

NATÁLIA DE SOUZA CORREIA

Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-graduação em Geotecnia.

Orientador:
Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno

São Carlos
2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

C824c Correia, Natália de Souza
 Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados
 com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão
 de trincas / Natália de Souza Correia ; orientador
 Benedito de Souza Bueno. -- São Carlos, 2010.


 Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
 Geotecnia e Área de Concentração em Geossintéticos) --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
 Paulo, 2010.

 1. Geotêxteis. 2. Reforço de capa asfáltica. 3.
 Emulsão asfáltica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro NATALIA DE SOUZA CORREIA.

Dissertação defendida e julgada em 20/04/2010 perante a Comissão Julgadora:



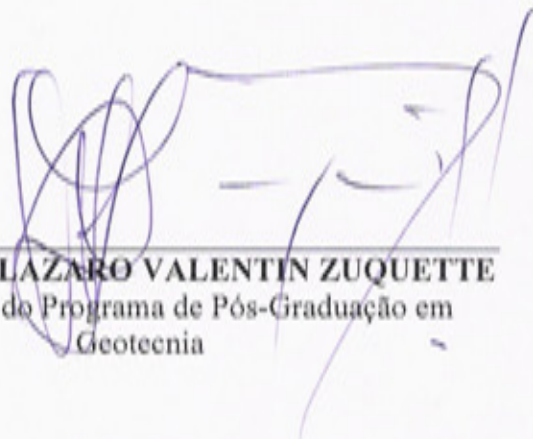
Prof. Titular **BENEDITO DE SOUZA BUENO - (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO



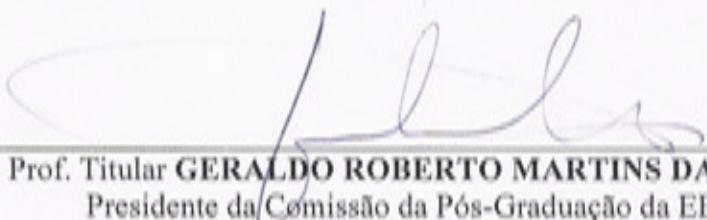
Prof. Dr. **PAULO CÉSAR LODI**
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/Campus de Ilha Solteira) APROVADO



Prof. Dr. **GLAUCO TÚLIO PESSA FABRI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado



Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia



Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

*Aos meus pais, pelo amor incondicional e
incentivo ao aprendizado contínuo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de vida e pela maravilhosa família que tenho.

Aos meus pais, Pedro e Marina, um agradecimento especial, por acreditarem em minhas escolhas, pelos conselhos, preocupações divididas e por fazerem parte do que sou.

A minha família, em especial a minha irmã Izabela, pelo carinho e companheirismo ao longo de toda a minha vida.

Ao Professor Benedito Bueno, pela orientação, conselhos, aprendizado durante esta etapa e por acreditar e confiar na realização deste trabalho.

Aos meus grandes amigos, principalmente àqueles de convívio diário e colegas do Departamento de Geotecnia, pelo companheirismo e apoio nos momentos mais importantes.

Ao Fernando Portelina, pelo carinho, companheirismo e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos distantes, porém sempre lembrados em meus pensamentos.

Ao Professor Paulo Lodi, pela confiança e orientação desde a época de graduação e, principalmente, pela oportunidade de ingressar no meio científico.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Geossintéticos, pela grande ajuda na etapa experimental, sugestões e apoio constante.

Aos professores e técnicos do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, pelo apoio profissional e sempre disposta ajuda.

Aos professores e técnicos do Departamento de Transportes da EESC-USP, pelo auxílio e colaboração.

À Universidade de São Paulo, pela oportunidade da realização do Curso de Pós-graduação em Geotecnia.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

A todos aqueles não citados, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

CORREIA, N. S. Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas. 2010. 131f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

O uso de geossintéticos em rodovias tem recebido considerável atenção nas últimas décadas. A utilização de materiais alternativos na reabilitação de pavimentos flexíveis, utilizando sistemas anti-reflexão de trincas, tem se destacado entre pesquisas acerca deste tema. A experiência internacional mostra que o uso de geotêxteis não tecidos, aliados ao ligante asfáltico, tem demonstrado bom desempenho em obras de restauração de pavimentos. No entanto, o sucesso desta técnica depende diretamente do entendimento do comportamento dos geotêxteis quando impregnados com asfalto. Neste contexto, este estudo avaliou diferentes geotêxteis não tecidos frequentemente utilizados em sistemas anti-reflexão de trincas, enfatizando o ganho de rigidez à tração e a redução da permeabilidade destes materiais após a impregnação com o ligante asfáltico. Amostras de geotêxteis não tecidos de poliéster e polipropileno foram impregnadas com emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida. Ensaio de tração foram realizados de acordo com a ABNT – NBR 12824/93 e os ensaios de transmissão de vapor d'água foram conduzidos conforme as especificações da ASTM – E96M/05. Os resultados dos ensaios de tração em geotêxteis impregnados mostraram um aumento significativo dos valores de rigidez à tração para os níveis de deformação analisados. Resultados revelaram também um elevado aumento nos valores de rigidez à tração para níveis de deformação da ordem de 0,03%. Ensaio de transmissão de vapor d'água demonstraram que a emulsão asfáltica aplicada sobre os geotêxteis permite uma drástica redução nos valores de permeabilidade normal do material, podendo transformar este sistema em uma barreira impermeável.

Palavras-chave: Reforço de capa asfáltica. Geotêxteis. Emulsão asfáltica.

ABSTRACT

CORREIA, N. S. **Behavior of nonwoven geotextiles impregnated with asphalt emulsion used in anti-reflective cracking systems.** 2010. 131f. Dissertation (Master) – Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos, 2010.

The use of geosynthetics in roadway systems has received considerable attention over the past decades. Paving fabrics have been used for rehabilitation of pavements to reduce propagation of cracks and to extend pavement life. In addition, the success of this technique depends directly on the understanding of the geotextiles behavior when impregnated with asphalt. In this sense, this study evaluated different nonwoven geotextiles frequently used in the anti-reflective cracking systems, focusing on initial stiffness gain and permeability reduction. Virgin and impregnated specimens of polyester and polypropylene nonwoven geotextiles were used. Cationic rapid setting emulsified asphalt (CRS) was used as asphalt binder. Wide-width tensile tests were performed in accordance with ABNT – NBR 12824/93 and water vapor transmission tests (WVT) were performed according to ASTM E96M/05. The results of tensile tests on impregnated geotextiles showed significantly increase in tensile stiffness values. Results also showed high increase in stiffness values at strain levels less than 0.03 % and decrease on stiffness gains with the increase of strains. Water vapor transmission tests demonstrated that cationic asphalt emulsion applied on nonwoven geotextiles allows a drastic reduction in permeability values and may turn this system in a low permeability barrier.

Keywords: Rehabilitation of pavements. Geotextiles. Asphalt emulsion.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 2.1 | Etapas do trincamento: (a) início do fissuramento, (b) propagação estável da trinca e (c) propagação instável da trinca (VILCHEZ, 1996)..... | 29 |
| Figura 2.2 | Movimentações de uma trinca (adaptada de RODRIGUES, 1991)..... | 30 |
| Figura 2.3 | Tipos de trincas: (a) longitudinal, (b) transversal, (c) oblíqua, (d) bloco e (e) couro de crocodilo (VILCHEZ, 1996)..... | 31 |
| Figura 2.4 | Mecanismo da reflexão de trincas (MONISMITH E COETZEE, 1980)..... | 33 |
| Figura 2.5 | Tensões devido à passagem de uma carga de roda (adaptada de LYTTON, 1989)..... | 35 |
| Figura 2.6 | Mudanças de temperatura e conseqüente trincamento da camada de reforço (adaptado de LYTTON, 1989)..... | 36 |
| Figura 2.7 | Esquema de uma camada intermediária de interrupção do trincamento (DNIT, 2006)..... | 39 |
| Figura 2.8 | Princípios de Colombier: (a) reflexão da trinca em inúmeras microfissuras, (b) reflexão da trinca na horizontal e (c) trinca com trajetória desviada (adaptado de COLOMBIER, 1989)..... | 40 |
| Figura 2.9 | Detalhe das fibras de geotêxteis não tecidos: (a) agulhados, (b) termoligados e (c) resinados (FERREIRA, 2001)..... | 47 |
| Figura 2.10 | Resultados de ensaios de permeabilidade em geotêxteis não tecidos (MARIENFELD e BAKER, 1999)..... | 51 |
| Figura 2.11 | Posicionamento do geotêxtil em pavimento recapeado (adaptado de DNIT, 2006) | 53 |
| Figura 2.12 | Sequência de operações: (a) Fresagem da superfície e (b) Primeira aplicação do ligante (BIDIM, 2005)..... | 61 |
| Figura 2.13 | Instalação do geotêxtil: (a) Instalação com equipamento específico e (b) Detalhe do rolo entre as imprimações (BIDIM, 2005)..... | 62 |
| Figura 2.14 | Sequência de operações: (a) Compactação com rolo pneumático e (b) Aplicação da segunda taxa de ligante (Vilchez, 2002; BIDIM, 2005)..... | 63 |
| Figura 2.15 | Sequência de operações: (a) Distribuição do concreto asfáltico e (b) Compactação do concreto asfáltico (BIDIM, 2005)..... | 64 |
| Figura 2.16 | Tipos de comportamento: (a) Elasto-plástico; (b) Visco-elasto-plástico; (c) Anisotropia; e (d) acúmulo de deformação permanente com as cargas aplicadas (PERKINS, 2000)..... | 64 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Figura 2.17 | Efeito de taxa de impregnação do Geotêxtil impregnado com asfalto (RODRIGUES e VILCHEZ ,1998)..... | 66 |
| Figura 3.1 | Geotêxteis não tecidos de poliéster utilizados na pesquisa: (a) fibras curtas e (b) fibras longas..... | 70 |
| Figura 3.2 | Geotêxteis não tecidos de polipropileno utilizados na pesquisa..... | 71 |
| Figura 3.3 | Equipamentos utilizados na caracterização dos materiais: (a) Balança de precisão e (b) Ensaio para determinação da espessura..... | 73 |
| Figura 3.4 | Figura 3.4 - Pressas mecânicas utilizadas nos ensaios de tração: (a) geotêxtil não tecido sem reforço e (b) geotêxtil não tecido reforçado..... | 74 |
| Figura 3.5 | Equipamento utilizado no ensaio de permissividade: (a) detalhe da amostra de geotêxtil e (b) equipamento completo..... | 75 |
| Figura 3.6 | Processo de impregnação dos materiais para o ensaio de retenção..... | 77 |
| Figura 3.7 | Geotêxtil não tecido durante o processo de impregnação: (a) corpo de prova de geotêxtil, (b) emulsão asfáltica, (c) após a aplicação da emulsão e (d) processo de impregnação..... | 79 |
| Figura 3.8 | Materiais no processo de secagem: (a) geotêxtil reforçado, (b) geotêxtil de poliéster e (c) detalhe dos grampos..... | 80 |
| Figura 3.9 | Ensaio de tração em geotêxteis não tecidos impregnados: (a) ensaio em andamento e (b) detalhe da ruptura do tecido..... | 81 |
| Figura 3.10 | Ensaio de tração após a impregnação: (a) posicionamento do corpo de prova e do plástico, (b) detalhe do plástico utilizado, (c) prensa de ensaio e (d) detalhe do corpo de prova posicionado..... | 82 |
| Figura 3.11 | Equipamento e montagem dos corpos de prova para o ensaio de transmissão de vapor d'água..... | 84 |
| Figura 4.1 | Resultados dos ensaios de tração dos geotêxteis não tecidos de poliéster e polipropileno: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 88 |
| Figura 4.2 | Resultados dos ensaios de tração dos geotêxteis não tecidos reforçados (PP-FV) comparado aos não reforçados: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 89 |
| Figura 4.3 | Curvas Módulo de rigidez (J) dos geotêxteis não tecidos de poliéster: (a) Filamentos curtos e (b) Filamentos longos..... | 90 |
| Figura 4.4 | Curvas Módulo de rigidez (J) dos Geotêxteis não tecidos de Polipropileno: (a) não reforçados e (b) reforçado com fibra de vidro..... | 90 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Figura 4.5 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-1A: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 92 |
| Figura 4.6 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-2A: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 92 |
| Figura 4.7 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 93 |
| Figura 4.8 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 93 |
| Figura 4.9 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-1C: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 94 |
| Figura 4.10 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-2C: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 94 |
| Figura 4.11 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PP-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 95 |
| Figura 4.12 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PP-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 96 |
| Figura 4.13 | Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PP-FV: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 96 |
| Figura 4.14 | Incremento de resistência na ruptura com adição do ligante asfáltico: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 97 |
| Figura 4.15 | Incremento de resistência na ruptura com adição do ligante asfáltico: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 98 |
| Figura 4.16 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-1A: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 99 |
| Figura 4.17 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-2A: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 99 |
| Figura 4.18 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 100 |
| Figura 4.19 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 100 |
| Figura 4.20 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-1C: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 101 |
| Figura 4.21 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-2C: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 101 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Figura 4.22 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PP-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 102 |
| Figura 4.23 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PP-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 103 |
| Figura 4.24 | Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PP-FV: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 103 |
| Figura 4.25 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-1A: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 105 |
| Figura 4.26 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-2A: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 106 |
| Figura 4.27 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante PET-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 106 |
| Figura 4.28 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 107 |
| Figura 4.29 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-1C: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 107 |
| Figura 4.30 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante do PET-2C: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 108 |
| Figura 4.31 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante do PP-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 108 |
| Figura 4.32 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante do PP-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 109 |
| Figura 4.33 | Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PP-FV: (a) Longitudinal e (b) Transversal..... | 109 |
| Figura 4.34 | Comparações entre os materiais dos fabricantes A e B quanto à rigidez a 0,05% de deformação: (a) 150 g/m ² e (b) 180 g/m ² | 111 |
| Figura 4.35 | Comparações entre os materiais de fibras curtas e longas quanto à rigidez a 0,05% de deformação: (a) 150 g/m ² e (b) 180 g/m ² | 111 |
| Figura 4.36 | Comparações entre os materiais de poliéster e polipropileno quanto à rigidez a 0,05% de deformação: (a) 150 g/m ² e (b) 180 g/m ² | 112 |
| Figura 4.37 | Relação entre permissividade e taxa de ligante (residual) para os geotêxteis não tecidos..... | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tabela 2.1 | Demanda de ligantes em pavimentos de superfície betuminosas (BUTTON et al., 1992)..... | 59 |
| Tabela 3.1 | Especificações dos geotêxteis não tecidos utilizados..... | 70 |
| Tabela 3.2 | Características da emulsão asfáltica RR-1C..... | 71 |
| Tabela 3.3 | Ensaio realizados para caracterização dos geotêxteis não tecidos..... | 72 |
| Tabela 3.4 | Taxas de emulsão asfáltica (residual) utilizada nos ensaios de tração..... | 78 |
| Tabela 4.1 | Características físicas dos geotêxteis não tecidos | 85 |
| Tabela 4.2 | Propriedades de tração dos geotêxteis..... | 86 |
| Tabela 4.3 | Propriedades hidráulicas dos geotêxteis..... | 86 |
| Tabela 4.4 | Retenção de asfalto dos geotêxteis não tecidos..... | 87 |
| Tabela 4.5 | Propriedades hidráulicas do material virgem..... | 113 |
| Tabela 4.6 | Permeabilidade normal em geotêxteis impregnados..... | 114 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------------------|--|-----------|
| <i>CAPÍTULO 1</i> | <i>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS</i> | 23 |
| 1.1 | Introdução | 23 |
| 1.2 | Objetivos | 25 |
| 1.3 | Organização do trabalho | 25 |
| | | |
| <i>CAPÍTULO 2</i> | <i>REVISÃO DA LITERATURA</i> | 27 |
| 2.1 | Introdução | 27 |
| 2.2 | Trincas na camada asfáltica do pavimento | 28 |
| 2.3 | A Reflexão de trincas | 32 |
| 2.3.1 | Trincamento induzido pelo tráfego | 34 |
| 2.3.2 | Trincamento induzido pela variação da temperatura | 35 |
| 2.3.3 | Água na estrutura do pavimento | 36 |
| 2.3.4 | Movimentos do solo do subleito | 37 |
| 2.3.5 | Defeitos na construção | 37 |
| 2.4 | Alternativas para a inibição da propagação de trincas | 37 |
| 2.4.1 | Selagem das trincas | 38 |
| 2.4.2 | Camada intermediária de alívio de tensões | 38 |
| 2.4.3 | Camada de interrupção de trincas | 39 |
| 2.4.4 | Camada de compósitos de alívio de tensões | 40 |
| 2.4.5 | Camada de desvio de trincas | 40 |
| 2.5 | Geossintéticos como reforço de capa asfáltica | 42 |
| 2.5.1 | Geossintéticos | 42 |
| 2.5.2 | Geossintéticos em camadas de desvio de trincas | 43 |
| 2.6 | Geotêxteis não tecidos como sistema anti-reflexão de trincas | 45 |
| 2.6.1 | Geotêxteis não tecidos | 45 |
| 2.6.2 | Histórico da aplicação de geotêxteis | 47 |
| 2.6.3 | Mecanismos de atuação dos geotêxteis não tecidos | 48 |
| 2.6.4 | Geotêxtil não tecido impregnado com asfalto em SART | 52 |
| 2.6.5 | Recomendações para a aplicação dos geotêxteis | 54 |
| 2.7 | Ligantes asfálticos | 55 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.7.1 | Generalidades | 55 |
| 2.7.2 | Emulsões Asfálticas | 56 |
| 2.7.3 | Recomendações para a taxa de aplicação do ligante asfáltico | 58 |
| 2.8 | Aplicação do geotêxtil em sistemas anti-reflexão de trinca | 60 |
| 2.8.1 | Recomendações para a aplicação do geotêxtil | 60 |
| 2.8.2 | Sequencia das operações | 61 |
| 2.8.2.1 | Primeira aplicação do ligante asfáltico | 61 |
| 2.8.2.2 | Aplicação da manta de geotêxtil | 62 |
| 2.8.2.3 | Segunda aplicação do ligante asfáltico | 62 |
| 2.8.2.4 | Compactação do concreto asfáltico | 63 |
| 2.9 | Comportamento de geotêxteis impregnados com asfalto | 64 |
| 2.9.1 | Características Tensão-Deformação | 64 |
| 2.9.2 | Propriedades de tração | 65 |
| 2.9.3 | Ensaio de tração faixa larga em geotêxteis impregnados | 66 |
| 2.10 | Considerações finais | 67 |
| <i>CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS</i> | | 69 |
| 3.1 | Materiais | 69 |
| 3.1.1 | Geotêxteis não tecidos | 69 |
| 3.1.2 | Emulsão asfáltica | 71 |
| 3.2 | Ensaio de caracterização de geotêxteis | 72 |
| 3.2.1 | Propriedades físicas | 72 |
| 3.2.2 | Ensaio de tração | 74 |
| 3.2.3 | Ensaio hidráulico | 75 |
| 3.3 | Processo de impregnação dos materiais | 76 |
| 3.3.1 | Ensaio de retenção de asfalto | 76 |
| 3.3.2 | Taxas de impregnação | 77 |
| 3.3.3 | Preparação dos corpos de prova | 78 |
| 3.4 | Ensaio com impregnação | 80 |
| 3.4.1 | Ensaio de tração faixa larga | 80 |
| 3.4.2 | Ensaio de permeação | 82 |
| <i>CAPÍTULO 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</i> | | 85 |
| 4.1 | Resultados obtidos | 85 |

| | | |
|---|--|-----|
| 4.2 | Análises da resistência e deformabilidade dos geotêxteis | 87 |
| 4.2.1 | Geotêxteis não tecidos sem impregnação | 87 |
| 4.2.2 | Geotêxteis não tecidos impregnados | 91 |
| 4.2.3 | Análise de rigidez inicial | 98 |
| 4.2.4 | Incremento de rigidez com a adição do ligante | 105 |
| 4.2.4.1 | Taxa ótima de asfalto | 105 |
| 4.2.4.2 | Influência do fabricante no comportamento do material impregnado | 110 |
| 4.2.4.3 | Influência do tipo de fibra no comportamento do material impregnado | 111 |
| 4.2.4.4 | Influência do tipo de polímero no comportamento do material impregnado | 112 |
| 4.2.4.5 | Influência da gramatura na impregnação no comportamento do material impregnado | 113 |
| 4.3 | Análises das propriedades hidráulicas dos geotêxteis | 113 |
| 4.3.1 | Geotêxteis não tecidos sem impregnação | 113 |
| 4.3.2 | Geotêxteis não tecidos impregnados | 114 |
| 4.4 | Discussões finais | 117 |
| <i>CAPÍTULO 5</i> | | |
| <i>CONCLUSÕES</i> | | 119 |
| 5.1 | Sugestões para pesquisas futuras | 121 |
| <i>REFEÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> | | 123 |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

1.1 Introdução

As rodovias brasileiras, em quase sua totalidade, são constituídas de pavimentos flexíveis sendo que uma grande parte da rede viária apresenta algum tipo de deterioração da camada superficial. Os esforços provocados pelas cargas atuantes no pavimento induzem o desenvolvimento de deformações plásticas ou permanentes e deformações elásticas ou resilientes. As deformações plásticas acumuladas resultam da contribuição do subleito e das camadas do pavimento, sendo responsáveis pelo afundamento de trilhas de roda nas superfícies de rolamento. Já as deformações elásticas são resultantes da deflexão alternada e repetida das cargas de tráfego, que provocam a ruptura por fadiga do revestimento, sendo, portanto associadas ao surgimento e a evolução de trincas observadas nos revestimentos. O trincamento é um dos principais problemas relatados e está associado ao intenso tráfego de veículos, a idade dos pavimentos, excesso de cargas de roda e a falta de manutenção adequada (MONISMITH, 1958).

Neste contexto, muitos estudos vêm sendo direcionados às diversas soluções que se enquadram na categoria de *Sistemas Anti-Reflexão de Trincas* (SART), com o objetivo de aumentar a vida útil do pavimento, a custos menores do que outras soluções de recapeamento asfáltico. Entre as alternativas que tem propiciado o incremento de vida útil das rodovias em países desenvolvidos, destaca-se o reforço da capa asfáltica com o emprego de geossintéticos.

O uso de geossintéticos, aplicados como elemento de reforço das camadas asfálticas em estruturas de pavimentos flexíveis, com destaque para o geotêxtil não tecido, proporciona confiabilidade adicional ao pavimento, além de reduzir a espessura de concreto asfáltico exigida para as camadas de recapeamento de sistemas convencionais. A contribuição positiva do emprego de geotêxteis deve-se a dois mecanismos distintos: (i) a rigidez adicional à estrutura, que permite interceptar a energia da trinca, retardando o seu aparecimento na

superfície (LYTTON, 1989; SPRAGUE et al., 1998; BONDT, 2000; SPRAGUE e CARVER, 2000 e FHWA, 2002) e (ii) o controle da infiltração de água, por meio de uma contínua barreira de umidade proporcionada pelo material impregnado (AL-QADI, 2002; BUTTON e LYTTON, 2007).

Resultados de estudos experimentais, trechos restaurados e ensaios de laboratório encontrados na literatura mostram-se positivos quanto à reflexão de trincas em pavimentos flexíveis e a inserção de materiais geossintéticos (LYTTON, 1989; GILCHRIST e PAUL, 1994; HASIN e MUSTAFA, 1994; GRZYBOWSKA e WOJTOWICZ, 1996; ROSCHEN, 1997; SPRAGUE et al., 1998; BONDT, 2000; FHWA, 2002; AL QADI, 2002; KOERNER, 2005; BUTTON e LYTTON, 2007; PENMAN e HOOK, 2008; entre outros). A literatura internacional apresenta também resultados positivos quanto à reflexão de trincas em pavimentos flexíveis reforçados com geotêxteis não tecidos (GILCHRIST e PAUL, 1994; HASIN e MUSTAFA, 1994; GRZYBOWSKA e WOJTOWICZ, 1996; ROSCHEN, 1997; PENMAN e HOOK, 2008).

Ademais, ao analisarmos o contexto de pesquisas na área de geossintéticos no Brasil, percebe-se ainda um grande déficit em relação às informações acerca do comportamento dos geotêxteis não tecidos nas diferentes situações de uso, bem como a confirmação dos mecanismos que envolvem o sucesso desta técnica. Das poucas aplicações da técnica em campo, deve-se destacar que tanto o projeto quanto o procedimento executivo são baseados em conhecimentos puramente empíricos. Assim, estudos devem ser desenvolvidos para que haja um avanço no conhecimento da restauração de pavimentos com aplicação de geossintéticos, visando estabelecer rotinas de projeto, procedimentos construtivos e manutenção.

Dentro deste aspecto, o presente trabalho estuda o comportamento de diferentes geotêxteis não tecidos usualmente aplicados na restauração de pavimentos flexíveis como camada anti-reflexão de trincas. Neste sentido, foi possível estudar como estes materiais se comportam após a impregnação com a emulsão asfáltica, de modo a contribuir para o entendimento dos mecanismos que realmente influenciam na eficácia deste sistema anti-reflexão de trincas.

1.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a caracterização de geotêxteis não tecidos utilizados como sistema anti-reflexão de trincas em obras de restauração de pavimentos deteriorados, avaliando-se:

- (i) os efeitos da impregnação na rigidez inicial à tração de geotêxteis não tecidos;
- (ii) a ação impermeabilizante do ligante asfáltico; e
- (iii) a influência de diferentes fabricantes, gramaturas e polímeros no comportamento do material impregnado.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação está organizada como segue:

- o capítulo 2 apresenta uma revisão dos conceitos relativos ao uso de geotêxteis não tecidos em sistemas anti-reflexão de trincas, abordando-se, também, aspectos do pavimento reforçado com geossintéticos, dos mecanismos que influenciam no sucesso da técnica, breves comentários dos tipos de ligantes utilizados e as formas de aplicação deste material em campo;
- o capítulo 3 explicita os materiais utilizados bem como os métodos empregados na realização do programa experimental;
- o capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões destes com base nos objetivos propostos; e
- o capítulo 5 sumariza as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de geotêxtil não tecido como sistema anti-reflexão de trincas (SART) em pavimentos flexíveis. A apresentação de conceitos básicos sobre os mecanismos e principais detalhes construtivos auxiliará o leitor a entender de forma mais clara os objetivos centrais do trabalho. Desta forma, a revisão se estende na descrição e discussão de aspectos que transcendem os objetivos deste trabalho de pesquisa.

2.1 Introdução

As trincas existentes na capa asfáltica do pavimento são decorrentes da ruptura por fadiga desta camada, que pela ação das cargas de tráfego, sofreu deflexão alternada e repetida. A restauração de pavimentos flexíveis visa, portanto, prolongar a vida útil do pavimento, tornando-o novamente seguro e confortável aos motoristas. No entanto, as diversas soluções de restauração de pavimentos apresentam como principal problema a reflexão das trincas existentes na camada antiga para a nova capa asfáltica. Uma técnica comumente utilizada para minimizar esse problema baseia-se num sistema anti-reflexão de trincas com o uso de materiais geossintéticos, especialmente os geotêxteis não tecidos, que tem sido amplamente discutida na literatura (LYTTON, 1989; SPRAGUE et al., 1998; BONDT, 2000; FHWA, 2002; AL-QADI, 2002; BUTTON e LYTTON, 2007).

Estudos acerca deste tema vêm sendo desenvolvidos em busca do entendimento dos mecanismos que regem o comportamento dos geotêxteis não tecidos quando inseridos na camada asfáltica do pavimento, com a finalidade de minimizar a propagação das trincas. Vários trabalhos sobre o controle de reflexão de trincas em camadas asfálticas de recapeamento foram desenvolvidos e mostram os benefícios que a técnica de restauração com

geotêxteis não tecidos pode proporcionar aos pavimentos deteriorados (GILCHRIST e PAUL, 1994; HASIN e MUSTAFA, 1994; ROSCHEN, 1997; GRZYBOWSKA e WOJTOWICZ, 1996; CARMO et al., 1999; VILCHEZ, 1996; RODRIGUES, 2003; BENEDETTI e GONÇALVES, 2003; GUERRA ESCOBAR, 2008). Contudo, poucos estudos tem sido desenvolvidos quanto à interação dos geossintéticos com o ligante asfáltico, para que se possa compreender os mecanismos que auxiliam no sucesso da técnica.

Portanto, um aspecto de grande interesse relacionado à restauração de pavimentos com geossintéticos, é a análise do ganho de rigidez que estes materiais adquirem após a impregnação com o ligante asfáltico, visando à redução das deformações de tração na fibra inferior da capa asfáltica, de modo a estender a sua vida útil quanto ao trincamento por fadiga. Outro aspecto de grande importância é avaliação do comportamento destes materiais quando impregnados, quanto à impermeabilização que oferecem à estrutura pavimento.

2.2 Trincas na camada asfáltica do pavimento

Qualquer que seja o tipo de estrutura do pavimento, mesmo que bem projetado e construído, sofrerá degradação ao longo do tempo, seja em virtude do tráfego sistemático de veículos pesados, das condições climáticas e das propriedades mecânicas dos materiais empregados na construção ou ainda pela ação combinada destes fatores.

O problema mais frequente nos pavimentos flexíveis é o trincamento da fibra inferior da camada de concreto asfáltico que se desenvolve a partir da deflexão alternada e repetida das cargas de tráfego. No Brasil, devido ao bom comportamento dos solos do subleito, os problemas decorrentes de deformações plásticas, em geral, são menos intensos.

As deformações elásticas repetidas geradas pelo tráfego são responsáveis pela ruptura por fadiga do revestimento. Pinto (1991) descreve o fenômeno da fadiga como um processo de deterioração estrutural que sofre um material, quando submetido a um estado de tensões e deformações repetidas. Portanto, a ruptura por fadiga é a perda de resistência que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga, resultando em trincas ou fratura completa. Quando ocorrem estes movimentos, surgem tensões de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, levando ao aparecimento de trincas na camada de revestimento (LYTTON, 1989; VILCHEZ, 1996; FHWA, 2002).

As trincas surgem na forma de microfissuras que, com o passar do tempo, e consequente aumento do número de ciclos de carga e descarga e ou ciclos térmicos, crescem e se ligam formando uma única trinca.

É de conhecimento geral que as trincas são um dos principais problemas existentes nas rodovias pavimentadas no Brasil e propiciam aos pavimentos rodoviários uma duração consideravelmente menor do que a esperada.

As consequências da inadequação de um pavimento nem sempre são imediatamente visíveis. Os prejuízos econômicos causados pelo aumento nos custos de manutenção e custos operacionais podem ser extremamente elevados. A previsão do desempenho futuro de um pavimento ou de medidas de manutenção é extremamente complexa (RODRIGUES, 2003). Para a execução de uma atividade que propicie uma solução mais duradoura, é necessário o entendimento do mecanismo associado ao trincamento, para que se tenham condições de avaliar o fenômeno atuante e a solução mais econômica para o problema.

Existem basicamente três etapas que decorrem da propagação de trincas e cada uma delas conta com um mecanismo diferente, dependendo do tipo de solicitação atuante na camada de revestimento. Os tipos de propagação das trincas são ilustrados na Figura 2.1.

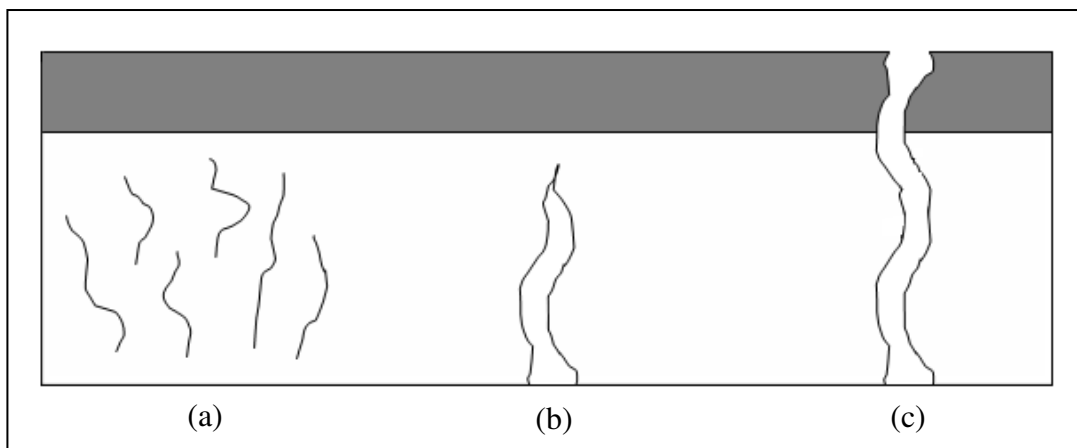


Figura 2.1 - Etapas do trincamento: (a) início do fissuramento, (b) propagação estável da trinca e (c) propagação instável da trinca (VILCHEZ, 1996).

a. Início do fissuramento - Corresponde ao momento do início da fissura na camada de revestimento;

b. Propagação estável da trinca - É o crescimento lento da fissura e corresponde a um crescimento vertical na camada de revestimento, a partir da concentração de tensões que provocam a abertura da trinca. Decorre de solicitações do tráfego e da temperatura;

c. Propagação instável da trinca - É a fase final e corresponde ao aparecimento da trinca na superfície do revestimento.

O crescimento das trincas pode também ser provocado pelo tipo de movimento imposto às faces das trincas. São três os tipos de movimentos de bordos: abertura, cisalhamento e rasgamento (Figura 2.2).

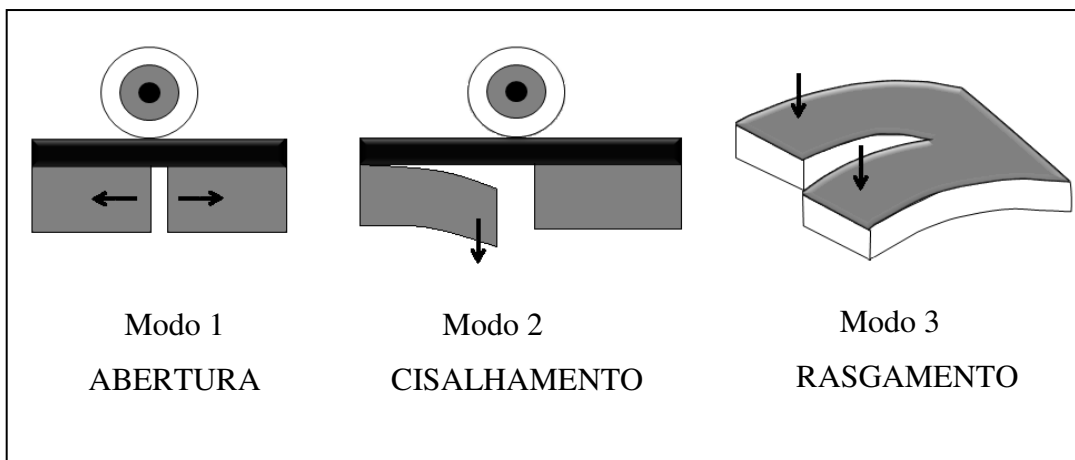


Figura 2.2 – Movimentações de uma trinca (adaptada de RODRIGUES, 1991).

No Modo 1, a abertura da trinca é provocada pela retração térmica ou por ressecamento de um ligante hidráulico, ou também por tensões normais de tração sob o centro de uma carga de roda, que tendem a abrir a trinca.

O Modo 2 tem a abertura da trinca provocada por cisalhamento da camada sob efeito de uma carga de roda, que ocorre quando o bordo da área carregada do pneu se encontra na direção do plano da trinca. Esta posição induz elevadas tensões e deformações de cisalhamento ao longo do plano da trinca. O trincamento resultante do tráfego é provavelmente uma combinação dos Modos 1 e 2 de deslocamento da trinca.

No Modo 3, o rasgamento da extremidade da trinca por solicitações de carga de roda, ocorre em trincas que já atravessaram a espessura da camada asfáltica e quando a carga de roda se encontra de forma assimétrica em apenas um dos lados da trinca, forçando um rasgamento da trinca em seu plano (IRWIN, 1957).

Existem diversas formas de se classificar o trincamento, tanto em função do tipo da trinca, de sua extensão, intensidade ou quanto à severidade. As trincas podem estar

configuradas de maneira isolada ou interligadas (COLOMBIER, 1989). As trincas isoladas configuram-se em longitudinais, transversais e um tipo raro, as oblíquas. As interligadas dividem-se em trincas tipo bloco ou couro de crocodilo. A Figura 2.3 ilustra os principais tipos de trincas citados.

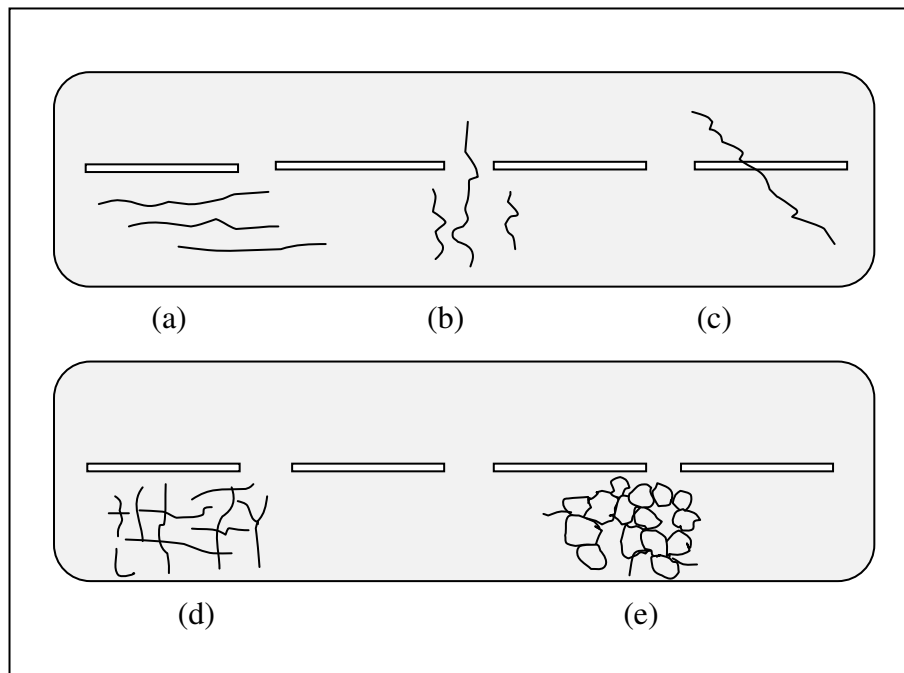


Figura 2.3 – Tipos de trincas: (a) longitudinal, (b) transversal, (c) oblíqua, (d) bloco e (e) couro de crocodilo (VILCHEZ, 1996).

De acordo com Molenaar (1993), as trincas do tipo bloco e as transversais, são atribuídas, em geral, a efeitos ambientais, como por exemplo, o desenvolvimento de trincas de retração em bases tratadas com cimento devido à hidratação do cimento e a ocorrência de variações térmicas. As forças horizontais de cisalhamento provocadas pelas cargas do tráfego são responsáveis por tensões de tração e deformações na superfície do pavimento, produzindo trincas. Estas trincas se propagam na direção longitudinal do pavimento e são generalizadas pelo modo 3 de trincamento (rasgamento). As trincas tipo couro de crocodilo são normalmente atribuídas à fadiga do pavimento. Na restauração de pavimentos flexíveis, cujo mecanismo de ruptura está associado a trincas por fadiga, a reflexão de trincas existentes para a nova camada a ser construída é um dos principais problemas a ser considerado.

2.3 A Reflexão de trincas

O fenômeno da reflexão de trincas consiste na propagação de juntas e trincas através da camada asfáltica, até que estas apareçam na superfície do pavimento. Quando as trincas são refletidas, a resistência estrutural decresce, permitindo a entrada da água, que acelera o processo de deterioração do pavimento e aumenta os custos de manutenção (LYTTON, 1898; FHWA, 2002; PRIETO et al., 2007). Os métodos de projeto, na sua maioria, não consideram o critério da reflexão de trincas (HAAS e PONNIAH, 1989).

Este fenômeno é também comumente definido como a reflexão de trincas devido ao movimento do pavimento subjacente ou da camada de base em direção à nova camada como resultado de tensões induzidas por carregamento e/ou temperatura (FHWA, 2002).

A reflexão de uma trinca pode ser causada por um ou mais ciclos de contração térmica, pela repetição de cargas do tráfego ou pela combinação dos dois (HAAS e PONNIAH, 1989). Bondt (2000) sugere que a reflexão de trincas em pavimentos asfálticos também pode ser causada por defeitos de construção ou movimentos desiguais do solo de subleito, sendo que os movimentos do solo podem ser verticais para baixo ou para cima, ou de natureza horizontal.

Monismith e Coetzee (1980) ressaltam que a causa provável é a baixa capacidade que as misturas asfálticas têm em resistir às deformações elevadas geradas na região em torno da extremidade das trincas e, que podem ser provocadas por deflexões diferenciais, movimentos horizontais de abertura e fechamento das trincas devido aos ciclos de expansão e retração térmica e de umidade.

Estudos teóricos e experimentais realizados até o momento indicam que a reflexão de trincas é afetada pelos seguintes fatores:

- espessura da camada asfáltica de recapeamento e suas propriedades mecânicas em função da variação sazonal da temperatura do revestimento asfáltico;
- rigidez das diferentes camadas da estrutura do pavimento;
- cargas de tráfego e a distribuição das solicitações com o horário e a correspondente temperatura;
- tensões e deformações em que a camada de recapeamento estará submetida em função da movimentação térmica da camada de trinca subjacente;

- configuração das trincas do pavimento existente (espessura e propriedades resilientes das camadas); e
- condições de interface entre a camada de recapeamento e o pavimento trincado subjacente, incluindo a presença eventual de camadas especiais intermediárias membrana de borracha-asfalto, geotêxtil-asfalto, asfalto-polímero, binder aberto, dentre outras) (VILCHEZ, 2002).

O mecanismo da propagação das trincas na nova camada asfáltica por efeito do carregamento associado ao tráfego, carregamento induzido pela temperatura, ou pela combinação de ambos, é mostrado na Figura 2.4 (MONISMITH e COETZEE, 1980).

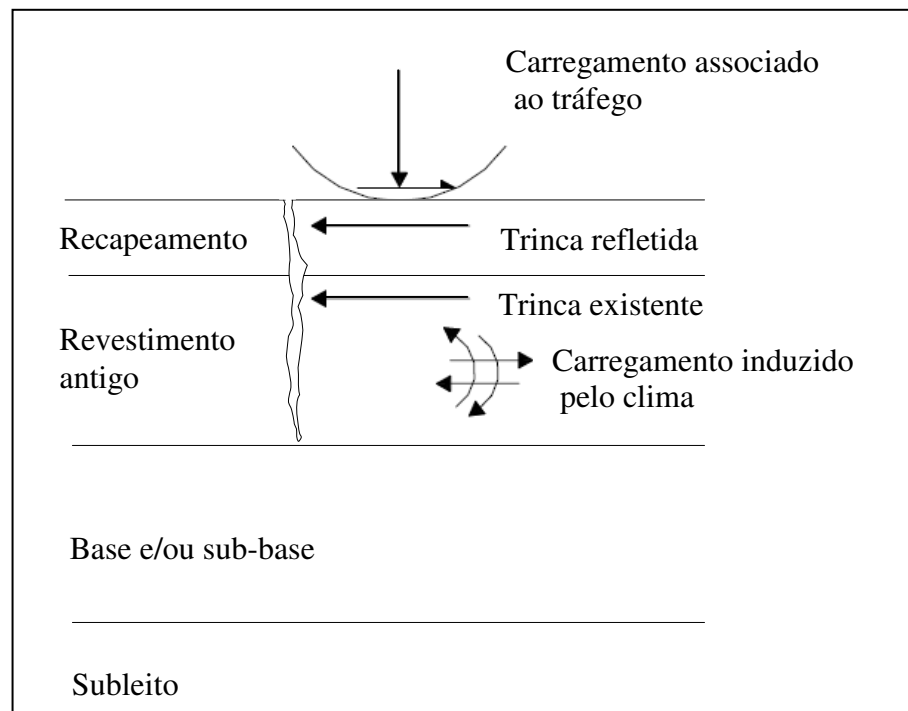


Figura 2.4 – Mecanismo da reflexão de trincas (MONISMITH e COETZEE, 1980).

MONISMITH e COETZEE (1980) relatam que o mecanismo da reflexão de trincas pode ocorrer devido a um descolamento da camada asfáltica em relação à camada trincada subjacente, o que leva a propagação horizontal das trincas até seu redirecionamento vertical. Este mecanismo ocorre também quando existe uma ligação perfeita entre as camadas, ou seja, a propagação é vertical desde o início, pelo fato de ocorrer uma concentração de tensões na região da extremidade da trinca, o que provoca a abertura de uma nova trinca por fadiga na camada de reforço. Considera-se, portanto, que a maioria das trincas geradas em trilhas de rodas decorre do próprio tráfego. A canalização das passagens das cargas aumenta as

solicitações em um determinado ponto do revestimento, já que as rodas dos veículos passam sempre sobre uma pequena parte da seção transversal. De acordo com Palma et al., (2000) este local é solicitado por forças cisalhantes horizontais, que aumentam as deformações e as tensões de tração que atuam na direção perpendicular ao pavimento e propagam as trincas na superfície.

O reaparecimento das trincas subjacentes na superfície da camada asfáltica de recapeamento se deve à incapacidade que o concreto asfáltico convencional tem de resistir às tensões de tração elevadas que são geradas em torno da extremidade das trincas (RODRIGUES, 2003). Essas tensões podem ser geradas por:

- deslocamentos verticais diferenciais entre as paredes de uma trinca, quando da passagem de uma carga de roda, gerando deformações cisalhantes na camada de recapeamento; e
- movimentos horizontais de abertura e fechamento da trinca, devido à passagem de veículos e ciclos térmicos.

2.3.1 Trincamento induzido pelo tráfego

A passagem de uma carga de roda gera, em um ponto qualquer do pavimento, pulsos de tensões e de deformações, normais e cisalhantes, como ilustra a Figura 2.5. O trincamento por fadiga é decorrente da passagem repetida das cargas dos veículos e causa a ruptura da camada após determinado número de ciclos

Lytton (1989) relata que quando as cargas do tráfego passam repetidas vezes sobre a trinca do pavimento antigo, três pulsos de alta concentração de tensões ocorrem na extremidade da trinca. O primeiro pulso de tensões é a máxima tensão cisalhante que ocorre quando a carga de roda encontra-se sobre a trinca (ponto “A” da Figura 2.5). O segundo pulso de tensões é devido ao momento fletor máximo, que ocorre no ponto “B”. O terceiro pulso de tensões é novamente a máxima tensão cisalhante, com a exceção de que, desta vez, na direção oposta à tensão cisalhante anterior e que resulta maior com a posição da carga no ponto “C”. Estes três pulsos ocorrem em um curto intervalo de tempo, da ordem de 0,05 segundos.

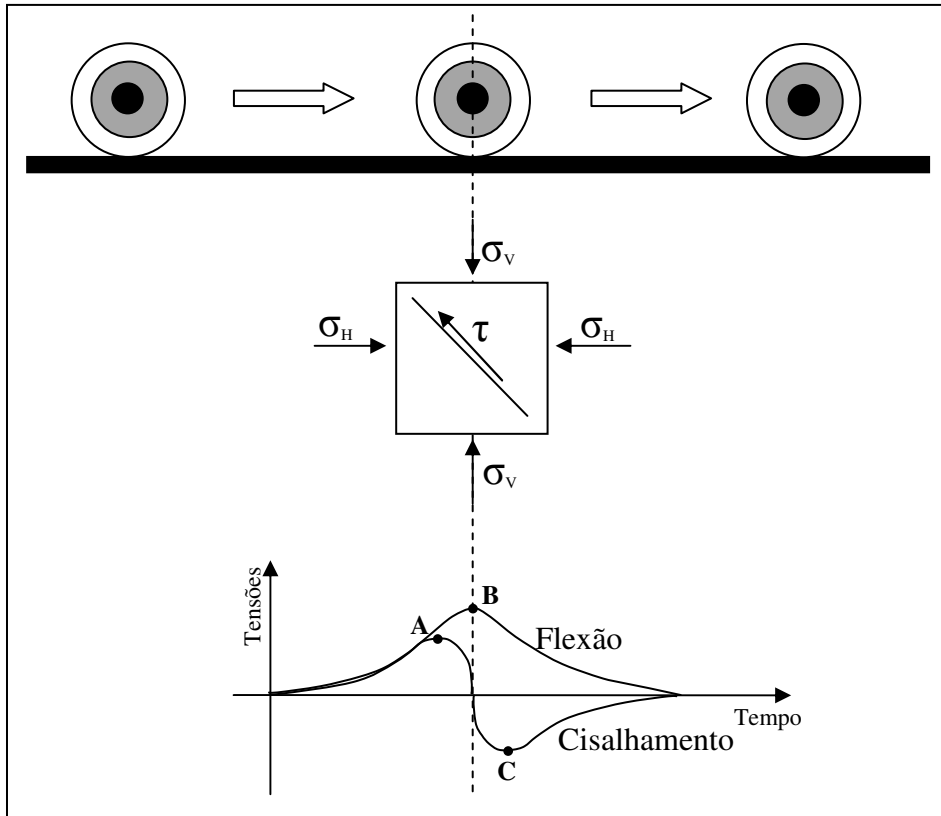


Figura 2.5 – Tensões devido à passagem de uma carga de roda (adaptada de LYTTON, 1989).

Nesta alta taxa de carregamento, a rigidez do concreto asfáltico na camada subjacente e no pavimento antigo é muito alta. Cada movimento do pavimento resulta num pequeno acréscimo na abertura de trincas da camada. Com o aumento do número de incrementos de carregamento, a magnitude do movimento aumenta, e assim, a taxa de crescimento de trincas cresce e a reflexão de trincas rapidamente aparece na superfície do carregamento. Embora este tipo de alteração seja de menor intensidade do que o causado por variações térmicas, por exemplo, ele é muito mais frequente e quanto maior a severidade das trincas, mais rapidamente elas se propagarão (LYTTON, 1989).

2.3.2 Trincamento induzido pela variação da temperatura

A Figura 2.6 mostra que a variação da temperatura pode levar ao trincamento da camada de reforço e contribui para a ocorrência da reflexão de trincas. Tensões térmicas na camada de reforço são provocadas pelo gradiente de temperatura da superfície para a base, ponto “A” da figura e contração por resfriamento, com levantamento da antiga camada

asfáltica, no ponto “B”. Observa-se que tensões térmicas podem causar a propagação da trinca, tanto no topo da superfície como na parte inferior da camada de reforço. A contração e a curvatura da antiga superfície aplicam tensões cisalhantes na parte inferior da camada de reforço e produzem concentrações de tensões de tração no ponto “B” (LYTTON, 1989).

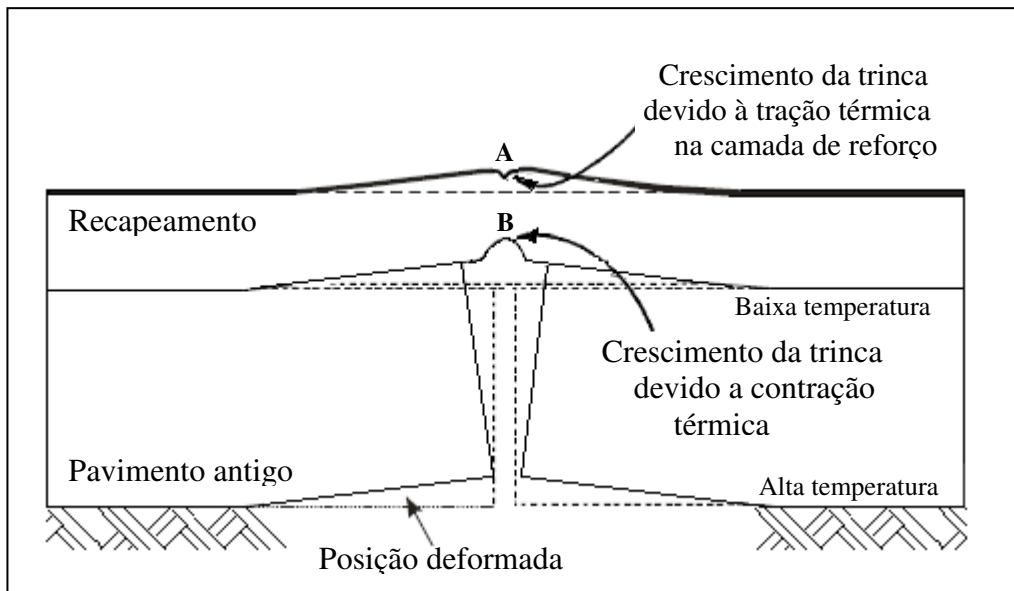


Figura 2.6 - Mudanças de temperatura e consequente trincamento da camada de reforço (adaptado de LYTTON, 1989).

Os ciclos de variação diária da temperatura ocorrem vagarosamente, num período de algumas horas ou na maior parte do dia e produzem tensões térmicas de tração no reforço. Com isso são gerados gradientes de temperatura na camada, forçando as extremidades das camadas a curvarem na região das trincas. Nos períodos mais frios do dia e a noite, quando a temperatura é mais baixa no topo do que parte inferior da camada, a abertura produzida não é tão severa quanto àquelas devido à contração pelo frio, porém muito mais frequentes, o que acarreta numa deterioração da mesma grandeza.

2.3.3 Água na estrutura do pavimento

Á água é um dos grandes problemas na Engenharia Rodoviária, sendo um dos principais fatores que levam o pavimento ao trincamento e a reflexão de trincas. Sem um sistema de drenagem adequado, a água infiltra e se deposita nas pequenas fissuras do pavimento e, com a passagem das cargas de tráfego, são geradas pressões neutras no interior

da camada, provocando o aumento das trincas existentes. Desta forma, deve-se impedir que a água influencie no desempenho da camada asfáltica do pavimento. As deficiências na camada de base ocasionadas pelo excesso de umidade geram problemas de baixa capacidade de suporte e aceleração dos defeitos superficiais, principalmente no que se refere ao bombeamento de finos pelos trincamentos.

2.3.4 Movimentos do solo do subleito

Os movimentos do solo do subleito, horizontais (perpendiculares às juntas) e verticais, em especial o movimento diferencial entre os bordos da trinca, contribuem para o fenômeno de reflexão de trincas (WICKERT et al., 2003). Estes movimentos são geralmente provocados por aumento no teor de umidade, recalques diferenciais, escorregamentos, retração e expansão do solo do subleito do pavimento.

2.3.5 Defeitos na construção

Em geral, os defeitos na construção do pavimento são causados por má composição das camadas, má execução de juntas longitudinais ou também por deslocamentos das camadas. As camadas adjacentes do pavimento também tem uma grande parcela de influência no aparecimento e na reflexão das trincas. Desta forma, deve-se projetar adequadamente cada camada da estrutura do pavimento para que se evite a propagação das trincas.

2.4 Alternativas para a inibição da propagação de trincas

Para eliminar a propagação de trincas é necessário suprimir as deformações e tensões produzidas na região das trincas do pavimento. A solução para o trincamento existente, que não será eliminado, é reduzir a sua taxa de manifestação e severidade. Neste sentido, medidas antes da execução do reforço têm sido desenvolvidas para tentar amenizar o problema. Devido ao número de variáveis envolvidas na natureza da reflexão de trincas, nenhuma solução para a completa prevenção da propagação de trincas foi adotada até o momento.

A principal razão para a grande disparidade nos resultados é a impossibilidade de quantificar precisamente os mecanismos da evolução do trincamento. Contudo, diferentes técnicas para a restauração da camada asfáltica vêm sendo testadas há várias décadas no sentido de se encontrar uma solução que seja economicamente viável, em situações onde a reflexão de trincas torna-se eminente (JAYAWICKRAMA e LYTTON, 1987; FHWA, 2002; KHODAI et al., 2009).

2.4.1 Selagem das trincas

A selagem de trincas é uma solução à conservação de pavimentos flexíveis. Seu grande sucesso deve-se à sua simplicidade, eficácia e alta durabilidade a um custo relativamente baixo, podendo o seu uso preventivo em período adequado muitas vezes vir a evitar intervenções pesadas e de altíssimo custo. Além da emulsão asfáltica, são utilizadas também as lamas asfálticas convencionais e as de cura controlada, resultantes da associação, em consistência fluida, de agregados miúdos, material de enchimento, água e emulsão catiônica de ruptura lenta (lama convencional) e de ruptura controlada (lama asfáltica controlada). O objetivo deste serviço é regularizar, limpar e fechar as trincas, dando-as características funcionais de juntas tratadas, impedindo assim a entrada de água e de materiais incompressíveis, além de evitar o bombeamento de agregados e a eliminação das tensões oriundas de dilatações térmicas e de deformações elásticas. Se executado em pavimento com condições de deterioração adequadas, este processo inibe a propagação e a interligação das trincas existentes.

2.4.2 Camada Intermediária de alívio de tensões

Para Orowan (1955), a mecânica da fratura sugere que para reduzir a reflexão das trincas, deve-se reduzir a concentração de tensões no topo da trinca. Isto estabelece teoricamente que camadas com baixo valor de módulo aliviam as tensões acima das trincas existentes, reduzindo a taxa de propagação das trincas. O uso de membranas intermediárias, conhecidas como SAMI (“Stress Absorbing Membrane Interlayer”), é uma das formas mais eficazes no tratamento da reflexão de trincas. A membrana aplicada fornece ao sistema: boa adesão entre as camadas, manutenção das propriedades elásticas e absorção de tensões, diminuindo assim o potencial da propagação de trincas do revestimento antigo para o novo.

O modo de atuação destes materiais no controle da reflexão das trincas baseia-se na capacidade destes de resistirem a elevadas deformações sob a aplicação de tensões. Nos últimos anos, o uso de asfaltos modificados com polímeros em obras de pavimentação tem crescido consideravelmente. A otimização de misturas asfálticas tem o propósito de aumentar a resistência da camada de recapeamento quanto à reflexão de trincas. Com o uso de ligantes modificados, melhoram as propriedades reológicas e a durabilidade dos ligantes, bem como a diminuição da susceptibilidade térmica das misturas betuminosas.

2.4.3 Camadas de interrupção de trincas

Quando existem movimentos acentuados nas juntas ou trincas devido às cargas de tráfego, as SAMI serão ineficazes se nenhum tratamento corretivo de regularização for realizado. Pavimentos rígidos e pavimentos flexíveis esbeltos com elevado padrão de trincamento, também podem ser restaurados por esta técnica, que consiste na aplicação de camadas de misturas abertas servindo como "Camada de Alívio de Trincas". As misturas possuem grandes vazios interconectados que aliviam o movimento gerado pelas camadas subjacentes diminuindo as tensões geradas na camada superior do reforço (HENSLEY, 1980; PEREIRA, 2002). Se a mistura não for bem compactada, poderá se tornar instável e ocasionar problemas futuros de afundamentos em trilhas de roda. A Figura 2.7 ilustra um esquema de camada de interrupção das trincas entre o pavimento antigo e o reforço.

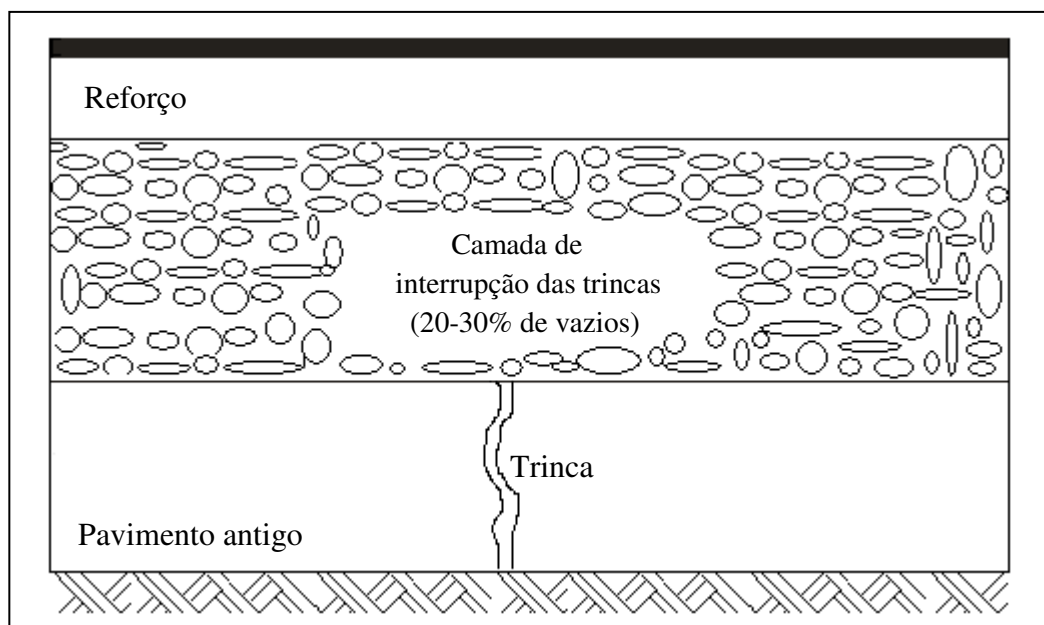


Figura 2.7 – Esquema de uma camada de interrupção do trincamento (DNIT, 2006)

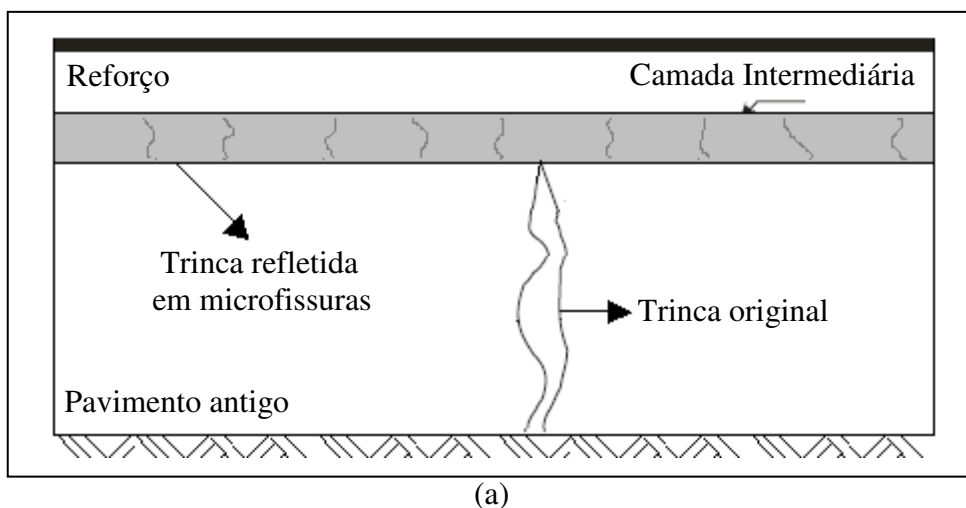
2.4.4 Camada de compósitos de alívio de tensões

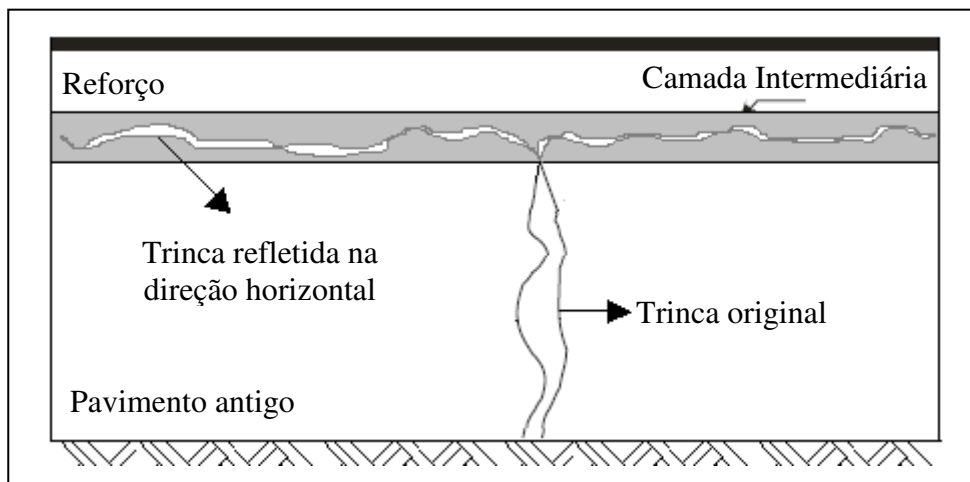
Uma solução potencial para o problema da reflexão das trincas é a utilização de um compósito como camada intermediária. Este compósito é a combinação de um material com baixo módulo de elasticidade reforçado com geossintético. A camada de baixo módulo atenua as tensões e a camada de geossintético elimina a passagem das tensões remanescentes (PEREIRA, 2002). O reforço de pavimento com bicamada otimizada é um sistema de camadas antifissuras, sendo concebidas com a superposição de duas ou três das seguintes camadas: geotêxtil-asfalto-polímero; areia-asfalto-polímero ou também revestimento com asfalto-polímero.

2.4.5 Camada de desvio de trincas

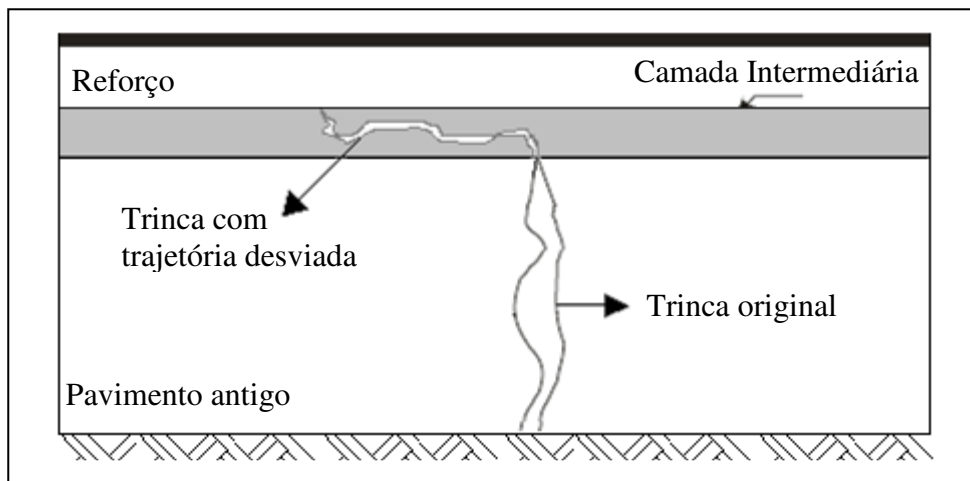
Determinados tipos de camadas intermediárias atuam de maneira a redirecionar a trinca existente, propagando-as na horizontal. O mecanismo associado a este tipo de camada é que a trinca, ao atingi-la, gera um descolamento localizado entre esta camada e a do pavimento antigo. Durante o redirecionamento da trinca, parte da energia de trincamento é utilizada na produção do descolamento, e com isso, a energia disponível para a propagação vertical da trinca é reduzida (RODRIGUES, 1991).

Alguns dos principais tipos de materiais com a finalidade de redirecionar as trincas para a horizontal são os geotêxteis não tecidos e as geogrelhas. De acordo com Colombier (1989), são três as funções da camada intermediária quanto a propagação de trincas, reportadas em princípios 3, conforme indica a Figura 2.8.





(b)



(c)

Figura 2.8 - Princípios de Colombier: (a) reflexão da trinca em inúmeras microfissuras, (b) reflexão da trinca na horizontal e (c) trinca com trajetória desviada (adaptado de COLOMBIER, 1989).

No princípio 1 de Colombier, as trincas são refletidas em inúmeras microfissuras ao passarem pela camada intermediária (Figura 2.8a) No segundo princípio, a trinca que se encontrava na vertical, é redirecionada para a horizontal (Figura 2.8b) No terceiro princípio, Colombier assume que a trinca tem sua trajetória desviada, ao passar pela camada intermediária, diminuindo o tempo de aparecimento na superfície (Figura 2.8c).

Colombier (1989) indica que o projeto da camada de reforço e ou construção de uma camada intermediária, deverá proporcionar o desligamento localizado entre as camadas do pavimento e absorver as tensões induzidas pelo tráfego, podendo ser de dois tipos:

- isolamento das camadas, mediante a colocação de lâmina de papel “craft”, geossintéticos, ou uma fina camada de areia, em que estes produtos fiquem aderidos somente a uma das camadas; e
- isolamento parcial entre a camada de reforço e o pavimento existente, de forma que a camada intermediária atue segundo seus princípios.

Além das funções já referidas, uma camada intermediária deve absorver as tensões térmicas, provenientes de movimentações de trincas subjacentes ou da própria camada de recapeamento. A camada deve também ser capaz de acompanhar essas movimentações, deformando-se sem ruptura. Outra função importante é a transmissão de tensões das cargas do tráfego para as camadas subjacentes do pavimento.

Um funcionamento satisfatório da camada intermediária utilizada como sistema anti-reflexão de trincas requer boa aderência entre as camadas do pavimento a ser restaurado, e para isso, a aplicação do ligante asfáltico deve ser homogênea e em uma taxa adequada para cada tipo de geossintético (BUTTON et al. 1982; LYTTON, 1989; FHWA, 2002; KOERNER, 2005).

2.5 Geossintéticos como reforço de capa asfáltica

2.5.1 Geossintéticos

Os geossintéticos formam um grupo de materiais sintéticos empregados principalmente na Engenharia Geotécnica. O termo “geo” refere-se à terra, e “sintético”, está relacionado com a matéria prima com que os materiais são feitos. A *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, na norma D 4439, define geossintéticos como “*elementos planares produzidos a partir de polímeros e utilizados em combinação com solo, rocha ou outros materiais relacionados com a engenharia geotécnica, como parte integral de um projeto, estrutura ou sistema*”.

Koerner (2005) estabelece que geossintéticos são materiais sintéticos manufaturados por indústrias petroquímicas, além dos fabricados a partir da borracha natural, fibra de vidro e outros materiais similares, que podem ser manipulados durante sua fabricação para possuírem uma propriedade específica desejada.

Os geossintéticos utilizados como reforço de capa asfáltica são geralmente os geotêxteis não tecidos e as geogrelhas. Os geotêxteis são, em geral, escolhidos por sua capacidade de absorção de asfalto e por apresentarem razoável isotropia no plano, sendo preferidos os de baixa gramatura, fabricados com fibras em poliéster ou polipropileno, reforçados ou não com outros materiais. Os compostos de geotêxteis podem conter: nylon, combinação com outros polímeros, materiais naturais orgânicos ou fibras de vidro, e são utilizados quando da necessidade de duas ou mais propriedades relevantes ao projeto (LYTTON, 1989; PANDEY e MAJUMDAR, 1993; BUTTON e LYTTON, 2007).

As geogrelhas têm sido usadas com sucesso como reforço de pavimentos asfálticos, por proporcionarem alta resistência à tração à estrutura, complementando as propriedades mecânicas da mistura asfáltica. Este material tem estrutura aberta e módulo de elasticidade elevado, comparado com o geotêxtil não tecido e com o próprio concreto asfáltico. As deformações geradas pelas cargas de roda são relativamente baixas, portanto, parte das tensões induzidas pelo tráfego é facilmente absorvida pelas geogrelhas.

2.5.2 Geossintéticos em camadas de desvio de trincas

Monismith e Coetzee (1980) sugerem que o mecanismo associado ao emprego dos geossintéticos é de que ao se instalar a manta impregnada com emulsão asfáltica, na interface entre o pavimento antigo e a camada de reforço, esta atuará como um plano de fraqueza. Nesta interface ocorrerá a máxima concentração de energia de deformação plástica, que resultará na máxima concentração de tensões. O plano de fraqueza tenderá a separar a camada intermediária da trincada e, se o vínculo na interface dos materiais for suficientemente fraco em relação à energia necessária para o trincamento do material de reforço, a trinca se propagará na horizontal. Com este redirecionamento, parte da energia que é gasta na propagação da trinca será utilizada na geração do descolamento localizado, reduzindo a densidade de energia que originaria a reflexão da trinca para a camada de reforço. Entretanto, se o material em torno da trinca for capaz de absorver a variação da energia de deformação associada com altas deformações sem ruptura, então a reflexão da trinca será inibida. Isto é, se a resistência do material em torno da trinca for alta, a trinca poderá não se propagar com a aplicação das cargas (PEREIRA, 2002).

Nos pavimentos flexíveis este redirecionamento da trinca também é esperado, já que o mecanismo está associado à camada intermediária de geossintético, independentemente do tipo de revestimento, rígido ou flexível.

Vilchez (1996) complementa dizendo que esta mudança para a direção horizontal na propagação da trinca ocorrerá mesmo que não haja deformações de tração. Portanto, a propagação para a horizontal será devido ao elevado gradiente de concentração de tensões na extremidade da trinca. A propagação também poderá ocorrer devido ao pulso de tensões verticais, que tenta comprimir uma camada e, com a anulação do pulso, a camada retornará à sua espessura original. Vilchez (1996) ressalta que nos revestimentos delgados, com espessuras menores que 5,0 cm, a fibra inferior da camada de reforço se encontra tracionada. O mecanismo de reflexão das trincas se dará principalmente pela fadiga na zona tracionada da camada de reforço e será mais influenciada pelas cargas de tráfego e menos pelos ciclos térmicos.

O mecanismo associado à capa asfáltica é que a trinca ao atingir a superfície, gera um descolamento localizado entre esta camada e a camada do pavimento antigo. Durante o redirecionamento da trinca, parte da energia do trincamento é utilizada na produção do descolamento e com isso a energia disponível para a propagação vertical da trinca é reduzida.

Este sistema deve satisfazer a quesitos funcionais, operacionais e econômicos para ser recomendado.

a) Funcionais:

- desviar o avanço da trinca para a direção horizontal, através de um desligamento limitado e localizado;
- aderir às duas camadas adjacentes para assegurar transmissão perfeita de tensões sob o efeito das cargas pesadas do tráfego;
- armazenar e fixar uma quantidade suficiente de ligante betuminoso para proporcionar um comportamento viscoelástico;
- suportar deflexões e não causar flexão na camada asfáltica de modo a não fatigá-la prematuramente;
- preservar uma continuidade que garanta a impermeabilidade da estrutura; e
- ser insensível à variação de temperatura, de modo que se possam utilizar plenamente as propriedades viscoelásticas do ligante.

b) Operacionais:

- procedimentos executivos no campo não devem criar incompatibilidades com as práticas usuais da restauração convencional.

c) Econômicos:

- custos comparáveis aos existentes na construção rodoviária, em relação aos materiais asfálticos e granulares convencionais (RODRIGUES, 1991).

De acordo com Lytton (1989), as trincas podem ser retardadas ou mantidas fechadas com o uso do geotêxtil ou da geogrelha, se as propriedades do material forem devidamente selecionadas e as técnicas de construção usadas forem satisfatórias. O autor esboça alguns princípios associados ao projeto e construção de camadas reforçadas com geossintéticos:

- a espessura requerida para o recapeamento aumenta com o aumento da abertura e frequência de trincas do pavimento antigo;
- a espessura requerida para o recapeamento diminui com o aumento da rigidez da camada intermediária;
- a quantidade requerida de pintura de ligação entre a camada antiga, o pavimento novo e a camada intermediária deve ser ótima, para que se assegure o mecanismo de aderência entre elas; e

A utilização de camadas de reforço com geossintéticos é recomendada quando existirem trincas de fadiga na camada betuminosa ou trincas de retração sem abatimento, ou seja, sem desnível dos bordos. Porém, esta técnica de desvio de trincas não é recomendada no caso de trincas com movimentos relativos de bordos, com grande variação de abertura devido a ciclos térmicos e no caso de trincas geradas por fadiga generalizadas (PEREIRA, 2002).

2.6 Geotêxteis não tecidos como sistema anti-reflexão de trincas

2.6.1 Geotêxteis não tecidos

Os geotêxteis não tecidos são os geossintéticos com o maior campo de aplicação no mercado, possuindo uma gama de aplicação muito grande, não somente na engenharia

geotécnica, mas também desempenhando diferentes papéis em obras de engenharia. Estes materiais podem ser utilizados para drenagem (coleta e condução de um fluido ao longo do plano do geotêxtil), filtração (retenção de partículas de solo ou outros materiais possibilitando a passagem de um fluido através do geotêxtil), separação (evita a mistura de materiais de naturezas diferentes), reforço (melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica), e até mesmo como elemento impermeável a líquidos ou vapores, quando impregnados com asfalto.

Em relação à composição, os geotêxteis são constituídos por fibras têxteis, naturais ou químicas. As naturais (lã, seda, algodão, linho, etc.), são raramente empregadas, dado o seu comportamento biodegradável. Dentre as químicas, destacam-se as fibras de polímeros sintéticos.

De acordo com Koerner (2005), os principais tipos de polímeros termoplásticos e semicristalinos utilizados para a confecção das fibras dos geotêxteis são: poliamida (1%), polietileno (2%), poliéster (12%) e polipropileno (85%). Segundo o autor, as fibras de poliéster são utilizadas nos geotêxteis principalmente por suas propriedades mecânicas, como a elevada resistência à tração. Já o polipropileno, apresenta propriedades mecânicas aceitáveis, além de inércia química e custo relativamente baixo. Os processos de fabricação dos geotêxteis não tecidos são divididos em: mecânico, térmico e químico e, influenciam na gramatura, espessura, resistência, permeabilidade, entre outras propriedades do material.

No processo mecânico, conhecido como “agulhagem”, a ligação das fibras ocorre com o entrelaçamento do material pela penetração das agulhas, repetidas vezes. A densidade da agulhagem na fabricação influi nas características e no desempenho do geotêxtil, com espessura final de 2,0 a 5,0 mm. Os geotêxteis não tecidos agulhados são os materiais mais utilizados como sistema anti-reflexão de trincas, por permitirem melhor absorção de asfalto em sua estrutura. Os produtos de pequena espessura são os mais indicados, pois facilitam a aplicação, tanto em relação às possíveis rugas, dobras, cortes, quanto à maior facilidade de impregnação.

No processo térmico, a ligação ocorre por fusão parcial das fibras, com a ligação de alguns pontos ou de regiões mais extensas da manta e apresentam espessuras reduzidas, da ordem de 0,5 a 1,0 mm. Quando a ligação das fibras ocorre pela aplicação de substâncias químicas no material, como a aplicação de resina acrílica por imersão ou pulverização, ocorre o processo químico. A Figura 2.9 ilustra os tipos de ligação das fibras em geotêxteis não tecidos.

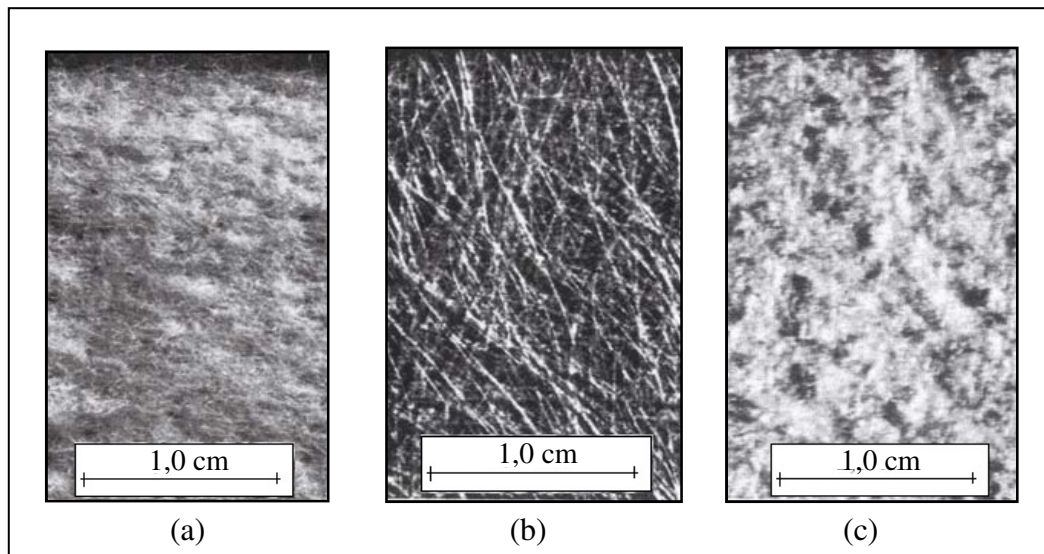


Figura 2.9 – Detalhe das fibras de geotêxteis não tecidos: (a) agulhados, (b) termoligados e (c) resinados (FERREIRA, 2001).

2.6.2 Histórico da aplicação de geotêxteis

As primeiras utilizações de geotêxteis não tecidos para restauração de pavimentos flexíveis ocorreram nos Estados Unidos, no final da década de 60. Dykes (1980) relata que uma das primeiras avaliações usando geotêxteis não tecidos para aplicação em pavimentos foi em 1966, em uma pequena pista experimental. Foram utilizadas mantas não tecidas de polipropileno impregnadas com emulsão asfáltica catiônica e cobertas com concreto asfáltico. Esta pista experimental foi executada em Banklesville, Oklahoma, e logo após foi executado um trecho em Vicksburg, Mississippi, pelo Corpo de Engenheiros dos EUA. Outras pistas experimentais também foram realizadas neste mesmo período em diversos estados americanos, avaliando diferentes tipos de geossintéticos e alternativas como asfalto borracha, reciclagem, entre outros. A partir destas, diversas pesquisas foram realizadas em todo o mundo.

Com a crise do petróleo nos anos 70, procurou-se desenvolver alternativas para o reforço de misturas asfálticas através de materiais que possibilitassem a melhoria do desempenho estrutural dos pavimentos e a redução dos custos envolvidos na construção e restauração dos pavimentos, seja pela redução das espessuras de concreto asfáltico ou pelo acréscimo de vida útil do pavimento (BÜHLER, 2001).

Na América do Sul os primeiros trechos de pavimentos restaurados com a utilização de geotêxtil não tecido impregnado com asfalto datam da década de 70. Entretanto, a partir da década de 80 é que começaram a haver grandes avanços técnico-científicos desta aplicação, com diversas pesquisas em campo e laboratório.

Estudos realizados por Button (1989) e Maurer e Malasheskie (1989) relataram que os benefícios econômicos adquiridos com o uso de geotêxteis não tecidos, quando aplicados em camada teste de pavimentos, não foram significativos e, Barnhart (1989) completou dizendo que o futuro do uso de geotêxteis para a redução de trincas não era garantido. No entanto, desde esta época, os custos relativos de geotêxteis e camadas asfálticas mudaram em favor do uso dos geotêxteis. Ladner (1990) e Van Wijk e Vicella (1989) indicaram que os geotêxteis poderiam ser usados no tratamento e prolongamento da vida de serviço das camadas asfálticas para redução da reflexão de trincas, provendo custo e benefícios expressivos (GILCHRIST e PAUL, 1994; HASIN e MUSTAFA, 1994; ROSCHEN, 1997; FHWA, 2002).

FHWA (1998) afirma que neste período, a segunda maior aplicação de geotêxteis na América do Norte foi em camadas de asfalto de pavimentos rígidos e flexíveis. Cerca de 30% de todo o geotêxtil utilizado em 1993 foi aplicado em camadas de pavimento (FHWA, 2002). Na década de 90 sua aplicação se incorporou de fato ao leque de técnicas disponíveis em projetos reais, passando a abranger pavimentos rodoviários, aeroportuários e urbanos, incluindo a restauração de pavimentos rígidos através de recapeamento asfáltico (PALMA et al., 2000, CERATTI e RODRIGUES, 2004).

No Brasil, pequenos trechos experimentais foram implementados usando a técnica anti-reflexão de trincas com geotêxteis não tecidos e, muitos estudos acerca deste tema e da interação entre os materiais e a camada asfáltica vêm sendo desenvolvidos (PINTO, 1991; RODRIGUES, 1991; CARMO et al., 1999, PALMA et al., 2000; VILCHEZ, 2002; BENEDETTI e GONÇALVES, 2003; WICKERT, 2003; entre outros).

2.6.3 Mecanismos da atuação dos geotêxteis não tecidos

De acordo com Lytton (1989), os geotêxteis não tecidos podem ser utilizados como sistema anti-reflexão de trincas para estender a vida útil do pavimento com três funções principais: reforço, redução de deformações e diminuição da permeabilidade.

Os geotêxteis não tecidos podem ser utilizados para diminuir a propagação de trincas por duas maneiras principais e inteiramente distintas: *reforço* e *barreira impermeável*, como reportado na literatura (BUTTON et al., 1982; LYTTON, 1989; SPRAGUE et al., 1998; BONDT, 2000; FHWA, 2002; AL QADI, 2002; KOERNER, 2005; BUTTON e LYTTON, 2007).

Koerner (2005) afirma que no dilema da reflexão de trincas, os geotêxteis tem múltiplas funções difíceis de serem definidas, já que não há como diferenciar uma clara função primária. Neste sentido, dois projetos completamente diferentes podem ser desenvolvidos, com base no reforço e na barreira impermeável. Considerando estes dois extremos, a combinação destes fenômenos pode ser a causa do sucesso da técnica.

- **Reforço**

O mecanismo de reforço contribui para a vida em fadiga da camada asfáltica já que esta retém a parte da rigidez devido às repetições da carga de tráfego (AUSTIN e GILCHRIST, 1996). A intercamada deve ter elevada rigidez à tração e conseqüentemente, pequena deformação, considerando as solicitações de campo. Para inibir a abertura de trincas, esta camada também deve controlar horizontalmente o movimento da camada asfáltica. Uma camada de alívio de tensões retarda o desenvolvimento das trincas pela absorção das tensões vindas do pavimento inferior.

Estudos são necessários para fornecer uma estimativa confiável da rigidez destes materiais após o contato com o asfalto. De acordo com Barsksdale e Brown (1989) e Sprague et al., (1998), a rigidez tem sido proposta como a primeira classificação para o potencial de contribuições da camada intermediária. No entanto, pouco se tem relatado sobre a contribuição da influência da rigidez inicial de geotêxteis não tecidos impregnados, já que os níveis de deformação do pavimento são extremamente baixos sob as condições de trabalho. Desta forma, é necessário entender e enfatizar o incremento de rigidez inicial que estes materiais adquirem após a impregnação e passam para a estrutura do pavimento (SPRAGUE, et al., 1998).

Pesquisas apontam como válida a consideração de que a inserção de uma camada intermediária de geotêxtil acrescenta rigidez suficiente ao sistema e propicia um aumento na vida útil da nova camada de recapeamento, atrasando assim, o momento de uma nova restauração. Desta forma, o desempenho geral do pavimento é melhorado através de uma

combinação de efeitos: atraso do trincamento por reflexão, trincas refletidas de severidade atenuada e manutenção da estanqueidade do revestimento, protegendo as camadas subjacentes da ação das águas pluviais. Assim, é possível manter a resistência da estrutura às deformações sob cargas repetidas e evitar o bombeamento de finos da camada de base através destas trincas refletidas (LYTTON, 1989; BARKSDALE e BROWN, 1989; GILCHRIST e PAUL, 1994; HASIN e MUSTAFA, 1994; ROSCHEN, 1997; GRZYBOWSKA e WOJTOWICZ, 1996; CARMO et al., 1999; VILCHEZ 2000; FHWA, 2002).

- **Barreira impermeável**

A barreira impermeável prevista na estrutura do pavimento ajuda a minimizar a infiltração de água e mantém as camadas inferiores a menores teores de umidade (MARIENFELD e BAKER, 1999). Manter o material a menores teores de umidade pode resultar em níveis mais elevados de resistência à tração (BUTTON, 1989; SUTHERLAND e PHILLIPS, 1990; AL-QADI, 1997; BUTTLAR et al., 1999; FHWA, 2005). A membrana de alívio de tensões também impermeabiliza o asfalto, e quando as trincas ocorrem, a água tende a não piorar a situação (SPRAGUE e CARVER, 2000). Sua ação como camada impermeabilizante evita a possível perda de capacidade de suporte dos solos e de materiais granulares sob o umedecimento que a infiltração de águas pluviais produziria através das trincas do revestimento.

Com a utilização do geotêxtil, mesmo após o surgimento das trincas na superfície e seu posterior espalhamento, o pavimento permanecerá impermeável, uma vez que o geotêxtil não é danificado pela formação e crescimento das trincas, mantendo assim a integridade do pavimento restaurado (PHILLIPS, 1993; RODRIGUES, 2003; BUTTON e LYTTON, 2007). A abertura de painéis, geração de afundamentos em trilha de roda e o bombeamento de finos, serão evitados ou inibidos, levando o pavimento a permanecer em uma condição funcional adequada por um período de tempo adicional. Há evidências de que a manta impregnada com asfalto vai resistir à infiltração de água, mesmo após o aparecimento de fissuras na superfície (BUTTON e LYTTON, 2007). A estrutura do pavimento funcionará como um sistema de drenagem para dissipar o fluxo de água para os lados na rodovia, ao invés de permitir a infiltração da água nas camadas de base e subleito. A membrana formada nesta prática proporcionará, ao menos, a impermeabilização temporária da base da estrada (MAURER e MALASHESKIE, 1989).

A quantidade de ligante é fundamental para o sistema final geotêxtil-asfalto. O ligante forma uma barreira de baixa permeabilidade no tecido unindo-o à camada subjacente. Assim, a investigação dos parâmetros hidráulicos dos materiais geossintéticos utilizados como sistemas anti-reflexão de trincas, em termos de permeabilidade do material após a impregnação, pode facilitar o projeto e a compreensão dos mecanismos que regem o comportamento deste sistema. Este parâmetro pode contribuir para o projeto de drenagem das camadas de base e sub-base do pavimento, ajudando a reduzir a infiltração de água e os custos de manutenção.

Estudos realizados por Marienfeld e Baker (1999) apresentam resultados de ensaios de permeabilidade em amostras de geotêxtil não tecido com diferentes quantidades de asfalto AC-20. Foram realizados ensaios de permissividade, de acordo com as especificações da ASTM-D4491, com modificações na coluna d'água sobre as amostras, para que se pudesse atingir um fluxo ideal através de amostras de baixa permeabilidade. A Figura 2.10 ilustra estes resultados, em que a taxa de ligante inclui a quantidade retida pelo material durante os ensaios e mais 0,23 l/m² (indicado para aderir o geotêxtil às camadas do pavimento).

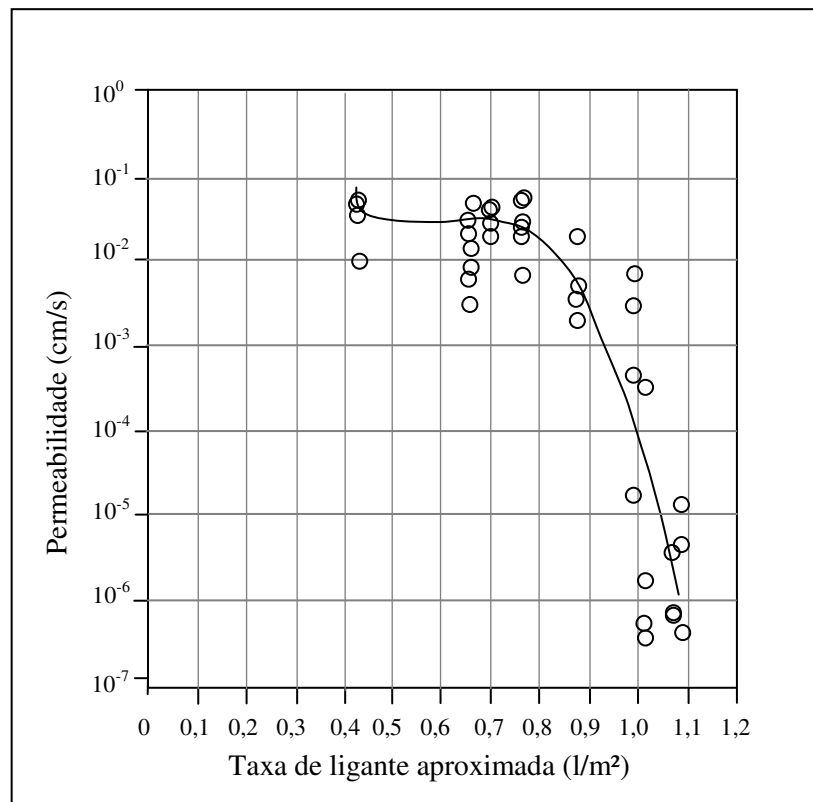


Figura 2.10 - Resultados dos ensaios de permeabilidade em geotêxteis não tecidos (MARIENFELD e BAKER, 1999).

Nota-se que a partir de 0,90 l/m², começam a aparecer indicativos de melhoria no desempenho quanto à barreira impermeável esperada. A partir de 1,0 l/m², os materiais alcançam níveis de permeabilidade da ordem de 10⁻⁶ cm/s, indicando um aumento considerável na impermeabilização do pavimento.

Outro ensaio realizado para a determinação das propriedades hidráulicas em materiais de baixa permeabilidade é o ensaio de transmissão de vapor d'água. De acordo com as recomendações da ASTM E96M (2005), através deste ensaio pode-se quantificar a perda de massa de água, em termos de permeabilidade normal ao plano do material. Os corpos de prova são acoplados a um recipiente com o fundo preenchido pelo líquido a ser avaliado (água, solvente, etc), onde é verificada a variação da massa do conjunto, em determinados intervalos de tempo. Com os valores de perda de massa de água, conhecendo as condições do ambiente e a geometria da amostra, é possível determinar as propriedades de permeância do material. Neste contexto, este ensaio pode ser realizado em amostras de geotêxteis não tecidos impregnadas com ligante asfáltico, para o conhecimento do comportamento hidráulico destes materiais, quanto a sua utilização como barreira impermeável na restauração de pavimentos.

A conclusão que a experiência de campo aponta ser válida até o momento é a de que a inserção do sistema Geotêxtil-Asfalto é capaz de propiciar um aumento da vida de reflexão de trincas de uma camada asfáltica de recapeamento, aplicada sobre um pavimento trincado, além de prolongar por um período de tempo significativo, o momento em que o pavimento deve ser novamente restaurado (FHWA, 1976; FHWA, 1984; BAKER, 1997). Desta forma, a fase pós-reflexão de trincas ocorrerá a uma velocidade menor, de forma mais controlada e previsível, em vista da menor severidade das trincas e da impermeabilização superficial.

2.6.4 Geotêxtil não tecido impregnado com asfalto em SART

Quando são utilizados geotêxteis impregnados com ligantes asfáltico na interface entre o revestimento antigo deteriorado e a camada de recapeamento (Figura 2.11), tem-se uma maior taxa de ligante asfáltico nesta interface, do que a obtida com pintura convencional. Desta forma, os seguintes benefícios são obtidos:

- impermeabilização do pavimento contra a infiltração de águas pluviais, uma vez que os poros da manta são praticamente preenchidos e ela não se rasga, mesmo após a reflexão de trincas; e

- aderência mais regular entre a camada de recapeamento e o pavimento subjacente, em vista de uma distribuição mais uniforme da imprimação, levando a um melhor desempenho global da camada de recapeamento.
- Afastamento da concentração de tensões no topo da trinca, de modo que esta tenha sua intensidade de propagação diminuída, retardando o tempo de aparecimento na superfície.

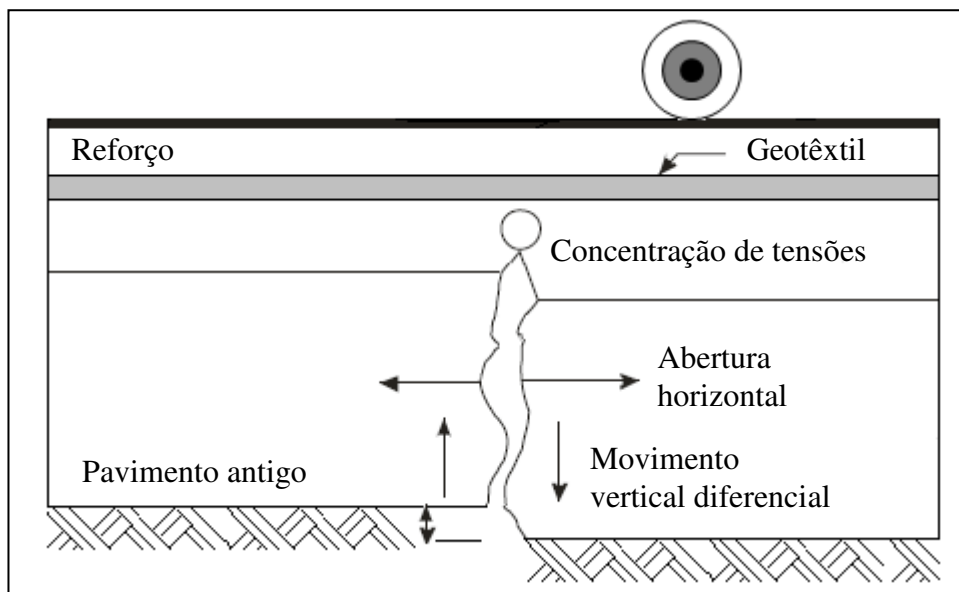


Figura 2.11 – Posicionamento do geotêxtil em pavimento recapeado (adaptado de DNIT, 2006).

O efeito da utilização de geotêxtil impregnado com ligante asfáltico pode ser equivalente à redução de 3 a 4 centímetros na espessura da camada asfáltica de recapeamento, como ficou evidenciado pelo desempenho da rodovia DF-003 e pela avaliação de numerosos ensaios de campos realizados pela CALTRANS (Departamento de Transportes da Califórnia). Quando é utilizado geotêxtil impregnado com asfalto, permite-se ainda a aplicação de três a quatro vezes mais ligante asfáltico na imprimação, sem risco de ocorrência de exsudação, em comparação com a taxa de imprimação necessária no caso do recapeamento simples (RODRIGUES, 2003). Contudo, o geotêxtil não tecido propicia uma menor aderência entre as duas camadas do pavimento quando este sofre pouca imprimação, assim, a tendência é de não aderir suficientemente às camadas asfálticas. Ao contrário, quando o geotêxtil sofre excesso de imprimação, a frenagem e a aceleração dos veículos pesados podem ocasionar o descolamento da camada de recapeamento.

2.6.5 Recomendações para a aplicação dos geotêxteis

Atualmente no Brasil, os fabricantes disponibilizam vários tipos de geotêxteis para serem utilizados como camada intermediária na restauração de pavimentos flexíveis. Esta linha é composta por geotêxteis de poliéster (PET) ou polipropileno (PP), termofixados ou agulhados, podendo conter reforço adicional com a fibra de vidro.

De acordo com Ceratti e Rodrigues (2004), recomenda-se os não tecidos de poliéster ou polipropileno com gramatura (g/m^2) acima de 150, espessura maior ou igual a 1,5 mm, resistência à tração maior ou igual a 7,0 kN/m e ponto de fusão maior ou igual a 180°C. Em termos de desempenho, pouca diferença tem sido observada entre os geotêxteis de diferentes gramaturas que atendam a este critério, com um ligeiro benefício acrescentado pelas menores gramaturas.

Anteriormente no Brasil, os geotêxteis de maior gramatura (acima de 200 g/m^2) eram mais empregados e podem ter sido uma das causas de insucessos da técnica. Atualmente, a indicação é de que se utilize geotêxteis de baixa massa por unidade de área, em torno de 135 a 180 g/m^2 . As empresas que aplicam o geotêxtil em obras de restauração de pavimentos geralmente não se baseiam em nenhuma norma para a sua aplicação, apenas seguem orientações de projeto e recomendações feitas pelos próprios fabricantes.

As principais dificuldades relacionadas com a técnica estão na aplicação do geotêxtil, quanto à ocorrência de dobras e quanto à ruptura completa do ligante, evitando que fique água ou solvente retidos no material, o que prejudica o desempenho da restauração. Normalmente as dificuldades relacionadas com a aplicação do geotêxtil são:

- no controle da taxa de ligante;
- no momento certo da aplicação da manta, antes ou depois da ruptura da emulsão asfáltica;
- em relação a dobras, rasgos ou rugas durante a aplicação; e
- em relação à falta de experiência, tanto dos órgãos contratantes, quanto da fiscalização e de algumas empresas que executam a técnica.

Em geral, as empresas fazem duas aplicações do ligante, uma antes do posicionamento do geotêxtil, com uma taxa em torno de 70% do total de ligante e, a segunda é feita sobre o geotêxtil com os 30% restantes. Outras empresas, por indicação do fabricante, fazem apenas uma única aplicação do ligante antes da colocação da manta de geotêxtil. Com uma posterior compactação da camada, a impregnação invertida ocorrerá de forma homogênea.

A estimativa da quantidade de ligante asfáltico a ser aplicado sobre o geotêxtil é um dos principais problemas desta técnica, pois variam dependendo do tipo de ligante, do geossintético e das condições de superfície do pavimento antigo.

2.7 Ligantes asfálticos

2.7.1 Generalidades

Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas são pavimentadas com revestimento asfáltico, além deste ser também utilizado em grande parte das ruas e avenidas. O uso intensivo de asfalto em pavimentação deve-se a várias razões:

- custo relativamente baixo em relação a outras soluções de pavimentação;
- proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável;
- é impermeabilizante, durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais; e
- pode ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos; e
- dispensa grandes cuidados com armazenagem e transporte, apresentando maior facilidade no processo de aplicação.

A definição do ligante asfáltico para a impregnação do geotêxtil deve ser feita com cautela e baseada em parâmetros técnicos que forneçam segurança na escolha de cada um dos materiais. A emulsão asfáltica é, no entanto, inviável em países frios, pois as baixas temperaturas retardariam a evaporação da água nela contida. Em países da América do Sul como Peru e Bolívia e em algumas regiões da Europa, é comum a utilização de asfalto diluído neste tipo de aplicação. Nos Estados Unidos, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) é geralmente a escolha dos projetistas.

A prática rodoviária nacional e os fabricantes de geotêxteis sempre especificaram como produto asfáltico para a impregnação do geotêxtil as emulsões asfálticas convencionais.

Quando houve a abordagem de uma possível utilização de outros tipos de ligantes asfálticos, o meio técnico envolvido apresentou surpresa e total desconhecimento da eficácia e/ou restrições de outros produtos asfálticos. Após esta constatação, passou-se para a fase de identificação de quais seriam os outros tipos de ligantes que poderiam ser aplicados para esta finalidade.

Um estudo proposto por Klein et, al. (2003) sobre a análise de custo entre o CAP, o asfalto diluído e a emulsão asfáltica, mostrou que o asfalto diluído foi considerado inadequado quando analisado o seu custo aliado ao desempenho muito próximo ao da emulsão asfáltica. A utilização do CAP pode ser interessante após o conhecimento de benefícios futuros deste ligante. Já a emulsão asfáltica apresenta o menor custo, que justifica em partes, o motivo histórico da utilização deste produto no Brasil.

Segundo alguns especialistas, a utilização de asfalto diluído é ambientalmente incorreta, pois, no processo de ruptura deste ligante são liberados para a atmosfera, gases do diluente utilizado na fabricação do produto. Outra desvantagem do asfalto diluído em relação à emulsão asfáltica é em relação ao tempo de ruptura. A razão da intensa utilização de emulsões asfálticas, além do custo, é que são de fácil obtenção e aplicação, quando comparadas ao CAP.

2.7.2 Emulsões asfálticas

As emulsões asfálticas representam na engenharia de rodoviária, uma considerável economia de energia, já que na maioria das vezes, podem ser aplicadas sem necessidade de aquecimento. O transporte e armazenamento também são facilitados, pois requerem instalações simples. Este ligante não gera vapores tóxicos poluentes, representando assim um produto ecologicamente mais viável.

A emulsão é definida como uma dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis (asfalto e água), que quando mantidos em suspensão por agitação ou, mais frequentemente, por pequenas quantidades de emulsificantes, formam uma mistura estável.

Emulsões asfálticas representa m uma classe particular de emulsões óleo-água, na qual a fase “óleo” tem uma viscosidade elevada. Os dois materiais não formam uma emulsão por simples mistura dos dois componentes, sendo necessária a utilização de um produto auxiliar para manter a emulsão estável, os agentes emulsificantes. Além disso, o asfalto precisa ser

preparado por ação mecânica que o transforme em pequenas partículas ou glóbulos (IBP, 1999; ABEDA, 2001).

Os agentes emulsificantes têm o objetivo de fornecer a dispersão da fase asfáltica na fase aquosa e revestir os glóbulos de asfalto com uma película protetora, permitindo que estes permaneçam em suspensão na água por algum tempo, evitando a aproximação entre as partículas e sua posterior coalescência (DNER, 1998). Os agentes emulsificantes podem ser do tipo ionizáveis, conferindo às emulsões cargas positivas ou negativas, respectivamente emulsões catiônicas e aniônicas. Podem ser também do tipo não ionizáveis, ou seja, eletricamente neutras.

As proporções entre o ligante asfáltico e o agente emulsificante que geralmente entram na mistura são da ordem de 60% a 70% para o asfalto, 0,2% a 1,0%, com um máximo de 2,0% para o agente emulsificante, em peso, sendo o restante constituído pela fase aquosa. Ademais, o solvente é eventualmente utilizado.

As emulsões devem permanecer suficientemente fluidas para sua adequada aplicação. Os glóbulos de asfalto são mantidos separados pelo agente emulsificante até que a emulsão se deposite nas partículas de agregados causando a ruptura da emulsão. Desta forma, para que o asfalto desempenhe a sua função final de cimentação e impermeabilização, a fase asfalto deve separar-se da água, através da neutralização das cargas eletrostáticas e da evaporação da água. O tempo para que haja a coalescência dos glóbulos de asfalto, denomina-se tempo de ruptura.

A cor predominante da emulsão asfáltica antes da sua ruptura é a cor marrom. Isto facilita a inspeção visual e a constatação da qualidade do produto. Após a ruptura, a cor preta do CAP prevalece, sendo facilmente constatada a ruptura da mesma (IBP, 1999; ABEDA, 2001; WICKERT, 2003; DAVID, 2006). A velocidade de ruptura depende do tipo de emulsão, da reatividade, da temperatura e umidade ambiente e da temperatura dos materiais em contato (ABEDA, 2001).

As emulsões catiônicas podem ser de ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL). Dependendo da quantidade de cimento asfáltico envolvido, elas podem ser classificadas em 1C e 2C, onde C indica emulsão catiônica e os números 1 e 2 estão relacionados à viscosidade relativa e à quantidade de cimento asfáltico empregado na fabricação. Nas emulsões de ruptura rápida, a ruptura ocorre imediatamente ou logo após a aplicação, diferentemente das rupturas médias e lentas, que demoram mais tempo para a ruptura.

No Brasil, a emulsão asfáltica mais utilizada é a RR-1C, seguida da RR-2C, não só porque aqui predominam agregados eletronegativos, mas também porque estas emulsões apresentam boa adesividade com outros agregados. Atualmente as emulsões catiônicas têm grande importância na pavimentação, pois correspondem à maioria das emulsões utilizadas para este fim, por satisfazer de forma econômica as condições exigidas nas inúmeras fases dos serviços.

2.7.3 Recomendações para a taxa de aplicação do ligante asfáltico

Atualmente, as taxas de ligante asfálticos recomendadas pelos fabricantes e projetistas variam de 0,9 l/m² a 1,3 l/m² (valor residual), sendo que estes atentam para o fato de a taxa de ligante variar com a massa por unidade de área do geotêxtil, com o tamanho das trincas do pavimento antigo, dentre outras variáveis.

As empresas indicam o uso de emulsão asfáltica de ruptura rápida, RR-1C ou RR-2C, por sua fácil e rápida aplicação. Outras recomendam o uso de cimento asfáltico de petróleo de baixa viscosidade (CAP), como sendo a melhor opção, por permitir uma colocação direta do geotêxtil sobre o ligante, ou seja, sem tempo de ruptura, e por proporcionar aparentemente uma melhor aderência do sistema geotêxtil-asfalto.

A quantidade de pintura de ligação a ser aplicada na restauração é de grande importância para o recapeamento asfáltico. Pouca quantidade de ligante pode não saturar o geotêxtil, permitindo a passagem de água para as camadas inferiores. Uma grande quantidade de ligante pode ocasionar excessos acima ou abaixo da manta, formando uma possível camada de deslizamento após o recapeamento. Button et al. (1982) sugerem um equacionamento para o cálculo da quantidade de ligante.

- Estimativa de Q_D

O cálculo da quantidade de ligante residual a ser utilizada na restauração de pavimentos flexíveis com a utilização de geotêxtil pode ser estimado por:

$$Q_D = 0,36 + Q_S + Q_C \quad (1)$$

Sendo:

Q_D = Quantidade de ligante residual de projeto (l/m²);

Q_S = Índice de saturação do geotêxtil a ser utilizado (l/m^2);

Q_C = Correção baseada na demanda necessária pela superfície do pavimento existente (l/m^2).

- Estimativa de Q_S

Quanto ao valor de Q_S , a maioria dos fabricantes de geotêxteis disponibiliza a retenção de asfalto de cada material. Porém, Button et al., (1982) sugerem como ensaio, que o geotêxtil deve ser primeiro saturado com cimento asfáltico (CAP) a $120^\circ C$ por 1 minuto. Deixa-se esfriar e pressiona-se um ferro quente entre dois papéis absorventes para remover o asfalto excedente, e assim é determinado o valor de Q_S (KOERNER, 2005). A quantidade de Q_S depende diretamente das características do geotêxtil, principalmente da espessura. Um procedimento similar pode ser realizado em campo, utilizando uma folha de metal completamente lisa abaixo do geotêxtil.

- Estimativa de Q_C

Na Tabela 2.1 são apresentados os valores para Q_C . Observa-se que a quantidade de ligante (residual) necessária aumenta com as condições de deterioração do pavimento. As taxas de aplicação de ligante asfáltico residual devem ser estabelecidas no projeto e ajustadas em campo no início dos serviços, conforme as condições particulares de cada obra.

Tabela 2.1 – Demanda de ligantes em pavimentos de superfícies betuminosas (BUTTON et al.,1982).

| Condições da Superfície | Q_C (l/m^2) |
|--|--|
| Nivelada | -0,09 a 0,09 |
| Lisa, não porosa | 0,09 a 0,23 |
| Ligeiramente porosa e ligeiramente oxidada | 0,23 a 0,36 |
| Ligeiramente porosa e oxidada | 0,36 a 0,50 |
| Porosa e oxidada | 0,50 a 0,59 |

2.8 Aplicação do geotêxtil em sistemas anti-reflexão de trincas

2.8.1 Recomendações para a aplicação do geotêxtil

Embora os projetos e especificações para o tratamento do pavimento com o sistema anti-reflexão de trincas varie entre as indicações de projetistas, fabricantes de geotêxtil e a literatura, as recomendações iniciais para a execução da camada geralmente são:

- evitar dias chuvosos ou sob risco de chuva quando da execução dos serviços;
- corrigir panelas, depressões, deformações na trilha de rodas ou escorregamentos eventualmente existentes antes da execução do tratamento;
- cuidar para que a superfície na qual será aplicado o tratamento não apresente água e esteja livre de pó, lamelas, material solto, evitando assim prejudicar a aderência entre o revestimento antigo, o geotêxtil e a camada de recapeamento;
- verificar as condições de distribuição do ligante, ou seja, a vazão da emulsão em função da velocidade do veículo, para que se possa atender à taxa de aplicação especificada; e
- o ligante deverá ser aplicado de uma única vez, em toda a largura da faixa a ser tratada.

A eficiência desta técnica de recapeamento depende muito da adequada instalação do geotêxtil, da qualidade dos materiais utilizados e da interação entre eles.

A resistência mecânica do geotêxtil deve suportar os esforços de tração e punção a que estará submetido durante a instalação, tanto na fase de estiramento quanto na fase de compactação, ou no caso de um eventual tráfego.

Outro aspecto importante a ser destacado é a flexibilidade do geotêxtil. Os de menor gramatura se destacam por se conformarem com mais facilidade às curvas das estradas (reduzindo a necessidade de cortes ou dobras), às superfícies fresadas e às irregularidades do pavimento antigo.

Um problema inevitável neste tipo de técnica são as ondulações na manta provocadas durante a instalação, que podem facilitar a propagação de trincas na camada asfáltica de recapeamento. Os cuidados em geral são no sentido de limitar a formação de ondulações, através da aplicação de tensões apropriadas durante o processo de desenrolamento da manta.

Alguns cuidados devem ser tomados com relação à aderência entre o geotêxtil e o pavimento subjacente. Excesso, ruptura incompleta, ou falta do ligante, assim como umidade excessiva da manta de geotêxtil, podem causar insucessos futuros.

2.8.2 Sequencia das Operações

2.8.2.1 Primeira aplicação do ligante asfáltico

A superfície onde for aplicada a manta deve estar a mais limpa possível, uma vez que a poeira pode reduzir a aderência entre as camadas. É recomendável a limpeza do material solto por meio de varredura mecânica ou jato de ar comprimido, após a fresagem da rodovia.

Para a primeira aplicação do ligante asfáltico, recomenda-se uma taxa de 70% a 80% do valor da taxa definida em projeto ou experimentalmente. Esta taxa deve ser compatível com o tipo de geotêxtil utilizado.

A taxa de aplicação deve ser controlada através da pesagem de bandejas antes e depois da aplicação, permitindo a correção na segunda aplicação para compensar uma eventual diferença. O tempo de ruptura está diretamente relacionado com as condições climáticas do local e do tipo da emulsão. Na Figura 2.12 são ilustradas as etapas de fresagem da superfície e primeira aplicação do ligante.



(a)



(b)

Figura 2.12 – Sequência de operações: (a) Fresagem da superfície e (b) Primeira aplicação do ligante (BIDIM, 2005).

2.8.2.2 Aplicação da manta geotêxtil

Após a constatação da ruptura da emulsão asfáltica, o geotêxtil pode ser aplicado. No caso de CAP, a colocação do geotêxtil deve ser feita logo após a aplicação do ligante. A colocação do geotêxtil pode ser efetuada manualmente, com um pendural instalado em uma pá-carregadeira com a caçamba levantada ou com equipamento específico, como ilustra a Figura 2.13. Deve ser aplicada sobre a manta, uma tensão apropriada enquanto esta estiver sendo desenrolada, com cuidado para que não se formem ondulações ou rugas durante a aplicação. As uniões longitudinais e transversais das mantas de geotêxteis devem ser feitas por sobreposição de 10 a 15 cm.



Figura 2.13 – Instalação do geotêxtil: (a) Instalação com equipamento específico e (b) Detalhe do rolo entre as imprimações (BIDIM, 2005).

É importante que se evite sobreposições nas regiões de solicitação das cargas do tráfego e, nas áreas de sobreposição deve-se aplicar uma sobretaxa de ligante asfáltico para garantir uma perfeita impregnação.

2.8.2.3 Segunda aplicação do ligante asfáltico

O Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER) especifica que a compactação do geotêxtil deve ser executada com rolo pneumático com baixa pressão, de 40 a 50 psi. No entanto, estes valores podem variar de acordo com as especificações de projeto.

Duas ou três passadas do rolo de pneus normalmente são suficientes para induzir a penetração invertida do ligante asfáltico no geotêxtil, bem como promover a aderência completa entre o geotêxtil e o pavimento subjacente (DNER, 1998).

Sobre a manta deve ser feita uma segunda aplicação do ligante asfáltico para impregnar o geotêxtil e promover a ligação entre este e camada de reforço. A taxa de emulsão deve ser aquela que complementa a taxa total de projeto, geralmente de 20 a 30 % da taxa total. Na Figura 2.14 são apresentados o tipo de rolo mais utilizado neste tipo de tratamento e a segunda aplicação do ligante.



Figura 2.14 – Sequência de operações: (a) Compactação com rolo pneumático e (b) Aplicação da segunda taxa de ligante (Vilchez, 2002; BIDIM, 2005).

2.8.2.4 Compactação do concreto asfáltico

Após a ruptura da emulsão asfáltica, recomenda-se que a distribuição do concreto asfáltico sobre a segunda pintura de ligação seja feita manualmente, ao longo das faixas de trilhas dos equipamentos de transporte. Esta etapa executiva é indicada para que o trânsito destes equipamentos não danifique a manta geotêxtil.

A próxima etapa consiste na aplicação da camada de concreto betuminoso na espessura indicada, seguindo os procedimentos usuais de pavimentação e do projeto. Por fim, deve-se proceder a compactação da camada betuminosa seguindo os procedimentos convencionais de pavimentação asfáltica. Na Figura 2.15 são mostradas as etapas de salgamento da superfície e compactação do concreto asfáltico.



Figura 2.15 – Sequência de operações: (a) Distribuição do concreto asfáltico e (b) Compactação do concreto asfáltico (BIDIM, 2005).

2.9 Comportamento de geotêxteis impregnados com asfalto

2.9.1 Características Tensão-Deformação

Geossintéticos são materiais visco-elasto-plásticos, anisotrópicos e em alguns casos, seu comportamento depende da tensão normal aplicada (PERKINS, 2000). O comportamento tensão-deformação é ilustrado na Figura 2.16 (a) onde uma resposta não linear é vista durante o carregamento.

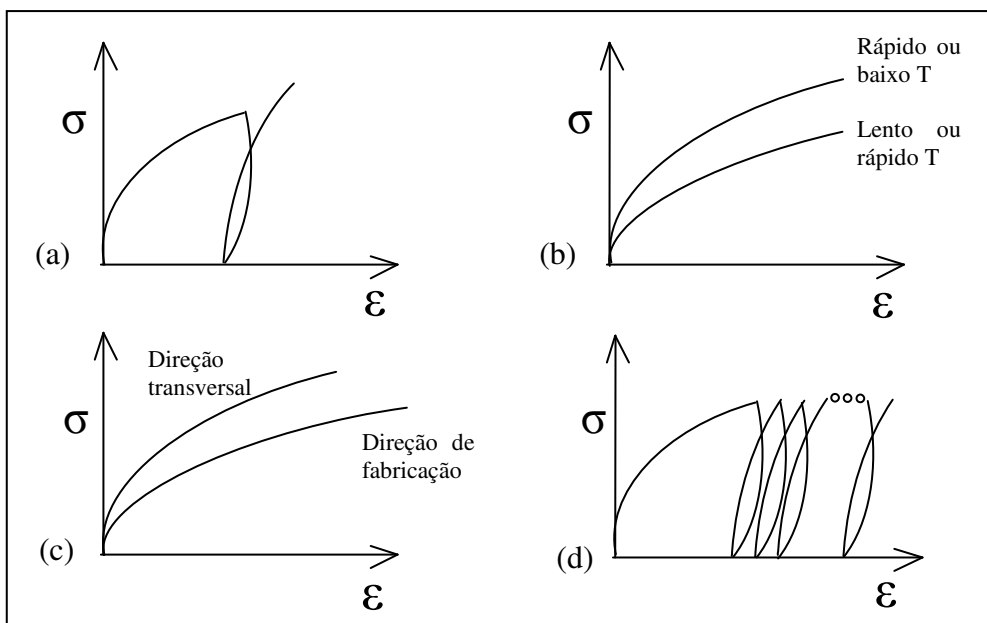


Figura 2.16 – Tipos de comportamento: (a) Elasto-plástico; (b) Visco-elástico-plástico; (c) Anisotropia; e (d) acúmulo de deformação permanente com as cargas aplicadas (PERKINS, 2000).

Uma resposta mais rígida é observada durante o descarregamento e é geralmente aproximada a uma resposta linear indicativa do comportamento elástico do material. O comportamento visco-elásto-plástico é ilustrado na Figura 2.16 (b), em que a variação da temperatura e da velocidade de aplicação do carregamento resultam em respostas diferentes de tensão-deformação. Comportamento anisotrópico implica numa diferente resposta quanto à tensão-deformação dependendo da direção em que o carregamento é aplicado, conforme indica a Figura 2.16 (c). O acúmulo de deformação permanente com o cliço de carga aplicado é geralmente observado quando ensaios cíclicos de tração com carga constante são realizados (Figura 2.16d).

Asmaway e Bourdeau (1996) mostraram em seus estudos que, para um geotêxtil não tecido, o comportamento tensão-deformação é não linear e que acúmulos de deformações permanentes com as cargas aplicadas ocorrem com carregamentos cíclicos.

Neste contexto os geotêxteis não tecidos são submetidos a ensaios de tração, com o objetivo de melhor compreender suas características de resistência e deformabilidade a diferentes condições de carregamento.

2.9.2 Propriedades de tração

A resistência dos geotêxteis pode ser determinada de várias formas, cada qual buscando reproduzir uma condição de campo. As propriedades de materiais poliméricos são avaliadas, portanto, através de ensaios de tração. Os ensaios de tração podem ser utilizados no controle de qualidade durante a fabricação, na comparação de produtos diferentes, na identificação e na avaliação de mudanças no comportamento mecânico após as modificações ou solicitações.

A maioria dos métodos utiliza esforços unidirecionais, ou seja, aplicam-se esforços de tração ao longo de um eixo apenas. Os ensaios de tração unidirecional são realizados em equipamentos que permitem altas taxas de deformação das amostras ensaiadas. De um modo geral, este ensaio consiste em prender as extremidades dos corpos de prova com um par de garras (geralmente pneumáticas) na base e no topo do seu comprimento e sujeitar o conjunto à tração em uma máquina universal de ensaio. Após a aplicação da solicitação, o material deforma-se sob taxa constante até que se atinja a ruptura ou as faixas de deformação de interesse.

2.9.3 Ensaio de tração faixa larga em geotêxteis impregnados

Em laboratório, rotineiramente se utilizam os ensaios em faixa larga para quantificar a resistência à tração dos geotêxteis. O ensaio é realizado de acordo com a NBR 12824/93 e as dimensões do corpo de prova para o geotêxteis são 200 x 200 (mm). Na realização dos ensaios, a direção que será solicitada ficará apenas com 100 (mm) devido a uma parte da amostra ser presa na extremidade das garras. Com estas dimensões, reduz-se a estricção do material e se obtém resultados mais próximos das reais condições de campo.

No caso de recapeamento asfáltico, esse ensaio tem o objetivo de determinar o comportamento da resistência e deformabilidade de amostras de geotêxtil não tecido, afim de avaliar o incremento de rigidez obtido pela impregnação do material com diferentes ligantes e diversas taxas de ligante. Rodrigues e Vilchez (1998) realizaram ensaios de tração faixa larga no sentido transversal, com geotêxteis Bidim OP-20 e diferentes taxas de impregnação. Nas amostras com impregnação de asfalto, pode-se observar claramente através das curvas tensão-deformação (Figura 2.17), um trecho elástico e outro plástico antes da ruptura, com aumentos significativos da resistência à tração e do módulo tangente inicial, com o aumento da taxa de impregnação de asfalto. Este aumento de resistência à tração vem a ser ainda maior se as amostras forem compactadas com pressões iguais às de compactação de campo.

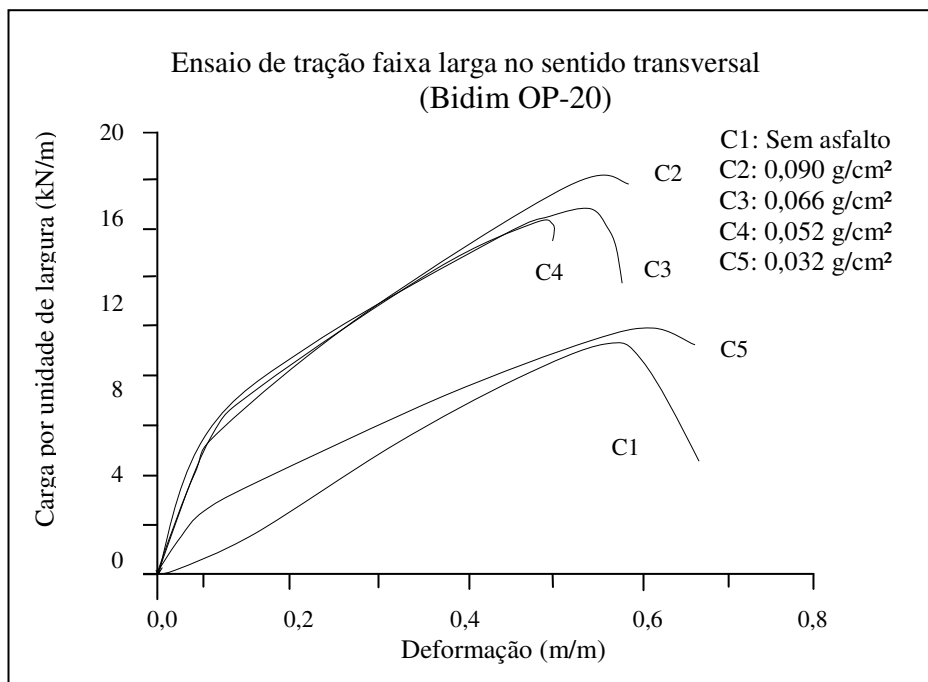


Figura 2.17 – Efeito de taxa de impregnação do Geotêxtil impregnado com asfalto (RODRIGUES e VILCHEZ, 1998).

Wickert (2003) conduziu ensaios de tração faixa larga com base na NBR 12824/93 em 5 amostras de geotêxtil, com o uso de ligantes (Emulsão Asfáltica) e com taxas de impregnação diferenciadas, e as comparou com o material virgem. A velocidade de carregamento foi de 20 mm/min. Através deste estudo, o autor observou quanto ao uso de emulsão asfáltica, que a impregnação com taxa insuficiente (ao valor utilizado em campo) tende a aumentar os valores de resistência à tração e rigidez secante a 5% de deformação. Os geotêxteis 100% polipropileno apresentam resistência à tração a taxas insuficientes, superiores ao observado para o caso de impregnação ideal, enquanto que os de poliéster foram muito pouco afetados pela quantidade de ligante. A impregnação insuficiente pouco alterou o alongamento na ruptura destes materiais, mas aumentou consideravelmente este alongamento no caso ideal para os geotêxteis não tecidos termofixados; a impregnação aumentou a rigidez a 5% de deformação, e um maior aumento relativo foi observado no geotêxtil de poliéster.

Embora alguns estudos de resistência e deformabilidade em geotêxteis não tecidos com emulsão asfáltica tenham sido realizados, pouco se falou sobre o comportamento destes materiais ao nível de deformações da camada asfáltica do pavimento. Os níveis de deformações de 2 e 5% são valores extremamente elevados comparados à deformabilidade da camada asfáltica, que tende a ser muito menor.

2.10 Considerações Finais

Diante do exposto na literatura, o uso de geotêxteis não tecidos, aplicados como elemento de reforço das camadas de asfalto em estruturas de pavimentos flexíveis, contribui significativamente a esta camada com dois mecanismos distintos: rigidez adicional à estrutura e barreira de umidade.

O mecanismo de reforço contribui para a vida em fadiga da camada asfáltica, já que esta retém parte da rigidez devido às repetições da carga de tráfego. Assim, o geotêxtil inibe o desenvolvimento das trincas pela absorção das tensões vindas do pavimento inferior e atua como interceptador da propagação das trincas já existentes. Os níveis de deformação do pavimento são extremamente baixos sob as condições de trabalho, no entanto, pouco se tem relatado sobre a contribuição da influência da rigidez dos geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica a tais níveis de deformação.

Na literatura, encontram-se relatos de que esta membrana também tende a impermeabilizar o pavimento após o contato com ligante, ajudando a minimizar a infiltração de água para as camadas inferiores. Manter estas camadas a menores teores de umidade pode resultar em menores níveis de deformabilidade da estrutura do pavimento. Assim, a investigação dos parâmetros hidráulicos dos materiais impregnados, em termos de permeabilidade normal ao material, pode facilitar o projeto e a compreensão dos mecanismos deste sistema e, ajudar a reduzir a infiltração de água e os custos de manutenção do pavimento.

A literatura mostra também resultados positivos quanto à reflexão de trincas com o uso de geotêxteis. A conclusão que a experiência de campo aponta ser válida até o momento é a de que a inserção do sistema geotêxtil-asfalto é capaz de prolongar por um período significativo, o momento em que o pavimento deve ser novamente restaurado.

A restauração de pavimentos com o uso desta técnica é internacionalmente reconhecida, e começa a fazer parte do cotidiano de algumas empresas brasileiras. Das poucas aplicações da técnica em campo, deve-se destacar que tanto o projeto quanto o procedimento executivo são baseados em conhecimento puramente empíricos. Assim, ao analisarmos o contexto desta pesquisa, percebe-se ainda um grande déficit em relação às informações acerca do comportamento dos geotêxteis não tecidos nas diferentes situações de uso em campo.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta a descrição dos materiais, métodos e equipamentos utilizados para a realização desta pesquisa. Foram realizados ensaios de caracterização de geotêxteis não tecidos, com e sem impregnação do ligante asfáltico. Neste capítulo, estão descritos instrumentalmente os ensaios físicos, mecânicos e hidráulicos. O programa experimental consiste essencialmente de ensaios de tração em faixa larga e ensaios de permeação.

Nesse sentido, foram realizados 9 ensaios de tração para a caracterização dos materiais, 27 ensaios de tração, com um total de 270 corpos de prova impregnados, 9 ensaios de permissividade e 9 ensaios de transmissão de vapor d'água, este último com 27 corpos de prova impregnados. O estudo experimental foi realizado no Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da EESC/ USP.

3.1 Materiais

3.1.1 Geotêxteis não tecidos

Nove diferentes tipos de geotêxteis não tecidos foram utilizados nesta pesquisa, classificados de acordo o polímero, gramatura e o tipo de fibras, de três diferentes fabricantes (A, B e C). Estes foram escolhidos de forma a se abranger a maior parte dos materiais utilizados nas práticas de projeto de restauração de pavimentos com geossintéticos no Brasil. Foi utilizado também um geotêxtil não tecido reforçado com fibra de vidro, pertencente ao fabricante D, que aparenta ser um material promissor para essa aplicação.

São exibidos, na Tabela 3.1, os tipos de geotêxteis utilizados nos ensaios, os valores de gramatura nominais e a nomenclatura adotada para os materiais neste trabalho. Os geotêxteis não tecidos utilizados nesta pesquisa são ilustrados nas Figuras 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Especificações dos geotêxteis não tecidos

| Tipo de Geotêxtil não tecido | Gramatura (g/m²) | Nomenclatura |
|---|------------------------------------|---------------------|
| | 150 | PET-1A |
| <i>Agulhado, 100% poliéster, Fibras curtas</i> | 150 | PET-1B |
| | 180 | PET-2A |
| | 180 | PET-2B |
| | 150 | PET-1C |
| <i>Agulhado, 100% poliéster, Fibras longas</i> | 180 | PET-2C |
| | 150 | PP-1B |
| <i>Agulhado, 100% polipropileno, Fibras curtas</i> | 200 | PP-2B |
| | | |
| <i>100% polipropileno, termofixado Reforçado com fibra de vidro</i> | 430 | PP-FV |

PET- Poliéster; PP- Polipropileno; A = Fabricante de fibras curtas; B = Fabricante de fibras curtas; C = fabricante de fibras longas; D= Fabricante do geotêxtil reforçado.

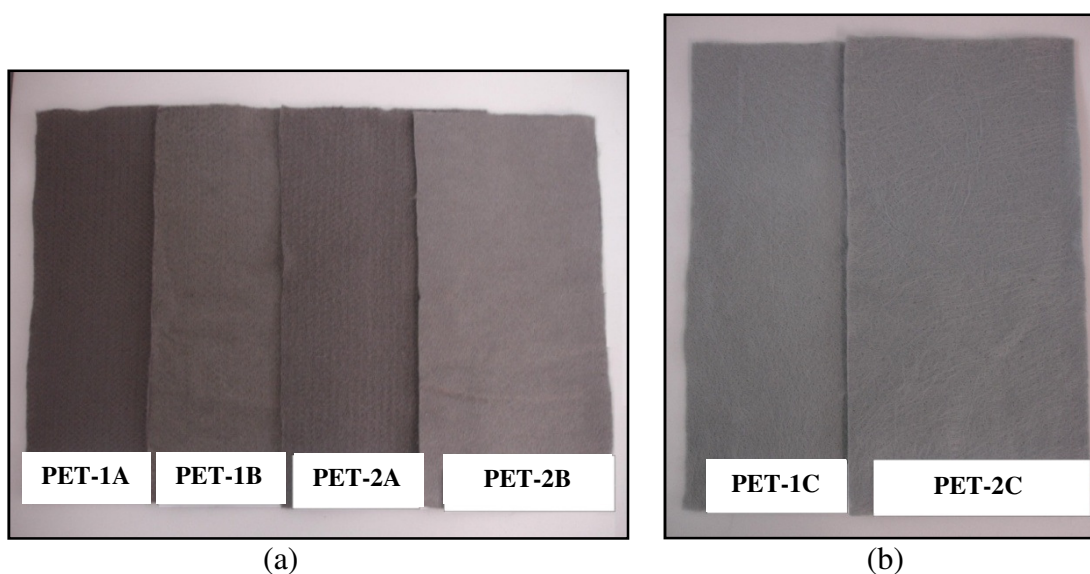


Figura 3.1 – Geotêxteis não tecidos de poliéster utilizados na pesquisa: (a) fibras curtas e (b) fibras longas.

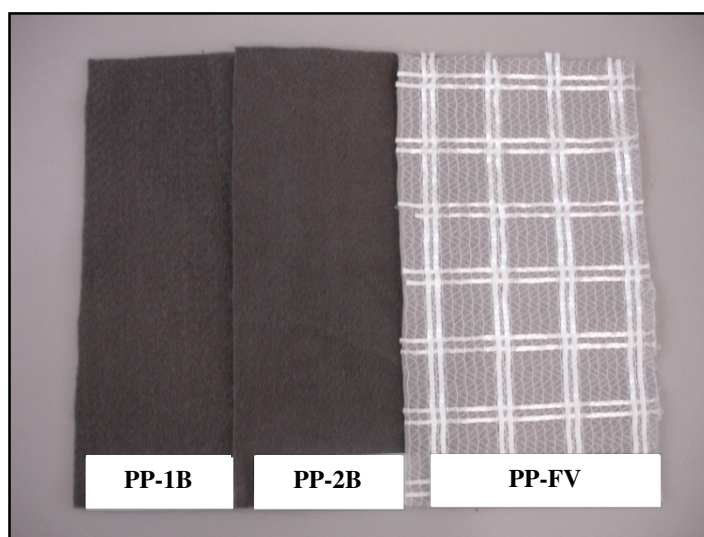


Figura 3.2 – Geotêxteis não tecidos de polipropileno utilizados na pesquisa.

3.1.2 Emulsão Asfáltica

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa para a impregnação dos geotêxteis foi a emulsão asfáltica, de ruptura rápida, catiônica, denominada emulsão asfáltica RR-1C. A emulsão asfáltica é uma dispersão coloidal de asfalto e fase aquosa, basicamente composta de cimento asfáltico, água, agente emulsificante e eventualmente solvente. Na Tabela 3.2 são apresentadas as características da emulsão asfáltica e os ensaios realizados, de acordo com as especificações do DNER (1998).

Tabela 3.2 – Características da emulsão asfáltica RR-1C

| Norma | Ensaio sobre a emulsão | RR1C |
|----------------|---|----------|
| ASTM D 7496/09 | Viscosidade de <i>Saybolt-Furol</i> , S, a 50°C | 21,0 |
| ASTM D 7402/09 | Identificação de Emulsão asfáltica catiônica | Positiva |
| ASTM D 6997/04 | Resíduo de destilação (%) | 63,0 |
| ASTM D 6936/09 | Demulsibilidade (%) | 64,1 |
| ASTM D 6933/08 | Peneiração 0,84mm, % peso máx. | 0,1 |

3.2 Ensaios de caracterização de geotêxteis

Foram realizados ensaios para a caracterização das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geotêxteis não tecidos. Os ensaios e as correspondentes normas para a caracterização dos materiais são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ensaios realizados para caracterização dos geotêxteis não tecidos

| Propriedades | Norma |
|------------------------------------|---------------|
| <i>Física</i> | |
| Espessura nominal | NBR 12569/92 |
| Massa por unidade de área | NBR 12568/92 |
| Ensaio de retenção de asfalto | ASTM 6140/05 |
| <i>Mecânica</i> | |
| Resistência à tração – Faixa larga | NBR 12824/93 |
| <i>Hidráulica</i> | |
| Transmissão de vapor d'água | ASTM E96M/05 |
| Permissividade | ASTM D4491/04 |

3.2.1 Propriedades físicas

Foram realizados os ensaios de espessura nominal e determinação da massa por unidade de área para a caracterização das propriedades físicas dos geotêxteis não tecidos. A preparação dos corpos de prova seguiu as recomendações da NBR 12593 (1992) – Amostragem e preparação de corpos de prova de geotêxteis.

A massa por unidade de área ou gramatura é determinada pela pesagem de amostras de ensaio retiradas de diferentes posições do material recebido em laboratório. As amostras devem possuir área de 100 cm² (10 x 10) cm e a média dos valores de 10 corpos de prova será a massa por unidade de área. O método de ensaio é simples, uma vez que utiliza apenas uma balança digital, com precisão de 0,01g, sendo utilizado para determinar se o material está de

acordo com as especificações referentes ao mesmo, e empregado, portanto, no controle de qualidade de fabricação (NBR 12568/2003).

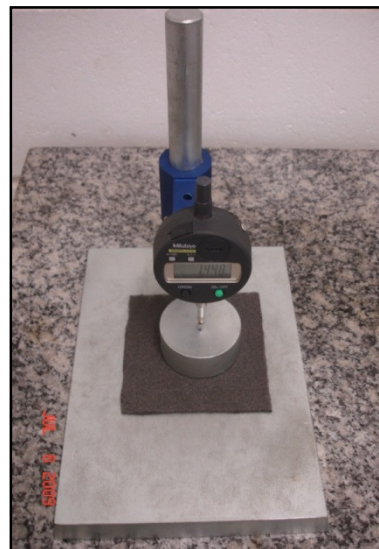
A espessura é também uma das características básicas utilizadas no controle de qualidade de geotêxteis e o método de ensaio segue as recomendações da NBR 12569 (2003). Segundo esta norma, a definição de espessura para os geotêxteis é: a distância entre as superfícies rígidas e paralelas que comprimem o geotêxtil a uma dada pressão.

A espessura é então determinada observando-se a distância perpendicular entre a placa de referência, sobre a qual se apóia o geotêxtil, e a superfície, paralela à placa, de um cilindro de área inferior ao corpo de prova, enquanto exerce a pressão específica de 2 kPa sobre ele. As amostras utilizadas devem possuir dimensão de 100cm² perfazendo um total de 10 amostras. Para a medida da espessura, adota-se uma referência inicial como sendo o ponto zero no extensômetro através da aplicação da pressão estabelecida sobre uma base uniforme. Em seguida, coloca-se a amostra sob pressão sobre esta base, e verifica-se a nova leitura que corresponderá à espessura da amostra.

A balança de precisão utilizada para quantificar a massa por unidade de área é ilustrada na Figura 3.3 (a), enquanto o equipamento utilizado para determinar a espessura dos geotêxteis não tecidos é apresentado na Figura 3.3 (b).



(a)



(b)

Figura 3.3 – Equipamentos utilizados na caracterização dos materiais: (a) Balança de precisão e (b) Ensaio para determinação da espessura.

3.2.2 Ensaio de tração

Os ensaios para a determinação da resistência à tração de geotêxteis não-confinados foram realizados conforme prescrição da norma NBR 12824 (1993). São utilizados 5 corpos de prova em cada direção da manta (longitudinal e transversal) e sua amostragem e preparação seguem os procedimentos da NBR 12593 (1993). No caso do geotêxtil reforçado, estas dimensões podem ser ampliadas, de modo a garantir que a largura contenha pelo menos cinco elementos de tração e, no comprimento, contenha pelo menos uma fileira de nós e elementos de tração. Para este tipo de material, utiliza-se a garra de rolete ao invés da garra de mordente, utilizada para materiais sem reforço.

Para a entrada de dados no equipamento descrito, utilizam-se os valores originais de largura e altura das amostras. Dessa forma, ao término do ensaio, o equipamento fornece valores de tensão na ruptura, da deformação obtida e da força máxima do material. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 20 mm/min, com pré-carga de aproximadamente 1% do valor da carga de ruptura.

Os equipamentos utilizados para o ensaio de tração em geotêxteis comuns e reforçados são ilustrados na Figura 3.4.



(a)



(b)

Figura 3.4 - Pressas mecânicas utilizadas nos ensaios de tração: (a) geotêxtil não tecido sem reforço e (b) geotêxtil não tecido reforçado.

3.2.3 Ensaio Hidráulico

A permeabilidade na direção normal ao plano dos geotêxteis é, em geral, muito elevada. Além disso, como os geotêxteis não tecidos são materiais compressíveis e essa propriedade decresce com o aumento dos esforços normais aplicados ao material. Dessa forma, para cada espessura, o material apresenta uma condutividade hidráulica diferente.

Em vista deste comportamento, define-se a permissividade, de acordo com a ASTM D4491 (2004) como um indicador da quantidade de água que pode passar através do geotêxtil numa condição isolada. Essa propriedade correlaciona o coeficiente permeabilidade normal com a espessura do geotêxtil. Este ensaio foi realizado em geotêxteis virgens por se tratarem de materiais com elevada permeabilidade.

O detalhe da amostra e o equipamento utilizado para a determinação da permissividade do geotêxtil são apresentados na Figura 3.5.

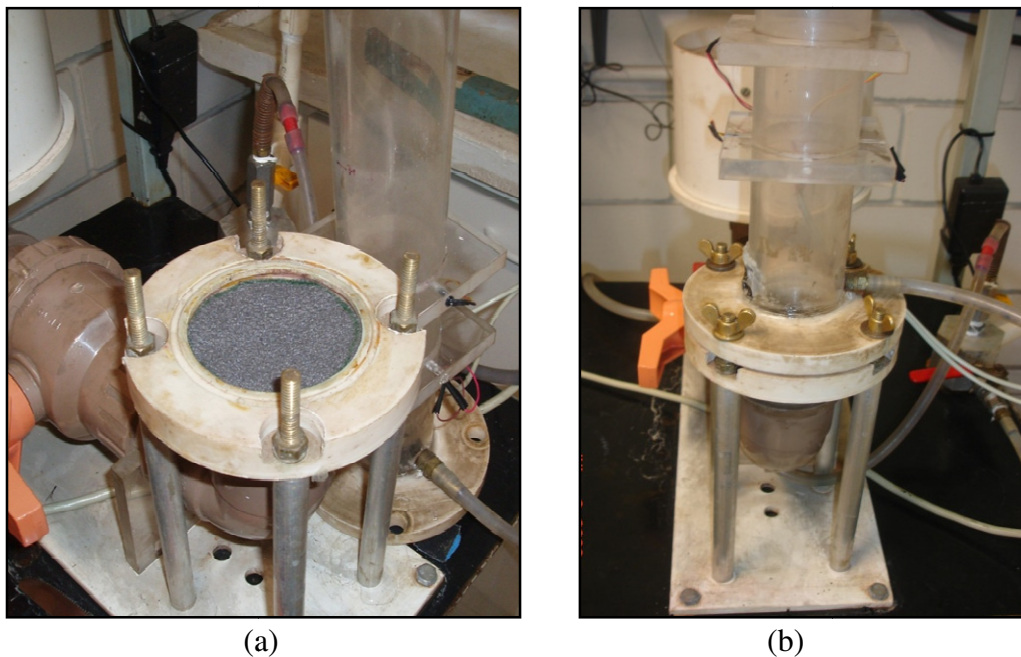


Figura 3.5 – Equipamento utilizado no ensaio de permissividade: (a) detalhe da amostra de geotêxtil e (b) equipamento completo.

3.3 Processo de impregnação dos materiais

3.3.1 Ensaios de retenção de asfalto

O ensaio de retenção de asfalto foi realizado para determinar a taxa de retenção de asfalto de cada geotêxtil. Os ensaios seguiram as recomendações da ASTM 6140 (2005), no entanto, emulsão asfáltica RR1C foi utilizada ao invés de cimento asfáltico. Para a determinação da retenção de asfalto, 4 corpos de prova de (10 x 20) cm, em cada direção do tecido, foram pesados individualmente. Posteriormente, os corpos de prova foram submersos no ligante asfáltico por 30 minutos, em ambiente controlado ($21 \pm 2C$).

Depois da saturação, o excesso de emulsão foi removido e os corpos de prova saturados foram levados a secagem (sentido longitudinal na vertical). Grampos foram utilizados nas bordas de cada corpo de prova para facilitar o processo de secagem. Após a ruptura da emulsão e pesagem dos corpos de prova, verificou-se a retenção de asfalto em ambos os sentidos de fabricação.

O cálculo da retenção de asfalto dos geotêxteis foi realizado com base nas recomendações da ASTM 6140/2005, sendo:

$$R_A = \frac{W_{SAT} - W}{A_{CP} \times \rho} \quad (2)$$

Onde W_{SAT} é o peso do material saturado, em g; W é o peso do material, em g; A_{CP} é a área do corpo de prova, em m^2 ; ρ é a densidade da emulsão asfáltica, em g/l. Para o cálculo da retenção de asfalto do material, calculou-se a densidade de emulsão asfáltica baseada nos resultados obtidos no ensaio de resíduo de destilação, sendo, portanto, $\rho = 630,0$ g/l. A retenção de asfalto é dada em l/m^2 .

O processo de impregnação dos materiais para o ensaio de retenção de asfalto é ilustrado na Figura 3.6.

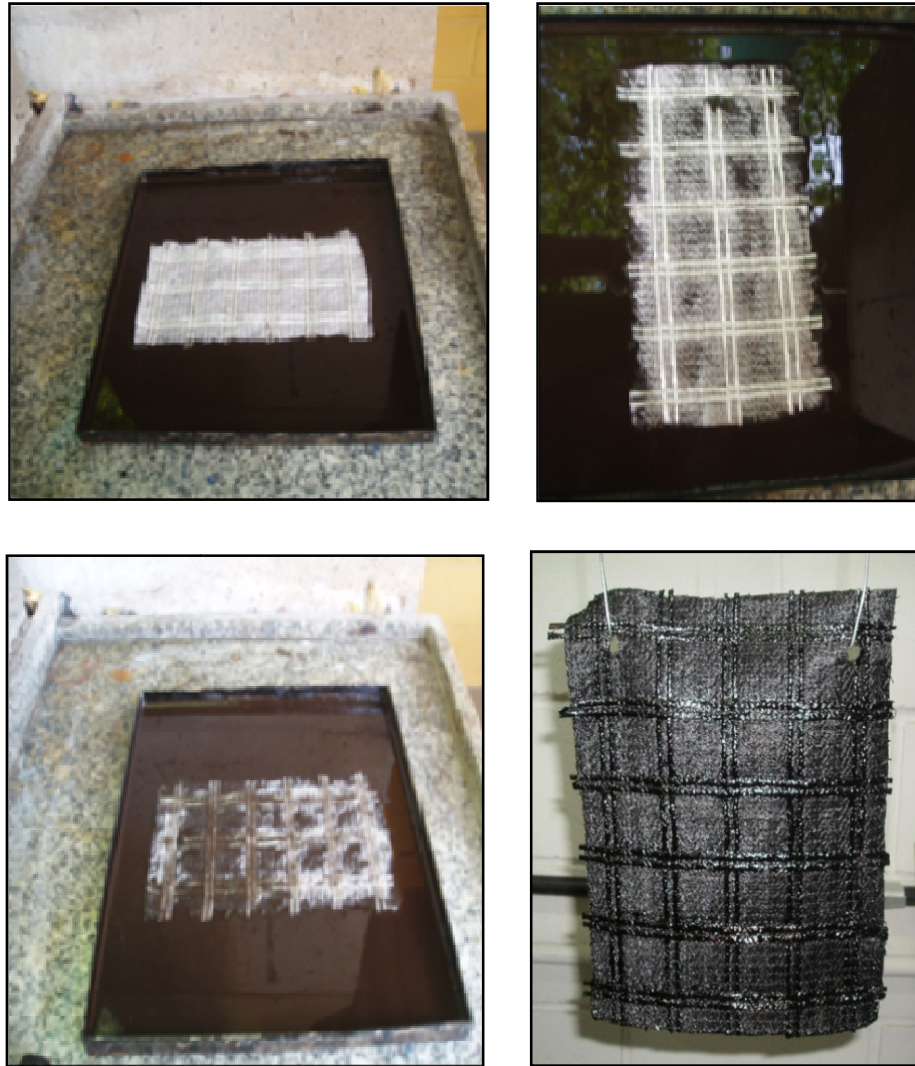


Figura 3.6 – Processo de impregnação dos materiais para o ensaio de retenção.

3.3.2 Taxas de impregnação

Todos os materiais expostos nesta pesquisa foram preparados para os ensaios de tração de transmissão e de vapor d'água com impregnação. Os corpos de prova foram preparados de acordo com as dimensões específicas para cada ensaio normatizado, com as taxas de ligante determinadas. As quantidades de ligante (valor residual) utilizadas em cada um dos materiais para a realização dos ensaios de tração após a impregnação são mostradas na Tabela 3.4. Foram utilizadas três taxas de ligante em cada material para o ensaio de tração, com base nos resultados do ensaio de retenção de asfalto, considerando quantidades superiores e inferiores a estes. Foram aplicados sobre os materiais, os valores referentes aos obtidos nos ensaios para a determinação da taxa retenção de asfalto, nomeados de Taxa 1.

Tabela 3.4 - Taxas de emulsão asfáltica (residual) utilizada nos ensaios de tração

| Materiais | Taxa 1 (l/m²) | Taxa 2 (l/m²) | Taxa 3 (l/m²) |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| PET-1A | 1,20 | 0,60 | 0,90 |
| PET-1B | 1,15 | 0,60 | 1,30 |
| PET-1C | 1,00 | 0,60 | 1,20 |
| PET-2A | 1,40 | 0,60 | 0,95 |
| PET-2B | 1,10 | 0,60 | 1,20 |
| PET-2C | 1,15 | 0,60 | 1,20 |
| PP-1B | 1,20 | 0,60 | 1,10 |
| PP-2B | 1,00 | 0,60 | 1,20 |
| PP-FV | 1,15 | 0,60 | 1,30 |

A Taxa 2 foi especificada em 0,60 l/m² de resíduo asfáltico, referente a metade da média dos valores obtidos para as taxas de retenção de asfalto, e também para que se possa conhecer o comportamento destes com uma menor quantidade de ligante do que a usualmente aplicada em campo. Para a Taxa 3 foram aplicados valores aleatórios, variando de 0,90 a 1,10 l/m² para valores de retenção maiores do que 1,20 l/m² e, 1,20 a 1,30 l/m² para valores abaixo desta quantidade.

Para o ensaio de transmissão de vapor d'água, três taxas de ligante emulsão asfáltica (residual) também foram utilizadas, porém as mesmas quantidades foram estipuladas para cada um dos materiais, para que se pudesse averiguar o comportamento hidráulico destes materiais sobre as mesmas condições de impregnação, sendo elas 0,60 l/m², 0,90 l/m² e 1,10 l/m².

3.3.3 Preparação dos corpos de prova

A exata taxa de ligante a ser utiliza em cada corpo de prova, tanto do ensaio de tração quanto do ensaio de transmissão de vapor d'água foi devidamente quantificada (em peso), e aplicada sobre os materiais. O ligante foi colocado sob uma bandeja, de modo a se obter uma impregnação homogênea. O procedimento de impregnação dos corpos de prova de geotêxtil é ilustrado na Figura 3.7.

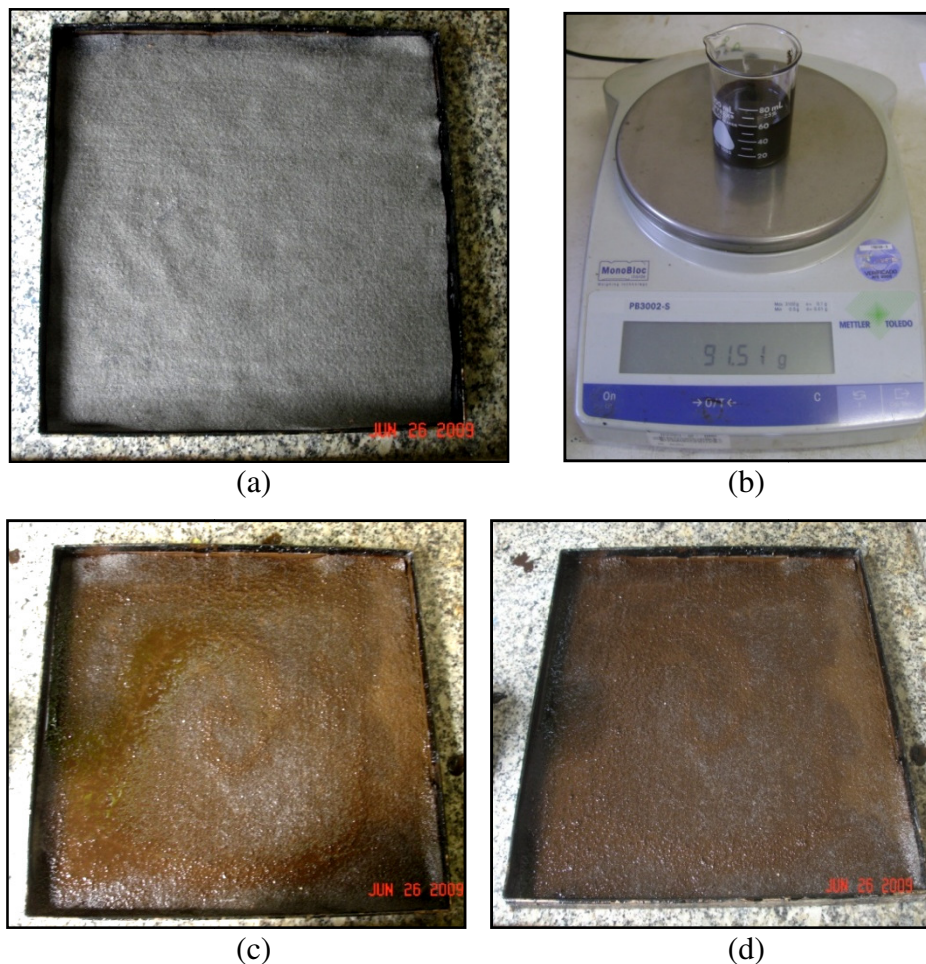


Figura 3.7 – Geotêxtil não tecido durante o processo de impregnação: (a) corpo de prova de geotêxtil, (b) emulsão asfáltica, (c) após a aplicação da emulsão e (d) processo de impregnação.

Uma vez impregnados, os corpos de prova foram levados a secagem, em ambiente controlado. A emulsão asfáltica tem ruptura rápida, porém depende das condições de temperatura e umidade relativa do ambiente. Uma das formas rápidas de se verificar a ruptura do material é pela cor. Quando aplicado o ligante, sua coloração é marrom, e após a ruptura, a cor muda para preto. O tempo de ruptura dos corpos de prova variou entre 30 min. e 4 horas.

Para uma melhor análise, todos os ensaios foram realizados após 24 horas de impregnação. O processo de secagem dos materiais é mostrado na Figura 3.8, bem como o detalhe dos grampos utilizados para pendurar o material.

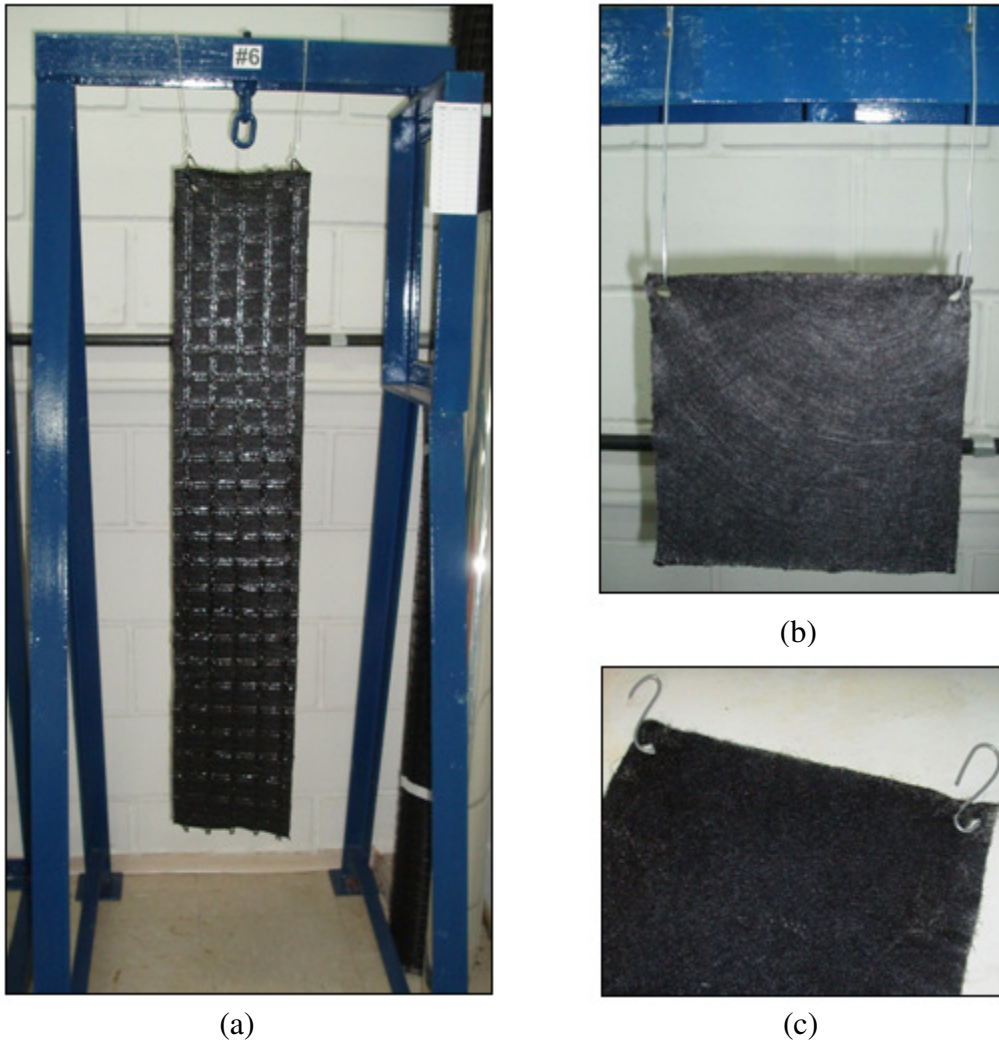


Figura 3.8 – Materiais no processo de secagem: (a) geotêxtil reforçado, (b) geotêxtil de poliéster e (c) detalhe dos grampos.

3.4 Ensaios com impregnação

3.4.1 Ensaios de tração faixa larga

Após a impregnação dos corpos de prova, podem ocorrer alterações em sua estrutura interna e conseqüente ganho de resistência aos esforços mecânicos a que o elemento estará submetido durante sua vida útil. Estas variações podem provocar a ruptura do elemento sob condições diferenciadas de deformação, quando este for submetido às tensões impostas em campo.

Para avaliar as alterações das propriedades de resistência mecânica dos materiais impregnados, foram realizados ensaios de resistência à tração em amostras de geotêxtil não tecidos impregnados, conforme as indicações da NBR 12824 (1993), tanto para os materiais não reforçados, quanto para o material reforçado com fibra de vidro.

A Figura 3.9 ilustra um ensaio de resistência à tração em geotêxteis não tecidos impregnados.

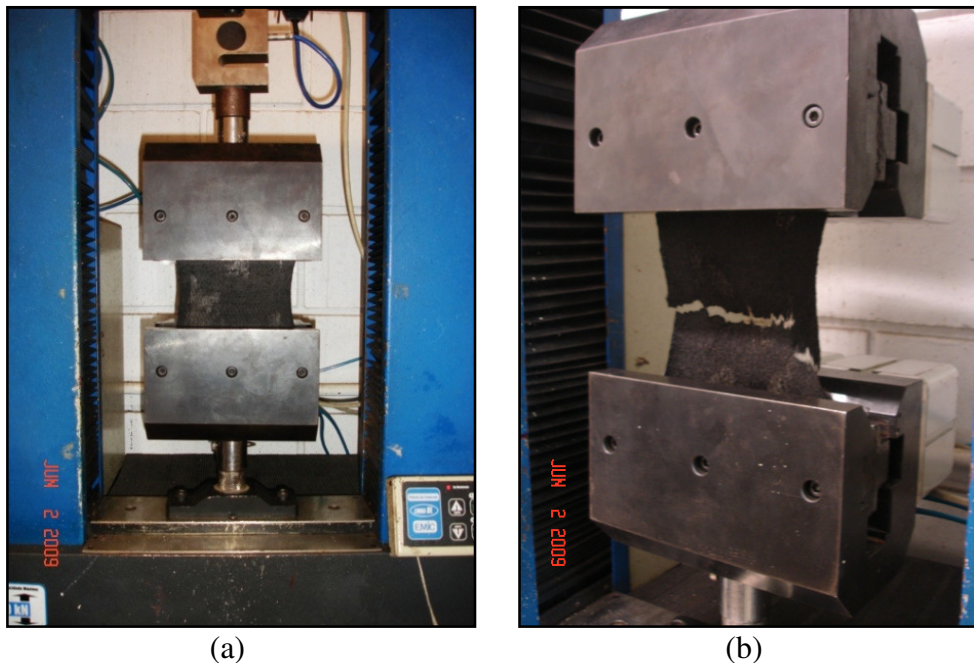


Figura 3.9 – Ensaio de tração em geotêxteis não tecidos impregnados: (a) ensaio em andamento e (b) detalhe da ruptura do tecido.

Para os ensaios em geotêxteis não tecidos reforçados, houve a necessidade da adaptação da garra de mordente (Figura 3.9) para a garra de rolete. As amostras foram envoltas por folhas de plástico de mesma largura, de forma a não haver contato entre as garras e o material de impregnação. Não foram verificadas alterações nos resultados devido à presença do plástico, que estava também preso às garras.

A Figura 3.10 apresenta um detalhe do posicionamento do plástico e do geotêxtil não tecido reforçado com fibra de vidro preparado para o ensaio.

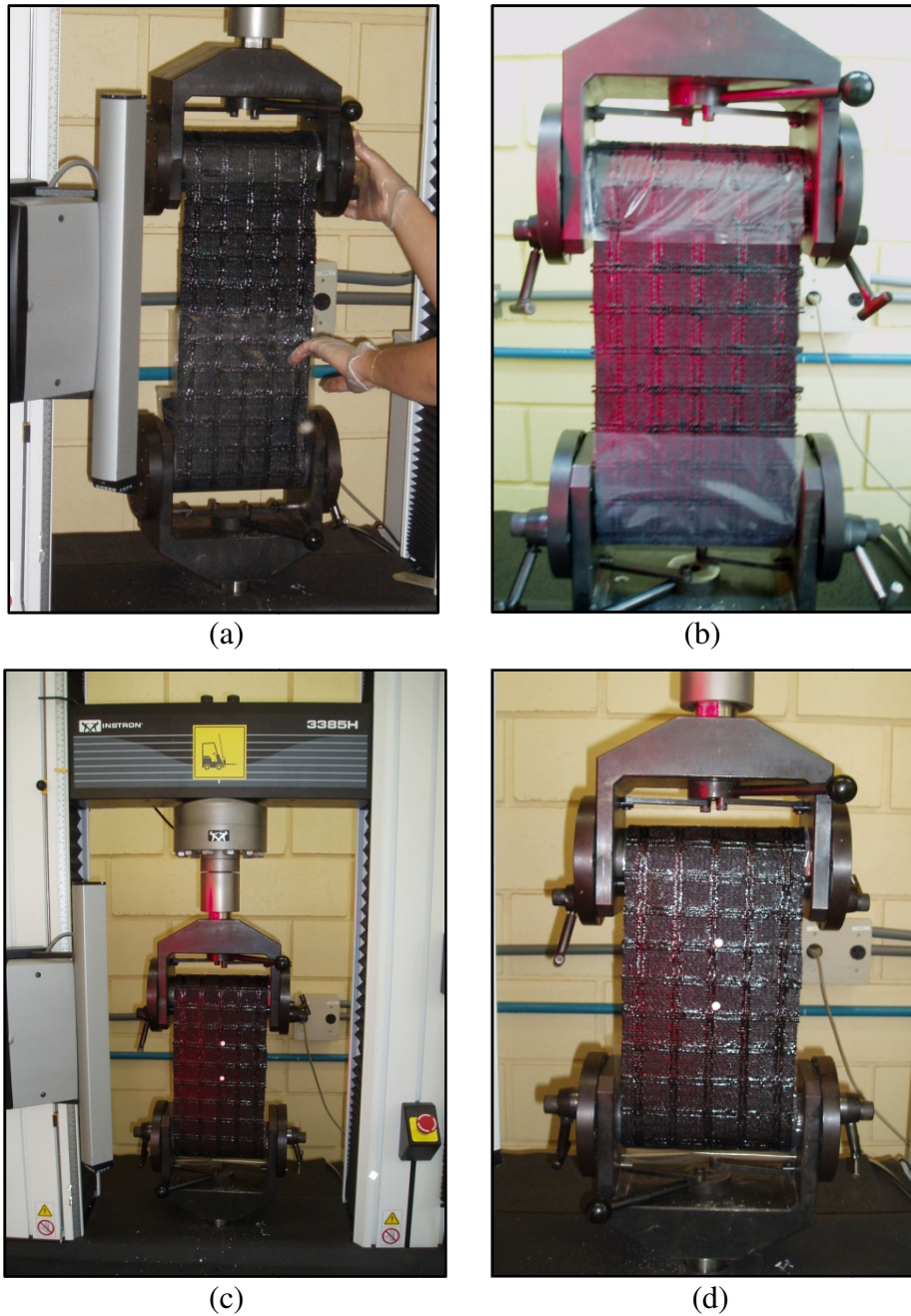


Figura 3.10 – Ensaio de tração após a impregnação: (a) posicionamento do corpo de prova e do plástico, (b) detalhe do plástico utilizado, (c) prensa de ensaio e (d) detalhe do corpo de prova posicionado.

3.4.2 Ensaio de permeação

Os geotêxteis não tecidos são empregados em sistemas anti-reflexão de trincas com a finalidade de prover uma barreira para o controle de umidade. Desta forma, a avaliação do

desempenho hidráulico é fundamental para verificar se estes materiais ganham características de materiais com baixa permeabilidade após a impregnação com o ligante asfáltico.

Para o conhecimento das propriedades hidráulicas dos geotêxteis, as amostras foram impregnadas com emulsão asfáltica, o que torna difícil quantificar a permeabilidade destes elementos por métodos tradicionais, já que a permeabilidade tende a reduzir significativamente após a aplicação do ligante. Para tanto foi empregado o ensaio de transmissão a vapor d'água, de acordo com as recomendações da ASTM E96M (2005).

O propósito deste ensaio é obter, através de equipamentos simples, valores confiáveis de transferência de vapor d'água em materiais semipermeáveis, expresso em unidades apropriadas. Estes valores podem então ser utilizados em projetos e na fabricação de materiais. A transmissão de vapor d'água é a taxa de transmissão de vapor de um material de certa área e espessura, induzido diferença de pressão de vapor entre duas superfícies conhecidas, sob temperatura e condições do ambiente conhecidas.

Neste método, os copos contêm água (3/4 da altura) e a pesagem destes copos determina a taxa de movimentação de vapor através da amostra, da água para o ambiente controlado. Uma análise matemática por regressão, em função do tempo, fornece a taxa de transmissão de vapor de água. Para os materiais de permeabilidade muito baixa, recomenda-se determinar os resultados após 30. Desta forma pode-se quantificar a perda de massa de água após a impregnação com o ligante, em termos de permeabilidade normal ao plano do material.

O cálculo da transmissão de vapor d'água e da permeância é calculado da seguinte forma:

$$WVT = G / t \times A_{CP} \quad (2)$$

Onde G é a variação do peso, em g; t é tempo, em h; A_{CP} é a área do corpo de prova, em m^2 e WVT é a transmissão de vapor d'água, em $g/h \cdot m^2$.

A permeância é a quantidade de vapor d'água que passa pelo plano normal de um material, a uma dada diferença de pressão entre duas superfícies, em intervalos de tempo e área conhecida, portanto a permeância é dada por:

$$\text{Permeância} = WVT / S(R1 - R2) \quad (3)$$

Onde WVT é a transmissão de vapor d'água, S é a pressão atmosférica, R1 é a umidade da água, R2 a umidade relativa do ar e, portanto, a permeância é dada em g/Pa.s.m^2 . O detalhe da confecção dos corpos de prova impregnados com emulsão asfáltica e a montagem nos copos são apresentados na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Equipamento e montagem dos corpos de prova para o ensaio de transmissão de vapor d'água.

A permeabilidade normal é o produto aritmético da permeância e da espessura do material. Desta forma, os resultados do ensaio são obtidos pela média dos valores de permeabilidade normal de três corpos de prova.

Capítulo 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da etapa experimental desta pesquisa, os quais são organizados em três tópicos diferentes: resultados obtidos, avaliação da resistência e deformabilidade e avaliação das propriedades hidráulicas. O primeiro tópico refere-se apenas aos resultados obtidos para os geotêxteis. O tópico referente à avaliação da resistência e deformabilidade apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração, com destaque para a análise da rigidez inicial dos materiais. No terceiro tópico, os resultados de caracterização dos parâmetros hidráulicos são apresentados em termos de permeabilidade normal ao plano do material.

4.1 Resultados

A caracterização física das amostras de geotêxtil não tecido, quanto à gramatura e espessura, é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características físicas dos geotêxteis não tecidos

| Propriedade | Materiais | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | PET-1A | PET-1B | PET-1C | PET-2A | PET-2B | PET-2C | PP-1B | PP-2B | PP-FV |
| Gramatura (g/m ²) | 136 | 146 | 151 | 181 | 182 | 183 | 165 | 214 | 505 |
| CV (%) | 6,7 | 8,3 | 9,7 | 5,7 | 8,3 | 5,9 | 7,1 | 6,8 | 2,3 |
| Espessura (mm) | 1,60 | 1,75 | 1,36 | 2,00 | 1,36 | 1,83 | 2,29 | 1,37 | 1,28 |
| CV (%) | 4,3 | 9,2 | 13,2 | 5,0 | 5,3 | 9,8 | 7,5 | 6,3 | 5,6 |

CV = Coeficientes de Variação.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as propriedades de tração dos geotêxteis não tecidos de acordo com os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas.

Tabela 4.2 – Propriedades de tração dos geotêxteis

| Geotêxtil | Resistência à tração (kN/m) | | CV (%) | | Deformação na ruptura (%) | | CV (%) | |
|-----------|-----------------------------|-------|--------|-------|---------------------------|-------|--------|------|
| | L | T | L | T | L | T | L | T |
| PET-1A | 2,63 | 5,08 | 16,84 | 14,07 | 132,4 | 106,3 | 4,60 | 5,31 |
| PET-1B | 4,50 | 6,86 | 18,59 | 15,07 | 94,49 | 94,39 | 11,47 | 2,57 |
| PET-1C | 8,77 | 7,30 | 16,37 | 19,11 | 49,68 | 61,42 | 9,5 | 3,45 |
| PET-2A | 4,75 | 8,87 | 12,66 | 9,31 | 132,9 | 104,9 | 5,43 | 3,96 |
| PET-2B | 6,55 | 10,93 | 28,74 | 7,45 | 96,27 | 91,41 | 5,98 | 6,31 |
| PET-2C | 10,7 | 8,47 | 12,90 | 14,29 | 50,77 | 59,14 | 5,56 | 4,50 |
| PP-1B | 5,89 | 8,62 | 9,66 | 20,14 | 86,14 | 94,26 | 10,23 | 5,80 |
| PP-2B | 7,25 | 12,59 | 10,35 | 18,42 | 101,3 | 85,53 | 12,31 | 5,97 |
| PP-FV | 39,80 | 40,81 | 10,75 | 4,98 | 4,47 | 5,00 | 2,37 | 2,58 |

Nota: CV = Coeficiente de variação; L = longitudinal; T = Transversal

Na Tabela 4.3 são indicadas as propriedades hidráulicas dos geotêxteis. Este ensaio foi realizado em geotêxteis virgens por se tratarem de materiais com elevada permeabilidade.

Tabela 4.3 – Propriedades hidráulicas dos geotêxteis

| Propriedades | Materiais | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | PET-1A | PET-1B | PET-1C | PET-2A | PET-2B | PET-2C | PP-1B | PP-2B | PP-FV |
| Permissividade (s ⁻¹) | 4,00 | 3,78 | 4,45 | 2,75 | 2,28 | 1,89 | 2,33 | 1,75 | 1,34 |
| Permeabilidade (cm/s) | 0,64 | 0,66 | 0,60 | 0,55 | 0,30 | 0,34 | 0,53 | 0,24 | 0,17 |

A caracterização dos geotêxteis não tecidos quanto à retenção de asfalto é apresentada na Tabela 4.4, nos sentidos longitudinal e transversal de cada material.

Tabela 4.4 – Retenção de asfalto dos geotêxteis não tecidos

| Materiais | R _A (l/m ²) | | C.V. (%) | | Média |
|-----------|------------------------------------|------|----------|-------|------------------------------------|
| | L | T | L | T | R _A (l/m ²) |
| PET-1A | 1,10 | 1,30 | 4,1 | 9,0 | 1,20 |
| PET-1B | 1,10 | 1,21 | 7,2 | 13,8 | 1,15 |
| PET-1C | 0,90 | 1,10 | 6,3 | 6,4 | 1,00 |
| PET-2A | 1,30 | 1,50 | 1,7 | 4,2 | 1,40 |
| PET-2B | 0,98 | 1,18 | 6,7 | 5,5 | 1,10 |
| PET-2C | 1,01 | 1,20 | 6,9 | 11,8 | 1,15 |
| PP-1B | 1,10 | 1,31 | 7,4 | 13,6 | 1,20 |
| PP-2B | 0,90 | 1,15 | 11,4 | 14,7 | 1,00 |
| PP-FV | 1,20 | 1,10 | 5,0 | 4,2 | 1,15 |
| | | | | Média | 1,15 l/m ² |
| | | | | σ | 0,10 l/m ² |

Nota: L – Longitudinal; T – Transversal; C.V – Coeficiente de variação; σ – Desvio Padrão; R_A – Taxa de retenção de asfalto.

Em geral, todos os materiais apresentaram comportamento esperado quanto as suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. A variação nas propriedades de alguns materiais deve-se a própria variabilidade dos geotêxteis não tecidos. Os diferentes tipos de materiais utilizados apresentaram resultados bastante semelhantes para a taxa de retenção de asfalto. Portanto, a gramatura e o tipo de polímero não influenciaram significativamente nos valores de retenção de asfalto, que se mostraram compatíveis com os observados na literatura e nas aplicações de campo. A média global dos valores de retenção de asfalto foi de 1,15 l/m³, que está muito próxima dos valores de taxa residual usualmente aplicados em campo e indicados na literatura para emulsões asfálticas (1,0 a 1,3 l/m²). Os valores de retenção de asfalto foram também uniformes entre as amostras ensaiadas.

4.2 Análises da resistência e deformabilidade dos geotêxteis

4.2.1 Geotêxteis não tecidos sem impregnação

Os ensaios de tração foram realizados em todos geotêxteis não tecidos, nas direções longitudinal e transversal de fabricação do material. As análises nos dois sentidos foram

realizadas para que se pudesse conhecer o comportamento dos tecidos e a possível adequada direção a ser empregada na restauração de pavimentos.

As curvas força x deformação dos geotêxteis não tecidos de poliéster (PET) e polipropileno (PP) são apresentadas na Figura 4.1, considerando valores médios de resistência à tração e correspondente deformação dos materiais ensaiados. Cada curva foi traçada com valores médios de cinco corpos de prova.

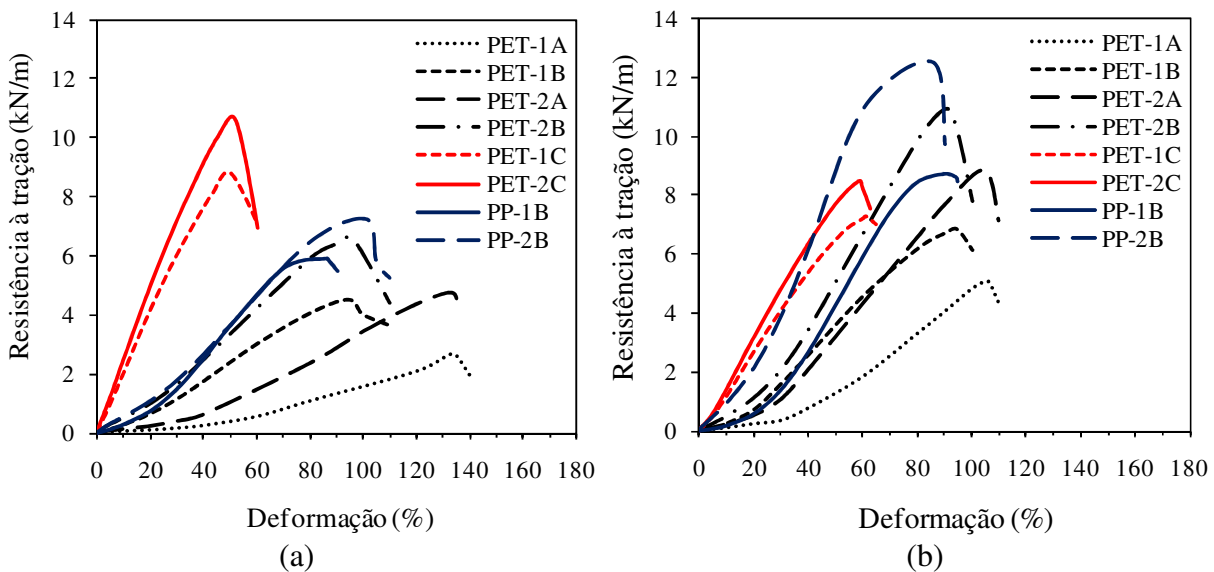


Figura 4.1 - Resultados dos ensaios de tração dos geotêxteis não tecidos de poliéster e polipropileno: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; 2 – 180 g/m²; A e B – Filamentos Curtos; C – Filamentos Longos.

Nos resultados apresentados na Figura 4.1a, as amostras virgens demonstram as diferenças existentes nos sentidos longitudinal e transversal quanto aos valores de resistência e deformabilidade para ambos os polímeros, principalmente para os geotêxteis de poliéster. A direção transversal apresenta menor deformabilidade e maior resistência nos tecidos de fibras curtas dos fabricantes A e B. Ao contrário do que ocorre no PET-1C e PET-2C, representantes das fibras longas, onde a menor deformabilidade e maior resistência são apresentadas no sentido longitudinal de fabricação. Os geotêxteis de polipropileno, de fibras curtas, seguem o mesmo comportamento dos geotêxteis de poliéster do fabricante B, com maior resistência e menor deformabilidade no sentido transversal para as duas gramaturas analisadas.

Na Figura 4.2 são apresentadas as curvas força x deformação dos geotêxteis não tecidos reforçados com fibra de vidro, comparado aos geotêxteis não tecidos se reforço da Figura 4.1.

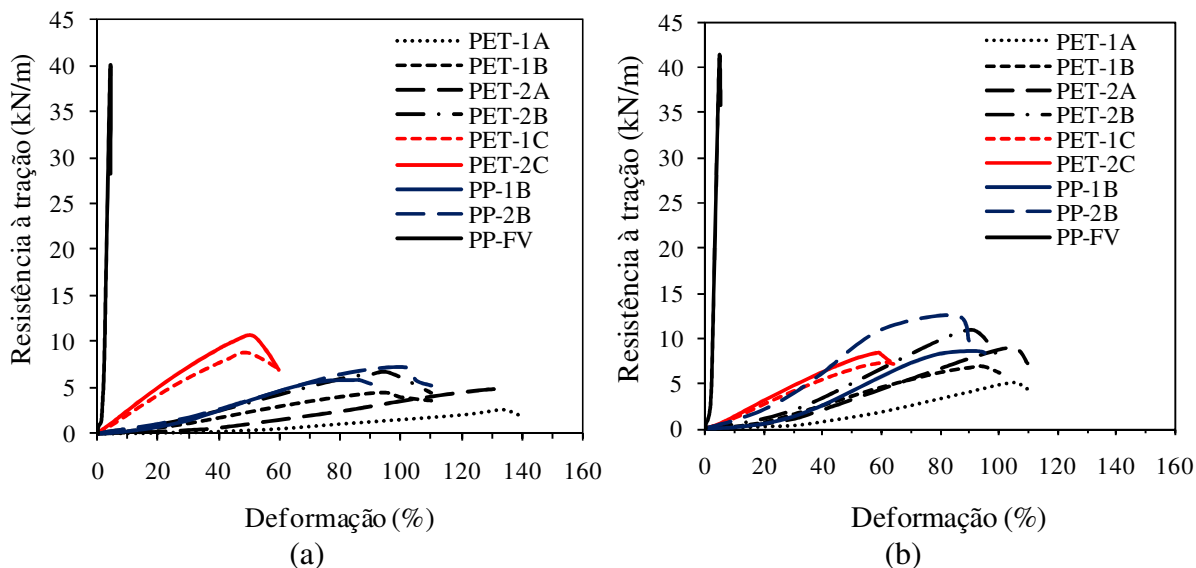


Figura 4.2 - Resultados dos ensaios de tração dos geotêxteis não tecidos reforçados (PP-FV) comparado aos não reforçados: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP – Polipropileno; 1 – 150 g/m²; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos Curtos; FV – Fibra de Vidro.

De acordo com a Figura 4.2, o polipropileno reforçado (PP-FV) apresenta a mesma resistência à tração nominal nos dois sentidos do tecido, porém, a direção transversal mostrou a força de tração na ruptura um pouco mais elevada. Nota-se também que o geotêxtil não tecido reforçado se rompe com valores de deformação extremamente baixos, o que demonstra sua elevada rigidez em relação aos outros materiais e o seu potencial como reforço de camadas de pavimento, quando comparado aos materiais não reforçados.

Alguns materiais não apresentam resistência à tração superior a 7 kN/m no sentido de menor resistência, como especificam as instruções técnicas do DNER-PRO 380/98 para a aplicação de geotêxteis como elemento retardador da propagação de trincas. Contudo, considerando o baixo nível de deformações da camada asfáltica do pavimento, é possível que o uso de geotêxteis não tecidos que estejam abaixo desta especificação possam atender às necessidades impostas aos mesmos após o contato com o ligante asfáltico.

Quando geossintéticos são empregados em reforço de capa asfáltica, ou mesmo base de pavimentos, a rigidez a pequenas deformações, quando solicitado por cargas de roda, tem mais importância do que a resistência máxima à tração do material. Para tanto, sugere-se que uma análise do módulo de rigidez secante destes materiais deve ser realizada, considerando níveis de deformação compatíveis com as solicitações que ocorrem em campo.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 as curvas Módulo de rigidez secante (J) x deformação inicial são mostradas no sentido de maior resistência à tração dos materiais virgens, considerando polímeros, filamentos, gramaturas e fabricantes para níveis de deformabilidade de até 0,1%.

Nota-se na Figura 4.3b nota-se que o PET-2C (sentido longitudinal) apresentou os valores mais elevados de rigidez inicial, comparado aos outros materiais, seguido do PP-2B e PET-2A. O poliéster de fibras longas PET-1C, mesmo tendo apresentado elevada resistência última à tração, mostrou comportamento semelhante quanto à rigidez inicial a dos materiais PET-1A, PET-1B e PET-2B (Figura 4.5a), todos com resistência última menor do que 7 kN/m. Entre os materiais de menor gramatura, destacam-se os geotêxteis de poliéster.

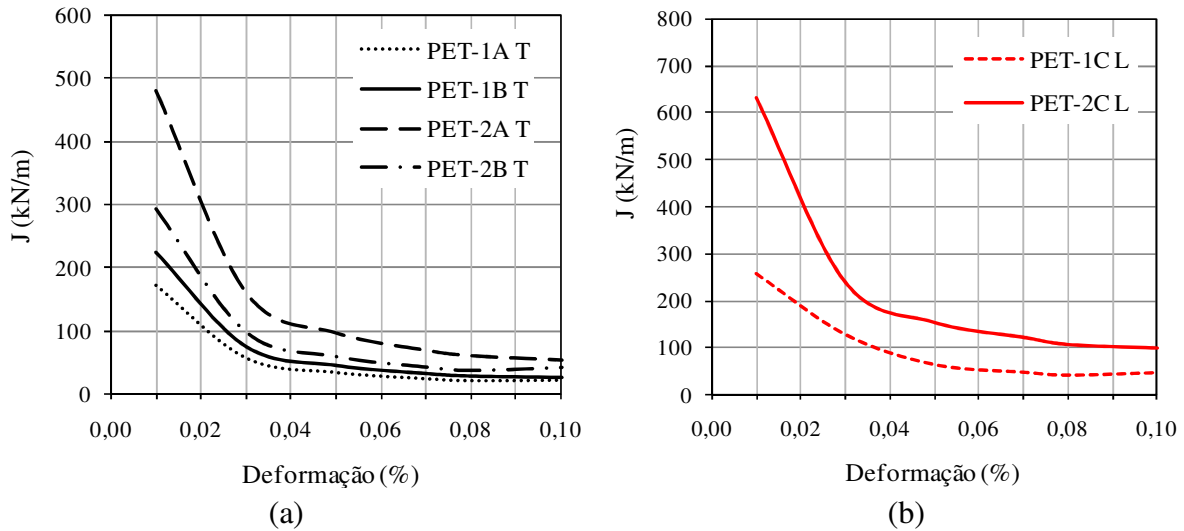


Figura 4.3 - Curvas Módulo de rigidez (J) dos geotêxteis não tecidos de poliéster: (a) Filamentos curtos e (b) Filamentos longos. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; 2 – 180 g/m²; A e B – Filamentos Curtos; C – Filamentos Longos; L – Longitudinal; T – Transversal.

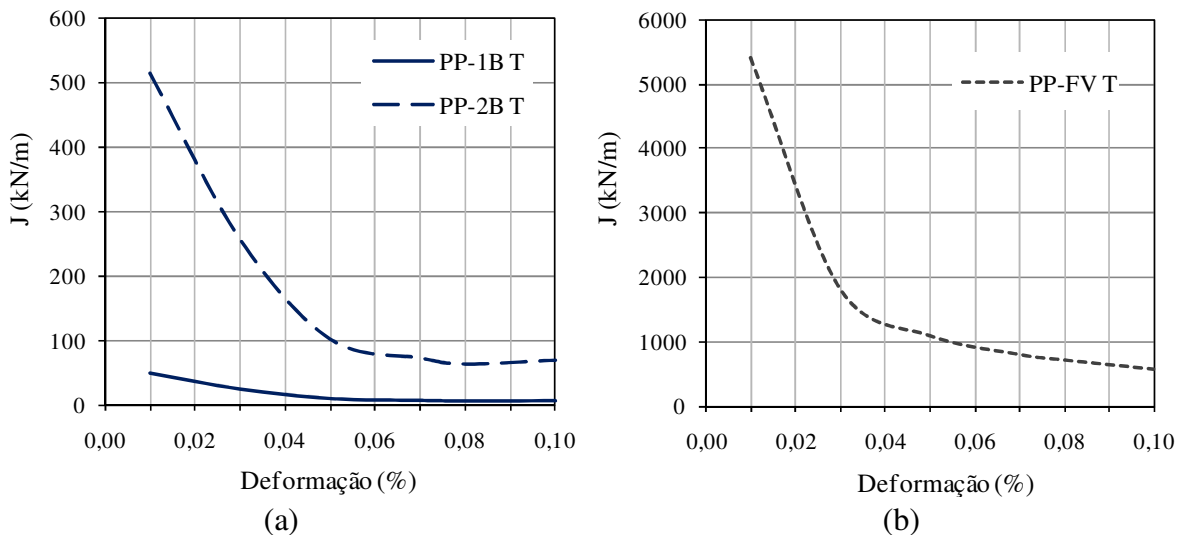


Figura 4.4 - Curvas Módulo de rigidez (J) dos Geotêxteis não tecidos de Polipropileno: (a) não reforçados e (b) reforçado com fibra de vidro. Nota: PP – Polipropileno; 1 – 150 g/m²; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos Curtos; FV – Fibra de Vidro; T – Transversal.

A Figura 4.4b apresenta os benefícios de se utilizar um material reforçado com fibra de vidro, que confere maiores valores de rigidez inicial ao geotêxtil, quando comparado as amostras não reforçadas. É notório também que todos os materiais apresentaram uma drástica redução nos valores de rigidez inicial para níveis de deformação menores do que 0,03%, sendo ainda mais expressiva para os geotêxteis de maior gramatura. Em geral, observa-se que os geotêxteis PET de filamentos contínuos apresentam maiores valores de rigidez inicial do que os de filamentos curtos.

De forma geral, os resultados mostram a influência da gramatura nos valores de rigidez inicial. Quanto ao fabricante de poliéster de fibras curtas, a maior gramatura apresenta maiores valores de rigidez do que os materiais do fabricante B, no entanto, o oposto ocorre com a menor gramatura. Quanto aos polímeros, pouca diferença foi apresentada entre os materiais de maior gramatura do Fabricante B de fibras curtas, porém, na menor gramatura, o geotêxtil de polipropileno é bem menos rígido do que o de poliéster. Em relação às fibras de poliéster, os materiais de fibras longas se destacam na maior gramatura e são equivalentes aos de fibras curtas na menor gramatura analisada. O geotêxtil reforçado com fibra de vidro apresenta-se superior aos outros materiais, em termos de resistência e deformabilidade a pequenas deformações.

4.2.2 Geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são apresentadas as curvas força x deformação dos materiais de poliéster de fibras curtas do fabricante A, para cada uma das taxas de ligante utilizadas. Cabe salientar que as curvas na cor vermelha referem-se neste trabalho a quantidade de ligante referente ao ensaio de retenção de asfalto.

Nota-se na Figura 4.5 que os valores de resistência à tração na ruptura ($T_{\text{útl}}$) para o PET-1A, no sentido transversal, foram mais elevados após a impregnação com o ligante asfáltico do que o outro sentido. Para este material, a impregnação tende a aumentar o valor de $T_{\text{útl}}$ na medida em que se acrescenta ligante asfáltico, porém, acredita-se que possa existir uma taxa ótima de ligante. A quantidade de ligante referente à taxa obtida no ensaio de retenção de asfalto (em vermelho) mostrou melhor desempenho do que as demais quantidades aplicadas. O mesmo comportamento foi observado para o PET-2A (Figura 4.6), tanto em relação ao incremento de resistência com a presença do ligante, quanto ao destaque para a

taxa de retenção de asfalto. Não foi verificada em nenhum dos casos, significativa redução da deformação na ruptura após a impregnação.

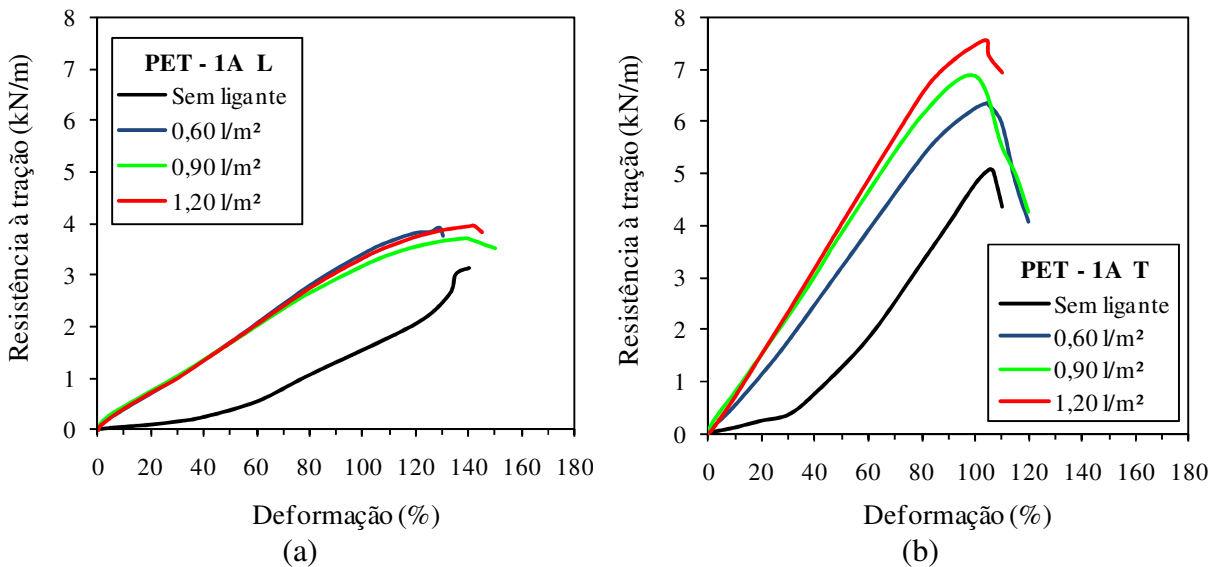


Figura 4.5 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-1A: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; A – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

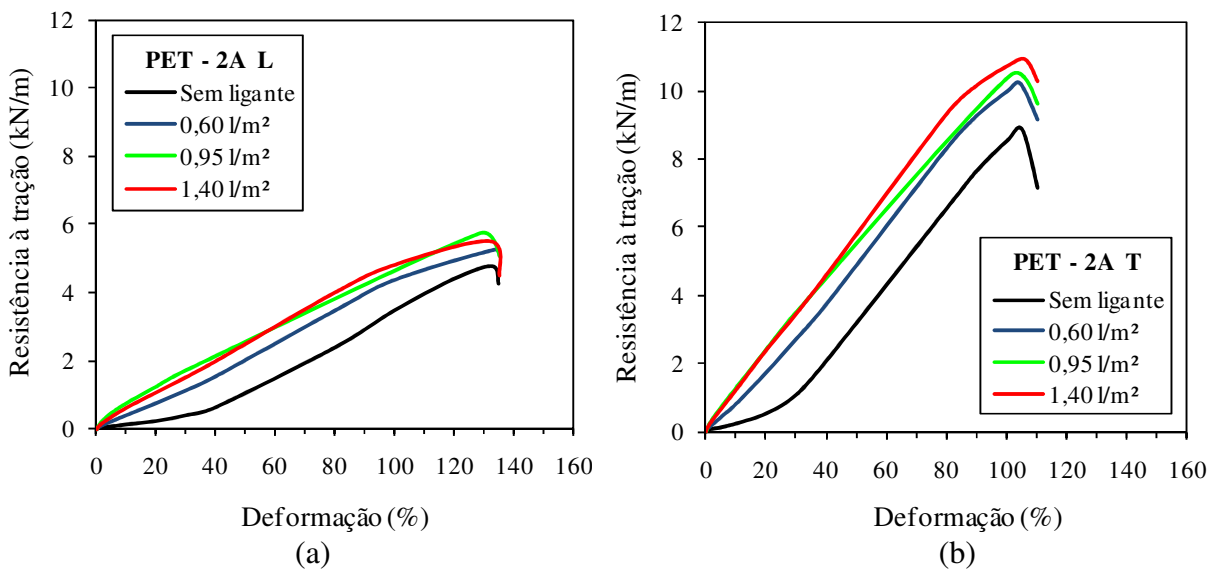


Figura 4.6 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-2A: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; A – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 a seguir, são ilustrados o comportamento dos materiais de poliéster do fabricante B quando ao incremento de resistência com a adição do ligante. Os materiais PET-1B (Figura 4.7) e PET-2B (Figura 4.8) apresentaram comportamento

diferenciado quanto às características de resistência à tração após a impregnação com emulsão asfáltica nos dois sentidos ensaiados.

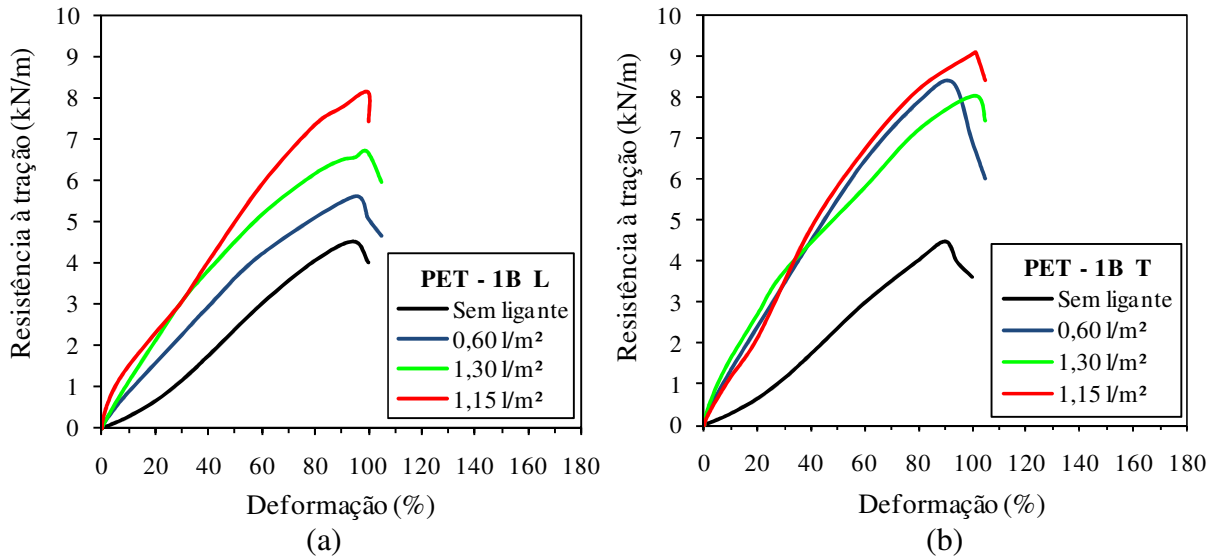


Figura 4.7 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; B – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

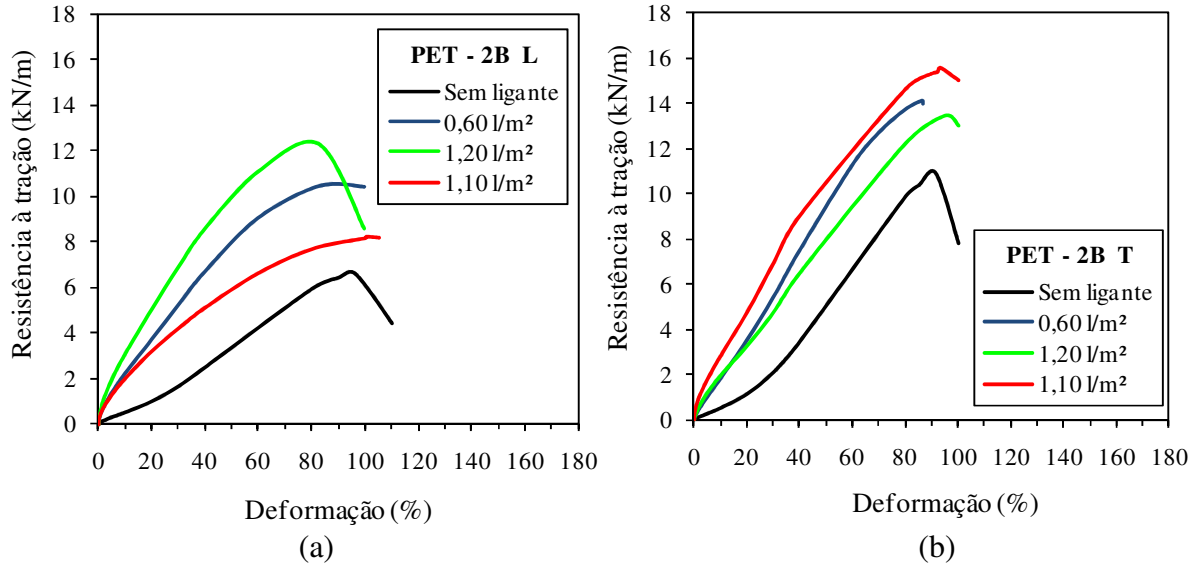


Figura 4.8 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Nota-se na Figura 4.7a que a quantidade de ligante asfáltico referente à taxa de retenção de asfalto (em vermelho) se destacou nos dois sentidos do material. No sentido transversal, incremento de rigidez ao material foi muito mais expressivo, bem como o aumento dos valores de $T_{\text{útil}}$ em relação ao material virgem. Na Figura 4.8a pode-se verificar

uma pequena redução nos valores de deformação na ruptura do PET-2B. O sentido transversal deste material (Figura 4.8b) mostrou destaque para a taxa de retenção que elevou os valores de $T_{\text{úil}}$, mantendo os mesmos níveis de deformação.

O comportamento dos geotêxteis não tecidos de fibras longas, com e sem impregnação é mostrado nas Figuras 4.9 e 4.10 para o fabricante C, nos sentidos longitudinal e transversal das duas gramaturas ensaiadas.

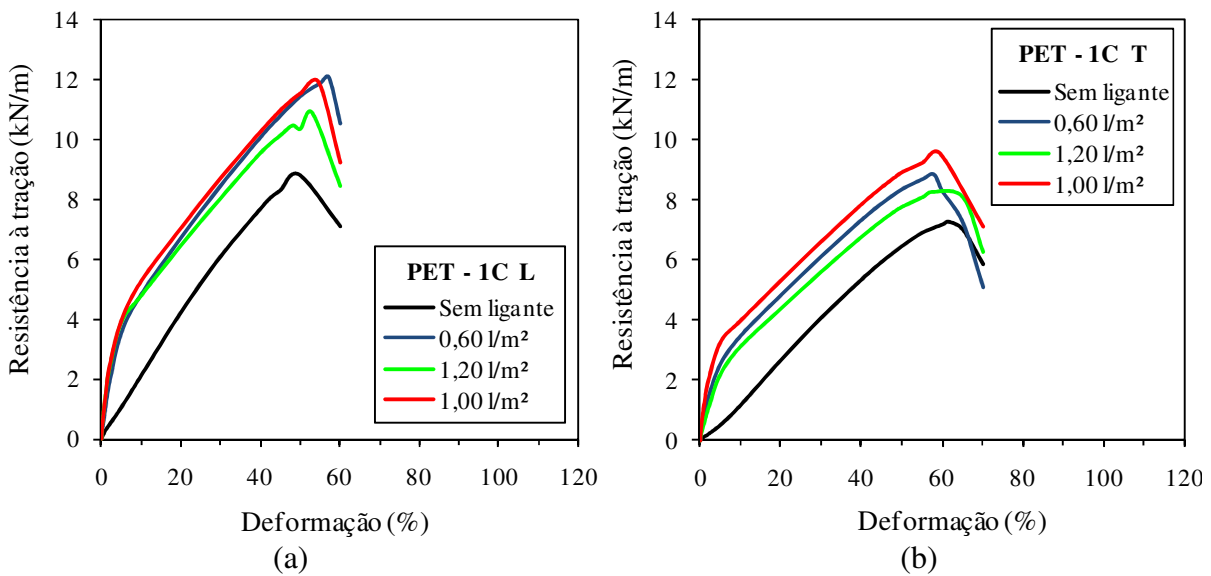


Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-1C: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; C – Filamentos Longos; L – Longitudinal; T – Transversal.

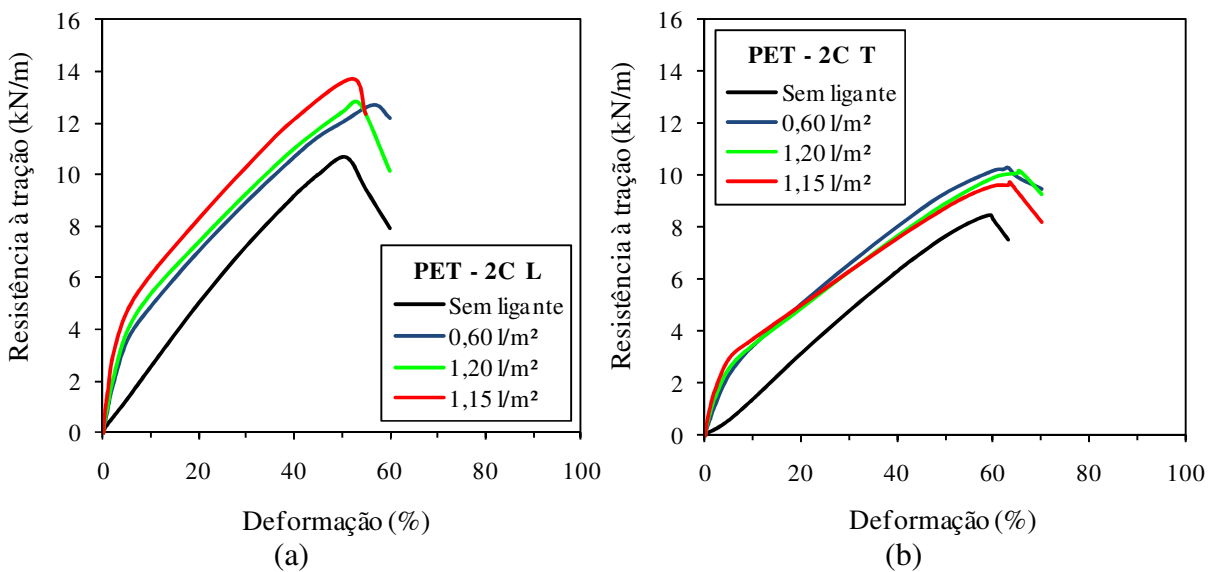


Figura 4.10 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PET-2C: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; C – Filamentos Longos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Como esperado, o sentido longitudinal é o sentido onde o material tem seu melhor desempenho e, além disso, revela que a impregnação com o ligante asfáltico possibilitou um expressivo incremento do módulo tangencial para deformações menores do que 5%, tanto para o PET-1C (Figura 4.9) quanto para o PET-2C (Figura 4.10). Quanto ao ganho de resistência e a taxa de impregnação, estes materiais sugerem quantidades de ligante menores do que 1,15 l/m², já que o comportamento destes quanto ao incremento de rigidez diminuiu quando aplicada uma maior quantidade de ligante. Em ambos os casos, a quantidade de ligante referente à taxa retenção de asfalto apresentou o maior destaque. Uma leve redução nos valores de deformação na ruptura foi verificada no PET-1C (Figura 4.9).

As Figuras 4.11 e 4.12 a seguir, evidenciam o comportamento dos materiais de polipropileno de fibras curtas do fabricante B.

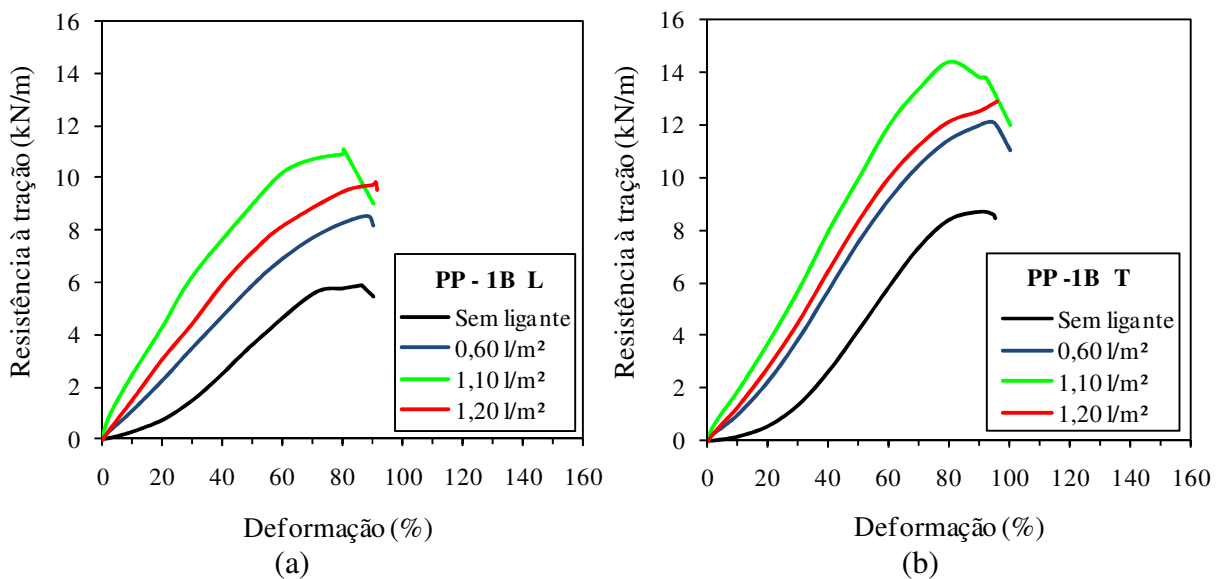


Figura 4.11 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PP-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP – Polipropileno; 1 – 150 g/m²; B – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Na Figura 4.11, nota-se que o PP-1B mostrou que os ensaios de tração em amostras impregnadas com emulsão asfáltica revelaram os melhores resultados com 1,10 l/m² (Taxa 3) do que com a taxa obtida no ensaio de retenção. Já o oposto ocorreu nos dois sentidos ensaiados para o polipropileno de maior gramatura (Figura 4.12), que teve a taxa de retenção (em vermelho) com o melhor desempenho. Em geral, os materiais demonstraram pequena redução nos valores de deformação na ruptura após a impregnação. Na maioria dos casos, a resistência última à tração dos filamentos curtos apresentou incrementos acima de 50%, e no

caso de filamentos longos, chegou a 25%, em relação aos materiais virgens. Para os materiais PET-1A (Figura 4.5) e PET-2A (Figura 4.6), a $T_{\text{útil}}$ aumentou com a quantidade de ligante asfáltico. O mesmo foi observado apenas no sentido transversal dos materiais PET-1B (Figura 4.7b) e no longitudinal do PET-2B (Figura 4.8a). Para o restante dos materiais, a maior quantidade de ligante não levou aos melhores resultados de $T_{\text{útil}}$.

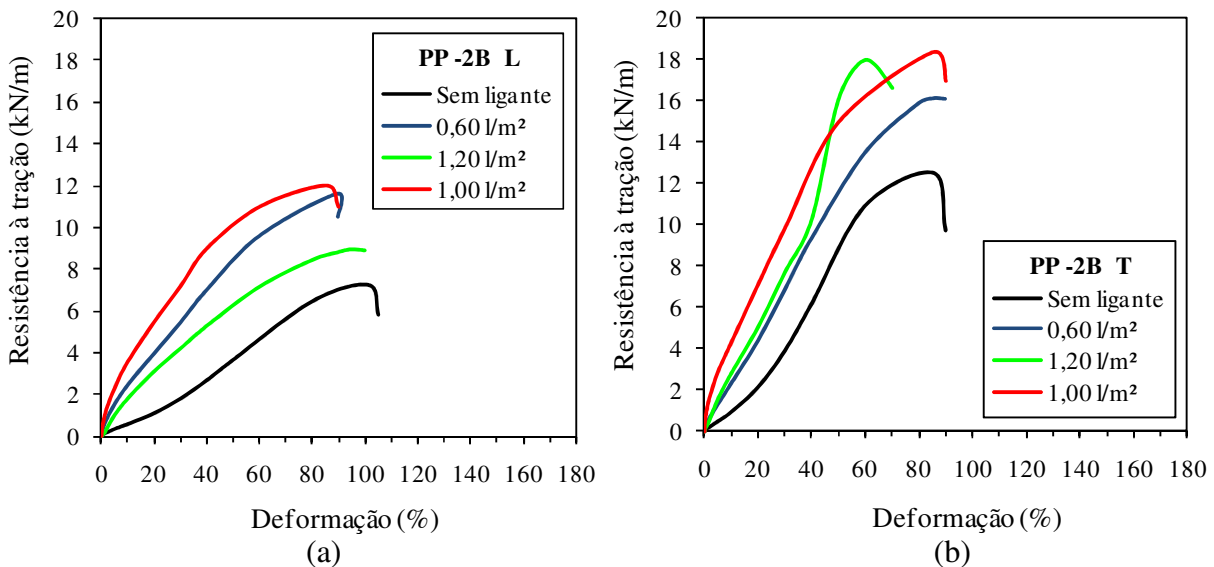


Figura 4.12 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PP-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP – Polipropileno; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Na Figura 4.13, o comportamento do geotêxtil reforçado (PP-FV) é mostrado nos dois sentidos ensaiados, com e sem a impregnação com o ligante asfáltico.

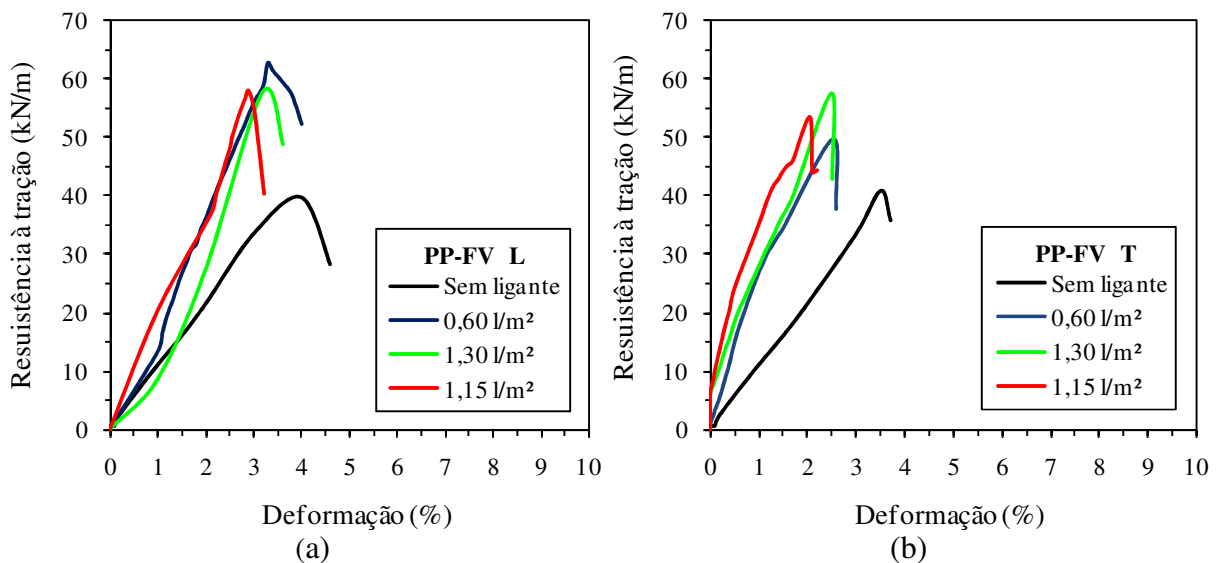


Figura 4.13 - Resultados dos ensaios de tração do geotêxtil PP-FV: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP – Polipropileno; FV – Fibra de Vidro; L – Longitudinal; T – Transversal.

Diferentemente dos outros materiais, o geotêxtil não tecido reforçado com fibra de vidro mostrou uma redução significativa nos valores de deformação na ruptura após a impregnação com o ligante. Os valores de $T_{\text{útl}}$ aumentaram com a quantidade de ligante nos dois sentidos do tecido, com destaque para o sentido longitudinal. A taxa referente à retenção de asfalto do material (em vermelho) mostrou melhor desempenho quanto ao incremento de rigidez do material nos dois sentidos de orientação dos ensaios, porém não alcançou os valores máximos de $T_{\text{útl}}$.

Em geral, a taxa de retenção de asfalto gerou os melhores resultados de $T_{\text{útl}}$ em 70% dos casos analisados, sendo, porém, a maior quantidade de ligante entre as três taxas analisadas em apenas 31% do total de amostras ensaiadas. Em relação ao incremento de rigidez do material para baixos níveis de deformação, a taxa de retenção de asfalto se destacou em 66% dos casos. Os valores de deformação na ruptura, em geral, tiveram alterações pouco significativas, excluindo os geotêxteis reforçados.

O aumento nos valores de resistência a ruptura com o acréscimo na quantidade de ligante é ilustrado nas Figuras 4.14 e 4.15 a seguir, para todos os geotêxteis analisados.

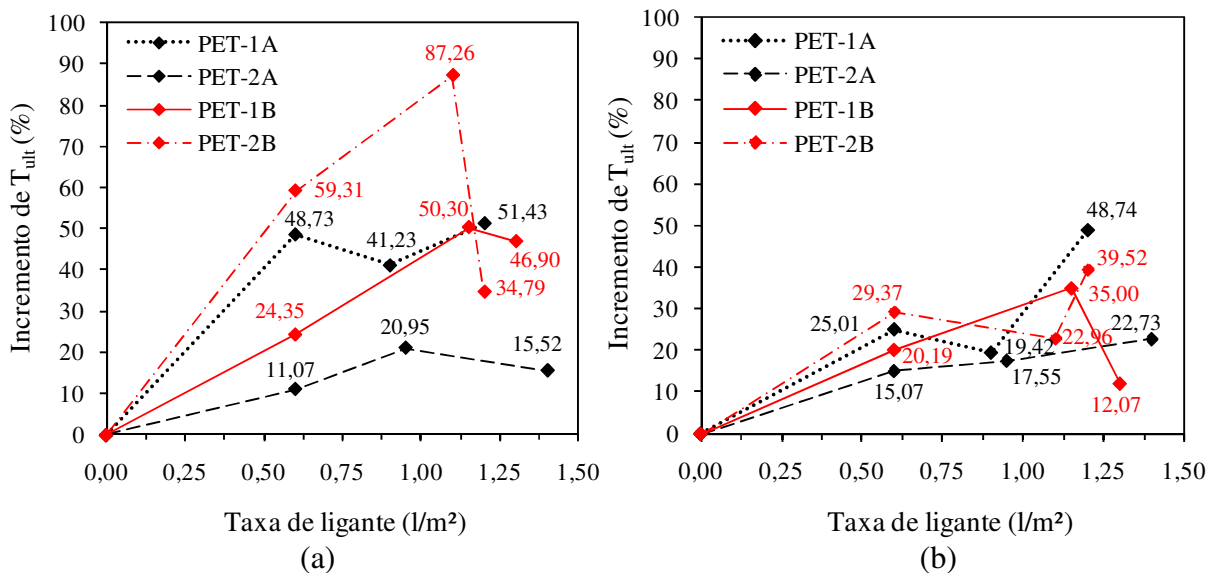


Figura 4.14 - Incremento de resistência na ruptura com adição do ligante asfáltico: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; 2 – 180 g/m²; A e B – Filamentos Curtos.

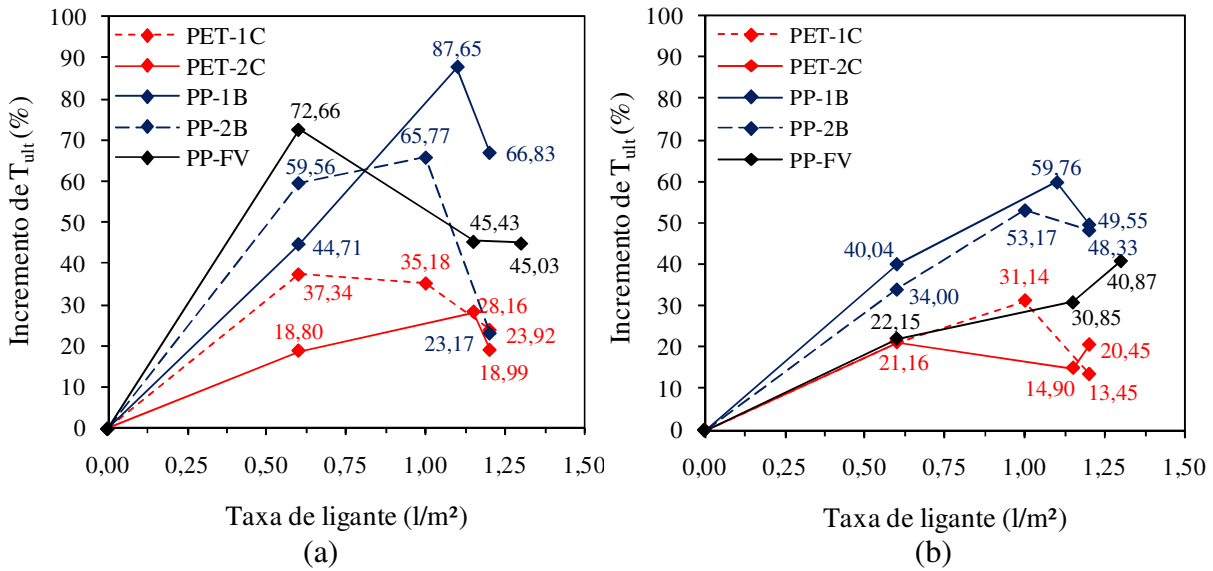


Figura 4.15 - Incremento de resistência na ruptura com adição do ligante asfáltico: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; PP – Polipropileno; 1 – 150 g/m²; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos Curtos; C – Filamentos longos; FV – Fibra de vidro.

Diante do exposto, nota-se que, para a grande maioria dos materiais, nos respectivos sentidos analisados, os resultados demonstram que pode existir uma taxa ótima de ligante e que, quantidades maiores do que esta levam à queda da resistência última a tração, como é o caso dos materiais PET-1B e do sentido longitudinal do PET-2A e PET-2B (Figura 4.14), bem como os materiais apresentados na Figura 4.15, PP-1B e PP-2B, PET-1C, e PET-2C e PP-FV (sentido longitudinal).

Alguns destes materiais não seguem uma tendência quanto ao incremento de ligante asfalto e os valores de resistência última como é o caso do PET-1A e PET-2A, e PET-2C (sentido transversal). Os casos em que se obteve o aumento de T_{ult} com o aumento do ligante foram verificados apenas para o PET-2A e PP-FV (sentido transversal).

4.2.3 Análise de rigidez inicial

As curvas de módulo de rigidez secante x deformação para os geotêxteis não tecidos de PET do fabricante A são mostradas nas Figuras 4.16 e 4.17 a seguir. A quantidade de emulsão asfáltica é indicada em vermelho para a taxa correspondente à retenção de asfalto do material.

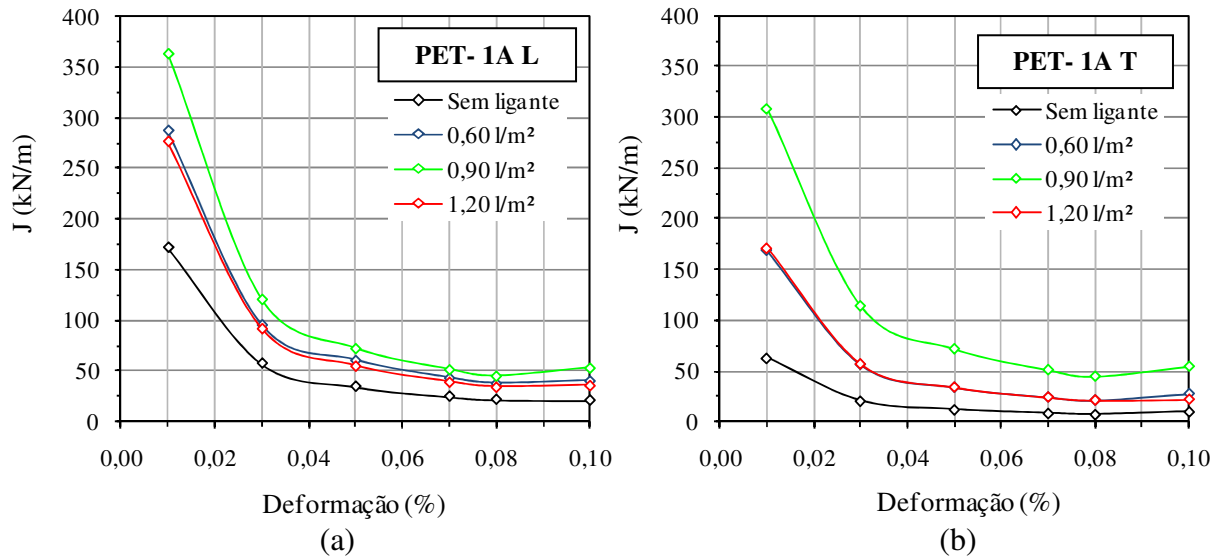


Figura 4.16 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-1A: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; A – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

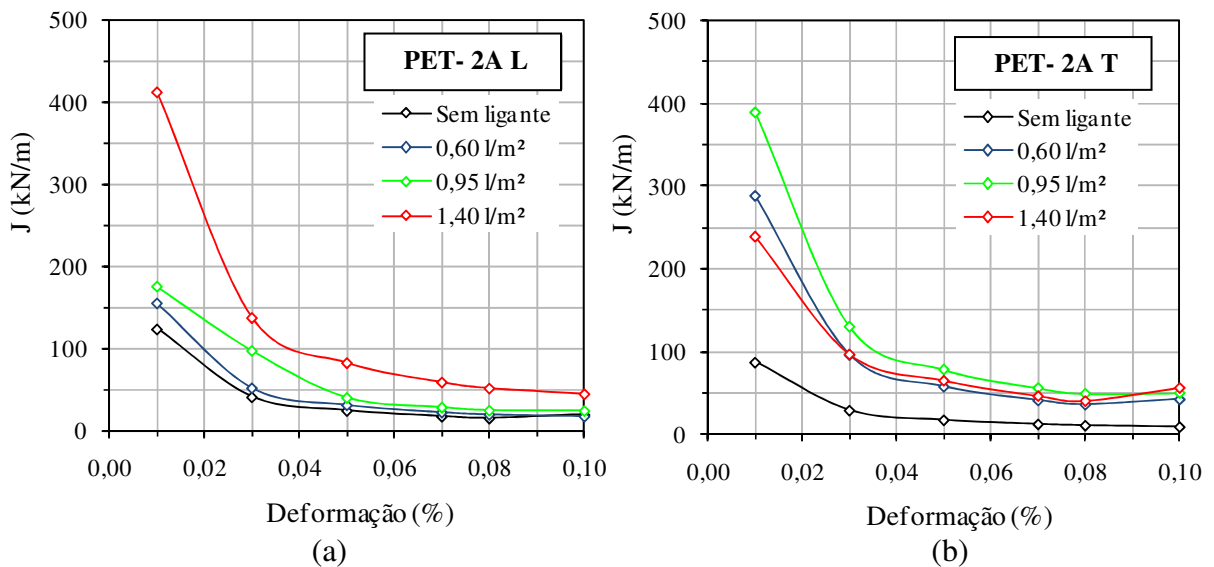


Figura 4.17 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-2A: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; A – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Para o poliéster PET-1A ilustrado na Figura 4.16, a Taxa 3 referente a 0,90 l/m² foi suficiente para alcançar os maiores valores de rigidez inicial, para os níveis de deformação avaliados, tanto no sentido longitudinal como transversal. Neste caso, a taxa de retenção de asfalto (1,20 l/m²), mesmo sendo maior do que as demais, não levou aos melhores resultados. O mesmo ocorreu para o PET-2A no sentido transversal, onde 0,95 l/m² de ligante apresentou o melhor desempenho, mesmo sendo menor do que a taxa de retenção de asfalto, como mostra a Figura 4.17b. O sentido longitudinal deste material (Figura 4.17a) revelou que a taxa de

1,40l/m² (retenção) revelou o melhor desempenho. Todos os materiais alcançaram a mesma ordem de grandeza para os valores de módulo de rigidez inicial.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 o comportamento dos materiais de poliéster do fabricante B quanto ao ganho de rigidez após a impregnação com a emulsão asfáltica é ilustrado. Nos materiais do fabricante B, a taxa referente à retenção de asfalto mostrou ser a taxa mais indicada, podendo ser referenciada como uma possível taxa ótima pra os dois materiais, em ambos os sentidos estudados.

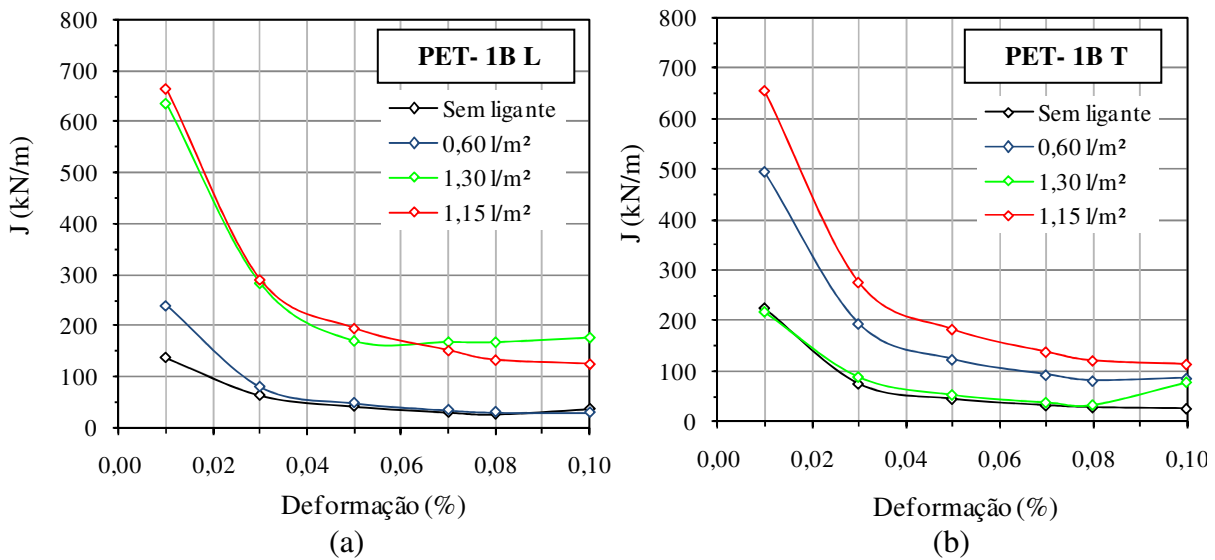


Figura 4.18 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; B – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

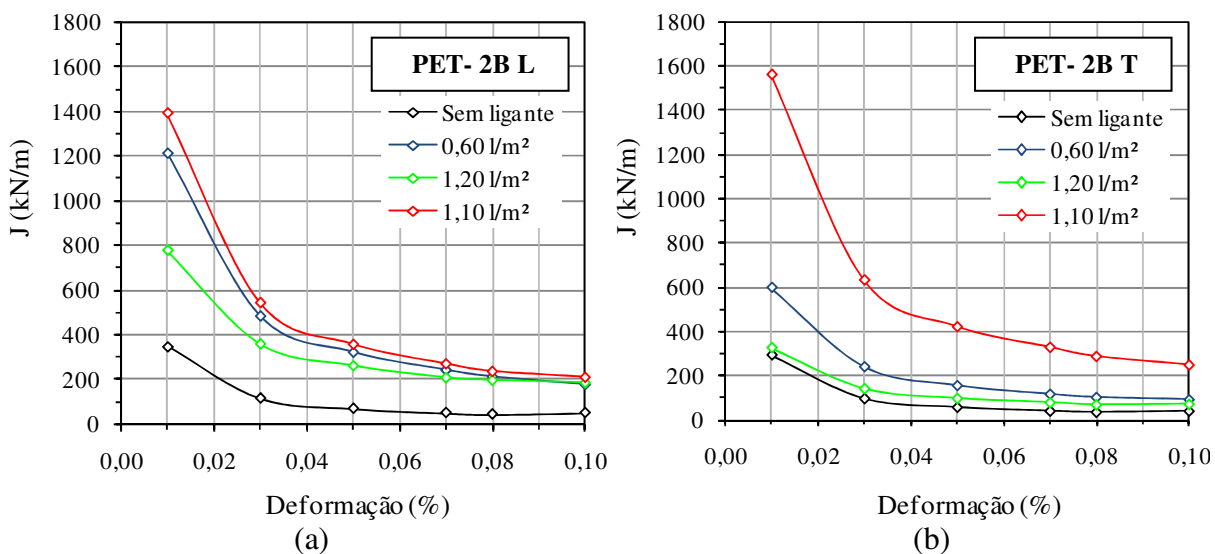


Figura 4.19 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

O poliéster de gramatura (g/m^2) 180 (Figura 4.19) alcançou o dobro de rigidez inicial do que o de menor gramatura. Nota-se que houve um grande incremento de rigidez neste material no sentido transversal, para níveis de deformação menores do que 0,03%.

Os geotêxteis não tecidos de poliéster e fibras longas, pertencentes ao fabricante C, são ilustrados nas Figuras 4.20 e 4.21 quanto ao módulo de rigidez x deformação para gramaturas (g/m^2) 150 e 180, respectivamente.

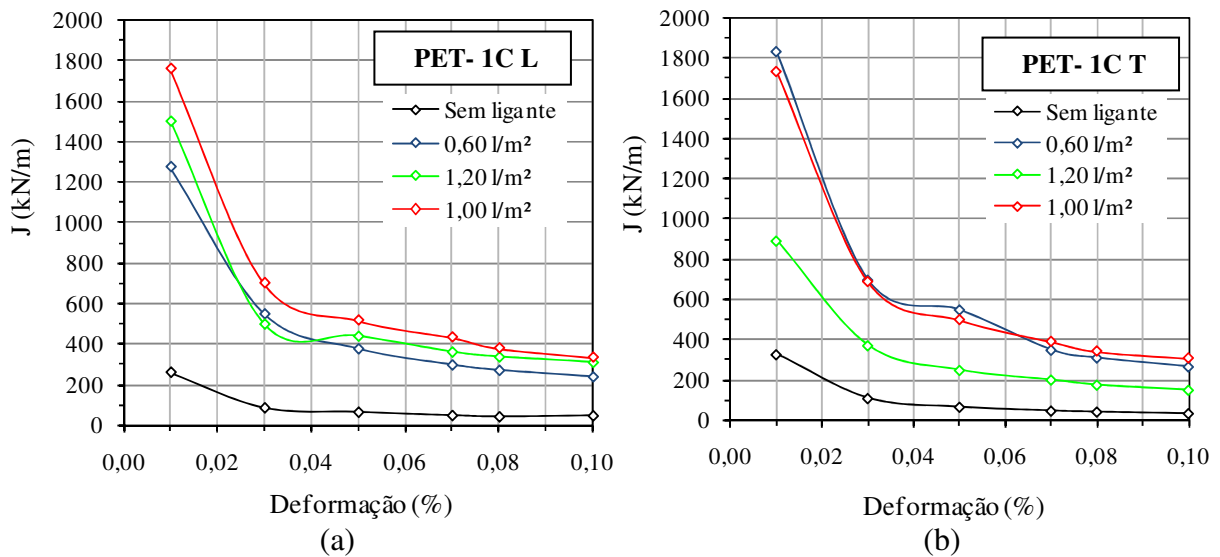


Figura 4.20 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-1C: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m^2 ; C– Filamentos Longos; L – Longitudinal; T – Transversal.

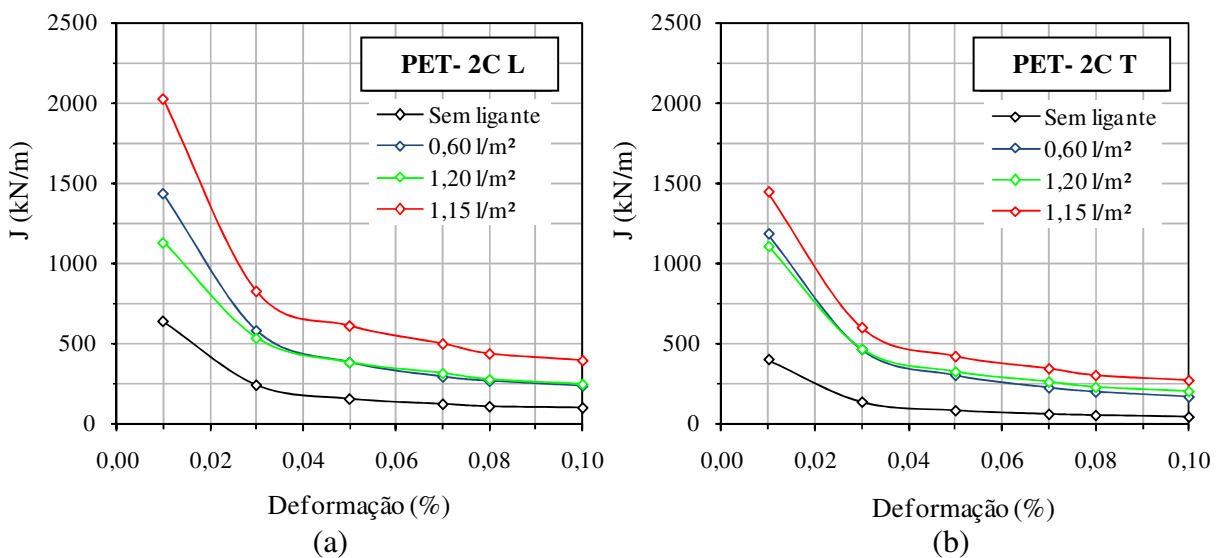


Figura 4.21 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PET-2C: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m^2 ; C– Filamentos Longos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Foi observado neste caso que os geotêxteis de fibras longas alcançam valores significativamente maiores de rigidez do que os materiais de fibras curtas, para ambas as gramaturas analisadas. A taxa referente à retenção de asfalto se destacou entre as outras para estes materiais, excluindo o PET-1C no sentido transversal, em que a taxa de 0,60 l/m² praticamente se igualou a 1,00 l/m² (retenção). Em relação aos máximos valores de rigidez alcançados, o PET-2C no sentido transversal, mesmo sendo mais resistente do que os de menor gramatura, não alcançou aos mesmos valores de rigidez.

A presença de fibras longas evidencia um comportamento superior aos de fibras curtas quando comparados níveis de deformação menores do que 0,03% para os geotêxteis de 150 g/m². Com relação à maior gramatura de fibras curtas, o fabricante A se mostrou bem inferior ao alcance do fabricante B, que por sua vez teve resultados muito próximos ao do fabricante C, de fibras longas.

Nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 apresentam-se os resultados do módulo de rigidez x deformação dos materiais de polipropileno nas gramaturas (g/m²) 150 e 180, bem como para o material reforçado com fibra de vidro, em ambos os sentidos de fabricação.

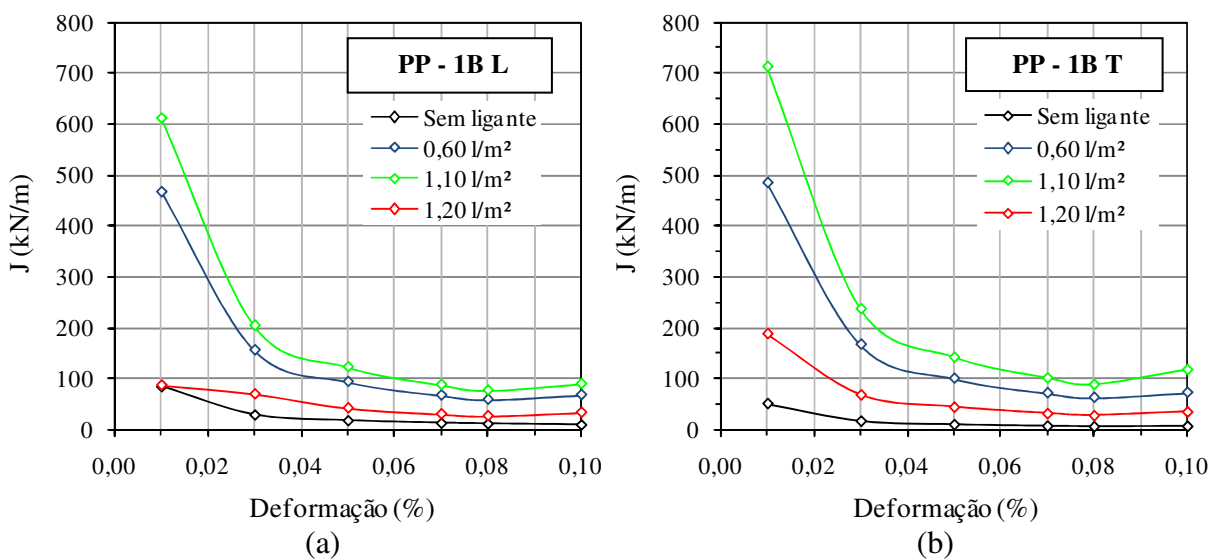


Figura 4.22 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PP-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP – Polipropileno; 1 – 150 g/m²; B– Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Na Figura 4.22, nota-se que quando 1,20 l/m² são aplicados ao material, os valores de rigidez para os níveis de deformações analisados caíram significativamente em relação às menores quantidades aplicadas. Para tanto, 1,10 l/m² também mostra ser a melhor quantidade

a ser aplicada a este material para a obtenção dos melhores resultados de deformabilidade e resistência.

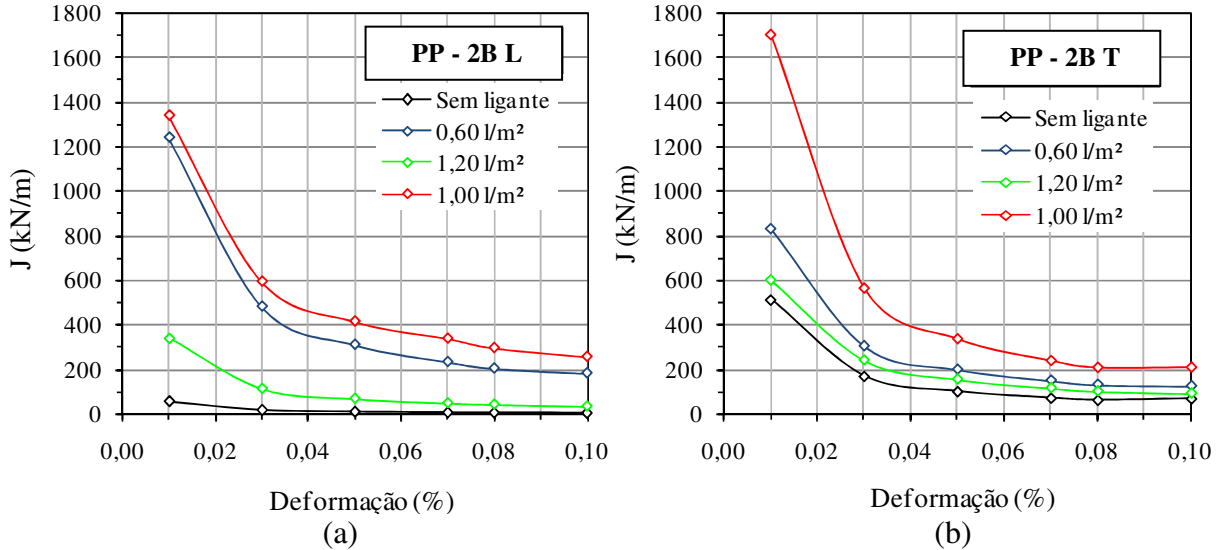


Figura 4.23 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PP-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP – Polipropileno; 2– 180 g/m²; B– Filamentos Curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

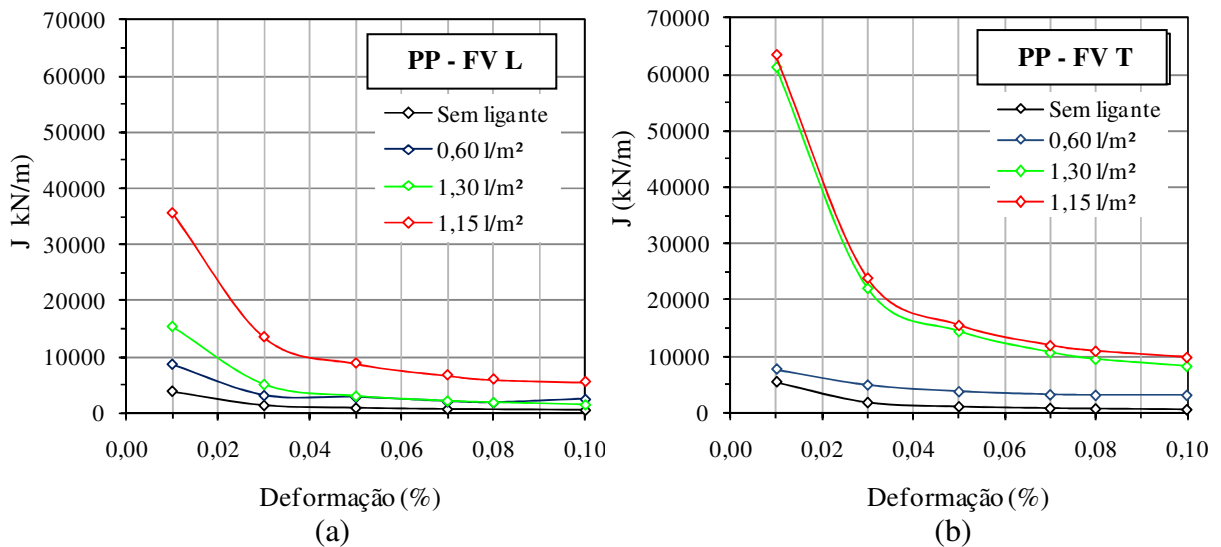


Figura 4.24 - Curvas Módulo de rigidez (J) do geotêxtil PP-FV: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP – Polipropileno; FV – Fibra de Vidro; L – Longitudinal; T – Transversal.

Nos materiais de polipropileno em geral, a quantidade de ligante em torno de 1,10 l/m² se destacou em todos os casos, sendo a taxa referente à retenção de asfalto (em vermelho) para o PP-2B e para o PP-FV, como ilustram as Figuras 4.23 e 4.24.

O geotêxtil não tecido reforçado com fibra de vidro (Figura 4.24) apresenta o incremento de rigidez inicial muito mais expressivo no sentido transversal. Este sentido do

material não apresenta diferença significativa quanto ao incremento de rigidez nas taxas de 1,15 l/m² e 1,30 l/m². Já no sentido longitudinal (Figura 4.24a), a taxa referente à retenção de asfalto se mostrou mais eficaz, mesmo não sendo a máxima quantidade de ligante aplicada ao material.

Enquanto um geotêxtil não reforçado de polipropileno atinge 1800 kN/m de módulo de rigidez secante, a fibra de vidro impõe ao material o alcance de valores superiores a 60.000 kN/m para o mesmo nível de deformação. Outro aspecto a ser destacado nesta análise é o fato destes materiais apresentarem, principalmente no sentido transversal, um expressivo aumento nos valores de rigidez para deformações menores do que 0,03%, com destaque para o PP-FV (Figura 4.24). No caso da restauração de pavimentos com geotêxteis, isto pode significar um grande acréscimo de rigidez ao sistema anti-reflexão de trincas, que trabalha em níveis de deformação muito próximos a estes. Desta forma, este pode ser um dos possíveis mecanismos responsáveis pelo sucesso da técnica.

A taxa referente à retenção de asfalto mostrou os melhores resultados em 73% dos casos analisados, sendo que esta quantidade era menor do que a taxa 3 em 66% dos casos. Com isso, é possível acreditar que existe uma taxa ótima para a aplicação de ligante asfáltico a estes materiais e que esta pode ser baseada no ensaio de retenção de asfalto.

Em geral, a impregnação forneceu um considerável aumento nos valores de rigidez a baixos níveis de deformação, em comparação com os materiais virgens. Os geotêxteis PET-1C e PET-2C mostraram os melhores incrementos nos valores de rigidez para o níveis de deformação inferiores 0,03%, seguidos do PET-2B e do PP-2B.

Para os geotêxteis PET-2A (apenas no sentido longitudinal), PET-1B, PET-2B, PET-1C, PET-2C, PP-2B, a taxa referente à retenção de asfalto utilizada como quantidade de ligante mostrou o melhor desempenho quanto ao ganho de rigidez inicial. O mesmo foi verificado com o geotêxtil reforçado com fibra de vidro (PP-FV). Apenas o PET-1A, PET-2 A (apenas no sentido transversal) e o PP-1B não chegaram aos valores máximos de rigidez esperados para a taxa de retenção. Ao contrário, eles apresentaram os melhores resultados com uma menor quantidade de ligante do que a quantidade referente à retenção de asfalto. Os geotêxteis não tecidos PET-1B, PET-2B, PET-1C, PET-2C, PP-2B e PP-FV mostraram que a taxa de retenção de asfalto aplicada sobre os corpos-de-prova mostrou ser quantidade mais indicada, mesmo não sendo a maior quantidade aplicada ao material.

4.2.4 Incremento de rigidez com a adição do ligante

4.2.4.1 Taxa ótima de asfalto

O incremento de rigidez com a adição do ligante nos materiais de poliéster do fabricante A é apresentado nas Figuras 4.25 e 4.26, para ambas as gramaturas e direções ensaiadas. Os níveis de deformação analisados foram 0,03%, 0,05% e 0,10%, compatíveis com as solicitações normalmente impostas à camada asfáltica do pavimento flexível. O ponto em destaque no gráfico refere-se à retenção de asfalto dos materiais.

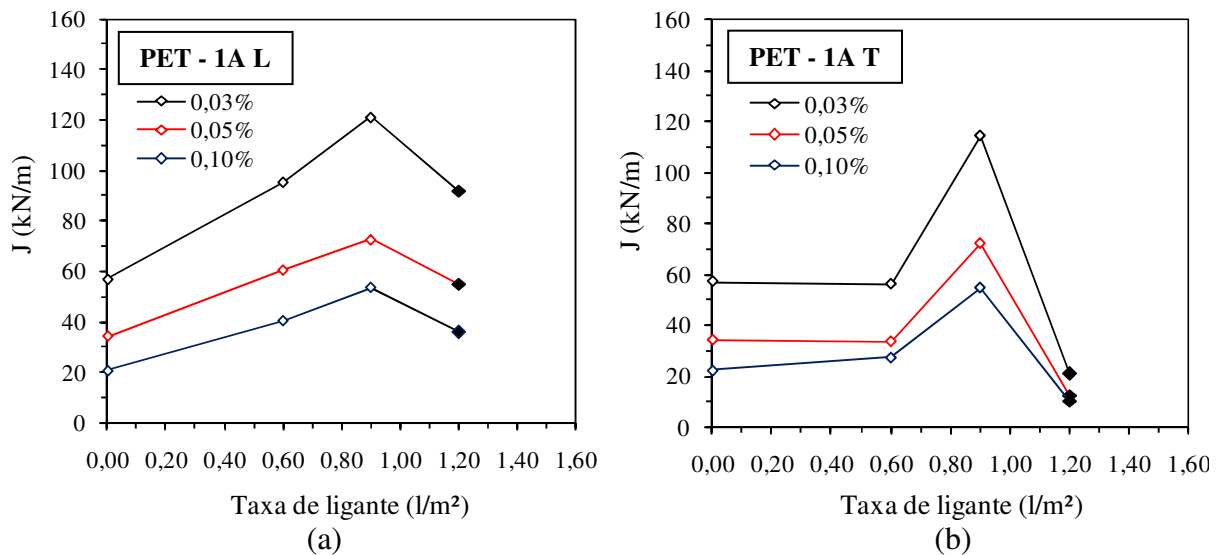


Figura 4.25 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-1A: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; A – Filamentos curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.25a nota-se que há uma aparente taxa ótima de aplicação de asfalto em torno de 0,90 l/m². O mesmo ocorre no sentido transversal deste material (Figura 4.25b), em que não é observado incremento de rigidez com baixa quantidade de ligante e também em quantidades acima de 1,0 l/m², sendo, portanto o ponto ótimo em torno de 0,90l/m².

Na Figura 4.26a, o material não parece ter alcançado uma taxa ótima, porém o melhor resultado foi obtido com a quantidade de ligante referente à retenção de asfalto do material. No sentido transversal (Figura 4.26b) nota-se que o material obteve significativo aumento de rigidez em torno de 0,95 l/m², sendo, portanto esta uma possível taxa ótima de ligante.

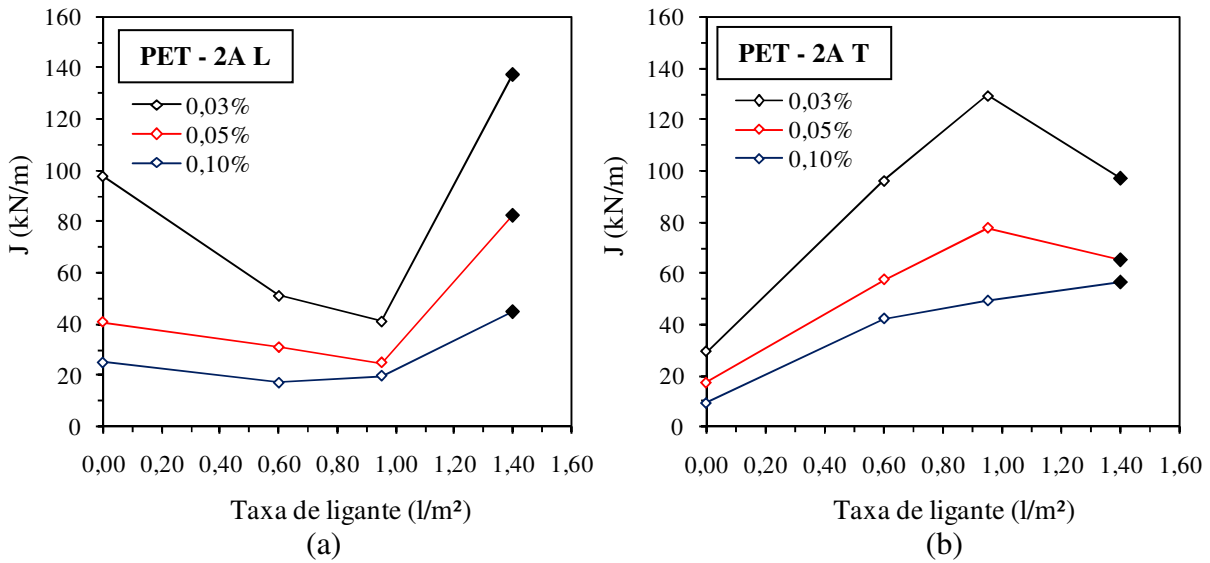


Figura 4.26 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-2A: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; A – Filamentos curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Nas Figuras 4.27 e 4.28 é ilustrado o incremento de rigidez com a adição do ligante nos materiais de poliéster do fabricante B, para ambas as gramaturas.

Diante do exposto na Figura 4.27, o máximo ganho de rigidez foi alcançado com 1,15 l/m², referente à retenção de asfalto do material. Para o material de maior gramatura exposto na Figura 4.28, a quantidade de ligante em torno de 1,10 l/m² se destaca das demais, especialmente no sentido transversal.

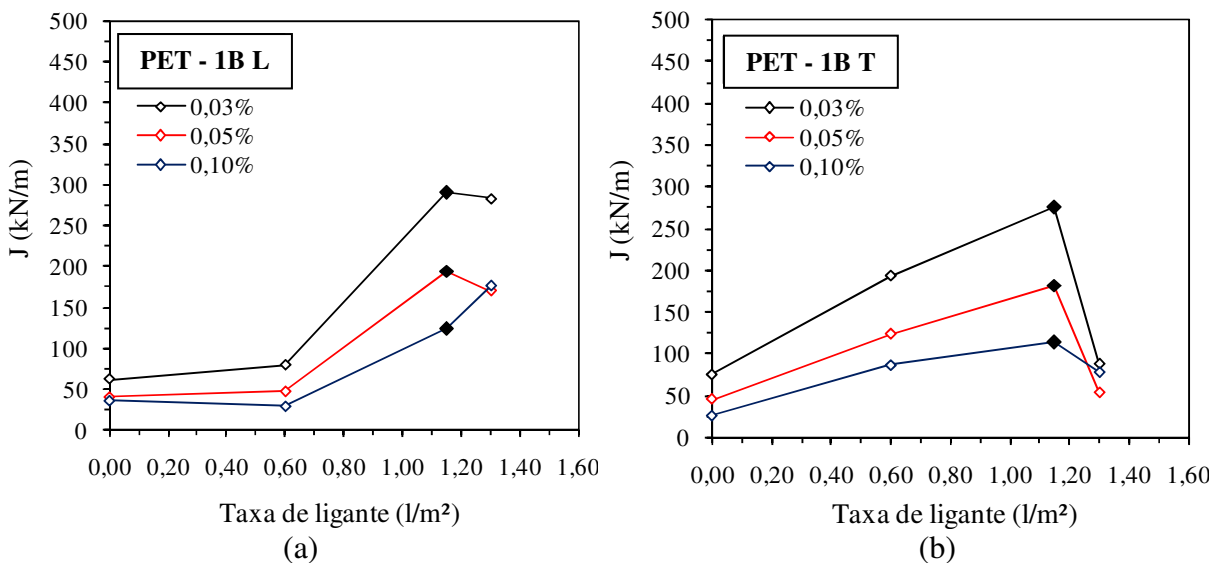


Figura 4.27 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante PET-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; B – Filamentos curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

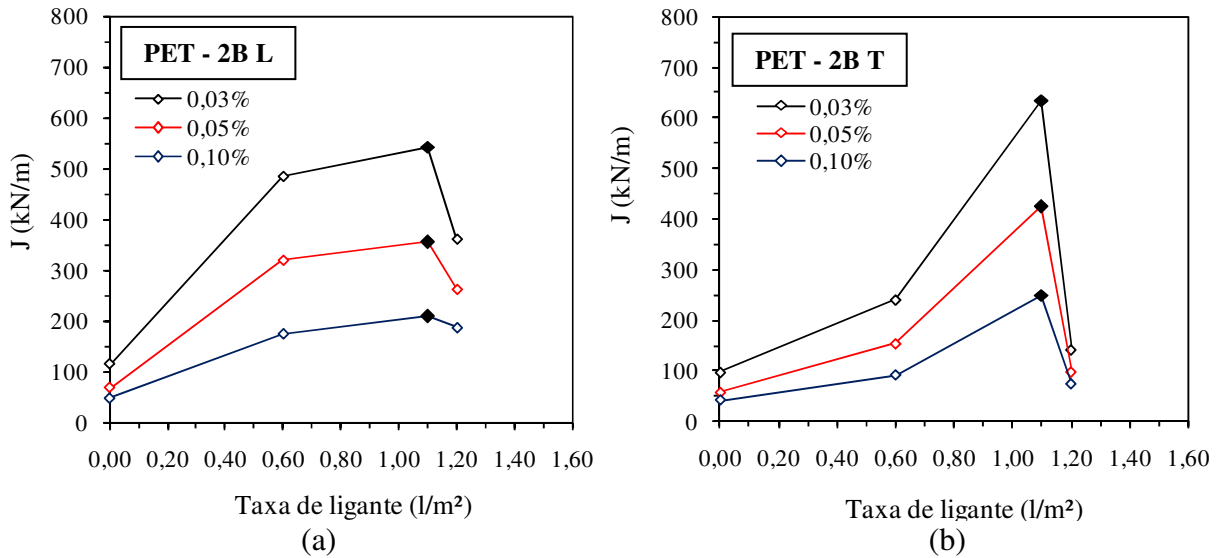


Figura 4.28 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

O incremento de rigidez com a adição do ligante nos materiais de poliéster de fibras longas é apresentado nas Figuras 4.29 e 4.30, para ambas as gramaturas e direções do tecido.

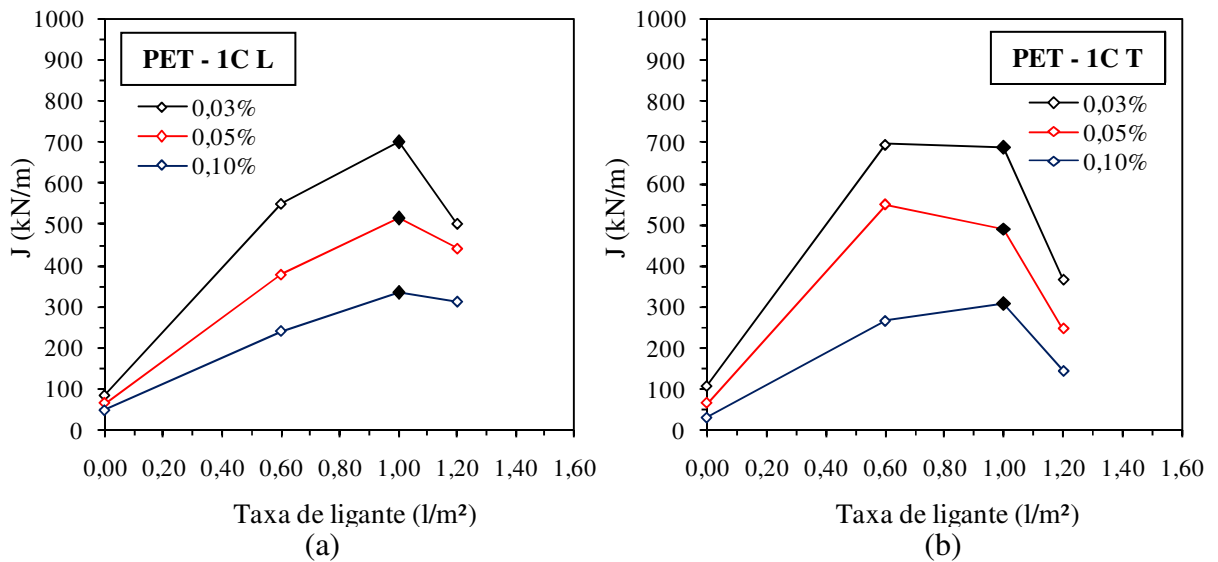


Figura 4.29 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PET-1C: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 1 – 150 g/m²; C – Filamentos longos; L – Longitudinal; T – Transversal.

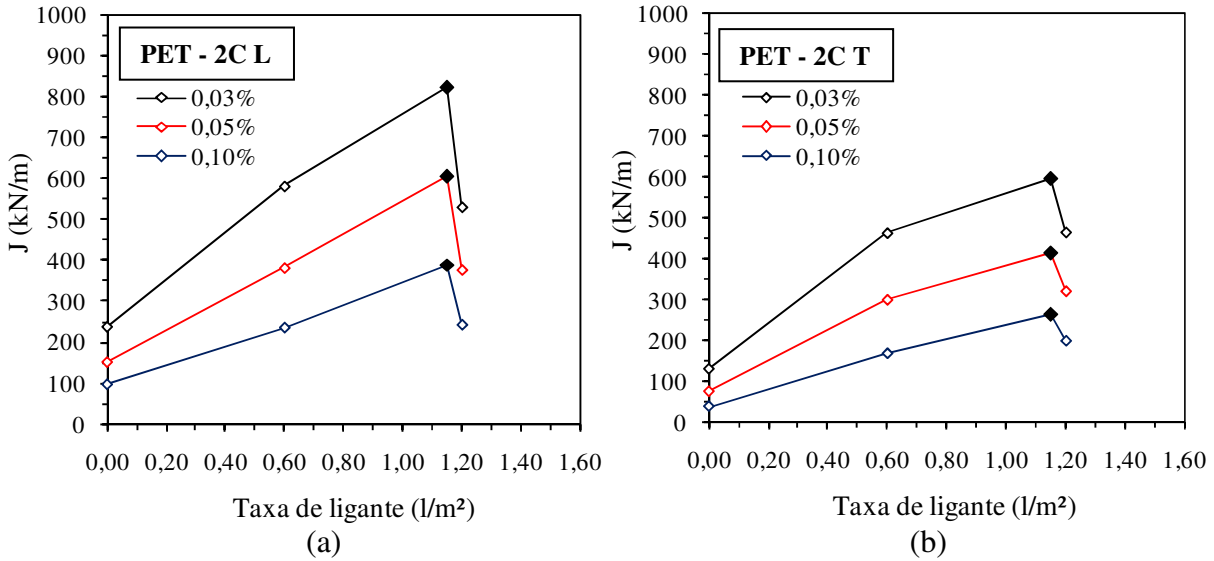


Figura 4.30 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante do PET-2C: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PET – Poliéster; 2 – 180 g/m²; C – Filamentos longos; L – Longitudinal; T – Transversal.

Os materiais de fibras curtas (Figuras 4.29 e 4,30) demonstram que pode haver uma taxa ótima de ligante para a obtenção do máximo incremento de rigidez a pequenas deformações e que esta pode estar também relacionada à retenção de asfalto do material. Esta taxa é em torno de 1,00 l/m² para o PET-1C e 1,15 l/m² para o PET2C. Não foram verificadas variações entre os níveis de deformação avaliados.

Nas Figuras 4.31, 4.32, 4.33, ilustra-se o incremento de rigidez com a adição do ligante para os materiais de polipropileno do fabricante B e do polipropileno reforçado.

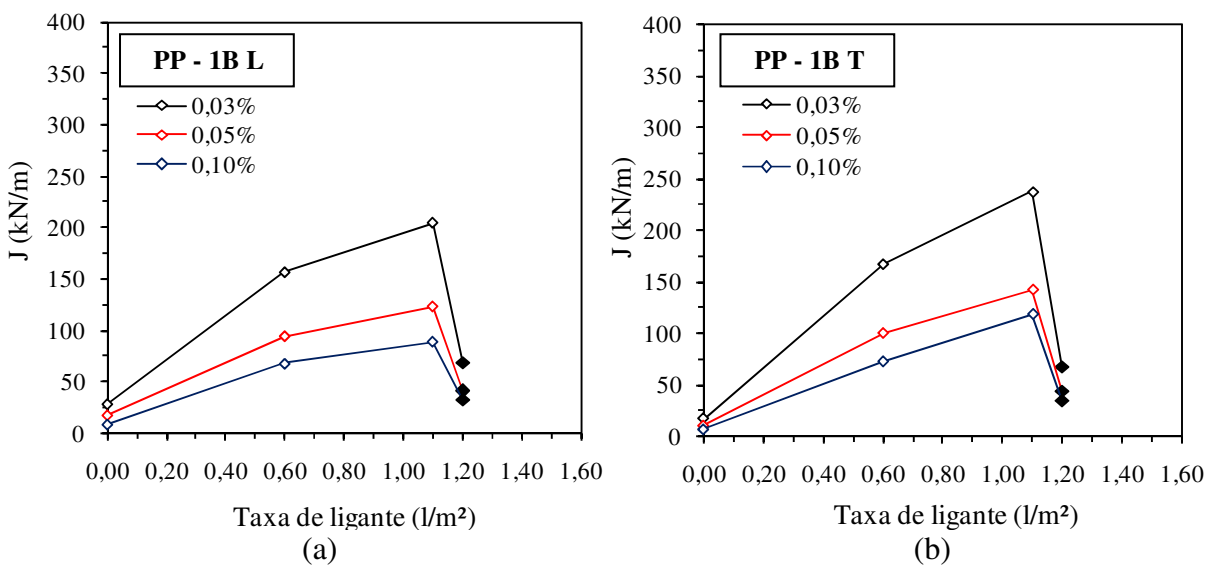


Figura 4.31 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante do PP-1B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP - Polipropileno; 1 – 150 g/m²; B – Filamentos curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

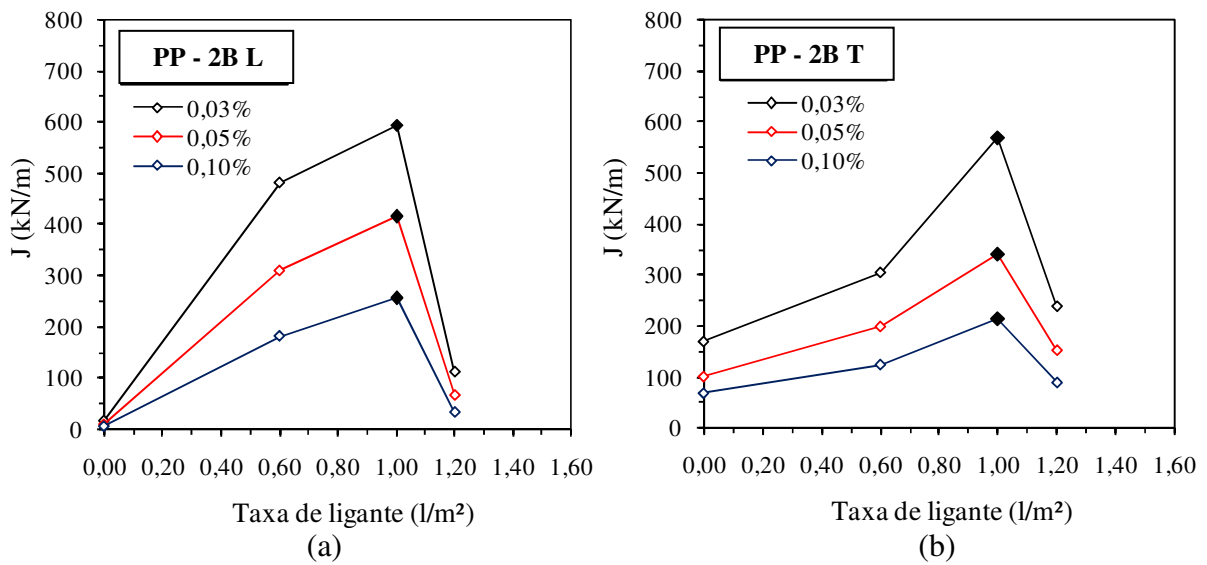


Figura 4.32 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante do PP-2B: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP - Polipropileno; 2 – 180 g/m²; B – Filamentos curtos; L – Longitudinal; T – Transversal.

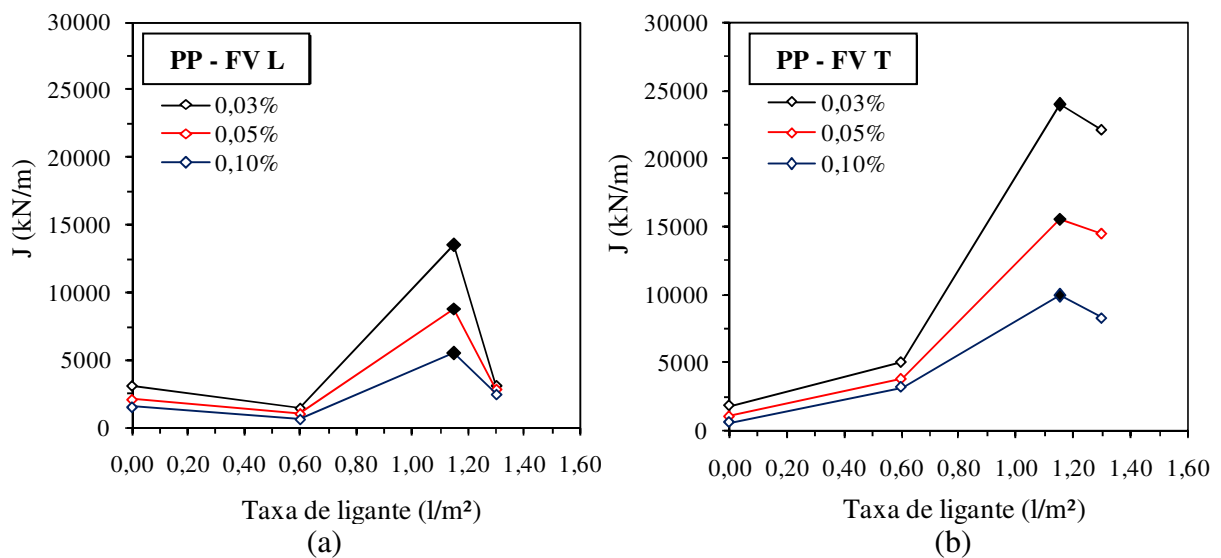


Figura 4.33 – Incremento de rigidez com a aplicação do ligante para o PP-FV: (a) Longitudinal e (b) Transversal. Nota: PP - Polipropileno; FV – Fibra de vidro; L – Longitudinal; T – Transversal.

Os resultados do material de polipropileno de 150 g/m² indicados na Figura 4.31 indicam claramente que a retenção de asfalto do material utilizada como taxa de ligante não confere a este os melhores resultados de incremento de rigidez nos dois sentidos do tecido. Portanto, acredita-se que este material tem melhor trabalhabilidade com o ligante com 1,10 l/m². Já os resultados do polipropileno de maior gramatura apresentados na Figura 4.32 e o material reforçado (Figura 4.33) indicam nitidamente um expressivo incremento da rigidez com o ligante em torno de 1,10 l/m², coincidentes com a retenção de asfalto dos mesmos.

Dos nove materiais analisados, considerando os dois sentidos do geotêxtil, verificou-se que 39% dos materiais tem a taxa ótima entre 0,9 a 1,10 l/m². Para quantidades entre 1,10 l/m² a 1,15 l/m², 55% deles obtiveram o máximo incremento de rigidez. Apenas um material, o PET-2A (sentido longitudinal) não apresentou tendência a taxa ótima.

Os resultados apresentados demonstram que pode existir uma taxa ótima de emulsão asfáltica RR-1C em cada tipo de geotêxteis, e que esta mostrou ser coerente com a taxa habitualmente aplicada em campo, de 1,00 a 1,30 l/m², na maioria dos casos. Constatou-se através desta análise que a impregnação com emulsão asfáltica confere rigidez adicional ao geotêxtil e que cada material pode alcançar o seu melhor desempenho quando aplicada sobre ele, a taxa de emulsão asfáltica adequada. Não foram verificadas influências do fabricante, da gramatura, do tipo de polímero ou do tipo de fibras os resultados da taxa ótima de emulsão asfáltica.

O nível de deformações de uma camada asfáltica do pavimento é usualmente menor do que 0,1%. Portanto, a análise mais profunda da rigidez inicial destes materiais demonstrou que para a maioria dos geotêxteis não tecidos expostos nesta pesquisa, a taxa referente à retenção de asfalto utilizada nos ensaios de tração revelou os melhores resultados de incremento de rigidez inicial.

4.2.4.2 Influência do fabricante no comportamento do material impregnado

Na Figura 4.34 são feitas comparações entre os materiais de poliéster de fibras curtas dos fabricantes A e B nas gramaturas nominais (g/m²) 150 e 180, com relação ao incremento de rigidez após a impregnação para o nível de deformação fixado em 0,05%. Essas comparações foram realizadas considerando a taxa ótima de ligante asfáltico obtida para cada um dos materiais. As taxas consideradas foram 0,90 l/m² para o PET-1A, 1,15 l/m² para o PET-1B, 1,00 l/m² para o PET-2A e 1,10 l/m² para o PET-2B.

Nota-se na Figura 4.34 que o destaque foi para o fabricante B, que além de atingir maiores valores de rigidez a 0,05% de deformação, apresenta ainda incrementos de rigidez com a impregnação superiores aos do fabricante A nas duas gramaturas analisadas. Enquanto o poliéster A apresentou incrementos de 110% e 324%, o fabricante B alcançou 304% e 621% para as gramaturas 150 e 180, respectivamente.

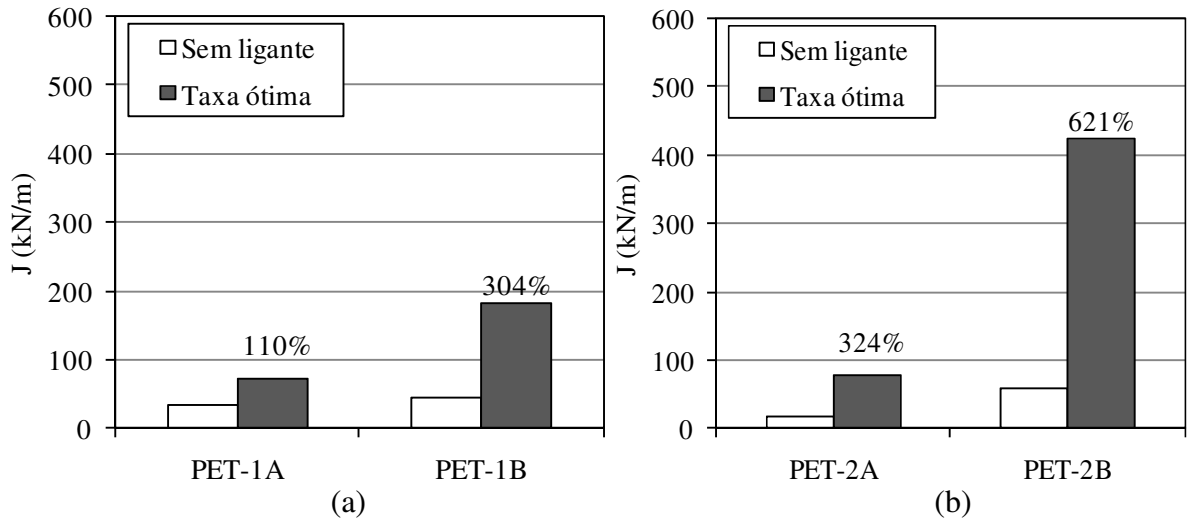


Figura 4.34 – Comparações entre os materiais dos fabricantes A e B quanto à rigidez a 0,05% de deformação: (a) 150 g/m² e (b) 180 g/m².

4.2.4.3 Influência do tipo de fibra no comportamento do material impregnado

Comparações entre os materiais de poliéster de fibras curtas e longas nas gramaturas (g/m²) 150 e 180 são ilustradas na Figura 4.35, considerando a taxa ótima de ligante asfáltico para cada um dos materiais e sua relação com o incremento de rigidez após a impregnação para o nível de deformações de 0,05%. Estas taxas foram 1,15 l/m² para PET-1B, 1,00 l/m² para PET-1C, 1,10 l/m² para PET-2B e 1,15 l/m² para o PET-2C.

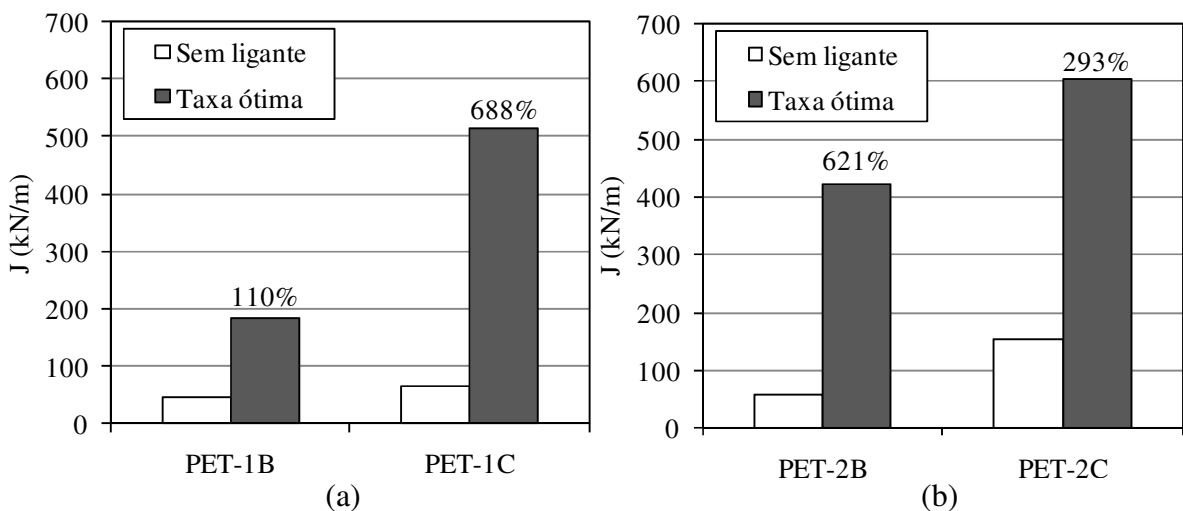


Figura 4.35 – Comparações entre os materiais de fibras curtas e longas quanto à rigidez a 0,05% de deformação: (a) 150 g/m² e (b) 180 g/m².

Os resultados apresentados na Figura 4.35 mostram que material de fibras longas tem desempenho superior ao de fibras curtas de mesma gramatura quanto ao alcance dos valores de módulo de rigidez para a deformação de 0,05%. No entanto, nota-se que entre os materiais de maiores gramaturas (Figura 4.35b), o incremento de rigidez adicional devido ao ligante asfáltico foi muito mais elevado para o PET-2B de fibras curtas (621%) do que para o de fibras longas (293%).

4.2.4.4 Influência do tipo de polímero no comportamento do material impregnado

Foram comparados geotêxteis não tecidos de fibras curtas do fabricante B, nas gramaturas (g/m^2) 150 e 180, com dois tipos de polímero: poliéster (PET) e polipropileno (PP). As comparações foram realizadas considerando a taxa ótima de ligante asfáltico para cada um dos materiais e o incremento de rigidez após a impregnação para o nível de deformações de 0,01% como ilustra a Figura 4.36. As taxas foram $1,10 \text{ l/m}^2$ para o PP-1B, $1,15 \text{ l/m}^2$ para o PET-1B, $1,00 \text{ l/m}^2$ para o PP-2B e $1,10 \text{ l/m}^2$ para o PET-2B.

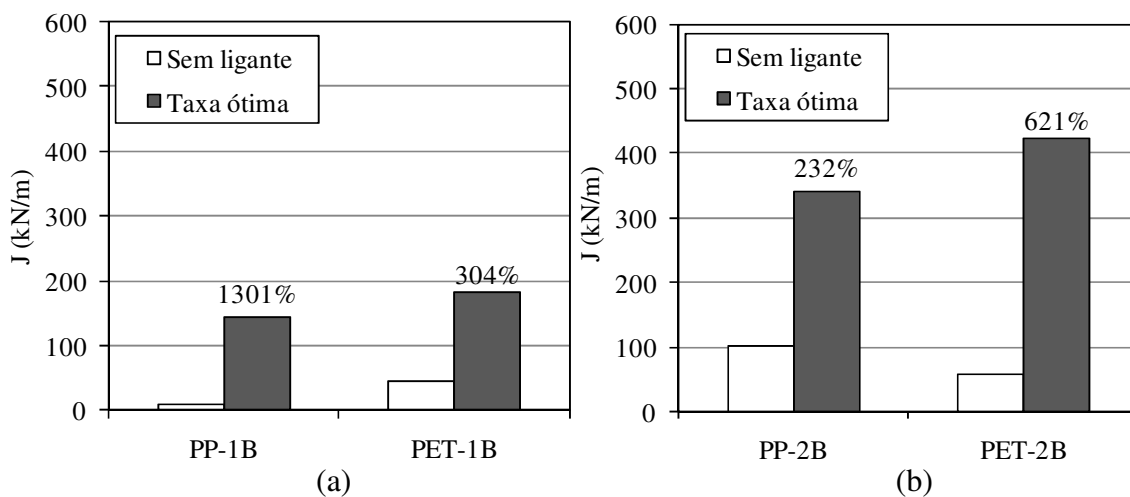


Figura 4.36 – Comparações entre os materiais de poliéster e polipropileno quanto à rigidez a 0,05% de deformação: (a) 150 g/m^2 e (b) 180 g/m^2 .

Nota-se na Figura 4.36 que os materiais de poliéster apresentam módulo de rigidez para a deformação adotada um pouco maiores do que para os geotêxteis de polipropileno na gramatura 150. Para a maior gramatura, o máximo incremento de rigidez também foi verificado no poliéster (621%) contra 232% do PP. Já para o caso da gramatura 150, um expressivo ganho de rigidez foi apresentado no PP (1301%), em comparação ao PET (304%).

4.2.4.5 Influência da gramatura no comportamento do material impregnado

Para os materiais de poliéster de fibras curtas A e B, houve influência da gramatura quanto ao incremento de rigidez após adição do ligante, pois os materiais de 180 g/m² apresentaram desempenho superior aos de menor gramatura (Figura 4.34). O material PET-1A apresentou desempenho inferior ao PET-1B, de mesma gramatura nominal, porém, cabe salientar que este possui gramatura de ensaio inferior a do fabricante B (Tabela 3.4).

Nos materiais de fibras longas, a menor gramatura apresentou o dobro de incremento de rigidez do que o visto na maior gramatura (Figura 4.35). Para o polipropileno, o incremento de rigidez do PP-1B em relação ao PP-2B foi cinco vezes maior (Figura 4.36).

4.3 Análises das propriedades hidráulicas dos geotêxteis

4.3.1 Geotêxteis não tecidos sem impregnação

São apresentados na Tabela 4.5 os resultados das propriedades hidráulicas dos materiais virgens avaliados através do ensaio de Permissividade.

Tabela 4.5 – Propriedades hidráulicas do material virgem

| Material | t (mm) | Permissividade (s ⁻¹) | Permeabilidade Normal (cm/s) |
|----------|--------|-----------------------------------|------------------------------|
| PET-1A | 1,60 | 4,00 | 6,40x10 ⁻⁰¹ |
| PET-1B | 1,75 | 3,78 | 6,60x10 ⁻⁰¹ |
| PET-1C | 1,36 | 4,45 | 6,00x10 ⁻⁰¹ |
| PET-2A | 2,00 | 2,75 | 5,50x10 ⁻⁰¹ |
| PET-2B | 1,36 | 2,28 | 3,00x10 ⁻⁰¹ |
| PET-2C | 1,86 | 1,89 | 3,40x10 ⁻⁰¹ |
| PP-1B | 2,29 | 2,33 | 5,30x10 ⁻⁰¹ |
| PP-2B | 1,37 | 1,69 | 2,40x10 ⁻⁰¹ |
| PP-FV | 1,28 | 1,34 | 1,70x10 ⁻⁰¹ |

A e B = Fibras curtas; C = Fibras longas; FV = Fibra de vidro; t = espessura.

Dos resultados mostrados na Tabela 4.5, nota-se que a permeabilidade normal dos geotêxteis não tecidos apresenta valores da ordem de 10⁻¹ cm/s. Os valores de permeabilidade

normal demonstram que os geotêxteis são considerados materiais de alta permeabilidade normal, quando comparados, por exemplo, com uma geomembrana que atinge 10^{-12} cm/s.

4.3.2 Geotêxteis não tecidos impregnados

A Tabela 4.6 apresenta a influência da impregnação nos valores de permeabilidade normal dos materiais analisados. No caso de geotêxteis impregnados com emulsão asfáltica, por se tratarem de materiais de baixa permeabilidade, foram realizados ensaios de transmissão de vapor d'água. As taxas de ligante utilizadas foram de 0,60 l/m², 0,90 l/m² e 1,10 l/m², para cada um dos materiais.

Tabela 4.6 – Permeabilidade normal em geotêxteis impregnados

| Material | Permeabilidade normal (cm/s) | | |
|----------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 0,60 l/m ² | 0,90 l/m ² | 1,10 l/m ² |
| PET-1A | 2,88x10 ⁻⁰⁹ | 2,70x10 ⁻⁰⁹ | 2,10x10 ⁻⁰⁹ |
| PET-1B | 2,77x10 ⁻⁰⁹ | 2,54x10 ⁻⁰⁹ | 1,73x10 ⁻⁰⁹ |
| PET-1C | 4,96x10 ⁻¹⁰ | 7,64x10 ⁻¹⁰ | 7,71x10 ⁻¹⁰ |
| PET-2A | 5,20x10 ⁻¹⁰ | 5,01x10 ⁻¹⁰ | 4,18x10 ⁻¹⁰ |
| PET-2B | 4,80x10 ⁻¹⁰ | 3,77x10 ⁻¹⁰ | 1,68x10 ⁻¹⁰ |
| PET-2C | 6,44x10 ⁻¹⁰ | 6,39x10 ⁻¹⁰ | 5,81x10 ⁻¹⁰ |
| PP-1B | 1,28x10 ⁻⁰⁹ | 1,27x10 ⁻⁰⁹ | 1,22x10 ⁻⁰⁹ |
| PP-2B | 9,60x10 ⁻¹⁰ | 5,96x10 ⁻¹⁰ | 2,17x10 ⁻¹⁰ |
| PP-FV | 1,36x10 ⁻¹⁰ | 6,70 x10 ⁻¹¹ | 5,40 x10 ⁻¹¹ |

B = Fibras curtas; C = Fibras longas; 1 = 150 g/m²; 2 = 180 g/m²

De acordo com o exposto pelo ensaio de transmissão de vapor d'água (WVT), nota-se que há um grande decréscimo nos valores de permeabilidade normal destes materiais após a impregnação com o ligante asfáltico. A impregnação com a taxa de 0,60 l/m² de emulsão asfáltica proporcionou uma drástica redução nos valores de permeabilidade normal de todos os materiais analisados.

No entanto, quando foram adicionados 0,90 l/m² de emulsão RR-1C nos corpos de prova, comparado com a taxa de 0,60l/m², a redução foi significativa apenas nos materiais PET-2B e PP-2B, acima de 20%, e no PET-1C e PP-FV, que reduziram mais de 50%.

A taxa de aplicação de 1,10 l/m² mostrou o melhor desempenho em todos os casos analisados, com destaque para o material reforçado com fibra de vidro, que chegou a permeabilidade normal de 10⁻¹¹ cm/s. As fibras de vidro possivelmente colaboraram com estes resultados, pois dificultam a passagem de água.

Quando comparadas as taxa de 0,60 l/m² e 1,00 l/m², a maior taxa mostrou redução significativa nos valores de permeabilidade na maioria dos casos, variando de 20 a 90% de redução sobre a permeabilidade da taxa menor. A Figura 4.37 ilustra o desempenho dos materiais quanto à influência do ligante asfáltico em termos de redução da permissividade, ou seja, desconsiderando a espessura dos materiais.

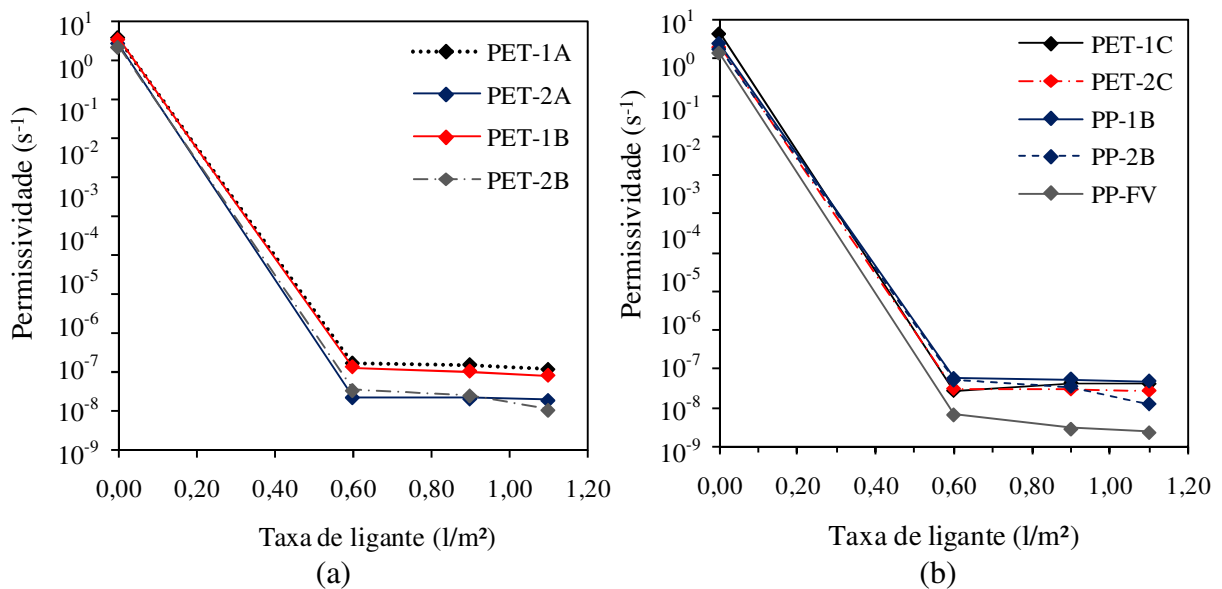


Figura 4.37 – Relação entre permissividade e taxa de ligante (residual) para os geotêxteis não tecidos.

Observa-se na Figura 4.37 a redução da permeabilidade com o acréscimo do ligante asfáltico em todos os casos analisados. Na Figura 4.37a pode-se visualizar a diferença entre o comportamento da permissividade com a taxa de ligante dos materiais de menor e maior gramatura. Na Figura 4.35b, nota-se que o material de poliéster de menor gramatura, PP-1B e o material de fibras longas PET-2C, não apresentaram o mesmo comportamento dos outros materiais com o aumento da taxa de ligante. A redução obtida pela maior taxa, quando comparada com a taxa de 0,60l/m² chegou a apenas 5% para o PP-1B e 10% para o PET-2C. Desta forma, não houve influência significativa de redução da permeabilidade com taxa de ligante superior a 0,60 l/m².

Em geral, os materiais gramatura (g/m^2) 180, apresentaram os melhores resultados quanto à redução da permeabilidade, chegando a valores de 10^{-10} cm/s. Ainda em relação às variações apresentadas, deve ser considerado o fato de que todos os materiais apresentaram a mesma ordem de grandeza, excluindo o material reforçado que apresentou valores de permeabilidade ainda menores, chegando a 10^{-11} cm/s.

Não foram verificadas influência do fabricante e do tipo de polímero. Quanto às fibras, os materiais de menor gramatura não apresentaram resultados semelhantes, sendo que os de fibras longas (PET-1C) mostraram-se menos permeáveis do que os de fibras curtas (PET-1A e PET-1B).

No entanto, o que deve ser enfatizado com estes resultados é que estes valores são muito próximos aos valores de permeabilidade normal de uma geomembrana, utilizada normalmente como material impermeável, com valores de 10^{-12} cm/s, e cuja permeabilidade é obtida através deste mesmo ensaio. Contudo, os corpos de prova ensaiados são muito pequenos e podem não refletir a exata variação apresentada pela impregnação com a emulsão asfáltica que ocorre em campo nos geotêxteis não tecidos.

Problemas inerentes às avaliações de laboratório incluem: área limitada dos testes comparada com as de campo, variações na permeabilidade do concreto asfáltico, na densidade do ligante, diferença entre a permeabilidade de corpos de prova pequenos em comparação com as permeabilidades de campo em áreas grandes, e um melhor controle nas aplicações do ligante, comparado com o que é alcançado frequentemente em campo (WICKERT, 2003).

Ensaio de permeabilidade de FHWA (1984) em geotêxteis não tecidos típicos, com de taxa de ligante entre $0,9 \text{ l/m}^2$ e $1,4 \text{ l/m}^2$ mostraram que em 33 dos 36 ensaios, os pavimentos com o uso de geotêxtil impregnado com asfalto permitiram a passagem de menos fluxo de água que nos casos sem o uso de geotêxtil como camada intermediária

Em ensaios de Baker (1997), quando a taxa de ligante retido ficou entre $1,04$ e $1,09 \text{ l/m}^2$, o geotêxtil alcançou permeabilidades na ordem de 10^{-6} cm/s ou até menos, tornando o pavimento praticamente impermeável.

Neste sentido, é importante observar que os resultados apresentados nesta pesquisa com o uso da emulsão RR-1C podem indicar que o mecanismo de barreira de umidade proporcionado pelos geotêxteis à camada asfáltica do pavimento realmente acontece. Assim, através destes resultados, o fluxo de água na camada asfáltica do pavimento poderá ser estimado, visando à melhoria da estrutura do pavimento.

4.4 Discussões finais

Através dos ensaios de retenção de asfalto com emulsão RR1C, foi verificado que as taxas de aplicação recomendadas por muitos fabricantes são similares ao observado em alguns materiais estudados neste trabalho. Em geral, estes valores são menores do que o efetivamente aplicado em campo, o que pode ser extremamente positivo, visto que parte do ligante é absorvido pelas trincas do pavimento antigo na primeira pintura.

O significativo aumento da resistência e decréscimo da deformabilidade após a impregnação mostram que a rigidez inicial pode ser um dos mecanismos que governa o comportamento do sistema anti-reflexão de trincas (SPRAGUE et al., 1998). Contudo, a impregnação tende a aumentar os valores de resistência última e consequentemente, módulo de rigidez secante dos materiais, com destaque para níveis de deformação menores do que 0,03%.

No entanto, conhecendo a influência da rigidez inicial dos geotêxteis não tecidos com asfalto em sistemas anti-reflexão de trincas, a restauração de pavimentos pode ser devidamente projetada, com especificação dos materiais baseada nos mecanismos que fazem o sucesso da técnica. Em aplicações de campo, deve ser considerada a porção de emulsão asfáltica que efetivamente será retida no material, visto que há perda de emulsão dependendo das condições superficiais de deterioração do pavimento (KOERNER, 2005).

Em laboratório, os resultados dos ensaios com a emulsão catiônica de ruptura rápida evidenciaram uma possível taxa ótima para que se alcance os melhores incrementos no ganho de rigidez inicial para alguns geotêxteis não tecidos, e na maioria dos casos aqui apresentados, esta taxa correspondeu à obtida nos ensaios de retenção de asfalto.

Dentre os fabricantes de geotêxteis não tecidos no Brasil, notou-se que há uma diferença significativa de comportamento de deformabilidade e resistência à tração tanto do material virgem quanto do impregnado. Os resultados deste trabalho indicaram que o material de fibras curtas do fabricante B apresentou aumentos relativamente maiores de rigidez inicial e na ruptura do que o material fabricado pela indústria A. Outro aspecto relevante é a influência dos tipos de fibras utilizadas na confecção do tecido. O material de fibras longas apresentou-se mais suscetível a incrementos de resistência e rigidez que os de fibras curtas de mesma gramatura. Os resultados mostram também que o tipo de polímero não influencia na melhoria do comportamento do material após a impregnação.

Apesar das gramaturas utilizadas nesse trabalho serem relativamente próximas, a menor gramatura apresentou maiores incrementos de rigidez inicial com relação ao material virgem nos materiais de fibras longas de poliéster e fibras curtas de polipropileno.

Através dos resultados de permeabilidade normal, realizados por ensaios de transmissão de vapor d'água, pode se observar que a quantidade de emulsão asfáltica da ordem de 0,60 l/m² é suficiente para reduzir drasticamente a permeabilidade dos geotêxteis não tecidos. Desta forma, o objetivo de tornar este sistema numa barreira impermeável certamente será alcançado. Cabe salientar que os valores de permeabilidade dos materiais impregnados são bastante próximos ao dos materiais utilizados como barreira hidráulica, por exemplo, as geomembranas.

As variações apresentadas são apenas ilustrativas e não devem ser tomadas como base para qualquer tipo de decisão num projeto de reabilitação de pavimentos. Uma análise mais realista e apropriada deve ser realizada, levando-se em conta os tipos de materiais a serem utilizados, as taxas e o ligante asfáltico especificado. Neste sentido, pesquisas acerca deste tema estão em progresso para avaliar os mecanismos que levam ao sucesso da técnica de reforço de capa asfáltica baseada em sistemas anti-reflexão de trincas com geossintéticos.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou o comportamento de geotêxteis não tecidos usualmente aplicados como camada intermediária na restauração de pavimentos após a impregnação com a emulsão asfáltica RR-1C. O programa experimental permitiu a execução de ensaios para a determinação dos parâmetros de deformabilidade e resistência dos materiais impregnados, além da determinação de propriedades hidráulicas.

As principais conclusões que podem ser estabelecidas a partir dos resultados são:

- Os resultados dos ensaios de tração em geotêxteis não tecidos impregnados revelaram que a impregnação é um fator que potencializa o efeito da rigidez inicial como mecanismo anti-reflexão de trincas. Os valores de resistência última do material aumentaram significativamente para todos os geossintéticos após o contato com a emulsão asfáltica RR-1C, com destaque para o geotêxtil não tecido reforçado (PP-FV) que apresentou ainda expressiva diminuição da deformabilidade na ruptura;
- O estudo revelou incrementos do módulo de rigidez secante com a adição do ligante em todos os materiais para os níveis de deformações considerados, com destaque para deformações menores do que 0,03%. O significativo aumento da resistência e decréscimo da deformabilidade após a impregnação mostrou que a rigidez inicial pode ser um dos mecanismos responsáveis pelo excelente comportamento dos sistemas anti-reflexão de trincas;
- Os resultados evidenciaram uma possível taxa ótima de emulsão RR-1C para o máximo o alcance de incremento de rigidez inicial nos geotêxteis não tecidos analisados, e na maioria dos casos (73%), esta taxa correspondeu à obtida nos ensaios de retenção de asfalto. Em 39% dos materiais, este valor foi superior a 0,90

l/m² e inferior a 1,10 l/m². Para 55% dos geotêxteis, a taxa ótima revelou-se entre 1,10 l/m² e 1,15 l/m² de emulsão asfáltica.

- Diferença significativa de comportamento de deformabilidade e resistência à tração foi verificada tanto no material virgem quanto no impregnado entre os geotêxteis não tecidos de poliéster de fibras curtas dos fabricantes A e B. O material do fabricante B apresentou incrementos relativamente maiores de rigidez inicial e na ruptura após o contato com o ligante do que o material A;
- O tipo de fibra utilizado na fabricação dos tecidos apresentou influenciar nas propriedades de tração dos materiais após a impregnação, destacando os de fibras longas, sendo mais suscetível a incrementos de rigidez inicial do que os de fibras curtas de mesma gramatura. Não foi verificada influência do tipo de polímero na melhoria de comportamento do material após a impregnação;
- Observou-se através dos ensaios de transmissão de vapor d'água que a taxa mínima de aplicação residual (0,60 l/m²) de emulsão RR-1C é suficiente para reduzir drasticamente a permeabilidade normal dos geotêxteis não tecidos, em torno de 10⁻⁹ cm/s, com destaque para o geotêxtil não tecido reforçado que alcançou 10⁻¹¹ cm/s.
- Não foram verificadas variações significativas entre os valores de permeabilidade normal ao plano dos materiais de diferentes características, com tendência aos de menor gramatura serem um pouco mais permeáveis; e
- Em geral, os valores de permeabilidade foram muito próximos aos de materiais utilizados como barreira hidráulica. Ao reduzir a infiltração nas camadas subjacentes do pavimento, esta barreira de umidade pode melhorar o desempenho do pavimento quanto à propagação de trincas.

A relação custo-benefício de um sistema com geossintéticos pode ser aprimorada com o conhecimento das características e propriedades dos materiais a serem utilizados. Nota-se que o uso de reforço em camadas asfálticas é bastante promissor, e com o conhecimento da rigidez inicial destes produtos após o contato com ligante, pode-se projetar adequadamente a camada asfáltica do pavimento quanto à reflexão de trincas. Ademais, a aplicação de um sistema impermeável pode melhorar o desempenho global do pavimento.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Sugere-se para pesquisas futuras, a realização de ensaios para a determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade de geotêxteis não tecidos impregnados com ligante asfáltico, com diferentes frequências de aplicação de cargas cíclicas compatíveis com a realidade brasileira, variando-se também a taxa e o tipo de ligante.

Outro aspecto de grande importância a simulação de camadas asfálticas de pavimento em verdadeira grandeza, submetidas à ação de cargas de tráfego, com diferentes tipos de geotêxteis não tecidos como sistema anti-reflexão de trincas, taxas de imprimação e tipos de ligante. Desta forma, podem ser avaliadas as condições de aderência entre o material e as camadas, o tipo, velocidade e a intensidade de propagação das trincas, sendo possível também traçar o comportamento de uma obra de restauração com geossintéticos frente às solicitações impostas ao pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL QADI, I. L. Petromat evaluation in Kernersville, NC, Communication, **Virginia Polytechnic Institute with Amoco Fabrics and Fibers**, 1997.

_____. The proper use of geosynthetics in flexible pavements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, **7**, 2002 Nice. **Proceedings...** Nice: Swets & Zeitlinger, 2002, p. 913-916.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **ASTM D 4491**: Standard test methods for water permeability of geotextiles by permittivity, PA, USA, 2004, 6p.

_____. **ASTM D 4493**: Standard Terminology of Geosynthetics. ASTM International, West Conshohocken, USA, 2004, 4p.

_____. **ASTM D 6140**: Standard test method to determine asphalt retention of paving fabrics used in asphalt paving for full-width applications, PA, USA, 2005, 3p.

_____. **ASTM D 6936**: Standard test method for determining demulsibility of emulsified asphalt, PA, USA, 2009, 2p.

_____. **ASTM D 6933**: Standard test method for oversized particles in emulsified asphalts (sieve test), PA, USA, 2008, 2p.

_____. **ASTM D 6997**: Standard test method for distillation of emulsified asphalt, PA, USA, 2004, 3p.

_____. **ASTM D 7402**: Standard practice for identifying cationic emulsified asphalts. PA, USA, 2009, 3p.

_____. **ASTM D 7496**: Standard test method for viscosity of emulsified asphalt by Saybolt Furol viscometer, PA, USA, 2009, 3p.

_____. **ASTM E 96M**: Standard test methods for water vapor transmission of materials, PA, USA, 2005, 11p.

- AUSTIN, R. A.; GILCHRIST, A. J. T. Enhance performance of asphalt pavements using geocomposites. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 14, p. 175-186, 1996.
- ASHMAWAY, A. K.; BOURDEAU, P. L. Response of a woven and a nonwoven geotextile to monotonic and cyclic simple tension. **Geosynthetics Internacional**, No 4, p. 493-515, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas**. Editora: ABEDA, Rio de Janeiro, 2001, 136p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6568**: Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo de destilação, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 6570**: Emulsões asfálticas - Determinação da sedimentação, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 6568**: Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo de destilação, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 12553**: Amostragem e Preparação de corpos de prova de Geotêxteis. Rio de Janeiro, 2003, 3p.
- _____. **NBR 12568**: Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área. Rio de Janeiro, 2003, 3p.
- _____. **NBR 12569**: Geotêxteis - Determinação da espessura. Rio de Janeiro, 2003, 2p.
- _____. **NBR 12593**: Geotêxteis - Amostragem e preparação dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 1992, 5p.
- _____. **NBR 12824**: Geotêxteis - Determinação da tração não-confinada – Ensaio de Tração de Faixa Larga. Rio de Janeiro, 1993, 5p.
- _____. **NBR 14594**: Emulsões asfálticas catiônicas – Especificação, Rio de Janeiro, 2000.

- BARNHART V.T. Field evaluation of experimental fabrics to prevent reflective cracking in bituminous resurfacing. Report No. R-1300. **Materials & Technology Division**, Michigan Transportation Commission, Lansing, Michigan, July, 1989.
- BARKSDALE, R. D.; BROWN, S. F.; CHAN, F. Potential benefits of geosynthetics in flexible pavements. Report No. NCHRP-315, **Transportation Research Board**, Washington, D.C., 1989, p. 32-33.
- BAKER, T.L. Results of melt through asphalt absorption and permeability tests, **Amoco Fabrics and Fibers Co.**, 1997.
- BENEDETTI, D.; GONÇALVES F. P. Avaliação do desempenho de pavimentos rodoviários restaurados com geotêxtil. In CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E tecnológica – CRICTE, 18, Passo Fundo, 2003. **Anais...** Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2003, 5p.
- BIDIM. **Uso do Bidim como elemento retardador de trincas na restauração da Rodovia dos Imigrantes em São Paulo**, 2005. Disponível em: <[http://www.bidim.com.br/Mod_03/AplicacaoA.asp? CodAplic=6&Aplicacao=Geotêxteis e Geossintéticos](http://www.bidim.com.br/Mod_03/AplicacaoA.asp?CodAplic=6&Aplicacao=Geotêxteis%20e%20Geossintéticos)>, Acesso em: 18 Jul. 2009.
- BONDT, A. Effect of reinforcement properties. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT - RILEM, 4, 2000, Ottawa. **Proceedings...** Londres: RILEM Publications S. A. R. L., 2000, p. 13-22.
- BÜHLER, A. V. **Estudo do efeito da grelha metálica de reforço em revestimentos asfálticos**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.
- BUTTLAR, W. G.; BOZKURT, D.; DEMPSEY, B. J. Cost-effectiveness of paving fabrics used to control reflective cracking. Report No. 00-1327, **Transportation Research Record**, Washington, DC, 1999, p. 139-149.
- BUTTON, J. W. Overlay construction and performance using fabrics. In: 68th ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **Proceedings...** Washington, DC, 1989.
- BUTTON J. W.; LYTTON R. L. Guidelines for using geosynthetics with hot-mix asphalt overlays to reduce reflective cracking.: **Journal of the Transportation Research Board**, Washington, D.C, No. 2004, **Transportation Research Record**, p. 111–119, 2007.

- BUTTON, J. W.; EPPS, J. A.; LYTTON, R. L. Fabric interlayer for pavements overlays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, 2, 1982, Las Vegas. **Proceedings...** Las Vegas, 1982, p. 523-528.
- CARMO, C. A. T.; ARAKAWA, N. T.; VERTEMATTI, J. C.; ARAMAQUI R. T.; MARONI, L. G. Análise do efeito de geotêxteis no recapeamento da rodovia SP-320 (Rodovia Euclides da Cunha). In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSSINTÉTICOS, 1, 1999. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1999, v. 1, p. 345-352.
- CERATTI, J. A. P.; RODRIGUES R. M. **Aplicações na restauração de pavimentos.** In: VERTEMATTI, J. C. MANUAL BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, p 295-320, 2004.
- COLOMBIER, G. Fissuration des chaussées: nature et origine des fissures; moyens pour maîtriser leur remontée. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 1, 1989 Liege. **Proceedings...** Liege: E & FN Spon, 1989, p. 3-22.
- DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado.** 2006. 128f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-PRO 380/98:** Utilização de geossintéticos em obras rodoviárias. Rio de Janeiro, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT IPR-720:** Manual de restauração de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 2006, 314p.
- DYKES, J. W. The Use of fabric interlayers to retard reflective cracking. In: Asphalt Paving Technology, Louisville, 1980. **Proceedings...** Kentucky, 1980, p. 354-368.
- FERREIRA, G. L. M. Geotêxteis e suas aplicações. A indústria têxtil nos caminhos da inovação. In: SEMINÁRIO UBITEX, 2001, Covilhã. **Proceedings...** Covilhã, 2001, p.10- 20.
- FHWA. **Experimental overlay to minimize reflection cracking.** Report No. FHWA-CA-TL-3167-76-28, California, Texas, 1976.

- _____. **Geosynthetic design and construction guidelines**. Report No. FHWA HI-95-038, NHI Course No. 13213. National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Abril, 1998.
- _____. **Geosynthetics in flexible and rigid pavements overlay systems to reduce reflection cracking**. Report No. FHWA-TX-02-1777, Texas, 2002, p 1-297.
- _____. **Laboratory Investigation of Fabric Interlayers for Asphalt Concrete Paving**. Report No. FHWA-CA-TL-84-06, California, 1984.
- _____. **Potential applications of paving fabrics to reduce reflective cracking**. Report No. FHWA-MS-DOT-RD-05-174, Mississippi, 2005, 45p.
- GUERRA ESCOBAR, M. P. Technology of repaving the freeway to Santa Ana using nonwoven paving geotextile (El Salvador, Central America). In: PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION, 1, 2008, México. **Proceedings...** México, 2008, p. 1045-1053.
- GRZYBOWSKA, W.; WOJTOWICZ, J. Geotextile anti-cracking interlayers used for pavement renovation on Southern Poland, design and performance of overlay systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 3, 1996, Maastricht, **Proceedings...** London: E & FN Spon, 1996, p. 412–421.
- GILCHRIST, A. J. T.; PAUL, P. Asphalt Reinforcement: 10 Years of Experience and Development. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES, AND RELATED PRODUCTS, 5, 1994. Southeast Asia Chapter of the International Geotextiles Society. **Proceeding...** Singapore: IGS, 1994, p. 91–94.
- GONÇALVES, F. J. P.; CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B. Study of permanent deformations in asphalt concrete layers in Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERFORMANCE TESTING AND EVALUATION OF BITUMINOUS MATERIALS – RILEM, 4, 2002, Zurich, **Proceeding...** Zurich: RILEM Publication S. A. R. L., 2002.
- HAAS, R.; PONNIAH, J. E. Design oriented evaluation of alternatives for reflection cracking through pavement overlays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 1, 1989, Liege. **Proceedings...** Liege: E & FN Spon, 1989, p 23-46.

- HASIN, M. S.; MUSTAFA M. S. Use of geosynthetics in pavement rehabilitation: field experience in Malaysia. In.: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES, AND RELATED PRODUCTS, 5, 1994. Southeast Asia Chapter of the International Geotextiles Society. **Proceedings...** Singapore: IGS, 1994, p. 67–70.
- HENSLEY, M. J. Open-graded asphalt concrete base for the control of reflective cracking. In: AAPT SYMPOSIUM, 1980, Arkansas, **Proceedings...** Arkansas, 1980, p. 68-378.
- INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE MATERIAIS ASFÁLTICOS. In: **Instituto Brasileiro de Petróleo, IBP**. Rio de Janeiro, 1999. 75p.
- IRWIN, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate. **Journal of Applied Mechanics**, v. 24, p. 361-164, 1957.
- JAYAWICKRAMA, P. W.; LYTTON, R. L. Methodology for predicting asphalt concrete overlay life against reflective cracking. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, 6, 1987. **Proceedings...** v. 1, p. 912-924, 1987.
- KHODAIL, A.; FALLAH, S.; NEJAD, F. M. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, p. 1-8, 2009.
- KLEIN, R. J.; WICKERT, F.; VIDAL, D. de M. Estudo do comportamento de diferentes ligantes asfálticos utilizados na impregnação de geotêxteis em obras de restauração de pavimentos flexíveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 4, 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Editora Palotti, 2003, 8p.
- KOERNER, R. M. Reflective crack prevention in bituminous pavement overlays. In: **Design with geosynthetics**. Prentice Hall 5ª Ed., New Jersey, EUA, 2005, p 273-285.
- LADNER, S. Reflective crack control in asphalt overlays by geotextile membrane – A Contractor’s View. **International Journal of Construction Maintenance & Repair**. Palladian Publications Ltd., Berkshire, United Kingdom, 1990.
- LYTTON, R. L. Use of Geotextiles for Reinforcement and Strain Relief in Asphalt Concrete. **Geotextiles and Geomembranes**, Texas, v. 8, p. 217-237, 1989.

- MARIENFELD, M. L.; BARKER, T. L. Paving fabric interlayer as a pavement moisture barrier. Number E-C006, Transportation Research Circular: **Journal of the Transportation Research Board**, Washington, DC, 1999, p. 1-13.
- MAURER, D. A.; MALASHESKIE G. J. Field performance of fabrics to retard reflective cracking. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 8, p. 239-267, PA, USA, 1989.
- MOLENAAR, A. A. A. Evaluation of pavement structure with emphasis on reflective cracking. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 2, 1993, London. **Proceedings...** London: Ed J.M. Rigo and R. Degeimbre, London, 1993, p. 21-48.
- MONISMITH, C. L.; COETZEE, N. F. Reflection cracking: Analyses, laboratory studies, and design considerations. In: Asphalt Paving Technology, Louisville, 1980. **Proceedings...** Louisville, p. 268-313.
- MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: Critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- OROWAN, E. Energy criteria of fracture. **Weld J. Res. Suppl.** 20, 1955.
- PALMA, S. L.; VIERA, C. S.; CERATTI, J. A.; NÚÑEZ, W. P. Aplicação de geotêxteis em restauração de pavimentos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS E CONTROLE TECNOLÓGICO, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2000.
- PANDEY, S. N.; MAJUMDAR, A. K. Jute fibre for production of non-woven geotextiles to prevent reflective cracking in pavements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 2, 1993, Londres. **Proceedings...** Londres: Ed J.M. Rigo and R. Degeimbre, 1993, p. 334-342.
- PEREIRA, A. S. **Utilização de geotêxteis em reforço de pavimento aplicado em um trecho experimental**. 2002. 195 f. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- PERKINS, S. W. Constitutive modeling of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, p. 273-292, 2000.

- PHILLIPS, P. Long term performance of geotextile reinforced seals to control shrinkage on stabilized and unstable clay bases. INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 2, 1993, Londres. **Proceedings...** Londres: Ed J.M. Rigo e R. Degeimbre, 1993, p. 406-412.
- PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- PRIETO, J. N.; GALLEGO J.; PÉREZ, I. Application of the wheel reflective cracking test for assessing geosynthetics in anti-reflection pavement cracking systems. **Geosynthetics International**, v. 14, p 287-297, 2007.
- RIGO, J. M. Laboratory testing and design method for reflective cracking in pavement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 1, 1989, Liege. **Proceedings...** Liege: E & FN Spon, 1989, p. 75-88.
- RODRIGUES, R. M. **Estudo do trincamento dos pavimentos.** 1991. 175 f. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.
- _____. Geossintéticos aplicados a pavimentação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 4, 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2003, p. 9-37.
- RODRIGUES R. M; VILCHEZ, G. E. M. Geossintéticos em Pavimentação Rodoviária. In: CURSO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA E MEIO AMBIENTE, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IGS Brasil, 1998, p. I-1-36.
- ROSCHEN, T. J. a case study into the use of pavement reinforcing grid, mastic, and membrane interlayers on asphalt concrete overlays. In: GEOSYNTHETICS 97, 1997, Long Beach. **Proceedings...** Long Beach, Califórnia, 1997, p. 725–748.
- SPRAGUE, C. J.; ALLEN, S.; TRIBBETT, W. Tensile properties of asphalt overlay geosynthetics Reinforcement, **Transportation Research Record**, 1998, No. 98-0519, p. 65-69.
- SPRAGUE, C. J.; CARVER, C. A. Asphalt overlay reinforcement. **Geotechnical Fabrics Report**, 2000, p. 30-33.

- STEEN, E. R. Road Maintenance: Technical aspects regarding the choice of geosynthetics, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 4, 2000, Ottawa. **Proceedings...** London: RILEM Publications S. A. R. L. 2000, p. 507-516.
- SUTHERLAND, M., PHILLIPS, P. Geotextile reinforced sprayed seal roads in rural Australia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4, 1990, The Hague. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1990, v. 1, p. 209-212.
- VAN WIJK, W.; VICELJA, J. L. Asphalt Overlay Fabrics, A Life Time Extension of New Asphalt Overlays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFLECTIVE CRACKING IN PAVEMENT – RILEM, 1, 1989, Liege. **Proceedings...**Liege: E & FN Spon, 1989.
- VILCHEZ, G. E. M. **Estudo de sistemas anti-reflexão de trincas na restauração de pavimentos asfálticos.** 1996. 158f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.
- _____. **Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti- reflexão de trincas.** 2002. 118 f. Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.
- VILCHEZ, G. E. M.; SILVA, A. E. F. Principais efeitos da incorporação de geogrelhas no concreto asfáltico. In: Seminário Nacional de modernas técnicas rodoviárias, 2, Florianópolis, 2000. **Anais...** Florianópolis, 2000.
- WICKERT, F.; BUHLER, A. V.; RODRIGUES, R. M. Análise de insucessos na aplicação de geotêxtil como camada anti-reflexão de trincas na restauração de pavimentos flexíveis. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 2003. **Anais...** Porto Alegre, 2003.
- WICKERT, F. **Fatores de influência no comportamento de camadas anti-reflexão de trincas com geossintéticos.** 2003. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)