



Bárbara Viapiana de Carvalho

**Avaliação do Comportamento Resiliente de solo
Argiloso com Inserção de Politereftalato de Etileno
(PET) para Aplicação em Base de Pavimentos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Raquel Quadros Velloso
Co-orientadores: Prof^a. Michéle Dal Tóe Casagrande
Prof. Márcio Muniz de Farias

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2019



Bárbara Viapiana de Carvalho

**Avaliação do Comportamento Resiliente de solo
Argiloso com Inserção de Politereftalato de Etileno
(PET) para Aplicação em Base de Pavimentos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada
pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/PUC-Rio

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Co-Orientadora

Departamento de Engenharia Civil/UnB

Prof. Márcio Muniz de Farias

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil/UnB

Prof. Vitor Nascimento Aguiar

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/PUC-Rio

Prof^a. Sandra Oda

Departamento de Engenharia de Transportes Poli/UFRJ

Rio de Janeiro, 22 de fevereiro de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Bárbara Viapiana de Carvalho

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Sergipe em 2016. Ingressou no mestrado em Geotecnia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2017, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia experimental aplicada a pavimentos.

Ficha Catalográfica

Carvalho, Bárbara Viapiana de

Avaliação do comportamento resiliente de solo argiloso com inserção de politereftalato de etileno (PET) para aplicação em base de pavimentos / Bárbara Viapiana de Carvalho ; orientadora: Raquel Quadros Velloso ; co-orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2019.

144 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Base de pavimentos. 3. Politereftalato de etileno (PET). 4. Módulo de resiliência. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Casagrande, Michéle Dal Toé. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD:624

Dedico este trabalho
À minha querida família, Marisa, Raimundo e Verônica
À minha professora, Michéle,
E ao meu namorado, Miguel.

Agradecimentos

À Deus, por me permitir chegar até aqui.

Ao meu pai e minha mãe, por todo esforço, apoio, incentivo, acalento e amor dedicados nesta etapa da minha vida. A “presença” de vocês foi fundamental para início e conclusão deste trabalho. À vocês minha eterna gratidão.

À minha irmã, por me representar como filha ao longo destes dois anos longe de casa. E também por ser amiga, me proporcionando momentos de descontração e alegria.

Ao meu namorado, por me acompanhar nesta árdua jornada, dividindo os momentos de stress e desespero e também os de conquista e felicidade. Sua companhia e apoio tornaram melhor essa fase da vida.

À minha co-orientadora/orientadora Michéle, que me ensinou e me guiou não somente no desenvolvimento da pesquisa, mas durante todo o mestrado. Obrigada por ser tão acessível, tão amiga, e tão preocupada comigo dentro e fora da vida acadêmica.

Aos responsáveis, técnicos e usuários do laboratório de Geotecnia da UnB e do INFRALAB, pela disponibilidade de uso de suas instalações e pelo auxílio prestado, tornando possível e tranquila a realização experimental da pesquisa.

Aos colegas e profissionais do departamento de pós-graduação em Geotecnia da UnB, pelo bom acolhimento e pelo conhecimento compartilhado.

Aos meus amigos e amigas que torcem sempre pelo meu sucesso.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Carvalho, Bárbara Viapiana; Velloso, Raquel Quadros (Orientadora); Casagrande, Michéle Dal Toé (Co-orientadora); Farias, Márcio Muniz de (Co-orientador). **Avaliação do Comportamento Resiliente de solo Argiloso com Inserção de Politereftalato de Etileno (PET) para Aplicação em Base de Pavimentos.** Rio de Janeiro, 2019. 144p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A geração e consumo crescente de embalagens PET representa um grande problema ambiental, pois o resíduo destes produtos acaba sendo descartado inadequadamente na natureza ou sendo simplesmente disposto nos aterros. Com o objetivo de atenuar este problema pesquisas foram desenvolvidas nos últimos anos buscando oferecer um destino mais nobre para o resíduo de PET, especialmente para as garrafas PET. Neste contexto, a presente pesquisa propõe o uso do resíduo de garrafas PET, sob a forma de pó, triturado e fibras, como material alternativo para camadas de base em pavimentos. Misturas de Solo-PET, utilizando um solo argiloso com inserção de pó de PET nas porcentagens de 10, 20 e 30 %, inserção de PET triturado nas porcentagens de 3, 5 e 7 %, e inserção de fibras de PET nas porcentagens de 0,25 e 0,50 %, foram avaliadas geotecnicaamente por meio de ensaios de caracterização física, ensaios de compactação e ensaios de módulo de resiliência. Os ensaios mecânicos foram realizados nas amostras recém-compactadas e em corpos de prova aquecidos, avaliando ainda a influência do aquecimento no módulo de resiliência. Também foi utilizado o programa computacional SisPav para simular o dimensionamento de um pavimento típico composto pelos materiais estudados. Os resultados obtidos apontam que a inserção de PET nas misturas tem influência sobre o comportamento mecânico do solo, sendo constatado que menores teores possibilitam maiores valores de módulo resiliência. Ainda, a mistura com 10% de pó de PET foi considerada mais eficiente. Conclui-se que a utilização de um solo argiloso adicionado com PET como material alternativo em base de pavimentos é tecnicamente viável e representa uma boa solução para a destinação deste resíduo bem como para a mitigação de seu potencial agressivo ao meio ambiente.

Palavras-chave

Base de pavimentos; politereftalato de etileno (PET); módulo de resiliência.

Abstract

Carvalho, Bárbara Viapiana; Velloso, Raquel Quadros (Advisor); Casagrande, Michéle Dal Toé (Co-advisor); Farias, Márcio Muniz de (Co-advisor). **Evaluation of resilient behavior of a clayey soil with polyethylene terephthalate (PET) insertion for application in pavement bases**. Rio de Janeiro, 2019. 144p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The growing production and consumption of PET packaging represents a major environmental problem because they end up being improperly discarded in nature or simply disposed in landfills. With the aim to attenuate the environmental problem researchers were developed in the last years, in order to offer a nobler destination for this waste, especially for PET bottles. In this context, this research proposes the use of PET bottles waste, in form of powder, crushed and fibers as an alternative material for pavements base. Soil-PET mixtures, using a clayey soil with the addition of PET powder in percentages of 10, 20 and 30 %, addition of crushed PET in percentages of 3, 5 and 7 % and addition of PET fiber in percentages of 0,25 and 0,5 %, were geotechnically evaluated by physical characterization tests, compaction tests and Resilient Modulus tests. The mechanical tests were performed on freshly compacted samples and also on heated specimens, evaluating the influence of heating in the resilient modulus. The computer program SisPav was also used to simulate the mechanistic empirical design for a typical pavement structure composed of the researched material. The results indicate that the insertion of PET influences the mechanical behavior of the soil, and it was verified that lower contents of PET allows higher values of resilient modulus. It can be concluded that the use of a clayey soil added with PET, as an alternative material in pavements base, is technically feasible and represents a good solution for the destination of this waste as well as for the mitigation of its aggressive potential to the environment.

Keywords

Pavements base; polyethylene terephthalate (PET); resilient modulus.

Sumário

1 Introdução	22
1.1. Relevância da Pesquisa	23
1.2. Objetivos	24
1.3. Organização do trabalho	25
2 Revisão da literatura	26
2.1. Pavimentos rodoviários	26
2.1.1. Definição e classificação	26
2.1.2. Solos tropicais na pavimentação	27
2.2. Propriedades mecânicas dos pavimentos	28
2.2.1. Índice de suporte Califórnia	28
2.2.2. Módulo de Resiliência	29
2.3. Resíduos sólidos	31
2.4. Politereftato de etileno (PET)	32
2.4.1. Definição, histórico e classificação	32
2.4.2. Resíduo e reciclagem do PET	33
2.5. Utilização de resíduos em base e/ou sub-bases de pavimentos	35
2.6. Uso de resíduo de PET na geotecnia	38
2.7. Efeito do aquecimento em misturas	42
3 Programa experimental	44
3.1. Considerações iniciais	44
3.2. Materiais	44
3.2.1. Solo argiloso	44
3.2.2. Resíduo de politereftalato de etileno (PET)	46
3.3. Metodologia	49
3.4. Classificação Miniatura Compactado Tropical (MCT)	51
3.4.1. Ensaio Mini-MCV	52
3.4.2. Ensaio de perda de massa por imersão	53
3.5. Ensaios de caracterização física	55

3.5.1. Densidade relativa dos grãos	55
3.5.2. Limites de Atterberg	56
3.5.3. Análise granulométrica	56
3.5.4. Compactação em equipamento miniatura	57
3.6. Ensaio de caracterização mecânica	58
3.6.1. Ensaio de módulo de resiliência	58
3.7. Dimensionamento do pavimento típico	60
3.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	63
4 Resultados e Análises	65
4.1. Considerações iniciais	65
4.2. Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)	65
4.3. Ensaio de caracterização física	66
4.3.1. Densidade Relativa dos Grãos	66
4.3.2. Limites de Atterberg	68
4.3.3. Análise granulométrica	69
4.3.4. Compactação em equipamento miniatura	70
4.3.4.1. Compactação em equipamento miniatura no solo puro	70
4.3.4.2. Compactação em equipamento miniatura nas misturas com pó de PET	71
4.3.4.3. Compactação em equipamento miniatura nas misturas com PET triturado	72
4.3.4.4. Compactação em equipamento miniatura nas misturas com fibra de PET	73
4.4. Ensaio de caracterização mecânica	75
4.4.1. Módulo de resiliência do solo puro	75
4.4.2. Módulo de resiliência das misturas com pó de PET	77
4.4.3. Módulo de resiliência das misturas com PET triturado	81
4.4.4. Módulo de resiliência das misturas com fibra de PET	85
4.4.5. Módulo de resiliência do solo puro aquecido à 110 °C	93
4.4.6. Módulo de resiliência das misturas com pó de PET aquecidas à 110 °C	96
4.4.7. Módulo de resiliência das misturas com PET triturado	

aquecidas à 110 °C	100
4.4.8. Módulo de resiliência das misturas com fibra de PET	
aquecidas à 110 °C	104
4.5. Dimensionamento do Pavimento típico	112
4.5.1. Dimensionamento da base com as misturas com pó de PET	112
4.5.2. Dimensionamento da base com as misturas com PET triturado	113
4.5.3. Dimensionamento da base com as misturas com fibra de PET	114
4.5.4. Dimensionamento da base com as misturas com pó de PET	
aquecidas à 110 °C	118
4.5.5. Dimensionamento da base com as misturas com PET triturado	
aquecidas à 110 ° C	119
4.5.6. Dimensionamento da base com as misturas com fibra de PET	
aquecidas à 110 °C	120
4.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	123
5 Conclusões e sugestões	127
5.1. Conclusões	127
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	129
6 Referências Bibliográficas	131
Anexos	137

Lista de figuras

Figura 2.1 Estrutura típica de um pavimento.	26
Figura 2.2 Deformação permanente e deformação resiliente sofrida por um pavimento (Bernucci <i>et al.</i> , 2008).	29
Figura 2.3 Evolução da Reciclagem do PET no Brasil (Adaptado de ABIJET, 2013).	34
Figura 2.4 Aplicação do PET reciclado (ABIJET, 2016).	35
Figura 3.1 Solo do Campo Experimental da UnB.	45
Figura 3.2 Localização do Campo Experimental da UnB (Google Earth, 2018).	45
Figura 3.3 Pó de politereftalato de etileno.	46
Figura 3.4 Politereftalato de etileno triturado.	47
Figura 3.5 Equipamento triturador da marca Radial LaFrance (Louzada, 2015).	48
Figura 3.6 Fibras de politereftalato de etileno de 1.4 Dtex e 3.3 Dtex.	48
Figura 3.7 Esquema do aparelho de compactação da metodologia MCT. (Nogami e Villibor, 1995).	52
Figura 3.8 Curvas de deformabilidade do ensaio Mini-MCV (Nogami e Villibor, 1995).	52
Figura 3.9 Curvas de compactação do ensaio Mini-MCV (Nogami e Villibor, 1995)	53
Figura 3.10 (a) Corpos de prova extraídos parcialmente. (b) Corpos de prova submersos.	54
Figura 3.11 Gráfico classificatório da metodologia MCT.	54
Figura 3.12 Equipamento Pentapycnometro modelo PENTAPYC 5200e.	55
Figura 3.13 Equipamento triaxial cíclico da marca ELE International Limited England.	58
Figura 3.14 Fluxograma do método de análise e dimensionamento adotado pelo SisPav (Franco, 2007).	61
Figura 3.15 Estrutura do Pavimento adotada (Vizcarra, 2010).	61

Figura 3.16 Exemplo de estrutura do pavimento introduzida no SisPav.	62
Figura 3.17 Configuração do tráfego introduzida no SisPav.	62
Figura 3.18 (a) Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura . (b) Amostras no equipamento MEV.	64
Figura 4.1 Gráfico da classificação MCT para o solo puro.	65
Figura 4.2 (a) Variação da densidade relativa dos grãos nas misturas com pó de PET (b) Variação da densidade relativa dos grãos nas misturas PET triturado.	67
Figura 4.3 (a) Variação do limite de liquidez e limite de plasticidade em função do teor de pó de PET, (b) Variação do índice de plasticidade em função do teor de pó de PET.	68
Figura 4.4 Curva granulométrica do solo puro.	69
Figura 4.5 Curva granulométrica do PET triturado e do Pó de PET.	70
Figura 4.6 Curva de compactação do solo puro.	71
Figura 4.7 Curvas de compactação das misturas com pó PET.	72
Figura 4.8 Curvas de compactação das misturas com PET triturado.	73
Figura 4.9 Curvas de compactação das misturas com fibra de PET 1.4 Dtex.	74
Figura 4.10 Curvas de compactação das misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.	74
Figura 4.11 Relação do módulo de resiliência do solo puro com a tensão desvio.	76
Figura 4.12 Relação do módulo de resiliência do solo puro com a tensão confinante.	76
Figura 4.13 Gráfico 3D do modelo composto para o solo puro.	77
Figura 4.14 Relação do módulo de resiliência das misturas com pó de PET com a tensão desvio.	78
Figura 4.15 Relação do módulo de resiliência das misturas com pó de PET com a tensão confinante.	79
Figura 4.16 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S90P10.	80
Figura 4.17 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S80P20.	80
Figura 4.18 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S70P30.	81
Figura 4.19 Relação do módulo de resiliência das misturas com PET	

triturado com a tensão desvio.	82
Figura 4.20 Relação do módulo de resiliência das misturas com PET triturado com a tensão confinante.	83
Figura 4.21 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S97T03.	84
Figura 4.22 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S95T05.	84
Figura 4.23 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S93T07.	85
Figura 4.24 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 1.4 Dtex de comprimento 38 mm com a tensão desvio.	86
Figura 4.25 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 1.4 Dtex de comprimento 38 mm com a tensão confinante.	87
Figura 4.26 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura com 0,25%Fi1.4Dtex.	88
Figura 4.27 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura com 0,50%Fi1.4 Dtex.	88
Figura 4.28 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 3.3 Dtex de comprimento 56 mm com a tensão desvio.	89
Figura 4.29 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 3.3 Dtex de comprimento 56 mm com a tensão confinante.	90
Figura 4.30 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,25%Fi3.3Dtex.	91
Figura 4.31 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,50%Fi3.3 Dtex.	91
Figura 4.32 Relação do módulo de resiliência das misturas com 0,25% de fibra 1.4 e 3.3 Dtex com a tensão desvio.	92
Figura 4.33 Relação do módulo de resiliência das misturas com 0,25% de fibra 1.4 e 3.3 Dtex com a tensão confinante.	93
Figura 4.34 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio do solo puro aquecido.	94
Figura 4.35 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante do solo puro aquecido.	95
Figura 4.36 Gráfico 3D do modelo composto para o solo puro aquecido 3 horas à 110 °C.	96
Figura 4.37 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio	

das misturas com pó de PET aquecidas.	97
Figura 4.38 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com pó de PET aquecidas.	98
Figura 4.39 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S90P10 aquecida por 3h à 110 °C.	99
Figura 4.40 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S80P20 aquecida por 3h à 110 °C.	99
Figura 4.41 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S70P30 aquecida por 3h à 110 °C.	100
Figura 4.42 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com PET triturado aquecidas.	101
Figura 4.43 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com PET triturado aquecidas.	102
Figura 4.44 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S97T03 aquecida por 1h à 110 °C.	103
Figura 4.45 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S95T05 aquecida por 1h à 110° C.	104
Figura 4.46 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S93T07 aquecida por 1h à 110 °C.	104
Figura 4.47 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com fibra 1.4 Dtex aquecidas.	106
Figura 4.48 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com fibra 1.4 Dtex aquecidas.	106
Figura 4.49 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,25% Fi1.4 Dtex aquecida por 3h à 110 ° C.	107
Figura 4.50 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,50% Fi1.4 Dtex aquecida por 1h à 110 °C.	108
Figura 4.51 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com fibra 3.3 Dtex aquecidas.	109
Figura 4.52 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com fibra 3.3 Dtex aquecidas.	110
Figura 4.53 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,25% Fi3.3Dtex aquecida por 1h à 110 ° C.	111

Figura 4.54 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,50% Fi3.3Dtex aquecida por 1h à 110 ° C.	111
Figura 4.55 Variação da espessura da base em função do teor de pó de PET e da vida útil do pavimento.	112
Figura 4.56 Variação da espessura da base em função do teor de PET triturado e da vida útil do pavimento.	113
Figura 4.57 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 1.4 Dtex e da vida útil do pavimento.	115
Figura 4.58 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 3.3 Dtex e vida útil do pavimento.	115
Figura 4.59 Variação da espessura da base em função do teor de pó de PET e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.	118
Figura 4.60 Variação da espessura da base em função do teor de PET triturado e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.	119
Figura 4.61 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 1.4 Dtex e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.	120
Figura 4.62 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 3.3 Dtex e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.	121
Figura 4.63 MEV do solo puro com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).	123
Figura 4.64 MEV da mistura S90P10 com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).	123
Figura 4.65 MEV da mistura S97T03 com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).	124
Figura 4.66 MEV da mistura S90P10 aquecida por 3 horas com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).	124
Figura 4.67 Espectro EDS da amostra de solo Puro.	125
Figura 4.68 Espectro EDS da amostra da mistura S90P10.	125
Figura 4.69 Espectro EDS da amostra da mistura S97T03.	126
A.1 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das	

misturas com pó de PET aquecidas por 1 hora.	137
A.2 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com pó de PET aquecidas por 3 horas.	137
A.3 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com pó de PET aquecidas por 1 hora.	138
A.4 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com pó de PET aquecidas por 3 horas.	138
A.5 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com PET triturado aquecidas por 1 hora.	139
A.6 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com PET triturado aquecidas por 3 horas.	139
A.7 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com PET triturado aquecidas por 1 hora.	140
A.8 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com PET triturado aquecidas por 3 horas.	140
A.9 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 1 hora.	141
A.10 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 3 horas.	141
A.11 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 1 hora.	142
A.12 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 3 horas.	142
A.13 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 1 hora.	143
A.14 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 3 horas.	143
A.15 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 1 hora.	144
A.16 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 3 horas.	144

Lista de tabelas

Tabela 3.1 Composição química em termos de elementos químicos do Pó de PET (Louzada 2015).	47
Tabela 3.2 Índices Físicos do Pó de PET (Louzada, 2015).	47
Tabela 3.3 Propriedades físicas e mecânicas das Fibras Alya Eco.	49
Tabela 3.4 Nomenclaturas adotadas para cada material.	50
Tabela 3.5 Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência (AASHTO T 307/99).	59
Tabela 3.6 Valor de N em função da vida útil para o tráfego considerado.	62
Tabela 4.1 Densidade relativa dos grãos.	66
Tabela 4.2 Densidade relativa dos grãos das misturas com PET.	67
Tabela 4.3 Resultados dos limites de Atterberg para o solo puro e para as misturas com pó de PET.	68
Tabela 4.4 Resultados da compactação para as misturas com pó de PET.	71
Tabela 4.5 Resultados da compactação para as misturas com PET triturado.	72
Tabela 4.6 Resultados da compactação para as misturas com fibra de PET.	73
Tabela 4.7 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 para o solo puro.	75
Tabela 4.8 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para o solo puro.	77
Tabela 4.9 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET.	78
Tabela 4.10 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET.	80
Tabela 4.11 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET	

triturado.	82
Tabela 4.12 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET triturado.	84
Tabela 4.13 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex.	86
Tabela 4.14 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex.	87
Tabela 4.15 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.	89
Tabela 4.16 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.	91
Tabela 4.17 Faixa de valores do M_R do solo puro aquecido a 110 ° C.	93
Tabela 4.18 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para o solo puro aquecido à 110 °C.	94
Tabela 4.19 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para o solo puro aquecido à 110 °C.	95
Tabela 4.20 Faixa de valores de M_R das misturas com pó de PET aquecidas a 110 °C..	96
Tabela 4.21 Valores dos constantes de regessão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET aquecidas à 110 °C.	97
Tabela 4.22 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET aquecidas à 110 ° C.	99
Tabela 4.23 Faixa de valores de M_R das misturas com PET triturado aquecidas a 110 °C.	100

Tabela 4.24 Valores das constantes de regressão para os modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET triturado aquecidas à 110 °C.	101
Tabela 4.25 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET triturado aquecidas à 110 °C.	103
Tabela 4.26 Faixa de valores de M_R das misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas à 110 °C.	105
Tabela 4.27 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas à 110 °C.	105
Tabela 4.28 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas à 110 °C.	107
Tabela 4.29 Faixa de valores de M_R das misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas à 110 °C..	108
Tabela 4.30 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas à 110 °C.	109
Tabela 4.31 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas à 110 °C..	111
Tabela 4.32 Espessura em cm de camada de base para o solo puro e as misturas solo-PET.	117
Tabela 4.33 Espessura em cm de camada de base para o solo puro aquecido e para as misturas solo-PET aquecidas à 110 °C.	122

Lista de Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento de Infraestrutura de Transportes
EDS	Sistema de Energia Dispersiva
EDX	Espectometria de Raios-X por Dispersão em Energia
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compactado Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
M _R	Módulo de Resiliência
PET	Politereftalato de Etileno
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Lista de Símbolos

σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
k_1, k_2, k_3	Constantes de regressão
γ_{dmax}	Peso específico aparente seco máximo
w_{ot}	Umidade ótima

1

Introdução

Em todo o mundo o crescimento populacional e o avanço da indústria elevam a exploração de recursos naturais, a fabricação de produtos e consequentemente a geração de resíduos. Dentre estes produtos estão as embalagens de Politereftalato de Etileno (PET), material que foi introduzido no mercado na década de 70 trazendo muitos benefícios ao consumidor. As propriedades e vantagens oferecidas pelas embalagens PET fizeram com que as mesmas fossem produzidas cada vez mais ao longo dos anos, atingindo uma produção de aproximadamente 30,3 milhões de toneladas em 2017.

Como malefício de tal expansão está a volumosa geração de resíduo de PET, cujo descarte ocorre muitas vezes de forma indevida na natureza, acarretando sérios impactos ambientais, especialmente pelo seu longo tempo de degradação (aproximadamente 100 anos). Outro problema é a falta de espaço nos aterros para deposição deste resíduo. Cerca de 4 % de todo o resíduo sólido urbano do Brasil, por exemplo, é composto por PET, ocupando, portanto, grandes áreas do aterro.

Com relação à reciclagem do PET, a taxa de reciclagem registrada no ano de 2015 no Brasil foi de 51 %, valor que corresponde ao dobro do registrado 20 anos antes, quando o interesse e as políticas de reutilização de resíduos de um modo geral ainda não eram muito fortes. O ideal era que todo o PET produzido fosse reciclado. Sendo assim, faz-se necessário promover e incentivar mais práticas de reutilização e reciclagem do PET para que o índice de reciclagem suba ainda mais.

Sabendo que a reutilização de resíduos minimiza os impactos ambientais e preserva os recursos naturais, algumas pesquisas desenvolvidas nos últimos anos objetivaram a busca por uma destinação final mais adequada de resíduos provenientes de diversos setores da indústria.

Transferindo esse contexto para a geotecnia, alguns resíduos foram estudados para serem aproveitados como material alternativo na pavimentação. O

fato das rodovias serem obras de grandes proporções implica na utilização de grandes quantidades de resíduos, sendo esta alternativa uma boa solução para a destinação dos mesmos.

O aproveitamento dos resíduos na pavimentação busca, em geral, melhorar as características mecânicas dos materiais/solos utilizados nos pavimentos. Isto porque muitas vezes o solo natural de uma determinada região não atende às especificações necessárias para que o mesmo seja utilizado como base e/ou sub-base do pavimento, sendo necessário um melhoramento ou uma estabilização.

Resíduos sólidos urbanos (RSU), resíduos de construção e demolição (RCD), rejeitos de mineração e resíduos da indústria termoeletrica, metalúrgica e petrolífera, são exemplos de materiais alternativos estudados e que apresentam potencial de aproveitamento na cadeia produtiva de pavimentos.

Ainda que o solo da região seja apropriado para utilização em base e/ou sub-base, a introdução do resíduo pode ser viável (desde que não piore as características mecânicas do solo) promovendo benefícios como redução de custos e destinação nobre do resíduo.

Frente à problemática do grande volume de resíduo de PET produzido todos os anos e motivada pela necessidade de oferecer uma destinação mais nobre para o mesmo, a presente pesquisa propõe a inserção de pó de PET, PET triturado e fibras de PET, provenientes da moagem e reciclagem de garrafas PET, à um solo argiloso, para emprego em base de pavimentos.

1.1. Relevância da Pesquisa

A adição de PET ao solo mostra-se muito promissora, já que o PET é um material inerte, resistente e com boa estabilidade química. O comportamento mecânico em termos estáticos dessa mistura já foi estudado por LOUZADA (2015). Entretanto para aplicação do PET como material alternativo em base de pavimentos é necessário o estudo do comportamento resiliente deste material.

A avaliação deste comportamento determinará a viabilidade da utilização do PET na pavimentação. Esta medida pode atenuar os impactos ambientais provocados pelo descarte incorreto deste material e ainda melhorar o comportamento mecânico do pavimento.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o potencial de utilização do resíduo de PET, proveniente da reciclagem de garrafas PET, em granulometrias e teores diversos como material alternativo em uma mistura com solo argiloso, para aplicação em bases de pavimentos rodoviários. Esta avaliação é feita pela análise e comparação do comportamento mecânico, especificamente o módulo de resiliência do solo e das misturas realizadas.

Três materiais diferentes são utilizados: o PET em pó (moído), o PET triturado e as de fibras de PET. O primeiro é adicionado ao solo nas porcentagens de 10, 20 e 30 %, enquanto o segundo é adicionado nas porcentagens de 3, 5 e 7 % e o terceiro nas porcentagens de 0,25 e 0,50 % (todas em peso seco de solo).

Portanto, a partir do objetivo principal, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento mecânico do solo e das misturas estudadas por meio de ensaios triaxiais cíclicos para obtenção dos respectivos módulos de resiliência e analisar a influência dos terrores e granulometrias do PET triturado e das fibras de PET;
- Avaliar a influência do aquecimento no comportamento mecânico do solo e das misturas estudadas;
- Realizar o dimensionamento de base de pavimentos, com o objetivo de comparar os materiais estudados mediante análises mecanístico-empíricas;
- Avaliar se há viabilidade técnica e ambiental das misturas estudadas serem aproveitadas para aplicação em base de pavimentos.

1.3. Organização do trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, de acordo com as etapas realizadas na pesquisa. Inicia-se com este Capítulo 1, introdutório, seguido, pelo Capítulo 2, onde é feita a revisão bibliográfica dos principais tópicos apresentados no trabalho e necessários para o entendimento da dissertação.

No Capítulo 3, é feita a apresentação do procedimento experimental adotado na pesquisa, além do detalhamento e descrição dos materiais, métodos e ensaios utilizados em acordo com as normas vigentes.

No Capítulo 4, os resultados encontrados nos ensaios de caracterização física e mecânica do solo puro e das misturas solo-PET são apresentados.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

2

Revisão da literatura

2.1. Pavimentos rodoviários

2.1.1. Definição e classificação

O pavimento é definido, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), como uma superestrutura formada por camadas finitas de diferentes materiais, cada uma com sua respectiva resistência e deformabilidade, apoiada sobre a infraestrutura, considerada infinita, chamada subleito. De acordo com Berbucci *et al.* (2008), o pavimento tem como finalidade resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, bem como proporcionar aos usuários melhores condições de rolagem, conforto, segurança e economia.

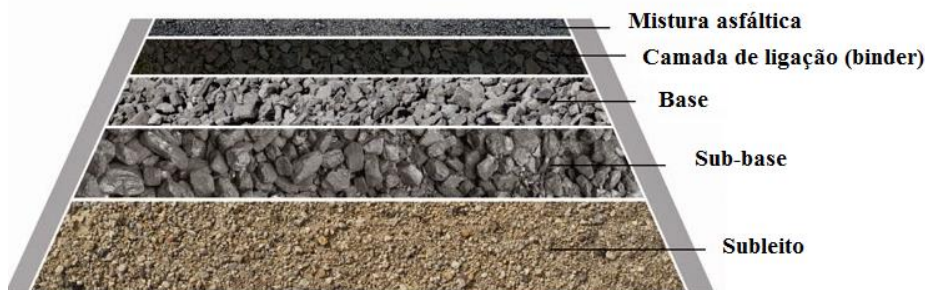


Figura 2.1 Estrutura típica de um pavimento.

A camada superior do pavimento é denominada revestimento. Esta camada é composta por mistura asfáltica ou concreto de cimento Portland, tendo como função resistir diretamente às ações do tráfego, impermeabilizar o pavimento assim como melhorar as condições de conforto e segurança do mesmo (Arao, 2016).

As camadas intermediárias são chamadas de base e sub-base. A base é a camada destinada a resistir aos esforços do tráfego e reduzi-los a níveis aceitáveis para as camadas subjacentes. Também é responsável por minimizar ou eliminar as deformações de consolidação e cisalhamento do subleito. A sub-base é,

geralmente, usada para regularizar a espessura da base, principalmente quando não é aconselhável executar a base diretamente sobre o subleito (DNIT, 2006).

A execução da base de um pavimento dá-se pela compactação de solos naturais, agregados, combinação de solo-agregado e materiais estabilizados com aditivos. O material compactado deve apresentar bom suporte estrutural, promovendo rigidez e baixa deformação. O emprego de agregados baseia-se na distribuição granulométrica, bem como na resistência, forma e durabilidade dos grãos. Já o emprego de materiais granulares com presença de frações passantes na peneira de 0,074 mm de abertura possui limitação com relação à porcentagem e atividade destes finos, de modo a não reduzir a rigidez e aumentar a deformabilidade e expansão da camada (Bernucci *et al.*, 2008).

Os pavimentos podem ser classificados de três formas:

- Flexível - aquele em que o revestimento é composto por uma mistura asfáltica. Nesse tipo de pavimento as tensões aplicadas são absorvidas entre as camadas, proporcionalmente a rigidez.
- Semi-Rígido - aquele que possui em sua base ou sub-base materiais cimentados.
- Rígido - aquele em que o revestimento é composto por concreto de cimento Portland que possui alta rigidez e absorve a maior parte das tensões do carregamento aplicado.

2.1.2. Solos tropicais na pavimentação

Solos tropicais são compostos normalmente por dois tipos de solo, o laterítico e o saprolítico. O primeiro, situado em uma camada mais superficial, encontra-se intemperizado e rico em minerais de argila e sesquióxidos. O segundo, localizado numa camada mais profunda, mantém a estrutura da rocha mãe.

Ao se classificar um solo tropical baseando-se nas metodologias tradicionais de classificação, verifica-se uma incoerência quanto a avaliação do comportamento dos solos finos. Estas metodologias consideram fundamentais a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade. Ocorre que os solos lateríticos, apesar de serem plásticos, apresentam elevada resistência e baixa

expansibilidade, apresentando, portanto, bom desempenho em campo quando utilizado em bases e sub-bases de pavimentos (Nogami e Villibor, 1995).

Com o objetivo de distinguir os solos com comportamento laterítico dos solos com comportamento não laterítico Nogami e Villibor (1995) desenvolveram uma classificação aplicável aos solos tropicais, baseado em suas propriedades mecânicas e hidráulicas. Esta classificação separa sete grupos de solos, sendo três deles lateríticos e quatro não lateríticos (Nogami e Villibor, 1995).

A classificação baseada na metodologia MCT foi normatizada pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER), pela norma DNER-CLA 259/96. Esta classificação baseia-se em parâmetros (c' , d' e e') obtidos por meio de dois ensaios: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV e o ensaio de Perda de Massa por Imersão, realizados de acordo com as normas DNER-ME 258/94 e DNER-ME 256/94, respectivamente.

Fortes *et al.* (1999) apud Fuji (2012) comenta que a utilização de solos tropicais na pavimentação resultou na redução dos custos de transporte e aquisição de material estabilizante, proporcionando economia na construção do pavimento e viabilizando estradas vicinais.

2.2. Propriedades mecânicas dos pavimentos

2.2.1. Índice de suporte Califórnia

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) é um parâmetro mecânico que expressa à capacidade de suporte de um solo compactado.

Este parâmetro é determinado por meio do ensaio de ISC, o qual consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita estabilizada granulométricamente (DNIT, 2006).

Devido à facilidade de execução e ao custo relativamente baixo o ensaio de ISC é adotado por grande parte dos órgãos rodoviários brasileiros na determinação da capacidade de suporte do solo, e com este parâmetro realizam o dimensionamento da espessura de um pavimento flexível, em função do tráfego.

Apesar de ainda ser amplamente utilizado no Brasil, o dimensionamento de um pavimento utilizando o ISC não é a metodologia mais adequada, pois considera um parâmetro obtido em um ensaio de carga estática, e na realidade o pavimento está sujeito a cargas cíclicas. Desta forma, a metodologia mais recomendada atualmente é aquela baseada no módulo de resiliência, parâmetro que será descrito no item 2.2.2.

2.2.2. Módulo de Resiliência

Segundo Medina e Motta (2015), resiliência significa energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.

Nos materiais de pavimentação as deformações são de dois tipos: permanente e resiliente (Figura 2.2). As deformações permanentes ocorrem normalmente logo após a construção da rodovia, devido ao processo de densificação dos materiais. Em seguida as deformações permanentes são minimizadas (desde que os materiais tenham sido adequadamente escolhidos e a compactação bem realizada) e passam a predominar as deformações resilientes ou recuperáveis, que ocorrerão durante toda a vida útil do pavimento (Cunto, 1998).

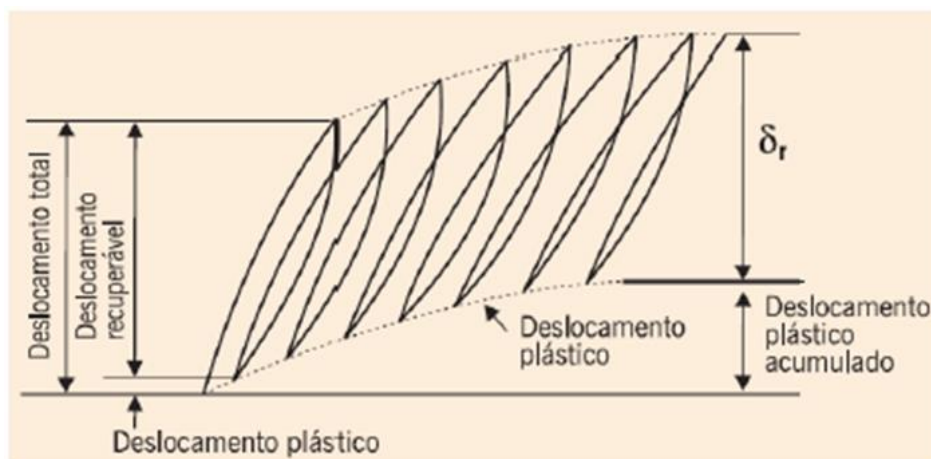


Figura 2.2 Deformação permanente e deformação resiliente sofrida por um pavimento (Bernucci *et al.*, 2008).

As deformações resilientes são resultado da deformação elástica das partículas de solo e dos aglomerados de partículas. Para previsão destas deformações faz-se necessário o conhecimento do módulo de elasticidade dinâmico do material, que é definido como módulo de resiliência, dependente da

natureza e constituição do solo, das condições de estado e das solicitações de tensões (Medina e Motta, 2015).

O módulo de resiliência é expresso de modo geral pela relação entre a tensão (cíclica) aplicada a um material e a deformação resiliente observada (Equação 1).

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

Onde:

M_R – Módulo de resiliência (MPa);

σ_d – Tensão desvio cíclica: $\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa);

ε_r – Deformação resiliente (vertical).

Durante muito tempo o dimensionamento de pavimentos foi baseado em aspectos empíricos e resultados de ensaios estáticos. Com o estudo do módulo de resiliência esta prática mudou e o módulo de resiliência tornou-se o melhor parâmetro a ser utilizado no dimensionamento e análise do comportamento de estruturas de pavimentos.

O módulo de resiliência dos solos pode ser determinado por meio do ensaio de cargas repetidas, ou ensaio triaxial cíclico. Este ensaio busca relacionar as tensões atuantes (σ_d, σ_3) com o módulo de resiliência para condições de densidade, umidade e grau de saturação específicos. O ensaio é feito em solos não saturados quase sempre em condições de drenagem livre e consiste em aplicar pares de tensão confinante e tensão desvio cíclica. As solicitações de tensões aplicadas repetidamente (com frequência constante) procuram representar a ação do tráfego na estrutura do pavimento (Medina e Motta, 2015).

Para cada material ensaiado o módulo de resiliência pode ser expresso por um modelo matemático, com constantes experimentais, que é função do estado de tensões ao qual foi submetido o corpo de prova. Solos argilosos tendem a se comportar segundo um modelo dependente da tensão desvio (Equação 2), enquanto que solos granulares apresentam comportamento mais dependente da tensão confinante ou do primeiro invariante de tensões (Equações 3 e 4) (Medina e Motta, 2015).

$$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad (2)$$

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (3)$$

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad (4)$$

Onde:

σ_3 : tensão confinante;

θ : Primeiro invariante de tensões ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$);

k_1 e k_2 : parâmetros de regressão.

O manual do DNIT (2006) comenta que nos solos granulares não apenas a tensão confinante exerce influência nos valores de módulo de resiliência. Fatores como o índice de vazios crítico, a densidade, o grau de saturação, a história de tensões e a frequência do carregamento aplicado também afetam este parâmetro. Já nos solos coesivos, além da tensão desvio, as condições de compactação também exercem influência no módulo resiliente. Umidades além da ótima reduzem os valores de M_R , assim como o método de compactação também se faz sentir para umidades acima desta.

Outros modelos matemáticos também são atualmente empregados por ajustarem-se melhor a materiais não tratados e de granulometrias diversas. Entre estes modelos está o modelo desenvolvido por Macedo (1996) denominado de modelo Composto, o qual define o módulo de resiliência como um parâmetro dependente tanto da tensão confinante quanto da tensão desvio (Equação 5).

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (5)$$

Onde:

k_1 , k_2 e k_3 : constantes de regressão, derivadas de resultados de ensaios em laboratório.

2.3. Resíduos sólidos

A Lei nº 12305/2010, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define resíduos sólidos como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

Entre os principais objetivos desta lei está a não geração, redução, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

A classificação dos resíduos, segundo esta lei, é feita de duas formas:

- Quanto à origem: se domiciliar, urbano, industrial, de serviços da saúde, da construção civil, etc.
- Quanto à periculosidade: se perigosos, quando apresentam significativo risco à saúde pública ou a qualidade ambiental, ou não perigosos.

A Norma NBR 10004 (2004), que também trata de resíduos sólidos divide ainda os resíduos não perigosos em:

- Inertes: Quaisquer resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.
- Não Inertes

2.4.

Politereftato de etileno (PET)

2.4.1.

Definição, histórico e classificação

O Politereftalato de Etileno é um polímero termoplástico. Isto significa que, quando aquecido, o mesmo se deforma, podendo tornar-se fluido, ser moldado e solidificado novamente, sem sofrer alterações em suas propriedades e estrutura original.

O Politereftalato de Etileno foi desenvolvido em 1941, por John Rex Whinfield e James Tennant Dickson. Inicialmente tinha a forma de fibra e foi empregado na indústria têxtil em substituição às fibras de algodão, linho e lã que ficaram escassas após a Segunda Guerra Mundial. A introdução da fibra do PET na indústria têxtil brasileira deu-se apenas em 1988. Entretanto, a produção das primeiras garrafas PET, nos EUA e Europa, iniciaram-se ainda na década de 70. A partir de 1990 o PET passou a ser amplamente utilizado em embalagens de diversos produtos (Romão *et al.* 2006).

A produção do PET é dividida em três fases: a polimerização no estado líquido, a pós-condensação e a polimerização no estado sólido. Na primeira etapa forma-se o oligômero tereftalato de bis (2 hidroxietileno) (BHET), um polímero amorfo, produzido pela esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com monoetileno glicol (MEG), ou produzido por transesterificação, na qual o TPA é substituído pelo éster tereftalato de dimetileno (DMT). Na segunda etapa a resina PET amorfa obtida na fase anterior é cristalizada e polimerizada continuamente, resultando em polímeros com massa molar em torno de 33.000 g/mol. Na última etapa, a polimerização realizada numa temperatura entre a transição vítrea e fusão visa o aumento da massa molar e o grau de cristalinidade do material (Romão *et al.*, 2009).

Por conta das suas propriedades mecânicas, térmicas e custo de produção, o PET passou a ser um dos termoplásticos mais produzidos no mundo, atingindo uma produção em torno de 30,3 milhões de toneladas em 2017 (Plastic Insight, 2017). Uma das principais finalidades do PET é a fabricação de embalagens. No Brasil 71 % do PET é destinado para este setor, sendo 32 % utilizado para embalagens de alimentos (Romão *et al.*, 2009).

2.4.2. Resíduo e reciclagem do PET

Devido ao aumento na produção de politereftalato de etileno nos últimos anos, a geração de resíduo de PET cresceu substancialmente, ocupando grande parte dos aterros. No Brasil, por exemplo, do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados, 4% é composto por PET. Quando não disposto nos aterros, este resíduo é, muitas vezes, descartado de forma indevida na natureza, e, por conta do longo tempo de degradação (cerca de 100 anos) torna-se um vilão ambiental (Romão *et al.*, 2009). Por estes motivos, é de extrema importância realizar a reciclagem do resíduo de PET, pois esta minimiza o problema ambiental, reduz o volume de lixo nos aterros e ainda oferece vantagens como economia de petróleo, energia de produção e geração de riqueza e emprego.

O décimo censo de reciclagem de PET no Brasil informa que a taxa de reciclagem no ano de 2015 foi de 51 %, correspondendo à reciclagem de 274 ktons de PET (ABIPET, 2016). Essa taxa já foi superior, sendo de 58,9% no ano

de 2012 (ABIPET, 2013). O panorama geral de reciclagem desde 1994 pode ser visualizado na Figura 2.3.

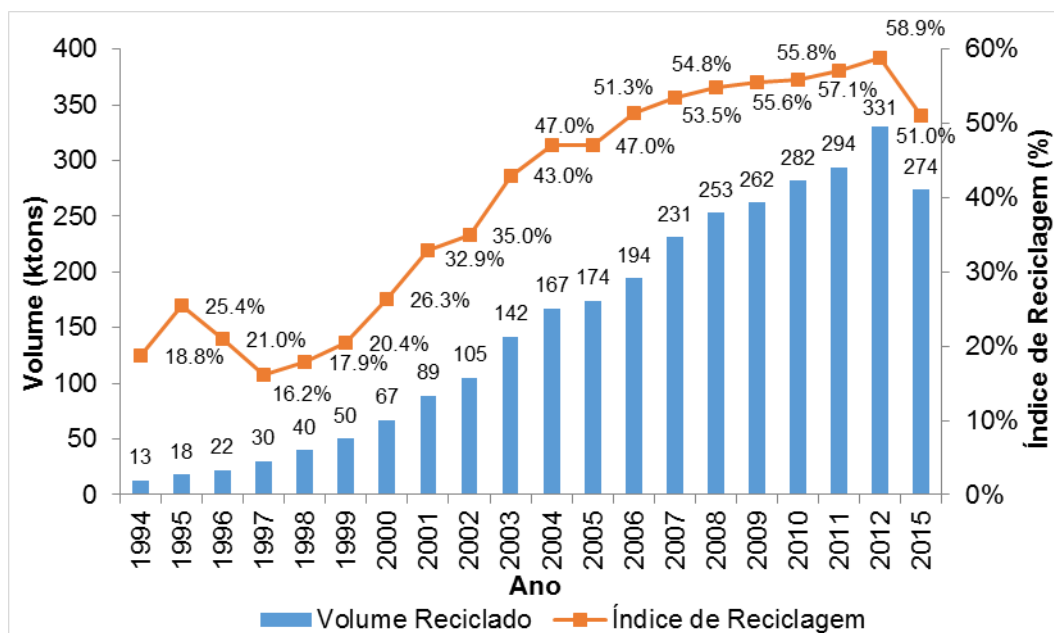


Figura 2.3 Evolução da Reciclagem do PET no Brasil (Adaptado de ABIPET, 2013).

Com as taxas de reciclagem apresentadas nos últimos anos, o Brasil coloca-se como o segundo país que mais recicla PET, perdendo apenas para o Japão, cuja taxa de reciclagem é superior a 90 %. Na Europa a taxa de reciclagem fica em torno de 50 % e nos EUA não ultrapassa os 30 % (Plastic Insight, 2017).

Dentre as formas mais comuns para obtenção do PET reciclado estão os flocos, os fardos e o granulado. Os flocos são a forma preferencial para quem vai usar o material reciclado na produção de um novo artigo, representando 65 % do material reciclado, seguido dos fardos de garrafa, 25 %, e do granulado de PET, 10 % (ABIPET, 2016).

Grande parte do PET reciclado é aplicado na indústria têxtil, outra parte é destinada a produção de resinas alquílicas e o restante é usado na fabricação de novas embalagens não alimentícias, laminados, chapas, fitas e tubos (Figura 2.4) (ABIPET, 2016).

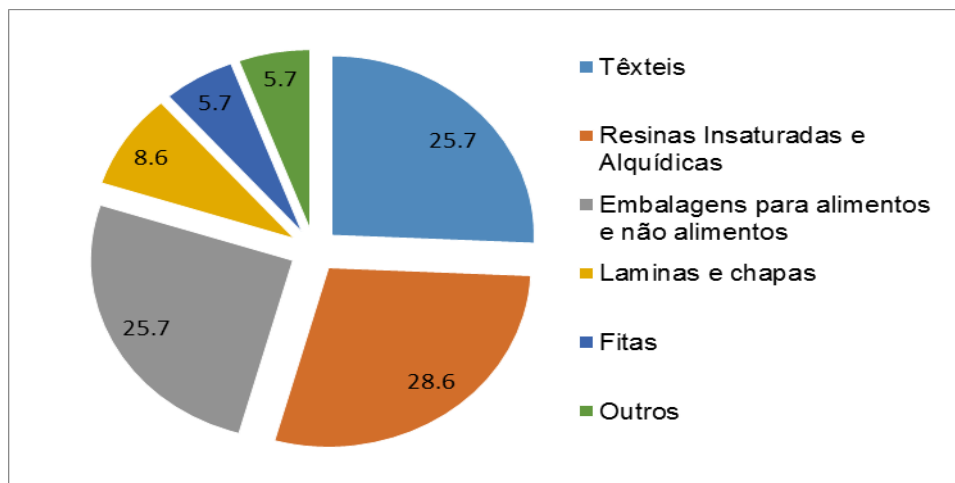


Figura 2.4 Aplicação do PET reciclado (ABIPET, 2016).

É importante salientar que os produtos fabricados com PET reciclado possuem limitação de uso, não sendo livremente utilizadas em embalagens de bebidas, alimentos e fármacos por possibilidade de contaminação. (Romão *et al.*, 2009).

A portaria nº 987 da Secretaria da Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde (1998), estabelece, por exemplo, que bebidas carbonatadas não-alcóolicas podem ser acondicionadas em embalagens fabricadas com resina pós-consumo, desde que estas embalagens sejam compostas por três camadas: duas externas de resina virgem e uma interna de resina reciclada.

Já a resolução RCD N.20/2008 estabelece requisitos gerais e critérios de avaliação, aprovação e registro de embalagens de PET elaboradas com proporções de PET virgem e PET pós-consumo reciclado descontaminado, destinadas a entrar em contato com alimentos.

2.5.

Utilização de resíduos em base e/ou sub-bases de pavimentos

Diversos tipos de resíduos foram estudados nos últimos anos para serem empregados na pavimentação. Estes estudos possuem como objetivos o melhoramento ou reforço do solo a ser empregado na camada de base e/ou sub-base, a redução de custos com obtenção de material nas jazidas, redução de custos de transporte e a disposição mais nobre do resíduo.

Resíduos sólidos urbanos (RSU), resíduos de construção e demolição (RCD), rejeitos de mineração e resíduos da indústria termoeletrica, metalúrgica e

petrolífera, são exemplos de materiais alternativos estudados e que apresentam potencial de aproveitamento na cadeia produtiva de pavimentos do Brasil. Alguns destes estudos serviram de base para a presente pesquisa e, portanto, são brevemente descritos neste tópico.

No que se trata de resíduos sólidos urbanos, Vizcarra (2010) avaliou a aplicabilidade de cinzas de RSU em camadas de base de pavimentos rodoviários. O autor realizou misturas de cinza de fundo e cinza volante com um solo argiloso não laterítico, nas proporções de 20 e 40 %, em relação ao peso seco de solo. Para avaliar o comportamento mecânico das misturas foram realizados ensaios de módulo de resiliência e Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência, obtidos por Vizcarra (2010), apontaram que a adição de cinza volante permitiu um aumento dos valores de M_R , especialmente para a mistura com 20 %. Em contrapartida, a adição de cinza de fundo não foi benéfica, piorando os valores de M_R .

No que se refere ao CBR, a adição de cinzas ao solo possibilitou o aumento deste parâmetro, indicando uma melhoria na capacidade de suporte, quando comparado ao solo puro. Houve também redução da expansibilidade nas misturas com cinza, entretanto, apenas a redução ocorrida na mistura com 40 % de cinza volante foi capaz de tornar o material adequado para emprego em base de pavimentos, segundo as especificações do DNIT. Desta forma Vizcarra (2010) concluiu que apenas a mistura com 40 % de cinza volante mostrou-se viável para fins rodoviários.

Lopes (2011) avaliou a aplicabilidade de dois tipos de cinza (fundo e volante), provenientes da queima de carvão em indústrias termoeletricas, como material alternativo em camadas de base de pavimentos rodoviários. As cinzas foram adicionadas a um solo areno-siltoso e o comportamento mecânico do composto foi avaliado por meio de ensaios de módulo de resiliência. A cinza de fundo foi adicionada ao solo na proporção de 30 e 40 %, enquanto que a cinza volante foi adicionada na proporção de 10 e 20 %, todas em relação ao peso seco de solo.

Os resultados de módulo resiliente obtidos por Lopes (2011) mostraram que as misturas com cinza de fundo apresentaram ganhos de até 50 % nos valores de M_R , em relação ao solo puro, sendo que os dois teores estudados apresentaram comportamentos semelhantes. Nas misturas com cinza volante não houve ganho,

mas também não houve piora deste parâmetro, permitindo ainda a utilização deste material em substituição aos materiais convencionais.

Santana (2014) avaliou a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas de base ou sub-base de pavimentos. O autor avaliou três granulometrias de RCD, uma definida como agregado reciclado miúdo (ARM), com dimensões inferiores a 4,8 mm, e as outras duas definidas como agregado reciclado grão (ARG1 e ARG2). O ARM foi testado misturado a dois tipos de solo, um A-2-4 e um A-2-7, nas porcentagens de 30, 50 e 70 %. Já os agregados grãos foram testados nas combinações de 50% solo A-2-7 + 25% ARG1 + 25% ARG2 e 70% ARM + 15% ARG1 + 15% ARG2.

A avaliação mecânica dos materiais estudados deu-se por ensaios de Índice de Suporte California (ISC) e Módulo de Resiliência. Os resultados dos ensaios demonstraram que a adição gradativa de RCD elevou o ISC, e que as misturas de 30, 50 e 70 % ARM com solo A-2-4, a mistura de 70 % ARM com solo A-2-7 e as misturas com ARG atenderam às exigências para aplicação em base de pavimentos. Com relação ao módulo de resiliência, todas as misturas apresentaram valores de M_R superiores aos valores encontrados nos solos puros, destacando-se as misturas de solo A-2-7 com 50 e 70 % de RCD, cujos valores de M_R foram mais de cinco vezes o do solo puro.

Klinsky (2013) avaliou o reaproveitamento de areia de fundição residual (AFR) em camadas de pavimentos. O autor realizou misturas de AFR, nas porcentagens de 20, 40, 60 e 70 %, com um solo argiloso laterítico e um não laterítico.

Ensaio de Mini-CBR foram realizados nas amostras e observou-se uma tendência de aumento da capacidade de suporte com o acréscimo da porcentagem de resíduo adicionada, sendo o CBR melhor para as misturas com solo laterítico. O incremento de AFR também proporcionou diminuição da expansão das misturas. Segundo as especificações do DNIT, as misturas de AFR com solo laterítico e as misturas com 60 e 70 % de AFR em solo não laterítico poderiam ser utilizadas em sub-base de pavimentos.

Klinsky (2013) também realizou ensaios triaxiais cíclicos nas misturas e verificou uma tendência diferente relacionado aos teores ideais definidos pelo CBR. Os valores de módulo de resiliência, parâmetro mais indicado para avaliar

materiais a serem empregados na pavimentação, mostraram que teores de 20 a 40 % de AFR é suficiente para se obter um bom comportamento mecânico.

Além dos materiais com características mais granulares apresentados, as fibras são outro tipo de material alternativo que vem sendo empregado como reforço de solo, e eventualmente aplicado na pavimentação. Vários tipos de fibra podem ser utilizados: naturais, poliméricas, minerais e metálicas.

Lima Neto *et al.* (2016) estudaram a utilização de fibras de polipropileno como reforço em solo para aplicação na pavimentação. Na pesquisa foram avaliados quatro teores de fibra, 0,5, 1, 1,5 e 2 %, adicionada a um solo tipo A-2-4. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia e expansão foram realizadas nas amostras e no solo puro a fim de verificar as propriedades mecânicas dos materiais.

Os autores constataram que o acréscimo de fibras na mistura promove aumento no ISC, embora não suficiente para atender as especificações do DNER para aplicação em base e/ou sub-base. No que se refere a expansão verificou-se um leve aumento desta para o teor de 0,5 % de fibras, depois queda considerável para a mistura com 1 % de fibra e depois um novo aumento para teores acima de 1,5 %. Lima Neto *et al.* (2016) concluíram que adição de 1 % de fibra poderia ser uma boa alternativa para solos com ISC próximos aos valores normativos, mas com elevada expansibilidade.

2.6.

Uso de resíduo de PET na geotecnia

Com relação ao uso de resíduo de PET ainda não foram verificados estudos que busquem especificamente seu emprego em base e/ou sub-base de pavimentos. Entretanto, Senez (2016) e Louzada (2015) utilizaram este resíduo em seus estudos sobre de reforço de solos, servindo de referência para a presente pesquisa.

Recentemente, Senez (2016) utilizou fibras derivadas da reciclagem de garrafas PET, como material alternativo para reforço de solos. Duas fibras diferentes foram testadas por Senez, a 1.4 Dtex, com 0,0098mm de diâmetro e 38 mm de comprimento, e a 3.3 Dtex, com 0,023 mm de diâmetro e 56 mm de comprimento. Essas fibras foram inseridas aleatoriamente em uma areia pura com

umidade de 10 % e compacidade relativa de 50 %, no teor de 0,5 %, em relação ao peso seco de solo.

Para avaliar o material foram realizados ensaios de compressão triaxial drenado, ensaios de prova de carga em placa e uma simulação de um talude em modelo físico reduzido.

Senez (2016) observou que a inserção de fibras influencia os parâmetros mecânicos do solo, melhorando o intercepto coesivo e o ângulo de atrito. Foi possível verificar que as misturas com fibra apresentam maiores resistência ao cisalhamento do que o solo não reforçado.

Constatou-se também que, as fibras de menor diâmetro e menor espessura (1.4 Dtex), apresentam resultados melhores que as fibras 3.3 Dtex. Este fato é justificado pelo maior número de fibras presente na matriz de solo, e consequentemente pela maior quantidade de fibras passando pela superfície de ruptura. Ainda, as fibras 1.4 Dtex apresentam menor tendência de contração do que as fibras maiores.

Com relação aos ensaios de carga em placa, Senez (2016) verificou que a adição de fibras influencia o comportamento carga-recalque, sendo possível a aplicação de quase duas vezes o valor da carga aplicada na areia pura, registrando-se uma redução de 19 % do recalque. O autor também observou uma mudança na forma de ruptura, pois na areia pura a ruptura foi localizada enquanto que no compósito areia-fibra PET a ruptura foi por puncionamento.

Na simulação de talude, foi observada uma redução dos deslocamentos horizontais no topo, meio e base do talude. O talude formado pela mistura de areia e fibra também sofreu ruptura a tensões mais elevadas, cerca de três vezes a carga do talude não reforçado.

Outro estudo envolvendo politereftalato de etileno reciclado em reforço de solos foi realizado por Louzada (2015). Em seu estudo a autora avaliou o comportamento de dois tipos diferentes de granulometria de PET: o pó, com dimensões inferiores a 0,042 mm, e o triturado, com dimensões inferiores a 1 mm. O pó foi adicionado aos solos nos teores de 10, 20 e 30 %, enquanto que o triturado foi adicionado nas porcentagens de 3 e 5 %, todos em relação ao peso seco de solo.

Louzada (2015) estudou a inserção do PET em três solos diferentes, um solo coluvionar, uma areia limpa e mal graduada e uma bentonita. Para avaliar o

comportamento mecânico dos materiais foram realizados ensaios triaxiais não drenados, para tensões confinantes de 50, 150 e 300 kPa, e ensaios de cisalhamento direto.

Louzada (2015) concluiu que para as misturas com areia a inserção de 10 % de pó de PET proporcionou melhores resultados mecânicos enquanto que para o solo argiloso as misturas com 30 % de pó de PET e as misturas com 5 % de PET triturado foram as que se destacaram. Na bentonita a mistura com 5 % de PET triturado também se mostrou mais eficaz.

Na geotecnia de pavimentos, especificamente, as pesquisas existentes buscam aplicar o PET reciclado como um material alternativo em misturas asfálticas, sendo este inserido como agregado ou como modificador de asfalto. A utilização de diferentes tipos de polímeros como aditivos em misturas asfálticas é uma prática comum para aumentar a vida útil do pavimento.

Arao (2016) avaliou o emprego de resíduo de polietileno tereftalato em misturas asfálticas do tipo CBUQ (Concreto betuminoso usidado a quente). A autora utilizou duas granulometrias do PET triturado, uma com diâmetro de até 10 mm e outra com diâmetro de até 2 mm. Estes materiais foram adicionados como agregado na mistura asfáltica, nos teores 0,5 % e 1 %. Também foi realizada uma mistura com 0,5 % de PET triturado 10 mm e substituição de 2,5 % do fíler convencional (pó de pedra) por pó de PET.

A avaliação do comportamento mecânico das misturas foi baseada nos resultados de ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração, módulo de resiliência e vida de fadiga.

Em termos de estabilidade Marshall, Arao (2016) verificou que a mistura com 1 % de PET triturado 2 mm apresentou um aumento significativo deste parâmetro, indicando maior entrosamento entre as partículas. Com exceção da mistura com pó de PET, as demais misturas apresentaram um pequeno aumento da estabilidade Marshall quando comparado com a mistura convencional.

Com relação à fluência, as misturas com 0,5 % de PET triturado 10 mm e a mistura com pó de PET foram as que indicaram maior deformação.

Os resultados de resistência à tração obtidos por Arao (2016) indicaram que as misturas com menor teor de PET apresentaram valores próximos ao da mistura convencional, enquanto que as misturas com maior teor apresentam aumento significativo deste parâmetro. Verificou-se que a adição do pó de PET na mistura

com 0,5 % de PET triturado 10 mm influencia positivamente na resistência a tração da mistura.

No que se refere ao módulo de resiliência, Araújo (2016) constatou que quanto maior a porcentagem de PET triturado presente na mistura menor o valor do módulo resiliente, indicando que a inserção de PET deixa as misturas menos rígidas, e consequentemente mais deformáveis.

Em relação aos ensaios de vida de fadiga, foi constatado que a mistura com 0,5 % de PET triturado de 10 mm apresentou melhor comportamento.

Araújo (2016) realizou ainda um estudo referente à vida útil do pavimento, utilizando o software SisPav, e verificou que as misturas com PET triturado de 10 mm, apresentavam aumento extremamente significativo da vida útil. Ao relacionar os resultados de vida útil com os de módulos de resiliência a autora concluiu que a mistura com 0,5 % de PET triturado em 10 mm e com a substituição de 2,5 % do fíler por pó de PET era a mais adequada dentre as misturas pesquisadas.

Outro estudo envolvendo resíduo de PET em misturas asfálticas foi realizado por Queiroz (2016). As misturas realizadas pelo autor foram do tipo porosa e a adição de PET foi realizada via processo seco, nas proporções de 0,33, 0,50, 0,75 e 1,00 % de PET, em relação ao peso seco dos agregados. O autor utilizou PET com dimensões entre 1,18 e 2,36 mm.

Para avaliação do comportamento mecânico do material foram realizados ensaios de módulo de resiliência, deformação permanente e vida de fadiga.

Queiroz (2016) verificou que as misturas aditivadas com PET, especialmente nos teores de 0,33, 0,50 e 0,75 %, apresentaram aumento no módulo de resiliência, ou seja, tornaram-se mais rígidas. Apesar de estarem mais rígidas as amostras adicionadas com PET mostraram-se mais suscetíveis a deformação permanente. Com relação à vida de fadiga, as misturas com adição de PET apresentaram maior vida de fadiga para baixos níveis de tensões e maiores números de aplicações de cargas, quando comparado com as misturas sem PET.

Alzate (2017) também avaliou o uso de politereftalato de etileno reciclado como agregado em uma mistura asfáltica semidensa tipo MSC-19. O autor testou a inserção de três granulometrias diferentes de PET triturado na mistura asfáltica, a primeira com partículas de 5 mm, outra de 2 mm e uma terceira com dimensões

entre 0,5 e 2 mm. As porcentagens adotadas foram, 0,5, 1 e 2 %, totalizando nove combinações.

Das nove misturas estudadas, apenas a mistura com 1 % de PET triturado com dimensões entre 0,5 e 2 mm (mistura C) e a mistura com 0,5 % de PET triturado na dimensão de 5 mm (mistura H), atenderam as especificações relativas à estabilidade e fluência Marshall. Ensaio de módulo resiliente e ensaios de deformação permanente com simuladores de tráfego foram realizados nestas duas misturas e na mistura padrão para a avaliação do comportamento mecânico dos materiais.

Com relação ao módulo de resiliência Alzate (2017) observou que as duas misturas (C e H) apresentaram módulos superiores aos valores da mistura padrão, sendo que na mistura C essa melhora foi mais evidente. No ensaio de deformação permanente verificou-se que a mistura C possui velocidade de deformação inferior a da mistura padrão, enquanto que a mistura H apresenta velocidade de deformação superior, mas, ainda inferior ao limite estabelecido pelas especificações consideradas.

Desta forma, Alzate (2017) concluiu que a mistura C apresentou melhores resultados mecânicos e, portanto, foi considerada a mistura asfáltica mais adequada em termos de teor e granulometria de PET triturado.

Moghaddam e Karin (2012) realizaram um estudo semelhante em misturas *Stone Mastic Asphalt* (SMA) adicionando 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1 % de partículas de PET reciclada com dimensões inferiores a 2,36 mm. Foram realizados ensaios de estabilidade e fluência Marshall, rigidez e vida de fadiga. Os resultados indicaram que a inserção de até 0,4 % de PET aumenta a estabilidade e que o aumento de teor de PET aumenta a fluência do material. A vida de fadiga do material também aumenta com o acréscimo de PET, embora haja uma redução da rigidez da mistura. O teor ótimo considerado pelos autores foi de 0,4 %.

2.7.

Efeito do aquecimento em misturas

Garcia (2016) utilizou o aquecimento para proporcionar a cimentação e consequentemente melhorar as propriedades mecânicas de uma mistura formada por areia e pó de polietileno. O aquecimento era feito deixando o corpo de prova

(ainda no molde) por 1 hora na estufa a 150°C, e tinha a finalidade de amolecer o polímero. Após o aquecimento a mistura era resfriada e o polímero voltava a solidificar criando uma ligação entre os grãos de areia e os grãos de polímero.

Garcia (2016) realizou misturas com 1,0, 2,4 e 5,6 % de polietileno e avaliou o comportamento por meio de ensaios de compressão simples. Nas misturas com 1 % de polietileno também foram realizados ensaios triaxiais drenados, utilizando cinco tensões confinantes com valores entre 55 e 586 kPa.

O autor verificou que os resultados de compressão simples forneceram resistências de pico de aproximadamente 2100, 4300 e 11900 kPa, para os respectivos teores de polietileno estudados. Estes valores são bem superiores aos observados em misturas cimentadas com cimento Portland em teores semelhantes.

Os resultados do ensaio triaxial realizados na mistura com 1 % de polietileno forneceram resistência de pico entre 1300 e 2400 kPa. O ângulo de atrito e a coesão correspondente foi de 46° e 415 kPa, respectivamente. Ao comparar estes resultados com os observados em estudos envolvendo misturas com Portland e outros materiais cimentantes (em teores iguais ou maiores a 1%) Garcia (2016) verificou que a mistura com 1 % de polietileno cimentada por aquecimento apresentava comportamento mecânico muito melhor que os outros materiais.

3

Programa experimental

3.1.

Considerações iniciais

O programa de ensaios teve como principal objetivo caracterizar e analisar a influência do polietileno tereftalato (PET), em suas diversas formas e teores, no módulo de resiliência de um solo argiloso.

As etapas do programa experimental e a descrição dos materiais e equipamentos utilizados são descritas neste capítulo, assim como os métodos e execução dos ensaios.

O desenvolvimento deste programa experimental foi realizado no Laboratório do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB, com a realização de ensaios de caracterização, e no Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB), com a realização de ensaios triaxiais cíclicos.

3.2.

Materiais

3.2.1.

Solo argiloso

O solo utilizado para o desenvolvimento da pesquisa é um solo argiloso (Figura 3.1) coletado no Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo do Programa de Pós-graduação da Universidade de Brasília, situado no Campus Universitário Darcy Ribeiro, na Asa Norte do Plano Piloto de Brasília, no Distrito Federal. A posição geográfica da área é determinada pelas coordenadas 15°45'58"S e 47°52'21"O, com altitude média de 1047 m, ocupando uma área quadrangular de aproximadamente 5000 m², conforme apresentado na Figura 3.2.

Segundo Muñetón (2013), o perfil de solo residual apresenta o intemperismo típico do Distrito Federal e é constituído por uma camada superficial de solo argilo-arenoso seguido de solo argiloso poroso.



Figura 3.1 Solo do Campo Experimental da UnB.



Figura 3.2 Localização do Campo Experimental da UnB (Google Earth, 2018).

A escolha por um solo argiloso foi baseada no estudo de Louzada (2015), que analisou o comportamento mecânico de três solos diferentes, a saber, solo arenoso, solo argiloso e bentonita, misturados com PET em pó e PET triturado. O estudo de Louzada (2015) teve foco no comportamento estático, sendo realizados ensaios triaxiais e ensaios de cisalhamento direto nos solos puros e nas misturas. Os resultados mostraram que as misturas de PET com solo argiloso conseguiram superar os parâmetros de resistência do solo puro.

Além disso, o solo presente no Campo experimental é representativo dos solos predominantes no Distrito Federal, sendo, portanto, estudado e empregado em diversas pesquisas locais.

3.2.2. Resíduo de politereftalato de etileno (PET)

O resíduo de politereftalato de etileno utilizado nesta pesquisa foi empregado em três formas diferentes denominadas pó de PET, PET triturado e fibra de PET.

- Pó de PET

O pó de PET (Figura 3.3) utilizado na pesquisa foi produzido em Campina Grande/PB e é um material resultante da moagem de garrafas PET com partículas de dimensões inferiores a 0,42 mm.

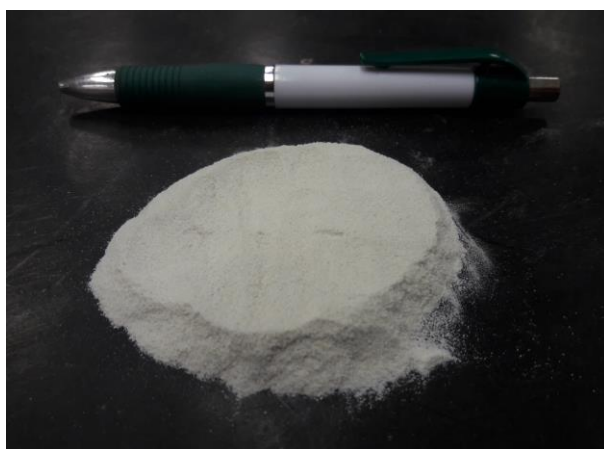


Figura 3.3 Pó de politereftalato de etileno.

O processo pelo qual a garrafa PET passa para transformar-se no pó, inicia-se pela remoção do rótulo e do bico da garrafa, seguido pela moagem para obtenção de flakes de PET. Posteriormente, o material passa por aglomeração para redução do volume e aumento da densidade dos flakes. Em seguida, o material passa por preparação e transformação do termoplástico e nova moagem resultando em pelotas. Por fim, ocorre a micronização para reduzir o material a um pó.

Louzada (2015) utilizou o mesmo pó de PET em sua pesquisa, executando em seu estudo o ensaio de Espectrometria de fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX), para determinação da composição química do material. O resultado deste ensaio segue apresentado na Tabela 3.1. Louzada (2015) também realizou ensaios para determinação dos índices físicos do pó de PET, os quais seguem apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 Composição química em termos de elementos químicos do Pó de PET (Louzada 2015).

Elemento Químico	Quantidade (%)
Enxofre (S)	0,223
Silício (Si)	0,198
Cloro (Cl)	0,017
Cálcio (Ca)	0,015
Ferro (Fe)	0,013
Túlio (Tm)	0,006
Cobre (Cu)	0,003
Carbono (C)	99,524

Tabela 3.2 Índices Físicos do Pó de PET (Louzada, 2015).

Índices Físicos	Pó de PET
Densidade relativa (Gs)	1,44
Coeficiente de Uniformidade (Cu)	14
Coeficiente de Curvatura (Cc)	4,6
Diâmetro Efetivo (D10)	0,01 mm
Diâmetro nominal (D50)	0,12 mm
Índice de Vazios mínimo	0,69
Índice de vazios máximo	1,27

▪ PET Trituado

O PET trituado (Figura 3.4) utilizado na pesquisa é um material com partículas inferiores a 2 mm resultante da trituração de garrafas PET, realizada com um equipamento triturador da marca Radial LaFrance, modelo SG-500F (Figura 3.5), pertencente ao Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-RIO.



Figura 3.4 Politereftalato de etileno trituado.

Para obtenção do material é necessário lavagem das garrafas PET, bem como remoção do rótulo, bico e fundo da garrafa. Feito isto, as garrafas são inseridas na bandeja superior do equipamento e, em seguida, passam por um conjunto de lâminas, localizadas no interior do mesmo, que realizam a trituração. Depois, os pedaços triturados passam por uma peneira de 2 mm e por fim são depositados na bandeja inferior. Faz-se necessário retirar o material que fica retido na peneira e repetir o processo até que todo o material tenha passado pela peneira.

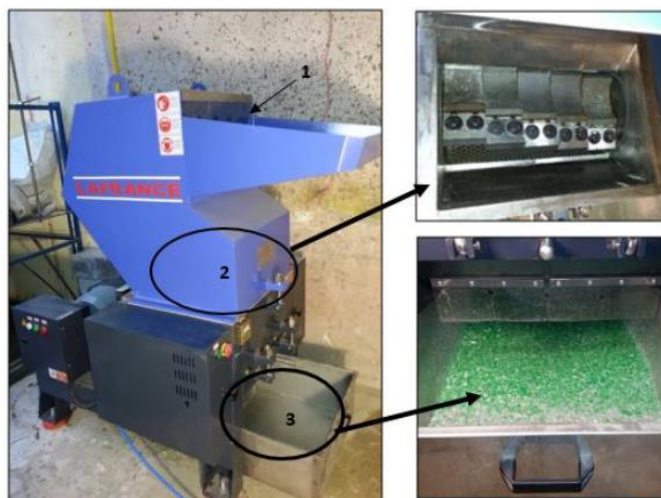


Figura 3.5 Equipamento triturador da marca Radial LaFrance (Louzada, 2015).

▪ Fibras de PET

As fibras utilizadas nesta pesquisa são produzidas pela empresa M&G Fibras Brasil Ltda. É comercialmente denominada de Alya Eco e é confeccionada a partir da reciclagem de garrafas PET. Duas fibras diferentes foram testadas neste trabalho, a 1.4 Dtex, com diâmetro de 0,0098 mm e comprimento de 38 mm, e a 3.3 Dtex, com diâmetro de 0,0230 mm e comprimento de 56 mm (Figura 3.6).

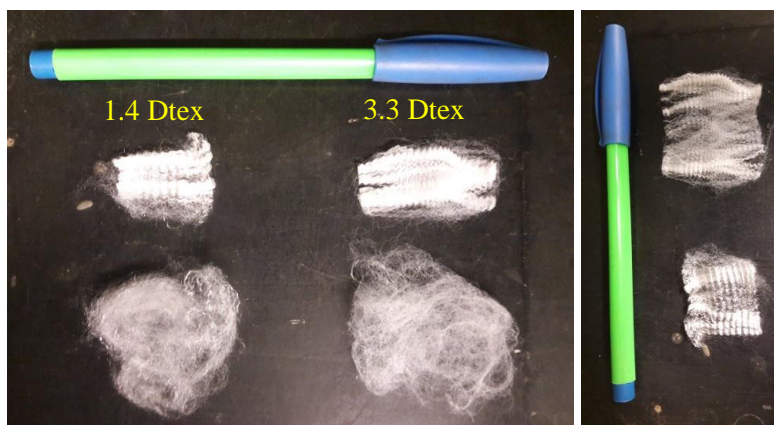


Figura 3.6 Fibras de politereftalato de etileno de 1.4 Dtex e 3.3 Dtex.

Para misturar as fibras ao solo foi necessário desfiá-las manualmente e espalhá-las de modo que ficassem com distribuição aleatória e uniforme.

Algumas propriedades das fibras seguem descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Propriedades físicas e mecânicas das Fibras Alya Eco.

Índices Físicos	Fibra de PET
Densidade (g/cm ³)	1,27
Resistência à tração (MPa)	81
Módulo de Young (MPa)	2800
Alongamento até a ruptura (%)	70
Ponto de Fusão (°C)	250

O processo de produção das fibras de PET inicia-se pela coleta, lavagem e secagem das garrafas, bem como retirada da tampa e do rótulo. Em seguida, as garrafas passam pela moagem, onde são reduzidas a pedaços pequenos. Depois esse material é fundido a uma temperatura de 300 graus Celsius e filtrado para remoção de impurezas. O processo de fusão é repetido e o material fundido passa por equipamentos que o transformam em filamentos. Por fim, os filamentos passam por estiragem onde são transformados em fios cerca de 20 vezes mais finos que o fio de algodão.

As fibras de PET são usualmente empregadas na confecção de roupas, mantas, travesseiros, etc, conferindo durabilidade, resistência às lavagens e estabilidade dimensional a estes produtos.

3.3. Metodologia

A metodologia da pesquisa consistiu em avaliar primeiramente o solo puro e o PET separadamente, depois avaliar as misturas de solo-PET, com a adição de PET em pó, nas porcentagens de 10, 20 e 30 %, inserção de PET triturado, nas porcentagens de 3, 5 e 7 %, e adição de fibra nas porcentagens de 0,25 e 0,50 %, todas em peso seco de solo.

As misturas de solo com pó de PET e PET triturado foram realizadas misturando manualmente os materiais secos em uma bandeja e adicionando posteriormente a água necessária. No caso das misturas de solo com fibra, primeiramente parte do solo já umedecido foi espalhado sobre uma bandeja e

depois a fibra foi distribuída uniformemente sobre o solo e coberta pelo restante do solo umedecido, formando um “sanduíche”. No fim, para homogeneizar a mistura, o “sanduíche” era levemente remexido, tomando cuidado para não aglomerar as fibras.

Para facilitar a identificação de cada material/mistura, foram adotadas as nomenclaturas apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Nomenclaturas adotadas para cada material.

Material	Solo (%)	PET (%)	Nomenclatura
Solo Puro	100	0	SP
Solo + Pó de PET	90	10	S90P10
	80	20	S80P20
	70	30	S70P30
Solo + PET triturado	97	3	S97T03
	95	5	S95T05
	93	7	S93T07
Solo + Fibra de PET 1.4 Dtex	99,75	0,25	0,25%Fi1.4Dtex
	99,50	0,50	0,50%Fi1.4Dtex
Solo + Fibra de PET 3.3 Dtex	99,75	0,25	0,25%Fi3.3Dtex
	99,50	0,50	0,50%Fi3.3Dtex

A fim de classificar o solo de acordo com a metodologia MCT (Miniatura compactado tropical), específica para solos tropicais, foram realizados ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão.

Para determinar as propriedades físicas das amostras de solo, de PET e das misturas solo-PET foram executados ensaios de caracterização física, que foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília. Ensaio de densidade relativa dos grãos, limites de Atterberg, análise granulométrica e compactação em equipamento miniatura, fizeram parte desta etapa.

Com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas do solo e das misturas solo-PET foram executados ensaios triaxiais cíclicos, para determinação do módulo de resiliência, os quais foram realizados no INFRALAB, também na Universidade de Brasília.

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados em duas condições. A primeira com o corpo de prova recém moldado e a segunda com o corpo de

prova aquecido. Esta segunda condição busca avaliar o efeito do aquecimento nas propriedades mecânicas dos materiais estudados.

De posse dos dados de módulo de resiliência, foi realizado o dimensionamento de um pavimento típico, empregando em sua camada de base os materiais estudados. Este dimensionamento foi realizado com o programa computacional SisPav, desenvolvido pela COPPE/UFRJ.

Por fim, foi realizada a microscopia eletrônica de varredura em amostra de 4 materiais estudados na pesquisada (cujas escolhas seguem justificadas no item 3.8) a fim de comparar a estrutura interna das mesmas.

Ensaio químicos e ambientais de lixiviação/solubilização não foram realizados pelo fato dos materiais adicionados ao solo serem inertes.

3.4. Classificação Miniatura Compactado Tropical (MCT)

A metodologia MCT foi desenvolvida por Nogami e Villibor (1981) e está baseada em propriedades mecânicas e hidráulicas obtidas em corpos de prova compactados em dimensões reduzidas, que são diretamente correlacionáveis com o comportamento dos solos tropicais. Esta metodologia foi desenvolvida para classificar os solos tropicais, pois as metodologias tradicionais não podem ser aplicadas diretamente a estes solos por fornecerem incoerências relativas ao comportamento dos mesmos.

A classificação baseada na metodologia MCT foi normatizada pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER), pela norma DNER-CLA 259/96. Esta classificação baseia-se em parâmetros obtidos por meio de dois ensaios: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV e o ensaio de Perda de Massa por Imersão, realizados de acordo com as normas DNER-ME 258/94 e DNER-ME 256/94, respectivamente.

Os ensaios da metodologia MCT são realizados apenas em materiais com menos de 10 % de material retido na peneira de 2 mm de abertura. O ensaio é realizado no aparelho de compactação miniatura (Figura 3.7), com moldes cilíndricos de 50 mm de diâmetro.

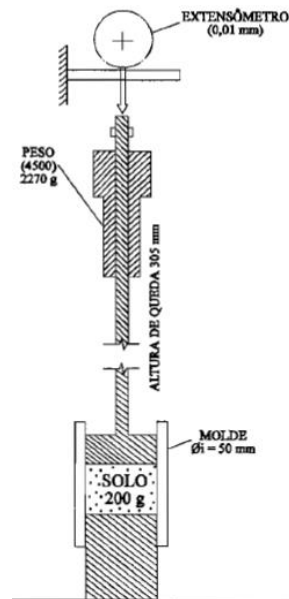


Figura 3.7 Esquema do aparelho de compactação da metodologia MCT. (Nogami e Villibor, 1995).

3.4.1. Ensaio Mini-MCV

O ensaio Mini-MCV tem como objetivo determinar os coeficientes empíricos c' e d' utilizados na classificação MCT. A realização deste ensaio consiste em aplicar golpes crescentes em um corpo de prova com determinada umidade, verificando-se a diferença de altura (a_n) do corpo de prova, até que se atinja uma massa específica aparente seca máxima. Para cada teor de umidade existirá uma curva em função da diferença de altura pelo número de golpes, denominada curva de deformabilidade, conforme exemplificado na Figura 3.8.

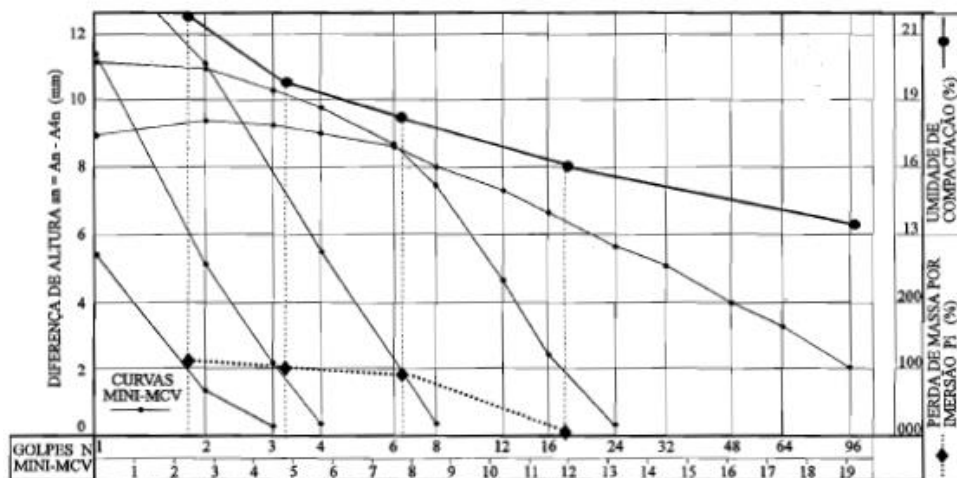


Figura 3.8 Curvas de deformabilidade do ensaio Mini-MCV (Nogami e Villibor, 1995).

A interseção destas curvas com a horizontal correspondente a diferença de altura de 2 mm, dá o número de golpes B_i e o respectivo Mini-MCV expresso pela equação 3.1.

$$\text{Mini-MCV}_i = 10 \log B_i \quad (3.1)$$

A inclinação da reta assimilável à curva de Mini-MCV igual a 10 fornece o coeficiente c' . Segundo Nogami e Villibor (1995) para solos argilosos os valores típicos de c' estão acima de 1,5.

Com os valores de umidade e massas específicas aparentes secas, calculadas a cada sequência de golpes, também são traçadas as famílias de curvas de compactação (Figura 3.9). A inclinação do ramo seco da curva correspondente a 12 golpes fornece o coeficiente d' . Os solos de comportamento laterítico apresentam d' superior a 20.

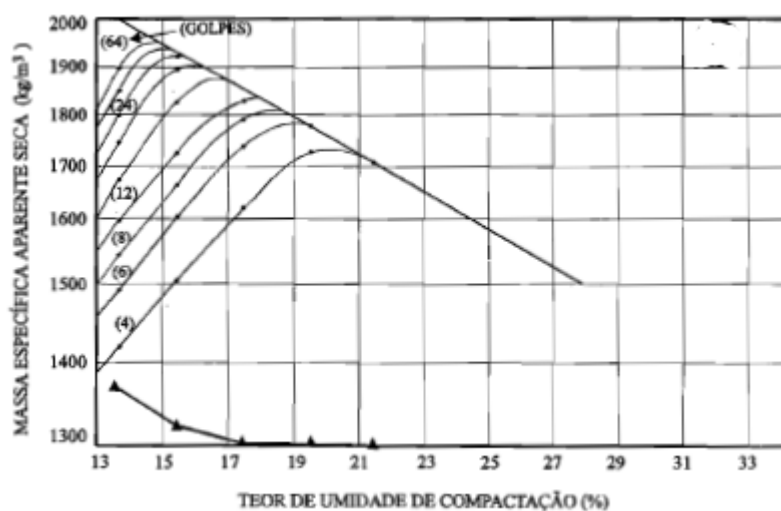


Figura 3.9 Curvas de compactação do ensaio Mini-MCV (Nogami e Villibor, 1995)

3.4.2.

Ensaio de perda de massa por imersão

O ensaio de perda de massa por imersão tem como objetivo a determinação do parâmetro e' utilizado na classificação MCT. Este ensaio consiste em extrair parcialmente os corpos de prova obtidos na compactação Mini-MCV, de modo que fiquem com 1 cm de saliência (Figura 3.10 a) e, em seguida, colocá-los horizontalmente sobre um suporte dentro de uma recipiente de imersão. Logo em seguida, deve-se encher o recipiente a fim de cobrir os corpos de prova e, abaixo

da saliência, devem ser colocadas cápsulas (previamente pesadas) de modo a armazenar o material que desagrega (Figura 3.10 b). Depois de 20h de imersão, determina-se a massa seca do material desprendido. A relação entre a massa seca desprendida e a massa seca inicial do material saliente estabelece a perda de massa por imersão (P_i).



Figura 3.10 (a) Corpos de prova extraídos parcialmente. (b) Corpos de prova submersos.

A partir do valor de P_i e do coeficiente d' obtido no ensaio Mini-MCV, é possível obter o último coeficiente (e') necessário para a classificação MCT, pelo uso da expressão 3.2.

$$e' = \left(\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'} \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

Dispondo-se dos coeficientes classificatórios (c' e e') obtidos nos ensaios de Compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão é possível classificar os solos lateríticos de acordo com a Metodologia MCT, com utilização do Gráfico Classificatório proposto por Nogami e Villibor (1981) (Figura 3.11).

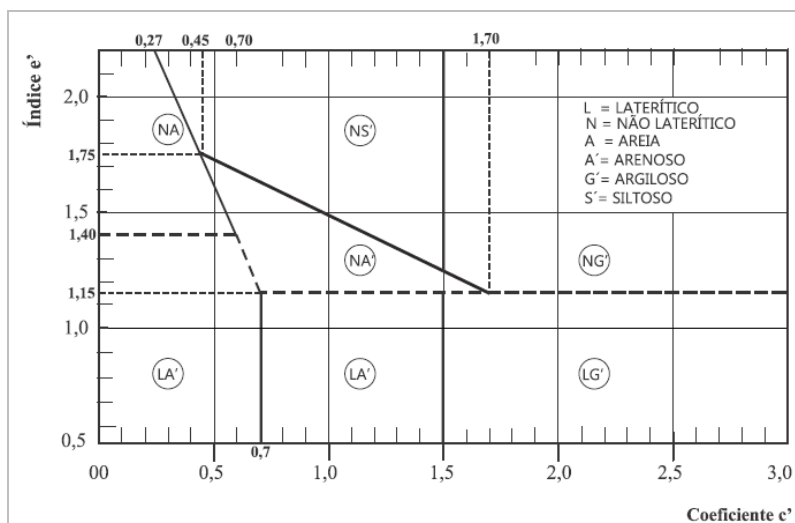


Figura 3.11 Gráfico classificatório da metodologia MCT.

3.5. Ensaio de caracterização física

3.5.1. Densidade relativa dos grãos

A densidade relativa dos grãos é a relação entre o peso específico das partículas sólidas (γ_g), e o peso específico de água pura a 4 °C. A determinação da densidade relativa dos grãos foi realizada utilizando o equipamento Pentapycnometro modelo PENTAPYC 5200e da “Quantachrome Instruments” (Figura 3.12). Foram utilizados cerca de 30 g de material passado na peneira de abertura 0,42 mm e seco em estufa por 24 horas. Este ensaio foi realizado no solo puro, no PET triturado e nas misturas de solo com pó de PET e com PET triturado.

Devido à necessidade de passar o material em uma peneira (abertura de 0,42 mm) o ensaio não foi realizado nas misturas com fibras. Para estas misturas a densidade relativa foi calculada baseando-se nas densidades relativas do solo puro e das fibras.



Figura 3.12 Equipamento Pentapycnometro modelo PENTAPYC 5200e.

Este aparelho é capaz de medir o volume dos grãos. Uma vez inserida a massa seca do material ensaiado, como dado de entrada, é possível obter a densidade relativa dos grãos.

3.5.2. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg consistem na determinação do estado de consistência do solo através da obtenção do limite de liquidez (L.L.), do limite de plasticidade (L.P.) e do cálculo do índice de plasticidade (I.P.).

Os ensaios foram realizados de acordo com as seguintes normas: NBR 56 6459/2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e a NBR 7180/2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. O cálculo do Índice de Plasticidade por sua vez é dado pelo valor do limite de liquidez subtraído do valor do limite de plasticidade.

Os ensaios de limite de liquidez e plasticidade foram realizados no solo puro e nas misturas com pó de PET, visto que apenas a adição de pó de PET altera a interação do solo com a água.

3.5.3. Análise granulométrica

A análise granulométrica tem o objetivo de determinar as dimensões das partículas que constituem a amostra e a proporção de cada fração que compõe o solo em relação ao peso de solo seco.

O ensaio foi executado baseado na norma da ABNT. NBR 7181/2016: Solo – Análise granulométrica, e a classificação desta granulometria é feita baseada na NBR 6502/95.

Os ensaios de análise granulométrica foram realizados no solo puro e no PET triturado. A curva granulométrica do pó de PET foi extraída do trabalho de Louzada (2015), visto que foi utilizado o mesmo material de sua pesquisa.

Para determinar a curva granulométrica do solo 1000 g de material foi inicialmente passado na peneira de 2 mm de abertura, sendo observado que não havia material retido e, portanto, não havia fração grossa neste solo. Do material passante na peneira de 2 mm de abertura foram separadas cerca de 70 g de solo que foi misturado com defloculante, deixado em repouso por 24 horas, e em seguida, submetido à dispersão mecânica. Feito isto, o material foi colocado em uma proveta de 1000 ml cujo restante do volume foi completado com água destilada para realização da sedimentação. Após a sedimentação, o material foi

lavado na peneira de 0,075 mm de abertura. O material retido foi seco em estufa por 24 horas e em seguida submetido no peneiramento fino.

Para o PET triturado foi realizado apenas o peneiramento fino visto que não havia material passante na peneira de abertura 0,075 mm.

3.5.4. Compactação em equipamento miniatura

O ensaio de compactação em equipamento miniatura foi realizado segundo a norma DNER-ME 228/94: Solos – Compactação em Equipamento Miniatura. Este ensaio correlaciona um teor de umidade com a massa específica aparente seca, para uma determinada energia de compactação aplicada. Desta forma, é possível traçar a curva de compactação por meio da obtenção de pontos que definam os ramos seco e úmido.

Assim como os ensaios da metodologia MCT este ensaio só pode ser realizado em materiais com menos de 10 % de material retido na peneira de 2 mm de abertura. O equipamento utilizado na compactação com equipamento miniatura é o mesmo apresentado na Figura 3.7.

Devido às suas dimensões, a compactação em equipamento miniatura apresenta como vantagens a redução considerável da quantidade de amostra utilizada na obtenção de cada ponto da curva, cerca de 200 g. Consequentemente, também existe uma redução do esforço na aplicação dos golpes. Além disto, este ensaio permite uma medição mais exata da altura do corpo de prova e uma maior homogeneidade dos corpos de prova ensaiados.

Nesta pesquisa a compactação em equipamento miniatura foi efetuada na energia intermediária (Procedimento B da norma), utilizando soquete com 4,54 kg e 6 golpes em cada lado da amostra. Foi utilizada a energia intermediária, uma vez que a adição de polietileno tereftalato modifica a granulometria do solo, por meio da estabilização granulométrica, e, segundo a norma DNIT 139/2010-ES (pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente), a energia mínima requerida é a intermediária.

3.6. Ensaio de caracterização mecânica

3.6.1. Ensaio de módulo de resiliência

Os ensaios para determinação do módulo resiliente seguiram a norma americana AASHTO T 307/99, intitulada *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*, e foram executados no equipamento triaxial cíclico, da marca ELE International Limited England, pertencente ao INFRALAB da Universidade Federal de Brasília (Figura 3.13). O software utilizado para executar o ensaio foi o UTM41, o qual já vem programado com as especificações da norma americana.

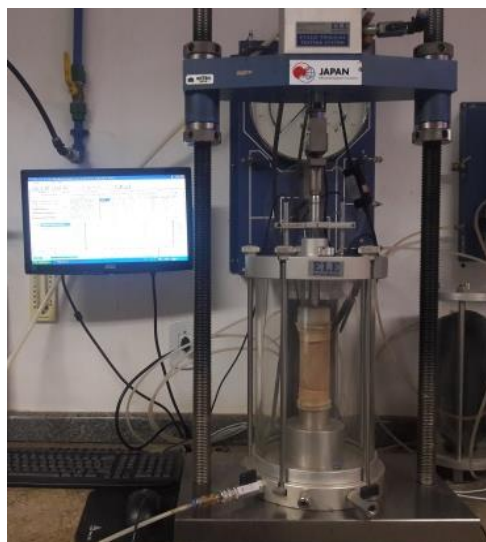


Figura 3.13 Equipamento triaxial cíclico da marca ELE Internatinal Limited England.

O equipamento consiste em uma câmara triaxial com sistema de ar comprimido, que permite aplicação da tensão confinante, pórticos de reação para aplicação da tensão desvio e transdutores do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*), para medição dos deslocamentos verticais.

Os corpos de prova ensaiados possuíam dimensões iniciais de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e foram compactados na umidade ótima, ou seja, densidade aparente seca máxima. Estes corpos de prova foram assentados na base da câmara triaxial sobre um papel filtro e em sua parte superior é colocado um cabeçote (top cap). Feito isto, todo o conjunto foi envolvido por uma membrana de borracha, fixada nas extremidades por o-rings. Logo após, instalou-se o restante da câmara triaxial e fixaram-se os dois LVDTs que servem para medição

dos deslocamentos verticais do corpo de prova. Por fim, posicionou-se a célula de carga, de modo que houvesse transferência de carga ao corpo de prova e fez-se um ajuste fino nos LVDTs.

O ensaio triaxial cíclico é comumente dividido em duas fases, a primeira é denominada condicionamento, na qual se aplica um par de tensões, confinante e tensão desvio, de modo a eliminar as deformações plásticas (permanentes) e reduzir o efeito da história de tensões no valor do módulo de resiliência a ser obtido. Nos ensaios triaxiais cíclicos realizados a fase de condicionamento consistiu na aplicação de 500 repetições de carga, com tensão desvio de 103,4 MPa e tensão confinante de igual valor, segundo especifica a norma americana AASHTO T 307/99.

Na fase seguinte, de determinação do módulo de resiliência, aplicou-se uma sequência de 15 pares de tensões (Tabela 3.5), de acordo com valores especificados pela norma AASHTO T 307/99, com 100 aplicações de carga por ciclo. Todas as cargas repetidas são aplicadas numa frequência de 1 Hz, sendo 0,1 segundo de aplicação e 0,9 segundos de intervalo.

Tabela 3.5 Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência (AASHTO T 307/99).

Tensão Confinante (σ_3) kPa	Tensão Desvio (σ_d) kPa
20,7	20,7
	41,4
	62,1
34,5	34,5
	68,9
	103,4
68,9	68,9
	137,9
	206,8
103,4	68,9
	103,4
	206,8
137,9	103,4
	137,9
	275,8

Conforme citado anteriormente, os ensaios de módulo de resiliência foram executados com o corpo de prova em duas condições. A primeira com o corpo de prova recém moldado e a segunda com o corpo de prova aquecido. Esta segunda condição tinha como objetivo avaliar o efeito do aquecimento sobre os valores de M_R .

A ideia de verificar se o aquecimento das amostras produzia algum efeito nos parâmetros mecânicos foi inspirada no estudo de Garcia (2016), que ao aquecer misturas de areia com polímero promoveu uma cimentação do material elevando os parâmetros de resistência obtidos em ensaios de compressão simples e ensaios triaxiais.

O procedimento de aquecimento adotado por Garcia (2016) consistia em levar os corpos de prova à estufa, a uma temperatura de 150 °C, por 1 hora. Na presente pesquisa, este procedimento sofreu algumas variações. A temperatura adotada foi de 110 °C, visto que era a temperatura padrão utilizada nas estufas coletivas do laboratório, não havendo possibilidade de alteração. Com relação ao tempo de aquecimento, os corpos de prova foram aquecidos inicialmente por 1 hora e após esfriarem eram ensaiadas no triaxial cíclico. Ao fim dos ensaios, os corpos de prova retornaram para a estufa permanecendo por mais 2 horas (totalizando 3 horas de aquecimento) e depois eram ensaiados novamente. Este segundo ciclo de aquecimento tinha a finalidade de avaliar a influência do tempo de aquecimento sobre os valores de M_R .

3.7. Dimensionamento do pavimento típico

O dimensionamento do pavimento foi realizado utilizando-se o programa computacional SisPav, desenvolvido pela COPPE/UFRJ. O programa utiliza um método de dimensionamento mecanístico-empírico no qual os materiais das camadas do pavimento podem ser considerados como elástico-lineares ou não lineares e terem comportamento traduzido por diferentes modelos constitutivos.

O SisPav permite a verificação dos dados de entrada (tráfego, clima, estrutura e materiais do pavimento) e requisitos definidos pelo projetista e informa a vida de projeto que a estrutura pode suportar ou dimensiona a espessura da camada desejada de modo a atender aos requisitos pré-estabelecidos.

O fluxograma básico utilizado para o desenvolvimento do SisPav segue apresentado na Figura 3.14.

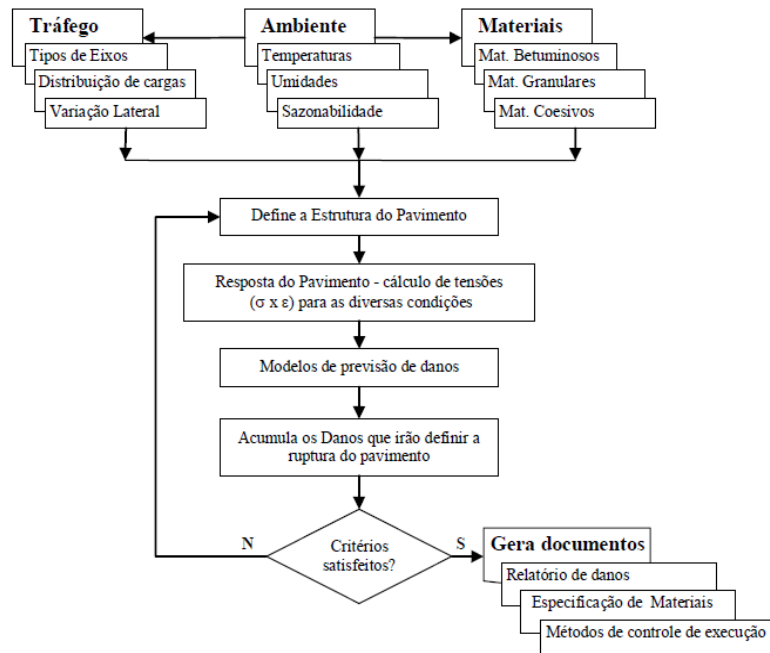


Figura 3.14 Fluxograma do método de análise e dimensionamento adotado pelo SisPav (Franco, 2007).

Para o dimensionamento em questão foi considerada a estrutura do pavimento ilustrada na Figura 3.15. Nesta estrutura as propriedades mecânicas do revestimento e do sub-leito permanecem constantes e apenas a espessura da base varia de acordo com os parâmetros resilientes de cada mistura testada.

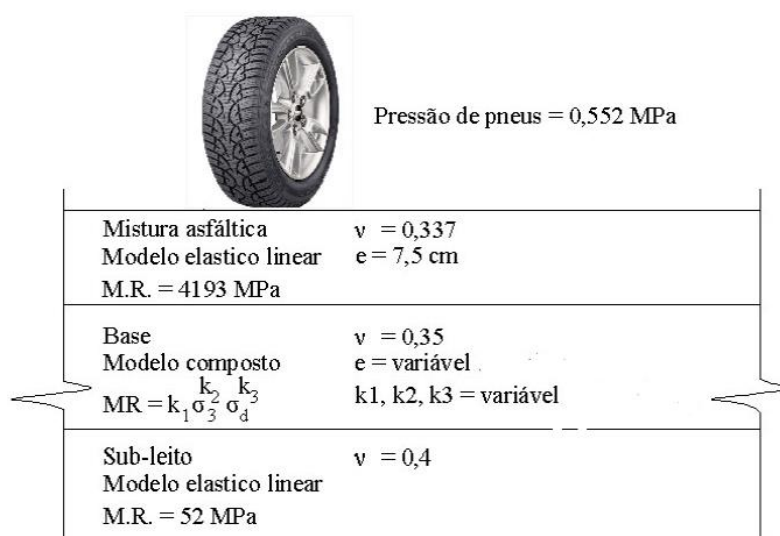
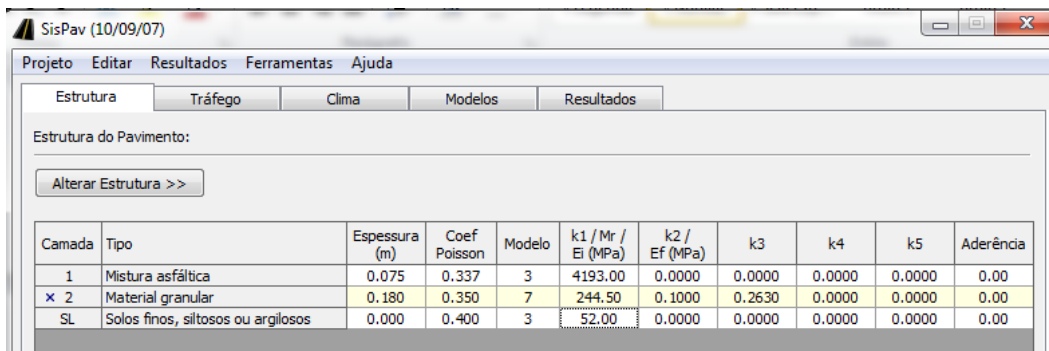


Figura 3.15 Estrutura do Pavimento adotada (Vizcarra, 2010).

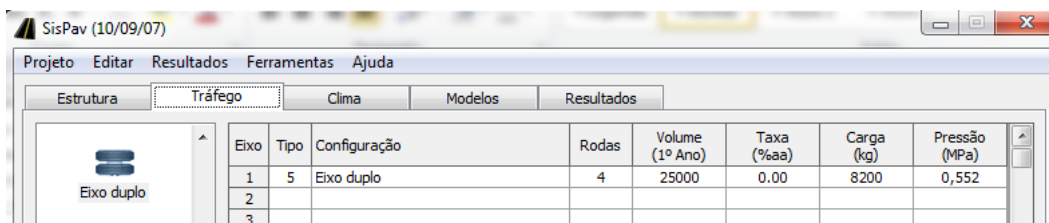
A estrutura considerada foi introduzida na aba “Estrutura” do SisPav, conforme exemplificado na Figura 3.16.



Camada	Tipo	Espessura (m)	Coef Poisson	Modelo	k1 / Mr / Ei (MPa)	k2 / Ef (MPa)	k3	k4	k5	Aderência
1	Mistura asfáltica	0.075	0.337	3	4193.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
x 2	Material granular	0.180	0.350	7	244.50	0.1000	0.2630	0.0000	0.0000	0.00
SL	Solos finos, siltosos ou argilosos	0.000	0.400	3	52.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

Figura 3.16 Exemplo de estrutura do pavimento introduzida no SisPav.

Na aba “Tráfego” foi adotada a configuração de eixo duplo, 4 rodas, com carga de 8200 kg e um volume de 25000 repetições, conforme apresentado na Figura 3.17.



Eixo	Tipo	Configuração	Rodas	Volume (1º Ano)	Taxa (%aa)	Carga (kg)	Pressão (MPa)
1	5	Eixo duplo	4	25000	0.00	8200	0,552
2							
3							

Figura 3.17 Configuração do tráfego introduzida no SisPav.

Para o tráfego em questão a variação do número de repetições do eixo padrão, N, em função da vida útil do projeto segue apresentado na Tabela 6.

Tabela 3.6 Valor de N em função da vida útil para o tráfego considerado.

Vida útil (anos)	N	Vida útil (anos)	N
1	$2,377 \times 10^4$	11	$2,615 \times 10^5$
2	$4,754 \times 10^4$	12	$2,852 \times 10^5$
3	$7,131 \times 10^4$	13	$3,090 \times 10^5$
4	$9,508 \times 10^4$	14	$3,328 \times 10^5$
5	$1,189 \times 10^5$	15	$3,566 \times 10^5$
6	$1,426 \times 10^5$	16	$3,803 \times 10^5$
7	$1,664 \times 10^5$	17	$4,041 \times 10^5$
8	$1,902 \times 10^5$	18	$4,279 \times 10^5$
9	$2,139 \times 10^5$	19	$4,516 \times 10^5$
10	$2,377 \times 10^5$	20	$4,754 \times 10^5$

Os dados de clima admitidos foram referentes aos da cidade de Brasília, uma vez que foi utilizado um solo representativo da região. O banco de dados interno de clima do programa foi obtido das Normas Climatológicas, segundo descreve Franco (2007).

3.8.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia Eletrônica de Varredura é um ensaio que permite analisar a estrutura de um material sólido em escala micrométrica ou submicrométrica. Neste ensaio, a área a ser analisada é irradiada por um fino feixe de elétrons, que interage com a superfície emitindo uma série de radiações. Estas radiações são captadas e fornecem informações como topografia da superfície, composição e cristalografia da amostra (Maliska, 2007).

O MEV pode alcançar um aumento de até 900.000 vezes, sendo normalmente adotado um aumento de 10.000 vezes para análises de materiais. Este aumento é ainda muito maior do que o aumento conseguido pela microscopia ótica, que atinge no máximo 2.000 vezes. Por este motivo, a microscopia eletrônica de varredura é tão mais eficiente na obtenção de informações microestruturais do que a microscopia óptica. Devido à elevada profundidade de foco o MEV fornece imagens com aparência tridimensional que são de fácil análise (Maliska, 2007).

Acoplado ao ensaio de MEV pode ser realizada a microanálise por energia dispersiva (EDX), que permite a análise qualitativa e quantitativa da composição química da amostra em observação. Para realização do EDX é necessário fazer uma adaptação na câmara do aparelho que possibilita a detecção, captação e análise dos raios-X característicos emitidos pela amostra (Maliska, 2007).

Nesta pesquisa foi realizado MEV em quatro amostras: (i) solo puro, (ii) S90P10, (iii) S97T03 e (iv) S90P10 com 3 horas de aquecimento. O solo puro foi ensaiado para servir de referência para as demais amostras. A mistura com 10 % de pó de PET foi escolhida por ter fornecido melhores resultados mecânicos quando comparada as outras misturas com pó de PET. Pelo mesmo motivo a mistura com 3 % de PET triturado foi também escolhida. As misturas com fibra não foram ensaiadas por não terem fornecido resultados tão satisfatórios quanto às

misturas com pó de PET e PET triturado. Devido ao fato de o aquecimento ter se mostrado vantajoso, em alguns casos, a autora optou por ensaiar uma quarta amostra com a mistura aquecida que apresentou os melhores resultados mecânicos (S90P10 aquecida por 3 horas).

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica da PUC-Rio, no equipamento apresentado na Figura 3.18, modelo JSM-6510LV, onde foi aplicado baixo vácuo, por conta da umidade das amostras. Devido ao fato das amostras não serem condutoras, foi necessário fazer o recobrimento das mesmas com carbono para poder executar o ensaio.



Figura 3.18 (a) Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura. (b) Amostras no equipamento MEV.

4 Resultados e Análises

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises dos ensaios realizados nesta pesquisa, para as amostras de solo e para as misturas de solo-PET. Estes resultados auxiliaram na compreensão das características mecânicas das misturas e como a inserção de pó de PET, PET triturado e fibra de PET influencia o comportamento destes materiais.

4.2. Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)

Com relação aos resultados dos ensaios Mini-MCV e perda de massa por imersão da metodologia MCT, foram obtidos os seguintes parâmetros:

- $c' = 1,92$
- $d' = 134$
- $e' = 0,89$.

A Figura 4.1 apresenta o resultado da classificação MCT para o solo puro.

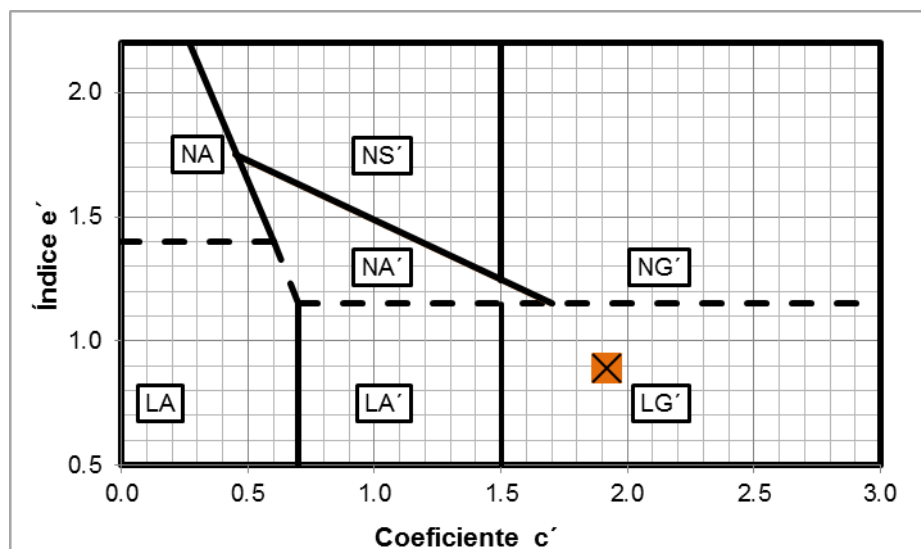


Figura 4.1 Gráfico da classificação MCT para o solo puro.

O solo é classificado como LG', ou seja, solo laterítico argiloso. De acordo com a classificação MCT estes solos possuem elevada capacidade de suporte, baixa expansão, média a elevada contração, baixa permeabilidade. Devido às suas características estes solos podem ser utilizados como subleito, reforço do subleito ou base de pavimentos. A classificação MCT permite retificar as informações referentes ao comportamento deste tipo de solo estabelecidas pelas metodologias de classificação tradicionais (AASHTO e SUCS) definidas no item 4.3.3.

4.3.

Ensaio de caracterização física

4.3.1.

Densidade Relativa dos Grãos

Os valores da densidade relativa dos grãos (Gs) do solo puro obtido no Pentapycnometro segue apresentada na Tabela 4.1. Na mesma tabela está apresentado o valor de Gs do pó de PET e do pó de PET, o qual foi determinado pela média do valor do pó de PET obtido por Louzada (2015) e o valor do PET triturado ensaiado nesta pesquisa no Pentapycnometro ($G_s = 1,39$). Já o valor de Gs da fibra de PET foi extraído do trabalho de Senez (2016).

Tabela 4.1 Densidade relativa dos grãos.

Material	Gs
Solo Puro	2,70
PET triturado	1,41
Pó de PET	1,41
Fibra de PET	1,27

Observando a tabela nota-se que a fibra é mais leve que o PET triturado e o pó de PET e que todos os materiais alternativos são mais leves que o solo puro.

O ensaio de densidade relativa dos grãos realizado nas misturas de solo com o pó de PET e o PET triturado forneceram os valores apresentados na Tabela 4.2. Nota-se que as densidades obtidas com a inserção do pó de PET são inferiores as obtidas com a inserção de PET triturado. Isto se deve ao fato de ter sido inserido teores muito maiores de pó de PET do que de PET triturado. Também se observa que a queda de densidade é mais acentuada nas misturas com pó do que com

triturado, e isto acontece porque incremento de pó é maior do que o incremento de triturado a cada mistura.

No caso das misturas com fibra, não foi possível a determinação da densidade relativa com utilização do pentapycnometro, tendo em vista que o material usado no ensaio precisava ser peneirado. Desta forma, o valor de Gs foi obtido por cálculo, conhecendo-se a densidade do solo e das fibras. Nota-se que a inserção de fibra praticamente não altera o valor da densidade relativa do solo.

Tabela 4.2 Densidade relativa dos grãos das misturas com PET.

Material	Gs (experimental)
S90P10	2,48
S80P20	2,27
S70P30	2,11
S97T03	2,62
S95T05	2,58
S93T07	2,53
Material	Gs (calculado)
0,25%Fi	2,69
0,50%Fi	2,68

A Figura 4.2 ilustra os dados da Tabela 4.2 e permitem comparação das misturas com o solo puro.

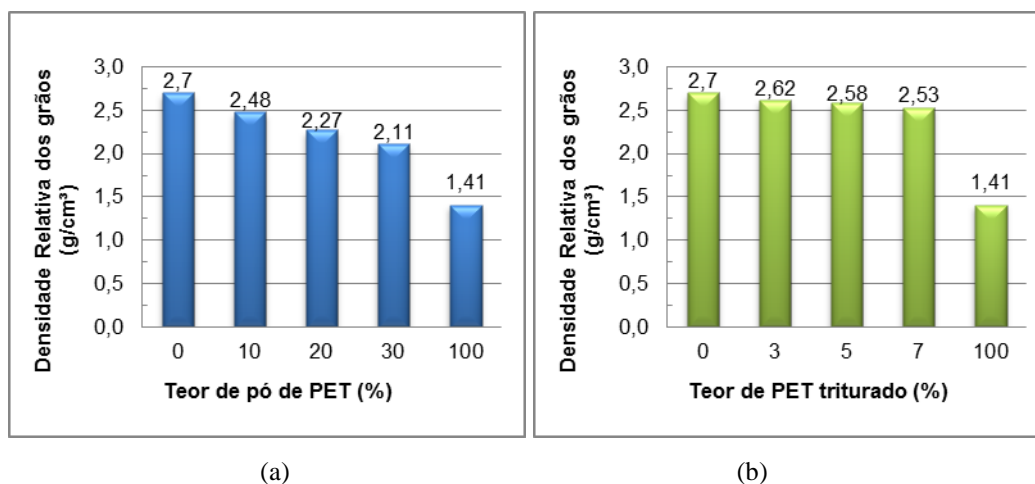


Figura 4.2 (a) Variação da densidade relativa dos grãos nas misturas com pó de PET (b) Variação da densidade relativa dos grãos nas misturas PET triturado.

4.3.2. Limites de Atterberg

Os ensaios de limites de Atterberg foram realizados tanto no solo puro quanto nas misturas com pó de PET, visto que a inserção desse material altera a interação do solo com a água. Os valores obtidos de Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e o valor calculado do Índice de Plasticidade, seguem apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resultados dos limites de Atterberg para o solo puro e para as misturas com pó de PET.

Material	L.L. (%)	L.P. (%)	I.P.
SP	42	27	15
S90P10	36	28	8
S80P20	33	31	2
S70P30	31	N.P.	N.P.

A Figura 4.3a ilustra a variação do limite de liquidez e do limite de plasticidade com a inserção de pó de PET, enquanto que a Figura 4.3b ilustra a variação do índice de plasticidade para os diferentes teores de pó de PET.

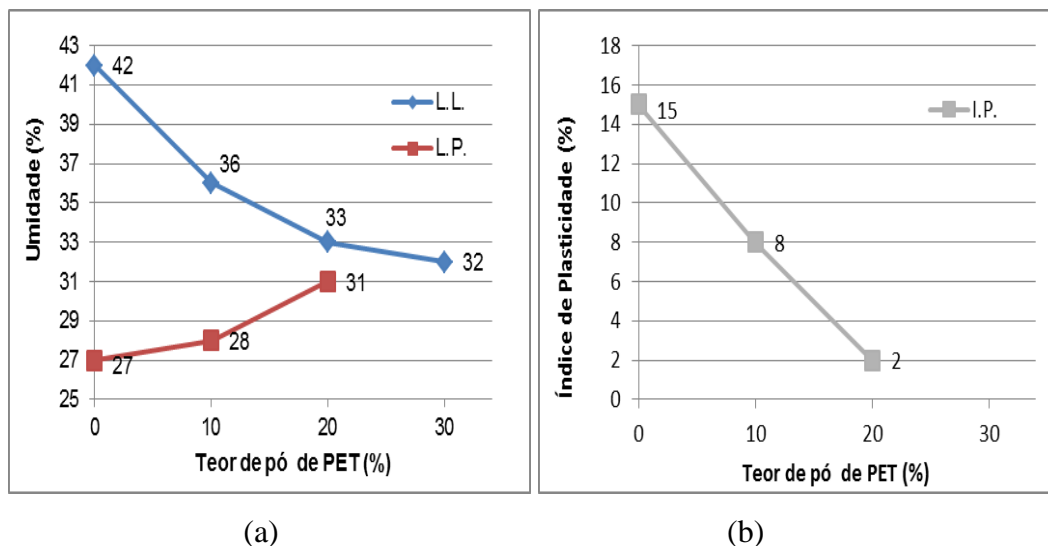


Figura 4.3 (a) Variação do limite de liquidez e limite de plasticidade em função do teor de pó de PET, (b) Variação do índice de plasticidade em função do teor de pó de PET.

O valor de índice de plasticidade obtido para o solo puro revela que o mesmo possui plasticidade média a alta. Este fato já era esperado visto que é um solo rico em argilo-minerais. À medida que foi sendo inserido pó de PET ao solo

a quantidade de argilo minerais foi reduzindo. Desta forma, houve redução do limite de liquidez e aumento do limite de plasticidade, com consequente diminuição do índice de plasticidade. A mistura com 10 % de pó de PET ainda é considerada medianamente plástica, entretanto, a mistura com 20 % de pó torna-se de baixa plasticidade e a mistura com 30 % de pó de PET torna-se não plástica.

Ressalta-se que não foi possível determinar os Limites de Atterberg para o pó de PET puro, devido ao comportamento granular do material, que durante o ensaio não apresentou características plásticas para a sua realização. O mesmo ocorre para o PET triturado e as misturas com este material.

4.3.3. Análise granulométrica

O ensaio de granulometria realizado no solo puro forneceu a curva granulométrica apresentada na Figura 4.4.

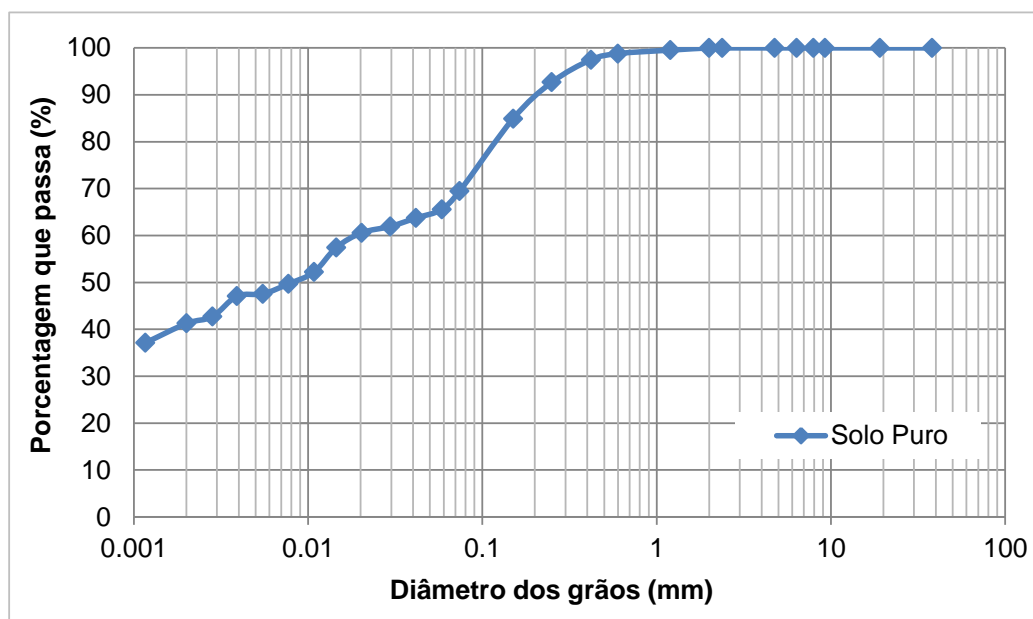


Figura 4.4 Curva granulométrica do solo puro.

A curva granulométrica apresentada revela que o solo puro é constituído das seguintes frações: 41,3 % de argila, 34,5 % de areia e 24,2 % de silte. De acordo com a classificação SUCs o solo é classificado como ML, ou seja, um silte de baixa compressibilidade. De acordo com a classificação AASHTO o solo pertence ao grupo A-7-6, cujo comportamento é sofrível a mau para utilização como subleito. Para determinar estas classificações foram utilizados os dados de

granulometria e os dados de limite de liquidez e índice de plasticidade apresentados anteriormente. Apesar das classificações definidas pela SUCs e pela AASHTO o item 4.2 menciona que pelo fato do solo ser do tipo argiloso laterítico (LG) o mesmo apresenta bom comportamento para aplicação em pavimentação.

O ensaio de granulometria realizado no PET triturado forneceu a curva granulométrica apresentada na Figura 4.5. Na mesma figura segue apresentada a curva granulométrica referente ao pó de PET, extraída do trabalho de Louzada (2015). Os resultados da granulometria revelam que o PET triturado é composto praticamente por partículas com dimensões entre 0,42 e 2 mm. Já o pó de PET é um material composto por partículas com dimensões inferiores a 0,42 mm.

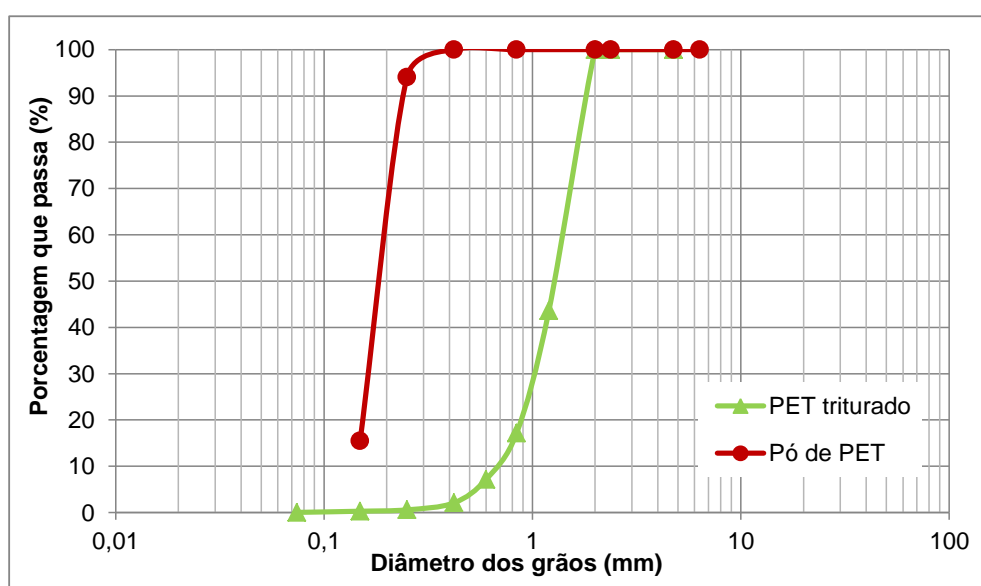


Figura 4.5 Curva granulométrica do PET triturado e do Pó de PET.

4.3.4. Compactação em equipamento miniatura

4.3.4.1. Compactação em equipamento miniatura no solo puro

O ensaio de compactação realizado no solo puro indicou um valor de umidade ótima de 19,8% e um peso específico aparente seco máximo de 16,8 kN/m³. A curva de compactação obtida pode ser visualizada na Figura 4.6.

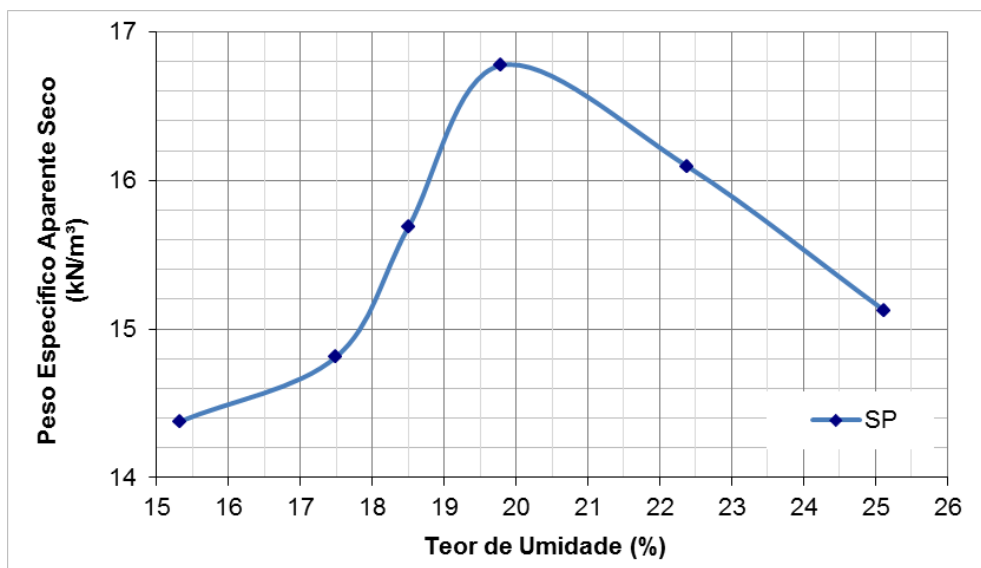


Figura 4.6 Curva de compactação do solo puro.

4.3.4.2.

Compactação em equipamento miniatura nas misturas com pó de PET

Os resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das misturas com pó de PET, obtidos por meio de ensaios de compactação estão apresentados na Tabela 4.4. Para efeito de comparação a tabela também apresenta os valores obtidos para o solo puro.

Tabela 4.4 Resultados da compactação para as misturas com pó de PET.

Material	γ_{dmax} (kN/m³)	W_{ot} (%)
SP	16,8	19,8
S90P10	15,8	19,4
S80P20	15,2	18,7
S70P30	14,2	18,0

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 demonstram que com o aumento da adição de pó de PET ocorre redução nos valores de peso específico aparente seco máximo, decorrente da maior quantidade de material com baixo peso específico inserido na mistura. Também se verifica uma redução, menos acentuada, na umidade ótima. A redução observada no valor do peso específico aparente seco máximo, em relação ao solo puro, atinge 15,5 % para a mistura S70P30, enquanto que a redução da umidade ótima é de 9 %.

As curvas de compactação das misturas com pó de PET podem ser visualizadas na Figura 4.7, assim como a curva de compactação obtida para o solo puro, já apresentada anteriormente.

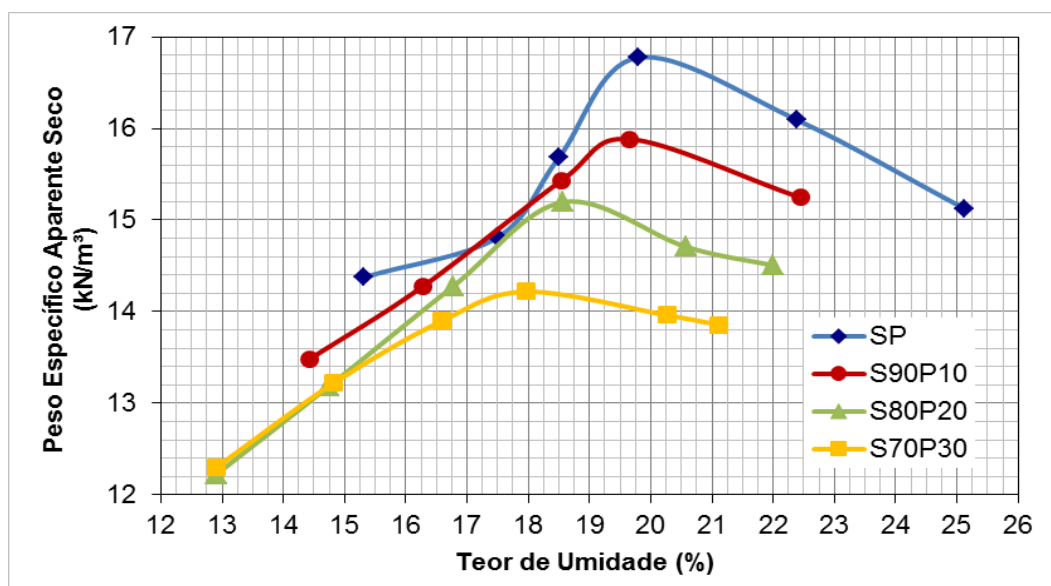


Figura 4.7 Curvas de compactação das misturas com pó PET.

4.3.4.3.

Compactação em equipamento miniatura nas misturas com PET triturado

Os resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das misturas com PET triturado, obtidos por meio de ensaios de compactação estão apresentados na Tabela 4.5. Para efeito de comparação a tabela também apresenta os valores obtidos para o solo puro.

Tabela 4.5 Resultados da compactação para as misturas com PET triturado.

Material	γ_{dmax} (kN/m³)	W_{ot} (%)
SP	16,8	19,8
S97T03	16,5	20,0
S95T05	16,3	20,2
S93T07	16,0	19,2

Devido ao baixo teor de PET triturado adicionado ao solo nota-se, pela Tabela 4.5, que ocorre uma leve redução nos valores de peso específico aparente seco máximo e quase nenhuma alteração nos valores de umidade ótima.

As curvas de compactação das misturas com PET triturado podem ser visualizadas na Figura 4.8, assim como a curva obtida para o solo puro, para efeito de comparação.

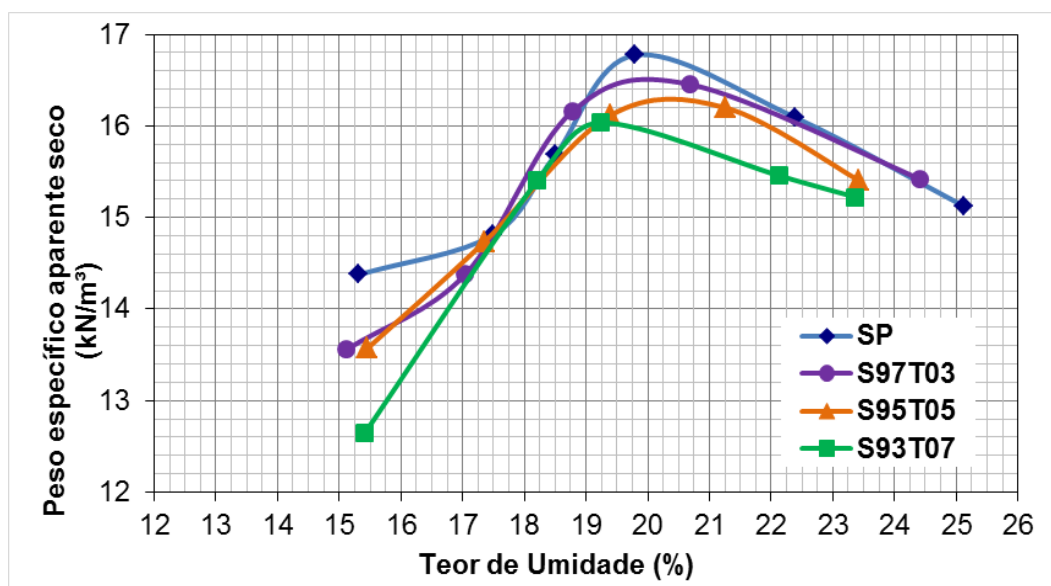


Figura 4.8 Curvas de compactação das misturas com PET triturado.

4.3.4.4.

Compactação em equipamento miniatura nas misturas com fibra de PET

Os resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima das misturas com fibra de PET, obtidos por meio de ensaios de compactação estão apresentados na Tabela 4.6. Para efeito de comparação a tabela também apresenta os valores obtidos para o solo puro.

Tabela 4.6 Resultados da compactação para as misturas com fibra de PET.

Material	γ_{dmax} (kN/m³)	W_{ot} (%)
SP	16,8	19,8
0,25%Fi1.4Dtex	16,8	19,5
0,50%Fi1.4Dtex	16,3	20,8
0,25%Fi3.3Dtex	16,5	20,6
0,50%Fi3.3Dtex	16,0	21,0

A análise da tabela permite verificar que a inserção de fibra provoca pouca ou nenhuma alteração nos valores de peso específico aparente seco máximo. Isto se deve ao fato da massa de fibra inserida na mistura ser muito baixa. É possível

observar ainda que, o aumento do teor de fibra ou o aumento do diâmetro da fibra causa um leve aumento da umidade ótima.

As curvas de compactação das misturas com fibra de PET 1.4 Dtex e 3.3 Dtex estão apresentadas na Figura 4.9 e Figura 4.10, respectivamente.

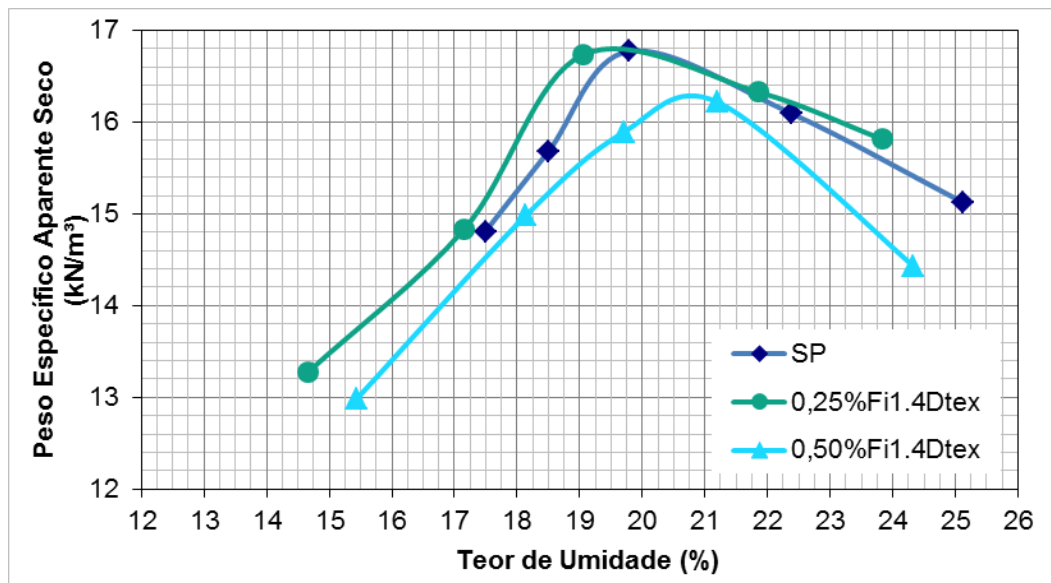


Figura 4.9 Curvas de compactação das misturas com fibra de PET 1.4 Dtex.

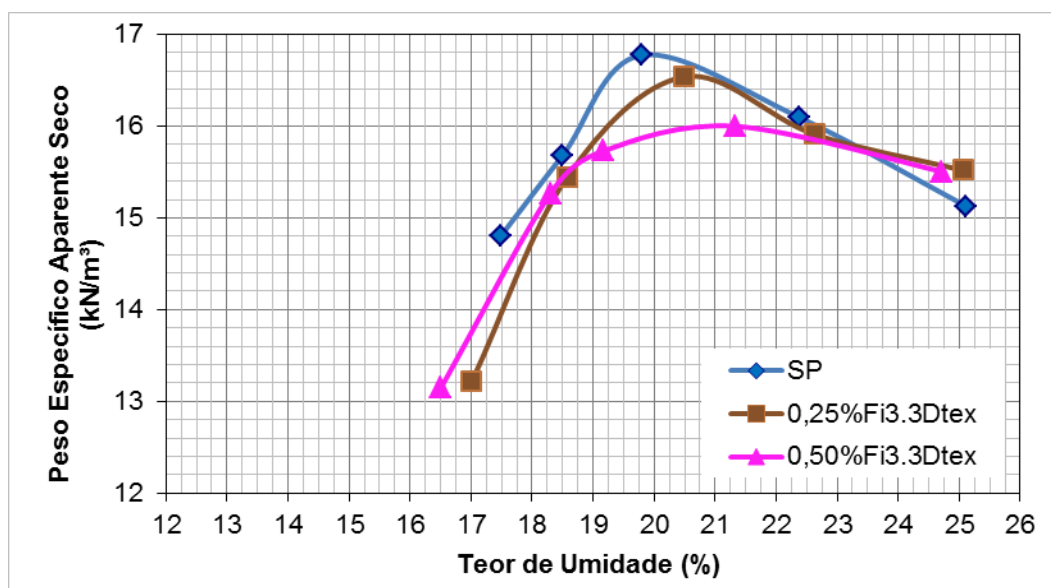


Figura 4.10 Curvas de compactação das misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.

4.4.

Ensaio de caracterização mecânica

Com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico, ensaios de módulo de resiliência foram realizados, sob carregamentos cíclicos, no solo puro e nas misturas com pó de PET, PET triturado e fibras de PET.

Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados no equipamento triaxial ciclico do INFRALAB (UnB) utilizando corpos de prova moldados na umidade ótima de cada material. Além disso, os ensaios foram executados com os corpos de prova recém-moldados e com os corpos de prova aquecidos. Neste tópico são apresentados primeiramente os resultados de M_R obtidos nos CPs recém-compactado (Ítem 4.4.1 a 4.1.4) e depois são apresentados os resultados de M_R obtidos nos CPs aquecidos (Ítem 4.4.5 a 4.4.8).

4.4.1.

Módulo de resiliência do solo puro

Os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, para os pares de tensões ensaiados, mostram que os valores de M_R do solo puro estão compreendidos entre 67 e 168 kPa. A análise destes valores demonstra que o solo tem seu M_R dependente da tensão desviadora, o que é pertinente visto que é um solo argiloso. As constantes de regressão encontradas para o modelo citado seguem apresentadas na Tabela 4.7. Também estão apresentadas as constantes do modelo dependente da tensão confinante, para o qual não houve bom ajuste.

Tabela 4.7 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 para o solo puro.

Material	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
SP	220,85	0,338	0,88	221,20	0,291	0,67

Na Figura 4.11 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.12 o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para o solo puro.

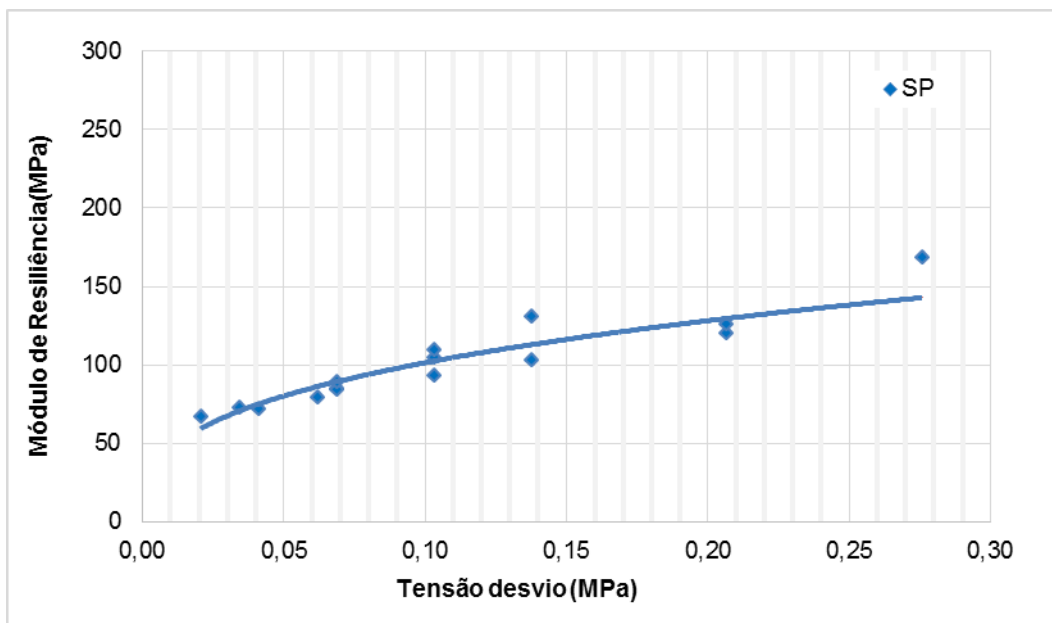


Figura 4.11 Relação do módulo de resiliência do solo puro com a tensão desvio.

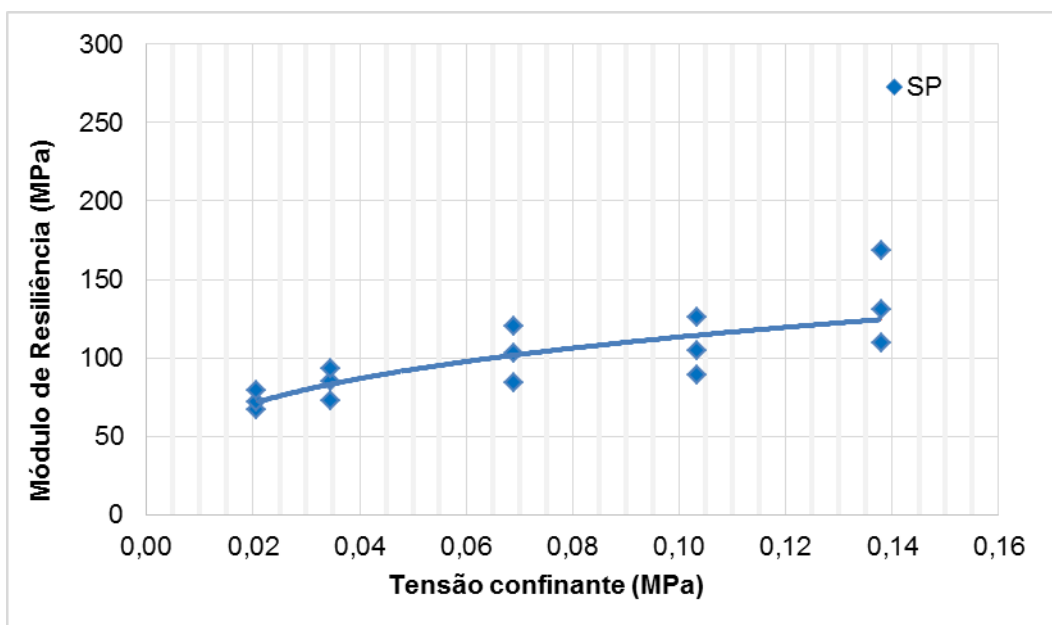


Figura 4.12 Relação do módulo de resiliência do solo puro com a tensão confinante.

Os gráficos acima mostram que o M_R é função tanto da tensão confinante quanto da tensão desvio, embora a influência da σ_d seja maior do que a influência de σ_3 . Como consequência, verifica-se que os módulos de resiliência obtidos para o solo puro ajustam-se muito bem ao modelo composto. Os valores das constantes encontradas para este modelo seguem apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para o solo puro.

Material	K_1	K_2	K_3	R^2
SP	244,50	0,100	0,263	0.92

No caso do modelo composto a representação do módulo de resiliência é dada por uma superfície contida no espaço tridimensional (σ_3 , σ_d , M_R), visto que estes modelos são dependentes da tensão confinante e da tensão desvio. Assim, por meio das superfícies é possível prever o Módulo Resiliente para diversas combinações de tensão confinante e desvio desejadas.

A Figura 4.13 apresenta o gráfico 3D do modelo composto para o solo puro, no qual se observa uma dependência quase uniforme do M_R com ambas as tensões.

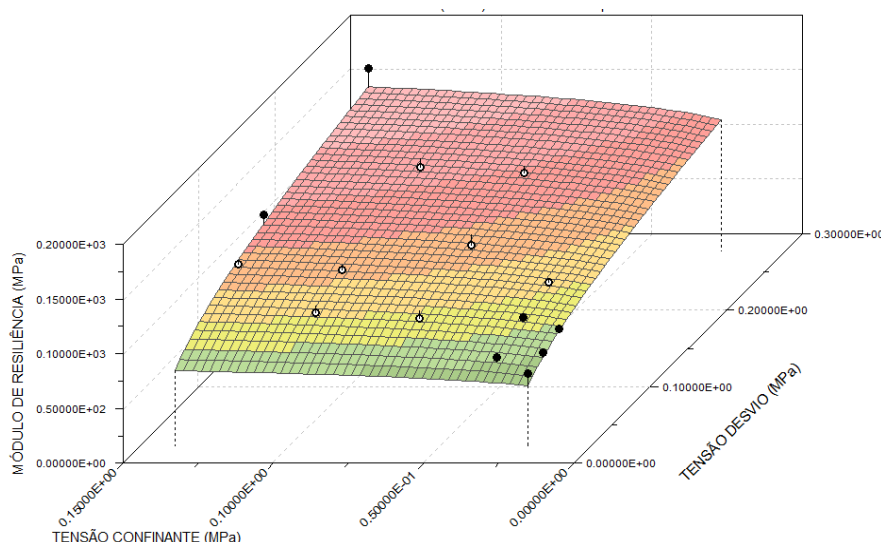


Figura 4.13 Gráfico 3D do modelo composto para o solo puro.

4.4.2.

Módulo de resiliência das misturas com pó de PET

Os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, para os pares de tensões ensaiados, apresentados nas figuras 4.14 e 4.15, mostram que os valores de M_R da mistura S90P10 estão compreendidos entre 115 e 247 MPa, enquanto que para a mistura S80P20 estes valores estão compreendidos entre 79 e 226 MPa e para a mistura S70P30 a variação é de 60 a 148 MPa.

A análise dos módulos de resiliência das misturas com pó de PET indica que estas não se ajustam bem ao modelo dependente somente da tensão desvio, e,

portanto a adição de pó de PET altera o comportamento do solo. No caso do modelo dependente somente da tensão confinante, foi verificado que houve bom ajuste somente da mistura S90P10. Nota-se, de modo geral, que as misturas com pó de PET não são dependentes exclusivamente de uma das tensões. Os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de correlação (R^2) para os dois modelos citados estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET.

Material	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
S90P10	305,61	0,202	0,526	380,92	0,251	0,840
S80P20	98,23	-0,083	0,026	253,12	0,263	0,271
S70P30	38,69	-0,289	0,705	53,18	-0,136	0,161

Na Figura 4.14 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.15 o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para as misturas com pó de PET.

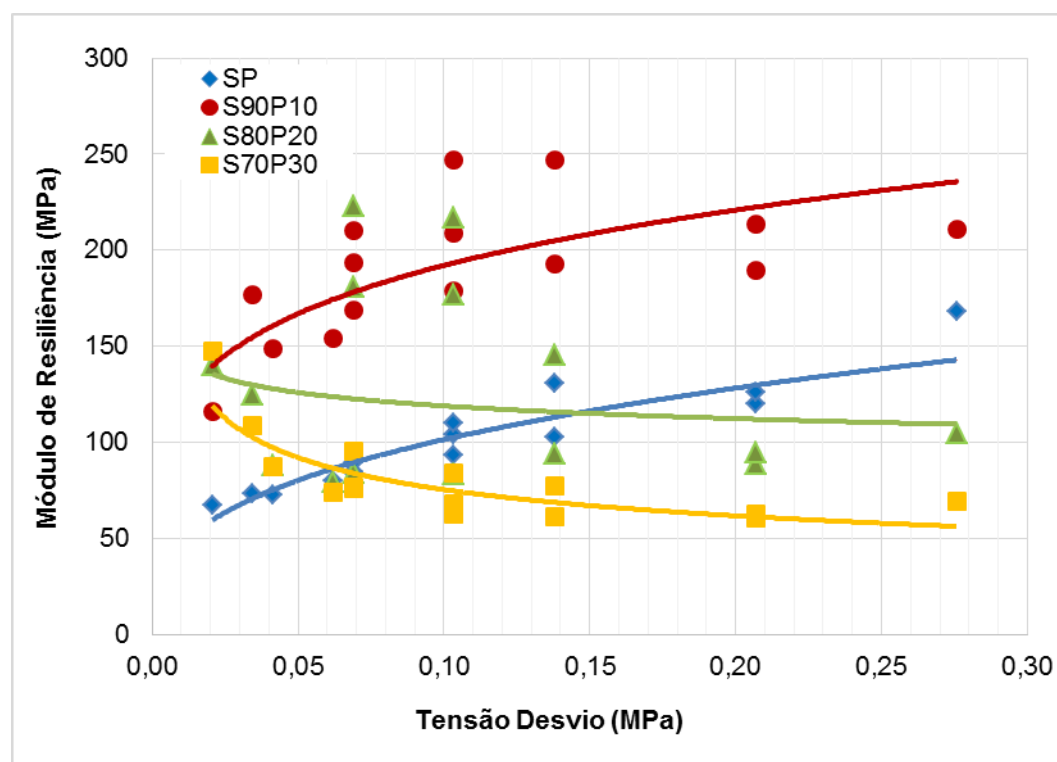


Figura 4.14 Relação do módulo de resiliência das misturas com pó de PET com a tensão desvio.

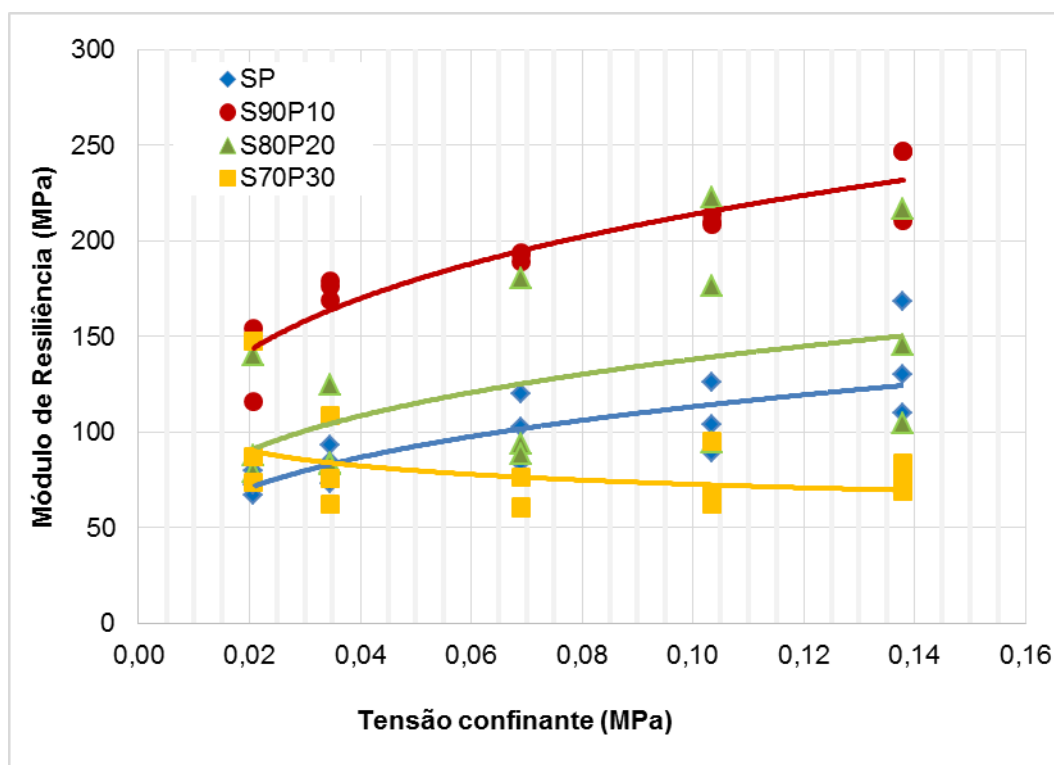


Figura 4.15 Relação do módulo de resiliência das misturas com pó de PET com a tensão confinante.

Apesar de não apresentarem boas correlações o gráfico da Figura 4.14 e da Figura 4.15 permitem uma rápida constatação de que os valores de M_R nas misturas decrescem com o aumento do teor de pó de PET adicionado. Ainda, nas misturas S90P10 e S80P20 os valores de M_R foram superiores ao do solo puro, indicando aumento na rigidez do material, enquanto que nas mistura S70P30 foram inferiores a referência. Além disso, é possível verificar que o M_R da mistura S90P10 possui uma dependência maior com a tensão confinante do que com a tensão desvio.

O fato da mistura S90P10 ter apresentado maior rigidez que as demais misturas indica que o teor de 10 % pó de PET é mais adequado para promover uma estabilização granulométrica. Isto quer dizer que na mistura S90P10 os grãos menores preenchem melhor os vazios deixados pelos grãos maiores, aumentando o contato entre eles e consequentemente melhorando o desempenho mecânico do material.

As análises dos valores de M_R que consideram tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio indicam que as misturas com pó de PET ajustam-se bem ao modelo composto. Os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de

correlação (R^2) encontrados para este modelo para cada mistura seguem apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET.

Material	K_1	K_2	K_3	R^2
S90P10	385,44	0,228	0,031	0,85
S80P20	160,88	0,690	-0.705	0,87
S70P30	45,52	0,160	-0.409	0,81

Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam as superfícies no espaço tridimensional que foram geradas por ajuste baseados no modelo composto para as misturas com pó de PET.

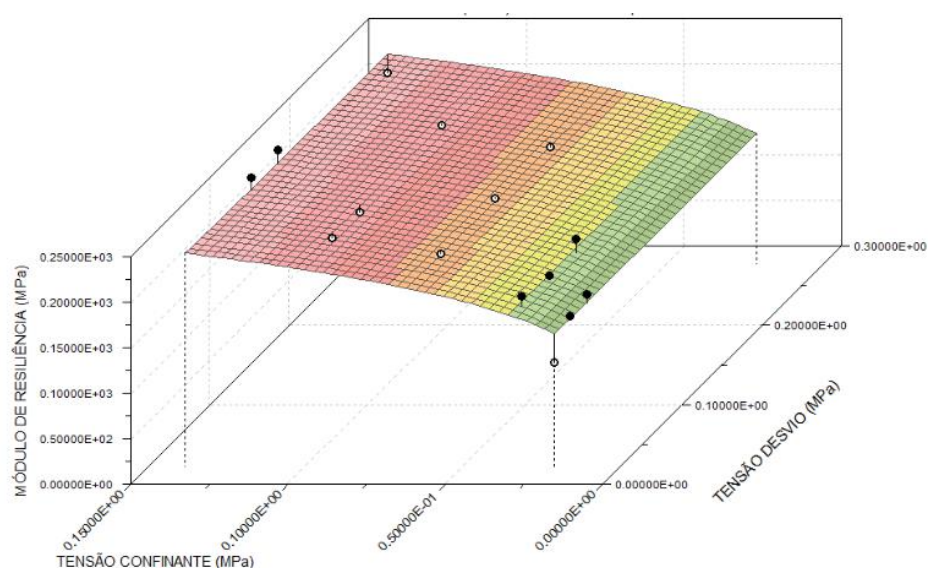


Figura 4.16 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S90P10.

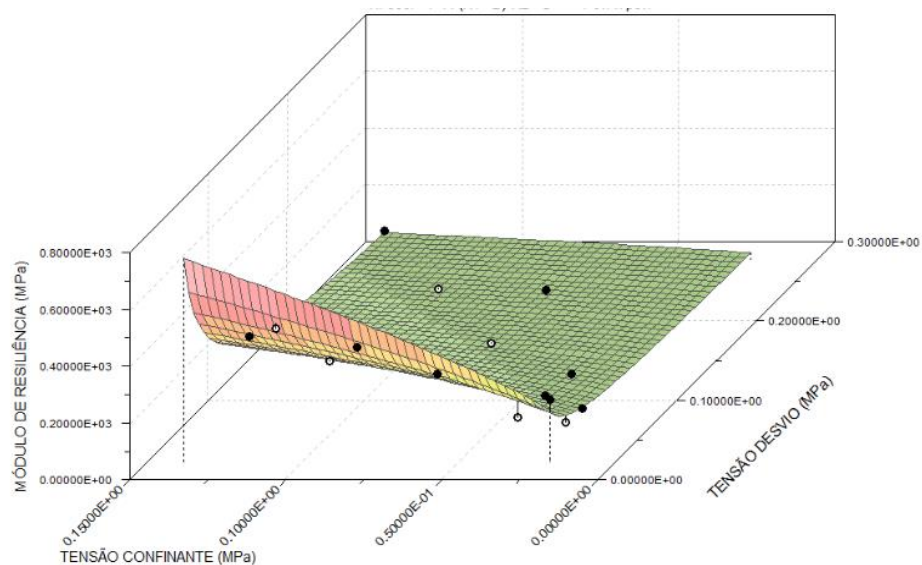


Figura 4.17 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S80P20.

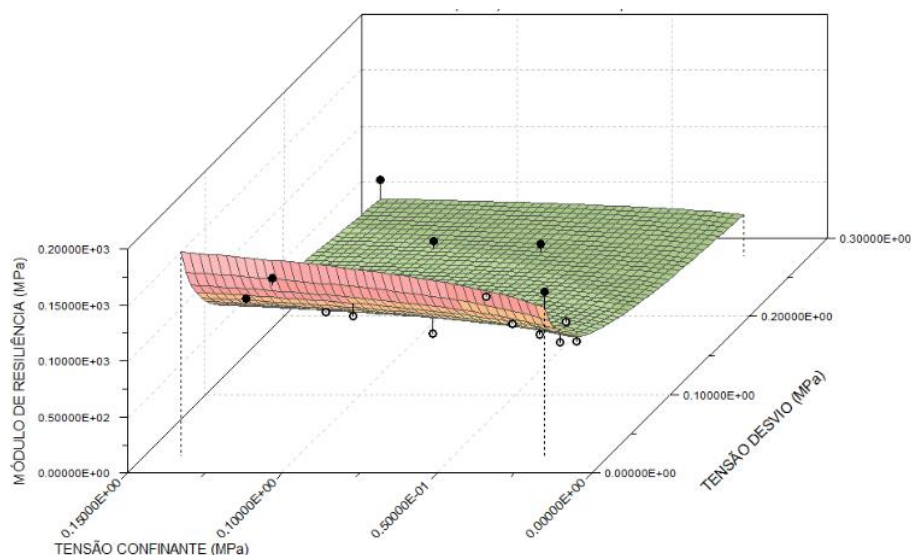


Figura 4.18 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S70P30.

Observa-se dos gráficos apresentados que a superfície da mistura S90P10 está dentro de uma faixa de valores superiores a apresentada para a mistura S80P20, que por sua vez também esta inserida em uma faixa de valores superior a da mistura S70P30.

4.4.3.

Módulo de resiliência das misturas com PET triturado

Os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, para os pares de tensões ensaiados, apresentados nas Figuras 4.19 e 4.20, mostram que os valores de M_R da mistura S97T03 estão compreendidos entre 80 e 183 MPa, enquanto que para a mistura S95T05 estes valores estão compreendidos entre 51 e 99 MPa e para a mistura S93T07 a variação é de 13 a 59 MPa.

A análise dos resultados demonstra que o módulo de resiliência das misturas com PET triturado ajusta-se bem ao modelo dependente somente da tensão desvio, da mesma forma que o comportamento do solo puro. Isto ocorreu porque os teores de PET triturado adicionados ao solo foram bem baixos. No caso do modelo dependente somente da tensão confinante, verifica-se que nenhuma das misturas com PET triturado ajusta-se bem ao modelo. Os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de correlação (R^2) para os modelos citados estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET triturado.

Material	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
S97T03	270,30	0,340	0,88	212,66	0,207	0,34
S95T05	123,54	0,221	0,90	117,27	0,171	0,56
S93T07	97,76	0,486	0,84	64,89	0,272	0,27

Na Figura 4.19 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.20 o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para as misturas com PET triturado.

Os gráficos apresentados permitem observar que os valores de M_R decrescem com o aumento do teor de PET triturado adicionado. Também se observa que a mistura S97T03 apresentou valores de M_R que superam em até 30% os valores encontrados no solo puro, indicando aumento da rigidez. Já as misturas S95T05 e S93T07 apresentaram redução média nos valores de M_R de 35 % e 70 %, respectivamente, em relação ao solo puro, indicando piora no comportamento mecânico do material.

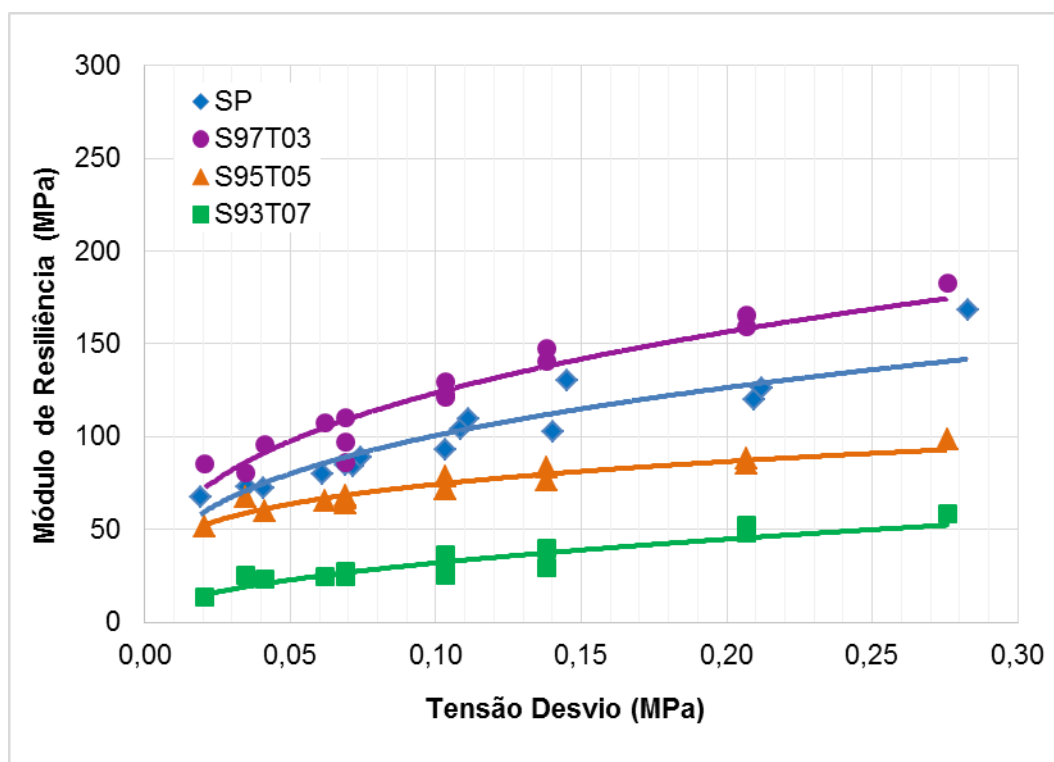


Figura 4.19 Relação do módulo de resiliência das misturas com PET triturado com a tensão desvio.

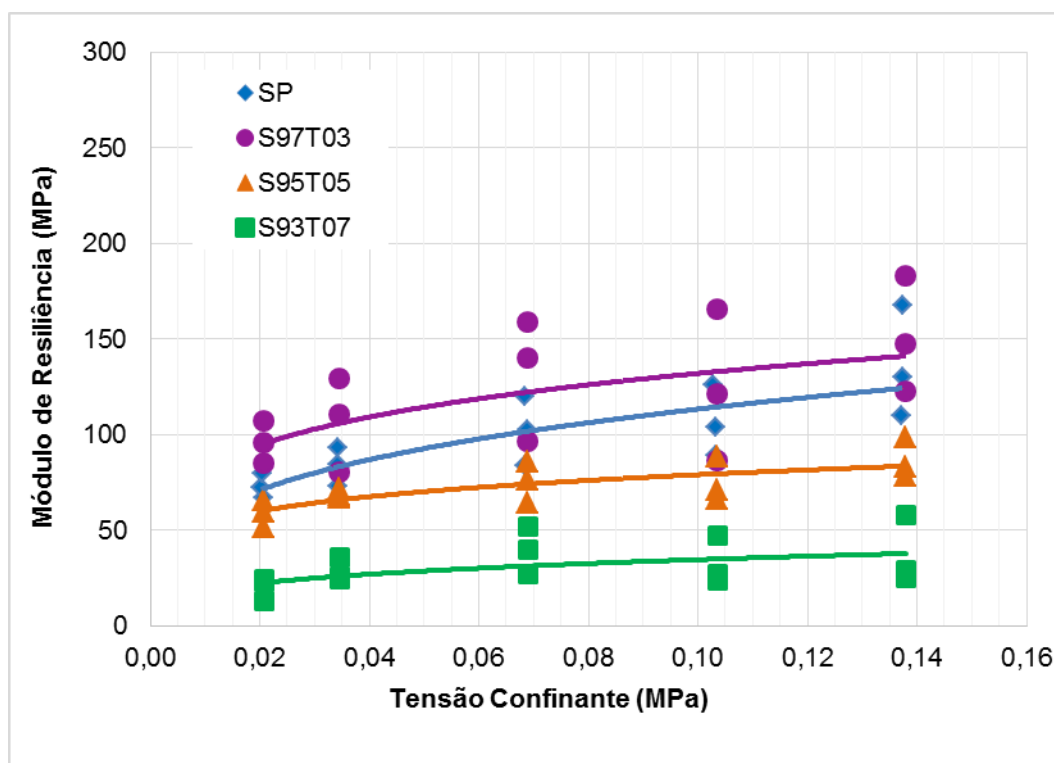


Figura 4.20 Relação do módulo de resiliência das misturas com PET triturado com a tensão confinante.

O fato da mistura S97T03 ter apresentado maior rigidez pode ser justificado pela promoção de uma estabilização granulométrica (em menor escala), proporcionada pela fração mais fina do PET triturado, e pela formação de grumos compostos por partículas de solo aderidas às partículas maiores e mais lamelares do PET triturado (em maior escala), conferindo melhor desempenho mecânico ao material. Entretanto, para teores de PET triturado acima de 3 % provavelmente ocorre mais contato entre grãos de PET e conseqüentemente menor formação e resistência dos grumos, reduzindo a rigidez do material.

As análises dos valores de M_R que consideram tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio indicam que as misturas com pó de PET ajustam-se bem ao modelo composto. Os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de correlação (R^2) encontrados para este modelo para cada mistura com PET triturado seguem apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET triturado.

Material	K_1	K_2	K_3	R^2
S97T03	235,89	-0,105	0,411	0,90
S95T05	123,74	0,013	0,209	0,91
S93T07	75,60	-0,206	0,626	0,89

Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23 apresentam as superfícies no espaço tridimensional que foram geradas por ajuste baseados no modelo composto para as misturas com PET triturado.

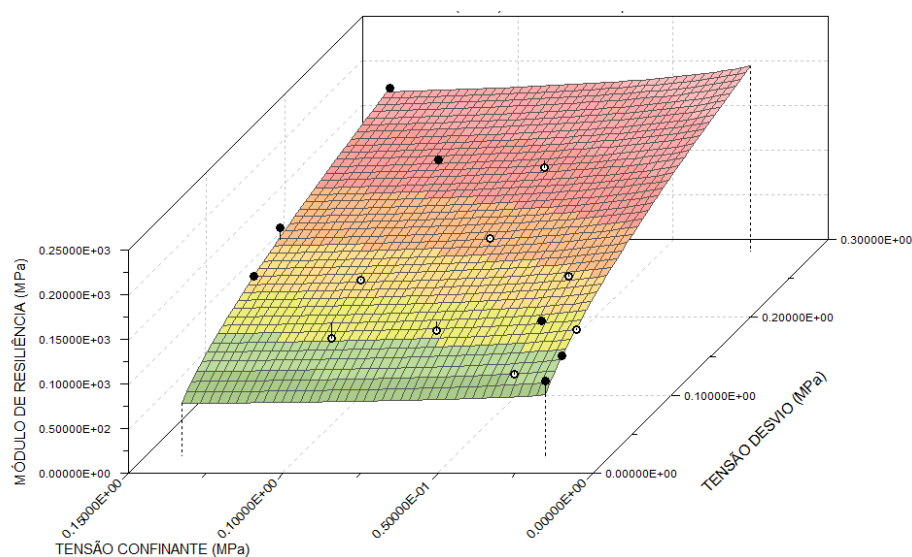


Figura 4.21 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S97T03.

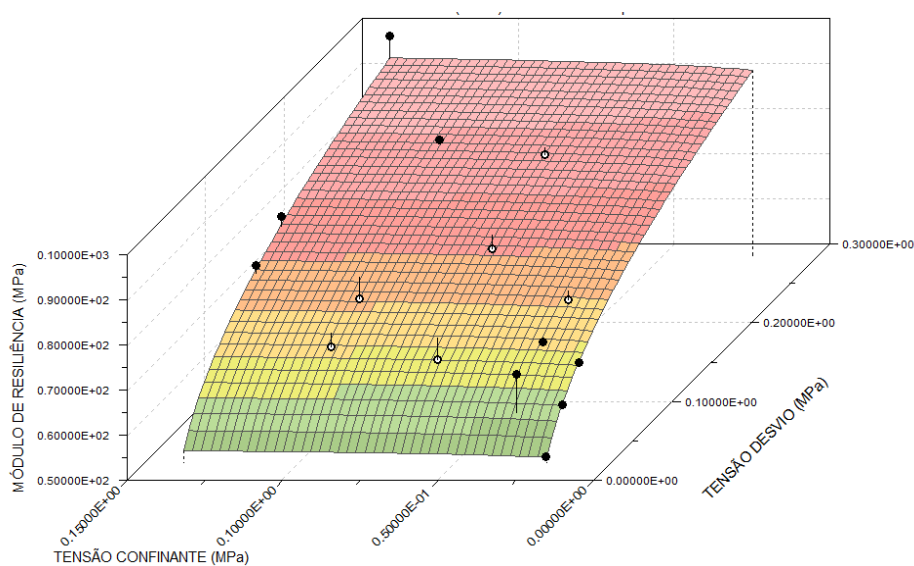


Figura 4.22 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S95T05.

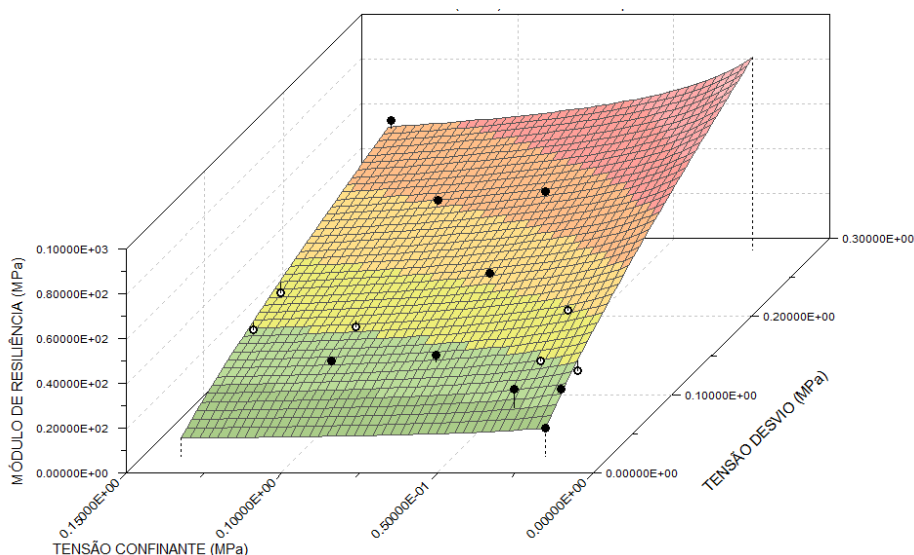


Figura 4.23 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S93T07.

Observando os gráficos é possível notar comportamento bem semelhante entre as superfícies apresentadas. Todas as misturas são ambas dependentes da tensão desvio e da tensão confinante, sendo a tensão desvio um pouco mais influente no comportamento da superfície, comprovando os dados apresentados anteriormente.

4.4.4. Módulo de resiliência das misturas com fibra de PET

Os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico para as fibras de PET são avaliados primeiramente pelo teor empregado em cada tipo de fibra, e, em seguida, os tipos de fibra são comparados.

No caso das misturas com fibra 1.4 Dtex de comprimento 38 mm, os resultados, apresentados nas Figuras 4.24 e 4.25, mostraram que, para os pares de tensões ensaiados, os valores de M_R da mistura 0,25%Fi1.4Dtex estão compreendidos entre 72 e 170 MPa, enquanto que para a mistura 0,50%Fi1.4Dtex estes valores estão compreendidos entre 32 e 99 MPa.

Os resultados mostram que os módulos de resiliência das misturas com fibra 1.4 Dtex de comprimento 38 mm ajustam-se bem ao modelo dependente somente da tensão desvio, da mesma forma que o solo puro, fato que já era esperado visto que os teores de fibra adicionados ao solo são extremamente baixos. Por outro lado não há bom ajuste ao modelo dependente somente da tensão confinante. Os

valores das constantes de regressão e dos coeficientes de correlação (R^2) para os dois modelos citados seguem apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex.

Material	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
0,25%Fi1.4Dtex	274,94	0,365	0,89	266,23	0,301	0,63
0,50%Fi1.4Dtex	145,06	0,377	0,89	128,79	0,281	0,52

Na Figura 4.24 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.25 o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex.

Pelos gráficos apresentados nota-se que os valores de M_R decrescem com o aumento do teor de fibra de PET, ou seja, a incorporação da menor porcentagem de fibras é mais vantajosa para o desempenho mecânico da mistura. Julga-se que, a adição de 0,25 % de fibra é capaz de proporcionar melhor adesão dos grãos de solo às fibras e que a introdução de uma maior quantidade de fibra resulta em mais contato fibra-fibra do que fibra-solo, reduzindo a rigidez da mistura.

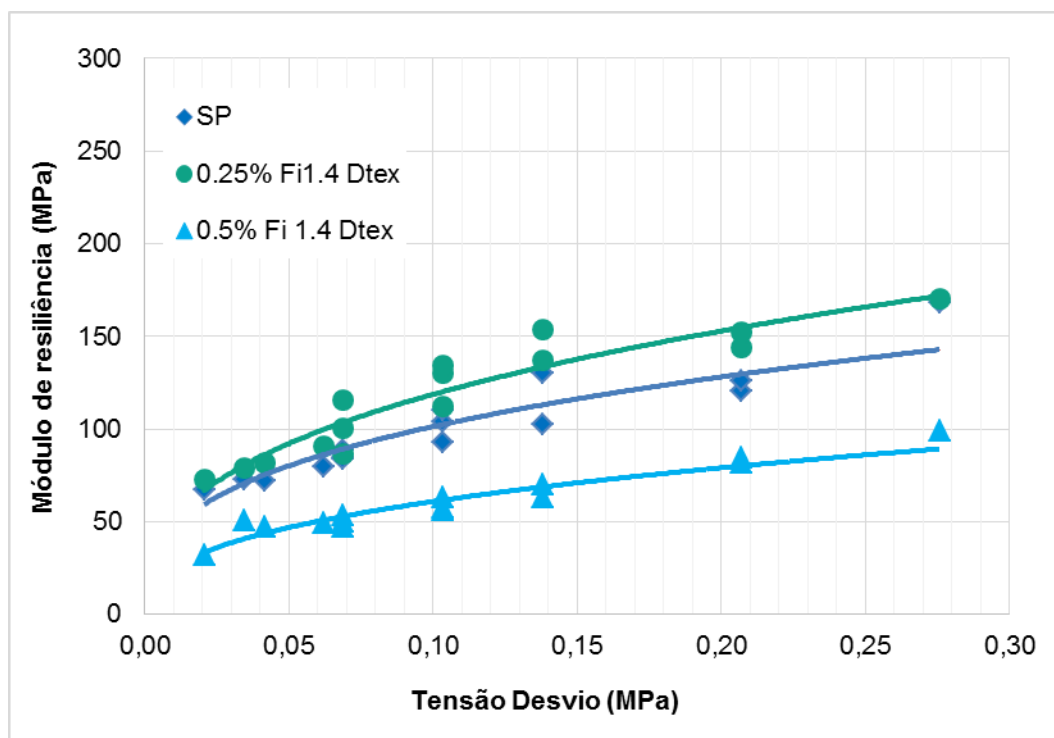


Figura 4.24 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 1.4 Dtex de comprimento 38 mm com a tensão desvio.

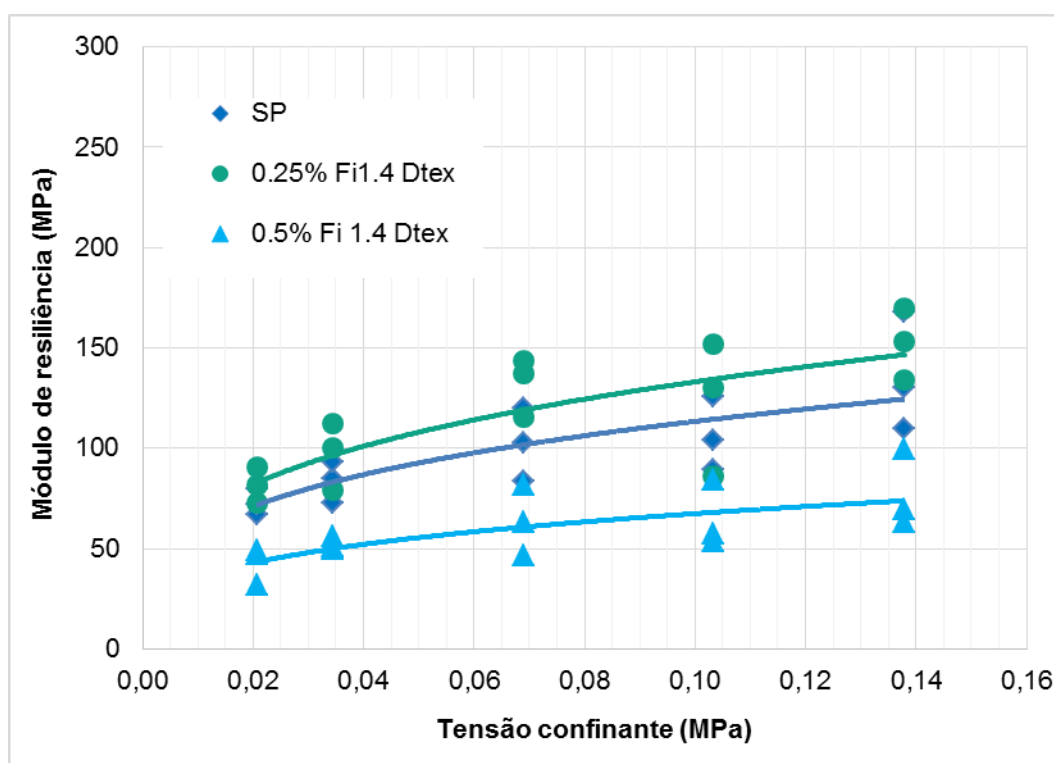


Figura 4.25 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 1.4 Dtex de comprimento 38 mm com a tensão confinante.

Também se observa que a mistura 0,25%Fi1.4 Dtex apresentou valores de M_R que superam os valores encontrados no solo puro, enquanto que a mistura 0,50%Fi1.4Dtex apresenta módulos de resiliência inferiores ao do solo puro.

As análises dos valores de M_R que consideram tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio indicam que as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex de 38 mm de comprimento ajustam-se bem ao modelo composto. Os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de correlação (R^2) encontrados para este modelo para cada teor de fibra inserido seguem apresentados na Tabela 4.14.

Na Figura 4.26 e na Figura 4.27 estão apresentadas as superfícies no espaço tridimensional que foram geradas por ajuste baseados neste modelo.

Tabela 4.14 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex.

Material	K_1	K_2	K_3	R^2
0,25%Fi1.4Dtex	298,79	0,082	0,303	0,91
0,50%Fi1.4Dtex	147,86	0,019	0,363	0,90

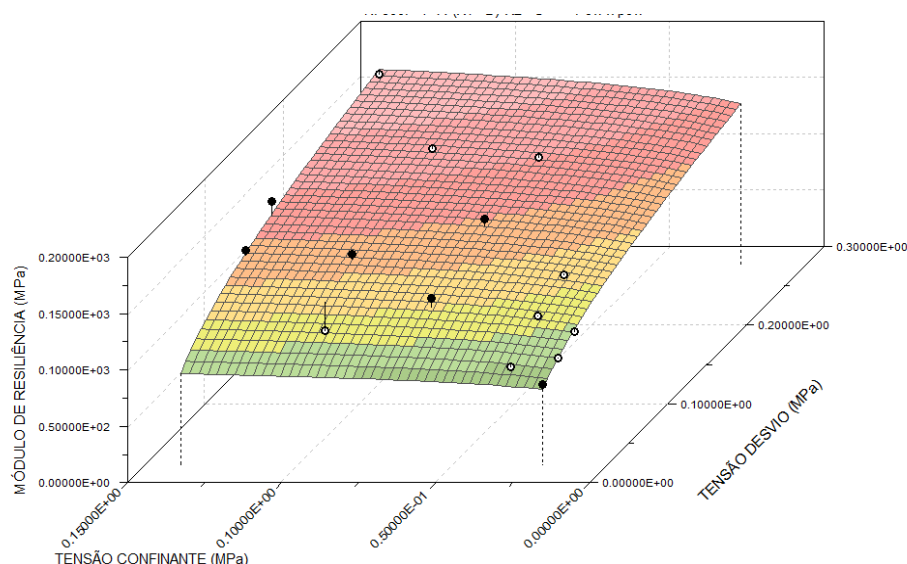


Figura 4.26 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura com 0,25%Fi1.4Dtex.

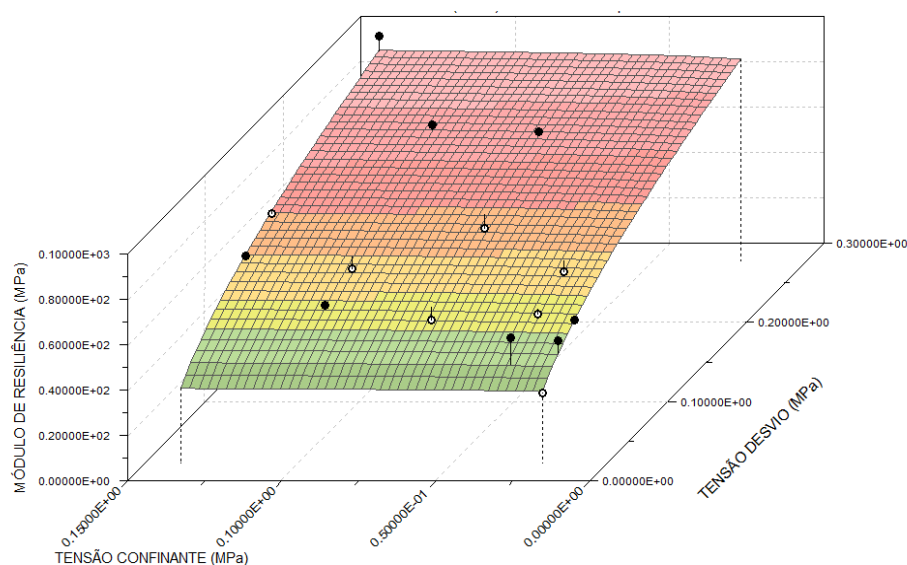


Figura 4.27 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura com 0,50%Fi1.4 Dtex.

Observa-se que as superfícies que traduzem o M_R das misturas com fibra 1.4 Dtex são dependentes tanto da tensão desvio quanto da tensão confinante, sendo a tensão desvio mais influente no comportamento das misturas, comprovando os dados apresentados na Tabela 4.13. Além disso, por apresentar maiores valores de M_R , a superfície representativa da mistura com 0,25 % de fibra encontra-se dentro de uma faixa de valores superior a da mistura com 0,50 % de fibras.

No caso das misturas com fibra 3.3 Dtex de comprimento 56 mm, os resultados, apresentados nas Figuras 4.28 e 4.29, mostraram que, para os pares de tensões ensaiados, os valores de M_R da mistura 0,25%Fi3.3Dtex estão

compreendidos entre 55 e 157 MPa, enquanto que para a mistura 0,50% Fi3.3Dtex estes valores estão compreendidos entre 45 e 115 MPa.

Os resultados mostram que os módulos de resiliência das misturas com fibra 3.3 Dtex de comprimento 56 mm ajustam-se bem ao modelo dependente somente da tensão desvio, da mesma forma que o solo puro, assim como ocorreu nas misturas com fibra 1.4 Dtex. Do mesmo modo, não houve bom ajuste ao modelo dependente somente da tensão confinante. Os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de correlação (R^2) para os dois modelos citados estão apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.

Material	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
	K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
0,25%Fi3.3Dtex	258,32	0,443	0,85	268,18	0,393	0,69
0,50%Fi3.3Dtex	148,14	0,265	0,75	149,25	0,229	0,59

Na Figura 4.28 segue apresentado o gráfico que relaciona os M_{RS} com a tensão desvio somente e na Figura 4.29 o gráfico que relaciona os M_{RS} com a tensão confinante somente, para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.

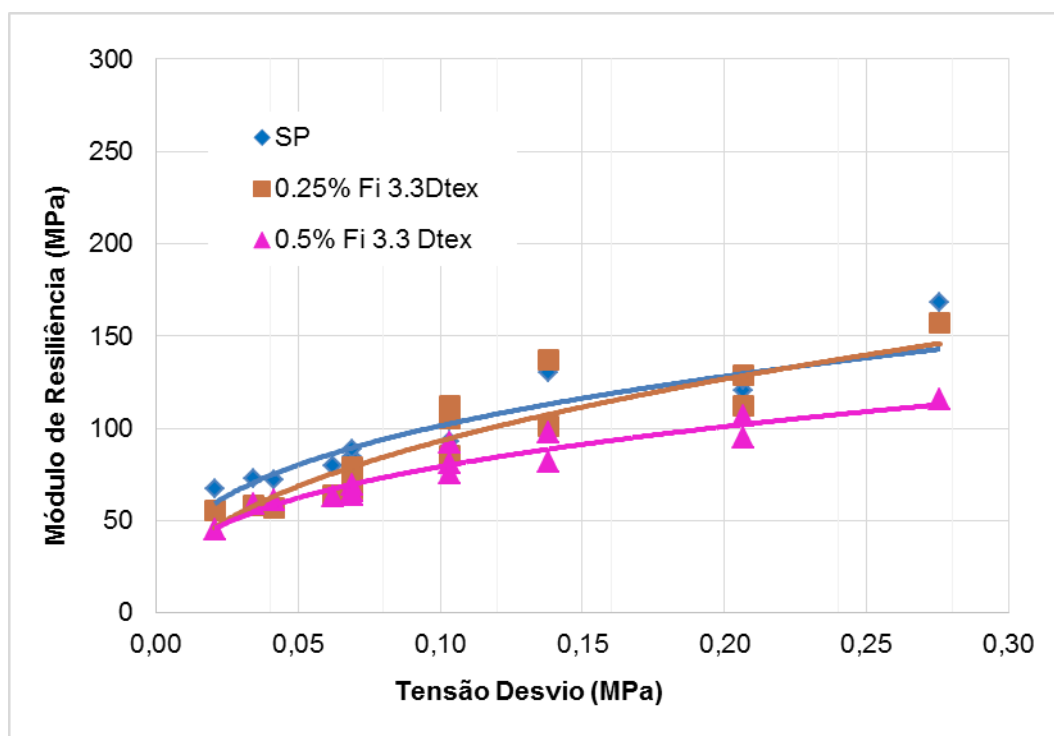


Figura 4.28 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 3.3 Dtex de comprimento 56 mm com a tensão desvio.

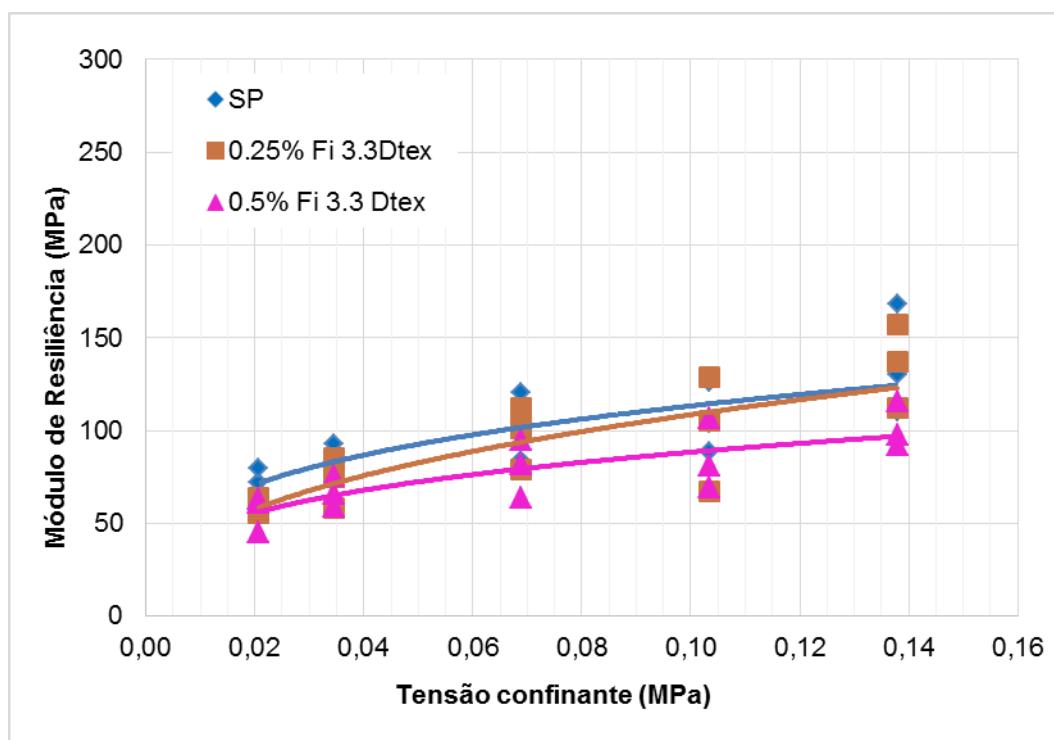


Figura 4.29 Relação do módulo de resiliência das misturas com fibra 3.3 Dt看 de comprimento 56 mm com a tensão confinante.

Os gráficos apresentados permitem observar que os valores de M_R decrescem com o aumento do teor de fibra de PET adicionado. Nota-se que as misturas 0,25%Fi3.3Dt看 apresentou valores de M_R ligeiramente inferiores aos do solo puro, especialmente para baixas tensões, enquanto que a mistura 0,50%Fi3.3Dt看 apresentou redução maior nos valores de módulo resiliente, e consequentemente maior redução da rigidez.

Os resultados encontrados nas misturas com fibra 3.3 Dt看 confirmam os resultados obtidos nas misturas com fibra 1.4 Dt看, onde um menor teor de fibras é mais benéfico para a mistura por proporcionar maior adesão das partículas de solo às fibras.

As análises dos valores de M_R que consideram tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio indicam que as misturas com fibra de PET 3.3 Dt看 de 56 mm de comprimento ajustam-se bem ao modelo composto. Os valores das constantes de regressão e dos coeficientes de correlação (R^2) encontrados para este modelo para cada teor de fibra inserido seguem apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.

Material	K_1	K_2	K_3	R^2
0,25%Fi3.3Dtex	303,40	0,158	0,324	0,90
0,50%Fi3.3Dtex	191,38	0,078	0,290	0,95

Na Figura 4.30 e na Figura 4.31 estão apresentadas as superfícies no espaço tridimensional que foram geradas por ajuste baseados no modelo composto para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex.

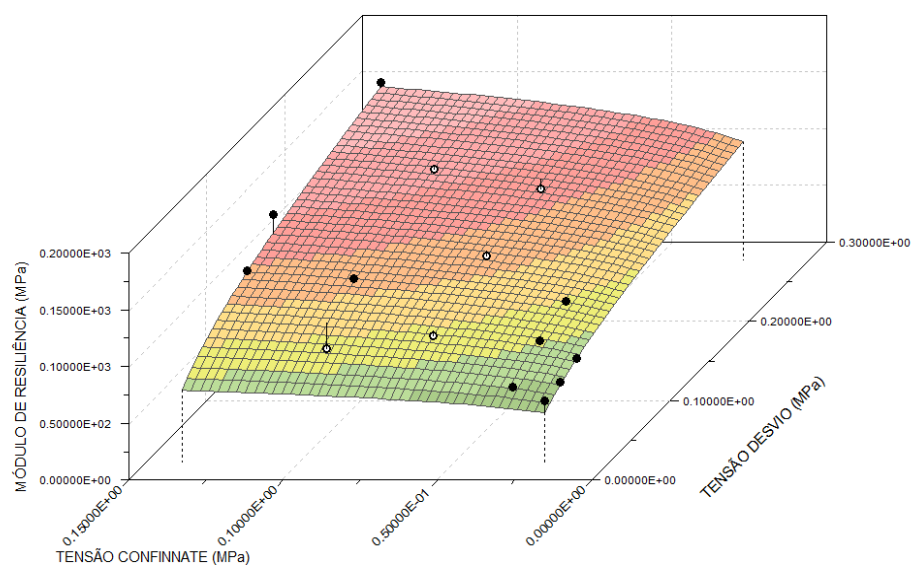


Figura 4.30 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,25%Fi3.3Dtex.

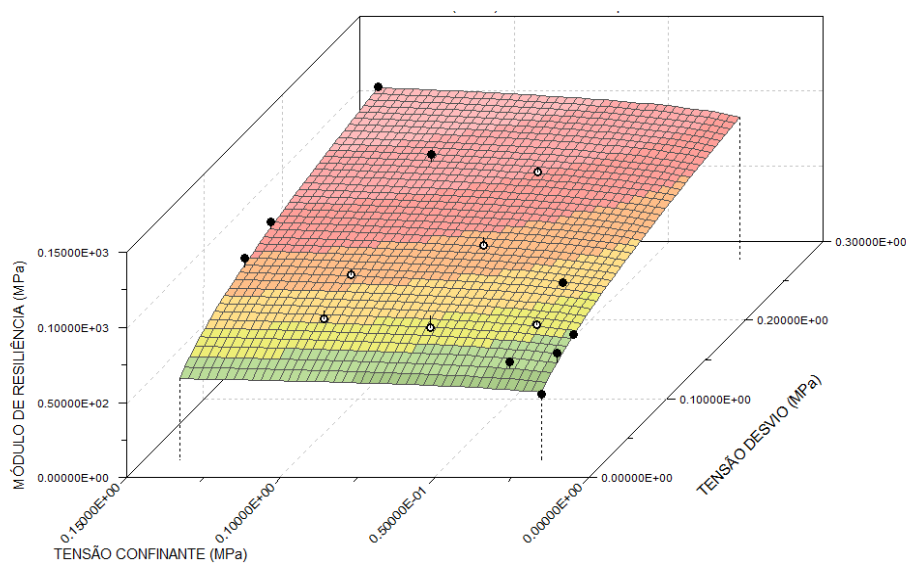


Figura 4.31 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,50%Fi3.3 Dtex.

Assim como nas misturas com fibra 1.4 Dtex, as superfícies que traduzem o M_R das misturas com fibra 3.3 Dtex são dependentes tanto da tensão desvio quanto da tensão confinante, sendo a tensão desvio mais influente no comportamento das misturas, comprovando os dados apresentados Tabela 4.15. Por apresentar maiores valores de M_R , a superfície representativa da mistura 0,25%Fi3.3Dtex também se encontra dentro de uma faixa de valores superior a da mistura 0,50%Fi3.3Dtex.

A fim de comparar os tipos de fibras também se plotaram os gráficos que apresentam a variação do M_R com a tensão desvio somente (Figura 4.32) e com a tensão confinante somente (Figura 4.33), das misturas com 0,25% (melhor teor) de fibra 1.4 e 3.3 Dtex.

A análise dos gráficos aponta que, para o teor considerado (0,25%), a fibra de menor diâmetro e menor comprimento (1.4 Dtex) resulta em maiores valores de módulo resiliente. Sabendo-se que a massa de fibra inserida é a mesma para as misturas com fibra 1.4 Dtex e 3.3 Dtex, aquelas com menor comprimento acabam sendo mais numerosas dentro da matriz do solo, existindo uma maior possibilidade de interação solo-fibra que melhoram a resposta mecânica do material.

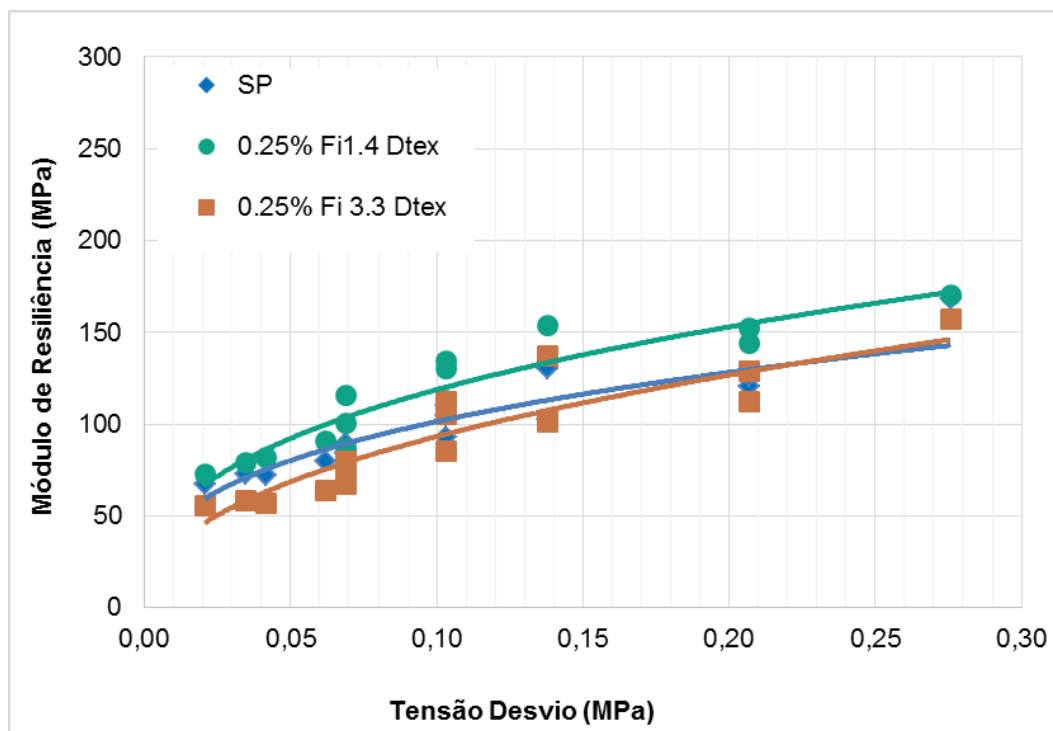


Figura 4.32 Relação do módulo de resiliência das misturas com 0,25% de fibra 1.4 e 3.3 Dtex com a tensão desvio.

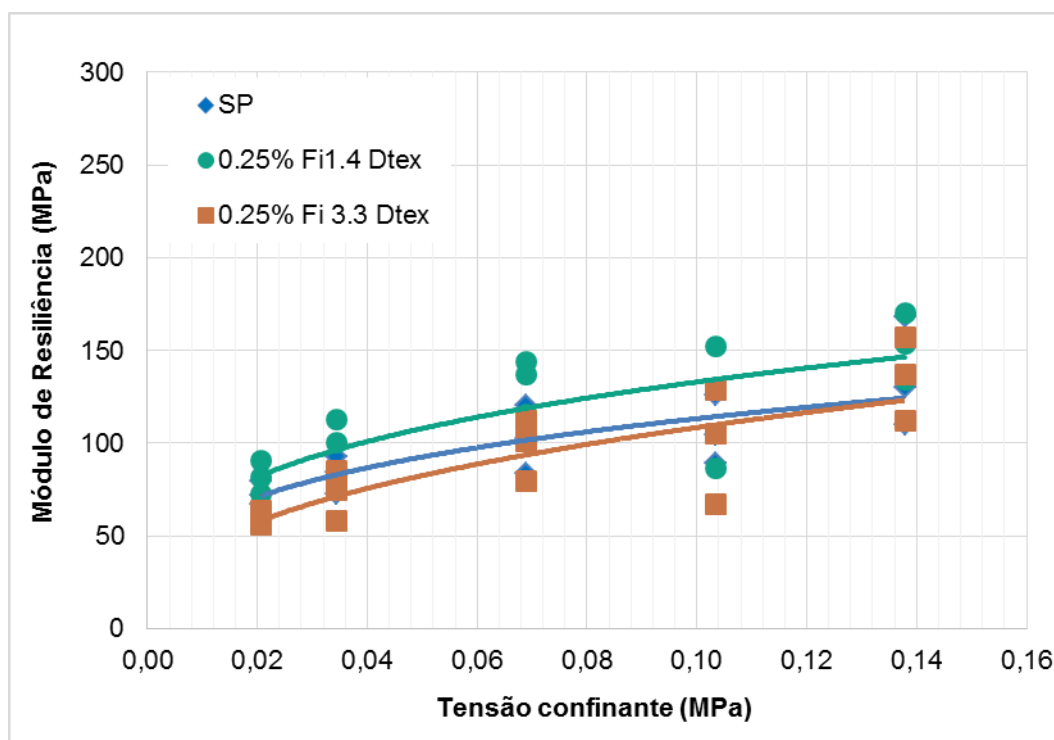


Figura 4.33 Relação do módulo de resiliência das misturas com 0,25% de fibra 1.4 e 3.3 Dtex com a tensão confinante.

Nos itens 4.4.5, 4.4.6, 4.4.7 e 4.4.8 são apresentados os resultados referentes aos ensaios triaxiais cíclicos realizados no solo puro e nas misturas em corpos de prova aquecidos. A temperatura adotada no aquecimento foi de 110 °C. Foram ensaiados corpos de prova com 1 hora de aquecimento e após estes ensaios os CPs retornavam para a estufa onde permaneciam por mais 2 horas (totalizando 3 horas de aquecimento), para em seguida serem ensaiados novamente.

4.4.5. Módulo de resiliência do solo puro aquecido à 110 °C

Os dados obtidos no ensaio triaxial cíclico do solo puro aquecido a 110° C, apresentados nas Figuras 4.34 e 4.35, mostram que os valores de M_R estão compreendidos dentro da faixa de valores apresentada na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 Faixa de valores do M_R do solo puro aquecido a 110 ° C.

Material	Tempo Aquec.	M_R (MPa)
SP	1h	111 – 338
	3h	99 – 371

A análise dos resultados mostra que o solo puro aquecido continua tendo comportamento de material coesivo, ou seja, verifica-se bom ajuste ao modelo dependente somente da tensão desvio e mau ajuste ao modelo dependente somente da tensão confinante. As constantes de regressão e os coeficientes de correlação encontrados para os dois modelos citados seguem apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para o solo puro aquecido à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
		K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
SP	1h	567,12	0,431	0,73	361,40	0,210	0,18
	3h	689,77	0,511	0,84	440,50	0,280	0,26

Na Figura 4.34 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência do solo puro aquecido com a tensão desvio somente e na Figura 4.35 gráfico que relaciona os M_{Rs} com a tensão confinante somente. A linha de tendência obtida para o solo puro sem aquecimento foi mantida em ambos os gráficos para efeito de comparação.

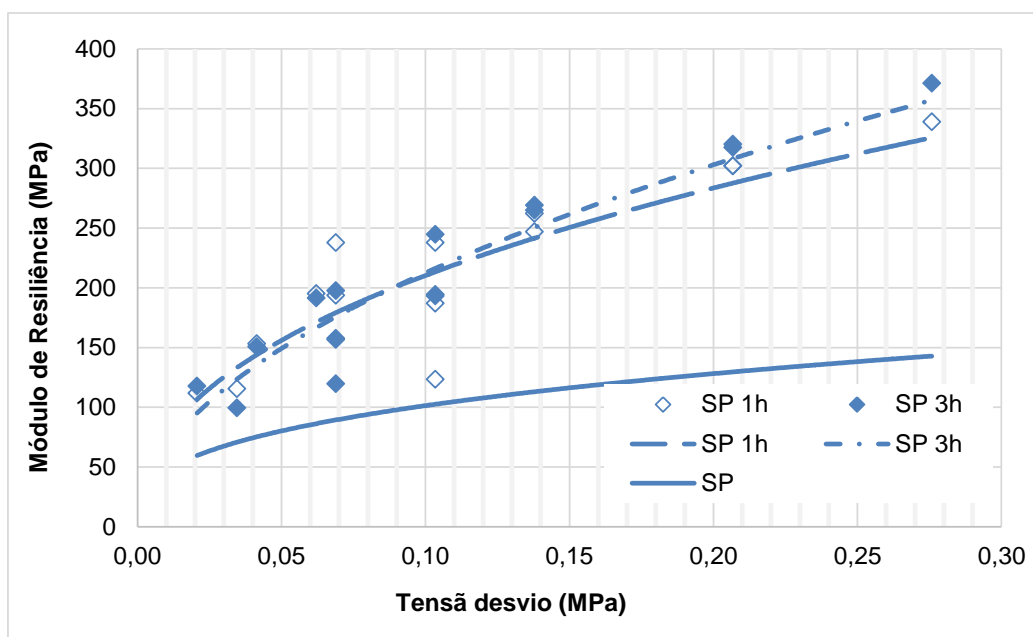


Figura 4.34 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio do solo puro aquecido.

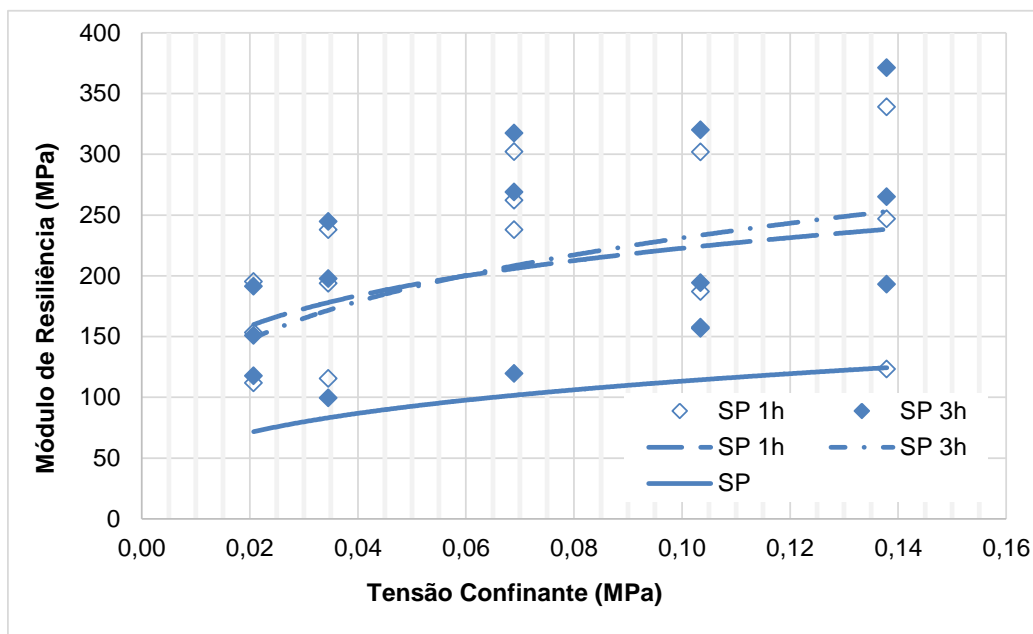


Figura 4.35 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante do solo puro aquecido.

Pelos gráficos apresentados tem-se que o aquecimento produz efeito significativo no módulo de resiliência do solo, sendo observado um aumento de até duas vezes nos valores de M_R . Esta melhora na resposta mecânica do solo deve-se à redução da umidade do corpo de prova e consequente aumento da sucção mátrica do material. Além disso, o aquecimento promove uma contração do corpo de prova o que provavelmente reduz o índice de vazios e aumenta o contato entre grãos.

As análises envolvendo o modelo composto indicam que também há boa correlação dos M_R obtidos no solo puro aquecido para este modelo. As constantes de regressão encontradas para o modelo citado seguem apresentadas na Tabela 4.19, assim como a representação gráfica esta apresentada na Figura 4.36.

Tabela 4.19 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para o solo puro aquecido à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	K_1	K_2	K_3	R^2
SP	1h	453,29	-0,220	0,596	0,82
	3h	565,60	-0,195	0,657	0,90

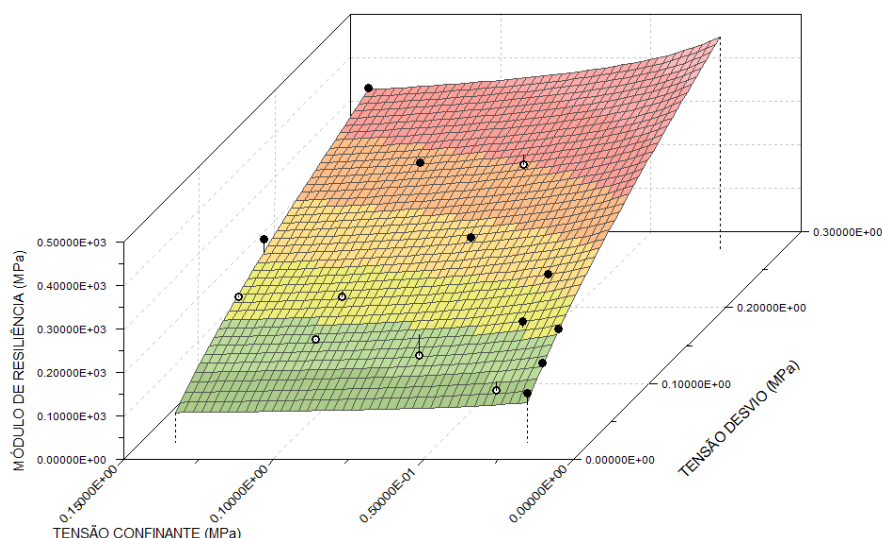


Figura 4.36 Gráfico 3D do modelo composto para o solo puro aquecido 3 horas à 110 °C.

4.4.6.

Módulo de resiliência das misturas com pó de PET aquecidas à 110 °C

Os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, para as misturas com pó de PET aquecidas a 110 °C, apresentados nas Figuras 4.37 e 4.38, mostram as faixas de valores de M_R apresentadas na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 Faixa de valores de M_R das misturas com pó de PET aquecidas a 110 °C..

Mistura	Tempo Aquec.	M_R (Mpa)
S90P10	1h	239 – 327
	3h	227 – 350
S80P20	1h	86 – 264
	3h	98 – 246
S70P30	1h	75 – 217
	3h	70 – 228

Diferentemente das misturas com pó de PET sem aquecimento, as misturas aquecidas a 110 °C por 1 hora e 3 horas se ajustam razoavelmente bem ao modelo dependente somente da tensão desvio (Figuras A.1 e A.2). Em contrapartida, não se verifica bom ajuste para nenhuma das misturas analisadas com o modelo dependente somente da tensão confinante (Figuras A.3 e A.4). Os valores das constantes e dos coeficientes de correlação (R^2) obtidos para os dois modelos citados seguem apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 Valores dos constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
		K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
S90P10	1h	362,03	0,106	0,88	354,13	0,083	0,56
	3h	409,59	0,146	0,78	429,29	0,141	0,76
S80P20	1h	425,65	0,443	0,85	291,97	0,247	0,27
	3h	332,17	0,302	0,74	222,77	0,118	0,12
S70P30	1h	328,80	0,394	0,82	233,43	0,217	0,26
	3h	365,25	0,405	0,73	233,43	0,189	0,16

Na Figura 4.37 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.38 gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para as misturas com pó de PET aquecidas a 110 ° C. Para melhor visualização os gráficos apresentam apenas as linhas de tendência obtida para cada mistura. Os pontos referentes aos ensaios de 1 hora de aquecimento e 3 horas de aquecimento para cada material podem ser visualizados nas figuras A.1, A.2, A.3 e A.4 do anexo.

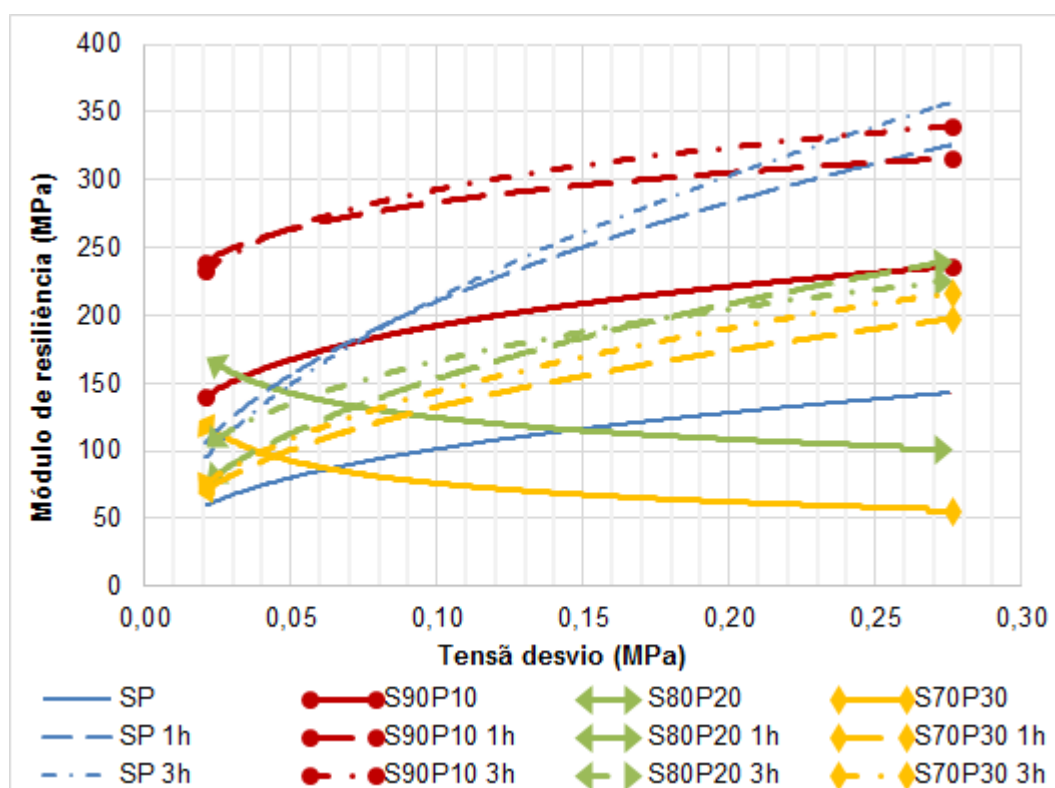


Figura 4.37 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com pó de PET aquecidas.

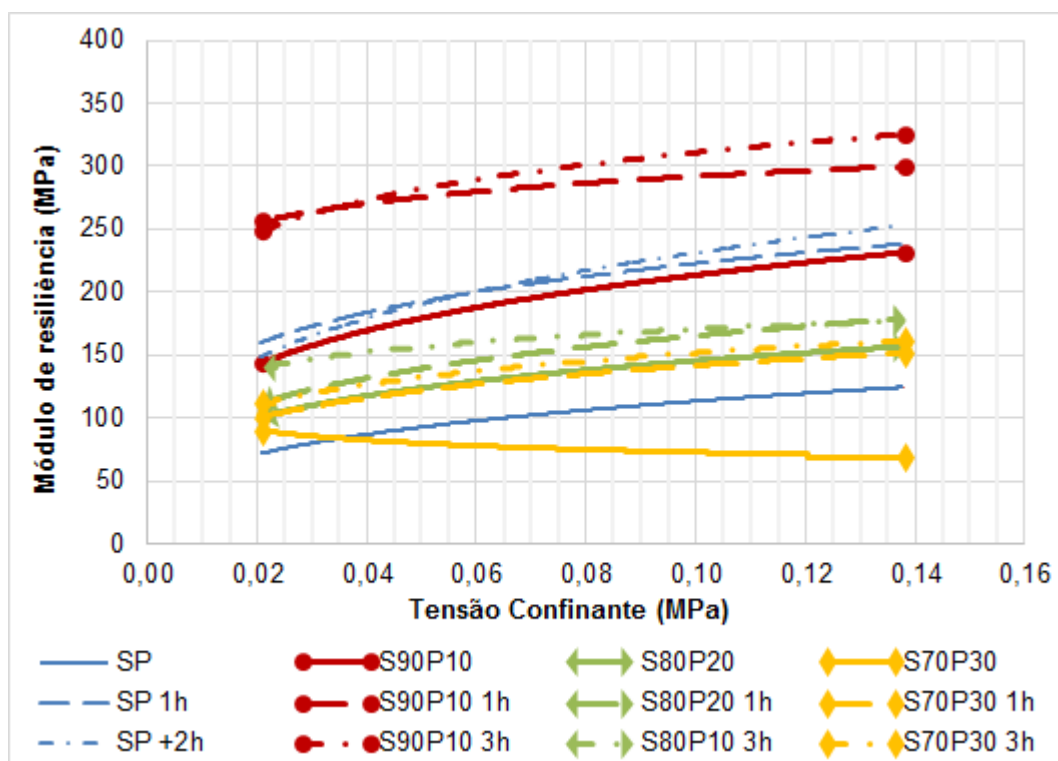


Figura 4.38 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com pó de PET aquecidas.

Os gráficos mostram que o aquecimento proporciona aumento na rigidez dos materiais. Nota-se que o aquecimento mais prolongado (3 horas) permite um ganho maior nos valores de M_R embora não haja uma diferença considerável entre os resultados obtidos neste aquecimento e no aquecimento mais curto (1 hora).

Verifica-se, na Figura 4.38, que a mistura S90P10 sem aquecimento possui valores de M_R compatíveis com os do solo puro aquecido e que o aquecimento desta mistura aumenta aproximadamente 100 MPa estes valores. É provável que o acréscimo de rigidez observado no aquecimento da mistura S90P10 seja devido ao aumento da rigidez ocorrido na fração solo, visto que o ganho de M_R observado no aquecimento da mistura é semelhante ao observado no aquecimento do solo puro. Apesar do aquecimento não influenciar na fração PET, nota-se que a inserção de 10 % de pó de PET continua mantendo o benefício proporcionado ao solo.

Nas misturas S80P20 e S70P30 o aquecimento não proporciona aumento suficiente para superar os valores do solo puro aquecido.

As análises relacionadas ao modelo composto forneceram boas correlações. As constantes de regressão e os coeficientes de correlação (R^2) estão apresentados na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com pó de PET aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	K_1	K_2	K_3	R^2
S90P10	1h	367,26	0,014	0,096	0,89
	3h	443,68	0,079	0,087	0,89
S80P20	1h	361,64	-0,160	0,563	0,90
	3h	265,92	-0,219	0,466	0,93
S70P30	1h	282,82	-0,148	0,505	0,87
	3h	290,34	-0,226	0,574	0,84

As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 apresentam os gráficos 3D das misturas com pó de PET para o aquecimento de 3h (melhor condição).

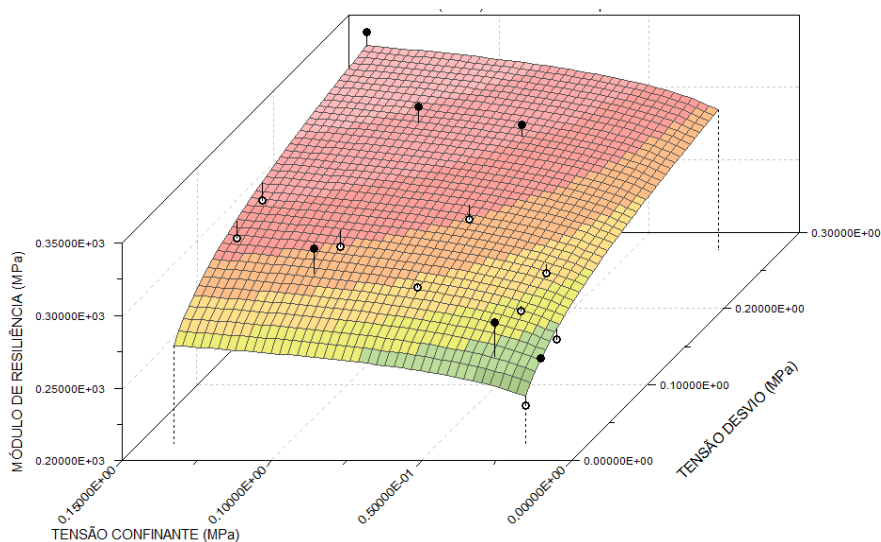


Figura 4.39 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S90P10 aquecida por 3h à 110 °C.

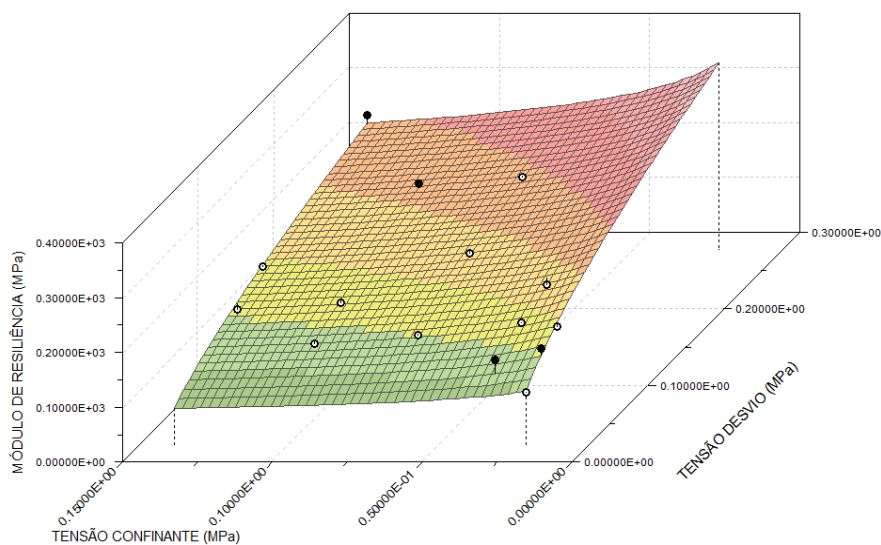


Figura 4.40 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S80P20 aquecida por 3h à 110 °C.

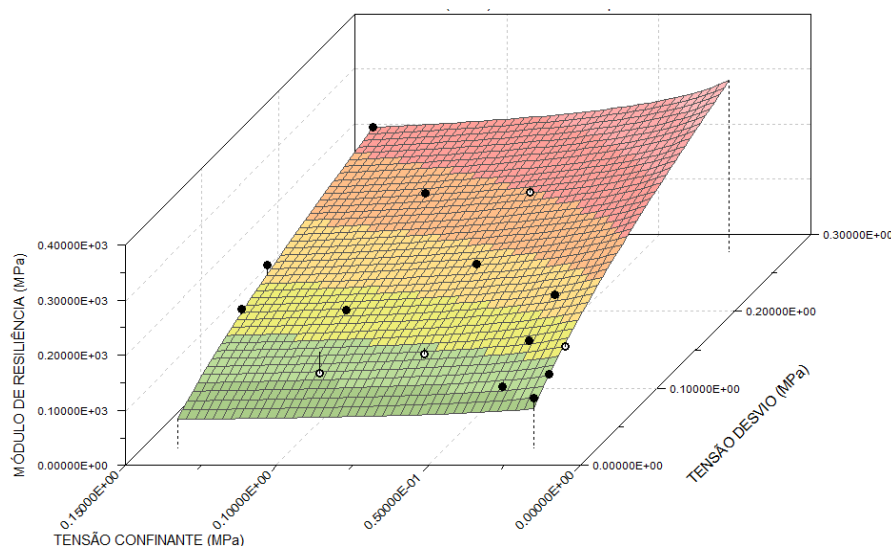


Figura 4.41 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S70P30 aquecida por 3h à 110 °C.

4.4.7. Módulo de resiliência das misturas com PET triturado aquecidas à 110 °C

Os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, para as misturas com PET triturado aquecidas a 110 °C, apresentados nas Figuras 4.42 e 4.43, mostram as faixas de valores de M_R apresentadas na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 Faixa de valores de M_R das misturas com PET triturado aquecidas a 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	M_R (MPa)
S97T03	1h	62 – 268
	3h	27 – 147
S95T05	1h	41 – 175
	3h	36 – 93
S93T07	1h	28 – 98
	3h	31 – 75

Assim como nas misturas com PET triturado sem aquecimento, as misturas aquecidas por 1 e 3 horas, à 110 °C, ajustam-se bem ao modelo dependente somente da tensão desvio (Figuras A.5 e A.6), da mesma forma que o comportamento do solo puro. Já para o modelo dependente somente da tensão confinante não se verifica bom ajuste para nenhuma das misturas analisadas (Figuras A.7 e A.8). Os valores das constantes e dos coeficientes de correlação (R^2) obtidos para os dois modelos citados seguem apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 Valores das constantes de regressão para os modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET triturado aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
		K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
S97T03	1h	558,29	0,615	0,85	315,72	0,326	0,25
	3h	306,36	0,638	0,94	188,11	0,375	0,34
S95T05	1h	377,45	0,591	0,89	220,79	0,317	0,27
	3h	119,52	0,334	0,73	82,42	0,155	0,16
S93T07	1h	162,43	0,446	0,86	126,21	0,293	0,38
	3h	98,17	0,284	0,72	68,63	0,117	0,13

Na Figura 4.42 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.43 gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para as misturas com PET triturado aquecidas a 110 ° C. Para melhor visualização os gráficos apresentam apenas as linhas de tendência obtida para cada mistura. Os pontos referentes aos ensaios de 1 hora de aquecimento e 3 horas de aquecimento para cada material podem ser visualizados nas figuras A.5, A.6, A.7 e A.8 do anexo.

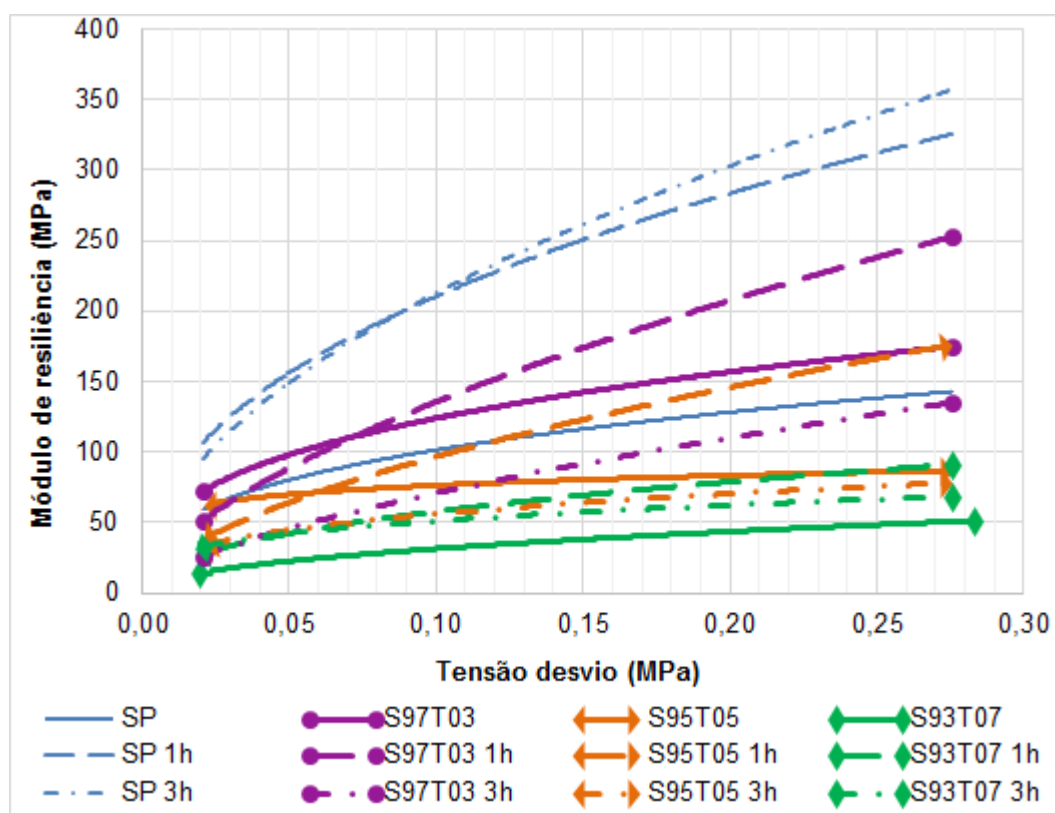


Figura 4.42 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com PET triturado aquecidas.

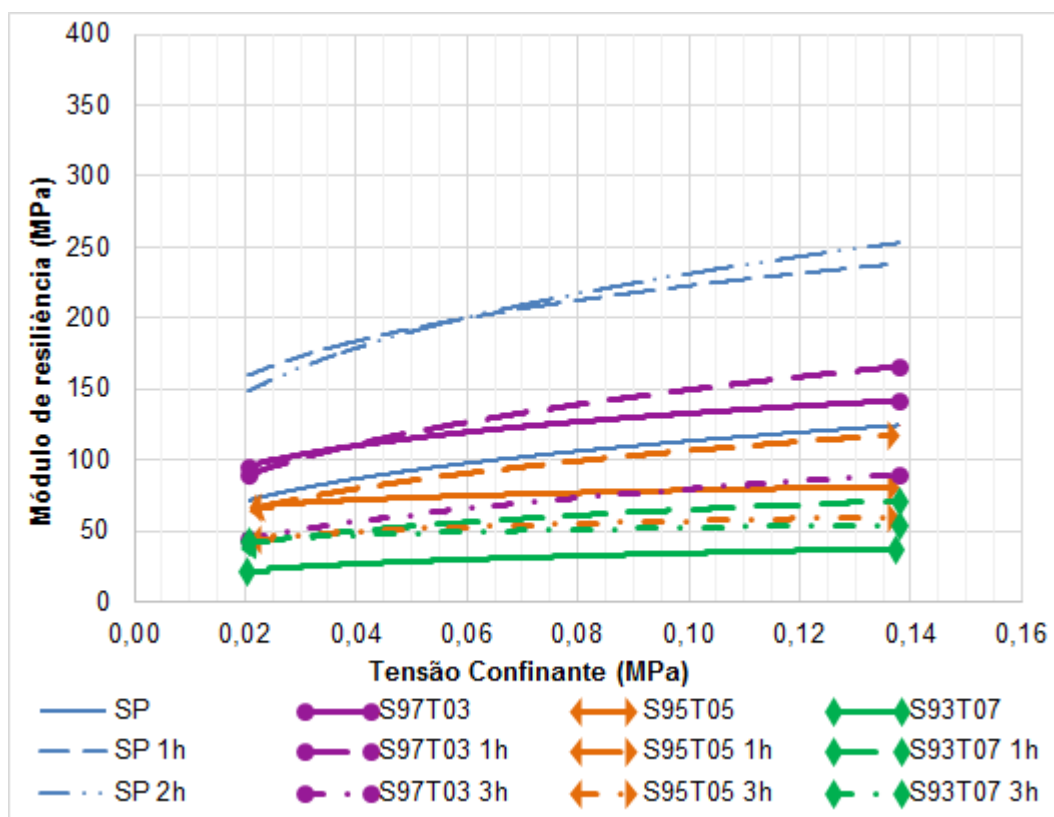


Figura 4.43 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com PET triturado aquecidas.

A análise dos gráficos mostra que o aquecimento de 1 hora é capaz de proporcionar aumento na rigidez das misturas com PET triturado, entretanto, ao se prolongar o aquecimento (3 horas) há uma redução nos valores de M_R nas misturas S97T03 e S95T05, ficando estes abaixo dos valores encontrados para as misturas sem aquecimento.

No caso da mistura S93T07 também se verifica redução nos valores de módulo de resiliência para o aquecimento de 3 horas, mas estes valores ainda superam os encontrados na mistura sem aquecimento. O comportamento da mistura S93T07 aquecida assemelha-se mais ao comportamento visto nas misturas com pó de PET, ou seja, não há diferença significativa entre o aquecimento mais curto e o mais prolongado. Isto pode ser devido ao maior teor de PET triturado na mistura tornando-a mais granular.

Uma vez que os resultados obtidos nas misturas com PET triturado sem aquecimento foram inferiores aos obtidos nas misturas com pó de PET sem aquecimento, já era esperado que os resultados obtidos no aquecimento seguissem a mesma tendência.

Para as análises relacionadas ao modelo composto, verifica-se que houve bom ajuste das misturas com PET triturado aquecidas a 110° C ao modelo. As constantes de regressão e os coeficientes de correlação (R^2) encontrados para este modelo estão apresentados na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com PET triturado aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	K_1	K_2	K_3	R^2
S97T03	1h	429,36	-0,258	0,808	0,92
	3h	253,01	-0,188	0,779	0,96
S95T05	1h	295,89	-0,240	0,770	0,96
	3h	98,73	-0,188	0,475	0,84
S93T07	1h	152,25	-0,064	0,493	0,87
	3h	80,75	-0,192	0,428	0,87

As Figuras 4.44, 4.45 e 4.46 apresentam os gráficos 3D das misturas com PET triturado aquecidas por 1 hora (melhor condição).

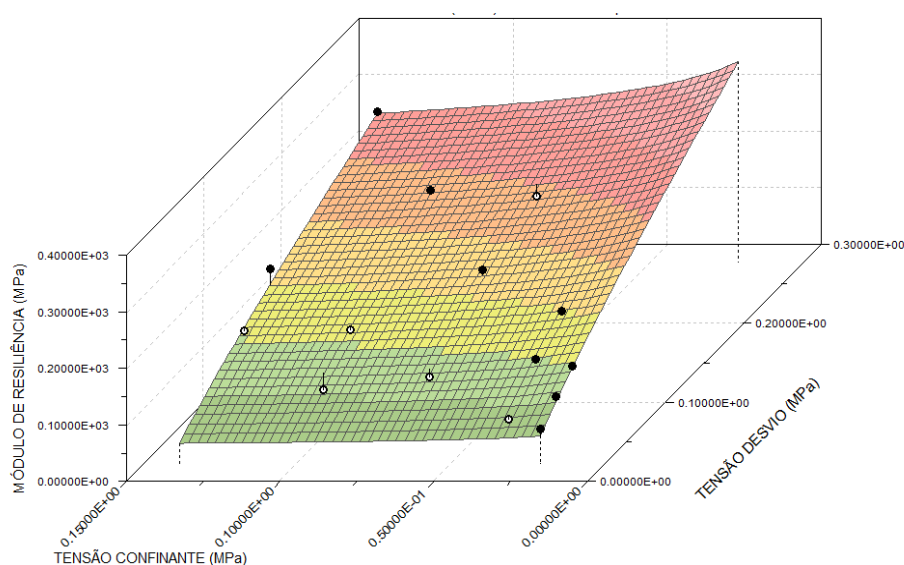


Figura 4.44 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S97T03 aquecida por 1h à 110 °C.

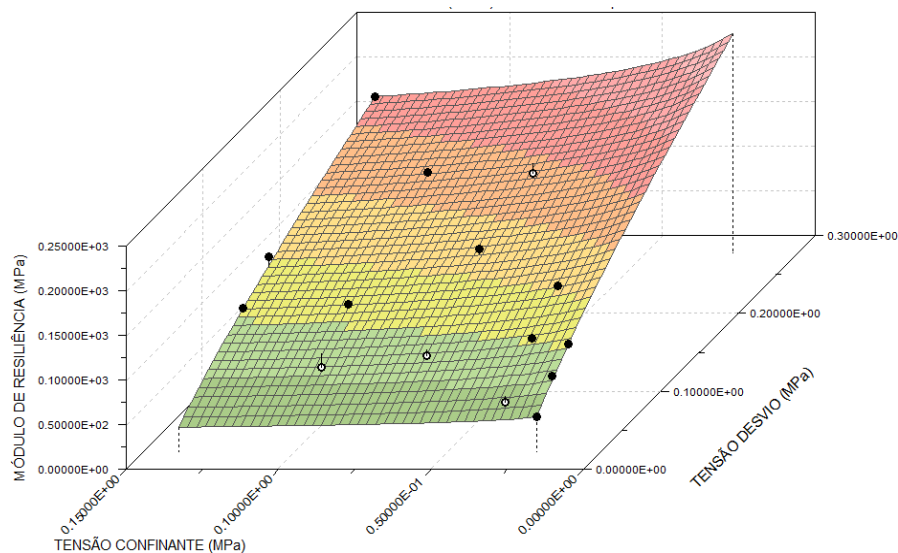


Figura 4.45 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S95T05 aquecida por 1h à 110° C.

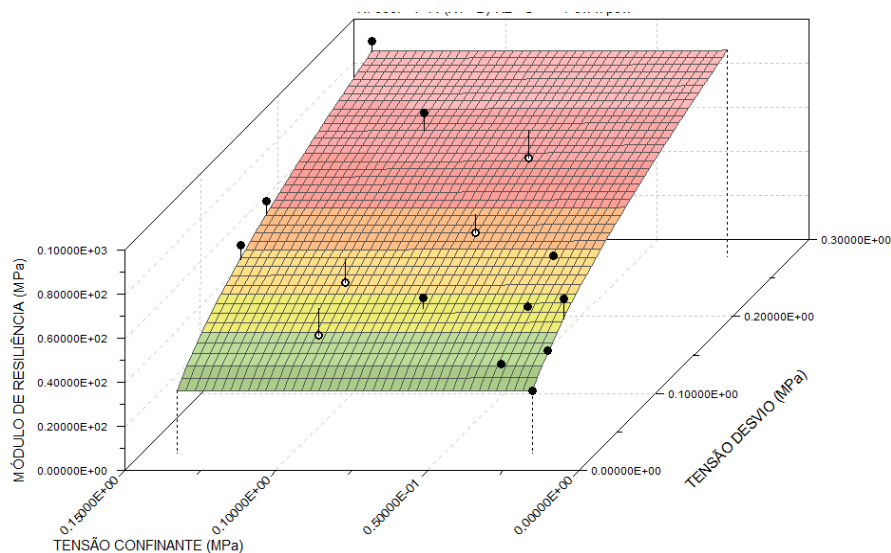


Figura 4.46 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura S93T07 aquecida por 1h à 110 °C.

4.4.8. Módulo de resiliência das misturas com fibra de PET aquecidas à 110 °C

Os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas a 110 °C, apresentados nas Figuras 4.47 e 4.48, mostram as faixas de valores de M_R apresentadas na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 Faixa de valores de M_R das misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	M_R (MPa)
0.25%Fi1.4Dtex	1h	68 – 223
	3h	74 – 254
0.50%Fi1.4Dtex	1h	49 – 159
	3h	42 - 136

Assim como nas misturas com as fibras 1.4 Dtex sem aquecimento, as misturas aquecidas por 1 hora e 3 horas ajustam-se bem ao modelo dependente somente da tensão desvio (Figuras A.9 e A.10), da mesma forma que o comportamento de solo puro. Com relação ao modelo dependente somente da tensão confinante não se verifica bom ajuste (Figuras A.11 e A.12). Os valores das constantes e dos coeficientes de correlação (R^2) obtidos para tal modelo seguem apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
		K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
0.25%Fi1.4Dtex	1h	334,10	0,408	0,78	227,96	0,215	0,22
	3h	430,33	0,496	0,90	295,67	0,293	0,32
0.50%Fi1.4Dtex	1h	225,08	0,434	0,89	180,04	0,294	0,42
	3h	203,99	0,448	0,87	157,73	0,293	0,38

Na Figura 4.47 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.48 gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas a 110 ° C. Para melhor visualização os gráficos apresentam apenas as linhas de tendência obtida para cada mistura. Os pontos referentes aos ensaios de 1 hora de aquecimento e 3 horas de aquecimento para cada material podem ser visualizados nas figuras A.9, A.10, A.11 e A.12 do anexo.

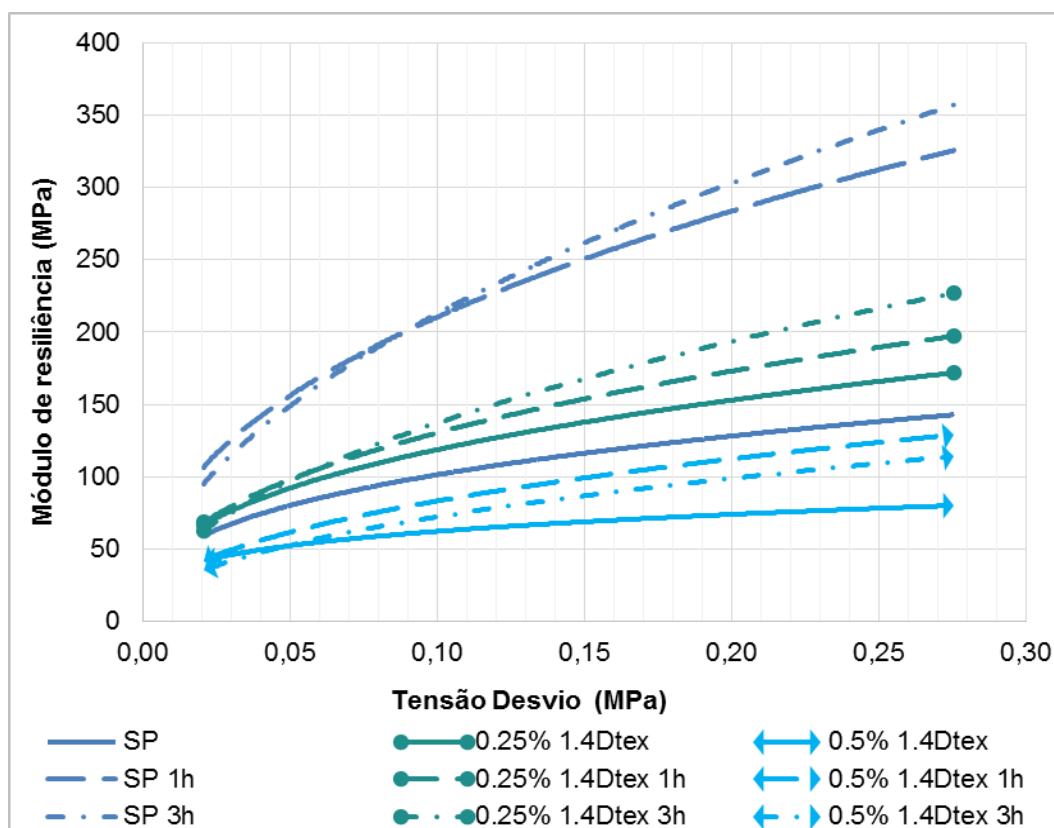


Figura 4.47 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com fibra 1.4 Dtex aquecidas.

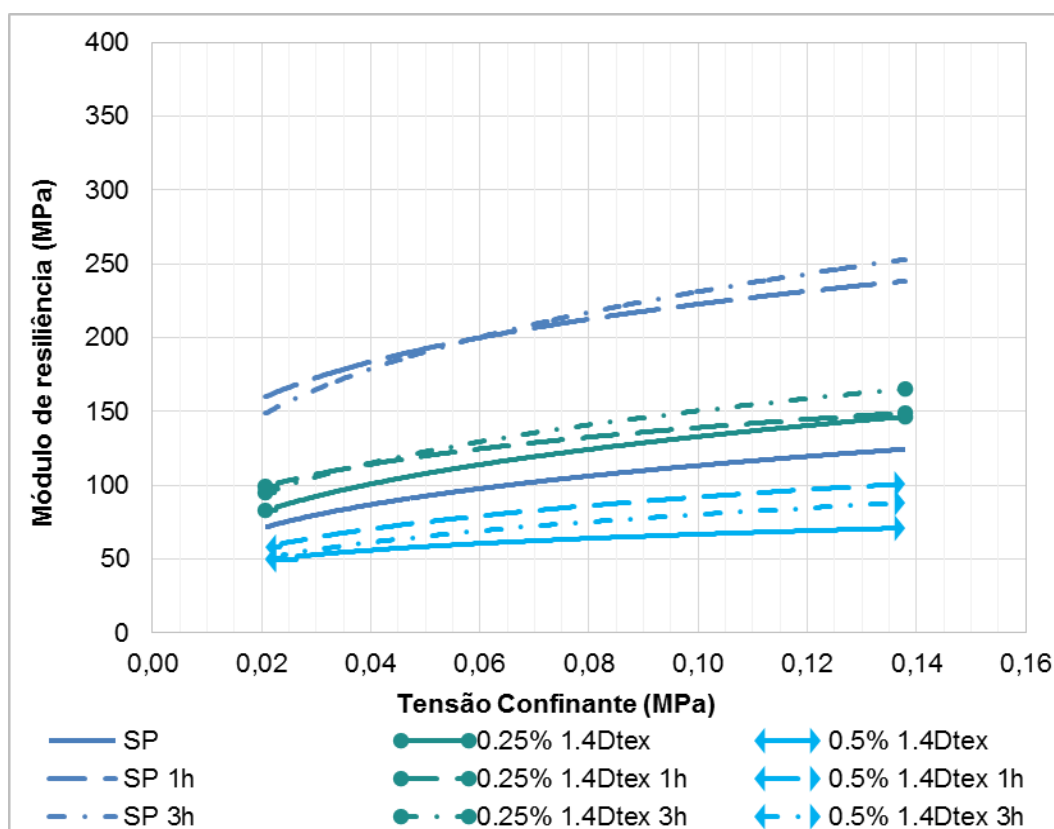


Figura 4.48 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com fibra 1.4 Dtex aquecidas.

É possível notar que o aquecimento promove um pequeno aumento nos valores de M_R das misturas com fibra. Mesmo com este aumento nenhuma das misturas aquecidas consegue superar o solo puro aquecido.

No caso da mistura 0,25%Fi1.4Dtex o aquecimento de 2 horas aumenta o benefício já apresentado em relação ao solo puro sem aquecimento. Na mistura 0,50%Fi1.4Dtex, o acréscimo promovido pelo aquecimento não é suficiente para equiparar a mistura ao solo puro não aquecido.

Com relação ao modelo composto verificou-se bom ajuste das misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas. As constantes de regressão e os coeficientes de correlação (R^2) encontrados para este modelo estão apresentados na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	K_1	K_2	K_3	R^2
0.25%Fi1.4Dtex	1h	279,80	-0,175	0,539	0,85
	3h	371,89	-0,144	0,603	0,93
0.50%Fi1.4Dtex	1h	215,09	-0,046	0,468	0,89
	3h	190,60	-0,067	0,498	0,88

Nas Figuras 4.49 e 4.50 estão apresentados os gráficos 3D gerados a partir modelo composto, sendo considerado o aquecimento de 3 horas para a mistura 0,25%Fi1.4Dtex e o aquecimento de 1 hora para a mistura 0,50%Fi1.4Dtex.

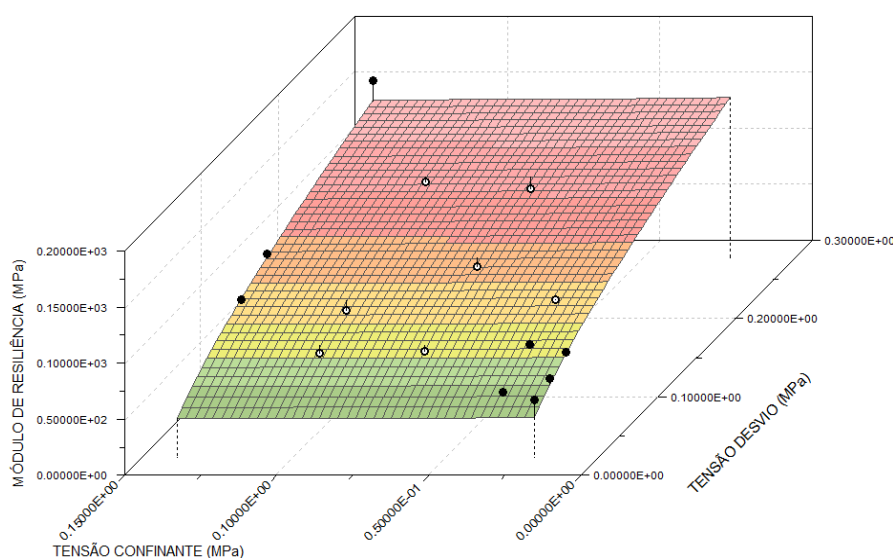


Figura 4.49 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,25% Fi1.4 Dtex aquecida por 3h à 110 ° C.

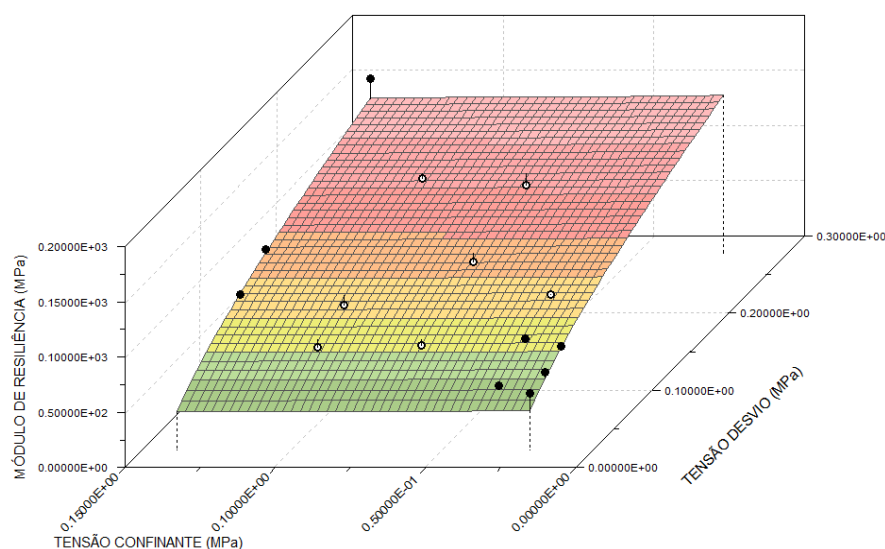


Figura 4.50 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,50% Fi1.4 Dtex aquecida por 1h à 110 °C.

No caso das misturas com fibra 3.3 Dtex aquecidas à 110 ° C, os resultados obtidos no ensaio triaxial cíclico, apresentados nas Figuras 4.51 e 4.52,, mostram as faixas de valores de M_R apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 Faixa de valores de M_R das misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas à 110 °C..

Mistura	Tempo Aquec.	M_R (MPa)
0.25% Fi3.3Dtex	1h	96 – 236
	3h	70 – 244
0.50% Fi3.3Dtex	1h	64 – 189
	3h	54 – 164

Novamente observou-se que as misturas com fibras aquecidas seguem a tendência das misturas sem aquecimento. Portanto, ajustam-se bem ao modelo dependente somente da tensão desvio (Figuras A.13 e A.14) e não se ajusta ao modelo dependente somente da tensão confinante (Figuras A.15 e A.16). Os valores das constantes e dos coeficientes de correlação (R^2) obtidos para os dois modelos citados seguem apresentados na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 Valores das constantes de regressão dos modelos σ_d e σ_3 , com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas à 110 °C.

Material	Tempo Aquec.	Modelo σ_d			Modelo σ_3		
		K_1	K_2	R^2	K_1	K_2	R^2
0.25%Fi3.3Dtex	1h	329,22	0,364	0,77	221,11	0,171	0,18
	3h	409,75	0,512	0,89	277,64	0,301	0,32
0.50%Fi3.3Dtex	1h	219,84	0,264	0,59	143,92	0,077	0,05
	3h	247,88	0,384	0,82	156,53	0,167	0,16

Na Figura 4.51 segue apresentado o gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão desvio somente e na Figura 4.52 gráfico que relaciona os módulos de resiliência com a tensão confinante somente, para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas a 110 ° C. Para melhor visualização os gráficos apresentam apenas as linhas de tendência obtida para cada mistura. Os pontos referentes aos ensaios de 1 hora de aquecimento e 3 horas de aquecimento para cada material podem ser visualizados nas figuras A.13, A.14, A.15 e A.16 do anexo.

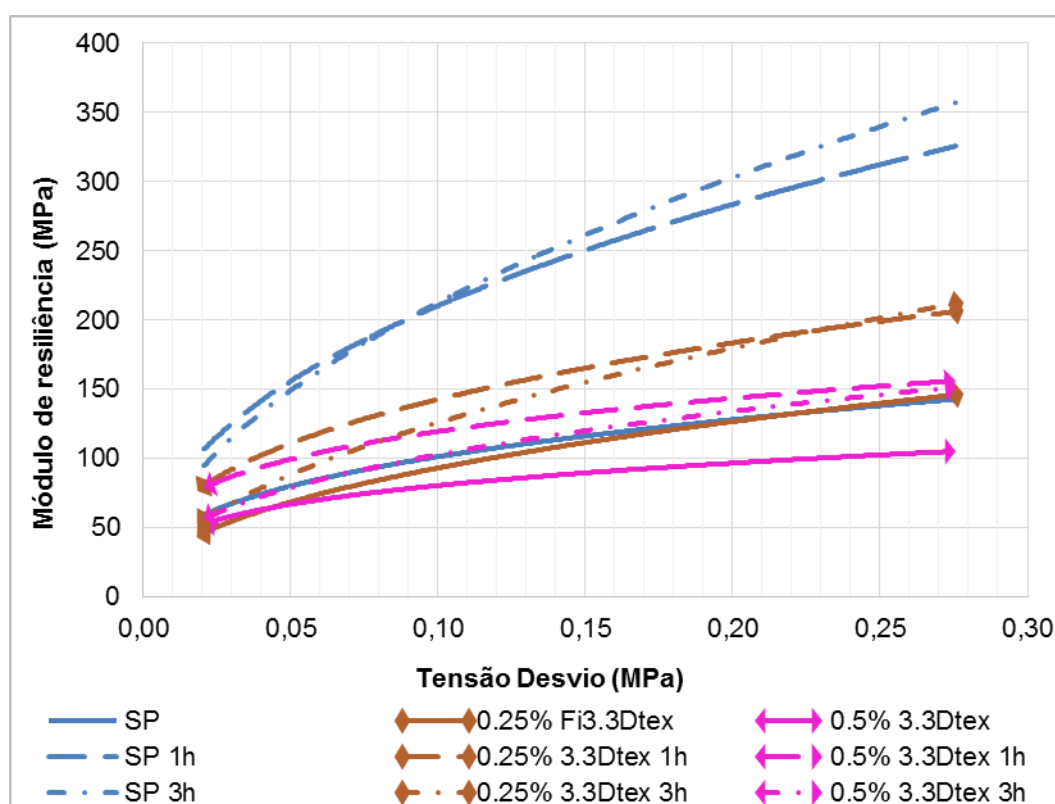


Figura 4.51 Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com fibra 3.3 Dtex aquecidas.

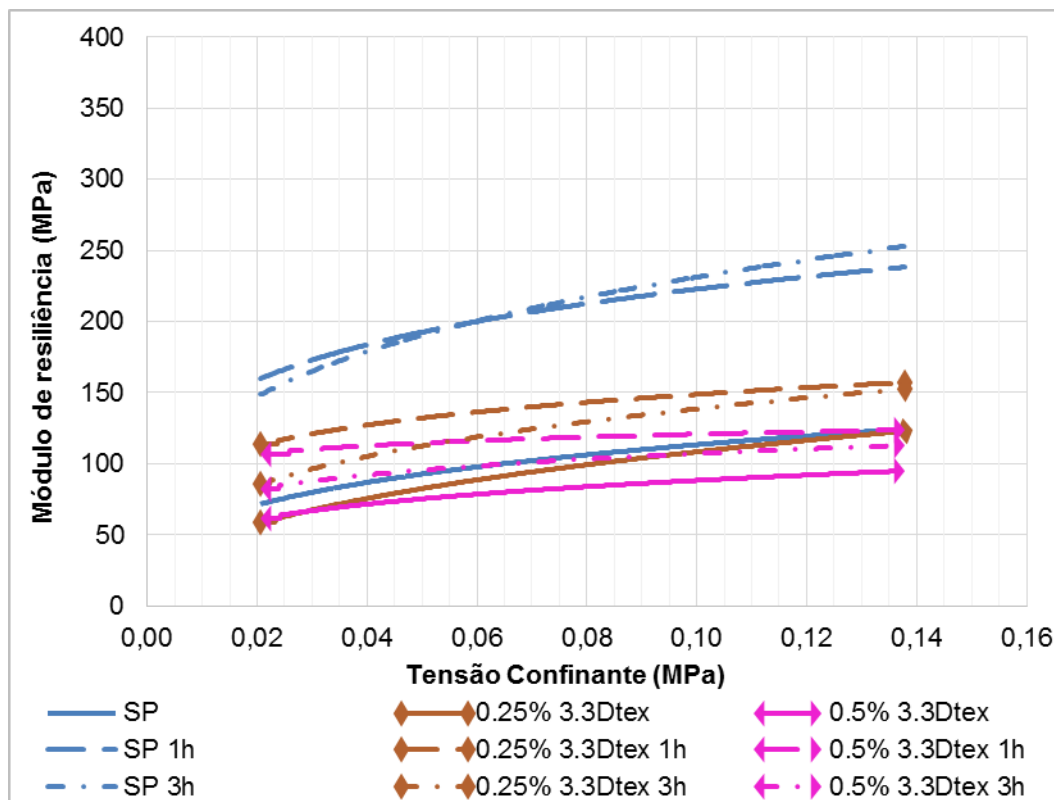


Figura 4.52 Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com fibra 3.3 Dtex aquecidas.

Os resultados apresentados mostram que, assim como nas fibras 1.4 Dtex, o aquecimento das misturas com fibra 3.3Dtex promove uma leve melhora nos valores de M_R . Apesar disso, nenhuma das misturas aquecidas conseguiu superar o solo puro aquecido.

É possível perceber também que a melhora promovida pelo aquecimento de 1 hora foi um pouco mais significativa que o de 2 horas. Ainda, o aquecimento de ambas as misturas mostra-se vantajoso ao se comparar os resultados deste com o solo puro não aquecido. Isto porque a mistura 0,50%Fi3.3Dtex aquecida passa a ter comportamento semelhante ao solo puro sem aquecimento, enquanto que a mistura 0,25%Fi3.3Dtex aquecida se torna melhor que o solo puro não aquecido.

Para as análises relacionadas ao modelo composto, verifica-se que houve bom ajuste das misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas ao modelo. As constantes de regressão e os coeficientes de correlação (R^2) encontrados para este modelo estão apresentados na Tabela 4.31.

Tabela 4.31 Valores das constantes de regressão do modelo composto, com os respectivos valores de R^2 , para as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas à 110 °C..

Material	Tempo Aquec.	K_1	K_2	K_3	R^2
0.25%Fi3.3Dtex	1h	268,74	-0,200	0,513	0,88
	3h	351,96	-0,150	0,624	0,93
0.50%Fi1.4Dtex	1h	170,76	-0,249	0,450	0,84
	3h	193,98	-0,241	0,564	0,97

As Figuras 4.53 e 4.54 apresentam os gráficos 3D das misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas por 1 hora à 110 °C (melhor condição do aquecimento).

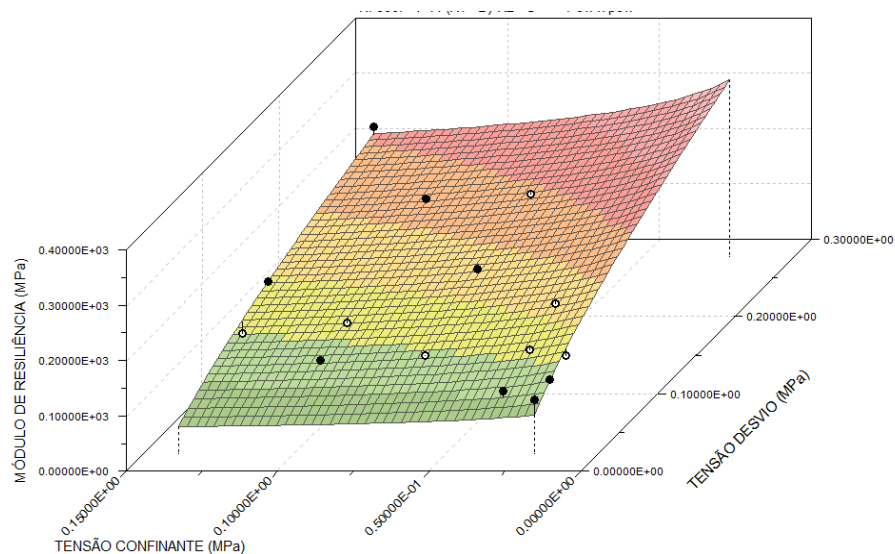


Figura 4.53 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,25% Fi3.3Dtex aquecida por 1h à 110 ° C.

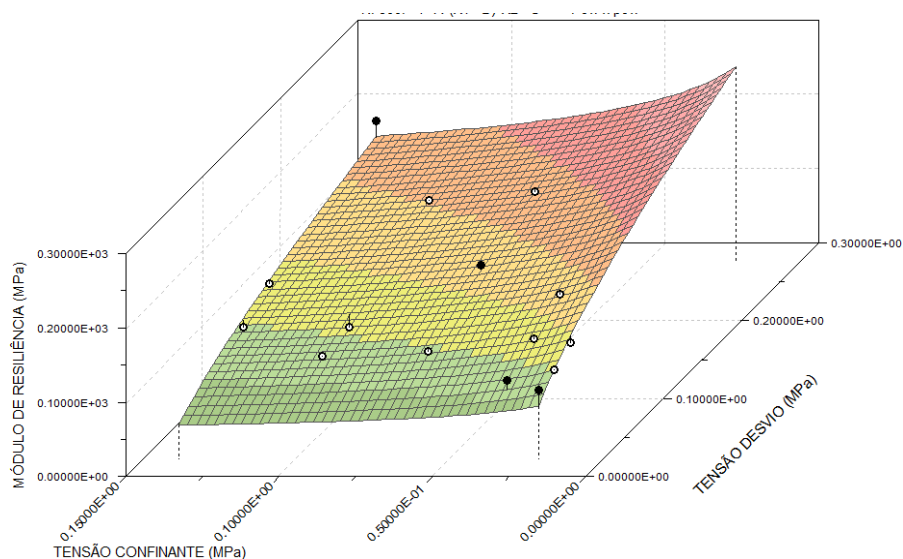


Figura 4.54 Gráfico 3D do modelo composto para a mistura 0,50% Fi3.3Dtex aquecida por 1h à 110 ° C.

4.5. Dimensionamento do Pavimento típico

O dimensionamento realizado no programa computacional SisPav utilizou o modelo composto, visto que este apresentou bom ajuste para todos os materiais estudados, como modelo constitutivo para os cálculos da espessura da camada de base. Desta forma, os valores das constantes de regressão obtidos para cada material foram introduzidos como dados de entrada no programa na seção referente às propriedades do material da camada.

O dimensionamento foi realizado para diferentes vidas úteis da obra, de modo a obter uma curva de espessura da camada de base em função da vida útil considerada para o pavimento.

4.5.1. Dimensionamento da base com as misturas com pó de PET

Os resultados obtidos no dimensionamento do pavimento típico utilizando as misturas com pó de PET na camada de base do pavimento foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.55.

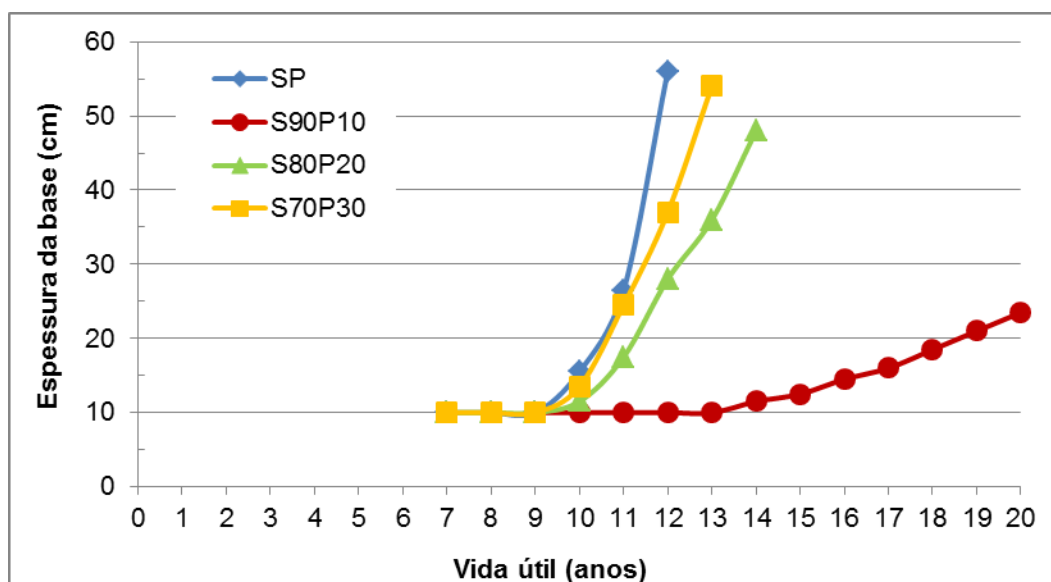


Figura 4.55 Variação da espessura da base em função do teor de pó de PET e da vida útil do pavimento.

Pela observação do gráfico é possível notar que a mistura S90P10 possibilitou uma drástica redução nos valores de espessura da camada de base, devido aos resultados relativos ao módulo de resiliência. Esta mistura consegue

atingir uma vida útil de 20 anos com uma espessura de 23,5 cm, enquanto que o solo puro atinge apenas 12 anos com 56 cm de espessura, mais que o dobro.

No caso da mistura S80P20 também observa-se uma redução na espessura da camada de base, mas em proporção bem menor do que a observada na mistura S90P10. A mistura S80P20 reduz no máximo 50 % a espessura da base, quando comparada ao solo puro em sua vida útil máxima. A mistura S80P20 consegue atingir ainda 2 anos mais de vida útil que o solo puro com uma camada de base 14 % mais fina.

Também pode ser observado que a mistura S70P30 começa a resultar em camadas de base menos espessas que as constituídas de solo puro, a partir de um dada vida útil, ou seja, a adição de 30 % de pó de PET pode ser viável dependendo da vida útil para a qual esta sendo dimensionando o pavimento.

Do ponto de vista ambiental, todas as misturas poderiam ser consideradas viáveis pelo fato de oferecerem um descarte apropriado para o resíduo.

4.5.2. Dimensionamento da base com as misturas com PET triturado

Os resultados obtidos no dimensionamento do pavimento típico utilizando as misturas com PET triturado na camada de base do pavimento foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.56.

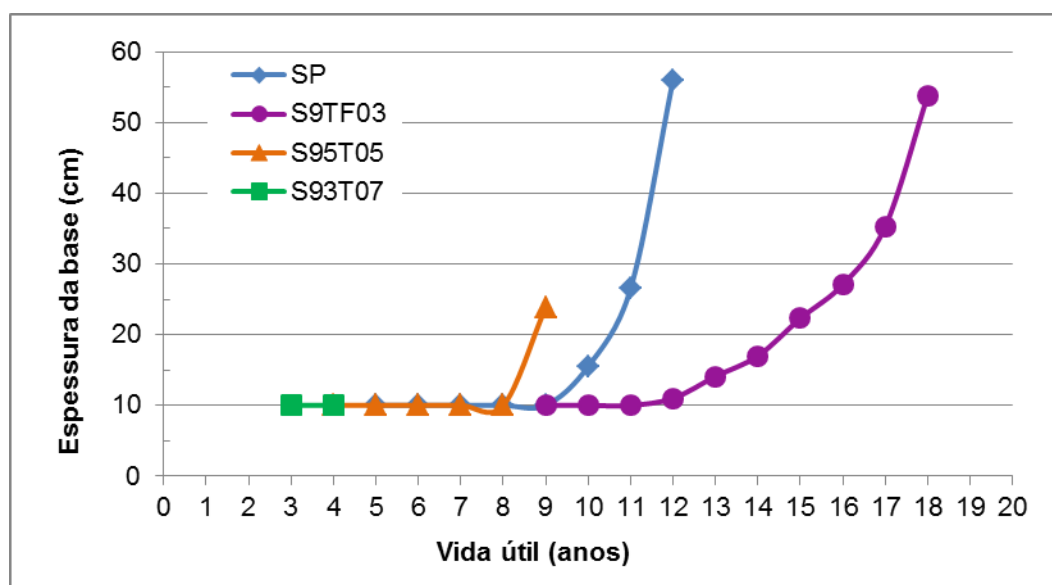


Figura 4.56 Variação da espessura da base em função do teor de PET triturado e da vida útil do pavimento.

Pela análise do gráfico é possível verificar que a mistura S97T03 foi capaz de proporcionar menores espessuras da base do pavimento, quando comparada aos demais materiais, devido ao aumento do M_R desta mistura. Se comparado ao solo puro, nota-se que este consegue atingir uma vida útil de apenas 12 anos, enquanto que a mistura S97T03 atinge 18 anos. Para a vida útil máxima encontrada no solo puro a espessura da base dimensionada é de 56 cm, valor que cai para 11 cm na mistura S97T03, ou seja, redução de 80 % na espessura da camada.

No caso da mistura S95T05 não se verifica redução na espessura da camada de base visto que o comportamento mecânico observado neste material foi um pouco inferior ao do solo puro. Apesar disso, esta mistura ainda pode ser utilizada em pavimentos com vida útil de até oito anos, onde a espessura da camada dimensionada tem valor igual à obtida no solo puro, que corresponde ao valor mínimo de camada de base (10 cm). Assim, parte do solo que seria empregado na construção da camada é substituído por PET triturado, resultando em menor extração nas jazidas e melhor destinação do resíduo.

A mistura S93T07 não é recomendada, pois piora consideravelmente o comportamento mecânico do solo, resultando em um pavimento com vida útil máxima de quatro anos.

4.5.3. Dimensionamento da base com as misturas com fibra de PET

Os resultados obtidos no dimensionamento do pavimento típico utilizando as misturas com fibra de PET 1.4 Dtex na camada de base do pavimento foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.57.

O gráfico mostra que a mistura 0,25%Fi1.4Dtex proporciona redução de até 66% na espessura da base do pavimento. Essa redução era esperada visto que o comportamento mecânico desta mistura, em termos de módulo resiliente, foi superior ao do solo puro. Além disso, esta mistura consegue atingir uma vida útil maior do que a solo puro.

A mistura 0,50%Fi1.4Dtex, por sua vez, não se mostra vantajosa, pois atinge uma vida útil máxima de 6 anos, ou seja, metade da encontrada para o solo puro.

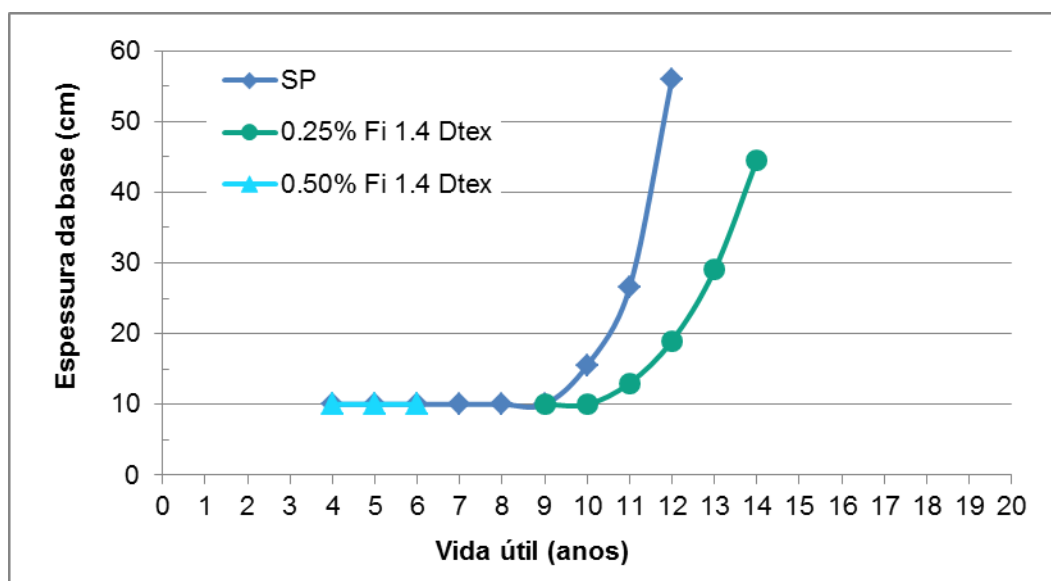


Figura 4.57 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 1.4 Dtex e da vida útil do pavimento.

No caso do dimensionamento do pavimento utilizando as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex na camada de base do pavimento os resultados foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.58. Nota-se que o dimensionamento das misturas com fibra 3.3 Dtex resulta em espessuras da camada de base maiores do que as obtidas no dimensionamento com o solo puro.

Além disso, ambas as misturas atingem uma vida útil 3 anos menor que a encontrada no solo puro. Estes dados são devido ao fato de as misturas com fibra 3.3 Dtex terem apresentado M_R inferiores ao do solo puro.

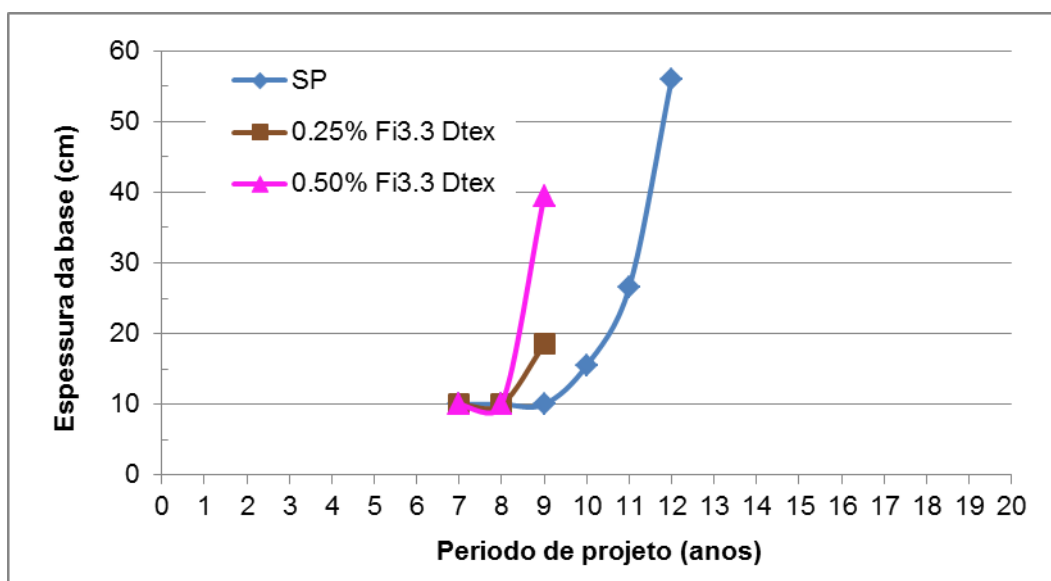


Figura 4.58 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 3.3 Dtex e vida útil do pavimento.

Também se nota que a mistura 0,25% Fi3.3 Dtex é um pouco melhor do que a mistura 0,50% Fi3.3 Dtex, ocorrendo uma redução de aproximadamente 50 % na espessura da camada para os 9 anos de vida útil máxima.

Na Tabela 4.32 estão sumarizadas as espessuras das camadas obtidas no dimensionamento do pavimento típico para cada material, de acordo com a vida útil desejada.

De um modo geral, pode-se dizer que a mistura S90P10 foi a que apresentou melhor resultado no dimensionamento, seguida da mistura S97T03 e depois a mistura 0,25% Fi1.4Dtex.

Tabela 4.32 Espessura em cm de camada de base para o solo puro e as misturas solo-PET.

Período de projeto (anos)	SP	S90P10	S80P20	S70P30	S97T03	S95T05	S93T07	0.25% Fi1.4 Dtex	0.50% Fi1.4 Dtex	0.25% Fi3.3 Dtex	0.50% Fi3.3 Dtex
4	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	>60,0	10,0	10,0	10,0	10,0
6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	>60,0	10,0	10,0	10,0	10,0
7	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	>60,0	10,0	10,0	>60,0	10,0
8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	>60,0	10,0	10,0	>60,0	10,0
9	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	24,5	>60,0	10,0	10,0	>60,0	18,5
10	15,5	10,0	11,5	13,5	10,0	>60,0	>60,0	15,5	10,0	>60,0	>60,0
11	26,5	10,0	17,5	24,5	10,0	>60,0	>60,0	26,5	13,0	>60,0	>60,0
12	56,0	10,0	28,0	37,0	11,0	>60,0	>60,0	56,0	19,0	>60,0	>60,0
13	>60,0	10,0	36,0	54,0	14,0	>60,0	>60,0	>60,0	29,0	>60,0	>60,0
14	>60,0	11,5	48,0	>60,0	17,0	>60,0	>60,0	>60,0	44,5	>60,0	>60,0
15	>60,0	12,5	>60,0	>60,0	22,5	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0
16	>60,0	14,5	>60,0	>60,0	27,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0
17	>60,0	16,0	>60,0	>60,0	35,5	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0
18	>60,0	18,5	>60,0	>60,0	54,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0
19	>60,0	21,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0
20	>60,0	23,5	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0

4.5.4.

Dimensionamento da base com as misturas com pó de PET aquecidas à 110 °C

Os resultados do dimensionamento do pavimento típico utilizando as misturas com pó de PET aquecidas (por 3 horas) na camada de base do pavimento foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.59.

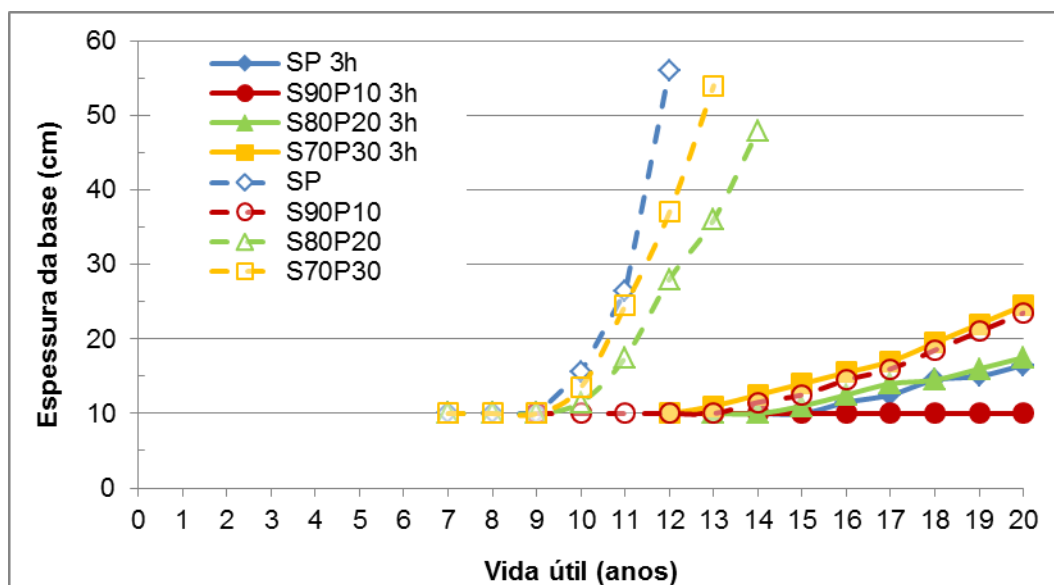


Figura 4.59 Variação da espessura da base em função do teor de pó de PET e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.

A Figura 4.59 mostra que as misturas aquecidas por 3 horas promovem redução considerável na espessura da camada de base e aumento da vida útil, devido ao aumento nos valores de módulo de resiliência apresentados na Figura 4.37 e Figura 4.38.

Observa-se também que as espessuras obtidas no dimensionamento da camada de base com mistura S90P10 aquecida foram as únicas menores que as espessuras encontradas no dimensionamento da camada de base com solo puro aquecido. Este resultado era esperado visto que somente esta mistura apresentou M_R superiores aos apresentados pelo solo puro aquecido. Deste modo a mistura S90P10 com 3 horas de aquecimento conseguiu atingir 20 anos de vida útil com uma espessura de 10 cm (espessura mínima), valor 43 % menor do que o obtido para a camada com o solo puro aquecido.

Ainda é possível perceber que ao se dimensionar o pavimento com a mistura S80P20 aquecida por 3h, são obtidas espessuras da camada de base muito

próximas às obtidas no solo puro com aquecimento, indicando que a inserção de 20 % de pó de PET ainda é viável.

No caso da mistura S70P30 aquecida por 3 horas ocorre um aumento de aproximadamente 140 % na dimensão da camada de base dimensionada, demonstrando que esta mistura não é competitiva com o solo puro aquecido.

4.5.5.

Dimensionamento da base com as misturas com PET triturado aquecidas à 110 ° C

Os resultados do dimensionamento do pavimento típico utilizando as misturas com PET triturado aquecidas (por 1 hora) na camada de base foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.60.

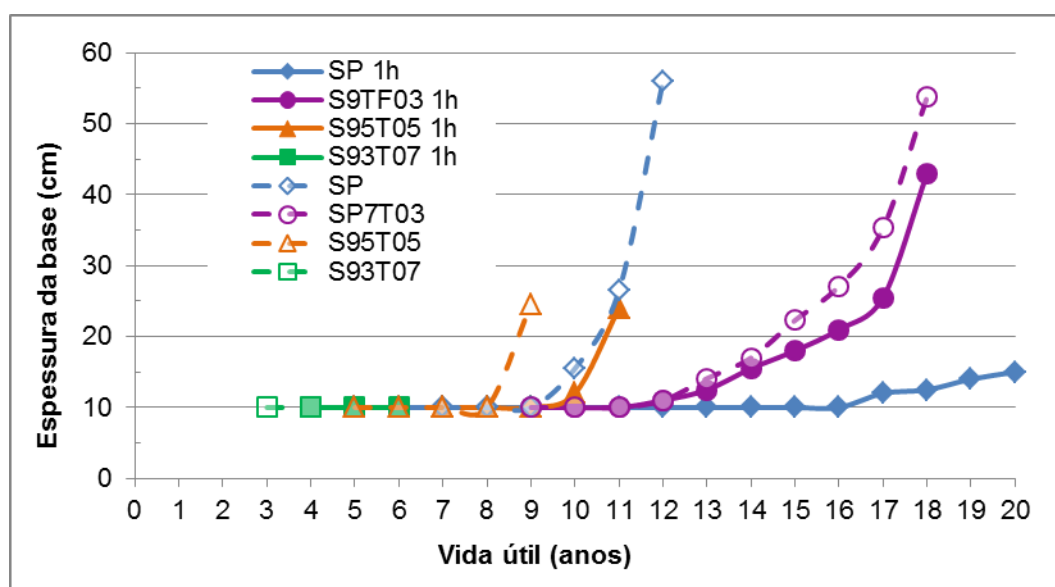


Figura 4.60 Variação da espessura da base em função do teor de PET triturado e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.

O gráfico apresentado na Figura 4.60 também é consequência dos resultados de módulo de resiliência obtidos para as misturas com PET triturado aquecidas apresentados nas Figura 4.42 e Figura 4.43. Devido ao aumento nos valores de M_R de cada mistura aquecida os dimensionamentos da camada de base atingiram vidas úteis maiores e espessuras menores que as encontradas no dimensionamento sem aquecimento.

Apesar de terem seu módulo de resiliência elevado com o aquecimento, nenhuma das misturas superou os valores de M_R do solo puro aquecido, como

consequência, nenhum dos dimensionamentos das misturas aquecidas forneceu espessuras inferiores às obtidas no dimensionamento com solo puro aquecido. Isto significa que não há muita vantagem em se aquecer as misturas com PET triturado.

4.5.6.

Dimensionamento da base com as misturas com fibra de PET aquecidas à 110 °C

Os resultados obtidos no dimensionamento do pavimento típico utilizando as misturas fibra de PET aquecidas (por 1 hora) na base do pavimento foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.61.

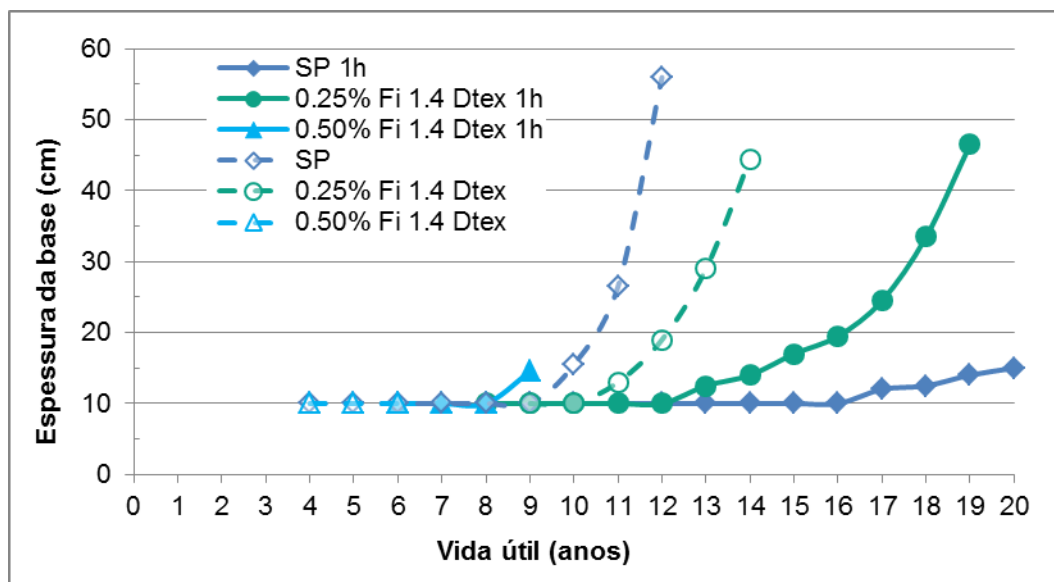


Figura 4.61 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 1.4 Dtex e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.

Assim como nas misturas com pó de PET e PET triturado o aquecimento das misturas com fibra de PET 1.4 Dtex proporcionou uma redução na espessura da camada de base e/ou um aumento da vida útil. Esta redução é motivada pelo aumento do M_R nas misturas aquecidas e foi muito mais significativa para o teor de 0,25 % de fibra.

Novamente, por nenhuma das misturas aquecidas ter alcançado módulos de resiliência superiores ao solo puro aquecido, não se observa benefícios no dimensionamento destas misturas.

Os resultados obtidos no dimensionamento do pavimento típico utilizando as misturas com fibra de PET 3.3 Dtex aquecidas (por 1 hora) na camada de base do pavimento foram plotados no gráfico apresentado na Figura 4.62.

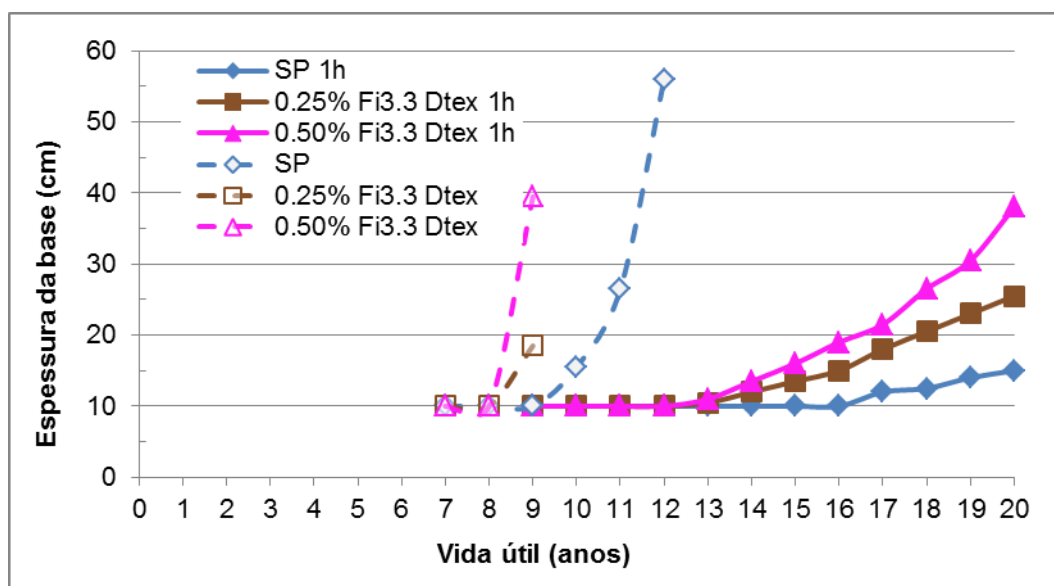


Figura 4.62 Variação da espessura da base em função do teor de fibra de PET 3.3 Dtex e da vida útil do pavimento, para as misturas aquecidas.

A análise dos resultados do dimensionamento obtido para as misturas com fibra 3.3 Dtex aquecidas é semelhante à apresentada para as misturas com fibra 1.4 Dtex aquecidas, com a diferença de que o aquecimento promoveu reduções de espessuras significativas tanto na mistura com teor de 0,25 % quanto na mistura com teor de 0,50 % de fibra 3.3 Dtex.

Mais uma vez nenhuma das misturas aquecidas conseguiu atingir espessuras da camada de base inferior às obtidas no solo puro aquecido.

Na Tabela 4.33 estão sumarizadas as espessuras das camadas obtidas no dimensionamento do pavimento típico para cada material aquecido, de acordo com a vida útil desejada.

Tabela 4.33 Espessura em cm de camada de base para o solo puro aquecido e para as misturas solo-PET aquecidas à 110 °C.

Período de projeto (anos)	SP	S90P10	S80P20	S70P30	S97T03	S95T05	S93T07	0.25% Fi1.4 Dtex	0.50% Fi1.4 Dtex	0.25% Fi3.3 Dtex	0.50% Fi3.3 Dtex
4	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
7	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	>60,0	10,0	10,0	10,0	10,0
8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	>60,0	10,0	14,5	10,0	10,0
9	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	>60,0	10,0	>60,0	10,0	10,0
10	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	12,0	>60,0	10,0	>60,0	10,0	10,0
11	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	24,0	>60,0	10,0	>60,0	10,0	10,0
12	10,0	10,0	10,0	10,0	11,0	>60,0	>60,0	10,0	>60,0	10,0	10,0
13	10,0	10,0	10,0	11,0	12,5	>60,0	>60,0	12,5	>60,0	10,5	11,0
14	10,0	10,0	10,0	12,5	15,5	>60,0	>60,0	14,0	>60,0	12,0	13,5
15	10,0	10,0	11,0	14,0	18,0	>60,0	>60,0	17,0	>60,0	13,5	16,0
16	11,5	10,0	12,5	15,5	21,0	>60,0	>60,0	19,5	>60,0	15,0	19,0
17	12,5	10,0	14,0	17,0	25,5	>60,0	>60,0	24,5	>60,0	18,0	21,5
18	14,5	10,0	14,5	19,5	43,0	>60,0	>60,0	33,5	>60,0	20,5	26,5
19	15,0	10,0	16,0	22,0	>60,0	>60,0	>60,0	46,5	>60,0	23,0	30,5
20	16,5	10,0	17,5	24,5	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	>60,0	25,5	38,0

4.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O MEV foi utilizado com a finalidade de se observar a microestrutura presente numa amostra de solo puro e as alterações ocorridas nessa microestrutura quando se adiciona 10 % de pó de PET (mistura S90P10) e 3 % de PET triturado (mistura S97T03). Também se buscou visualizar o efeito do aquecimento na microestrutura da mistura S90P10. Além disso, foram obtidos espectros EDS (Sistema de Energia Dispersiva) para uma análise quantitativa da composição química de cada uma das misturas.

Da Figura 4.63 à Figura 4.66 estão apresentadas as imagens obtidas no MEV com ampliação de 500 vezes e 1000 vezes para cada uma das amostras analisadas.

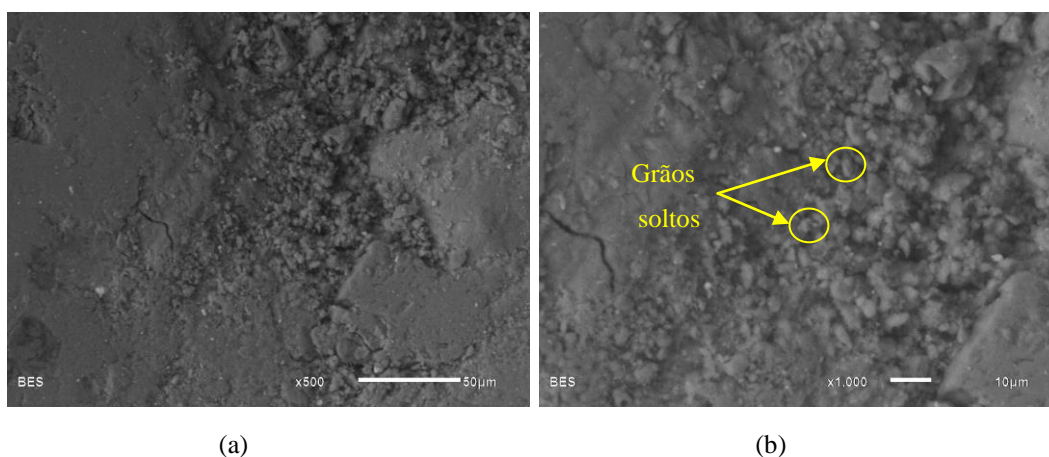


Figura 4.63 MEV do solo puro com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).

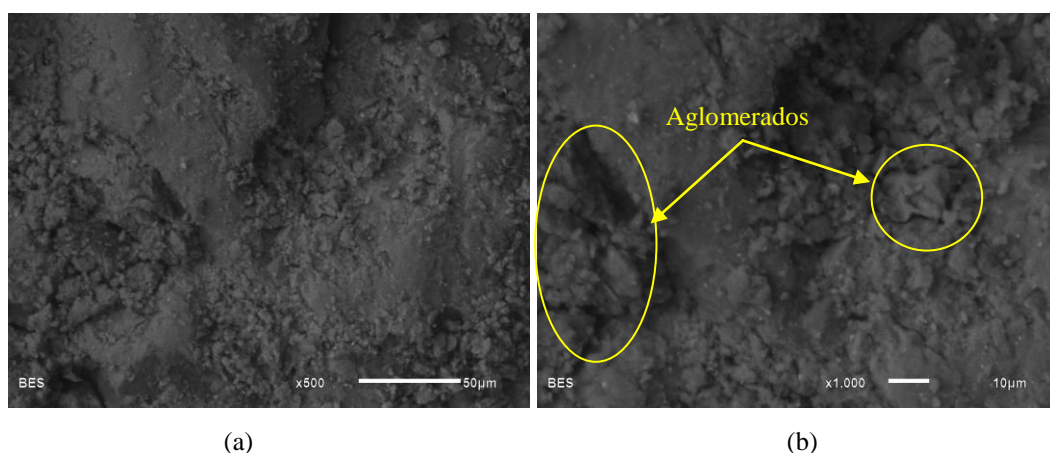


Figura 4.64 MEV da mistura S90P10 com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).

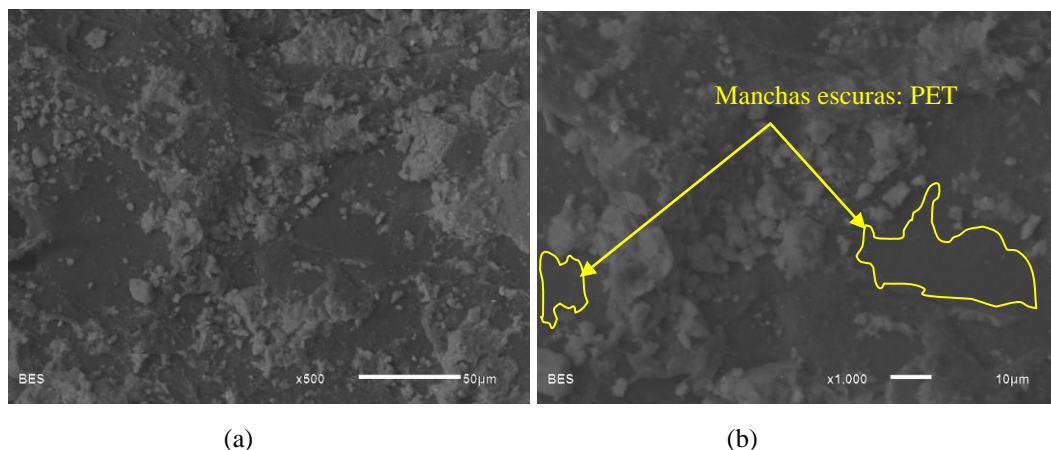


Figura 4.65 MEV da mistura S97T03 com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).

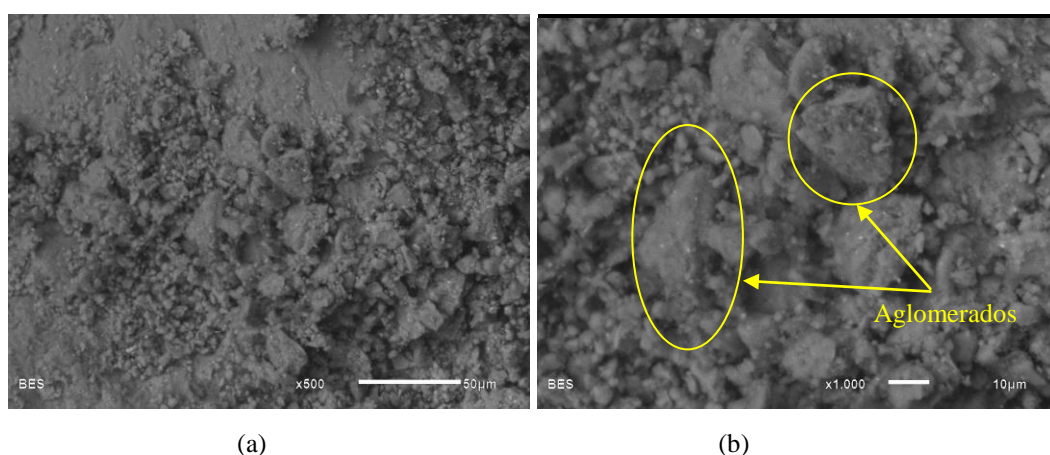


Figura 4.66 MEV da mistura S90P10 aquecida por 3 horas com ampliação de 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).

A partir da análise das figuras é possível notar que a mistura S90P10 (Figura 4.64) apresenta pequenos aglomerados em sua matriz, enquanto que no solo puro (Figura 4.63) os grãos aparentam estar mais soltos. Esta condição confere maior rigidez e consequentemente maiores valores de M_R à mistura S90P10 do que ao solo puro.

No caso da mistura S97T03 a imagem obtida no MEV (Figura 4.65) foi capaz de capturar grumos de solo bem aderidos a uma partícula de PET (apresentado como a parte mais escura da imagem). Isto demonstra que há uma boa adesão dos grãos de solo ao PET triturado, que para o teor considerado promove maior rigidez ao material. Entretanto, essa adesão não é tão eficiente ao promover rigidez quanto os aglomerados de solo e pó de PET verificados na mistura S90P10.

Para a mistura S90P10 aquecida por 3 horas a microestrutura se apresenta semelhante à encontrada na mistura sem aquecimento. Entretanto como houve redução do teor de água durante o aquecimento, o contato entre os grãos de solo e as partículas de PET melhorou, conferindo maiores valores de módulo de resiliência.

Durante o ensaio de MEV, alguns pontos das imagens foram escolhidos para fazer a análise da distribuição de elementos químicos a partir do EDS.

O espectro EDS do solo puro é apresentado pela Figura 4.67 e corresponde ao ponto 1 da amostra. Observa-se a presença de picos de Silício (Si), Ferro (Fe) e Alumínio (Al), que condiz com o tipo de solo (argiloso) analisado.

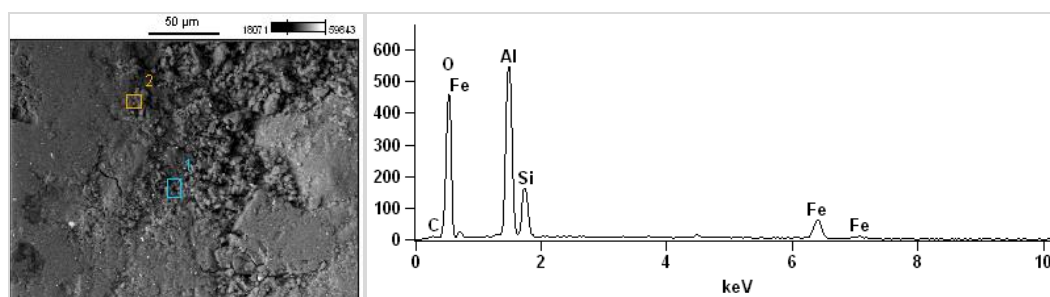


Figura 4.67 Espectro EDS da amostra de solo Puro.

Para o espectro EDS da amostra da mistura S90P10 (Figura 4.68) verifica-se que houve um incremento no teor de carbono. Isto se deve ao fato de 99,5% do PET ser composto por este elemento químico (Tabela 3.1). Os demais elementos presentes são os mesmos observados no solo puro.

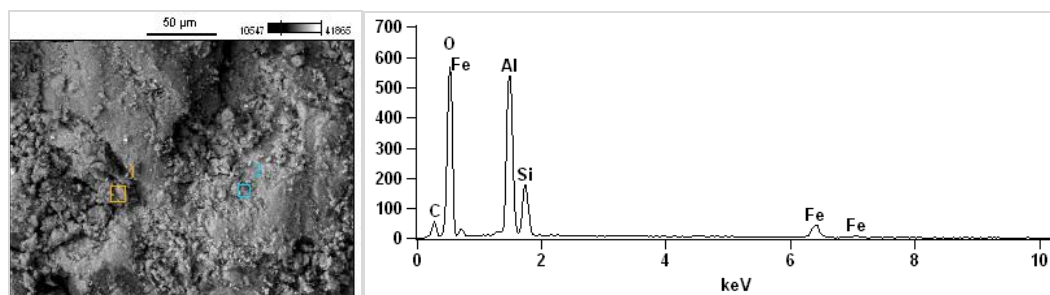


Figura 4.68 Espectro EDS da amostra da mistura S90P10.

No caso do espectro EDS da amostra da mistura S97T03 (Figura 4.69) observa-se que houve um incremento ainda maior no teor de carbono. Apesar do teor de PET triturado ser menor do que o utilizado na amostra com pó de PET, a partícula de PET triturado é maior e, portanto, ocupou maior parte da área de amostragem utilizada no EDS.

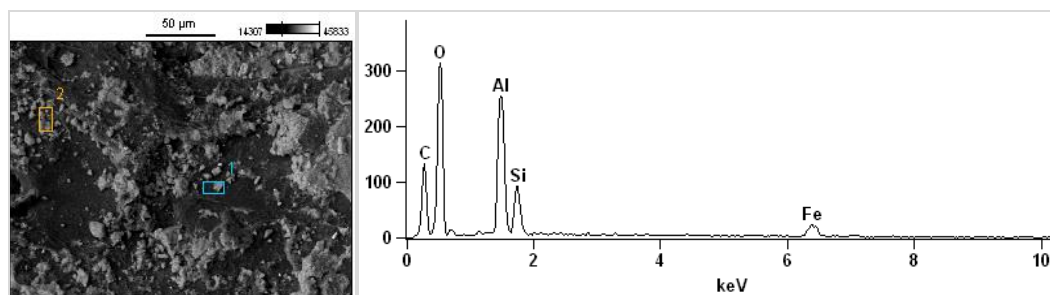


Figura 4.69 Espectro EDS da amostra da mistura S97T03.

O espectro EDS da mistura S90P10 aquecida não será apresentado, pois coincide com os resultados de composição química encontrados na mistura S90P10 sem aquecimento.

5

Conclusões e sugestões

5.1. Conclusões

Os resultados e análises obtidos dos ensaios realizados indicam a possibilidade de utilização do resíduo de garrafas PET como material alternativo em base de pavimentos. O resíduo, quando incorporado a um solo argiloso em uma porcentagem adequada, pode contribuir na melhoria das propriedades mecânicas do material. Além disso, a pesquisa possibilita uma ação mitigadora de impactos ao meio ambiente, uma vez que propõe um destino mais nobre para o resíduo até então disposto inadequadamente na natureza ou descartado nos aterros.

A seguir serão apresentadas as principais conclusões obtidas através dos resultados apresentados e analisados nos capítulos anteriores, relacionadas à adição de PET sob a forma de pó, triturado e fibra, no comportamento físico e mecânico de um solo argiloso para utilização em base de pavimentos.

- O acréscimo de pó de PET promove uma redução da massa específica aparente seca e da umidade ótima, enquanto que o acréscimo de PET triturado e fibra de PET promove uma leve redução da massa específica aparente seca e praticamente nenhuma alteração na umidade ótima.
- Por ser um material de granulometria fina (partículas inferiores a 0,42 mm) a inserção de pó de PET altera a interação do solo com a água tornando as misturas menos plásticas.
- A inserção de PET ao solo influencia no comportamento mecânico (sob carregamento cíclico) sendo constatado que, baixos teores de pó de PET e PET triturado promovem aumento na rigidez do solo. Entretanto, com o aumento do teor de PET o módulo de resiliência começa a cair. Para a inserção de fibra de PET não se verifica aumento de M_R para nenhum teor estudado.

- Com relação às diferentes formas adotadas para aplicação do resíduo, verifica-se que as misturas com pó de PET apresentou resultados melhores em termos mecânicos do que as misturas com PET triturado, que por sua vez superou os resultados encontrados nas misturas com fibra de PET.
- Observa-se que o aquecimento tem efeito sobre o comportamento mecânico das misturas, promovendo aumento do módulo de resiliência em todas as misturas, para as diferentes formas de aplicação e teores de PET.
- Com relação aos ensaios de módulo de resiliência realizados nas misturas recém-compactadas tem-se que a mistura S90P10 apresentou valores de M_R superiores aos encontrados no solo puro, e superiores aos obtidos nas demais misturas com pó, indicando ser esta a porcentagem de melhor estabilização granulométrica e consequentemente a mais eficaz. A adição de 20% de pó de PET ao solo também conseguiu proporcionar módulos de resiliência maiores que o do solo puro, apontando beneficiar ainda o comportamento mecânico.
- No caso dos ensaios de módulo de resiliência realizados nas misturas com PET triturado recém-compactadas apenas a mistura S97T03, mostrou-se melhor que o solo puro. Isto indica que este teor foi capaz de proporcionar uma melhor adesão e entrosamento entre as partículas de solo e de PET. Teores acima deste provavelmente geram mais contato entre partículas de PET reduzindo a rigidez e consequentemente o módulo de resiliência dos materiais.
- Para as misturas com fibra de PET recém-compactadas ensaiadas no triaxial cíclico, apenas a mistura com fibra de menor dimensão, 1.4 Dtex, inserida no teor de 0,25% permitiu valores de módulo de resiliência superiores aos do solo puro. Este resultado indica que um menor teor de fibra favorece uma melhor aderência entre as partículas de solo e as fibras. Também mostra que um número maior de fibras com menor comprimento e menor diâmetro na matriz de solo é mais eficaz, em termos de comportamento mecânico, do que um menor número de fibras com maior comprimento e maior diâmetro.
- No que se refere aos ensaios de módulo de resiliência realizado nas misturas aquecidas tem-se que, apesar do aquecimento ter promovido

aumento nos valores de M_R em todas as misturas, apenas aquela com 10% de pó de PET apresenta-se mecanicamente superior ao solo puro aquecido. Este resultado indica que o aquecimento é muito mais vantajoso para esta mistura do que para as demais, permitindo uma soma do benefício proporcionado pelo aquecimento ao promovido pela adição do pó de PET.

- Com relação ao dimensionamento do pavimento típico, o dimensionamento da camada de base com a mistura S90P10, tanto sem aquecimento quanto aquecida, se destacou por resultar em espessuras consideravelmente inferiores às obtidas no dimensionamento com o solo puro.
- Do ponto de vista ambiental, tem-se que, a introdução de PET ao solo resulta em grande benefício ao meio ambiente, conferindo um descarte mais apropriado do que a disposição em aterros ou descarte indevido na natureza. Mesmo para as situações em que a introdução de PET não promoveu melhoria no comportamento mecânico do solo, sua utilização pode ser viável desde que também não piore este comportamento.

5.2.

Sugestões para pesquisas futuras

- Analisar os efeitos da adição de pó, triturado e fibra de PET no comportamento mecânico e de estabilização do solo, realizando um programa experimental mais aprofundado, utilizando teores de PET diferentes dos estudados na presente pesquisa;
- Avaliar o comportamento ambiental das misturas, não somente para aplicação deste novo material em base de pavimentos, mas também para aplicações em obras geotécnicas em geral;
- Executar trechos experimentais com base de solo-PET, monitorando o seu comportamento mecânico e interações ambientais ao longo do tempo;
- Estudar por meio de ensaios mineralógicos os mecanismos de estabilização do solo e possíveis modificações na microestrutura, verificando as reações que ocorrem entre o solo e os diferentes tipos de PET;

- Realizar análise mecanística-empírica nos resultados obtidos para outros níveis de tráfego, mais elevados que os estudados, considerando a resposta positiva com os casos analisados;
- Avaliar a influência da umidade nos parâmetros mecânicos das misturas solo-PET.
- Avaliar a influência de outras temperaturas de aquecimento, bem como de outros métodos de aquecimento, nos módulos de resiliência (por exemplo, realizar as misturas com materiais aquecidos ao invés de aquecer os corpos de prova);
- Expandir o estudo da adição de PET em outros tipos de solo, dado os resultados obtidos.

6

Referências Bibliográficas

ABIPET (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET). **9º Censo da Reciclagem de PET-Brasil**. 2013.

ABIPET (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET). **10º Censo da Reciclagem de PET-Brasil**. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Aprova o Regulamento Técnico para embalagens descartáveis de polietileno tereftalato - PET - multicamada destinadas ao acondicionamento de bebidas não alcóolicas carbonatadas**. Portaria nº 987, de 08 de dezembro de 1998.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Dispões sobre o Regulamento Técnico sobre embalagens de polietilenotereftalato (PET) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau alimentício) destinados a entrar em contato com alimentos**. Resolução RCD nº 20, de 26 de março de 2008.

ALZATE, A. B. **Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo**. Tese (Mestrado em Engenharia), Universidad Nacional de Colombia. Medellin, 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **AASHTO T 307: Standart Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials**. Washington, 1999.

ARAO, M. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e de caracterização. Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de Ensaio.** ABNT. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2016.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, 1ª ed., Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2008.

BRASIL. Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília/DF, 2010.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de Resiliência através de ensaios triaxiais Dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: Estudo de três solos do nordeste brasileiro.** Dissertação (Mestrado em Transportes), Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-CLA 259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-ME 228: Solos – compactação em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-ME 256: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS. **DNER-ME 258: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos - SisPAV**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

FUJI, L. M. T. **Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias**. Dissertação (Mestrado em Getotecnia), Universidade de Brasília. Brasília, 2012.

GARCIA, N. F. **Strength characteristics of a Polymer bonded Sand**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), San Diego State University, 2016

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do Reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

LIMA NETO, P. DE S. **Estudo de utilização de fibras de polipropileno como reforço em solo para a pavimentação rodoviária**. 45º RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. Brasília, 2016.

LOPES, L. DOS S. E. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

LOUZADA, N. S. L. **Experimental study of soils reinforcement with crushed Polythylene Terephthalate (PET) residue**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A Experiência FWD**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1996.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise**. Santa Catarina, 2007.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.

MOGHADDAM, T. B.; KARIM, M. R. **Properties of SMA mixtures containing waste polythylene terephthalate**. World Academy of Science, Engineering and Technology, v. 6, p. 612-622, 2012.

MUÑETÓN, C. M. G. **Avaliação geotécnica de um perfil de solo tratado biotecnologicamente para fins de pavimentação**. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

NOGAMI, J. S. VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

NOGAMI, J. S. VILLIBOR, D. F. **Uma nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro, 1981.

PLASTIC INSIGHT. **Polyethylene Terephthalate: Production, Price, Market and its Properties**. Disponível em: <<https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polyethylene-terephthalate/>>. Acesso em: fevereiro/2019. 2017.

QUEIROZ, B. O. DE. **Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Porosas Modificadas com Politereftalato de Etileno (PET)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2016.

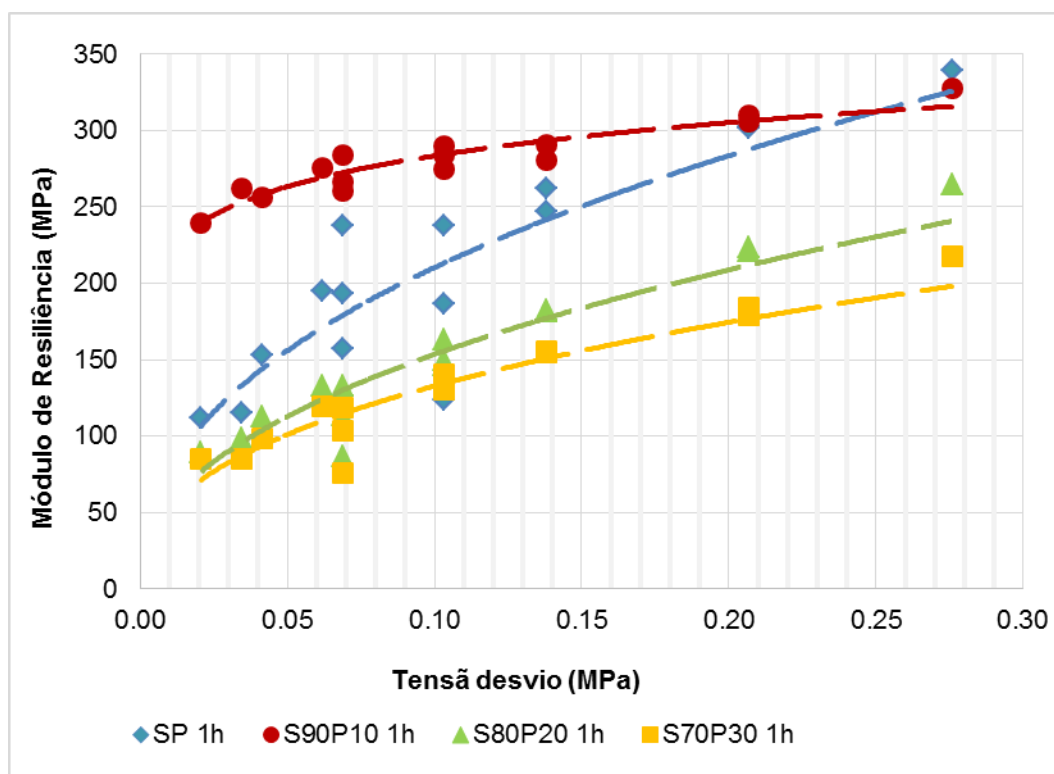
ROMÃO, W. SPINACÉ, M. A. S. DE PAOLI, M. A. **Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma revisão sobre os processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem**. Polímero: Ciência e Tecnologia, Vol 19, nº 2, p 121-132, 2009.

SANTANA, F. I. T. DE. **Estudos sobre misturas de Agregado Reciclados de Resíduos da Construção Civil com solos para utilização em pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2014.

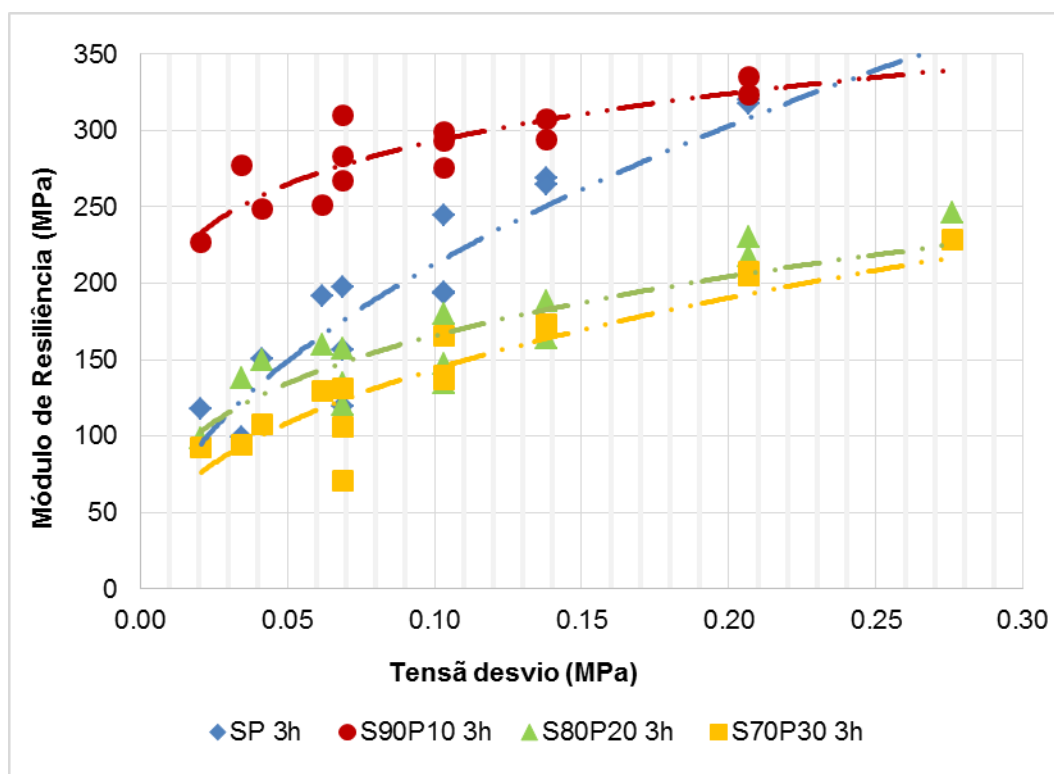
SENEZ, P. C. **Comportamento de uma areia Reforçada com Fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

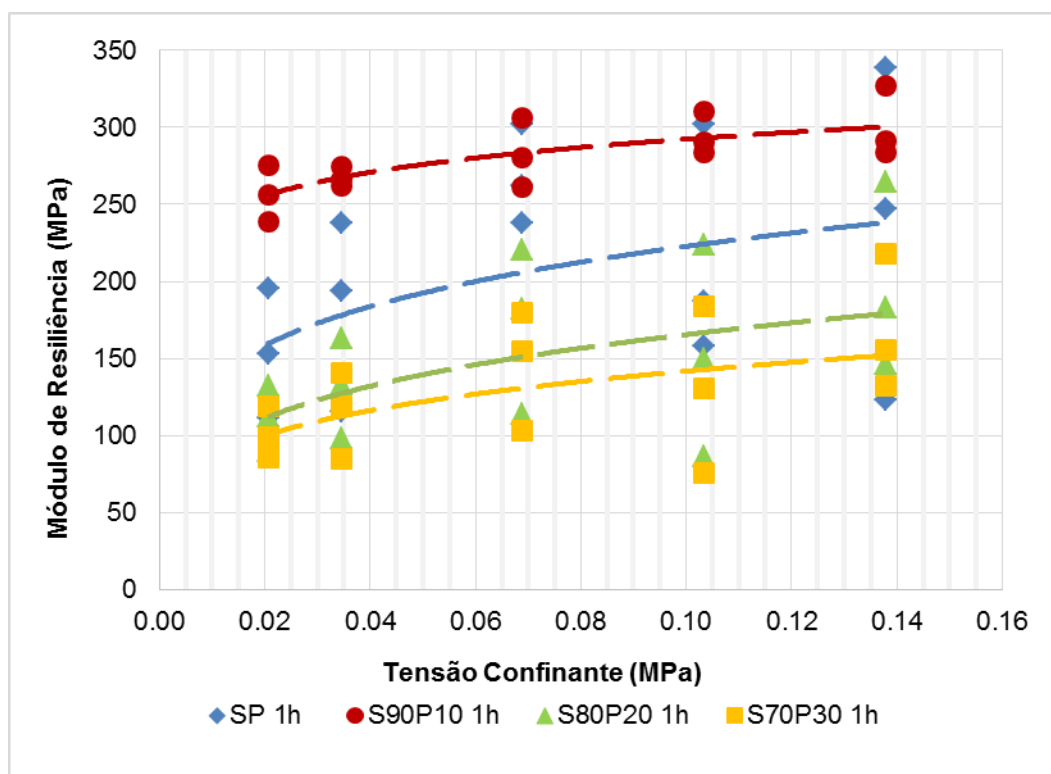
Anexo



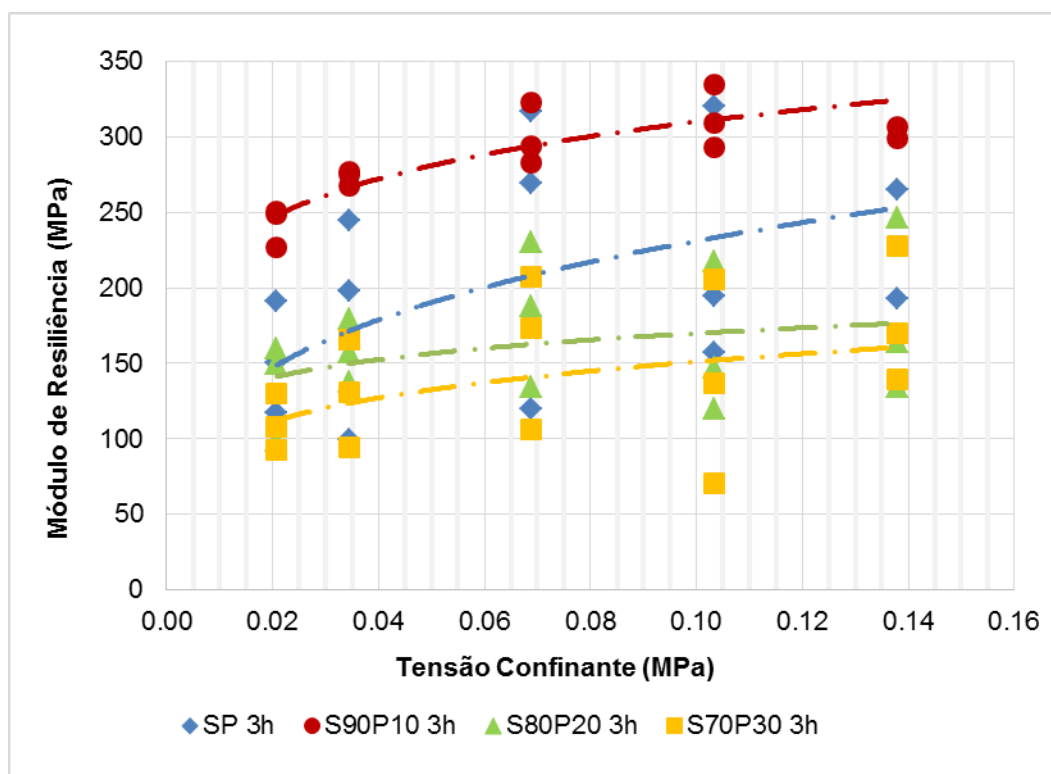
A.1 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com pó de PET aquecidas por 1 hora.



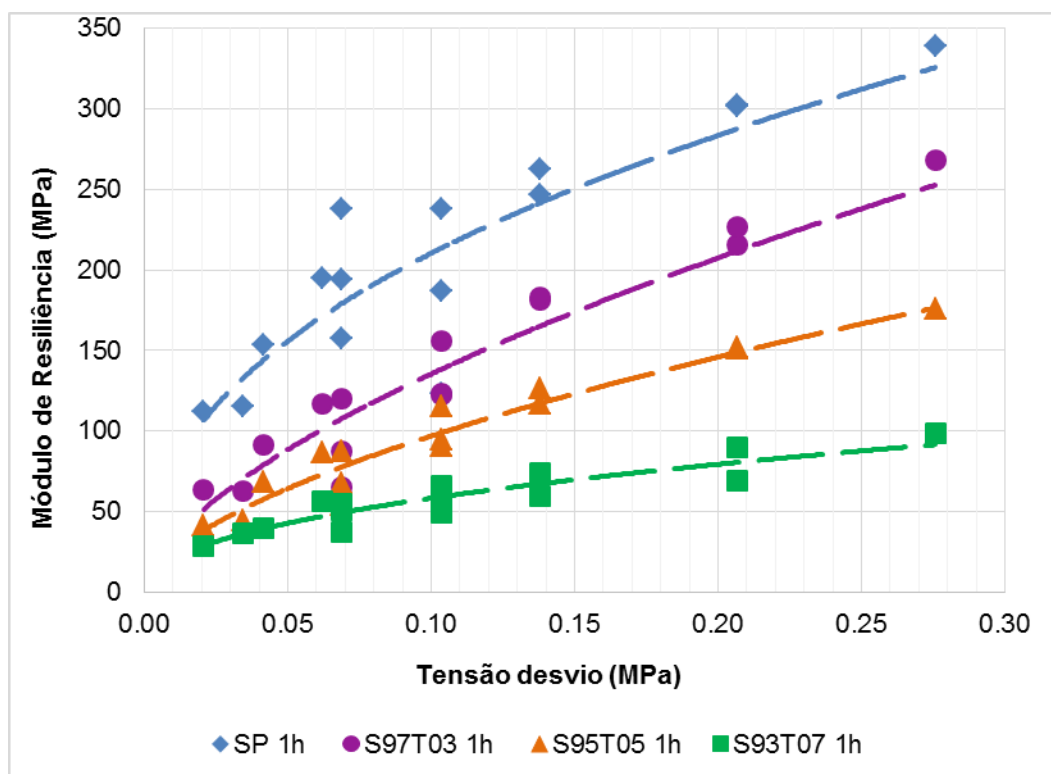
A.2 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com pó de PET aquecidas por 3 horas.



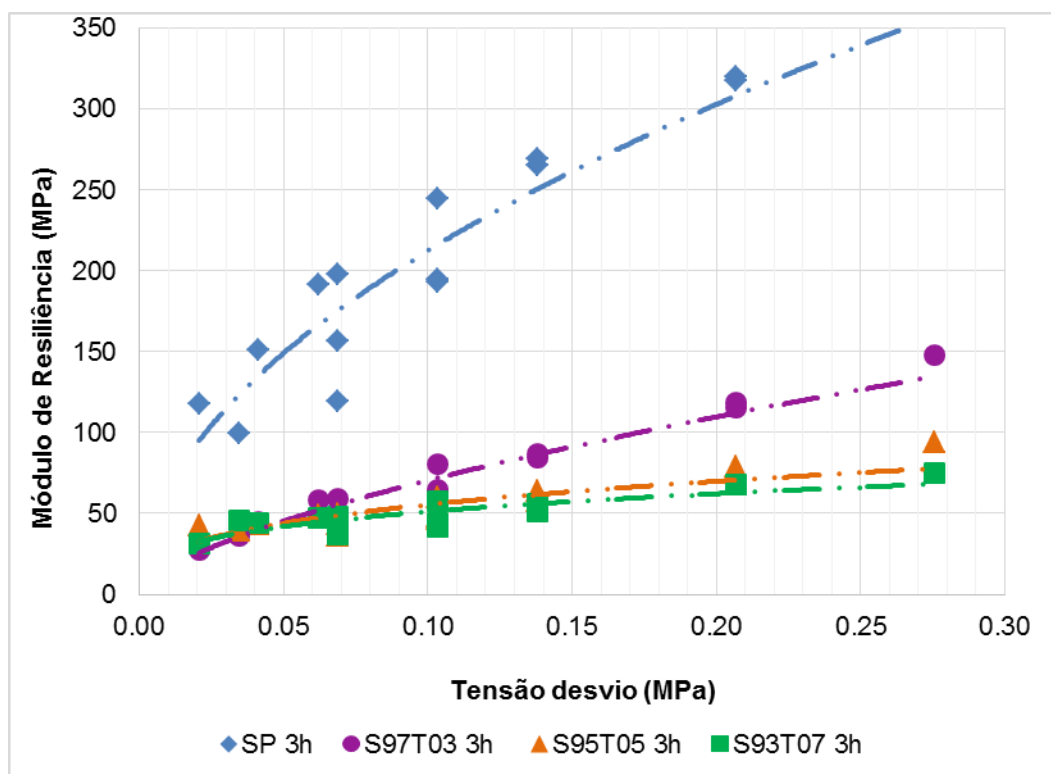
A.3 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com pó de PET aquecidas por 1 hora.



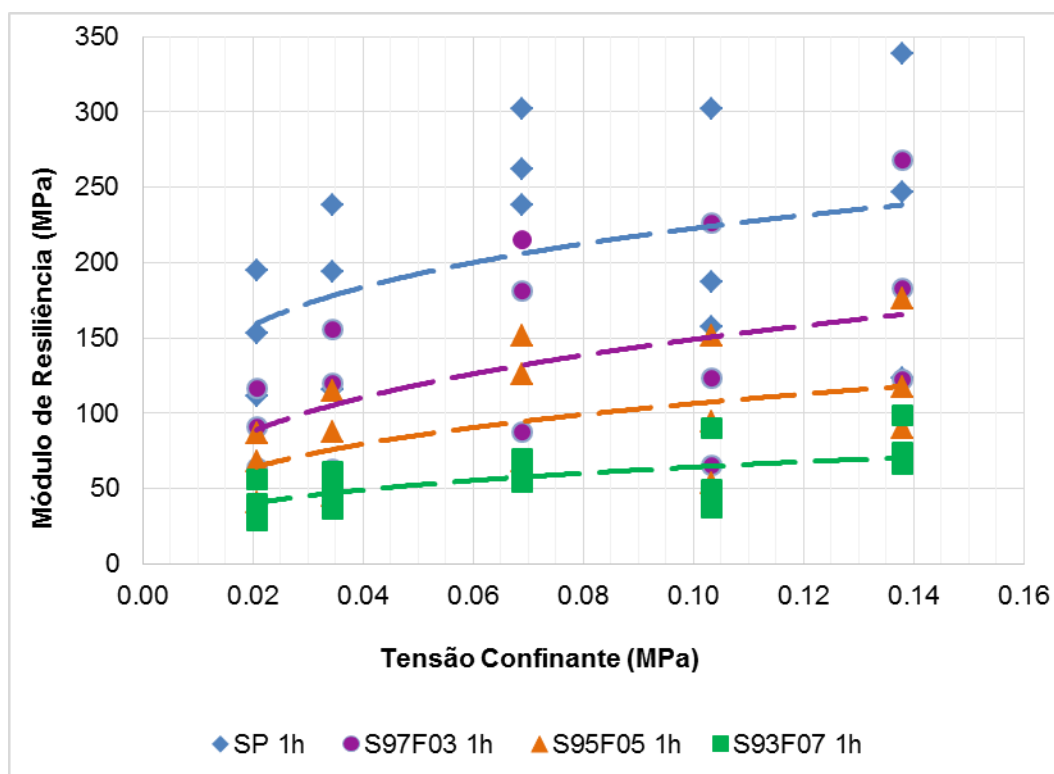
A.4 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com pó de PET aquecidas por 3 horas.



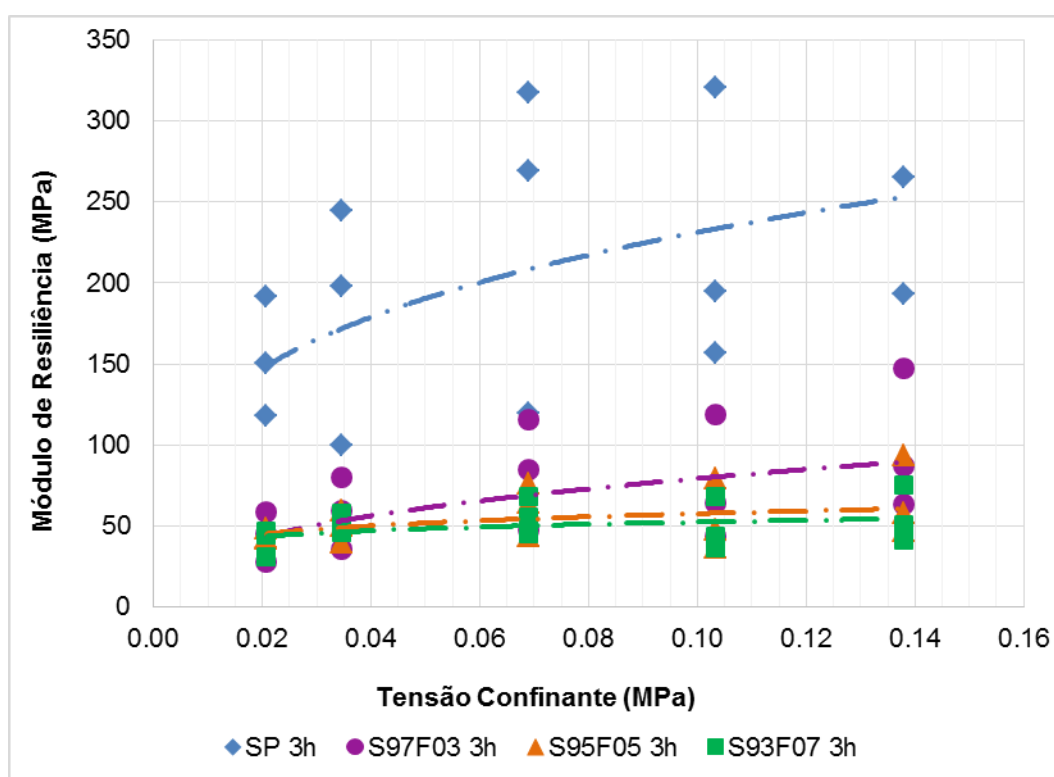
A.5 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com PET triturado aquecidas por 1 hora.



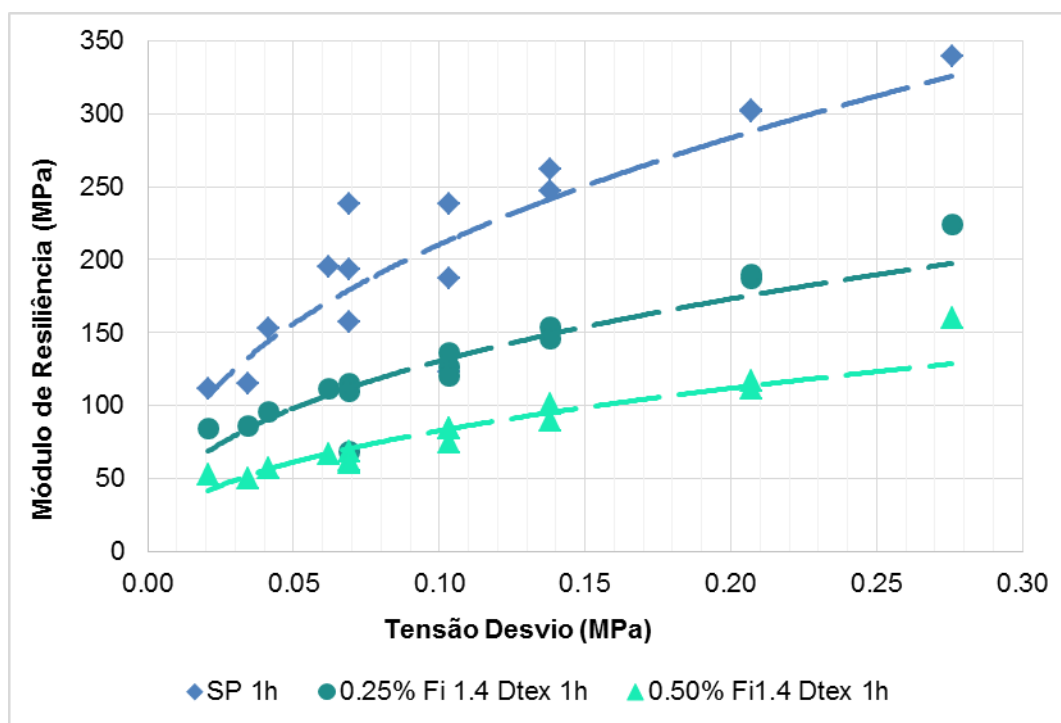
A.6 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com PET triturado aquecidas por 3 horas.



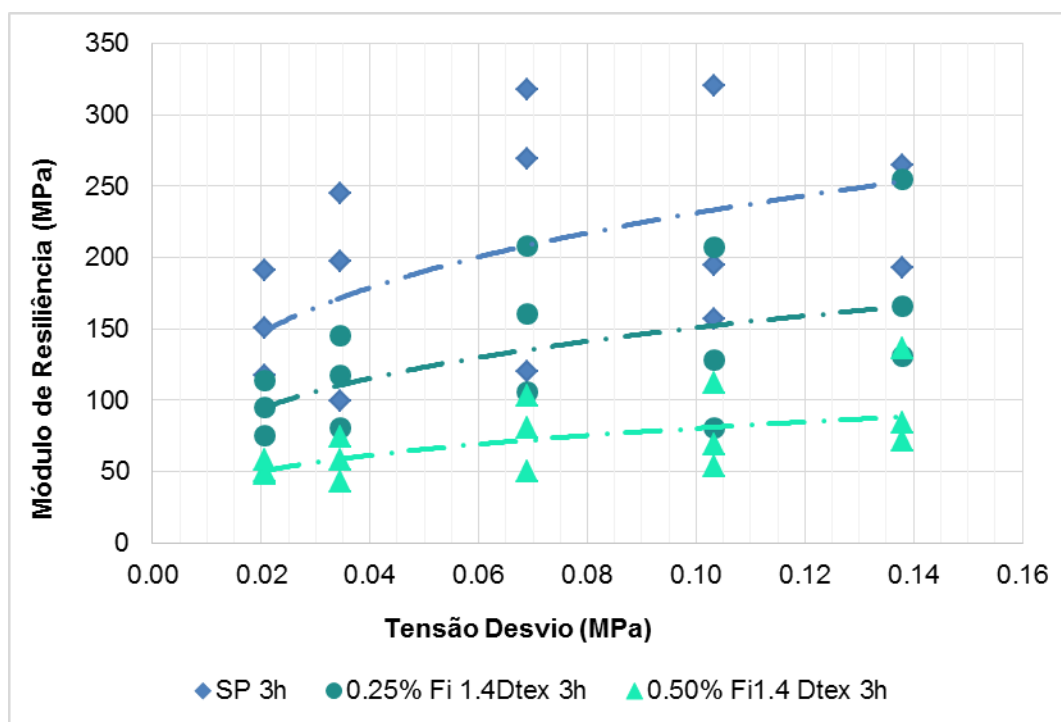
A.7 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com PET triturado aquecidas por 1 hora.



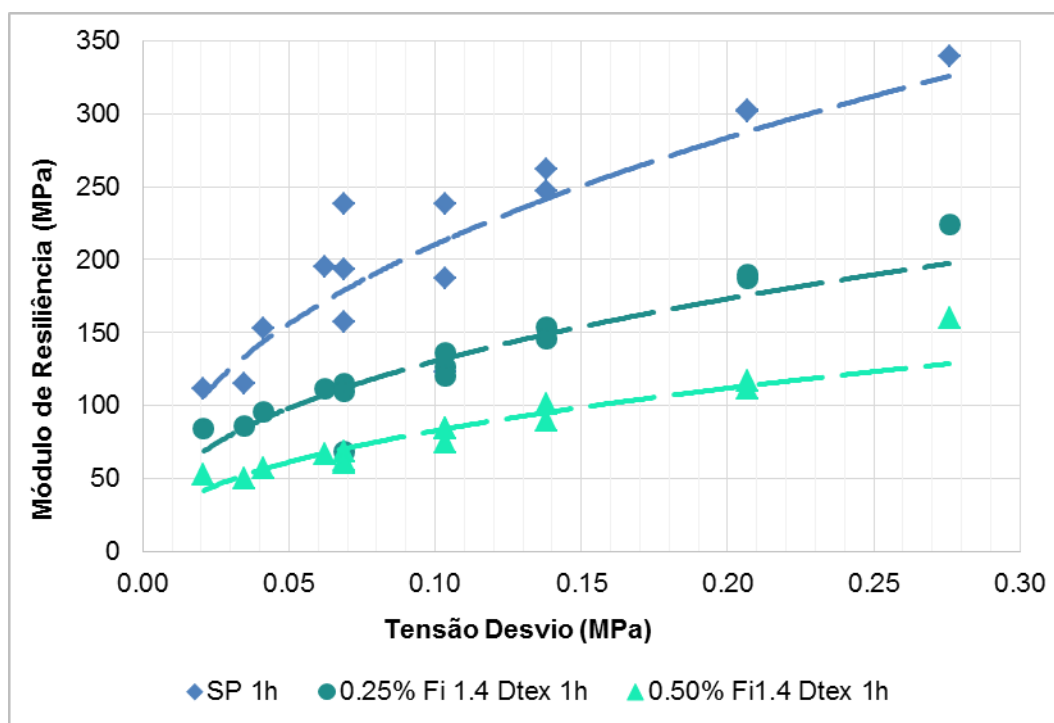
A.8 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com PET triturado aquecidas por 3 horas.



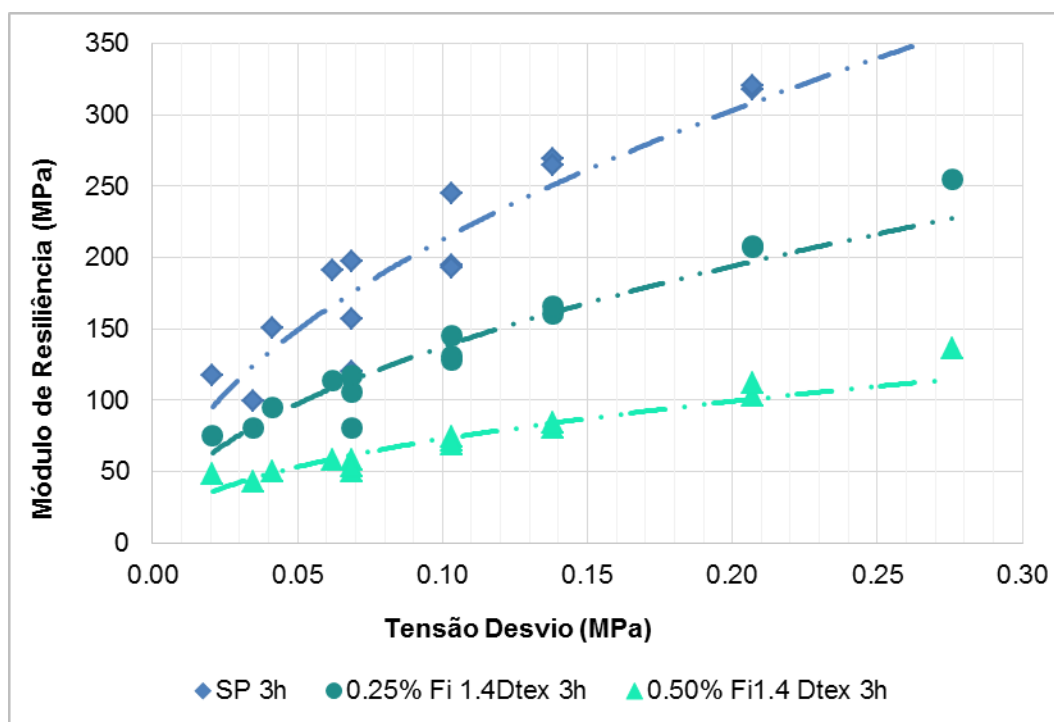
A.9 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 1 hora.



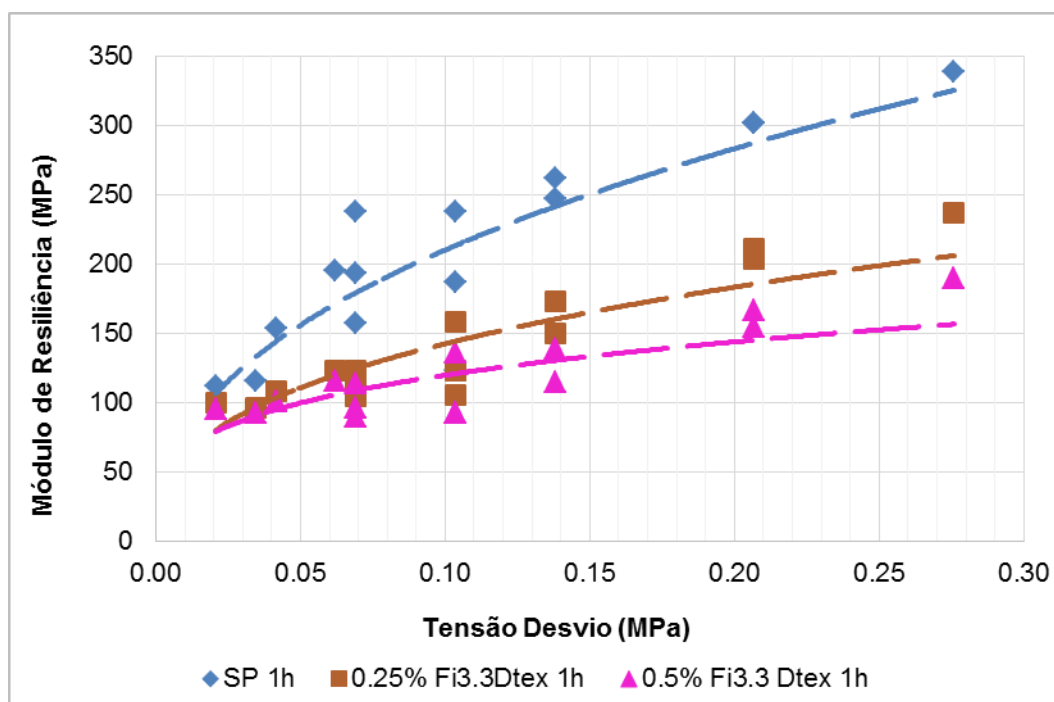
A.10 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 3 horas.



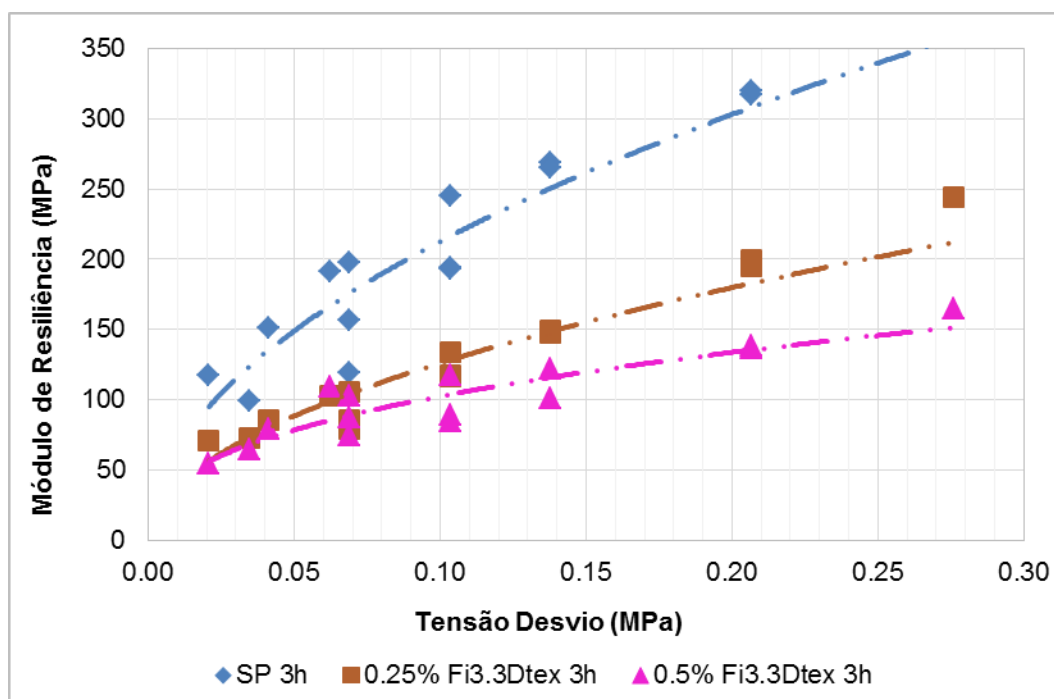
A.11 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 1 hora.



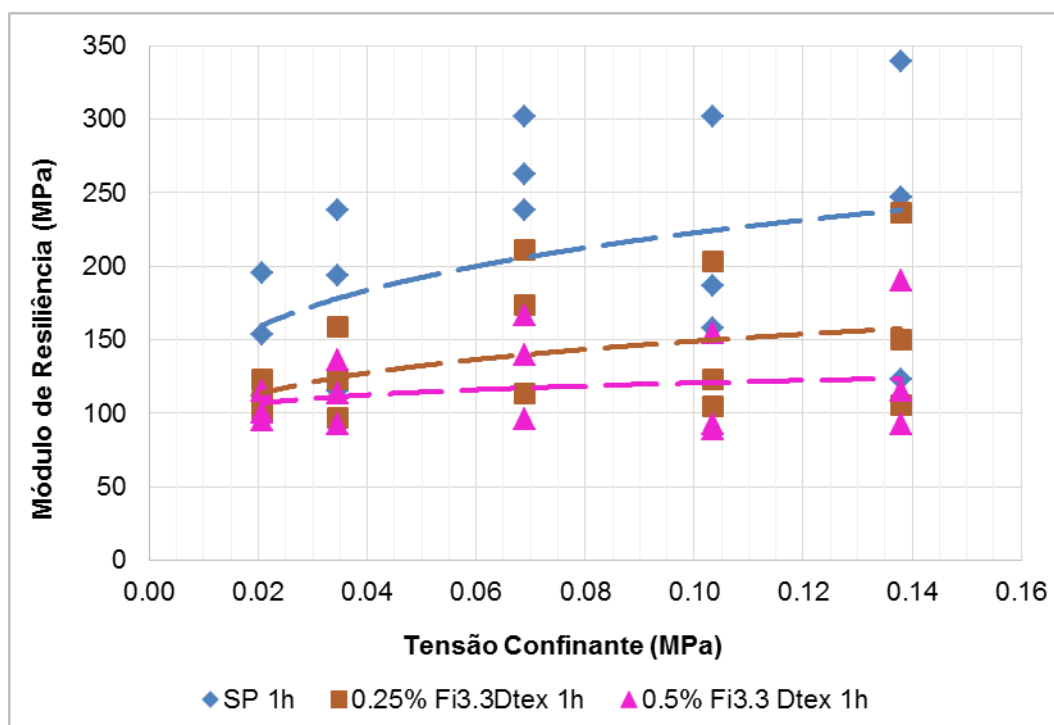
A.12 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 1.4 Dtex aquecidas por 3 horas.



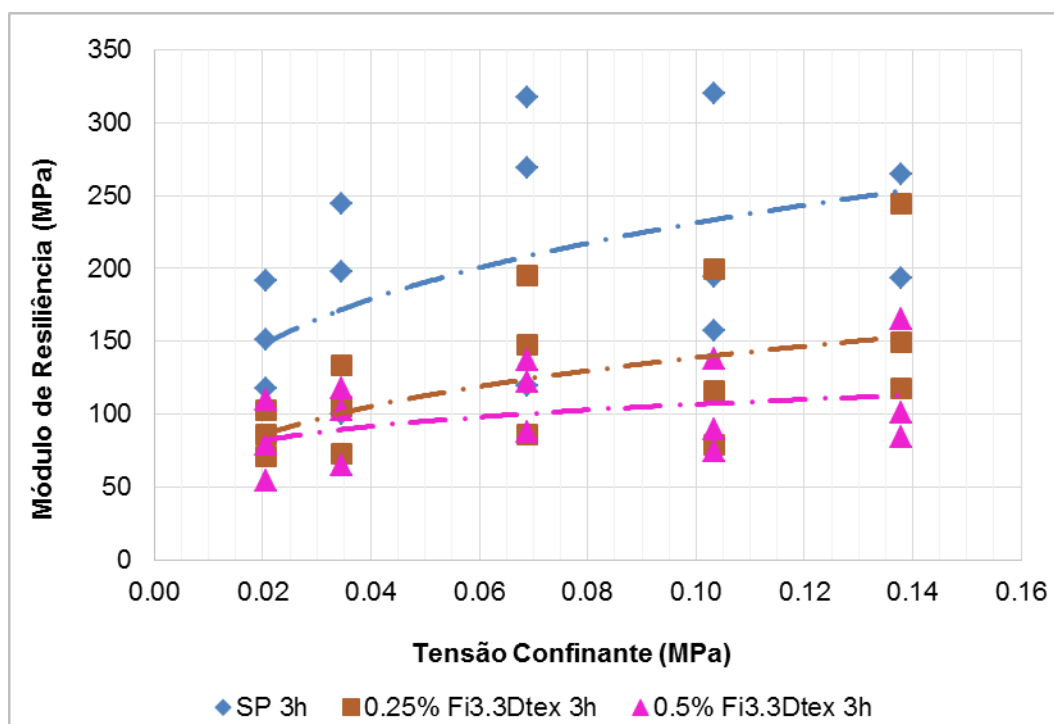
A.13 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 1 hora.



A.14 - Relação do módulo de resiliência com a tensão desvio das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 3 horas.



A.15 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 1 hora.



A.16 - Relação do módulo de resiliência com a tensão confinante das misturas com Fibra 3.3 Dtex aquecidas por 3 horas.