



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ESTER DE OLIVEIRA TERNERO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO BINÁRIO ASFALTO-SOLO NO PROCESSO DE  
IMPRIMAÇÃO

CAMPINAS

2017

ESTER DE OLIVEIRA TERNERO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO BINÁRIO ASFALTO-SOLO NO PROCESSO DE  
IMPRIMAÇÃO

Dissertação apresentada à Faculdade da  
Engenharia Química da Universidade  
Estadual de Campinas, como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do Título  
de Mestra em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Wagner dos Santos Oliveira

CAMPINAS

2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

T272c Ternero, Ester de Oliveira, 1991-  
Contribuição ao estudo do binário asfalto-solo no processo de imprimação /  
Ester de Oliveira Ternero. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Wagner dos Santos Oliveira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade  
de Engenharia Química.

1. Asfalto. 2. Solos. 3. Solventes. 4. Mistura de emulsão asfáltica. 5.  
Química de superfície. 6. Tensoativo. 7. Surfactantes. I. Oliveira, Wagner dos  
Santos, 1947-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Contribution to the study of the binary asphalt-soil for prime

**Palavras-chave em inglês:**

Asphalt

Alone

Solvents

Asphalt emulsion mixture

Surface chemistry

Tensiatory

Surfactants

**Área de concentração:** Ciência e Tecnologia de Materiais

**Titulação:** Mestra em Engenharia Química

**Banca examinadora:**

Wagner dos Santos Oliveira [Orientador]

Afonso Rodrigues de Aquino

Liliane Maria Ferrareso Lona

**Data de defesa:** 25-05-2017

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Química

Dissertação de mestrado defendida pela aluna Ester de Oliveira Ternero e aprovada em 25 de maio de 2017 pela banca examinadora constituída pelos professores:

---

Prof. Dr. Wagner dos Santos Oliveira

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Liliane Maria Ferrareso Lona

---

Prof. Dr. Afonso Rodrigues de Aquino

A ata de defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no processo de vida acadêmica do aluno

Dedico este trabalho à minha família,  
pela compreensão dos momentos ausentes  
e pela colaboração constante.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado forças e ter me ajudado...

Ao Prof. Dr. Wagner Oliveira, pela participação ativa e direta neste passo gigantesco a caminho do meu amadurecimento profissional. Sempre me apoiando, impulsionando, aconselhando e ensinando a conciliar os momentos de austeridade e ternura: fatores primordiais na realização de um trabalho científico. A ele, meu eterno agradecimento.

À Akzonobel, por oferecer seus estabelecimentos para os ensaios de imprimação e produção das emulsões asfálticas, também por todo auxílio financeiro durante o mestrado.

Aos meus supervisores Marcos e Douglas por me liberar para cursar as disciplinas e ceder o espaço para realização da minha pesquisa.

À Kelly Albino, da empresa Akzonobel, por me ajudar com a parte estatística do trabalho, por me incentivar e me apoiar.

Ao estagiário André que me auxiliou na realização dos experimentos.

Às minhas amigas Bruna e Tamaira por me apoiarem, incentivarem e por ajudarem a esclarecer minhas ideias.

Aos meus pais Andrea e Valdecir por terem acreditado em mim, me incentivado e dado forças para continuar quando não as tinha mais.

Ao meu grande amor Ettore pela paciência, compreensão e apoio nessa jornada e durante toda minha vida.

Aos meus irmãos Laís e João Vitor Ternero;

Aos meus avós Maria e João, aos meus tios Lidiane e Mizael;

A todas as pessoas que participaram, contribuindo para realização deste trabalho, direta ou indiretamente, meu agradecimento.

## RESUMO

TERNERO, Ester de Oliveira. *Contribuição ao estudo do binário asfalto-solo no processo de imprimação*. 2017. 93 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de materiais e bioprocessos, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2017.

PALAVRAS-CHAVE: emulsão de asfalto, asfalto, imprimação, solvente, solo.

## **ABSTRACT**

TERNERO, Ester de Oliveira. *Contribution to the study of the binary asphalt-soil in prime*. 2017. 93 p. Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de materiais e bioprocessos, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2017.

KEYWORDS: asphalt emulsion, asphalt, prime, soil, solvent.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática dos grupos componentes do asfalto.....	20
Figura 2 - Representação esquemática do modelo de micelas em asfalto .....	21
Figura 3 - Representação esquemática dos tipos de ligante asfáltico .....	22
Figura 4 - Sequência de reações de aromáticos policíclicos na oxidação do asfalto ....	23
Figura 5 - Representação esquemática de emulsões água/óleo .....	24
Figura 6 – Representação das formas de produção de emulsão asfáltica.....	26
Figura 7 - Fotografias da planta piloto usada para a emulsificação do asfalto.....	33
Figura 8 - Fotografia de um equipamento MICROTRAC modelo S 3500.....	344
Figura 9 - Fotografia de um equipamento Saybolt/Furol .....	35
Figura 10 - Esquema do conjunto de destilação de alumínio da ASTM D6997-04 .....	37
Figura 11 - Fotografia da prensa elétrica Marshall, molde e descompactador.....	39
Figura 12 - Fotografia do processo de compactação pela prensa Marshall.....	41
Figura 13 - Fotografia da aplicação da emulsão asfáltica no corpo-de-prova .....	42
Figura 14 - Fotografia do processo de compactação pelo compactador SBR .....	43
Figura 15 - Fotografia do processo do teste de imprimação no molde pelo SBR .....	43
Figura 16 - Comparação das curvas de compactação da amostra Peru/Lima quando aplicada energia de 12, 26 e 55 golpes.....	47
Figura 17 - Comparação das curvas de compactação da amostra Paulínia quando aplicada energia de 12, 26 e 55 golpes.....	47
Figura 18 - Comparação das curvas de compactação da amostra Paraná quando aplicada energia de 12, 26 e 55 golpes.....	48
Figura 19 - Comparação do tempo de penetração da imprimação feita em corpos-de-prova preparados na prensa Marshall e na SBR, utilizando amostra Paulínia.....	50
Figura 20 - Comparação da profundidade penetração da emulsão asfáltica feita em corpos-de-prova preparados na prensa Marshall e na SBR, utilizando amostra Paulínia .....	51
Figura 21 – Gráficos da avaliação estatística para comparação de desempenho entre prensa Marshall e SBR .....	52
Figura 22 - Diagrama dos testes de imprimação.....	53
Figura 23 - Resultados de profundidade de penetração da emulsão asfáltica em diferentes tipos de solo .....	55

Figura 24 - Resultados de tempo para penetração da emulsão asfáltica em diferentes tipos de solo .....	566
Figura 25 - Fotografias das amostras feitas de imprimação feitas em diferentes tipos de solo.....	56
Figura 26: Representação esquemática das estruturas do grãos do solo.....	57
Figura 27 - Micrografia do solo Paulínia (ampliação 250x) .....	57
Figura 28 - Representação esquemática da estrutura de solo tipo granular .....	58
Figura 29 – Micrografia do solo Paraná (ampliação 250x) .....	58
Figura 30 - Representação esquemática de estrutura de grão do tipo laminar .....	59
Figura 31 – Micrografia do solo Peru (ampliação 250x) .....	59
Figura 32 - Mecanismos físicos de mistura mecânica em escala microscópica.....	6060
Figura 33 - Resultados da profundidade de penetração da emulsão asfáltica com diferentes tipos de solvente.....	61
Figura 34 - Resultados de tempo de penetração da emulsão asfáltica com diferentes tipos de solvente .....	61
Figura 35 - Fotografias dos corpos-de-prova feitos com o solo Peru e emulsões preparada com diferentes tipos de solvente.....	62
Figura 36 - Micrografia da amostra formulada com óleo vegetal (ampliação 250x) .....	62
Figura 37 - Micrografia da amostra preparada com óleo lubrificante rerrefinado (ampliação 250x).....	63
Figura 38 - Resultados de profundidade de penetração da emulsão asfáltica em solos com diferentes teores de umidade .....	64
Figura 39 - Resultados de tempo necessário para penetração da emulsão asfáltica em solos com diferentes teores de umidade.....	65
Figura 40: Fotografias dos corpos-de-prova feitos com solo Peru e diferentes teores de umidade .....	65
Figura 41 – Micrografia do solo com baixo teor de umidade (ampliação 100x) .....	66
Figura 42 – Micrografia do solo com teor de umidade ideal (ampliação 100x) .....	67
Figura 43 – Micrografia do solo com alto teor de umidade (ampliação 100x) .....	67
Figura 44 - Resultados de profundidade de penetração da emulsão asfáltica em solos sob diferentes pressões de compactação .....	68
Figura 45 - Resultados de tempo necessário para penetração da emulsão asfáltica em solos sob diferentes pressões de compactação.....	68

Figura 46 - Fotografias dos corpos-de-prova feitos com o solo Peru sob diferentes pressões de compactação .....	69
Figura 47 - Micrografia do solo compactado à 2,5bar (ampliação 250x).....	69
Figura 48 - Micrografia do solo compactado à 4,0bar (ampliação 250x).....	70
Figura 49 - Resultados de profundidade de penetração de emulsão asfáltica preparada com diferentes surfactantes .....	71
Figura 50 - Resultados do tempo necessário para penetração de emulsão asfáltica preparada com diferentes surfactantes .....	72
Figura 51 - Fotografias dos corpos-de-prova variando o surfactante .....	72
Figura 52 – Micrografia do corpo-de-prova com emulsão asfáltica à base de Redicote® E-11 (ampliação 250x) .....	73
Figura 53 – Micrografia do corpo-de-prova com emulsão asfáltica à base de Redicote® E-7000 (ampliação 250x) .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição elementar de asfaltos da Califórnia, Boscan e México .....	199
Tabela 2 – Características das emulsões asfálticas para imprimação (EAI) .....	30
Tabela 3 - Descrição das formulações de emulsão asfáltica .....	32
Tabela 4 - Esquema dos testes de imprimação classificados por números .....	54
Tabela 5 - Tamanho de partícula das emulsões asfálticas .....	63
Tabela 6 – Resultados da análise química dos solos em espectrômetro de fluorescência de raios-X.....	75
Tabela 7. Descrição das formulações de emulsão asfáltica.....	87
Tabela 8. Análise química do solo através do espectrômetro de fluorescência de raios-X.....	88
Tabela 9 - Resultados do teste de imprimação para corpo-de-prova preparado no compactador SBR. ....	88
Tabela 10. Resultados do teste de imprimação para corpo-de-prova preparado no compactador Marshall. ....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ABNT** — Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ASTM** — *American Society for Testing and Material*

**CAP** — Cimento Asfáltico de Petróleo

**DNER** — Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

**DNIT** — Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

**DER/PR** — Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná

**ISSA** — *International Slurry Surfacing Association*

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
2	OBJETIVOS .....	18
3	REVISÃO DA LITERATURA .....	18
3.1	Asfalto.....	18
3.2	Emulsões asfálticas.....	24
3.3	Preparação de emulsões asfálticas .....	26
3.4	Imprimação.....	27
3.4.1	Propriedades.....	27
3.4.2	Penetração .....	28
3.4.3	Materiais usados na imprimação.....	28
3.4.4	Materiais alternativos para a imprimação .....	29
3.4.5	Especificação - Emulsão Asfáltica para Imprimação .....	29
3.5	Solo .....	30
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1	Ensaio na emulsão asfáltica.....	32
4.1.1	Fabricação da emulsão de asfalto .....	33
4.1.2	Determinação do pH.....	34
4.1.2	Análise da distribuição de tamanhos das partículas .....	35
4.1.2	Análise da viscosidade da emulsão asfáltica.....	36
4.1.3	Método para determinação da porcentagem de partículas grandes em emulsões asfálticas.....	35
4.1.2	Métodos para separação do resíduo na emulsão asfáltica .....	36
4.2	Ensaio no solo .....	38
4.2.1	Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas .....	38
4.3	Ensaio de imprimação .....	41
4.4	Compactação da amostra no Marshall e teste de penetração .....	41
4.5	Compactação da Amostra no Compactador SBR e Teste de Penetração.....	42
4.6	Análise fotográfica no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) .....	44
4.7	Fluorescência por Raio-X.....	44

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5.1	Emulsões asfálticas.....	45
5.1.1	Determinação do resíduo, peneira e tamanho de partícula .....	45
5.2	Solo .....	46
5.2.1	Determinação da umidade ideal do solo .....	46
5.3	Comparação dos métodos de compactação SBR x Marshall.....	49
5.3.1	Avaliação Estatística .....	52
5.4	Avaliação da imprimação – penetração .....	53
5.4.1	Influência da variação do solo.....	55
5.4.2	Influência da variação do solvente .....	60
5.4.3	Influência da variação da umidade.....	64
5.4.4	Influência da variação da pressão de compactação .....	68
5.4.5	Influência da variação do surfactante.....	71
5.5	Análise química dos solos – Fluorescência por raio-x.....	75
6	CONCLUSÃO .....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
	APÊNDICE A – Cálculo de massa específica aparente do solo Peru/Lima .....	82
	APÊNDICE B – Cálculo de umidade do solo Peru/Lima .....	83
	APÊNDICE C – Cálculo de massa específica do solo São Paulo/Paulínia.....	84
	APÊNDICE D – Cálculo de umidade do solo São/Paulínia .....	85
	APÊNDICE E – Cálculo de massa específica do solo Paraná/Marialva .....	86
	APÊNDICE F – Cálculo de umidade do solo Paraná/Marialva.....	87
	APÊNDICE G – Artigo.....	88

## 1 INTRODUÇÃO

A maior preocupação nas operações de pavimentação é a liberação de compostos orgânicos voláteis (COV's), principalmente pelos asfaltos diluídos que, devido à evaporação do solvente destilado de petróleo contido no cimento asfáltico de petróleo (CAP), os liberam mais intensamente. Segundo a *Environmental Protection Agency* (EPA), aproximadamente 70% do diluente é evaporado enquanto o restante permanecerá retido no cimento asfáltico. A taxa de evaporação seria, a partir do dia da aplicação, de 20% nas primeiras 24h, 50% em uma semana e 70% após 3 a 4 meses. A emissão pode ocorrer tanto na planta de mistura onde é produzido o asfalto diluído, quanto durante o processo de pavimentação sendo neste onde ocorre a maior liberação de COVs (EPA, 1995 *apud* CROSS *et al.*, 2005).

A imprimação é especificada pela norma rodoviária ES-144:2010 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) que a define como um impermeabilizante que permite condições de aderência entre a base granular e o revestimento, a ser executado através da aplicação de uma camada de material betuminoso (SILVA *et al.*, 2011). Ou seja, o serviço de imprimação consiste na impermeabilização das bases de uma pavimentação, através do uso de uma membrana asfáltica que permite a prevenção da entrada e perda de água por evaporação, bem como da perda de finos através de vento e forte pluviosidade, além de permitir controle de poeira. Ela também permite que os materiais fiquem unidos e firmes, diminuindo a rachadura da superfície (LOGARAJ, 2011). Contudo, sua má aplicação pode causar defeitos precoces a médio ou longo prazo na superfície do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Atualmente, o produto utilizado para formação da camada (asfalto diluído ou emulsão de solventes) vem sendo substituído por alternativas de menor custo, melhor desempenho e mais responsáveis ambientalmente (LOGARAJ, 2011). Não existe um consenso quanto ao intervalo de penetração aceito para a aprovação de um produto de imprimação, mas pesquisas recentes alegam que seu valor mínimo deve estar entre 4 e 12mm (SILVA *et al.*, 2011). Segundo Rabelo (2006), esse não deve ser o único parâmetro avaliado: a impermeabilidade, coesão e cisalhamento do topo da superfície também devem ser estudados.

O asfalto diluído CM-30 era o produto mais utilizado no processo de imprimação, sendo composto por 52% cimento asfáltico de petróleo (CAP) e 48% querosene. Quando esse asfalto sofre processo de cura, os diluentes de alta energia e preço são desperdiçados na atmosfera – diferentemente das emulsões que possuem baixo ponto de fulgor e, portanto, têm menor risco de incêndio, sendo mais seguras no manuseio (CROSS *et al.*, 2005). Devido ao seu alto teor de solvente aromático, apresenta limitações de uso e está sendo banido do mercado por questões ambientais e de saúde. Por isso, busca-se alternativas – dentre as quais destacam-se os biocombustíveis (SILVA *et al.*, 2011).

Outra alternativa é o uso de emulsões asfálticas, que são menos nocivas ao meio ambiente, mais seguras, perdem menos produtos de alto energia, podem ser aplicados com a base úmida, emitem menor quantidade de solventes e requerem uma menor temperatura de aplicação, o que implica na diminuição de custos com combustíveis (CROSS *et al.*, 2005).

A penetração do cimento asfáltico de petróleo na base é influenciada por diversos fatores como tipo de solo, tipo e taxa do ligante e umidade — pois, quanto maior a viscosidade do ligante, maior teor de umidade de compactação e menor será o poder de penetração. Solos com comportamento coesivo também influenciam no potencial de penetração, diminuindo-o (SILVA *et al.*, 2011). Segundo Dantas (1959), a irrigação prévia da superfície do solo contribui no sentido de se obter uma melhor penetração.

Emulsões asfálticas já eram utilizadas em países fora da América Latina, porém sem resultados satisfatórios devido a diferenças de composição do solo. Em busca de melhoras, especialistas da área iniciaram uma “corrida” por uma formulação que obtivesse resultados significativos com diversos solos, substituindo o CM-30. Buscavam também explicar o porquê a emulsão asfáltica não se mostra eficiente em alguns solos, determinar qual o meio de dispersão da emulsão para dentro do solo e quais características o solo deveria apresentar para determinado procedimento.

Até o momento do desenvolvimento do trabalho, pesquisas existentes principalmente no Brasil não abordavam com maiores detalhes o tema imprimação, explicando química e fisicamente a interação do asfalto com o solo. Tratando-se de emulsão asfáltica, a dificuldade estende-se também a quais os tipos de solo em que ocorre uma maior ou melhor interação.

Com o intuito de responder tais questões, observou-se a necessidade da realização deste projeto, buscando testar um novo produto e sua inserção no mercado de asfalto, contribuindo assim, com o problema da falta de conhecimentos específicos sobre os diferentes tipos de solo e a interação desses com a emulsão asfáltica no processo de imprimação.

## **2 OBJETIVOS**

- Inserir uma nova formulação de emulsão asfáltica para imprimação;
- Contribuir com o conhecimento dos fatores que influenciam na penetração da emulsão asfáltica com utilização do Redicote E 620 (Berol 260) no solo da América Latina, no processo de imprimação;
- Analisar a influência da pressão de compactação, da umidade do solo, dos tipos de solventes, dos tipos de solo e de surfactantes diferentes no processo de imprimação;
- Comparar o método de compactação entre equipamentos Marshall e SBR.

## **3 REVISÃO DA LITERATURA**

Neste tópico será feita uma revisão da literatura, expondo informações tecnológicas sobre as principais matérias-primas para a produção de emulsão asfáltica, sobre a emulsão asfáltica em si, sua aplicação e sobre o que é a imprimação.

### **3.1 Asfalto**

Asfalto é um termo usado para identificar o ligante betuminoso utilizado em pavimentação asfáltica, o qual é obtido através da destilação do petróleo. Este ligante betuminoso possui propriedades adesivas semelhantes às dos termoviscoplasticos, é impermeável à água e pouco reativo, o que não o impede de sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta em contato com o ar e a água. No Brasil, utiliza-se o termo cimento asfáltico de petróleo (CAP) para identificar o tipo de asfalto que é semissólido à baixa temperatura, viscoelástico à

temperatura ambiente, líquido à altas temperaturas e solúvel em benzeno, tricloroetileno e bissulfeto de carbono (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O asfalto é composto por um conjunto complexo de moléculas orgânicas, contendo 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos unidos por ligações covalentes. Em média, a composição elementar do asfalto apresenta de 82 a 88% de carbono, de 8 a 11% de hidrogênio, de zero a 6% de enxofre, de zero a 1,5% de oxigênio e de zero a 1% de nitrogênio. Entretanto, essa composição pode variar de acordo com a fonte de petróleo, modificações nos processos de refino e o envelhecimento na usinagem (BERNUCCI *et al.*, 2008). Na Tabela 1, pode-se comparar a composição química do asfalto originado de três regiões diferentes (PETERSEN, 2000).

Tabela 1 - Composição elementar de asfaltos da Califórnia, Boscan e México

	México (%)	Boscan (%)	Califórnia (%)
Carbono	83,77	82,90	86,77
Hidrogênio	9,91	10,45	10,94
Nitrogênio	0,28	0,78	1,10
Enxofre	5,25	5,43	0,99
Oxigênio	0,77	0,29	0,20
Vanádio <sup>a</sup>	180 <sup>a</sup>	1380 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
Níquel <sup>a</sup>	22 <sup>a</sup>	109 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Em partes por milhão (ppm).

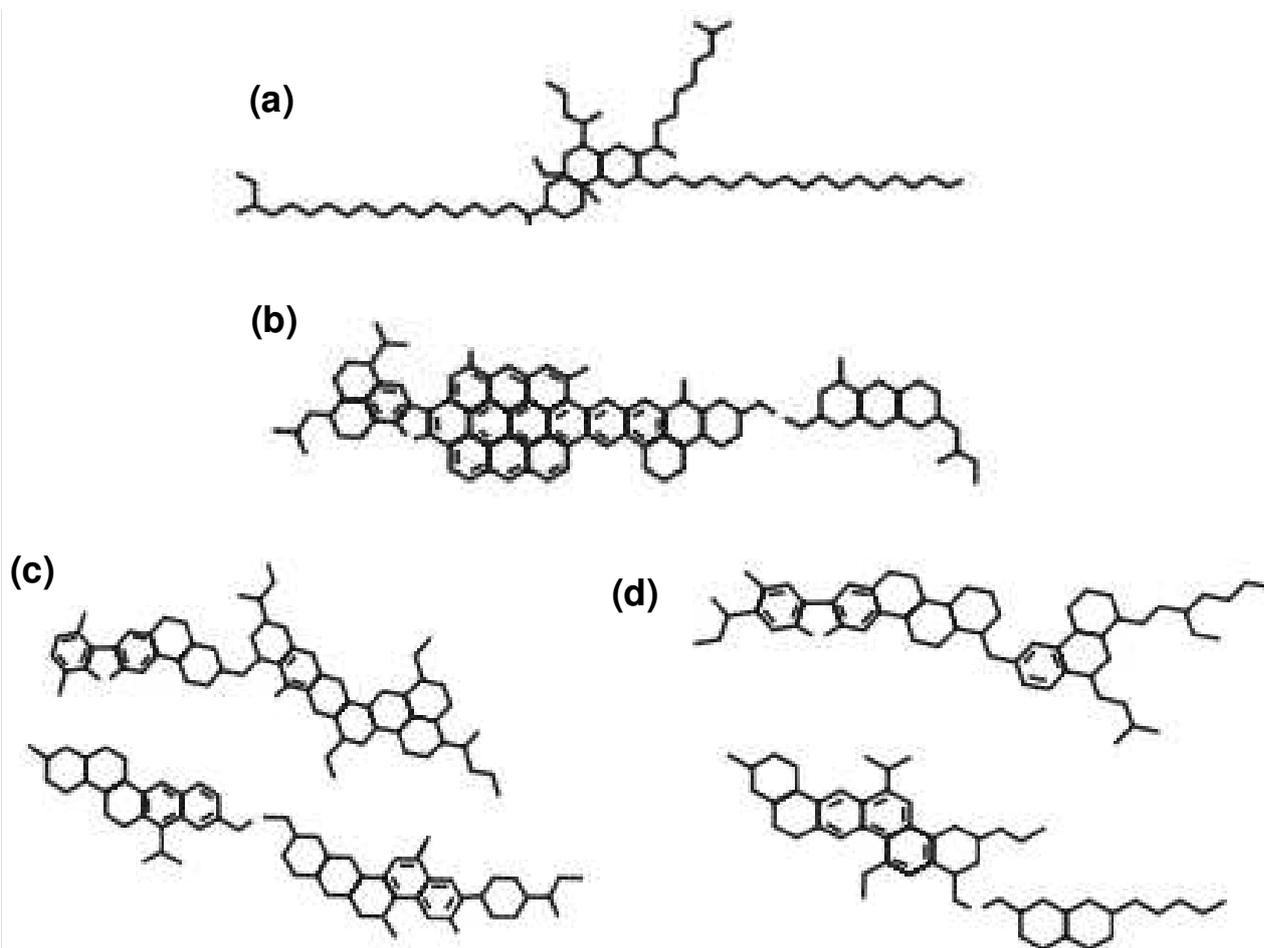
(Fonte: PETERSEN, 2000)

A quantidade de átomos de carbono presentes em anéis aromáticos pode ser determinada por ressonância magnética nuclear. O chamado carbono aromático faz parte de um sistema de anéis aromáticos condensados, no qual existem de 1 a 10 anéis. Os sistemas de anéis naftenos e aromáticos correspondem a hidrocarbonetos normais e ramificados (PETERSEN, 2000).

Nos asfaltos são encontrados quatro grandes grupos de componentes: (1) os compostos saturados (Fig. 1a), que são óleos viscosos apolares transparentes formados por cadeias lineares e ramificadas de hidrocarbonetos; (2) os asfaltenos, compostos polares constituídos por hidrocarbonetos naftênicos condensados (Fig.

1b) que costumam ser amorfos e de coloração preta ou marrom; (3) os compostos aromáticos (Fig. 1c) que são os componentes majoritários do asfalto - formam um líquido viscoso amarelo polar, apresentam baixo peso molecular, são o meio de dispersão e peptização dos asfaltenos; e por fim (4) as resinas, formadas por compostos de carbono e hidrogênio com pequenas quantidades de oxigênio, enxofre e nitrogênio, são sólidas, polares e fortemente adesivas (Fig. 1d) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 1 - Representação esquemática dos grupos componentes do asfalto



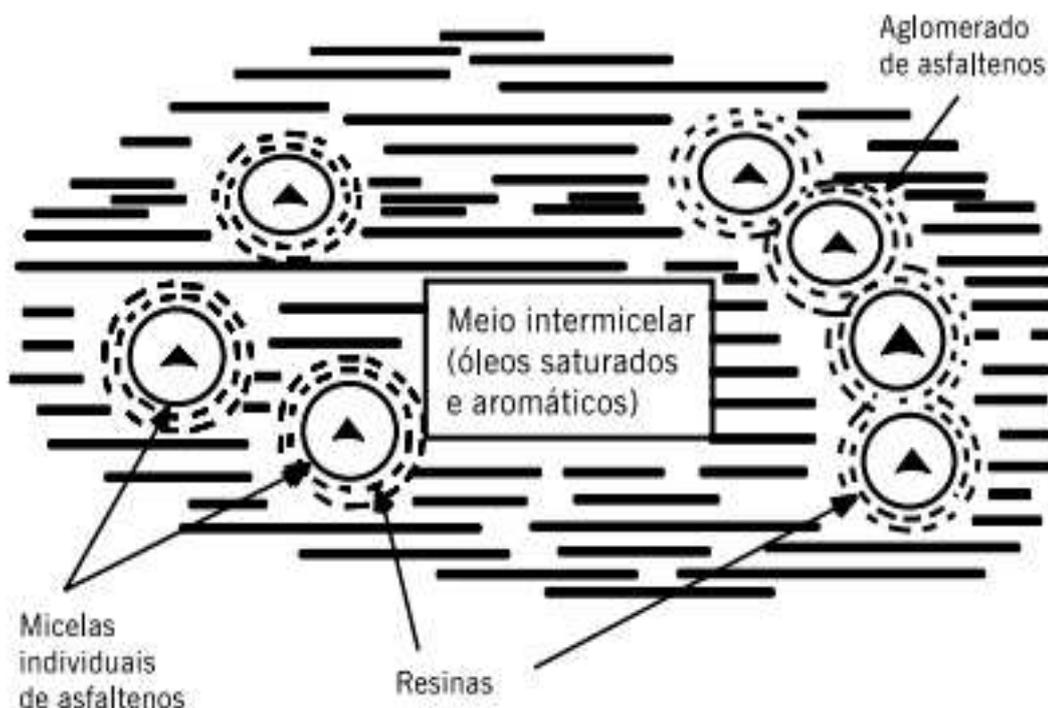
(a) Compostos saturados (b) Asfaltenos; (c) Compostos aromáticos; (d) Resinas

(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

Através da cromatografia em camada delgada com o n-heptano como eluente, os asfaltenos precipitados podem ser separados do asfalto. Em seguida, a separação da parte solúvel pode ser realizada em colunas capilares com sílica ou alumina como meio de adsorção com eluição por solventes de diferentes polaridades. A detecção dos compostos saturados, aromáticos e das resinas é grandemente realizada através da ionização de chama (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O chamado ligante asfáltico é uma dispersão coloidal composta de asfaltenos saturados e aromáticos (maltenos), imersos em resinas, formando micelas reversas ou diretas (Fig. 2) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

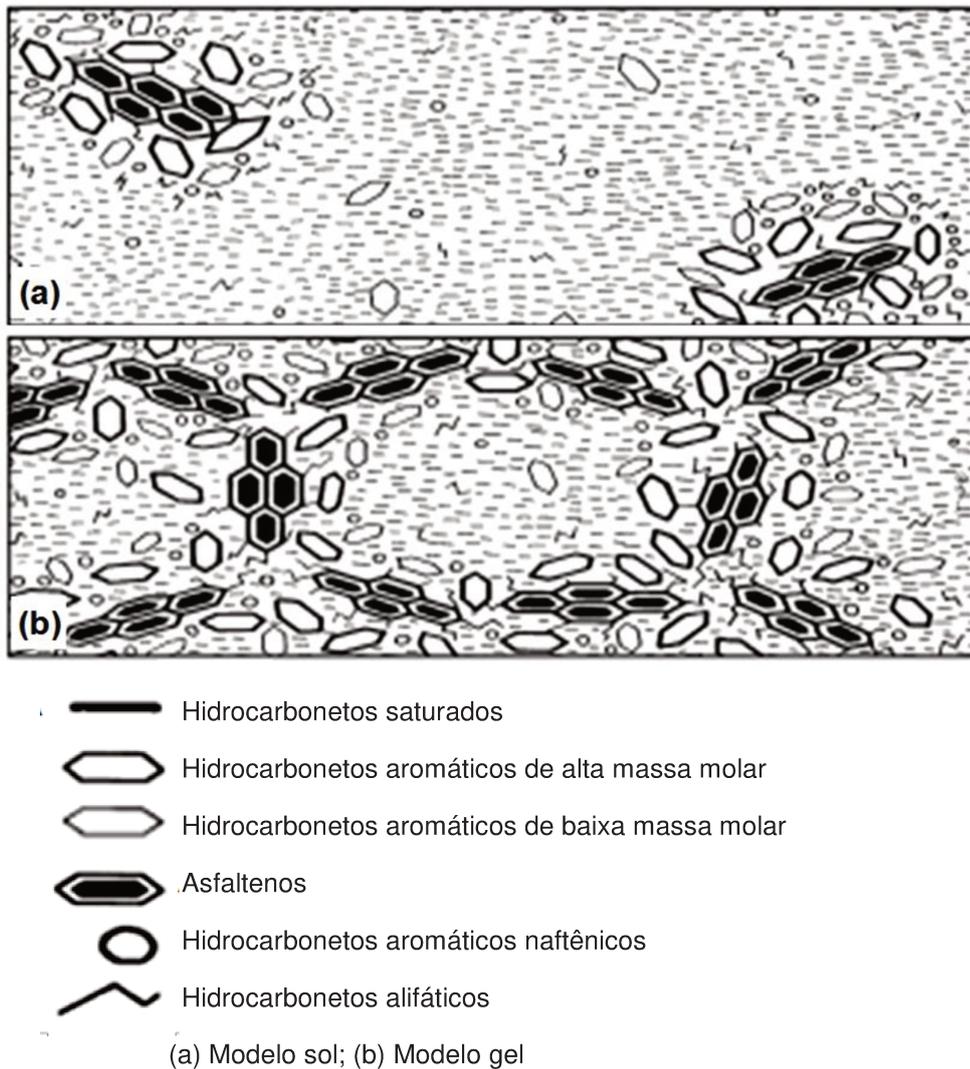
Figura 2 - Representação esquemática do modelo de micelas em asfalto



(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

Na literatura são propostos dois modelos de ligantes asfálticos, que estão representados na Figura 3: sol (a) e gel (b).

Figura 3 - Representação esquemática dos tipos de ligante asfáltico

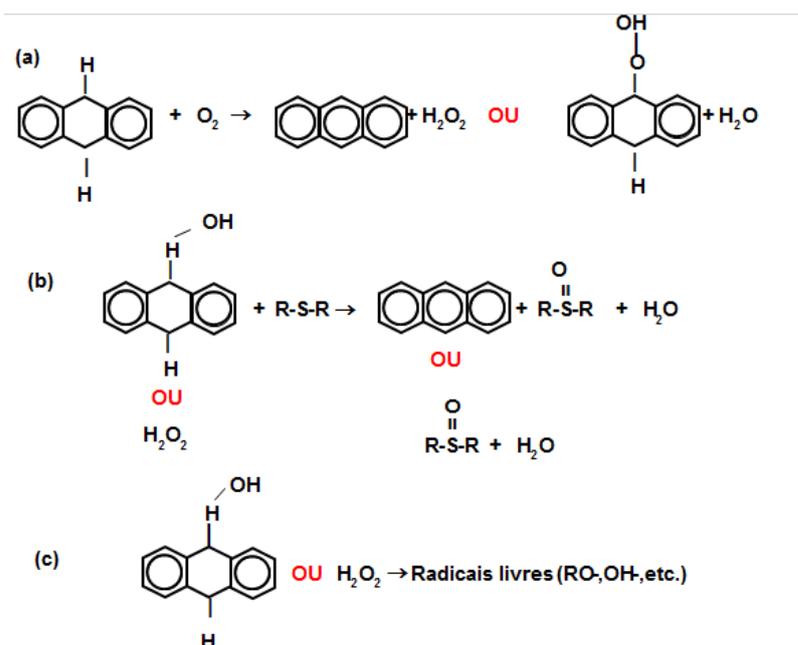


(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

Os ligantes do tipo sol ocorrem quando os asfaltenos formam micelas com boa mobilidade devido à presença de uma quantidade suficiente de resinas e aromáticos, gerando um asfalto com maior suscetibilidade térmica e menor resistência à aplicação de carga direta. Já os ligantes do tipo gel são formados quando esses compostos não estão balanceados, ocorrendo formação de micelas com vazios em seu interior, gerando um asfalto mais resistente à aplicação de carga e menos suscetível ao retorno, que pode, porém, apresentar trincas prematuramente, (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Um novo modelo estrutural para o asfalto, no qual foi identificada a presença de substâncias anfóteras, não considera válido o conceito de asfaltenos e classifica os componentes do asfalto em polares e apolares. Foi proposto a partir de resultados de análises por espectroscopia no infravermelho e cromatografia de troca de íons, que evidenciaram vários tipos de interações entre moléculas, como ligações de hidrogênio, ligações  $\pi$ - $\pi$ , forças de van der Waals e atrações polares. A estrutura química do asfalto é modificada conforme ele é exposto ao oxigênio atmosférico, principal responsável pelo envelhecimento irreversível do asfalto, que reage com hidrocarbonetos altamente reativos, conforme representado por modelo na Figura 4 (PETERSEN, 2000).

Figura 4 - Sequência de reações de aromáticos policíclicos na oxidação do asfalto



(a) Reação de oxidação do modelo dihidroantraceno, formando peróxido de hidrogênio ou um hidroaromáticohidroperóxido; (b) Reação dos produtos da reação de oxidação com sulfetos reativos do asfalto, produzindo sulfóxidos com aromatização dos hidroaromáticos; (c) Decomposição dos intermediários do hidroperóxido em radicais livres.

(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

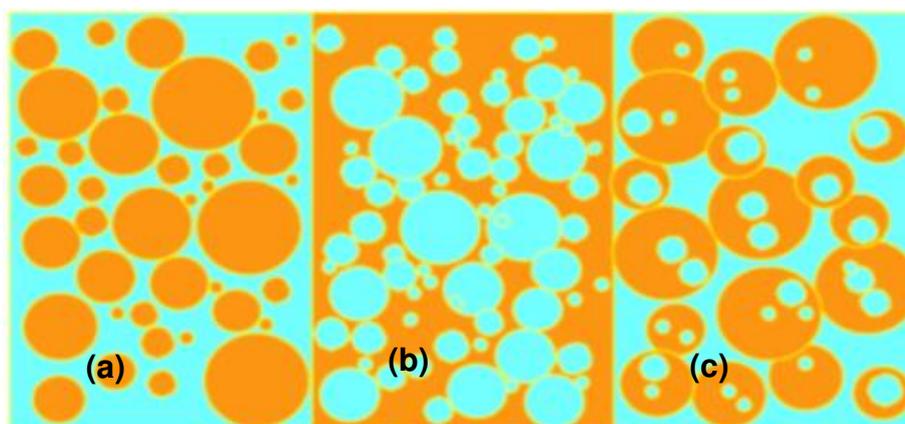
A oxidação deste hidrocarboneto aromático policíclico pode formar peróxido de hidrogênio ou um hidroaromáticohidroperóxido, que reagiriam com sulfetos reativos do asfalto formando sulfóxidos com aromatização dos hidroaromáticos.

Dentre os produtos desta reação, os sulfóxidos são os únicos que contêm oxigênio na estrutura. Ao longo dos anos, e à baixa temperatura (ex.: 25°C), pode ocorrer a formação de quantidades significativas de cetonas. Conforme a temperatura da oxidação aumenta, os intermediários do hidroperóxido tornam-se cada vez menos estáveis, decompondo-se em radicais livres, que produzem cetonas e sulfóxidos no asfalto (Fig.4) (PETERSEN, 2000).

### 3.2 Emulsões asfálticas

Uma emulsão é formada por pequenas gotas de um líquido dispersas em outro líquido, que pode ser formada apenas por dois líquidos imiscíveis, como a água e o óleo. Emulsões nas quais a fase contínua é a água e a fase dispersa é o óleo são chamadas de óleo em água. O inverso é chamado de água em óleo. Entretanto, existem emulsões mais complexas, nas quais a fase dispersa contém em seu interior outra fase dispersa de mesma composição da fase contínua (Fig.5) (JAMES, 1998).

Figura 5 - Representação esquemática de emulsões água/óleo



Azul: fase aquosa; Laranja: fase oleosa

(a) Óleo em água; (b) Água em óleo; (c) Fase dispersa contendo outra fase dispersa de mesma composição da fase contínua

(Fonte: JAMES, 1998)

Uma emulsão de asfalto é normalmente do tipo óleo em água, com as gotículas de asfalto dispersas na água. As emulsões asfálticas que possuem 40 a

80% de asfalto são líquidos marrons com gotículas dispersas que variam entre 0,1 a 20 $\mu$ m de diâmetro (WALSTRA, 1983).

Porém, algumas gotas de emulsões asfálticas podem conter pequenas gotículas de água em seu interior, classificando essa emulsão como do tipo água-óleo-água. A viscosidade da emulsão e as alterações de viscosidade durante a estocagem podem ser fortemente influenciadas pela presença dessas gotas internas (JAMES, 1998).

As emulsões asfálticas são formadas por três componentes principais: asfalto, água e emulsificante, com uma proporção aproximada de 40% água e 60% asfalto. O emulsificante reduz a tensão interfacial entre as fases aquosa e oleosa, permitindo que ocorra a formação da emulsão, que pode permanecer estável durante semanas ou até meses (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os emulsionantes mais comuns podem ter carga negativa (aniônicos) ou positiva (catiônicos). As emulsões catiônicas, preparadas com emulsionantes de carga negativa, são atualmente as de maior utilização por apresentarem melhor desempenho (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Fazem parte de sua formulação agregados obtidos de um conjunto de rochas e minérios. Eles possuem características específicas dependendo da natureza do minério, como a carga em água, que depende do pH e da presença de sais solúveis. Os agregados que possuem sílica (SiO<sub>2</sub>) normalmente apresentam uma carga superficial negativa em meio aquoso neutro. Já os que apresentam alto teor de cálcio, como a calcita e aragonita (CaCO<sub>3</sub>), possuem carga superficial positiva nas mesmas condições. Normalmente, uma emulsão catiônica tende a se romper mais rapidamente em presença de agregados com carga negativa, por isso é importante conhecer a carga da emulsão asfáltica a ser utilizada (JAMES, 1998).

De acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 14594:2000 “Emulsões asfálticas catiônicas – Especificação”, as emulsões asfálticas brasileiras são classificadas em função do tempo necessário para que ocorra a ruptura (podendo ser lenta, média ou rápida); teor de asfalto e carga iônica. Por exemplo: nas emulsões asfálticas identificadas com a sigla RR-1C, RR indica que as mesmas apresentam ruptura lenta, o número 1 indica a faixa da viscosidade e C é a abreviação para o tipo emulsão catiônica. Nos Estados Unidos da América, a norma adotada é da *American Society for Testing and Materials*

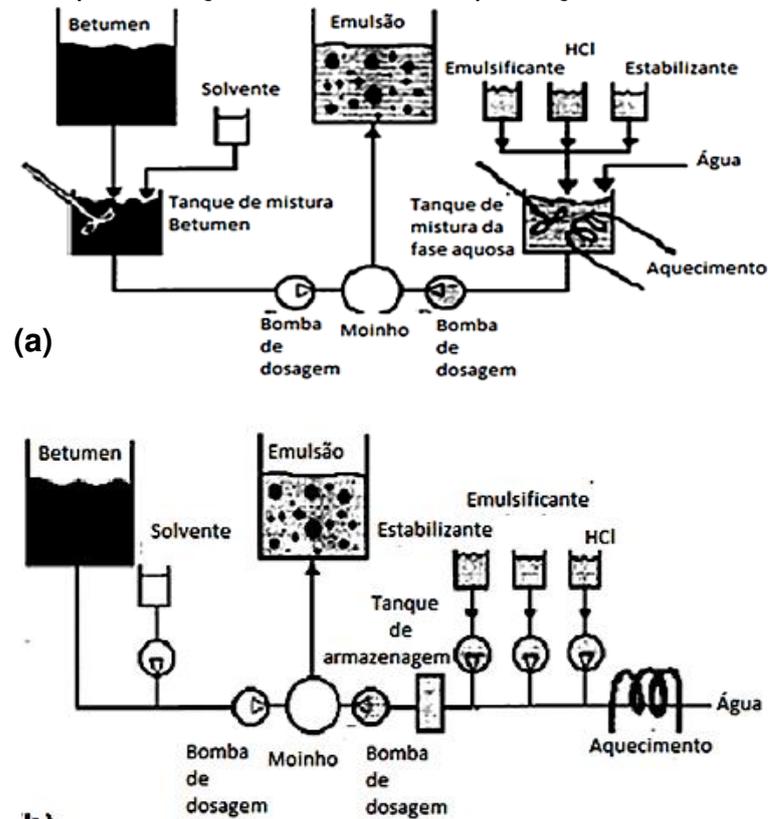
(ASTM), que identifica as emulsões catiônicas de ruptura rápida como CRS (*cationic rapid setting*) (JAMES, 1998).

A ruptura mencionada acima se refere à “cura” ou “quebra” da emulsão de asfalto. A velocidade deste processo depende de vários fatores, como temperatura, umidade, velocidade do vento e ação mecânica. Esse processo pode levar horas ou até mesmo semanas, dependendo da densidade do material à frio a ser usado na pavimentação.

### 3.3 Preparação de emulsões asfálticas

As emulsões asfálticas são preparadas em moinhos coloidais, nos quais ocorrem a formação da emulsão devido à alta pressão, ao cisalhamento e ao choque entre as gotas (CHIESA *et al.*, 2006).

Figura 6 – Representação das formas de produção de emulsão asfáltica



(a) Produção em batelada; (b) Produção contínua

(Fonte: JAMES, 1998)

Há dois importantes processos de produção da emulsão asfáltica: em batelada e contínuo (Fig. 6). A produção em batelada requer que a preparação da fase aquosa seja anterior à adição dos produtos químicos, em um tanque que contém a água aquecida. Durante o processo de emulsificação, a solução da fase aquosa e o asfalto são dosados pelo moinho coloidal. Durante o processo contínuo, o aquecimento da água e a dosagem de químicos na fase aquosa são feitos continuamente por bombas de dosagem individuais. Como não existe tanque de dosagem da fase aquosa, o sistema deve ser realizado proporcionando um tempo de reação suficiente para que a neutralização e homogeneização ocorram antes da fase aquosa atingir o asfalto. Esse processo é controlado utilizando medidores de fluxo para a dosagem dos componentes, exceto do ácido – que deve ser controlado de acordo com o pH da fase aquosa (JAMES, 1998).

### **3.4 Imprimação**

Em todo o mundo, pesquisadores têm se dedicado ao estudo de imprimação asfáltica (ou imprimação betuminosa) de forma que são encontradas na literatura várias formas de se definir o que é a imprimação em si, além de suas funções. De uma forma geral, a imprimação é definida como a aplicação de uma camada de material líquido asfáltico de baixa viscosidade, sob pressão, sobre uma base não tratada, antes da aplicação do revestimento (RABELO, 2006). Esta camada contém um ligante asfáltico que penetra a base (ou sub-base), enchendo seus vazios, diminuindo a infiltração de água (BALBO, 2007).

#### **3.4.1 Propriedades**

Pode-se dizer que a imprimação betuminosa tem três funções básicas: (1) melhorar a coesão da superfície da base, tornando-a lisa, polida e isenta de pó; (2) provocar melhor ligação do revestimento com a base; e (3) impedir uma possível infiltração de água na base. Outras funções podem ser atribuídas à imprimação, como o impedimento de capilaridade e da movimentação lateral do revestimento;

endurecimento da parte superior da base, aumentando sua resistência; proteção da base contra intempéries e contra o tráfego antes da aplicação do revestimento (RABELO, 2006).

Para que não haja sua ruína precoce, a dureza da base deve ser determinada, bem como deve ser selecionado agregado apropriado. Além disso, uma boa aderência entre a base e o revestimento garantem que não haja perda drástica da vida útil do pavimento. Quando suas propriedades estão de perfeito acordo com as características da base, do revestimento e do volume de tráfego, a base imprimada apresenta melhor coesão em qualquer situação (RABELO, 2006).

A impermeabilização é de suma importância, ainda que em regiões de baixa pluviosidade. Contudo, sabe-se que a base pode estar sujeita à várias formas de infiltração, provenientes também do lençol freático, e ainda não é conhecido o papel da imprimação em relação à impermeabilidade das bases (RABELO, 2006).

### **3.4.2 Penetração**

Segundo a ASTM D8-02 (2003), para que a imprimação seja eficiente, é necessário que o ligante penetre na base, retardando a deterioração do pavimento. Não há consenso sobre o quanto ela deve penetrar: alguns estudos indicam de 4 a 5mm, com a superfície seca e sem brilho após 24 horas; enquanto outros indicam de 5 a 10mm – ainda que seja muito difícil chegar a esses valores (RABELO, 2006).

Há vários fatores que podem interferir na penetração da imprimação betuminosa, sendo os principais o tipo e taxa de ligante, o teor de umidade da compactação, a massa específica aparente seca máxima, a umidade da base no momento da imprimação, e também as características dos solos constituintes da base e a quantidade de irrigação prévia em sua superfície (RABELO, 2006).

### **3.4.3 Materiais usados na imprimação**

Os materiais mais utilizados para imprimação betuminosa são o CM-30 e CM-70, ambos asfaltos diluídos de cura média. Porém há muitas outras possibilidades de ligantes asfálticos formulados para a imprimação, ainda que os de

cura média sejam os mais eficientes, devido ao rápido acréscimo de viscosidade após a sua aplicação (RABELO, 2006).

Para escolher o melhor tipo de ligante, deve-se levar em conta a qualidade e tamanho dos agregados, a temperatura da aplicação, as condições climáticas no momento e local da aplicação, e a velocidade desejada de cura. O volume de tráfego na via e o teor de asfalto contido no ligante em questão também devem ser considerados (RABELO, 2006).

Asfaltos de cura rápida levam à deposição do revestimento, pela separação do solvente ou por sua absorção pelos finos da base onde foi aplicada. Não são recomendados, também, asfaltos de alcatrão, pois não oferecem uniformidade ideal no momento da aplicação (RABELO, 2006).

Quando se trata de bases bastante permeáveis e pouco corrosivas (ou de exposição da base à chuva durante a cura) deve-se utilizar ligantes com alto teor de asfalto, pois oferecem imprimação de qualidade superior, apesar da difícil penetração. Para bases mais densas, recomenda-se o uso de ligantes com baixo teor de asfalto, apesar da necessidade de aplicação periódica de asfalto diluído em água sobre a base imprimada (RABELO, 2006).

#### **3.4.4 Materiais alternativos para a imprimação**

Os asfaltos diluídos estão sendo cada vez menos utilizados para a imprimação, pois libera compostos voláteis orgânicos no ar e, em épocas de chuva, pode ser arrastado pela água aos mananciais ou a áreas ambientalmente sensíveis. Por isso, é recomendado que sua diluição contenha entre 25 e 45% de solventes de petróleo (RABELO, 2006).

Devido à sua restrição de uso, busca-se novas alternativas para a imprimação. Uma é o uso de emulsões asfálticas, por possuírem pouca ou nenhuma quantidade de compostos voláteis. Além disso, pode-se usar solventes orgânicos naturais, como o óleo de castanha de caju (RABELO, 2006).

#### **3.4.5 Especificação - Emulsão Asfáltica para Imprimação**

A emulsão asfáltica para imprimação (EAI) deve-se enquadrar nos parâmetros descritos na especificação brasileira do Departamento Nacional de

Infraestrutura (DNIT) número 165/2013 – Emulsões asfálticas de Pavimentação – Especificação de Material, revisada em setembro de 2013 (DNIT 165/2013). Na tabela 2 estão os dados de especificação extraídos desta norma.

Tabela 2 – Características das emulsões asfálticas para imprimação (EAI)

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	Limite	Método de
		Ruptura Lenta	Ensaio
		EAI	ABNT NBR
<i>Ensaio para a emulsão</i>			
Viscosidade SayBolt-Furol à 25°C, máx.	s	90	14491:2007
Sedimentação, máx.	% m/m	10	6570:2010
Resistência à água (cobertura), mín.	%	0,1	14393:2012
pH, máx.	-	8	6299:2012
<i>Destilação</i>			
Solvente destilado	% v/v	0 a 15	6568:2005
Resíduo seco, mín.	% m/m	45	14376:2007

(Fonte: ABNT, 2013 – Adaptada pela autora)

### 3.5 Solo

O solo em sua forma grumosa é estável, possui facilidade de infiltração de ar e de água, que circulam em macroporos chegando a uma profundidade de até 20cm. A infiltração de água depende da quantidade de macroporos na superfície do solo e também de sua estrutura grumosa, enquanto que sua drenagem ocorre pela força da gravidade (PRIMAVESI, 2002).

O umedecimento de grãos ultrafinos de argila leva a um inchaço que, após secagem dos grãos, diminui fazendo com que surja espaços entre eles – o que resulta num aumento da porosidade. Dependendo da qualidade e dos cátions aderidos à argila, pode-se formar grânulos, blocos, colunas ou lâminas de diferentes formas e tamanhos. Com o reumedecimento do solo seco com elevado teor de argila, a compressão de ar nos microporos provoca a destruição dos grumos, de forma que os macroporos são afetados – prejudicando a infiltração de água e a circulação de ar no solo (PRIMAVESI, 2002).

A expressão anormal do desenvolvimento do solo é indicada pelo seu pH: solo argiloso com pH menor que 5, ou maior que 7,5; solo arenoso menor que 5,5 ou maior que 7; e solo orgânico menor que 4 (BARTH, 1968). O baixo pH da solução indica alta concentração de íons  $H^+$  e poucos íons magnésio ( $Mg^{2+}$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), potássio ( $K^+$ ) e sódio ( $Na^+$ ) adsorvidos. Quando o pH abaixa, há indicação de que o solo é compacto e sujeito a erosão – naqueles com pH abaixo de 5,5 o silício se perde, o que contribui para o endurecimento extremo de solos arenosos durante a estação de seca. O solo excessivamente ácido tem uma estrutura pior, pois possui uma menor capacidade de penetração e retenção de água (PRIMAVESI, 2002).

O pH do solo pode ser corrigido com cálcio, que ocupa vazios do complexo de troca (no lugar de íons hidrogênio ou hidroxilas), neutralizando o alumínio e o manganês tóxico, floculando o solo e melhorando sua agregação (BARTH, 1968).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

A metodologia deste trabalho inclui testes realizados na emulsão asfáltica, no solo, e também aplicação da emulsão no solo.

### **4.1 Ensaio na emulsão asfáltica**

As emulsões asfálticas foram produzidas em laboratório e seu resíduo foi analisado, com o objetivo de conferir a proporção de asfalto após a emulsificação. Também foram analisados tamanho de partícula, quantidade de partículas grandes e aglomeradas (peneira), viscosidade e pH da emulsão com o intuito de obter mais dados sobre suas características para melhor análise de sua qualidade.

#### **4.1.1 Fabricação da emulsão de asfalto**

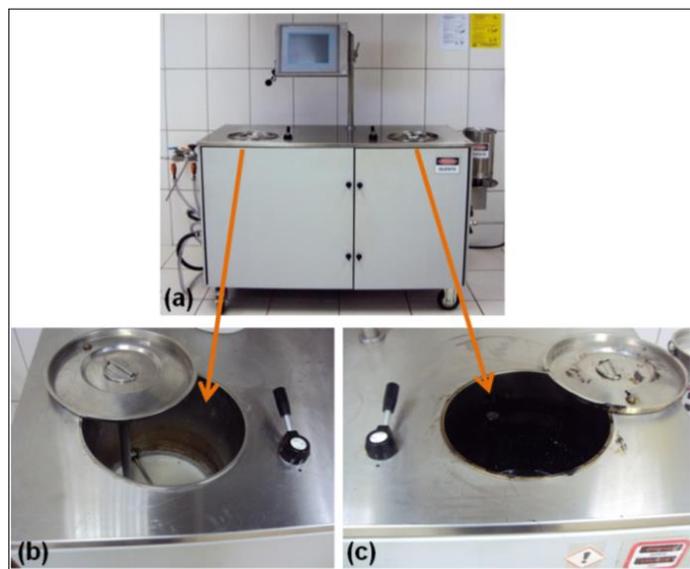
A água e ligante asfáltico foram usados para preparo da emulsão asfáltica, juntamente com outros componentes, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição das formulações de emulsão asfáltica

DESCRIÇÃO	% massa					
	EPF-01	EPF-02	EPF-03	EPF-04	EPF-05	EPF-06
CAP 50/70	43	43	43	43	43	43
Redicote PR <sup>®</sup>	7	-	-	7	7	12
Óleo Vegetal Refinado	-	7	-	-	-	-
Óleo Básico RR NM	-	-	7	-	-	-
Redicote <sup>®</sup> E-620 (antigo Berol <sup>®</sup> 260)	0,8	0,8	0,8	-	-	0,8
Redicote <sup>®</sup> E-11	0,7	0,7	0,7	1,5	-	0,7
Redicote <sup>®</sup> E-7000	-	-	-	-	1,5	-
Água	q.s.p.100					
pH	Sem ajuste					

Os componentes foram emulsionados em uma planta piloto, modelo DEP-03R, fabricada pela empresa Denimo Tech. A fase aquosa, constituída por água, ácido e emulsificante, foi colocada no tanque esquerdo, à 40°C. A fase asfáltica, constituída por cimento asfáltico de petróleo (CAP) e solvente foi colocada no compartimento direito, à 100°C (Fig. 7). Ambas passavam pelas tubulações chegando até o moinho coloidal, que foi mantido à 57,4°C, onde ocorre a emulsificação. O produto final foi retirado por uma tubulação externa, ao lado do tanque da fase aquosa. Utilizou-se 50% de asfalto e 50% de água, sendo que a vazão na planta piloto foi de 162m<sup>3</sup>/s na fase aquosa e 138m<sup>3</sup>/s na fase asfáltica, considerando uma pequena faixa de erro.

Figura 7 - Fotografias da planta piloto usada para a emulsificação do asfalto



(a) Planta piloto modelo DEP-03R, da Denimo Tech; (b) Tanque onde a fase aquosa foi colocada; (c) Compartimento onde a fase asfáltica foi colocada.

(AKZONOBEL, 2017)

#### 4.1.2 Determinação do pH

Cerca de 50ml de emulsão asfáltica à 25°C foram colocados em um béquer de vidro 100ml, de acordo com as especificações da norma brasileira ABNT NBR 6299. O eletrodo do pHmetro foi lavado com água destilada e o potenciômetro foi calibrado com três valores de pH (4; 7 e 10). O eletrodo foi imerso na emulsão asfáltica, mantida sob agitação lenta. Após alguns segundos para a estabilização do sistema, foi realizada a leitura de pH. Após a análise, o eletrodo foi retirado e higienizado com água destilada.

#### 4.1.3 Análise da distribuição de tamanhos das partículas

A distribuição de tamanhos das partículas na emulsão asfáltica preparada foi analisada com o uso do equipamento MICROTRAC modelo S3500 (Fig. 8), um

analisador de tamanho de partículas por difração à laser, que utiliza três lasers de diodo vermelhos. Este equipamento pode detectar partículas entre 0,02 a 2800 $\mu$ m de diâmetro.

Figura 8 - Fotografia de um equipamento MICROTRAC modelo S 3500



(AKZONOBEL, 2017)

Para o preparo da amostra, foram adicionados 3ml da emulsão asfáltica e 9ml da solução dispersante em um béquer de 50ml. Posteriormente, a mistura foi agitada e uma gota dela foi colocada no compartimento de amostra do equipamento, com auxílio de uma pipeta de Pasteur. Os resultados de tamanho médio e os gráficos da distribuição de tamanho das partículas foram obtidos por meio de *software* específico do aparelho.

#### **4.1.4 Análise da viscosidade da emulsão asfáltica**

A viscosidade da emulsão asfáltica foi determinada por meio de um ensaio realizado no viscosímetro Saybolt-Furol (Fig. 9), de acordo com a norma ABNT MB 581/71 – Viscosidade Saybolt-Furol de emulsões asfálticas. Esse teste mede o tempo, em segundos, necessário para que 60ml de material asfáltico flua através de um orifício padronizado.

Primeiramente, ajustava-se a temperatura de banho do viscosímetro de forma que a mesma permanecesse constante por um minuto à 25°C. A emulsão asfáltica era homogeneizada evitando-se a formação de bolhas de ar e, a seguir, era vertida em béquer de 100ml. A amostra era colocada no tubo do viscosímetro e

agitada com uma bagueta de vidro, também evitando formação de bolhas de ar. Após estas operações, a rolha do tubo do viscosímetro era retirada, simultaneamente ao acionamento de um cronômetro, deixando a amostra fluir continuamente para o interior do frasco receptor. O cronômetro era pausado quando toda a amostra (60ml) tinha fluído, registrando o tempo necessário para a transferência até o frasco receptor.



Figura 9 - Fotografia de um equipamento Saybolt/Furol

(AKZONOBEL, 2017)

#### **4.1.5 Método para determinação da porcentagem de partículas grandes em emulsões asfálticas**

A determinação da porcentagem de partículas grandes em emulsões asfálticas foi realizada conforme norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D 6933-08 – Método para partículas grandes em emulsões asfálticas (teste de peneiração). De acordo com a norma ABNT MB 581/71, é necessário um teste preliminar, de viscosidade em Saybolt/Furol, para determinar a temperatura na qual a peneira deve ser aquecida. Para emulsões que apresentam

resultados maiores do que 100 segundos à 25°C, usa-se temperatura ambiente para a realização do teste.

Para o cálculo da porcentagem de partículas grandes na emulsão asfáltica, foram determinadas e registradas em gramas as massas de: peneira e recipiente acoplado ao seu fundo (“massa A”) – após lavagem com água destilada, secagem em estufa à 110°C por 2h e resfriamento em dessecador; peneira, fundo e resíduo (“massa B”); recipiente contendo emulsão de asfalto (“massa C” = ± 800g a 1kg), que foi adicionada à peneira, de malha número 20 umedecida com uma solução aniônica de surfactante; e recipiente sem emulsão de asfalto (“massa D”). A porcentagem de partículas grandes na emulsão asfáltica foi obtida através da equação (1).

$$\text{Porcentagem de partículas grandes (\%)} = \left[ \frac{(B - A)}{(C - D)} \right] \times 100 \quad (1)$$

A: massa da peneira e fundo (g);

B: massa da peneira, fundo e resíduo (g);

C: massa do recipiente com a amostra de emulsão asfáltica (g);

D: massa do recipiente de amostra vazio (g).

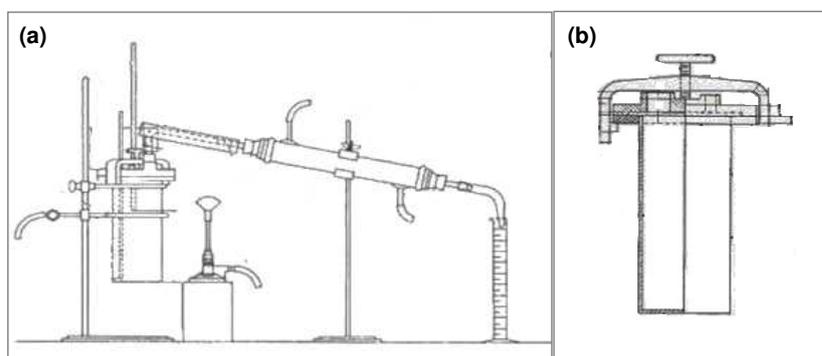
#### 4.1.6 Métodos para separação do resíduo na emulsão asfáltica

A confirmação da proporção correta entre o asfalto e a água no produto obtido, no teste realizado na planta piloto, foi feita pela destilação da emulsão asfáltica de acordo com a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D 6997-04 – Método para destilação de emulsão asfáltica.

Para tal, 200g de emulsão asfáltica foram colocados em um conjunto de alumínio previamente pesado, e, em sua tampa, foi inserido um termômetro fixado por rolha. O conjunto foi colocado no sistema de destilação e aquecido com fogo de chama baixa no anel de aquecimento (Fig. 10). Um bico de Bunsen foi colocado no tubo de conexão do sistema de destilação, e quando a temperatura da amostra atingia 215°C, o anel de aquecimento era movido para que a temperatura atingisse 260°C durante 15 minutos.

Todo o processo de destilação durava em torno de 60 minutos e, ao final dele, determinava-se a massa do resíduo contido no conjunto de alumínio – foram adicionados 1,5g à massa obtida como forma de corrigir erro de massa do conjunto de alumínio que, à temperatura ambiente pesava 1,5g a mais do que à 260°C devido à umidade.

Figura 10 - Esquema do conjunto de destilação de alumínio da ASTM D6997-04



(a) Sistema de destilação da emulsão asfáltica; (b) Destaque do conjunto de alumínio onde a emulsão asfáltica foi colocada para destilação

(ASTM, 2004)

O resíduo da destilação foi colocado em um recipiente de alumínio e armazenado para testes posteriores. A porcentagem de resíduo da destilação foi obtida através da equação (2).

$$\text{Porcentagem de resíduo (\%)} = \left[ \frac{(B - A)}{C} \right] \times 100 \quad (2)$$

A: massa do conjunto vazio antes do teste (g);

B: massa do conjunto após o teste, com correção de 1.5g (g);

C: massa da emulsão asfáltica adicionada ao conjunto (g).

## 4.2 Ensaio no solo

Fez-se necessária a realização do ensaio de compactação do solo para obtenção do teor ideal de umidade do solo. A partir disto, foi possível iniciar a sequência de testes de imprimação.

### 4.2.1 Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas

O método do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), nº162/94 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, foi aplicado para determinação da correlação entre o teor de umidade e a massa específica do solo seco, para o material passante na peneira 19mm à uma determinada energia de compactação. Tal metodologia consiste no fornecimento de dados para o desenho de uma curva de compactação, onde foram marcadas, no eixo das ordenadas, as massas específicas aparentes do solo seco ( $\gamma_s$ ) e, nas abscissas, os teores de umidade correspondentes (h). O teor ótimo de umidade é o valor correspondente da abscissa ao ponto da massa específica aparente máxima do solo seco, na curva de compactação.

Primeiramente, foi realizado o preparo da amostra, no qual a amostra foi seca a 60°C em estufa, destorroada no almofariz e passada em peneira 19mm. Para solos siltosos ou argilosos, retirou-se aproximadamente 6kg e para solos arenosos ou pedregulhosos, retirou-se 7kg.

Para compactação do corpo-de-prova foi utilizada a Prensa Elétrica Marshall. A amostra era colocada dentro de um molde cilíndrico metálico e compactada, de forma a obter o corpo-de-prova na altura média de 12,5cm. O solo foi exposto a uma “energia de compactação” normal de 12 golpes. O cilindro foi removido e foi determinada a massa do conjunto, com aproximação de 1g, e do material úmido compactado (P'h). Após compactação do solo, fez-se a remoção da amostra com o descompactador Marshall, retirando de sua parte central duas amostras representativas de cerca de  $\pm 250g$  cada para determinação da umidade, tendo sua massa também registrada (Fig. 11). Ambas as partes foram secadas em estufa à 110°C $\pm$ 5°C até que parassem de perder umidade e apresentassem massa

constante ( $P_s$ ). Posteriormente, as amostras foram pesadas com precisão de 0,1g e uma média foi calculada, como umidade representativa do corpo-de-prova.

Figura 11 - Fotografia da prensa elétrica Marshall, molde e descompactador



(a) Prensa elétrica Marshall; (b) Cilindro de compactação; (c) Descompactador Marshall

(AKZONOBEL, 2017)

O corpo-de-prova foi desmanchado, adicionou-se 2% de água, homogeneizado e compactado novamente. A operação foi repetida para teores de umidade crescentes, no mínimo 5 vezes. Nesse experimento, deve-se calcular primeiro a umidade do solo, de acordo com a equação (3), utilizando massas da amostra úmida e da amostra seca. Depois, calcula-se o volume do cilindro, para o qual será necessário medir o diâmetro e comprimento do molde, conforme equação (4).

$$h = \frac{P_h P_s}{P_s} \times 100 \quad (3)$$

$P_h$ : massa da amostra úmida (g);

$P_s$ : massa final da amostra seca (g);

h: teor de umidade (%).

$$A = \pi hr^2 \quad (4)$$

h: altura (cm);

r: raio (cm);

A: área (cm<sup>2</sup>).

Então, determina-se a massa específica aparente do solo úmido após cada compactação; seguida da massa específica aparente do solo seco, após cada compactação, conforme equações (5) e (6) respectivamente.

$$\gamma_h = \frac{P'_h}{V} \quad (5)$$

P'<sub>h</sub>: massa do solo úmido compactado (g);

V: volume do solo compactado (cm<sup>3</sup>);

γ<sub>h</sub>: massa específica aparente do solo úmido (em g/cm<sup>3</sup>).

$$\gamma_s = \gamma_h \frac{100}{100 + h} \quad (6)$$

γ<sub>h</sub>: massa específica aparente do solo úmido (g/cm<sup>3</sup>);

γ<sub>s</sub>: massa específica aparente do solo seco (g/cm<sup>3</sup>);

h: teor de umidade do solo compactado.

Com a massa específica aparente do solo seco no eixo y, e o teor de umidade no eixo x, é possível desenhar a curva de compactação. A massa específica aparente máxima do solo seco é determinada pela ordenada máxima da curva de compactação: o valor correspondente da abscissa é a sua umidade ótima naquele determinado solo e energia de compactação - que podem ser 12, 26 ou 55 golpes.

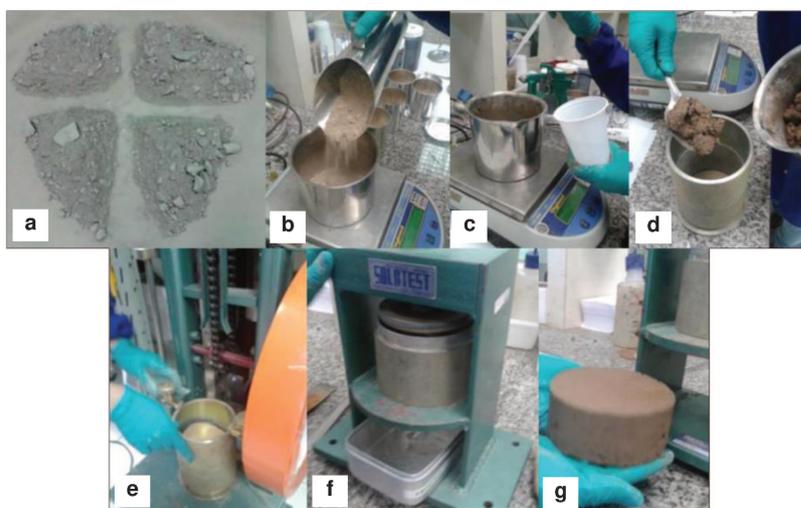
### 4.3 Ensaio de imprimação

Nesta etapa do projeto foram realizados dois processos, sendo que um deles teve como objetivo a comparação entre dois métodos de compactação de solo: o Marshall, já utilizado no mercado atualmente; e o SBR, desenvolvido em laboratório. O outro foi feito para avaliar o comportamento da emulsão asfáltica no solo, variando parâmetros como umidade e tipo do solo, pressão de compactação, tipos de solvente e surfactante. Para este último processo, foi utilizado somente o método SBR de compactação.

### 4.4 Compactação da amostra no Marshall e teste de penetração

Para avaliação dos resultados de imprimação foram moldados corpos-de-prova na Prensa Elétrica Marshall, com metodologia baseada no método do DNER nº162/94 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Uma amostra de solo foi quarteada em quatro partes iguais com aproximadamente 800g, às quais foram adicionadas água de acordo com porcentagem de teor ideal de umidade previamente calculada (Fig. 12). O solo umedecido foi colocado no cilindro e compactado na Prensa Marshall à energia normal (12 golpes), intermediária (26 golpes) e modificada (50 golpes) por camada (Fig. 12).

Figura 12 - Fotografia do processo de compactação pela prensa Marshall



(a) Amostra de solo quarteada em quatro partes iguais; (b) Pesagem da amostra; (c) Adição de água; (d) Solo umedecido sendo colocado no molde de cilindro; (e) Amostra sendo compactada em prensa Marshall; (f) Descompactador Marshall; (g) Corpo-de-prova retirado do descompactador.

(AKZONOBEL, 2017)

Para cada corpo-de-prova aplicou-se a emulsão de asfalto a taxa de  $1,0\text{l/m}^2$ , escolhida ao acaso no intervalo entre  $0,8$  e  $1,6\text{l/m}^2$  (Fig. 13). Esta faixa é aplicada para o uso do asfalto diluído, e é calculada através de experimentos no campo na hora da aplicação (*As built*). Os valores e cálculos são mencionados na especificação DNIT nº144/2010 – Pavimentação asfáltica – Imprimação com ligante asfáltico convencional – Especificação de Serviço.

Figura 13 - Fotografia da aplicação da emulsão asfáltica no corpo-de-prova



(AKZONOBEL, 2017)

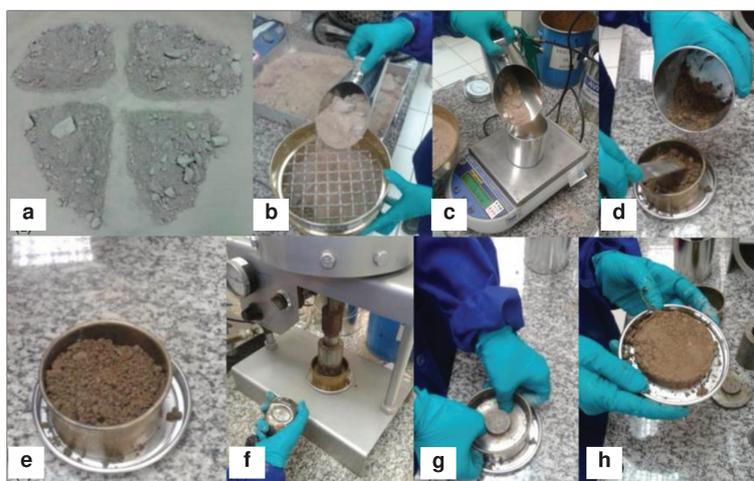
Após 24 horas, os moldes foram submetidos ao rompimento para a determinação da espessura de penetração, que foi obtida através da média de cinco medidas realizadas nos pedaços utilizando paquímetro digital.

#### **4.5 Compactação da Amostra no Compactador SBR e Teste de Penetração**

A avaliação dos resultados de imprimação foi feita pelo uso de corpos-de-prova preparados na Prensa Elétrica Marshall e também por corpos-de-prova preparados em uma prensa menor, Schulze-Breuer Ruck (SBR). Este método foi desenvolvido em laboratório com o intuito de ter uma resposta mais rápida, já que requer uma amostra menor de fácil logística e permite controlar pressão e tempo de compressão.

A amostra de solo foi quarteada e peneirada em malha 19mm. A 150g desta, pesada em um pote de alumínio, foi acrescentada a quantidade de água correspondente ao teor de umidade ideal do solo em questão. A mistura foi agitada, colocada em um molde, e compactada a 1,5bar por 30 segundos, e então descompactada (Fig. 14). Após o corpo-de-prova pronto, foi aplicada a emulsão de asfalto e o produto padrão chamado CM-30 à taxa de 1,0 l/m<sup>2</sup> (Fig. 15).

Figura 14 - Fotografia do processo de compactação pelo compactador SBR



(a) Amostra quarteada; (b) Peneiração da amostra em malha 19mm; (c) Pesagem da amostra; (d) Mistura sendo colocada em molde; (e) Molde com amostra de solo e água em teor de umidade ideal; (f) Compactação em prensa Schulze-Breuze-Breuer Ruck sob cronometragem; (g) Descompactação; (h) Corpo-de-prova pronto.

(AKZONOBEL, 2017)

Figura 15 - Fotografia do processo do teste de imprimação no molde pelo SBR



(AKZONOBEL, 2017)

#### **4.6 Análise fotográfica no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**

Os corpos-de-prova utilizados para avaliar a imprimação foram submetidos a análises fotográficas, capturadas em Microscópio Eletrônico de Varredura localizado no Laboratório de Caracterização de Biomassa, Recursos Analíticos e Calibração (LRAC) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas. Cada amostra foi fotografada sob ampliação de 55, 100 e 250 vezes.

Nas fotografias, o pedaço do corpo-de-prova recoberto pelo asfalto, mais escuro, está na parte superior da foto, enquanto que na parte inferior está o solo sem asfalto.

#### **4.7 Fluorescência por Raio-X**

Os teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, na calibração ROC-1 (rochas), relativa à análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X (Marca Bruker, modelo S8 Tiger). Tais análises químicas foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica, no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico encontra-se os resultados dos testes feitos nas emulsões asfálticas, solo e teste de aplicação (imprimação) – acompanhadas da discussão dos resultados obtidos.

### 5.1 Emulsões asfálticas

Analisou-se as emulsões asfálticas, a partir de uma série de testes, com o objetivo de garantir a qualidade e a eficiência da planta piloto durante sua produção.

#### 5.1.1 Determinação do resíduo, peneira e tamanho de partícula

Nas emulsões asfálticas, foram realizados testes de resíduo conforme norma ASTM D 6997-04, para comprovação da quantidade desejada na formulação; teste de peneira conforme norma ASTM D 6933-08, para quantificação das partículas grandes ou não emulsionadas na emulsão; medição de pH ABNT NBR 6299; e também a viscosidade Saybolt/Furol conforme ABNT MB 581/71. Os resultados estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados para testes resíduo, peneira e pH

	EPF-1	EPF-2	EPF-3	EPF-4	EPF-5	EPF-6
Teste de Peneira (% em peso)	0,007	0,002	0,003	0,004	0,003	0,0015
Teste de Resíduo (%peso)	51,69	51,79	52,00	51,68	51,26	55,57
pH da Emulsão Final	6,23	5,88	5,79	6,62	6,2	6,2
Viscosidade Saybolt/Furol (segundos)	11,00 ± 1,25	11,33 ± 0,47	11,00 ± 0,81	9,67 ± 0,47	12,67 ± 0,47	12,33 ± 0,47

## 5.2 Solo

Para preparação dos corpos-de-prova onde seriam realizados os testes de imprimação, foi determinado teor ideal da umidade do solo. Eles foram compactados nas prensas Marshall e SBR, métodos comparados estatisticamente de forma que posteriormente somente a prensa SBR foi utilizada no preparo de amostras para avaliação dos fatores que influenciam em um processo de imprimação.

### 5.2.1 Determinação da umidade ideal do solo

Conforme método descrito pelo DNER nº162/94 – Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas, foi realizada a curva de compactação dos solos com o objetivo de determinar seu teor ideal de umidade. Os solos testados foram originários de três regiões diferentes: Peru/Lima, Paraná/Marialva e São Paulo/Paulínia.

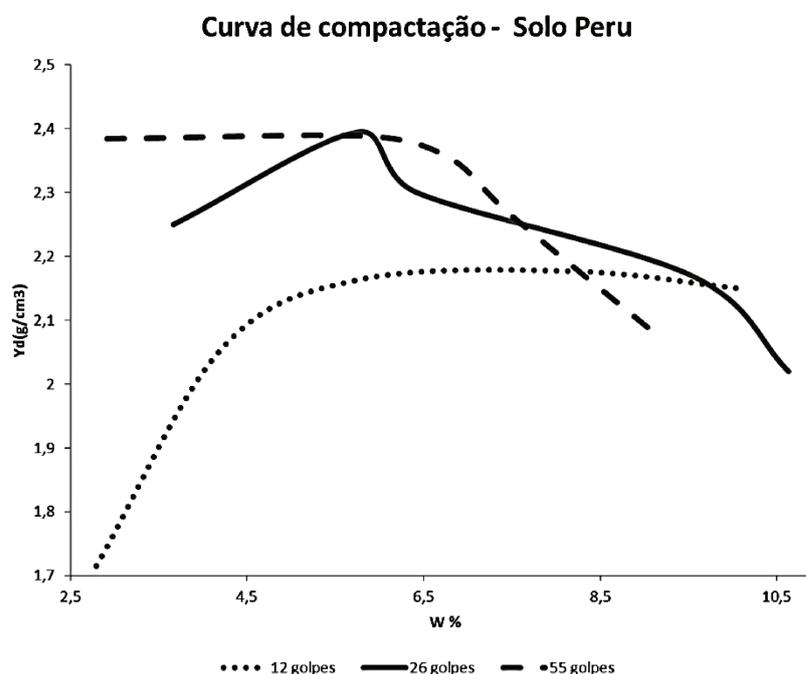
Os testes foram realizados em triplicatas, a partir das quais foram calculadas médias exibidas nos Apêndices (A a F). Os cálculos para determinação da umidade do solo (h) estão descritos no item 4.2.1.

#### 5.2.1.1 Umidade ideal do solo Peru/Lima

Segundo a norma DNER 162/94, a massa específica aparente máxima do solo seco é determinada pela ordenada máxima da curva de compactação; enquanto que o valor correspondente da abscissa é a sua umidade ótima naquele determinado solo e energia de compactação. Portanto, a massa específica aparente máxima deste solo é de  $2,195 \text{ g/cm}^3$  e seu teor ideal de umidade é de 5,90%.

Quando utilizada uma energia de 26 golpes, o teor de umidade diminuiu para 4,95% e a quantidade de massa específica aparente máxima aumentou para  $2,40 \text{ g/cm}^3$ . Para uma energia de 55 golpes, o teor de umidade diminuiu para 4,45% e a massa específica aparente manteve-se o mesmo no valor de  $2,41 \text{ g/cm}^3$  (Fig. 16). Os resultados estão descritos nos Apêndices A e B.

Figura 16 - Comparação das curvas de compactação da amostra Peru/Lima quando aplicada energia de 12, 26 e 55 golpes

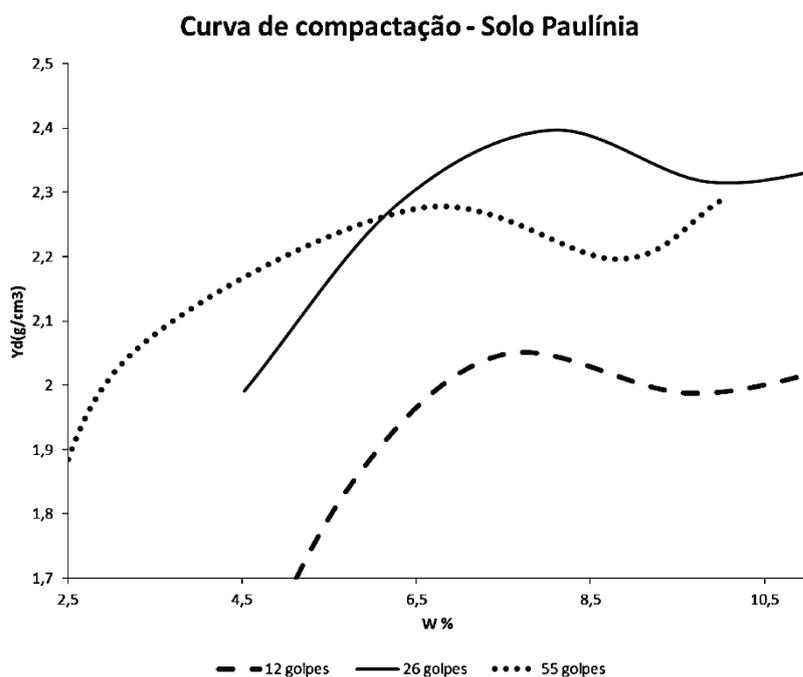


Podemos observar que o teor de umidade é inversamente proporcional à quantidade de massa específica aparente e que, conforme a energia de compactação é aumentada o teor de umidade é reduzido.

### 5.2.1.2 Umidade ideal do solo Brasil/São Paulo/Paulínia

Sob energia de 12 golpe, a massa específica aparente máxima do solo Brasília/São Paulo/Paulínia é de  $2,05g/cm^3$  e seu teor ideal de umidade é de  $7,80\%$ . Quando foi utilizada energia de 26 golpes, o teor de umidade diminuiu para  $7,60\%$  e a quantidade de massa específica aparente máxima aumentou para  $2,40g/cm^3$ . Para uma energia de 55 golpes, o teor de umidade aumentou para  $8,15\%$  e a massa específica aparente manteve-se o mesmo no valor de  $2,40g/cm^3$  (Fig. 17). Os resultados estão descritos nos Apêndices C e D.

Figura 17 - Comparação das curvas de compactação da amostra Paulínia quando aplicada energia de 12, 26 e 55 golpes

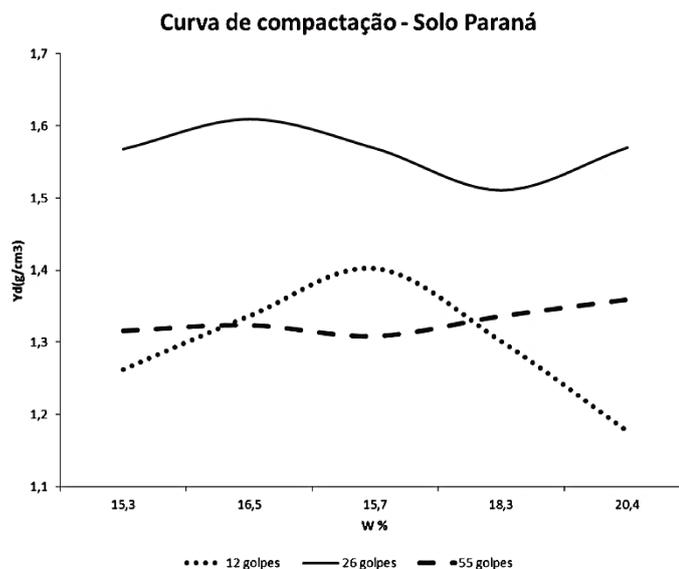


A variação de umidade em relação à energia de compactação inferior e superior foi mínima. Entretanto, ao aumentar a energia para 55 golpes houve um aumento significativo do teor de umidade.

### 5.2.1.3 Umidade ideal do solo Brasil/Paraná/Marialva

Para energia de 12 golpes, a massa específica aparente máxima é de  $1,39\text{g/cm}^3$  e o teor ideal de umidade é de 15,5%. Quando utilizada energia de 26 golpes, o teor de umidade diminuiu para 8,75% e a quantidade de massa específica aparente máxima aumentou para  $1,60\text{g/cm}^3$ . Para uma energia de 55 golpes, o teor de umidade aumentou para 9,87% e a massa específica aparente diminuiu para  $1,35\text{g/cm}^3$ . Os resultados estão descritos nos Apêndices E e F.

Figura 18 - Comparação das curvas de compactação da amostra Paraná quando aplicada energia de 12, 26 e 55 golpes



É possível observar que para teores de umidade alta se tem baixos valores de massa específica aparente.

### 5.3 Comparação dos métodos de compactação Marshall vs. SBR

As emulsões asfálticas citadas neste trabalho foram submetidas ao teste de imprimação ou penetração no solo em dois tipos de corpos-de-prova diferentes, sendo um deles compactado pela prensa Marshall e o outro pelo Compactador Schulze-Breuer Huck (SBR). Os resultados de tempo de secagem da amostra, e da profundidade em milímetros que a emulsão asfáltica atingiu dentro do solo compactado pelo Marshall e também pelo SBR estão descritos nas tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Resultados da imprimação para amostras preparadas na prensa Marshall

Teste	Solo	Solvente	Compactação (golpes)	Umidade	Surfactante	Tempo (h)	Média Penetração (mm)
1	Paulínia	Redicote PR	12	7,8	Redicote E-11+Berol 260	120	0,64
2	Peru	Redicote PR	12	5,9	Redicote E-11+Berol 260	96	1,50
3	Paulínia	Óleo de cozinha	12	7,8	Redicote E-11+Berol 260	120	0,40
4	Paulínia	Óleo de carro	12	7,8	Redicote E-11+Berol 260	120	0,48

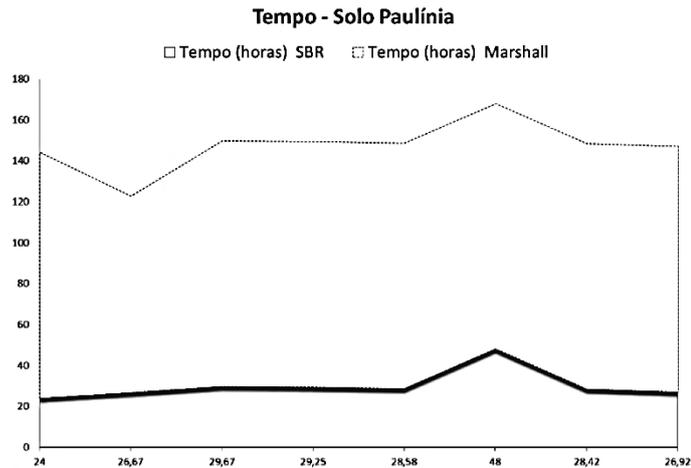
5	Paulínia	Redicote PR	26	7,6	Redicote E-11+Berol 260	120	0,54
6	Paulínia	Redicote PR	55	8,15	Redicote E-11+Berol 260	120	0,43
7	Paulínia	Redicote PR	12	5	Redicote E-11+Berol 260	120	0,49
8	Paulínia	Redicote PR	12	11	Redicote E-11+Berol 260	120	0,5

Tabela 6- Resultados da imprimação para amostras preparadas no compactador SBR

Teste	Solo	Solvente	Compactação (bar)	Umidade	Surfactante	Tempo (h)	Média Penetração (mm)
1	Paulínia	Redicote PR	1,5	7,8	Redicote E-11+Berol 260	24	0,80
2	Peru	Redicote PR	1,5	5,9	Redicote E-11+Berol 260	26,67	1,77
3	Paulínia	Óleo de cozinha	1,5	7,8	Redicote E-11+Berol 260	29,67	0,44
4	Paulínia	Óleo de carro	1,5	7,8	Redicote E-11+Berol 260	29,25	0,46
5	Paulínia	Redicote PR	3,0	7,8	Redicote E-11+Berol 260	28,58	0,51
6	Paulínia	Redicote PR	4,0	7,8	Redicote E-11+Berol 260	48	0,52
7	Paulínia	Redicote PR	1,5	5,8	Redicote E-11+Berol 260	28,42	0,62
8	Paulínia	Redicote PR	1,5	10,8	Redicote E-11+Berol 260	26,92	0,61

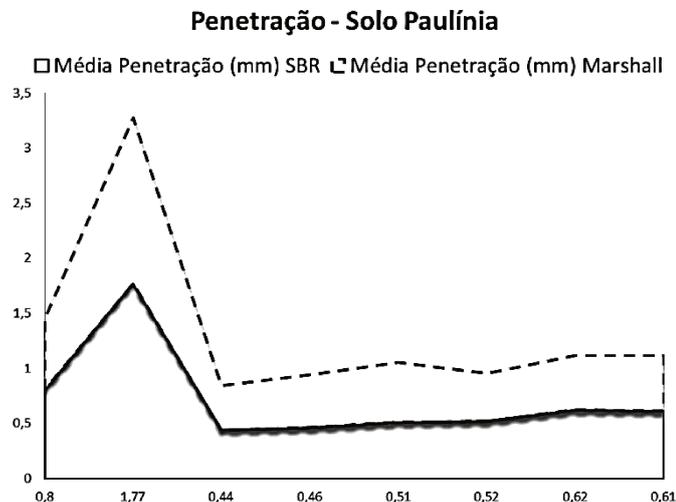
O tempo de secagem foi diferente entre as amostras: as preparadas na prensa Marshall demorou cerca de cinco dias, enquanto que na SBR demorou cerca de dois dias (Fig. 19).

Figura 19 - Comparação do tempo de penetração da imprimação feita em corpos-de-prova preparados na prensa Marshall e na SBR, utilizando amostra Paulínia



A profundidade de penetração da emulsão asfáltica foi semelhante entre os dois métodos de compactação (Fig. 20).

Figura 20 - Comparação da profundidade penetração da emulsão asfáltica feita em corpos-de-prova preparados na prensa Marshall e na SBR, utilizando amostra Paulínia

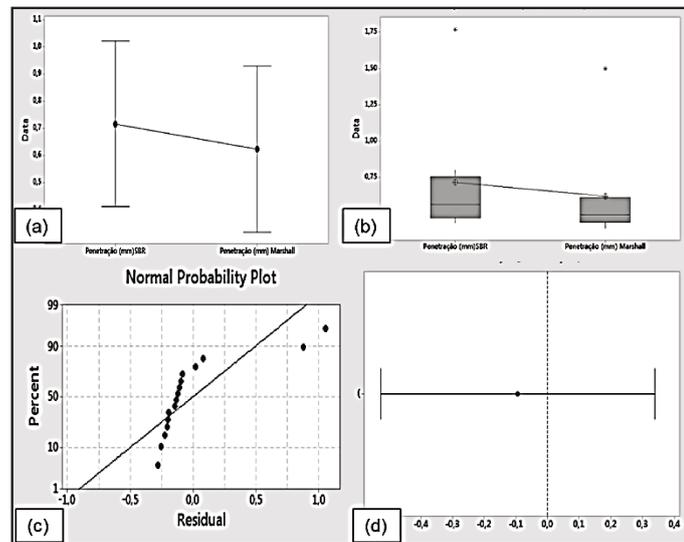


Além de o compactador SBR utilizar menos matéria-prima (cerca de 150g) do que a Marshall (800g a 1kg de amostra), ele também é mais seguro, evitando riscos à saúde do pesquisador, mais leve e mais fácil de manusear – exigindo menor esforço físico. Com ele, é possível otimizar o processo e obter resultados mais rápidos.

### 5.3.1 Avaliação Estatística

A partir do teste de Hipótese ANOVA, na opção *OneWay* pelo software *Minitab* v.17, avaliou-se estatisticamente a diferença de desempenho quanto à profundidade de penetração, independentemente de parâmetros como tensoativo, solo, pressão de compactação, umidade e tempo, entre a prensa Marshall e o compactador SBR. Não houve diferença significativa entre os dois métodos ( $p = 0,694$ ;  $\alpha = 0,05$ ), de forma que a hipótese de que Marshall e SBR têm eficiência similar é provada, sendo substituíveis uma pelo outra. Tal resultado está representado nos gráficos da Figura 21, onde percebe-se que os pontos estão próximos no gráfico de resíduo obtido, gerando confiança nos dados obtidos.

Figura 21 – Gráficos da avaliação estatística para comparação de desempenho entre prensa Marshall e SBR



- (a) Intervalo de valores de profundidade de penetração; (b) Boxplot de profundidade de penetração; (c) Valores de resíduo para penetração; (d) Método Turkey para penetração.

Além disso, foi realizado o teste estatístico *t-student* para a variação de penetração e de tempo, e com intuito de oferecer um maior embasamento para o teste ANOVA – um artigo mais detalhado sobre essa temática foi publicado (Apêndice G). Ambos testes provaram que o método SBR equivale ao método

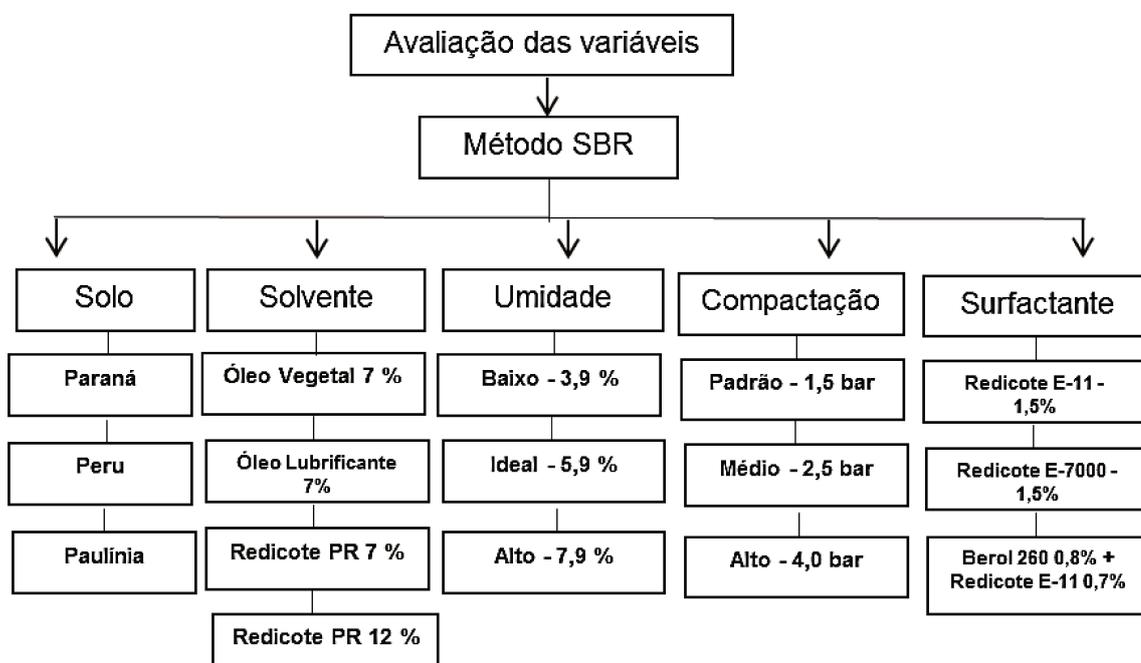
Marshall - com a substituição da desta por aquela, há economia de tempo e de matéria-prima e maior ergonomia.

## 5.4 Avaliação da imprimação – penetração

Com o objetivo de avaliar a influência da pressão de compactação, da umidade do solo, solvente, tensoativo e diferenças de solo na imprimação, foi realizada uma série de testes com aplicação das emulsões asfálticas nas amostras de solo. Os corpos-de-prova foram compactados pelo Método SBR somente, uma vez que foi provado estatisticamente era equivalente ao Marshall.

Após a aplicação e secagem da emulsão nos corpos-de-prova, sua penetração foi quantificada em cinco pontos da mesma amostra, utilizando um paquímetro. Os resultados foram usados para calcular uma média de penetração e as amostras analisadas em triplicata.

Figura 22 - Diagrama dos testes de imprimação



Foram analisados seis parâmetros que poderiam influenciar na penetração da emulsão asfáltica: tipo e umidade de solo, solvente, pressão de compactação e surfactante. Para cada um deles, foi estabelecido um padrão tendo como variável o parâmetro a ser analisado.

Na avaliação influência das mudanças de solo, foram utilizados os provenientes de Paulínia/Brasil, Lima/Peru e Paraná/Brasil. Nesses, foi utilizada a mesma emulsão asfáltica (EPF-4), sob pressão de 1,5bar por 30 segundos, com a umidade ideal para cada solo.

Na avaliação da interferência do solvente, o padrão foi solo proveniente do Peru, pressão de compactação 1,5bar por 30 segundos, umidade de 5,9% (ideal) e surfactantes Redicote E-620 e Redicote E-11, variando o solvente entre: Redicote PR, óleo vegetal recuperado ou óleo lubrificante rerrefinado de uso em carros.

Para avaliação da umidade do solo, o padrão foi solo proveniente do Peru, solvente Redicote® PR, surfactantes Redicote® E-620 e Redicote® E-11, e pressão de compactação 1,5 bar; sendo que a variável foi avaliada sob 3,9% (baixa), 5,9 % (ideal) e 7,9% (alta) de umidade.

Os corpos-de-prova que foram utilizados para avaliação da influência de pressão de compactação foram feitos com solo do Peru, solvente Redicote® PR, surfactantes Redicote® E-620 e Redicote® E-11 e umidade 5,9% - variando pressão em 1,5; 2,5 e 4bar por 30 segundos.

Os corpos-de-prova utilizados para avaliação da influência de diferentes surfactantes foram feitos com solo do Peru, solvente Redicote® PR, pressão de compactação 1,5bar e umidade do solo 5,9% - variando surfactantes entre Redicote® E-7000, Redicote® E-11 e a mistura de Redicote® E-11 com Redicote® E-620.

A lista de testes de imprimação realizados, com avaliação dos parâmetros que poderiam influenciar em sua eficiência, estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Esquema dos testes de imprimação classificados por números

<b>N° Amostra</b>	<b>Solo</b>	<b>Solvente</b>	<b>Compactação (bar)</b>	<b>Umidade</b>	<b>Surfactante</b>
1	Paulínia	Redicote® PR	1,5	7,8	Redicote E-11+Berol 260
2	Peru	Redicote® PR	1,5	5,9	Redicote E-11+Berol 260
<b>N° Amostra</b>	<b>Solo</b>	<b>Solvente</b>	<b>Compactação (bar)</b>	<b>Umidade</b>	<b>Surfactante</b>
3	Paraná	Redicote® PR	1,5	15,5	Redicote E-11+Berol 260

4	Peru	Óleo vegetal	1,5	5,9	Redicote E-11+Berol 260
5	Peru	Óleo lubrificante	1,5	5,9	Redicote E-11+Berol 260
6	Peru	Redicote® PR	2,5	5,9	Redicote E-11+Berol 260
7	Peru	Redicote® PR	4,0	5,9	Redicote E-11+Berol 260
8	Peru	Redicote® PR	1,5	3,9	Redicote E-11+Berol 260
9	Peru	Redicote® PR	1,5	7,9	Redicote E-11+Berol 260
10	Peru	Redicote® PR	1,5	5,9	Redicote E-11
11	Peru	Redicote® PR	1,5	5,9	Redicote E-7000

#### 5.4.1 Influência da variação do solo

O solo proveniente de Paulínia não teve resultados satisfatórios quanto à penetração da emulsão no solo (Fig 23) e uma das camadas de asfalto ficou na superfície do corpo-de-prova, indicando que a emulsão asfáltica não penetrou de forma uniforme no solo – o que também ocorreu com o solo do Paraná. Contudo, foi o solo que secou mais rápido dentre as três amostras (Fig. 24).

Figura 23 - Resultados de profundidade de penetração da emulsão asfáltica em diferentes tipos de solo

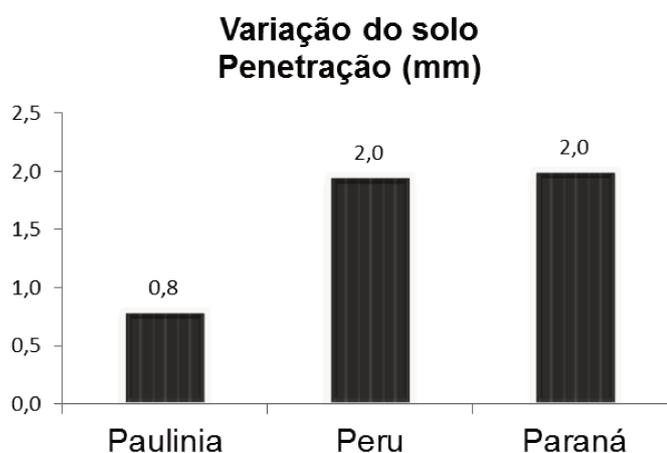
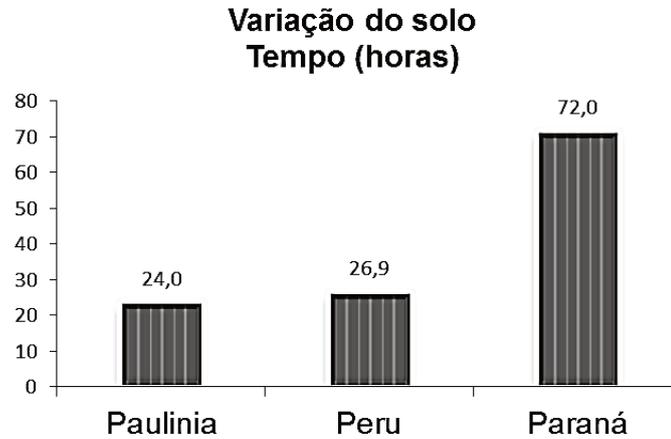
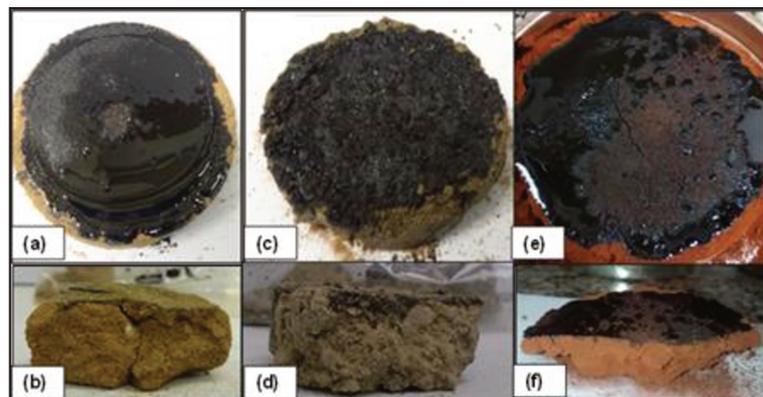


Figura 24 - Resultados de tempo para penetração da emulsão asfáltica em diferentes tipos de solo



O solo Paraná foi o de processo mais demorado para penetração da emulsão asfáltica, enquanto que o solo Peru/Lima não precisou de um tempo tão longo, apresentando ainda assim maior valor de penetração, sem camada de asfalto em sua superfície. Os corpos-de-prova foram cortados ao meio a profundidade de penetração da emulsão foram fotografadas no MEV na resolução 250 (Fig. 25), se forma que é possível observar sua estrutura cristalina.

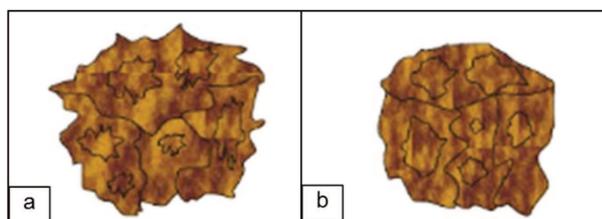
Figura 25 - Fotografias das amostras feitas de imprimação feitas em diferentes tipos de solo



(a) Camada de asfalto na superfície do solo Paulínia; (b) Corpo-de-prova do solo Paulínia; (c) Superfície do solo Peru livre de camada de asfalto; (d) Camada de asfalto na superfície do solo Peru; (e) Camada de asfalto na superfície do solo Paraná; (f) Corpo-de-prova do solo Paraná.

O grão do solo com estrutura em blocos (Fig. 26) possui altura, largura e espessura quase iguais e superfície plana. Essa estrutura é dividida em blocos angulares, onde as faces da estrutura possuem ângulos vivos; e blocos subangulares, nos quais os ângulos entre as faces são menos definidos e um pouco mais arredondados. Tais solos são geralmente encontrados nos horizontes subsuperficiais e nos solos argissolos, nitossolos e chernossolos (CAPECHE, 2008).

Figura 26: Representação esquemática das estruturas do grãos do solo

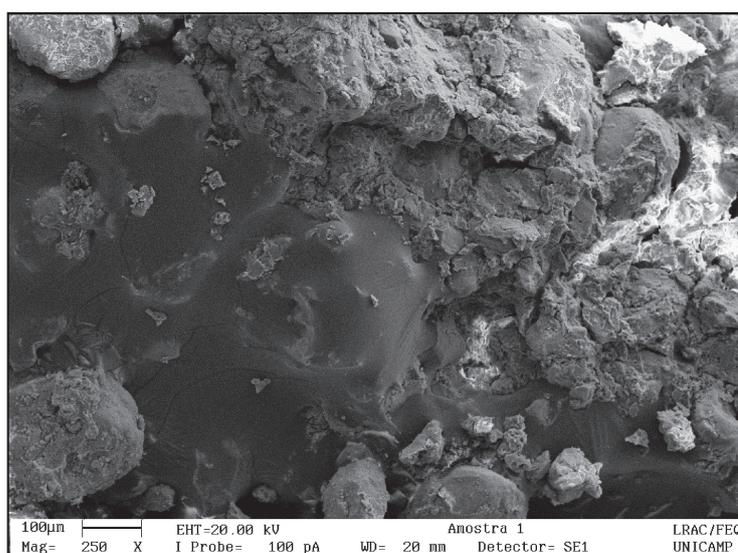


(a) Bloco angular; (b) Bloco subangular

(CAPECHE, 2008)

O solo de Paulínia, de acordo com as imagens feitas no MEV apresentaram estrutura em blocos (Fig. 27) – comprovada pela existência de dióxido de silício e óxido de alumínio, característicos de argissolos (CAPECHE, 2008) e detectados por fluorescência de raio-x (Tabela 6).

Figura 27 - Micrografia do solo Paulínia (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

Outra estrutura observada é a granular (Fig. 28), que possui três dimensões iguais de superfície arredondada, sendo mais comum na superfície do solo por formar grumos. Sua formação está relacionada com a presença de matéria orgânica e com atividade biológica no solo, sendo rica em óxido de ferro e de alumínio (CAPECHE, 2008).

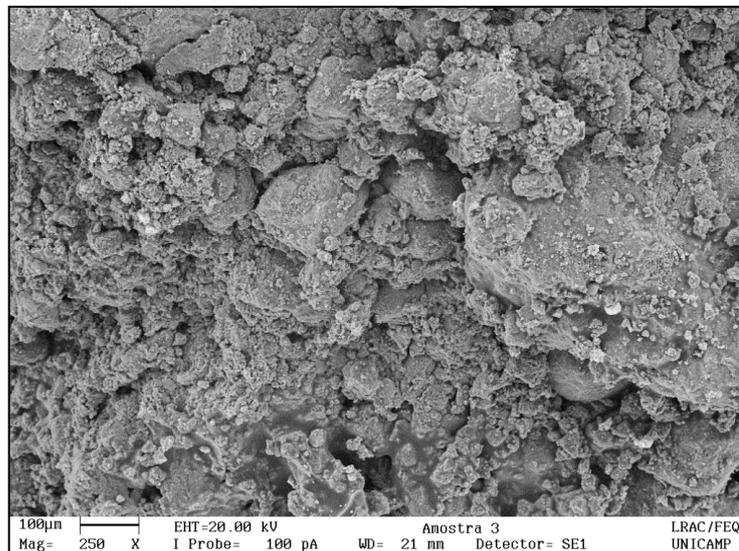
Figura 28 - Representação esquemática da estrutura de solo tipo granular



(CAPECHE, 2008)

O solo do Paraná, de acordo com as imagens feitas no MEV e por a fluorescência de raio-x ter detectado que ele é rico em óxido de ferro e óxido de alumínio, apresenta estrutura granular (Fig. 29).

Figura 29 – Micrografia do solo Paraná (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

A terceira estrutura observada é a laminar (Fig. 30), que possui dimensões horizontais maiores que as verticais – assemelhando-se à lâminas -, de espessura variável. Essa estrutura está mais presente nos horizontes e camadas

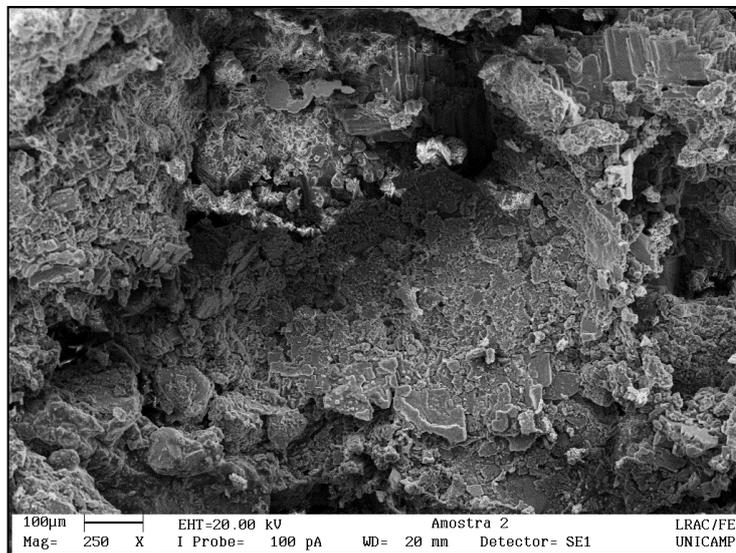
mais superficiais dos solos, sendo que algumas vezes podem ser encontradas em horizontes mais profundos e nos solos argissolo e planossolo (CAPECHE, 2008). O Solo do Peru, de acordo com as imagens feitas no MEV, apresenta estrutura laminar (Fig. 31).

Figura 30 - Representação esquemática de estrutura de grão do tipo laminar



(CAPECHE, 2008)

Figura 31 – Micrografia do solo Peru (ampliação 250x)

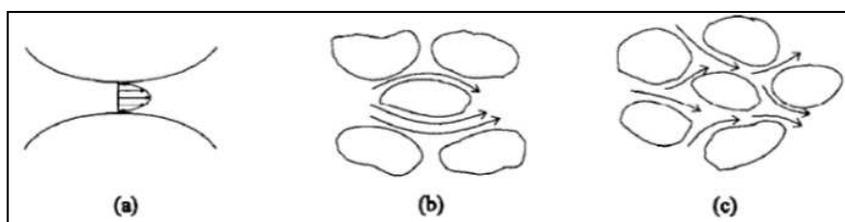


(UNICAMP, 2017)

Os corpos-de-prova com estrutura granular ou em blocos demandaram maior tempo de secagem, e também não tiveram penetração total da emulsão asfáltica no solo. A amostra que apresentou maior valor de penetração em menor tempo foi àquela feita com o solo do Peru/Lima que possui estrutura em lâminas.

A dispersão mecânica ocorre por três mecanismos: o primeiro ocorre em canais individuais, que devido à rugosidade e superfície dos poros as moléculas estão mais próximas dos grãos e têm maior atrito, de forma que elas se movem mais lentamente. O segundo é dependente do tamanho dos poros na trajetória de componentes entre os poros do solo, sendo que sua velocidade varia de acordo com a área de contato entre o fluido e a superfície rugosa. O terceiro está relacionado ao comprimento da trajetória de fluxo (Fig. 32) (THOMÉ *et al.*, 2013).

Figura 32 - Mecanismos físicos de mistura mecânica em escala microscópica



(a) Dispersão por canais individuais, de baixa velocidade; (b) Dispersão dependente do tamanho dos poros, sua velocidade é dependente da área de contato; (c) Dispersão relacionada com o comprimento da trajetória de fluxo.

(THOMÉ *et al.*, 2013)

A partir dessas informações, é possível explicar porque as emulsões asfálticas atingem profundidades maiores em tempos mais curtos quando o solo é laminar: devido à sua área de contato. A superfície de contato da estrutura laminar é menor, de forma que uma lâmina é sobreposta à outra – consequentemente, o tamanho dos poros vazios entre as lâminas é maior, assim como a velocidade de escoamento da emulsão asfáltica. Os grãos com estrutura granular ou em blocos possui uma área de contato maior, de forma que os vazios entre as partículas são menores, diminuindo a velocidade de escoamento da emulsão asfáltica.

#### 5.4.2 Influência da variação do solvente

A emulsão asfáltica feita com óleo lubrificante rerrefinado foi a de penetração menos profunda (Fig. 33) e mais demorada (Fig. 34). A emulsão feita com óleo vegetal recuperado foi o segundo melhor no quesito absorção de emulsão asfáltica, que levou um longo período de cerca de três dias - enquanto que a

emulsão preparada com Redicote® PR demorou um dia e duas horas para secagem no solo e penetrou 1,96mm. Além disso, seu corpo-de-prova apresentou uma superfície lisa e seca, diferentemente da amostra com óleo vegetal recuperado (Figura 35c) e com óleo lubrificante rerrefinado (Fig. 35).

Figura 33 - Resultados da profundidade de penetração da emulsão asfáltica com diferentes tipos de solvente

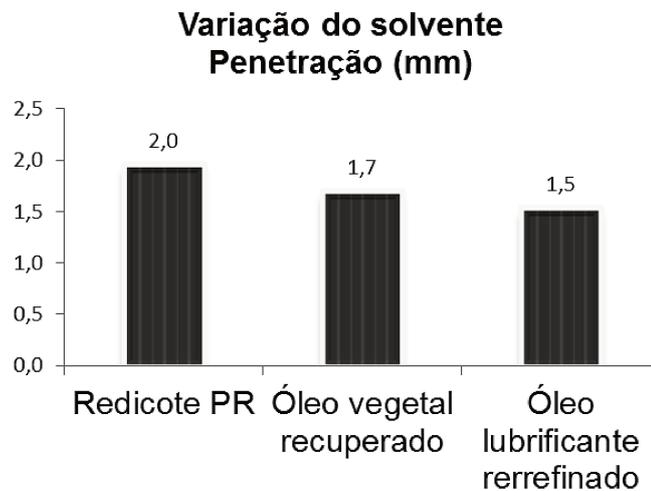
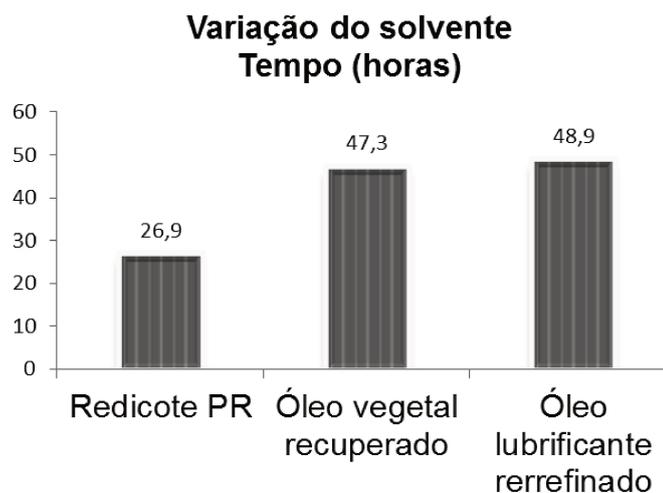


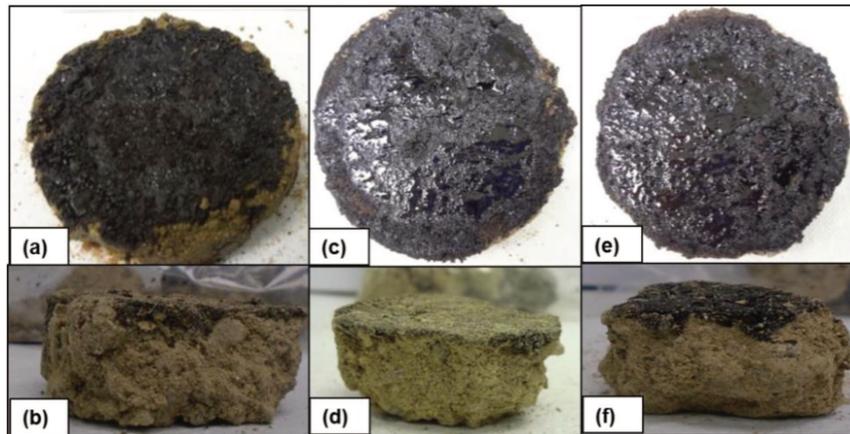
Figura 34 - Resultados de tempo de penetração da emulsão asfáltica com diferentes tipos de solvente



Ao analisar a micrografia do corpo-de-prova com emulsão preparada com solvente baseado em Sebonitrila (Redicote® PR), percebe-se que o asfalto se

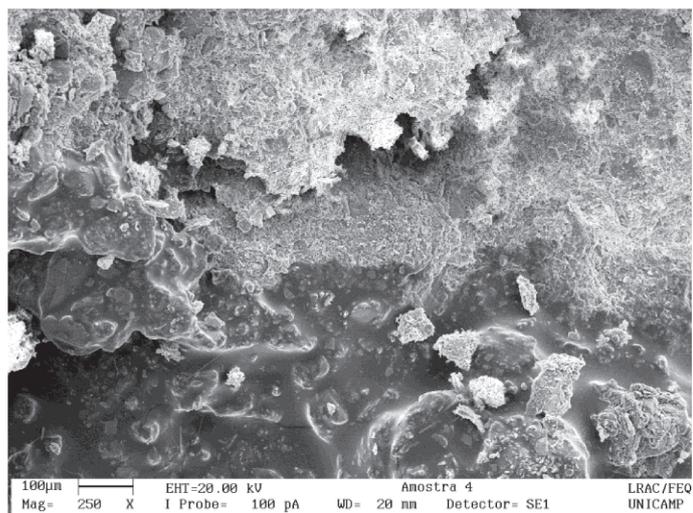
distribuiu de maneira uniforme entre as partículas do solo, sem acúmulo entre elas (Fig. 31).

Figura 35 - Fotografias dos corpos-de-prova feitos com o solo Peru e emulsões preparada com diferentes tipos de solvente



(a) Corpo-de-prova com emulsão contendo Redicote PR, de superfície lisa e seca; (b) Corpo-de-prova com emulsão contendo Redicote® PR; (c) Camada de asfalto na superfície do corpo-de-prova feito com emulsão contendo óleo vegetal recuperado; (d) Corpo-de-prova com emulsão contendo óleo vegetal recuperado; (e) Camada de asfalto na superfície do corpo-de-prova com emulsão contendo óleo lubrificante rerrefinado; (f) Corpo-de-prova com emulsão contendo óleo lubrificante rerrefinado.

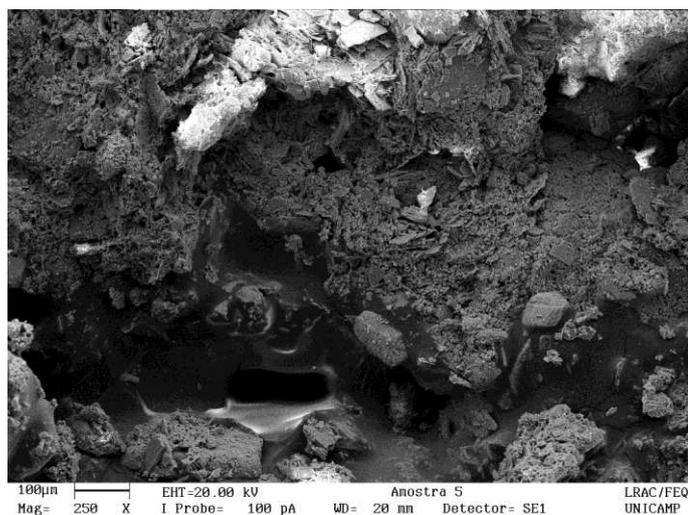
Figura 36 - Micrografia da amostra formulada com óleo vegetal (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

É possível observar camada asfáltica na superfície dos corpos-de-prova (Fig. 35) que na micrografia apresentaram acúmulo de asfalto entre seus grãos. Aquele preparado utilizando óleo vegetal apresentou esse acúmulo (Fig. 36), porém menos que o formulado com óleo lubrificante rerrefinado (Fig. 37).

Figura 37 - Micrografia da amostra preparada com óleo lubrificante rerrefinado (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

O tamanho d50 dessas partículas é de 2,58µm para a emulsão asfáltica feita com Redicote® PR; 2,79µm para emulsão com óleo vegetal e 2,92µm para a emulsão com óleo lubrificante (Tabela 5) e seus valores de penetração foram de 1,96mm; 1,70mm e 1,54mm respectivamente – fenômeno que ocorreu devido à dificuldade de penetração ser proporcional ao tamanho da partícula: quanto maior a partícula, menor sua profundidade de penetração.

Tabela 5 - Tamanho de partícula das emulsões asfálticas

Tile (%)	Tamanho da partícula (µm)		
	EPF-01 Redicote® PR	EPF-02 Óleo Vegetal	EPF-03 Óleo lubrificante
10	0,902	0,909	0,910
20	1,375	1,478	1,549

Tile (%)	Tamanho da partícula ( $\mu\text{m}$ )		
	EPF-01	EPF-02	EPF-03
	Redicote® PR	Óleo Vegetal	Óleo lubrificante
30	1,773	1,968	2,099
40	2,160	2,387	2,523
50	2,578	2,789	2,921
60	3,06	3,23	3,36
70	3,72	3,78	3,93
80	4,78	4,62	4,86
90	7,20	6,46	7,45
95	12,10	11,56	12,95

### 5.4.3 Influência da variação da umidade

O valor de umidade abaixo (3,9%) e acima (7,9%) do ideal do solo causa a diminuição da penetração da emulsão asfáltica. Além disso, o tempo para secagem e completa penetração aumenta drasticamente (Fig. 39).

Figura 38 - Resultados de profundidade de penetração da emulsão asfáltica em solos com diferentes teores de umidade

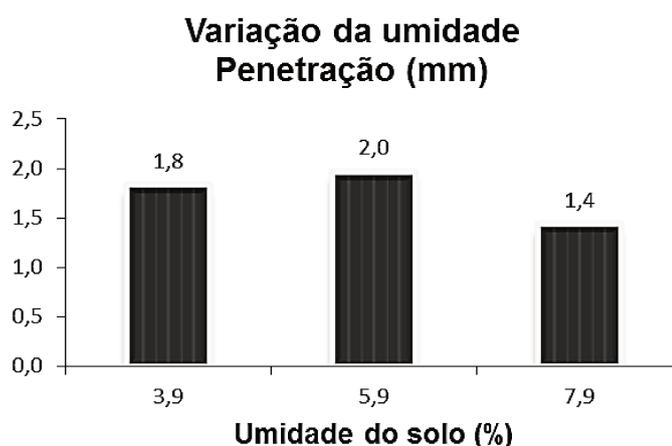
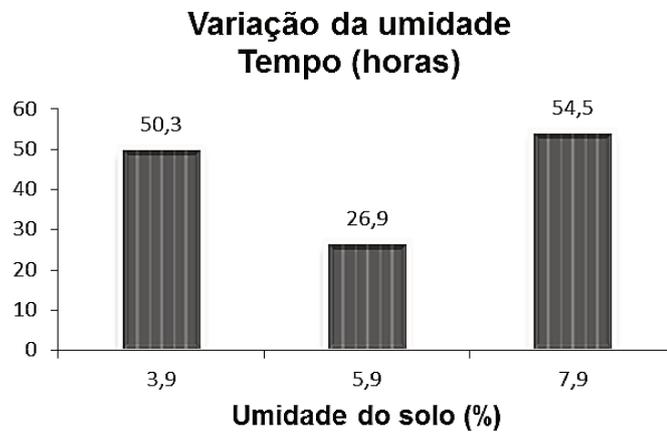
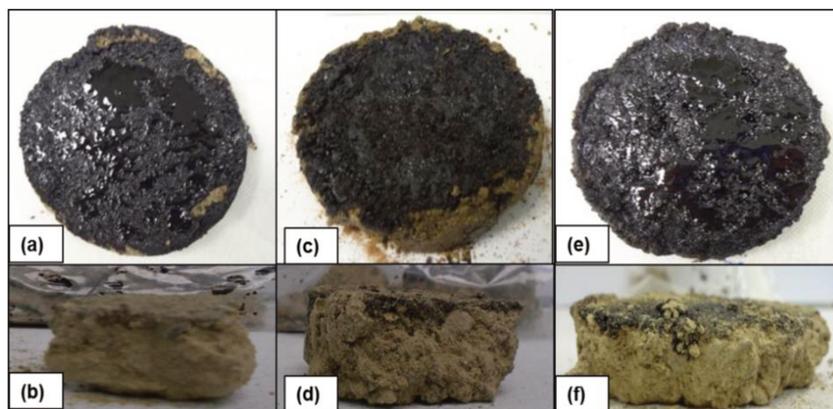


Figura 39 - Resultados de tempo necessário para penetração da emulsão asfáltica em solos com diferentes teores de umidade



O corpo-de-prova com menor teor umidade apresentou camada asfáltica em sua superfície, assim como aquele com teor elevado, indicando penetração não uniforme e incompleta. A amostra com teor de umidade ideal não apresentou camada asfáltica, indicando que houve completa e uniforme penetração da emulsão (Fig. 40).

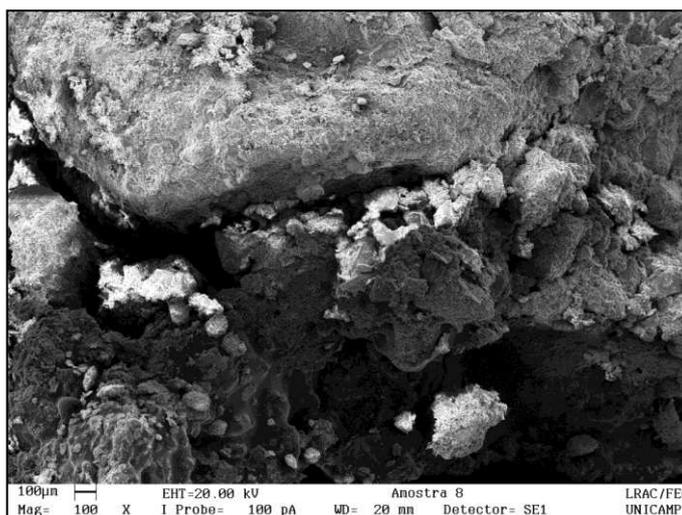
Figura 40: Fotografias dos corpos-de-prova feitos com solo Peru e diferentes teores de umidade



(a) Camada asfáltica na superfície do solo com baixo teor de umidade; (b) Corpo-de-prova com baixo teor de umidade; (c) Corpo-de-prova com teor ideal de umidade, livre de camada asfáltica; (d) Corpo-de-prova com teor ideal de umidade; (e) Camada asfáltica na superfície do solo com alto teor de umidade; (f) Corpo-de-prova com alto teor de umidade

Estruturas laminares são porosas e pobres em microporos, de forma que – em um meio onde há pouca água – a quantidade de partículas secas do solo e poros vazios são maiores. Conseqüentemente, esses estão livres para serem preenchidos pela água presente na emulsão asfáltica, comprometendo a qualidade da imprimação. Em suma, na amostra com teor de umidade aquém do ideal, a água da emulsão foi absorvida para dentro do solo, de forma que o asfalto foi forçado a parar nos vazios logo no início de seu trajeto, diminuindo a profundidade de penetração. Esse fenômeno é visível na Figura 41, onde a parte mais escura é o solo com emulsão asfáltica e a parte mais clara é o solo nu. Nesta, a emulsão atingiu somente metade do corpo-de-prova e também mostrou alguns espaços (os vazios) com acúmulo de asfalto.

Figura 41 – Micrografia do solo com baixo teor de umidade (ampliação 100x)

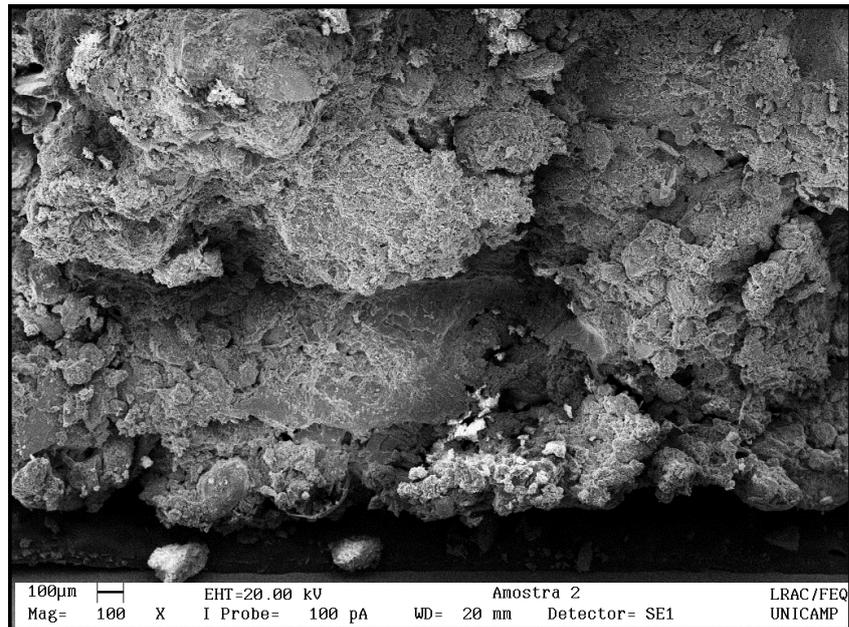


(UNICAMP, 2017)

Quando o solo tem teor de umidade ideal, as partículas laminares são preenchidas pela água, sem saturação, de forma que a emulsão de asfalto percorre somente pelos poros vazios existentes entre suas partículas. Desta forma, a emulsão se espalha uniformemente por todo o corpo-de-prova.

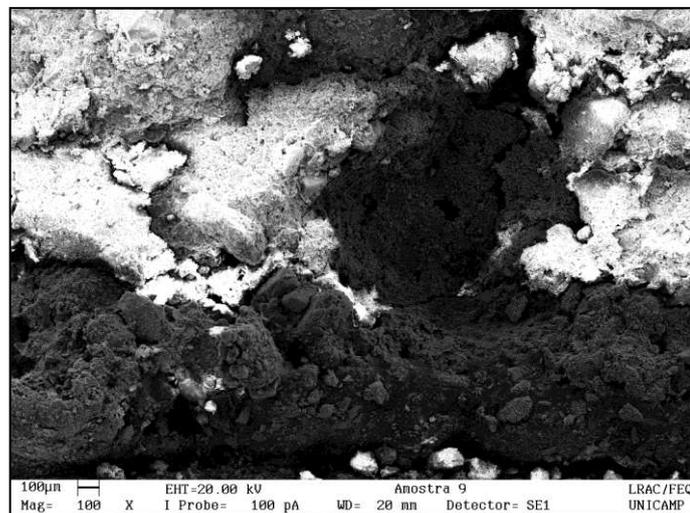
Na Figura 42, observa-se na amostra apenas uma única cor escura, referente à região completamente preenchida pela emulsão asfáltica – sem acúmulo ou déficit representado por partes mais claras que seriam as partículas do solo não atingidas. Pode-se inferir que os resultados da imprimação são mais significativos quando o solo adequadamente úmido.

Figura 42 – Micrografia do solo com teor de umidade ideal (ampliação 100x)



(UNICAMP, 2017)

Figura 43 – Micrografia do solo com alto teor de umidade (ampliação 100x)



(UNICAMP, 2017)

No solo com umidade além do ideal ocorre a saturação do sistema, pois a água preenche todos os poros e/ou microporos, comprometendo a penetração da emulsão asfáltica. Na Figura 43, observa-se que o solo com água em excesso apresentou penetração não uniforme, pois a emulsão asfáltica (parte mais escura)

se concentrou na superfície e penetrou apenas em alguns pontos. As partes claras representam partículas do solo sem asfalto.

#### 5.4.4 Influência da variação da pressão de compactação

O corpo-de-prova no qual foi aplicada uma pressão menor 1,5bar apresentou uma penetração mais profunda da emulsão no solo (Fig. 44). Com aumento da pressão de compactação, menor foi a profundidade de penetração e maior foi o tempo necessário para secagem (Fig. 45).

Figura 44 - Resultados de profundidade de penetração da emulsão asfáltica em solos sob diferentes pressões de compactação

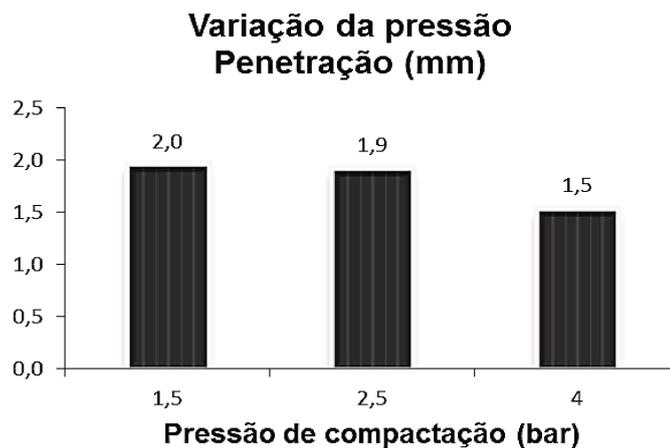
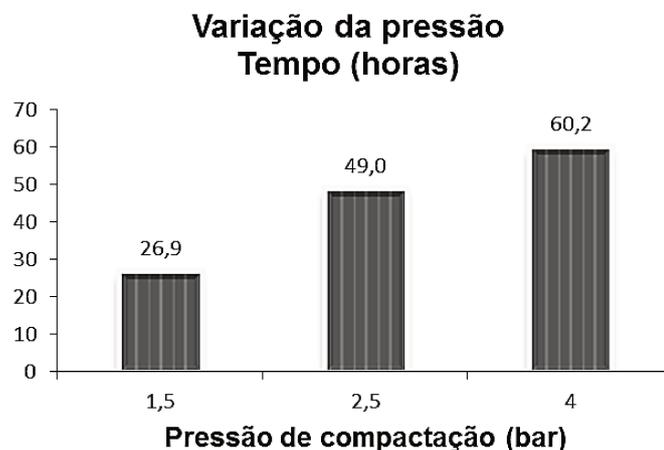
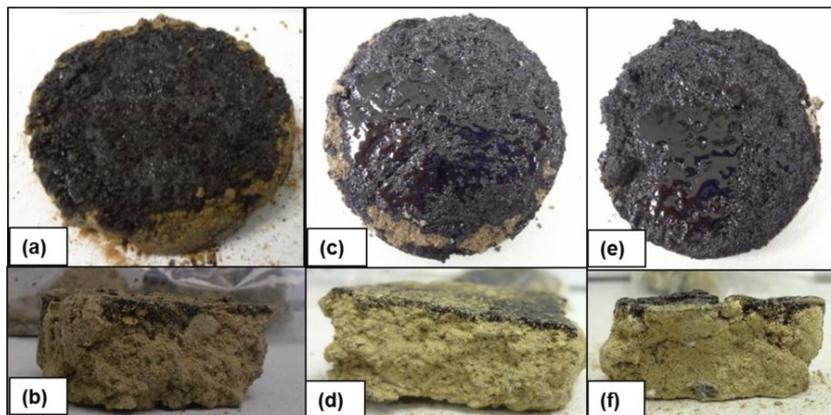


Figura 45 - Resultados de tempo necessário para penetração da emulsão asfáltica em solos sob diferentes pressões de compactação



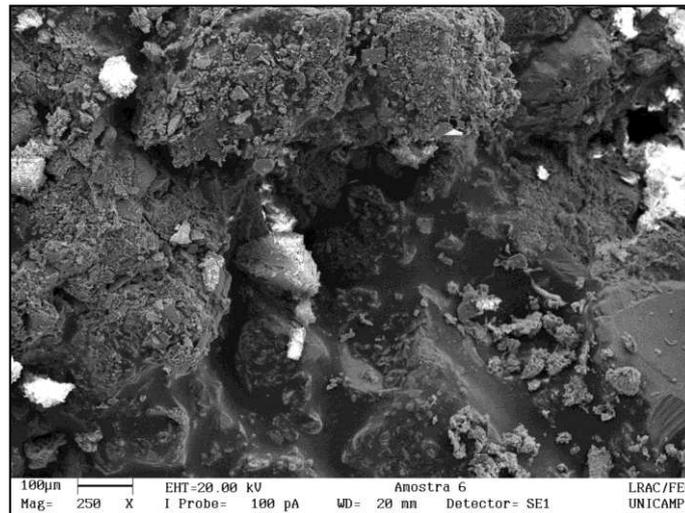
A superfície do solo compactado com 1,5bar estava uniforme e sem camada de asfalto aparente, diferentemente das demais amostras (compactadas à 2,5 e 4,0bar) que apresentaram camada de asfalto, indicando baixa absorção da emulsão (Fig. 46).

Figura 46 - Fotografias dos corpos-de-prova feitos com o solo Peru sob diferentes pressões de compactação



(a) Superfície do corpo-de-prova compactado à 1,5bar livre de camada de asfalto; (b) Corpo-de-prova compactado à 1,5bar; (c) Camada asfáltica na superfície do corpo-de-prova compactado à 2,5bar; (d) Corpo-de-prova compactado à 2,5bar; (e) Camada asfáltica na superfície do corpo-de-prova compactado à 4,0bar; (f) Corpo-de-prova compactado à 4,0bar.

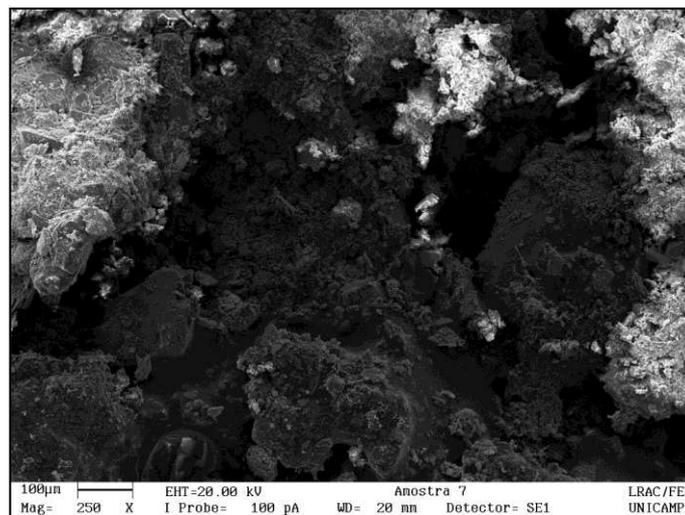
Figura 47 - Micrografia do solo compactado à 2,5bar (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

As estruturas laminares do solo compactado à 1,5bar permaneceram praticamente intactas (Fig. 31), enquanto que com o aumento da pressão elas foram se desfragmentando – diminuindo o tamanho dos grãos, aumentando a superfície de contato com as partículas, e diminuindo os poros vazios entre elas –, de modo que houve menor penetração da emulsão asfáltica no solo (Fig. 47 e 48).

Figura 48 - Micrografia do solo compactado à 4,0bar (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

#### 5.4.5 Influência da variação do surfactante

O corpo-de-prova ao qual foi aplicada emulsão asfáltica com Redicote® E-7000 (alquilamina) apresentou maior profundidade de penetração no solo (Fig. 49), entretanto foi uma das que mais demorou em finalização deste processo. Enquanto a amostra com Redicote® E-11/Redicote® E-620 (Berol® 260) levou um dia e duas horas para total penetração, a amostra com Redicote® E-7000 demorou dois dias e três horas (Fig. 50).

A amostra com somente o Redicote® E-11 (quaternário de amônia) foi a de pior resultado, tendo apresentado baixa profundidade de penetração no solo (Fig. 49) em um tempo significativamente alto: dois dias e quatorze horas (Fig. 50). Com a adição de Redicote® E-620 (álcool graxo etoxilado), houve uma queda drástica no tempo necessário e um aumento na profundidade de penetração da emulsão asfáltica no solo.

Figura 49 - Resultados de profundidade de penetração de emulsão asfáltica preparada com diferentes surfactantes

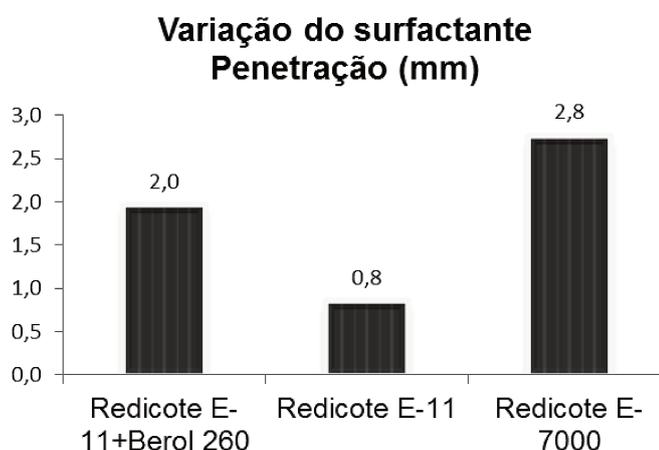
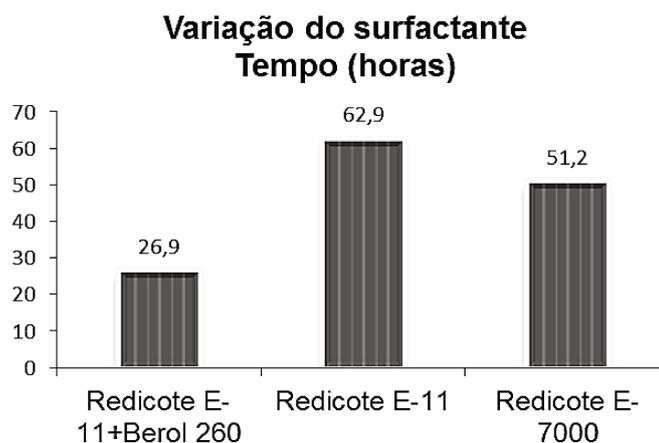
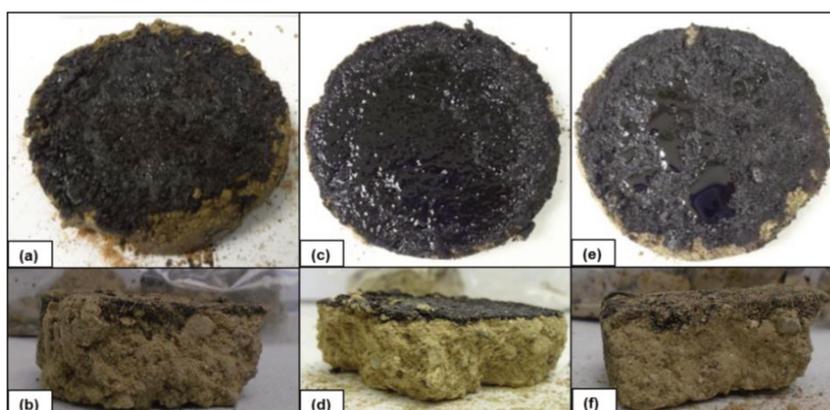


Figura 50 - Resultados do tempo necessário para penetração de emulsão asfáltica preparada com diferentes surfactantes



O corpo-de-prova feito com emulsão asfáltica baseado em Redicote® E-11 e Redicote® E-620 não apresentou nenhuma camada asfáltica em sua superfície, indicando completa penetração do asfalto no solo. As amostras nas quais foram aplicadas emulsões asfáltica com Redicote® E-11 ou com Redicote® E-7000 apresentaram camada asfáltica na superfície do solo, sendo que o corpo-de-prova com somente Redicote® E-11 foi visualmente o solo que apresentou maior camada asfáltica em sua superfície (Fig.51).

Figura 51 - Fotografias dos corpos-de-prova variando o surfactante

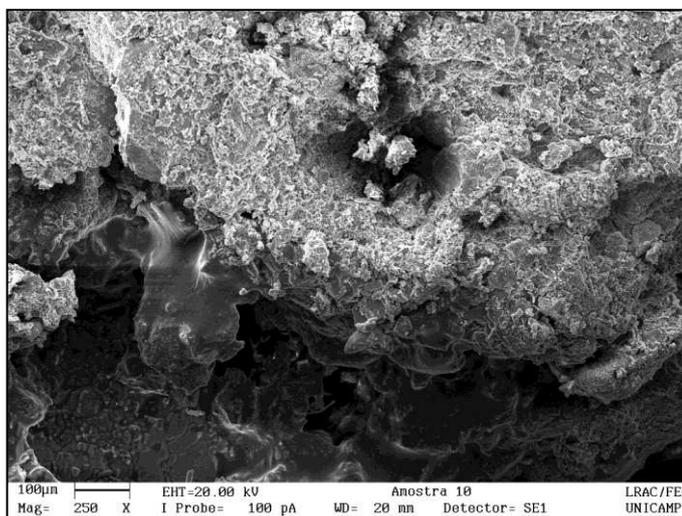


(a) Superfície do corpo-de-prova com emulsão baseada em Redicote® E-11 e Redicote® E-620 livre de camada asfáltica; (b) Corpo-de-prova com emulsão baseada em Redicote® E-11 e Redicote® E-620; (c) Camada asfáltica sobre superfície do corpo-de-prova com emulsão à base de Redicote® E-11; (d) Corpo-de-prova com emulsão à base de Redicote® E-11; (e) Camada asfáltica sobre superfície do corpo-de-prova com emulsão à base de Redicote® E-7000; (f) Corpo-de-prova com emulsão à base de Redicote® E-7000.

Os resultados acima indicam que surfactantes catiônicos, como sais quaternários de amônia, não são os mais adequados para imprimação em solos com índices de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , principalmente dióxido de silício, óxido de ferro III, óxido de alumínio III, óxido de cálcio e óxido de sódio. Na micrografia do corpo-de-prova onde foi aplicada a emulsão asfáltica à base de Redicote® E-11, é possível observar um acúmulo de asfalto entre os poros dos grãos do solo (Fig. 52).

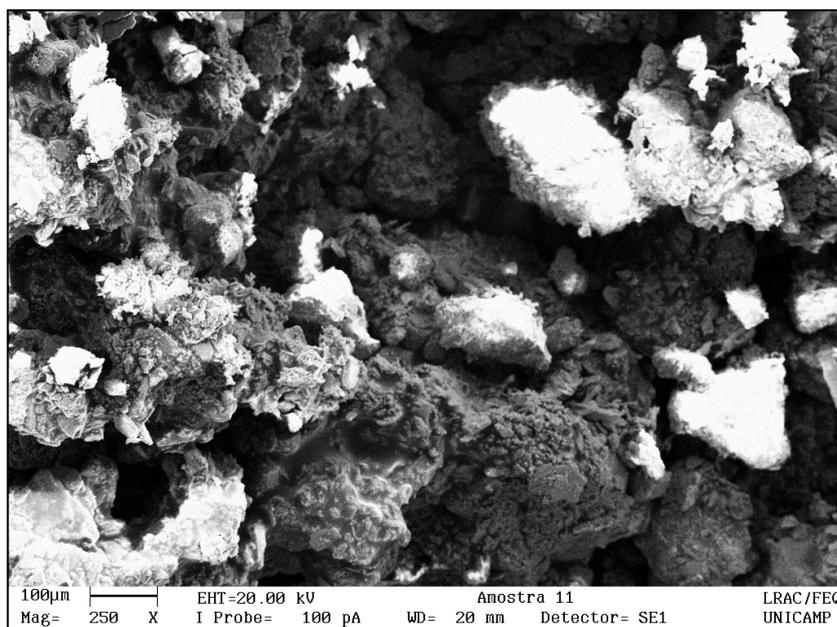
Somente o sal quaternário de amônia (Redicote® E-11) não é suficiente para boa eficiência de absorção do asfalto no solo, e foram obtidos melhores resultados com a adição de um álcool etoxilado (Redicote® E-620). Na micrografia do corpo-de-prova onde foi aplicada emulsão com essa mistura, é visível que o asfalto está distribuído uniformemente entre as partículas do solo (Fig. 31). Essa formulação foi considerada uma inovação no campo de pesquisa do asfalto, pois não havia sido ainda testada e registrada em outros trabalhos.

Figura 52 – Micrografia do corpo-de-prova com emulsão asfáltica à base de Redicote® E-11 (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

Figura 53 – Micrografia do corpo-de-prova com emulsão asfáltica à base de Redicote® E-7000 (ampliação 250x)



(UNICAMP, 2017)

Uma alquilamina ( $\text{NH}_2$ ) é outro surfactante eficiente no caso de um solo rico em dióxido de silício, óxido de ferro III, óxido de alumínio III, óxido de cálcio e óxido de sódio, com estrutura laminar. A alquilamina utilizada, o surfactante Redicote® E-7000, também apresentou uma absorção boa e uniforme do asfalto no solo (Fig. 53), porém exigindo o dobro do tempo necessário para secagem da amostra que a mistura do sal de amônia quaternária com álcool graxo etoxilado (Redicote® E-11 + Redicote® E-620). É necessário um estudo mais profundo e detalhado sobre o comportamento dos componentes químicos nas formulações de imprimação e sua eficiência.

Após uma série de testes comprovou-se que o produto Redicote® E-620 aumenta a eficiência da emulsão no processo de imprimação, provando assim, sua eficiência.

Redicote® E-620 (Berol® 260) apresentou alto valor de penetração em menor tempo, aumentando a eficiência da emulsão no processo de imprimação, sendo portanto o surfactante de melhor desempenho dentre os analisados.

Durante o processo de desenvolvimento da pesquisa de mestrado, este produto foi oferecido no mercado como teste, obtendo resultados positivos, grande aceitação, e pedidos de venda da formulação que ainda estava em fase de teste. Assim, antes do término da pesquisa, o produto Redicote® E-620 foi inserido no portfólio da empresa Akzonobel no mercado de asfalto.

## 5.5 Análise química dos solos – Fluorescência por raio-X

A composição química das três amostras de solo analisadas está descrita na Tabela 6. O dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) está presente nas três amostras de solo analisadas. Sendo que o solo Paulínia é o que tem maior porcentagem de sílica em sua composição, e uma pequena quantidade de óxido de ferro III (1,90%) e óxido de alumínio III (5,63%). Essa maior porcentagem de sílica torna o solo mais carregado de cargas negativas.

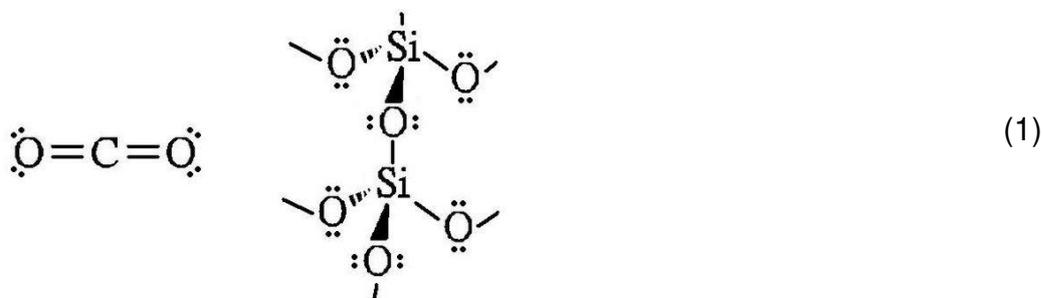
O solo Paraná apresentou maior quantidade de óxido de ferro III (28,5%), similar à porcentagem de dióxido de silício (27,4%) e pouco maior que a porcentagem de óxido de alumínio III (24,7%). Apresentou também um pouco de dióxido de titânio (4,38) – este solo possui tanto cargas negativas quanto positivas.

O solo proveniente do Peru tem dióxido de silício (46,8%) predominante em sua composição, além de óxido de alumínio III (12,4%), óxido de cálcio (9,33%), óxido de ferro III (7,72%), óxido de sódio (5,27%), óxido de magnésio (2,56%) e um pouco de óxido de potássio (1,60%). Este solo é mais carregado positivamente.

Tabela 6 – Resultados da análise química dos solos em espectrômetro de fluorescência de raios-X

Amostra (%)	Solo Peru	Solo Paulínia	Solo Paraná
$\text{SiO}_2$	46,8	88,0	27,4
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12,4	5,63	24,7
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,72	1,90	28,5
MnO	<0,10	<0,10	0,25
MgO	2,56	<0,10	0,26
CaO	9,33	<0,10	0,16
$\text{Na}_2\text{O}$	5,27	<0,10	<0,10
$\text{K}_2\text{O}$	1,60	<0,10	<0,10
$\text{TiO}_2$	0,67	0,47	4,38
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,14	<0,10	0,22

Além da carga positiva, a sílica também pode conter uma densidade de cargas negativas, pois seus oxigênios não compartilhados formam pares solitários, como representado na estrutura de Lewis na Fórmula (1). Como o oxigênio é mais eletronegativo que a sílica (3,44 e 1,90, respectivamente – formulação de Linus Pauling), é formada uma nuvem de cargas negativas (ATKINS, 2003).



Isso faz com que o solo que tem mais dióxido de silício em sua composição possua maior densidade de cargas negativas. O oxigênio também é mais eletronegativo que o alumínio (1,61), fósforo (2,19) e magnésio (1,31). Já, manganês, ferro, titânio, potássio, cálcio e sódio são mais eletropositivos, sendo o manganês e o ferro os componentes químicos mais eletropositivos dentre os mencionados (ATKINS, 2003).

Quando um componente químico com carga negativa é absorvido pelo solo por fluxo de massa, e o mesmo está carregado de cargas negativas, o componente é repellido por essas cargas iguais mantendo-se solúvel (SANTOS, 2004). Esse fenômeno acontece com a emulsão asfáltica carregada de carga positiva que, ao entrar em contato com o solo de carga negativa, é retido pela afinidade entre as cargas.

Os componentes alumínio e ferro são mais eletropositivos (ATKINS, 2003), portanto não impedem a passagem do componente catiônico. Isso acontece nos solos do Peru e do Paraná, que têm uma quantidade menor de sílica e têm outros componentes além da sílica. O solo do Peru que é composto por mais químicos eletropositivos em sua composição, obteve maior valor de penetração da emulsão asfáltica no solo em menor tempo.

Os resultados acima indicam que, para o solo granular ou em blocos, a quantidade de sílica dificulta a penetração do asfalto e a presença de outros componentes como o óxido de ferro e alumínio III facilitam sua absorção.

Já, a presença de sílica em quase metade da composição (46,8%) no solo proveniente do Peru não dificultou a penetração da emulsão asfáltica, por ter outros componentes eletropositivos em sua composição e principalmente por possuir estrutura laminar.

## 6 CONCLUSÃO

A aplicação da emulsão asfáltica nos solos do Paraná e Paulínia (ambos localizados no Brasil), com estrutura granular e em blocos respectivamente, não foi completamente satisfatória - já que exigiram maior tempo de secagem e apresentaram menor absorção do asfalto no solo quando comparado à amostra da região de Lima, no Peru, que possui estrutura laminar.

Foram observados pontos relevantes, como aumento do diâmetro das partículas das emulsões asfálticas quando utilizado os solventes à base de óleo vegetal e lubrificante, sendo essa característica um obstáculo para a absorção do produto no solo. Quando foram realizados testes com a emulsão a base de Redicote® PR, o resultado obtido foi menores partículas e melhor absorção da emulsão no solo.

Constatou-se que a umidade ideal faz com que haja melhor penetração da emulsão e pontos mais altos nos resultados. As partículas do solo absorvem a quantidade certa de água, sem saturação, e desta forma a emulsão asfáltica percorre somente nos poros vazios. Ao aumentar a quantidade de água, além do teor ideal, a profundidade de penetração diminuiu significativamente e aumentou o tempo de secagem – devido à saturação de água no sistema. Já, ao diminuir a umidade do solo, os grãos ficaram secos e a água da emulsão asfáltica foi absorvida, ocorrendo acúmulo de asfalto no início de seu trajeto, dificultando a passagem da emulsão asfáltica.

Quanto maior a pressão de compactação, menor a penetração da emulsão asfáltica, pois no solo que sofreu maior pressão as estruturas cristalinas são desfragmentadas aumentando a área de superfície - diminuindo o tamanho das lacunas entre os grãos.

Somente o sal quaternário de amônia como tensoativo não é o suficiente para boa absorção da emulsão de asfalto no solo, entretanto, ao adicionar um álcool etoxilado 4 EO (Redicote® E-620) o resultado foi excepcionalmente melhor. O tensoativo alquilamina (Redicote® E-7000) apresentou boa absorção no solo, porém despendeu maior tempo de secagem da amostra.

Em relação à composição química dos solos pode-se concluir que a emulsão asfáltica, carregada de carga positiva, ao entrar em contato com o solo de carga negativa é retida, devido à afinidade entre as cargas.

Com os dados apresentados, é possível direcionar as empresas, pesquisadores e demais envolvidos na temática, sobre quais formulações utilizar de acordo com a estrutura e composição dos solos, já que são características de grande influência no processo de imprimação, que não deve ser feito em solo úmido. Recomenda-se o uso de emulsões asfálticas com menor tamanho de partículas e a inserção de solventes em sua formulação, que não as aumentem.

A pesquisa apresenta que os testes em laboratórios podem ser realizados em prensa SBR, e que esse equipamento possibilita usar menos matéria prima e ter resultados mais rápidos.

Foi possível concluir que a formulação de emulsão com Redicote® E-11 e Redicote® E-620 (Berol® 260) apresenta ótimos resultados de desempenho no processo de imprimação, e foi, durante a pesquisa um novo produto inserido no mercado de asfalto e no catálogo da Akzonobel.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6997-04: Standard Test Method for Distillation of Emulsified Asphalt. West Conshohocken, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6933-08: Standard Test Method for Oversized Particles in Emulsified Asphalts - Sieve test. West Conshohocken, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6299: Emulsões Asfálticas – Determinação do pH. Rio de Janeiro, 2005. 2p.

ATKINS, P. W.; SHRIVER, D.F. Química Inorgânica. 3ª ed., Porto Alegre: Editora Bookman, 2003, 808p

BARTH, E. Asphalt Science and Technology. 1ª ed., Amsterdam: Editora Gordon and Breach Science Publishers, 1968, 700p

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 581.71: Viscosidade Saybolt/Furol de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, 2007.2p.

BERNUCCI, B. I. L.; GORETTI, M. L.; CERATTI, P. A. J.; SOARES B. J. Pavimentação Asfáltica formação básica para Engenheiros. 1ª ed., Rio de Janeiro: Abeda, 2008.501p.

CAPECHE, C. L.; Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista. EMBRAPA. Comunicado técnico ISSN 1517-5685, V. 51, 6 p., Rio de Janeiro, 2008.

CHIESA, M.; INGEBRIGTSEN, S.; MELHEIM, J. A.; HEMMINGSEN, P. V.; HANSEN, E. B. Investigation of the role of viscosity on electrocoalescence of water droplets in oil, Separation and Purification Technology, Amsterdam, v. 50, n. 2, p. 267–277, jun. 2006.

CROSS e SHRESTHA. Guideline for Using Prime and Tack Coat. Central Federal Lands. Lakewood Highway Division. Report nº FHWA-CFL/TD-05-002.2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 144/2010 - ES: Pavimentação asfáltica – Imprimação com ligante asfáltico convencional – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010. 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 165/2013: Emulsão Asfáltica para Pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013. 5p.

GODOI, D. L. Estudo do comportamento dos ligantes asfálticos utilizados na imprimação asfáltica relacionados à emissão de VOC's. Dissertação de mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2011.

JAMES, A. Asphalt emulsions (Chemistry and concepts). In: ASPHALT TECHNOLOGY CONFERENCE OF THE AMERICAS, 2., 1998, Texas. Anais...Texas: Akzonobel, 1998. p 1-6.

LOGARAJ, S. Formulacion de emulsiones para imprimación y riego de liga con bajo contenido de solventes. XVI CILA, Rio de Janeiro, v. 01, n. 1, p. 134-139, 2005.

PRIMAVESI, A. Manejo Ecológico do Solo. 1ª ed., São Paulo: Editora Novel, 2002, 552p

PETERSEN, C. J. Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability, Developments in Petroleum Science, Amsterdam, v. 40, n. 2, p. 363-399, 2000.

RABELO, A. N. Contribuição ao estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

RAMALHO, W. R. Avaliação em laboratório da utilização de emulsão com óleo de xisto na imprimação de solos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SANTOS, D.M.M. Absorção e transporte de íons. UNESP, Jaboticabal, 2004, 9p. Apud. PERES, L.E.P. Nutrição Mineral de Plantas. Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz. USP

SILVA, B., T., A.; VASCONCELOS, M., A., G.; BARROSO, S., H., A. Avaliação do potencial do biodiesel como diluente alternativo na imprimação betuminosa de misturas de solos/RCD de diferentes granulometrias. XVI CILA, Rio de Janeiro, v. 01, n. 1, p. 149-160, 2011.

THOMÉ, A.; KNOP, A. Movimento de contaminantes no solo. II Simpósio Nac. sobre o uso da água na agricultura. Universidade de passo fundo, 2013. 14 p. Passo fundo.

WALSTRA, P. Encyclopedia of emulsion technology basic theory. 1ª ed., New York: Marcel Dekker, 1983. 127 p.

## APÊNDICE A – Cálculo de massa específica aparente do solo Peru/Lima

Resultados e dados para cálculo da massa específica aparente do solo úmido ( $Y_h$ ) e do solo seco ( $Y_s$ ) para método normal, intermediário e modificado (12, 26 e 55 golpes) para o solo Peru/Lima

Amostras – Mescla Peru/Lima	Quantidade de água (g)	Massa da amostra úmida compactada + Molde (g)	Massa (g) antes da Estufa 110°C - P'h	Altura do molde (cm)	V (cm <sup>3</sup> )	$Y_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Y_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Método normal (12 golpes)	0	5163,1	1537,00	8,600	722,6251227	2,1270	2,07722
	2	5025,2	1399,10	7,400	621,79371	2,250	2,15503
	4	4898,1	1272,00	6,500	546,1701509	2,329	2,19574
	6	4746,6	1120,50	5,800	487,3518269	2,299	2,12092
	8	4588,5	962,40	5,000	420,13089	2,291	2,09069
Método intermediário (26 golpes)	0	5358,4	1780,30	9,4	789,8460644	2,2540	2,2262
	2	5273,8	1695,70	8,6	722,6251227	2,3466	2,2788
	4	5137,8	1559,70	7,5	630,196328	2,4749	2,3740
	6	4984,7	1406,60	6,5	546,1701509	2,5754	2,3880
	8	4853,3	1275,20	6,3	529,3649155	2,4089	2,2185
Método modificado (55 golpes)	0	5229,4	1657,90	8,700	731,0277404	2,2679	2,24089
	2	5120	1548,50	8,200	689,01465	2,247	2,18451
	4	4983,7	1412,20	6,700	562,9753863	2,508	2,40392
	6	4856,4	1284,90	6,400	537,7675332	2,389	2,23021
	8	4731,3	1159,80	6,000	504,15706	2,300	2,11553

## APÊNDICE B – Cálculo de umidade do solo Peru/Lima

Resultados e dados para cálculo da umidade em percentagem para método normal, intermediário e modificado (12, 26 e 55 golpes) para o solo Peru/Lima

Amostras – Mescla Peru/Lima	Quantidade de água (g)	Pote	Pote vazio (g)	Pote + amostra úmida	Amostra úmida (Ph)	Amostra Seca (Ps) + Molde	Amostra Seca (Ps)	h%	h (%)
Método normal (12 golpes)	0	1	45,63	100,12	54,49	98,87	53,24	2,3479	2,3950
		2	46,29	92,97	46,68	91,97	45,68	2,1891	
		3	49,87	105,3	55,43	103,87	54	2,6481	
	2	4	48,44	90,92	42,48	89,08	40,64	4,5276	4,4115
		5	46,58	88,73	42,15	86,97	40,39	4,3575	
		6	45,94	99,68	53,74	97,44	51,5	4,3495	
	4	7	45,85	97,8	51,95	95,13	49,28	5,4180	6,0664
		8	46,03	82,94	36,91	80,73	34,7	6,3689	
		9	46,41	114,45	68,04	110,35	63,94	6,4123	
	6	10	45,7	97,09	51,39	93,56	47,86	7,3757	8,4041
		11	45,73	95,9	50,17	91,61	45,88	9,3505	
		12	47,54	92,54	45	89,02	41,48	8,4860	
	8	13	47,4	116,99	69,59	111,02	63,62	9,3838	9,5674
		14	46,27	124,37	78,1	117,53	71,26	9,5987	
		15	48,28	152,81	104,53	143,55	95,27	9,7197	
Método intermediário (26 golpes)	0	1	46	72,7	26,7	72,39	26,39	1,1747	1,246156
		2	46,21	76,41	30,2	76,01	29,8	1,3423	
		3	47,08	96,8	49,72	96,2	49,12	1,2215	
	2	4	45,89	93,81	47,92	92,35	46,46	3,1425	2,974842
		5	45,51	92,82	47,31	91,53	46,02	2,8031	
		6	46,28	93,64	47,36	92,27	45,99	2,9789	
	4	7	45,89	97,23	51,34	95,79	49,9	2,8858	4,252893
		8	44,23	86,12	41,89	84,13	39,9	4,9875	
		9	50,24	105,63	55,39	103,05	52,81	4,8854	
	6	10	45,69	89,85	44,16	86,47	40,78	8,2884	7,846486
		11	46,62	91,78	45,16	88,49	41,87	7,8577	
		12	49,01	97,38	48,37	94,05	45,04	7,3934	
	8	13	46,63	122,33	75,7	116,33	69,7	8,6083	8,581714
		14	46,2	109,38	63,18	104,33	58,13	8,6874	
		15	45,7	115,78	70,08	110,32	64,62	8,4494	
Método modificado (55 golpes)	0	1	45,91	82,78	36,87	82,35	36,44	1,1800	1,2056
		2	46,39	82,78	36,39	82,29	35,9	1,3649	
		3	44,7	102,22	57,52	101,61	56,91	1,0719	
	2	4	46,44	109,82	63,38	108,09	61,65	2,8062	2,8797
		5	46,17	86,95	40,78	85,78	39,61	2,9538	
		6	46,23	95,9	49,67	94,51	48,28	2,8790	
	4	7	46,69	83,05	36,36	81,29	34,6	5,0867	4,3487
		8	46,21	82,92	36,71	81,18	34,97	4,9757	
		9	46,29	83,91	37,62	82,82	36,53	2,9838	
	6	10	46,33	85,6	39,27	82,84	36,51	7,5596	7,1346
		11	46,46	83,54	37,08	81,22	34,76	6,6743	
		12	49,97	84,05	34,08	81,77	31,8	7,1698	
	8	13	46,88	84,07	37,19	81,01	34,13	8,9657	8,7422
		14	45,49	86,12	40,63	82,71	37,22	9,1617	
		15	46,19	94,64	48,45	91,01	44,82	8,0991	

## APÊNDICE C – Cálculo de massa específica do solo São Paulo/Paulínia

Resultados e dados para cálculo da massa específica aparente do solo úmido ( $Y_h$ ) e do solo seco ( $Y_s$ ) para método normal, intermediário e modificado (12, 26 e 55 golpes) para o solo São Paulo/Paulínia

Amostras – São Paulo/Paulínia	Quantidade de água (g)	Massa da amostra úmida compactada + Molde (g)	Massa (g) antes da Estufa 110°C - P'h	Altura do molde (cm)	V (cm <sup>3</sup> )	Y <sub>h</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Y <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
Método normal (12 golpes)	0	4885,7	1260,80	9,8	823,4565352	1,5311	1,4682
	2	4807,4	1182,50	7,2	604,9884748	1,9546	1,8481
	4	4734,2	1109,30	6	504,1570624	2,2003	2,0473
	6	4650,4	1025,50	5,6	470,5465915	2,1794	1,9875
	8	4542,2	917,30	4,8	403,3256499	2,2743	2,0371
Método intermediário (26 golpes)	0	5030,2	1405,30	8,4	705,8198873	1,9910	1,9910
	2	4965,7	1340,80	7	588,1832394	2,2796	2,2796
	4	4893,7	1268,80	6,3	529,3649155	2,3968	2,3968
	6	4792,6	1167,70	6	504,1570624	2,3161	2,3161
	8	4689,3	1064,40	5,4	453,7413561	2,3458	2,3458
Método modificado (55 golpes)	0	5059,1	1433,40	9,800	823,4565352	1,7407	1,74071
	2	5023,6	1397,90	8,100	680,61203	2,054	2,05389
	4	4982,8	1357,10	7,100	596,5858571	2,275	2,27478
	6	4880,5	1254,80	6,800	571,378004	2,196	2,19609
	8	4818,1	1192,40	6,200	520,96230	2,289	2,28884

## APÊNDICE D – Cálculo de umidade do solo São/Paulínia

Resultados e dados para cálculo da umidade em percentagem para método normal, intermediário e modificado (12, 26 e 55 golpes) para o solo São Paulo/Paulínia

Amostras - São Paulo/Paulínia	Quantidade de água (g)	Pote	Pote vazio (g)	Pote + amostra úmida	Amostra úmida (Ph)	Amostra Seca (Ps) + Molde	Amostra Seca (Ps)	h%	h (%)
Método normal (12 golpes)	0	1	46,61	81,09	34,48	79,66	33,05	4,3268	4,286104
		2	49,04	81,59	32,55	80,26	31,22	4,2601	
		3	46,31	76,58	30,27	75,34	29,03	4,2714	
	2	4	46,13	79,26	33,13	77,4	31,27	5,9482	5,761359
		5	45,51	86,01	40,5	83,8	38,29	5,7717	
		6	46,23	66,72	20,49	65,64	19,41	5,5641	
	4	7	45,65	75,69	30,04	73,58	27,93	7,5546	7,474938
		8	46,23	83,18	36,95	80,6	34,37	7,5065	
		9	46,07	76,98	30,91	74,86	28,79	7,3637	
	6	10	45,73	80,1	34,37	77,08	31,35	9,6332	9,652776
		11	46,61	84,47	37,86	81,16	34,55	9,5803	
		12	47,09	92,25	45,16	88,24	41,15	9,7448	
	8	13	44,56	82,08	37,52	78,23	33,67	11,4345	11,647405
		14	46,34	90,93	44,59	86,51	40,17	11,0032	
		15	45,49	76,98	31,49	73,48	27,99	12,5045	
Método intermediário (26 golpes)	0	1	50,2	76	25,8	74,89	24,69	4,4957	4,524484
		2	46,14	76,52	30,38	75,19	29,05	4,5783	
		3	45,8	71,58	25,78	70,47	24,67	4,4994	
	2	4	46,25	68,68	22,43	67,36	21,11	6,2530	6,266266
		5	46,06	82,15	36,09	80,03	33,97	6,2408	
		6	65,3	95,48	30,18	93,69	28,39	6,3050	
	4	7	64,86	103,61	38,75	100,72	35,86	8,0591	8,045624
		8	64,9	104,61	39,71	101,67	36,77	7,9956	
		9	64,7	98,4	33,7	95,88	31,18	8,0821	
	6	10	45,69	78,92	33,23	75,92	30,23	9,9239	9,859120
		11	46,15	79,39	33,24	76,44	30,29	9,7392	
		12	45,4	86,42	41,02	82,72	37,32	9,9143	
	8	13	45,8	92,44	46,64	87,42	41,62	12,0615	11,602918
		14	46,68	91,22	44,54	86,67	39,99	11,3778	
		15	44,18	96,88	52,7	91,5	47,32	11,3694	
Método modificado (55 golpes)	0	1	46,4	87,99	41,59	87,88	41,48	0,2652	2,0858
		2	66,1	97,63	31,53	96,59	30,49	3,4110	
		3	66,29	86,16	19,87	85,66	19,37	2,5813	
	2	4	49,94	72,21	22,27	71,27	21,33	4,4069	3,2691
		5	46,62	67,18	20,56	66,34	19,72	4,2596	
		6	45,92	59,22	13,3	59,07	13,15	1,1407	
	4	7	45,98	79,76	33,78	77,77	31,79	6,2598	6,4971
		8	46,01	76,02	30,01	74,15	28,14	6,6453	
		9	65,29	107,69	42,4	105,07	39,78	6,5862	
	6	10	64,37	89,7	25,33	87,67	23,3	8,7124	8,8221
		11	65,07	89,07	24	87,26	22,19	8,1568	
		12	65,15	92,9	27,75	90,47	25,32	9,5972	
	8	13	64,84	89,57	24,73	87,34	22,5	9,9111	10,0142
		14	65,43	103,96	38,53	100,4	34,97	10,1802	
		15	65,42	92,6	27,18	90,14	24,72	9,9515	

## APÊNDICE E – Cálculo de massa específica do solo Paraná/Marialva

Resultados e dados para cálculo da massa específica aparente do solo úmido (Yh) e do solo seco (Ys) para método normal, intermediário e modificado (12, 26 e 55 golpes) para o solo Paraná/Marialva.

Amostras – Paraná/Marialva	Quantidade de água (g)	Massa da amostra úmida compactada + Molde (g)	Massa (g) antes da Estufa 110°C - P'h	Altura do molde (cm)	V (cm <sup>3</sup> )	Yh (g/cm <sup>3</sup> )	Ys (g/cm <sup>3</sup> )
Método normal (12 golpes)	0	4596,4	1186,00	9,7	815,0539175	1,4551	1,2624
	2	4496,4	1086,00	8,3	697,4172696	1,5572	1,3365
	4	4364,8	954,40	7	588,1832394	1,6226	1,4024
	6	4289,6	879,20	6,8	571,378004	1,5387	1,3012
	8	4184,4	774,00	6,5	546,1701509	1,4171	1,1769
Método intermediário (26 golpes)	0	4661,8	1251,40	9,5	798,2486821	1,5677	1,5677
	2	4627,2	1216,80	9	756,2355935	1,6090	1,6090
	4	4543,9	1133,50	8,6	722,6251227	1,5686	1,5686
	6	4464	1053,60	8,3	697,4172696	1,5107	1,5107
	8	4399,6	989,20	7,5	630,196328	1,5697	1,5697
Método modificado (55) golpes	0	4565,5	939,80	8,500	714,222505	1,3158	1,31584
	2	4515,4	889,70	8,000	672,20942	1,324	1,32355
	4	4450,3	824,60	7,500	630,196328	1,308	1,30848
	6	4411,6	785,90	7,000	588,1832394	1,336	1,33615
	8	4368	742,30	6,500	546,17015	1,359	1,35910

## APÊNDICE F – Cálculo de umidade do solo Paraná/Marialva

Resultados e dados para cálculo da umidade em percentagem para método normal, intermediário e modificado (12, 26 e 55 golpes) para o solo Paraná/Marialva.

Amostras – Paraná/Marialva	Quantidade de água (g)	Pote	Pote vazio (g)	Pote + amostra úmida	Amostra úmida (Ph)	Amostra Seca (Ps) + Molde	Amostra Seca (Ps)	h%	h(%)
Método normal (12 golpes)	0	1	60,3	118,13	57,83	108,44	48,14	20,1288	15,270475
		2	55,9	122,2	66,3	114,68	58,78	12,7935	
		3	57,02	129,54	72,52	121,26	64,24	12,8892	
	2	4	55,59	100	44,41	94,36	38,77	14,5473	16,513058
		5	55,99	112,2	56,21	103,86	47,87	17,4222	
		6	56,53	102,1	45,57	95,29	38,76	17,5697	
	4	7	66,26	91,93	25,67	88,09	21,83	17,5905	16,317426
		8	56,08	86,8	30,72	82,67	26,59	15,5322	
		9	61,02	89,85	28,83	85,91	24,89	15,8297	
	6	10	60,69	98,1	37,41	92,32	31,63	18,2738	18,258723
		11	56,59	89,63	33,04	84,59	28	18,0000	
		12	45,9	75,81	29,91	71,14	25,24	18,5024	
	8	13	45,71	87,21	41,5	80,25	34,54	20,1506	20,417326
		14	46,02	85,42	39,4	78,73	32,71	20,4525	
		15	60,71	97,52	36,81	91,22	30,51	20,6490	
Método intermediário (26 golpes)	0	1	65,57	85,84	20,27	84,43	18,86	7,4761	7,401587
		2	65,27	80,04	14,77	79	13,73	7,5747	
		3	46,01	59,79	13,78	58,87	12,86	7,1540	
	2	4	47,04	75,76	28,72	73,23	26,19	9,6602	9,685675
		5	57,04	95,1	38,06	91,79	34,75	9,5252	
		6	48,38	81,77	33,39	78,77	30,39	9,8717	
	4	7	90,74	120,36	29,62	117,33	26,59	11,3953	11,291534
		8	57,16	86,56	29,4	83,53	26,37	11,4903	
		9	56,71	76,91	20,2	74,91	18,2	10,9890	
	6	10	56,39	83,56	27,17	80,34	23,95	13,4447	13,605901
		11	162,46	184,28	21,82	181,66	19,2	13,6458	
		12	159,63	185,81	26,18	182,65	23,02	13,7272	
	8	13	156,85	184,47	27,62	180,79	23,94	15,3718	15,570281
		14	159,45	193,05	33,6	188,48	29,03	15,7423	
		15	155,26	180,83	25,57	177,38	22,12	15,5967	
Método modificado (55 golpes)	0	1	60,32	86,16	25,84	85,72	25,4	1,7323	1,6819
		2	55,94	70,96	15,02	70,73	14,79	1,5551	
		3	57,07	75,59	18,52	75,27	18,2	1,7582	
	2	4	55,66	75,31	19,65	74,58	18,92	3,8584	3,8101
		5	56,04	83,4	27,36	82,42	26,38	3,7149	
		6	56,61	82,19	25,58	81,24	24,63	3,8571	
	4	7	66,36	83,71	17,35	82,9	16,54	4,8972	5,2199
		8	56,14	76	19,86	74,96	18,82	5,5260	
		9	61,1	73,56	12,46	72,94	11,84	5,2365	
	6	10	60,74	76,07	15,33	75,1	14,36	6,7549	7,1545
		11	56,66	78,99	22,33	77,44	20,78	7,4591	
		12	45,94	62,08	16,14	60,989	15,049	7,2497	
	8	13	45,63	65,57	19,94	63,81	18,18	9,6810	9,8682
		14	45,9	72,6	26,7	70,13	24,23	10,1940	
		15	60,55	82,88	22,33	80,9	20,35	9,7297	

## APÊNDICE G – Artigo

### COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO PARA IMPRIMAÇÃO POR ESTATÍSTICA

Ester de Oliveira Ternero<sup>1</sup> – ester\_ternero@yahoo.com.br; ester.ternero@akzonobel.com

Wagner dos Santos Oliveira<sup>2</sup> – oliveira@feq.unicamp.br; wagner@ipen.br

Kelly Ivone Pina Albino<sup>3</sup> – kelly.albino@akzonobel.com

1 – Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP/AkzoNobel Ltda.

2 – Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP

3 – AkzoNobel Ltda

#### RESUMO

*Uma das primeiras etapas da pavimentação é a imprimação asfáltica. Esse procedimento consiste na aplicação da emulsão asfáltica ou asfalto diluído sob uma base de solo que é anteriormente compactada e umedecida.*

*A imprimação tem como objetivo a impermeabilização do solo, e também promover melhor aderência entre a base e a camada posterior.*

*As emulsões asfálticas são mais ecologicamente corretas por possuírem menor quantidade de solventes não voláteis, quando comparadas ao asfalto diluído. Suas vantagens são: questões ambientais, segurança, diminuição da perda de produtos de alta energia, menor temperatura de aplicação que implica na diminuição de custos com combustíveis e pode ser aplicado com a base úmida.*

*As emulsões asfálticas são testadas em laboratório antes da aplicação. Um dos testes que pode ser feito, é a penetração do asfalto no solo no qual é analisado o tempo em que o asfalto demora a penetrar no solo e a profundidade atingida. Para a realização deste método, o solo que será utilizado é compactado. Esta compactação pode ser realizada através de dois métodos diferentes, Marshall ou Proctor.*

*Esse trabalho propõe mais uma opção de método para compactação, pelo compactador SBR. Processo que diminui a quantidade de matéria-prima e o tempo do teste. O novo método é comparado com o método Marshall através de dois modelos estatísticos e assim, comprovando que o método SBR é equivalente ao método Marshall.*

**Palavras-Chave:** Emulsão de asfalto, asfalto, imprimação, SBR, Marshall, solo, solvente.

#### ABSTRACT

*One of the first steps of paving is the prime. This procedure consists of the application of the asphalt emulsion or asphalt diluted under a soil base which is previously compacted and moistened.*

*The prime has the objective of waterproofing the soil, promoting better adhesion between the base and the back layer.*

*Asphalt emulsions are more ecologically correct because they contain less solvent and also non-volatile as compared to the diluted asphalt. Its advantages are: environmental issues, safety, reduction of the loss of high energy products, lower application temperature that implies in the reduction of costs with fuels and can be applied with the wet basis.*

*Asphalt emulsions are tested in the laboratory before being released for application. One of the tests that can be done is the penetration of the asphalt into the soil in which the time that the asphalt takes to penetrate the soil and the depth is analyzed. For this method, the soil to be used is compacted. The soil can be compacted in two different ways, Marshall or Proctor.*

*This work proposes a different method of compaction, by the SBR compactor. Method that decreases the amount of raw material and the time of the test. The new method is compared with the Marshall method through two statistical models and thus, proven that the SBR method is equivalent to the Marshall method.*

**Keywords:** Asphalt emulsion, asphalt, prime, SBR, Marshall, soil, solvent.

## INTRODUÇÃO

A imprimação é um processo preliminar a fase da aplicação do asfalto e possui como função promover a aderência entre a base e a camada betuminosa, além da impermeabilização da base contra infiltração de água e umidade (MANTILLA *et al.*, 1994).

Os materiais que podem ser utilizados nessa aplicação é a emulsão asfáltica e os asfaltos diluídos. A emulsão de asfalto é a mistura heterogênea entre asfalto e água através do emulsificante e da agitação mecânica (moinho coloidal) formando uma mistura estável (GODOI, 2011).

A imprimação asfáltica é aplicada com o intuito de aumentar a coesão da superfície que se torna lisa e polida, pois os materiais finos são incorporados. Além disso, a imprimação protege a superfície contra infiltração de água. A falta da coesão da camada encurta a vida útil do pavimento (RAMALHO, 2011). Para que haja eficiência no projeto o asfalto deve penetrar no solo, porém enquanto para DANTAS (1959) a penetração deve ser entre 5 a 10 mm na base, para HITCH e RUSSEAL (1977) deve penetrar de 4 a 5 mm (RABELO, 2006).

A eficiência da imprimação no solo pode ser testada em escala laboratorial através da compactação do solo a ser utilizado em campo e posteriormente à aplicação da emulsão asfáltica. Após a secagem o corpo-de-prova é cortado ao meio e avaliado a profundidade da penetração do asfalto no solo (RAMALHO, 2011). RAMALHO (2011) usou o equipamento de compactação Proctor, já RABELO (2006) além de usar o Proctor para compactação do solo, também usou o Marshall. RABELO (2006) fez uma comparação de eficiência entre os dois cilindros (Marshall e Proctor). Foi observado que as umidades ótimas das amostras obtidas no cilindro Marshall são maiores que a do cilindro Proctor devido ao peneiramento do solo na peneira 3/8" e pelo repouso do solo umedecido por 24 horas realizado pelo autor (RABELO, 2006).

KUCHAREK *et. al.* (2010) compactou o solo pelo compactador que normalmente é utilizado para preparar amostras do equipamento Schultze Breuer and Ruck, o processo é uma adaptação do Sand Penetration test.

O pennDOT (Sand penetration test) é um ensaio de penetração de uma solução paliativa de poeira em areia que utiliza um cilindro pequeno de 76,2mm de diâmetro para

compactação da areia a 100psi (PENNDOT, 2004).

Este trabalho tem por objetivo comparar os métodos de compactação do solo através dos compactadores SBR e Marshall.

O procedimento da compactação do solo pelo compactador SBR reduz a quantidade de matéria-prima, tanto no solo quanto na água e emulsão asfáltica utilizada para realização do teste de penetração. Portanto, possui grandes vantagens econômicas e sustentáveis por gerar uma quantidade menor de resíduos.

## MATERIAL

Para a realização do experimento foi utilizado três tipos de formulações de emulsões (Tabela 1), nas quais utilizou-se o mesmo tensoativo (Redicote E-11 com Berol 260) com diferentes solventes (Redicote PR, Óleo lubrificante rerrefinado e Óleo vegetal recuperado).

**Tabela 7.** Descrição das formulações de emulsão asfáltica.

Descrição	EPF-01 (% massa)	EPF-02 (% massa)	EPF-03 (% massa)
<b>CAP 50/70</b>	43	43	43
<b>Redicote PR®</b>	7		
<b>Óleo Vegetal Refinado</b>		7	
<b>Óleo Básico RR NM</b>			7
<b>Berol 260®</b>	0,8	0,8	0,8
<b>Redicote E-11®</b>	0,7	0,7	0,7
<b>Água</b>	q. s. p. para 100	q. s. p. para 100	q. s. p. para 100
<b>pH</b>	Sem ajuste	Sem ajuste	Sem ajuste

O solo utilizado para compactação e comparação dos métodos é proveniente de Paulínia, e possui dióxido de silício em maior quantidade em sua composição (88%), conforme Tabela 2.

**Tabela 8.** Análise química do solo através do espectrômetro de fluorescência de raios X.

Amostra (%)	Solo Paulínia
SiO <sub>2</sub>	88,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,90
MnO	<0,10
MgO	<0,10
CaO	<0,10
Na <sub>2</sub> O	<0,10
K <sub>2</sub> O	<0,10
TiO <sub>2</sub>	0,47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,10

## METODOLOGIA

As emulsões asfálticas citadas neste trabalho foram submetidas ao teste de imprimação ou penetração no solo em dois tipos de corpos-de-prova diferentes. Sendo um deles compactado pelo Compactador SBR e o outro pela prensa Marshall, Tabela 3 e 4 respectivamente. Para cada corpo-de-prova foi definido características diferentes; sendo alteração na pressão (1,5bar, 3,0bar e 4,0 bar), umidade do solo (5,8%, 7,8% e 10,8%), tipo de solvente (óleo vegetal, óleo rerrefinado) e tipo de solo (solo proveniente do Peru).

**Tabela 9.** Resultados do teste de imprimação para corpo-de-prova preparado no compactador SBR.

Teste	Solo	Solvente	Compactação	Umidade	Surfactante
1	Paulínia	Redicote PR	1,5 bar	7,8	Redicote E-11+Berol 260
2	Peru	Redicote PR	1,5 bar	5,9	Redicote E-11+Berol 260
3	Paulínia	Óleo de cozinha	1,5 bar	7,8	Redicote E-11+Berol 260
4	Paulínia	Óleo de carro	1,5 bar	7,8	Redicote E-11+Berol 260
5	Paulínia	Redicote PR	3,0 bar	7,8	Redicote E-11+Berol 260
6	Paulínia	Redicote PR	4,0 bar	7,8	Redicote E-11+Berol 260
7	Paulínia	Redicote PR	1,5 bar	5,8	Redicote E-11+Berol 260
8	Paulínia	Redicote PR	1,5 bar	10,8	Redicote E-11+Berol 260

**Tabela 10.** Resultados do teste de imprimação para corpo-de-prova preparado no compactador Marshall.

Teste	Solo	Solvente	Compactação (golpes)	Umidade	Surfactante
1	Paulínia	Redicote PR	12 Golpes	7,8	Redicote E-11+Berol 260
2	Peru	Redicote PR	12 Golpes	5,9	Redicote E-11+Berol 260
3	Paulínia	Óleo de cozinha	12 Golpes	7,8	Redicote E-11+Berol 260
4	Paulínia	Óleo de carro	12 Golpes	7,8	Redicote E-11+Berol 260
5	Paulínia	Redicote PR	26 Golpes	7,6	Redicote E-11+Berol 260
6	Paulínia	Redicote PR	55 Golpes	8,15	Redicote E-11+Berol 260
7	Paulínia	Redicote PR	12 Golpes	5	Redicote E-11+Berol 260
8	Paulínia	Redicote PR	12 Golpes	11	Redicote E-11+Berol 260

## RESULTADO E DISCUSSÃO - ENSAIOS DE IMPRIMAÇÃO

Os resultados para tempo de penetração da emulsão asfáltica para dentro do solo e a profundidade em milímetros que essa emulsão atingiu sobre a superfície do solo compactado pelo Marshall e também pelo compactador estão descritas na Tabela 5 abaixo.

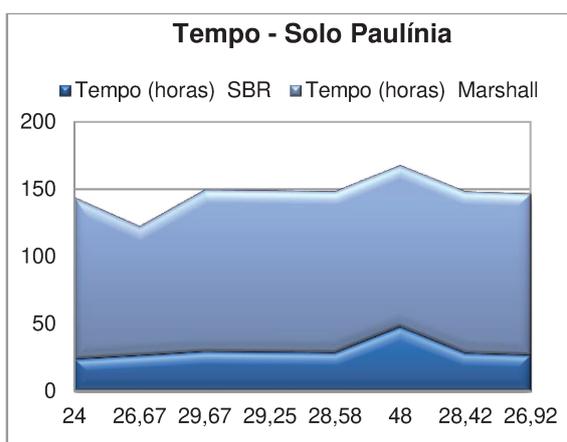
As amostras compactadas no equipamento Marshall levaram mais tempo para penetrar do que as amostras compactadas no SBR, ou seja, reduz o tempo de resposta do teste de imprimação. Além disso, por tomar menos tempo é possível ter uma precisão maior do tempo de penetração da emulsão asfáltica.

Em relação à penetração do asfalto no solo, os resultados entre as amostras foram similares.

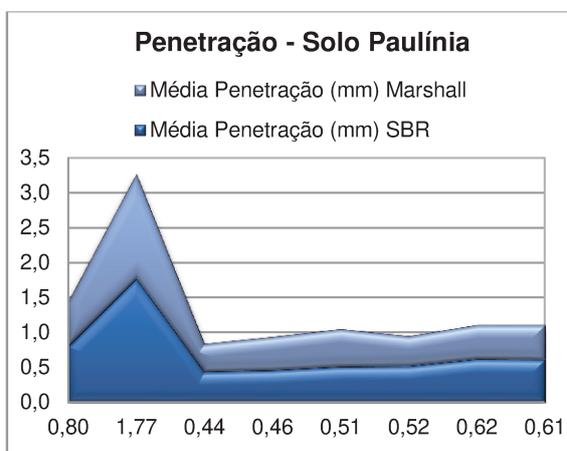
A penetração das amostras nas quais foram alteradas o tipo de solvente variando entre Redicote PR, óleo vegetal e óleo rerrefinado obtiveram resultados similares de penetração mesmo modificando o método de compactação. A amostra número três (Tabela 5) compactadas pelo Marshall apresentou 0,40 mm de penetração, enquanto compactada pelo SBR apresentou 0,44 mm de penetração. Em ambos os métodos, a amostra com o solvente Redicote PR apresentou melhor resultado de penetração, enquanto a amostra com óleo de cozinha foi o que menos penetrou no solo e o óleo rerrefinado penetrou menos que o Redicote PR, porém mais que o óleo vegetal.

**Tabela 5.** Resultados do teste de imprimação para corpo-de-prova preparado na prensa Marshall.

Teste	Marshall		SBR	
	Tempo (horas)	Média Penetração (mm)	Tempo (horas)	Média Penetração (mm)
1	120	0,64	24	0,80
2	96	1,50	26,67	1,77
3	120	0,40	29,67	0,44
4	120	0,48	29,25	0,46
5	120	0,54	28,58	0,51
6	120	0,43	48	0,52
7	120	0,49	28,42	0,62
8	120	0,5	26,92	0,61



**Figura 1.** Comparação do tempo de penetração.



**Figura 2.** Comparação da penetração.

## AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

Com o objetivo de provar estatisticamente que os dois métodos citados acima apresentaram o mesmo desempenho (profundidade de penetração) independente dos parâmetros, como tensoativo, solo, pressão de compactação, umidade e tempo. Realizou-se uma avaliação estatística, provando assim, a hipótese de que o método Marshall pode ser substituído pelo SBR, que

utiliza menos matéria prima, têm-se resultado em menor tempo, e apresenta menos risco ergonômico. Para isso, os resultados foram submetidos a testes estatísticos, por meio do teste T-Student e da análise de variância – ANOVA (Analysis of Variance) utilizando a opção One Way. A aplicação destes testes teve como objetivo comparar os métodos de forma independente.

Os testes estatísticos foram realizados no software Minitab, versão 17. O intervalo de confiança de 95% foi definido para o teste de hipóteses ( $\alpha=0,05$ ):

- Hipótese nula ( $H_0$ ): Todos os valores são iguais, e;
- Hipótese alternativa ( $H_a$ ): Pelo menos uma média é diferente.

Para analisar os resultados obtidos através do T-Student e ANOVA considerou-se:

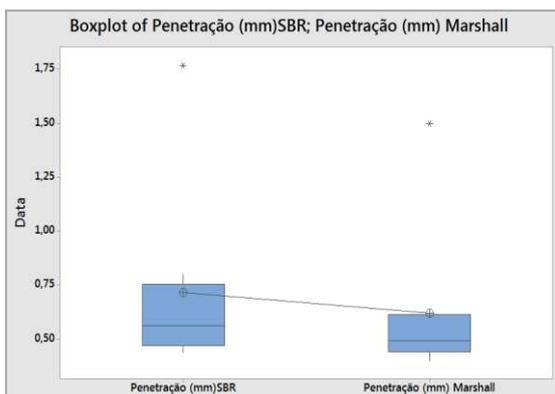
- Se p-valor é maior que  $\alpha$ , então a hipótese nula é aceitável;
- Se p-valor é menor que  $\alpha$ , determina-se que a hipótese alternativa é aceitável.

A tabela apresenta o p-valor obtido em cada análise estatística para avaliação de igualdade no quesito penetração e tempo para ambos os métodos.

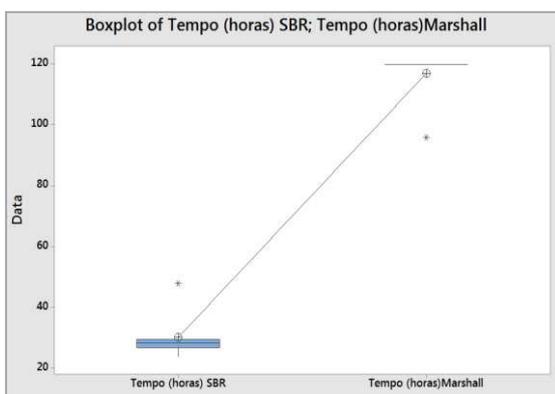
Análise Estatística	Avaliação	p-valor
t-Student	Penetração	0,649
ANOVA		0,649
t-Student	Tempo	0,000
ANOVA		0,000

O p-valor (0,649) permite-nos considerar que as variâncias dos valores obtidos no teste de penetração são iguais utilizando métodos diferentes. Porém, na questão de tempo gasto para cada um dos métodos comprovou-se que são significativamente diferentes já que o p-valor obtido foi 0,000, ou seja, menor que o valor definido de  $\alpha$ .

As Figuras 3 e 4 apresentam os gráficos de Boxplot gerados pelo Minitab, durante a avaliação da ANOVA.



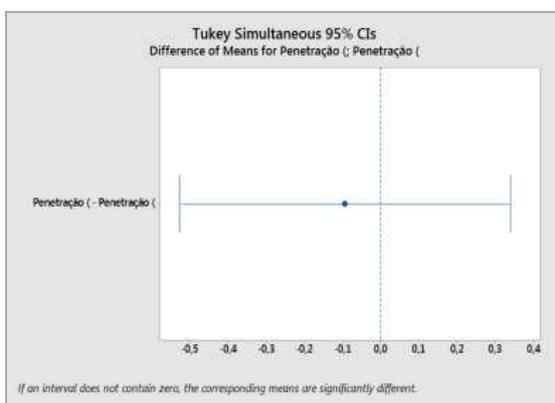
**Figura 3.** Boxplot comparativo gerado para os testes de Penetração.



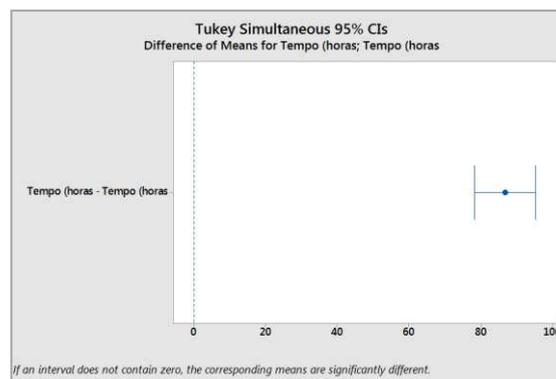
**Figura 54.** Boxplot comparativo dos tempos para cada método.

Como podemos observar, os testes de penetração apresentam níveis médios semelhantes. Já na questão de tempo gasto na execução de cada método os níveis médios apresentados no gráfico Boxplot são diferentes.

As Figuras 5 e 6 são gráficos gerados pelo método de Tukey que apresenta os intervalos de confiança para todos os pares de médias, com grau de confiança de 95%.



**Figura 55.** Método de Tukey para penetração.



**Figura 6.** Método de Tukey para tempo.

O método de Tukey comprova novamente as conclusões obtidas no teste t-Student e ANOVA, pois na Figura 5 onde avaliamos os testes de penetração observa-se que o intervalo contém o ponto zero, confirmando a semelhança dos métodos. Na Figura 6 o intervalo não contém o ponto zero, portanto o tempo gasto para realização de cada método é diferente.

## CONCLUSÃO

Foi concluído estatisticamente que o método de compactação SBR é equivalente para o método Marshall no teste de imprimação de emulsão asfáltica.

O método SBR proporciona vantagens ambientalmente corretas, e respostas rápidas com economia de tempo e quantidade de amostras.

Será possível usar menos solo, emulsão asfáltica, água. Desta forma, gerar menos resíduos. Além disso, uma resposta que demoraria mais de três dias é possível obter em apenas um dia, economizando tempo e acelerando a finalização de projetos.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter me dado forças e ter me ajudado a seguir este caminho.

Ao Prof. Dr. Wagner Oliveira, pela participação ativa e direta neste passo gigantesco.

À AkzoNobel, por oferecer seus estabelecimentos para a realização dos ensaios.

À Kelly Albino da empresa AkzoNobel por me ajudar com a parte estatística do trabalho.

À minha família e a todas as pessoas que participaram, contribuindo para realização deste trabalho, direta ou indiretamente, meu agradecimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MANTILLA C. A.; BUTTON, J. W. Prime coat methods and materials to replace cutback asphalt. **Technical Report Documentation**, Texa, p. 156, 1994.

GODOI, L. Estudo do comportamento dos ligantes asfálticos utilizados na imprimação asfáltica relacionados à emissão de VOC's. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 167, 2011.

KUCHAREK A.S.; KENNEDY M.; DAVIDSON K.J. Solvent-free bitumen emulsions for prime coats and granular sealing. World Congress on emulsion, Canada, p. 7, 2010.

RAMALHO, R. W. Avaliação em laboratório da utilização de emulsão com óleo de xisto na imprimação de solos. Escola de Minas UFOP, Ouro Preto, p. 180, 2011.

RABELO, A. N. Contribuição ao estudo da imprimação betuminosa das bases rodoviárias do estado do Ceará. Universidade do Ceará, Fortaleza, p. 91, 2006.

PENNSYLVANIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. PENNDOT APPENDIX B: Sand Penetration Test for Dust Palliative Solutions. 37. ed. Rio de Janeiro, 1998. 63 p, v. 25.

HITCH, L. S. e RUSSEAL, R.B.C. (1977) *Bituminous Bases and Surfacing for Low Cost in the Tropics*.

DANTAS, J. M. (1959) *Tratamentos Contra o Pó, Imprimações, Pinturas de Ligação, Tratamentos Superficiais, Macadames Betuminosos*. Curso de Especialização Rodoviária. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

Pennsylvania department of transportation OS-299 (8-72) Publication 37 bulletin 25 August 23 2004  
Change one (1), publication No.37 – November 2002 edition bulletin 25 – specifications – bituminous materials – p.1 a 67 – Appendix B p 50 e 51 Sand penetration test for dust palliatives.

MATHEWS P.G., Design of experiments with MINITAB. American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee 53203, p. 143 a 188, 2005.

SILVA T.M., Teste t-Student Teste igualdade de Variâncias. Universidade Federal do Pará, 2014. Acesso em 09/03/2017. Disponível em: <[http://www.ufpa.br/heliton/arquivos/aplicada/seminarios/M1\\_01\\_Testes\\_t\\_Tais.pdf](http://www.ufpa.br/heliton/arquivos/aplicada/seminarios/M1_01_Testes_t_Tais.pdf)>

REIS B.C.M, PINTO R.L.M, SOARES C.L, Aplicação da análise estatística via teste de Tukey e análise de variância para a avaliação dos parâmetros de qualidade de corte em processo de fabricação. XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa/PB, Brasil, de 03 a 06 de outubro de 2016. Acesso em 09/03/17. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN\\_STP\\_227\\_328\\_29448.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_227_328_29448.pdf)>

