b>	<b>Altura 1 (mm)</b>	<b>Altura 2 (mm)</b>	<b>Altura 3 (mm)</b>	<b>Altura 4 (mm)</b>	<b>Altura Média (mm)</b>
1	63,40	63,40	63,20	63,05	63,26
2	63,90	64,10	63,70	63,80	63,88
3	63,29	63,26	62,87	62,97	63,10
4	63,30	63,35	63,50	63,00	63,29
5	62,87	63,09	63,56	63,08	63,15
6	61,90	61,50	61,55	61,95	61,73
7	63,03	62,37	62,49	62,45	62,59
8	62,35	62,70	62,45	62,40	62,48
9	64,62	64,41	64,35	64,48	64,47
10	64,35	64,10	64,00	64,30	64,19
11	64,02	64,63	64,60	64,62	64,47
12	61,65	61,70	61,85	61,95	61,79
13	63,84	64,78	64,82	64,64	64,52
14	64,05	63,85	64,00	63,75	63,91
15	64,76	64,66	64,57	64,75	64,69

*Fonte: Autores.*

**Tabela 14** Diâmetros dos Corpos de Prova

<b>Corpos de Prova</b>	<b>Diam. 1 (mm)</b>	<b>Diam 2 (mm)</b>	<b>Diam 3 (mm)</b>	<b>Diam 4 (mm)</b>	<b>Diam. Médio (mm)</b>
1	100,90	101,75	101,70	101,85	101,55
2	101,40	101,20	101,50	102,30	101,60
3	101,07	101,38	101,63	101,56	101,41
4	101,00	100,95	101,15	101,25	101,09
5	101,33	101,66	101,55	102,20	101,69
6	101,85	101,75	102,05	101,60	101,81
7	102,18	102,04	101,62	102,04	101,97
8	101,40	101,75	101,70	101,45	101,58
9	101,57	101,94	101,76	102,08	101,84
10	101,50	101,00	101,90	101,80	101,55
11	101,64	101,95	101,76	102,04	101,85
12	101,85	102,05	102,00	101,90	101,95
13	101,52	101,57	101,71	101,95	101,69
14	101,50	101,40	101,60	101,50	101,50
15	101,75	101,42	102,08	102,26	101,88

*Fonte: Autores.*

**Tabela 15** Massa Específica Aparente

C.P	Teor de Ligante (%)	Massa do C.P ao ar (g)	Massa C.P imerso (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )
1	3,9	1231,41	802,38	429,03	2,862
2		1230,84	804,63	426,21	2,879
3		1220,83	803,93	416,90	2,920
4	4,4	1228,54	803,86	424,68	2,884
5		1235,55	812,74	422,81	2,914
6		1232,94	810,71	422,23	2,912
7	4,9	1231,88	807,24	424,64	2,893
8		1232,08	805,68	426,40	2,881
9		1239,45	808,96	430,49	2,871
10	5,4	1242,72	805,56	437,16	2,834
11		1245,80	807,10	438,70	2,832
12		1239,42	809,12	430,30	2,872
13	5,9	1249,80	804,36	445,44	2,798
14		1247,23	798,17	449,06	2,769
15		1237,70	797,19	440,51	2,802

*Fonte: Autores.*

**Tabela 16 Índices dos Corpos de Prova**

C.P	Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade Máxima Teórica (d)	Volume de Vazios (%)	Vazios do Agregado Mineral (%)	Relação Betume Vazios (%)
1	2,862	3,032	5,61	16,66	66,34
2	2,879	3,032	5,03	16,15	68,87
3	2,920	3,032	3,70	14,97	75,31
4	2,884	3,001	3,87	15,01	74,21
5	2,914	3,001	2,90	14,15	79,53
6	2,912	3,001	2,97	14,21	79,12
7	2,893	2,970	2,61	13,78	81,07
8	2,881	2,970	2,99	14,12	78,80
9	2,871	2,970	3,34	14,43	76,84
10	2,834	2,940	3,59	14,54	75,30
11	2,832	2,940	3,69	14,62	74,76
12	2,872	2,940	2,31	13,40	82,74
13	2,798	2,911	3,88	14,69	73,56
14	2,769	2,911	4,85	15,55	68,78
15	2,802	2,911	3,75	14,57	74,27

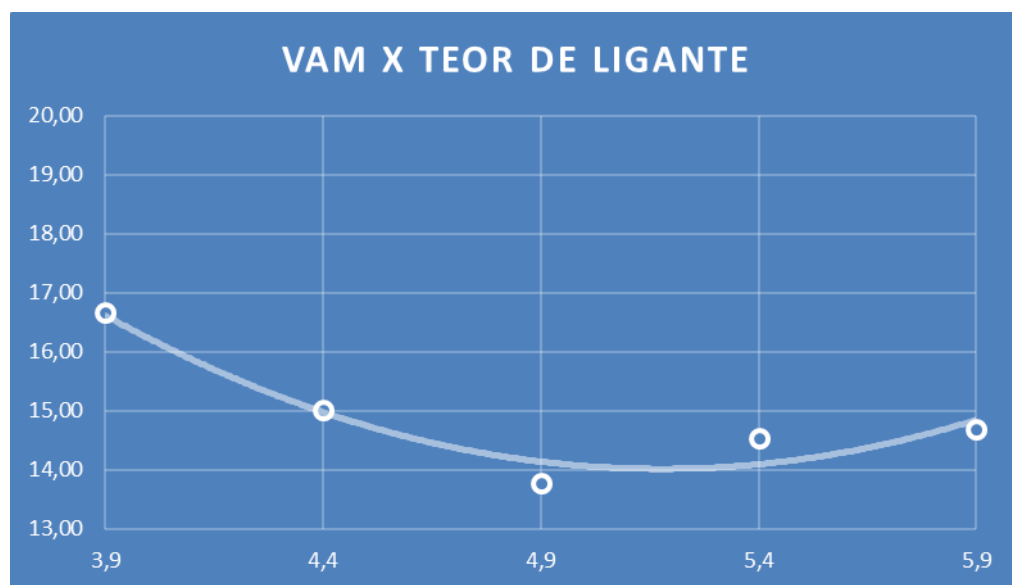
*Fonte: Autores.*
**Tabela 17 Índices dos Corpos de Prova**

C.P	Estabilidade (kgf)
1	379
2	379
3	316
4	452
5	436
6	383
7	471
8	405
9	317
10	589
11	557
12	609
13	488
14	549
15	511

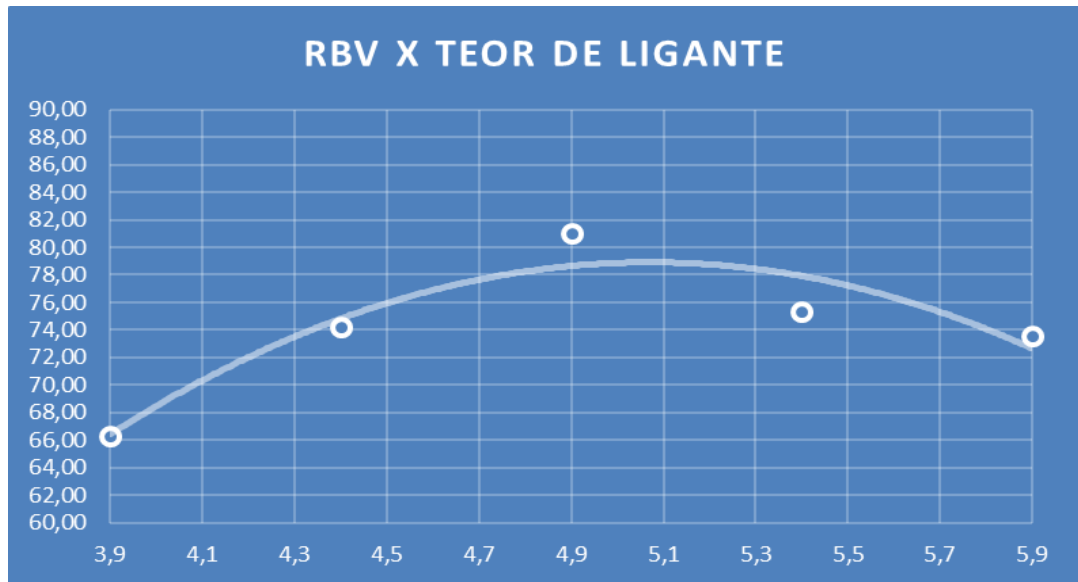
*Fonte: Autores.*

## APÊNDICE B – CURVAS DO TEOR DE CAP ÓTIMO PARA CADA DADO

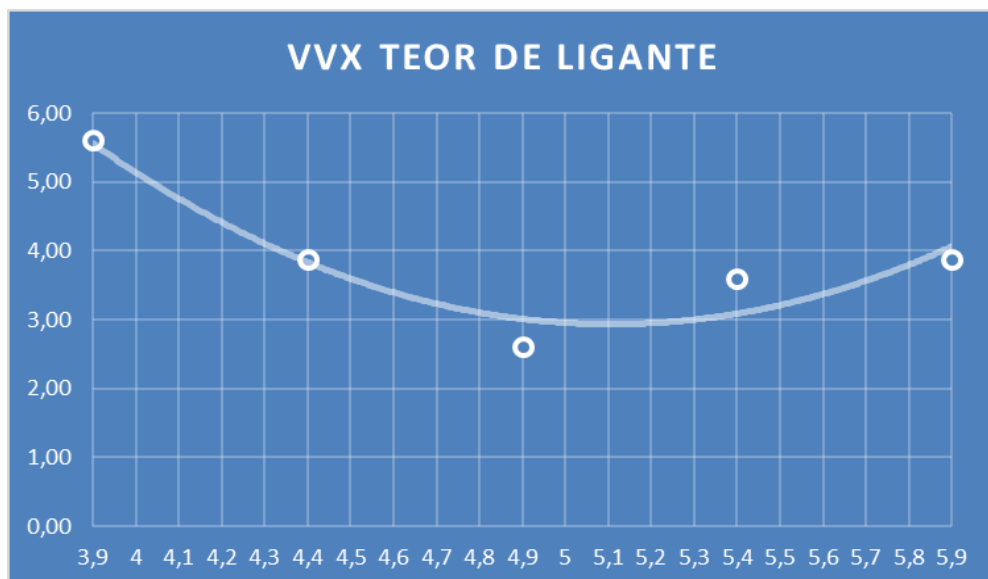
A linha preta pontilhada fornece o valor de cada dado para o teor ótimo de CAP.



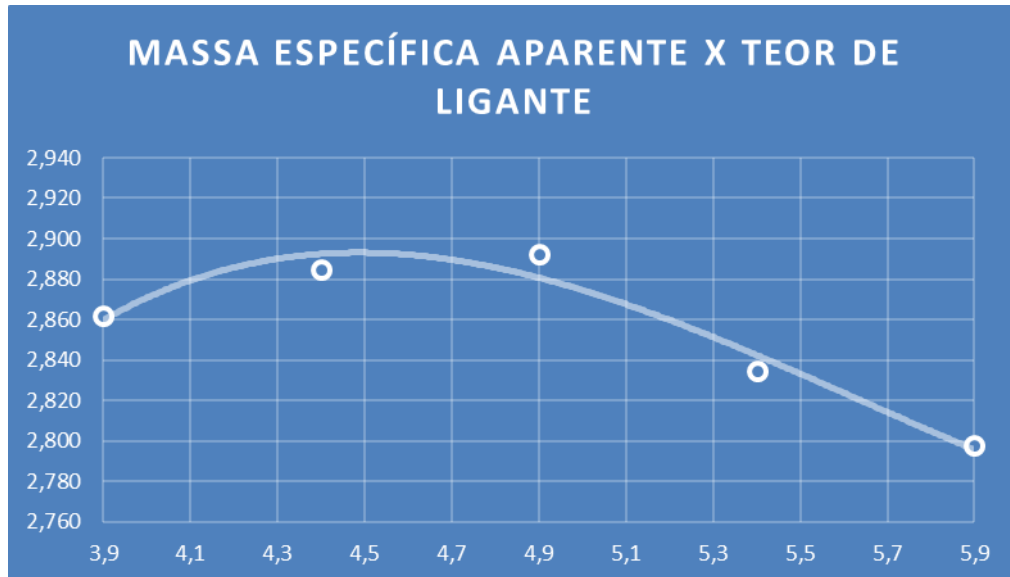
**Figura 11** Gráfico Vazios no Agregado x Teor de CAP  
*Fonte: Autores.*



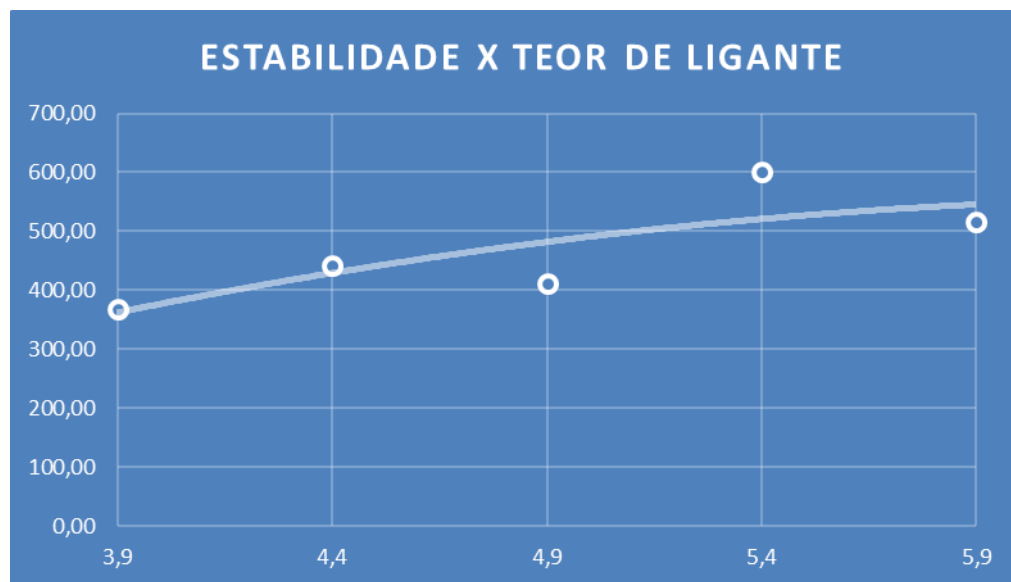
**Figura 12** Relação de Betume – Vazios x Teor de CAP  
*Fonte: Autores.*



**Figura 13** Volumes de Vazios x Teor de CAP  
*Fonte: Autores.*



**Figura 14** Massa Específica Aparente x Teor de CAP  
*Fonte: Autores.*



**Figura 15** Estabilidade x Teor de CAP  
*Fonte: Autores*