



MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES,
PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL

DEPARTAMENTO NACIONAL DE
INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

DIRETORIA GERAL

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E
PESQUISA

INSTITUTO DE PESQUISAS
RODOVIÁRIAS

Rodovia Presidente Dutra, km 163
Centro Rodoviário – Vigário Geral
Rio de Janeiro/RJ – CEP: 21240-000
Tel.: (21) 3545-4753

Maio/2018

NORMA DNIT 179/2018 - IE

Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio

Autor: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR

Processo: 50607.005822/2016-00

Aprovação pela Diretoria Colegiada do DNIT na Reunião de 15/05/2018.

Direitos autorais exclusivos do DNIT, sendo permitida reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte (DNIT), mantido o texto original e não acrescentado nenhum tipo de propaganda comercial.

Palavras-chave:

Solos, britas, deformação permanente

Total de páginas

20

Resumo

Esta norma especifica os procedimentos de ensaio para determinação da deformação permanente de solo, brita graduada e materiais não estabilizados quimicamente, com características que simulam as condições físicas e os estados de tensões que estes materiais estarão submetidos nas camadas do pavimento, devido às cargas móveis do tráfego. Descreve o equipamento e as condições do ensaio para obtenção de modelo de comportamento.

Este procedimento serve para determinar propriedades mecânicas que podem ser usadas para previsão do desempenho dos materiais e para calcular a resposta estrutural do pavimento. O ensaio é aplicável em corpos de prova cilíndricos preparados por compactação em laboratório, com o tamanho máximo da partícula menor ou igual a $\frac{1}{4}$ do diâmetro do corpo de prova.

Abstract

This standard specifies the test procedures for determining the permanent deformation of soil and unbound mixtures with features that simulate the physical conditions and stress states of these materials in pavement layers subjected to moving loads. It describes the equipment and test conditions for obtaining behavior models.

This procedure is useful to determine mechanical properties that can be used to predict the performance of materials and for calculating the structural responses of pavements structures. The test is applicable to cylindrical specimens of unbound mixtures prepared by laboratory compaction, with a maximum particle size less than or equal to $\frac{1}{4}$ of the specimen diameter.

Sumário

Prefácio.....	2
1 Objetivo	2
2 Referências normativas.....	2
3 Definições.....	2
4 Aparelhagem.....	3
5 Amostra.....	4
6 Preparação do corpo de prova	5
7 Montagem do ensaio.....	6
8 Aplicação das cargas repetidas.....	6
9 Cálculo	7
10 Resultados	8
Anexo A (Normativo) -Figuras - Esquemas	11
Anexo B (Normativo) - Figura - Aparelhagem.....	12
Anexo C (Normativo) - Figura - Cilindro.....	13
Anexo D (Normativo) - Tabela	14
Anexo E (Normativo) - Relatório	15
Anexo F (Informativo) – Fotos - Equipamento	16

Anexo G (Informativo) – Fotos - Ensaio	17
Anexo H (Informativo) – Figura - Exemplo	19
Anexo I (Informativo) – Bibliografia	20
Índice geral.....	21

Prefácio

A presente Norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DPP, para servir como documento base, visando estabelecer os procedimentos para a realização do ensaio para determinação da deformação permanente de solos. Sua criação foi promovida no âmbito do Termo de Execução Descentralizada – TED nº 682/2014 firmado com a COPPE/UFRJ. Está formatada de acordo com a norma DNIT 001/2009-PRO.

1 Objetivo

Este método descreve o ensaio de deformação permanente de solos utilizando o equipamento triaxial de carga repetida. O ensaio de deformação permanente consiste em aplicar um grande número de ciclos de carga repetida para um estado de tensões em cada corpo de prova, anotando as deformações permanentes acumuladas ao longo dos ciclos. Este procedimento pode ser usado para:

- Determinar a deformação permanente de um material para um estado de tensões particular;
- Definição dos parâmetros do modelo de comportamento de deformação permanente com o estado de tensões e número de ciclos, para ser usado em projeto de dimensionamento de pavimentos.

Além das amostras de solo, esta norma pode ser aplicada para amostras de britas graduadas, materiais estabilizados granulometricamente, solos e materiais melhorados por pequenas quantidades de adições de produtos químicos ou elementos como fibras naturais ou sintéticas, e outros materiais alternativos, desde que não estabilizados quimicamente.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação desta Norma. Para referências datadas aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas aplicam-se as

edições mais recentes do referido documento (inclusive emendas).

- DNER – ME 213: Solos – Determinação do teor de umidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR.
- GUIMARÃES, A. C. R. Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

3 Definições

Para os fins desta norma aplicam-se as definições seguintes:

3.1 Pulso

É o tempo de duração da carga em que o corpo de prova é submetido a uma tensão pulsante vertical (tensão desvio - σ_d).

3.2 Duração do ciclo da carga repetida

Uma repetição de carga ou ciclo corresponde a um pulso de carregamento seguido de um intervalo ou período de repouso. O pulso padrão é de 0,1 segundo de duração e o período de repouso deve ser proporcional à frequência adotada para o ensaio. No caso de frequência de 1 Hz o pulso de 0,1 segundo é seguido de um tempo de repouso de 0,9 segundo ou 60 ciclos por minuto.

3.3 Frequência

No ensaio de carga repetida a frequência corresponde a quantos ciclos de carga são aplicados por minuto. No padrão de frequência de 2 Hz são 120 ciclos por minuto, com a duração de um ciclo de carga repetida definido como um pulso de 0,1 s seguido de intervalo de repouso de 0,4 segundo. Ver esquema da Figura 1 do Anexo A.

3.4 Deslocamento resiliente/recuperável - δ_r

Deslocamento resiliente axial ou vertical de um ciclo de carga é definido como sendo o deslocamento recuperável medido entre o ponto onde a tensão aplicada é máxima e o fim do descarregamento. Ver esquema da Figura 2 do Anexo A.

3.5 Deslocamento plástico ou permanente total -

$$\delta_p$$

O deslocamento plástico ou permanente total é definido como deslocamento axial ou vertical acumulado durante a aplicação de cada par de tensões, do primeiro ao último ciclo do ensaio.

3.6 Deformação resiliente ou recuperável - ε_r

É o deslocamento resiliente vertical dividido pela altura de referência do medidor de deslocamento.

3.7 Deformação permanente específica - ε_p

É o deslocamento plástico ou permanente dividido pela altura de referência do medidor de deslocamento.

3.8 Deslocamento total ou deformação permanente (DP) total do pavimento

É a parcela permanente, não recuperável, da deformação total ou deslocamento total proveniente da passagem repetida das rodas dos veículos, considerando a contribuição das camadas do pavimento, sendo cumulativa ao longo da vida do pavimento. Também é chamada de afundamento de trilha de rodas. O resultado deste ensaio se aplica ao cálculo deste defeito estrutural que é expresso por:

$$\delta_{total}^p = \sum_{i=1}^n \varepsilon_p^i h_i$$

Onde:

δ_{total}^p = Profundidade total do afundamento na superfície do pavimento (afundamento de trilha de roda);

ε_p^i = Deformação específica plástica da i-ésima camada;

h_i = Espessura da i-ésima camada;

n = Número total de camadas.

NOTA: Nesta norma mantém-se, por uso histórico na pavimentação, as denominações deformação específica e deformação total, embora deformação específica seja um termo redundante e deformação total corresponda a deslocamento.

4 Aparelhagem

Está esquematizada no Anexo B, sendo constituída de:

- a) Prensa pneumática: estrutura de suporte, base ou suporte vertical da célula triaxial, cilindro de pressão a ar comprimido com pistão de carga. Admite-se, também, o uso de prensa hidráulica com estrutura que permita a aplicação de cargas repetidas. Toda prensa deve ter capacidade de carga compatível com os níveis de tensões a serem aplicadas sem apresentar deformações que comprometam o ensaio;
- b) Célula ou câmara triaxial, composta de um cilindro de policarbonato (corpo da câmara) ou material similar que permita a visualização do corpo de prova durante a execução do ensaio, base e tampa (placa superior de vedação) metálicas. As dimensões desta câmara devem ser suficientes para comportar com folga corpos de prova dos tamanhos especificados nesta norma, com todo o sistema de medições necessário para ensaiar amostras sob a ação de cargas verticais repetidas. A câmara deve ter um furo no centro da base inferior de 3 mm de diâmetro, conectado à base da mesma, e com ligação externa de mesmo diâmetro, com terminação por válvula de drenagem;
- c) Sistema pneumático de carregamento, composto de:
 - Válvulas reguladoras de pressão de ar comprimido, para aplicação da tensão desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3);
 - Válvula de três vias do carregamento vertical (pressão de ar, tempo de carregamento e frequência);
 - Temporizador eletrônico, para controle do tempo de abertura da válvula e frequência de aplicação do carregamento.
- d) Sistema de vácuo, com a finalidade de verificar a presença de furos na membrana que envolve a amostra;
- e) Transdutor de carga axial. A carga vertical ou axial aplicada repetidamente no corpo de prova deve ser monitorada por um transdutor de carga axial (célula de carga), com sensibilidade para medir com a acurácia de $\pm 0,5 \%$, ou outro sistema calibrado que garanta a

precisão das tensões aplicadas durante todo o ensaio. Quando utilizada célula de carga, esta deve ser colocada dentro da câmara triaxial, em contato direto com o cabeçote;

f) Sistema de medição do deslocamento vertical do corpo de prova sob o carregamento repetido, constituído de:

- Dois transdutores mecânico–eletromagnéticos, tipo LVDT (“linear variable differential transformer”), posicionados diametralmente opostos no corpo de prova;
- Cada LVDT pode estar preso ao cabeçote superior e apoiado em haste guia, que se estende até a base onde se encontra um prolongador ajustável externamente à célula (Anexo B), ou fixado no terço médio da amostra;
- O LVDT e o sistema de aquisição de dados usados devem garantir uma precisão na leitura do deslocamento de 1×10^{-3} mm. A faixa de leitura para o LVDT deve ser de até ± 5 mm;
- Computador ou sistema de aquisição de dados, com placa conversora de sinal analógico/digital, capaz de medir e registrar deslocamentos cíclicos compatíveis com a sensibilidade do LVDT e a carga cíclica.

NOTAS:

- 1) O princípio de funcionamento dos transdutores LVDT consiste em transformar as deformações axiais durante o carregamento repetido em potencial elétrico, cujo valor é registrado no computador ou sistema de aquisição de dados. A média dos deslocamentos registrados nos LVDTs é usada para o cálculo da deformação permanente específica e acumulada. Uma calibração com micrômetro é necessária para correlacionar as deformações com os valores dos registros;
 - 2) É possível utilizar outros tipos de medidores de deslocamento, desde que atendam à precisão da leitura cíclica.
- g) Pedra porosa - disco rígido poroso, de diâmetro igual ou ligeiramente menor que o corpo de prova. O

disco deve ser regularmente checado por passagem de água ou ar sob pressão, para verificar a sua porosidade;

h) Membrana de borracha - a membrana usada para encamisar o corpo de prova deve propiciar proteção contra a entrada de ar. Para que não haja compressão no corpo de prova pela membrana, esta, em repouso, deve ter um diâmetro maior que 95 % do diâmetro do corpo de prova. A espessura da membrana não deve exceder 0,8 % do diâmetro do corpo de prova;

i) Molde cilíndrico tripartido, de aço, com dimensões internas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, ou de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, base de aço, duas braçadeiras de aço (ou abas soldadas nas laterais do molde), apertadas por meio de parafusos, e anel complementar (colarinho). Ver Anexo C.

O tamanho do cilindro tripartido está condicionado à granulometria da amostra de solo a ser ensaiada (ver seção 5);

j) Soquete para compactação por impacto (manual ou mecânico). O soquete deve ser do tipo Proctor e pode ser leve (massa de 2.270 g) ou pesado (massa de 4.540 g);

k) Balança de precisão, com capacidade para determinar a massa do corpo de prova (dentro e fora do cilindro), com acurácia de $\pm 0,2$ %;

l) Estufa, com capacidade de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C.

5 Amostra

As amostras devem ser preparadas de acordo com as alíneas “a” e “b” desta seção.

a) No caso de solo ou material sem pedregulho:

Para material totalmente passante na peneira 4,8 mm procede-se à secagem ao ar ou em estufa, desde que a temperatura não ultrapasse 60 °C; em seguida, realiza-se o destorroamento em almofariz com pilão de ponta recoberta por borracha e o quarteamento da amostra.

Para esse tipo de solo, utiliza-se o cilindro tripartido de dimensões internas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

b) No caso de solo pedregulhoso e brita:

Para esse tipo de material deve-se obedecer à relação de diâmetro máximo das partículas para diâmetro do corpo de prova de 1:4, da seguinte forma:

- i. Caso a amostra seja integralmente passante na peneira de 25,4 mm deve ser utilizado o cilindro de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura;
- ii. Caso a amostra apresente material retido na peneira de 25,4 mm, mas que seja totalmente passante na peneira de 38,1 mm, deve ser utilizado o cilindro de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura;
- iii. Caso a amostra apresente até 10 % de material retido na peneira de 38,1 mm, descarta-se esse material retido nessa peneira e se utiliza o cilindro de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura;
- iv. Caso a amostra apresente até 10 % de material retido na peneira de 25,4 mm e não exista material suficiente para a realização do ensaio no cilindro de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, descarta-se o material retido na peneira de 25,4 mm e se utiliza apenas o material passante na peneira de 25,4 mm no cilindro de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, obrigatoriamente constando esta informação no Relatório Final do ensaio.

Conhecidas as condições de umidade ótima e densidade máxima determinadas na curva de compactação, utilizando a energia especificada, determina-se a umidade higroscópica da amostra para calcular a quantidade de água a ser acrescida. A determinação da umidade final deve ser realizada por meio de 3 cápsulas com frações da amostra após homogeneização e por meio do corpo de prova total, após ser ensaiado.

O teor de umidade medido com o corpo de prova, após o ensaio, pode variar em relação à umidade ótima até ± 1 % para material granular e $\pm 0,5$ % para material fino.

Admite-se a execução do ensaio em outras condições de umidade e densidade que não a ótima para estudos específicos, sempre mantendo a condição de aceitação da variação da moldagem em relação ao teor

pretendido. Informar estas condições de preparação do corpo de prova no Relatório Final do ensaio.

5.1 Preparação da amostra para um corpo de prova

Tomar uma fração desta amostra que seja suficiente para preencher o molde de compactação no volume previsto e acrescentar a quantidade de água necessária para atingir a umidade ótima. Misturar bem até obter uma massa homogênea, o mais rapidamente possível, a fim de evitar a evaporação da água.

O material homogeneizado deve ser colocado num saco plástico hermeticamente fechado e ser levado à câmara úmida por um prazo de 12 horas, no mínimo, antes da compactação, com exceção de brita, que pode ser compactada e ensaiada logo depois da homogeneização.

5.2 Preparação da amostra para *n* corpos de prova

As amostras, recém homogeneizadas, devem ser colocadas em uma única caixa, de volume compatível, e misturadas manualmente até que seja obtida uma massa de solo homogênea, imediatamente subdividida em porções com quantidade de massa necessária para cada corpo de prova, dependendo do material. Cada porção deve ser acondicionada em saco plástico hermeticamente fechado, sendo guardada em câmara úmida por um período mínimo de 12 horas e máximo de 30 dias, antes da compactação.

No caso de brita não é necessária a permanência da amostra na câmara úmida, aceitando-se sua homogeneização e a realização imediata do ensaio.

A quantidade de material para a moldagem de um corpo de prova de dimensões 100 mm por 200 mm é de, aproximadamente, 4.000 gramas para solo e 6.000 gramas para brita. Para um corpo de prova de 150 mm por 300 mm, devem ser utilizados, aproximadamente, 15.000 gramas de material.

No caso de solo pedregulhoso ou brita, a curva de compactação utilizada para definição da umidade ótima deve ser definida em cilindro de mesma dimensão da realização do ensaio de deformação permanente.

6 Preparação do corpo de prova

É feita por compactação dinâmica ou por impacto de um soquete, à energia especificada, conforme os seguintes passos:

- a) Montar o molde cilíndrico tripartido de aço, untado internamente com óleo ou vaselina, de dimensões internas iguais às do corpo de prova a ser compactado, preso a duas braçadeiras de aço envolvendo o cilindro tripartido, apertadas por meio de parafusos, de modo que as partes do molde não se afastem durante a compactação. Anota-se a massa do cilindro com as braçadeiras (P1);
- b) Colocar o cilindro tripartido com as braçadeiras preso a uma base de aço por três parafusos;
- c) Compactar o solo no molde tripartido de 100 x 200 mm ou no de 150 mm x 300 mm; a compactação deve ser realizada em 10 camadas e se acrescenta o anel complementar do cilindro na penúltima camada;
- d) Pesar uma parte do solo que não foi utilizado na compactação em duas ou três cápsulas, para obter uma aproximação da umidade média da amostra;
- e) A quantidade de golpes por camada depende do tamanho do corpo de prova, da energia de compactação, da massa do soquete e da altura de queda do soquete. A Tabela do Anexo D mostra relações do número de golpes por camada, para diferentes combinações;
- f) Pesar o corpo de prova, no molde, com as braçadeiras e sem a base de aço (P2), e calcular a massa do corpo de prova úmido, por diferença entre essa massa P2 e a P1 (massa P3). Dividir essa massa P3 (g) pelo volume interno do cilindro (cm^3), para obter a massa específica úmida do corpo de prova;
- g) Desapertar os parafusos das braçadeiras, retirando cada uma das partes do molde, que deve deslizar pela superfície lateral do corpo de prova.

7 Montagem do ensaio

A montagem do ensaio compreende as seguintes etapas:

- a) Colocar o corpo de prova sobre uma pedra porosa com papel filtro;

- b) Colocar a membrana de borracha com auxílio de um encamisador, para envolver toda a lateral do corpo de prova, que está apoiado na pedra porosa.

Antes de colocar a membrana de borracha no corpo de prova, verificar se ela não está furada. No caso de furo, a membrana deve ser substituída para realização do ensaio;

- c) Posicionar o corpo de prova envolvido na membrana e apoiado na pedra porosa sobre a base inferior da câmara triaxial;
- d) Colocar o cabeçote sobre o corpo de prova e prender a membrana de borracha na base da câmara triaxial e no cabeçote do corpo de prova com anéis de borracha (elásticos ou *oring*);
- e) Colocar cada LVDT preso ao cabeçote superior e apoiado numa haste guia, que se estende até a base, ou fixada no terço médio da amostra;
- f) Colocar o corpo da câmara (invólucro cilíndrico) e a placa superior de vedação (tampa);
- g) Abrir a válvula de drenagem, que conecta o corpo de prova na pressão atmosférica, realizando ensaio drenado. A simulação da condição não drenada requer a saturação do corpo de prova. Este procedimento está descrito apenas para a condição de ensaio drenado;
- h) Ajustar os transdutores LVDT com o auxílio do computador ou sistema de aquisição de dados, até que a leitura fique dentro do intervalo recomendado pelo programa ou sistema de aquisição de dados.

8 Aplicação das cargas repetidas

8.1 Condições de aplicação

A frequência de aplicação de cargas recomendada é de 2 (dois) Hz, podendo ser utilizada frequência de 1 até 5 Hz, ajustando somente o intervalo de repouso, desde que todos os ensaios para uma mesma amostra sejam realizados com essa frequência. A duração do pulso de carga para qualquer frequência é de 0,1 segundo. Durante todo o ensaio a tensão confinante é mantida constante (não cíclica).

8.2 Procedimento inicial

Aplicam-se 50 ciclos de carga iniciais, para garantir total contato entre o pistão e o cabeçote, evitando que

eventuais folgas ou ajustes da superfície sejam lidos como deformação do corpo de prova. A deformação permanente obtida após estes 50 ciclos não deve ser considerada como deformação do corpo de prova, sendo a altura de referência do medidor de deslocamento corrigida, para prosseguimento do ensaio de deformação permanente. O par de tensões para este procedimento inicial é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Procedimento inicial

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1 / σ_3
30	30	2

8.3 Determinação da deformação permanente

a) Após o procedimento inicial, para cada corpo de prova são aplicados no mínimo 150.000 (cento e cinquenta mil) ciclos de um par de tensões, escolhido dentre os propostos na Tabela 2. É necessário obter leituras intermediárias nos intervalos sugeridos na alínea “c” desta subseção, para permitir a descrição acurada da variação da deformação em relação ao número de ciclos de aplicação de cargas;

b) Na Tabela 2 são apresentados pares de tensões típicos para o ensaio de deformação permanente, admitindo-se outros pares dentro deste intervalo, ou maiores, caso o objetivo seja a verificação de limite de tensões admissíveis para subleito ou outra camada do pavimento. Se o objetivo do ensaio for a determinação do modelo de comportamento à deformação permanente é necessário utilizar vários corpos de prova e, em cada um, a aplicação de um par de tensões específico;

c) Podem ser adotadas as leituras: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1.000, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, 6.000, 7.000, 8.000, 9.000, 10.000, 11.000, 12.000, ..., 50.000, 55.000, 60.000, 65.000, 70.000, 75.000, ..., 100.000, 110.000, 120.000, ...;

d) Ao fim do ensaio, o corpo de prova deve ser pesado, sem a membrana, e levado à estufa com temperatura em torno de 110 °C, por 48 horas ou até constância de massa seca, para determinação da sua umidade, utilizando-se para o cálculo a norma DNER - ME 213/1994.

Tabela 2 – Estados de tensões indicados para determinação da deformação permanente

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1/σ_3
40	40	2
	80	3
	120	4
80	80	2
	160	3
	240	4
120	120	2
	240	3
	360	4

9 Cálculo

Com os valores de deslocamentos plásticos obtidos durante o ensaio deve ser estimada a deformação específica permanente do material ensaiado para o estado de tensões utilizado naquele corpo de prova.

$$\varepsilon_p = \frac{\delta_p}{H_0}$$

ε_p = Deformação específica plástica ou permanente acumulada;

δ_r = Deslocamento plástico ou permanente acumulado, mm;

H_0 = Altura de referência do medidor de deslocamento (LVDT), descontado o deslocamento plástico ou permanente acumulado correspondente ao número de ciclo anterior, mm.

NOTA: O valor de H_0 depende da posição do LVDT no ensaio, conforme descrito na seção 4 – Aparelhagem.

Os resultados devem ser apresentados no Relatório de Ensaio de Deformação Permanente, cujo modelo se encontra no Anexo E (normativo).

10 Resultados

Existem diferentes modelos e equações matemáticas que buscam descrever a deformação permanente de solos para pavimentação. Nesta Instrução de Ensaio é utilizado o modelo de Guimarães (2009), que foi desenvolvido para prever a contribuição de cada material para a deformação permanente total durante o dimensionamento mecanístico-empírico do pavimento, além de permitir verificar a tendência de ruptura ou acomodação das deformações.

10.1 Modelo de deformação permanente

Como o modelo Guimarães (2009) inclui as tensões atuantes, além do número de ciclos são necessários vários corpos de prova para se definir suas constantes. A expressão a seguir é a representação do modelo e foi obtida após a análise dos resultados de ensaios de deformação permanente feitos em equipamentos triaxiais de cargas repetidas, com vários níveis de tensão, em solos brasileiros. É uma ferramenta matemática que descreve de forma satisfatória o comportamento observado nos ensaios triaxiais de laboratório.

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4}$$

Onde:

$\varepsilon_p(\%)$ = Deformação permanente específica (ε_p^i);

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ = Parâmetros de regressão;

σ_3 = Tensão confinante;

σ_d = Tensão desvio;

ρ_0 = Tensão de referência (tensão atmosférica);

N = Número de ciclos de aplicação de carga.

Para o cálculo dos parâmetros do modelo de Guimarães (2009) devem ser ensaiados 9 (nove) corpos de prova, um para cada par de tensão indicado na Tabela 2, ou equivalentes, permanecendo cada estado de tensão constante ao longo do mesmo ensaio. Um número mínimo de 6 (seis) corpos de prova deve ser ensaiado, desde que os valores das tensões sejam bem espaçados entre si, de modo a abranger um universo amplo de tensões atuantes no material, em relação à carga de roda do eixo padrão.

É utilizada a técnica de regressão não linear múltipla para se obter as constantes do modelo.

10.2 Interpretação

Para a interpretação dos resultados do ensaio, de forma a definir os tipos de comportamento do material ensaiado, devem ser observadas as indicações seguintes e os preceitos da tese de Guimarães (2009).

O ensaio de deformação permanente de solo (brita, material granular etc.), feito a partir de vários corpos de prova submetidos a vários níveis de tensão desvio pulsante, permite a avaliação dos materiais não ligados, com base na sua deformação plástica acumulada ao longo de um grande número de ciclos. É possível distinguir vários tipos de comportamento dos materiais comparados entre si, ou mesmo, para cada material, os intervalos de comportamento quanto à resistência à ruptura plástica, em função dos níveis de tensão. Na Figura 1 desta subseção mostram-se os tipos de comportamentos seguintes:

- Tipo I – Acomodamento plástico (ou *shakedown*) – tendência à estabilização da deformação permanente com o número de ciclos de carregamento, para poucos ciclos, para um determinado nível de tensão vertical e horizontal;

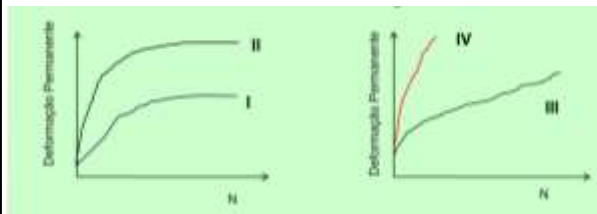
- Tipo II – Acomodamento plástico (ou *shakedown*) – tendência à estabilização da deformação permanente com o número de ciclos de carregamento, porém com um valor alto de deslocamento permanente acumulado antes do acomodamento, para um determinado nível de tensões vertical e horizontal;

- Tipo III – O material não se acomoda, continuando a acumular deformação permanente com o aumento do número de ciclos;
- Tipo IV – Colapso incremental - O material apresenta ruptura a baixos números de repetições de ciclos de carga.

cálculo da contribuição de cada camada no afundamento de trilha de rodas e a comparação das tensões verticais calculadas no dimensionamento com aquelas que levam ao comportamento de acomodação do material analisado.

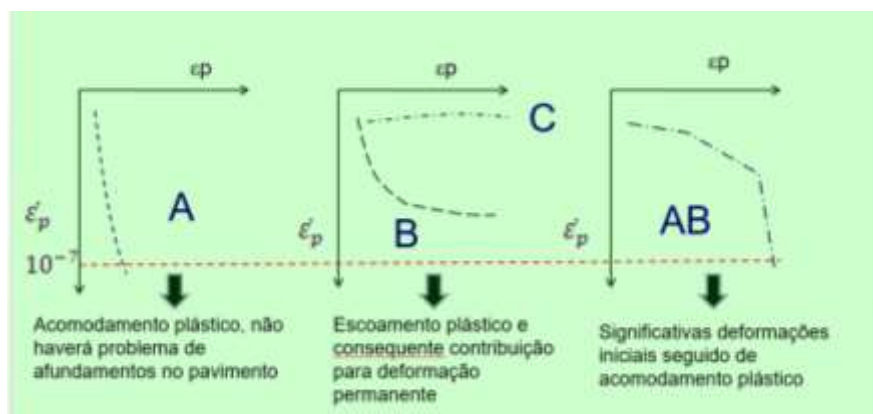
Para avaliação do acomodamento, de forma matemática, faz-se a análise dos resultados dos ensaios utilizando um gráfico semelhante ao indicado na Figura 2 desta subseção, onde no eixo X se representa a deformação permanente acumulada e no eixo Y é plotada a taxa de acréscimo da deformação permanente acumulada, considerando-se que foi atingida a acomodação quando os resultados ficam paralelos ao eixo Y após certo número de ciclos. O comportamento é ilustrado com um exemplo numérico na Figura do Anexo H.

Figura 1 – Modelos de comportamento à deformação permanente de vários materiais ou de um mesmo material a vários níveis de sollicitação de carga cíclica.



Níveis de tensões críticas podem ser definidos para classificar o material de subleito e uso na seleção de materiais para cada camada, e a expressão dos vários ensaios pelo modelo proposto nesta norma permite o

Figura 2 – Modelos de comportamento a deformação permanente de solos –
Análise do acomodamento (shakedown)



Anexo A (Normativo)

Figura 1 – Esquema da carga repetida com frequência de 2 Hz

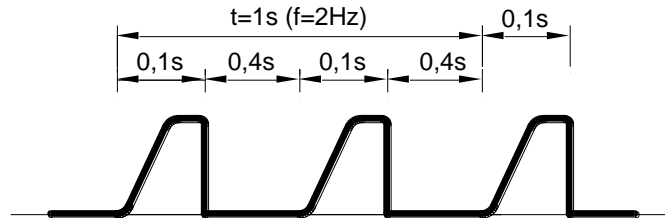
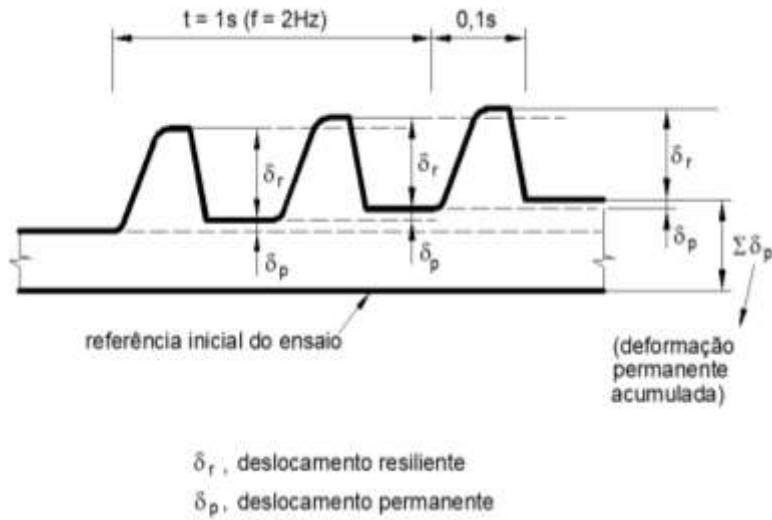


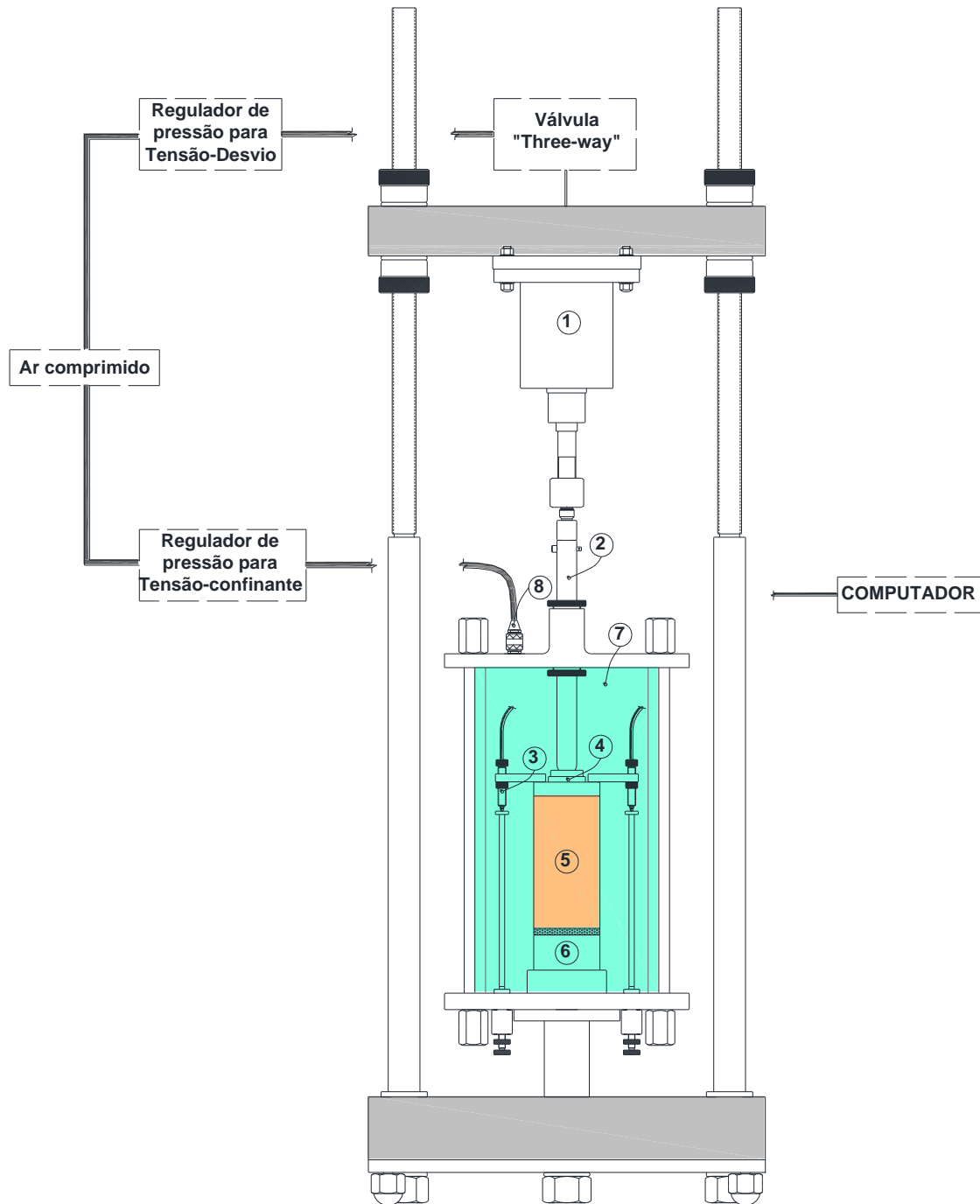
Figura 2 - Modelo esquemático de registro dos deslocamentos verticais do ensaio triaxial de cargas repetidas.



Anexo B (Normativo)

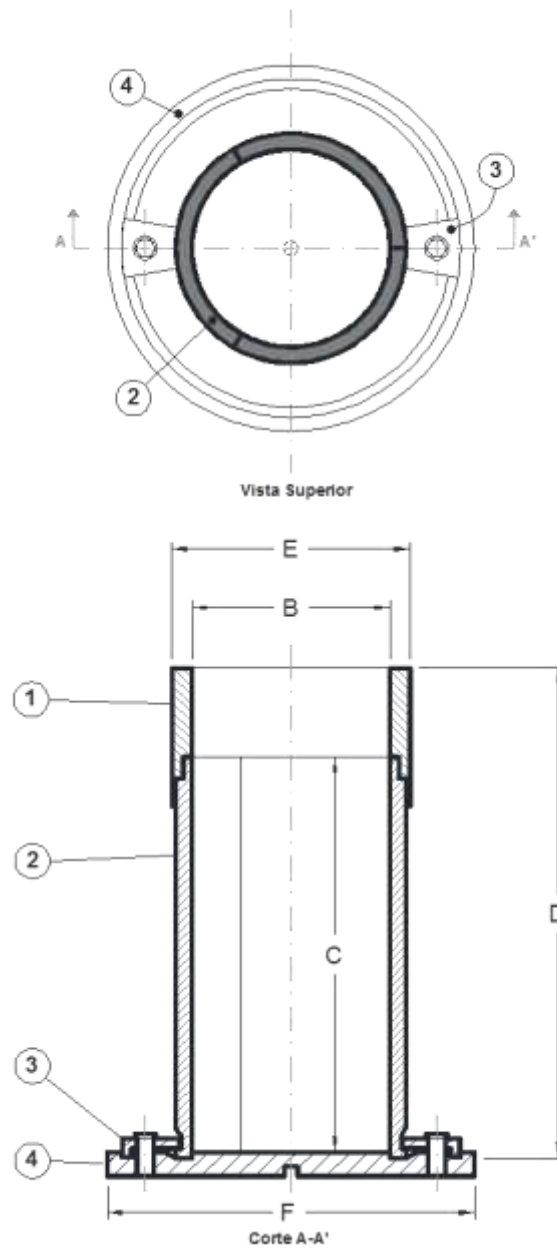
Aparelhagem para Determinação da Deformação Permanente dos Solos

Esquema do equipamento triaxial de carga repetida, LVDTs apoiados em hastes guias.



1 - Cilindro de Pressão	5 - Corpo de prova
2 - Pistão de Carga	6 - Base de apoio
3 - LVDT	7 - Câmara triaxial
4- Cabeçote (<i>Top cap</i>)	8 - Aplicação da tensão confinante

Anexo C (Normativo)



Dimensões do molde do cilindro tripartido

Peças	Dimensões (mm)		
	Cota	100 x 200	150 x 300
1 - Coroa	B	100	150
	E	116	174
2 Cilindro tripartido	C	200	300
	D	248	372
3 – Fixador	-	-	-
4- Base de suporte	F	184	220

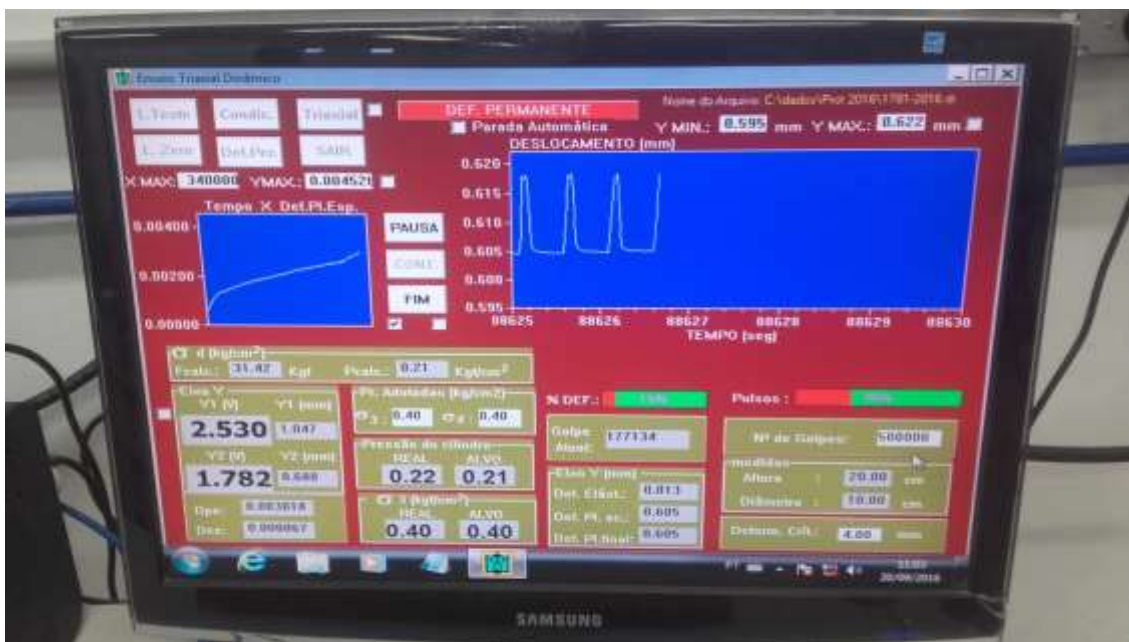
Anexo D (Normativo) - Tabela

Tabela - Condições de compactação de corpo de prova em cilindro tripartido para ensaio de deformação permanente.

Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Energia (kgf.cm/cm ³)	Nº de camadas	Altura de queda (cm)	Peso do soquete (kgf)	Nº de golpes por camada
10	20	1570,8	Normal 6	10	30,5	2,5	12
					45,7	4,53	5
					30,5	4,53	7
					45,7	2,5	8
			Intermediária 13		30,5	2,5	27
					45,7	4,53	10
					30,5	4,53	15
					45,7	2,5	18
			Modificada 27,3		30,5	2,5	56
					45,7	4,53	21
					30,5	4,53	31
					45,7	2,5	38
15	30	5301,5	Normal 6	10	30,5	2,5	42
					45,7	4,53	15
					30,5	4,53	23
					45,7	2,5	28
			Intermediária 13		30,5	2,5	90
					45,7	4,53	33
					30,5	4,53	50
					45,7	2,5	60
			Modificada 27,3		30,5	2,5	190
					45,7	4,53	70
					30,5	4,53	105
					45,7	2,5	127
					<p>N = (E . V) / (n . p . h)</p> <p>N - nº de golpes por camada E - energia de compactação V - volume de solo compactado n - nº de camadas p - peso do soquete h - altura de queda</p>		

Anexo F (Informativo) – Fotos

Exemplo de equipamento triaxial usado para ensaio de deformação permanente e tela de leituras.



Anexo G (Informativo) – Fotos

Sequência de fotos: desde a compactação do corpo de prova até a montagem do ensaio.



1 - Moldagem do corpo de prova (CP) compactador mecânico



2 - Compactação da penúltima camada com anel complementar



3 - Corpo de prova após a compactação da última camada



4 - Rasando o corpo de prova após a retirada do colarinho



5 - Corpo de prova depois de rasado



6 - Pesagem do corpo de prova



7 - Retirada do CP do cilindro tripartido



8 - Retirada do CP do cilindro tripartido



9 - Amostra moldada pronta para o ensaio (CP)



10 - CP desmoldado e encamisador com a membrana.



11 - Montagem dos LVDTs sobre o cabeçote na câmara triaxial



12 - Equipamento triaxial dinâmico pronto para ensaio.



13 - Detalhe: Tampa colocada e fixada.



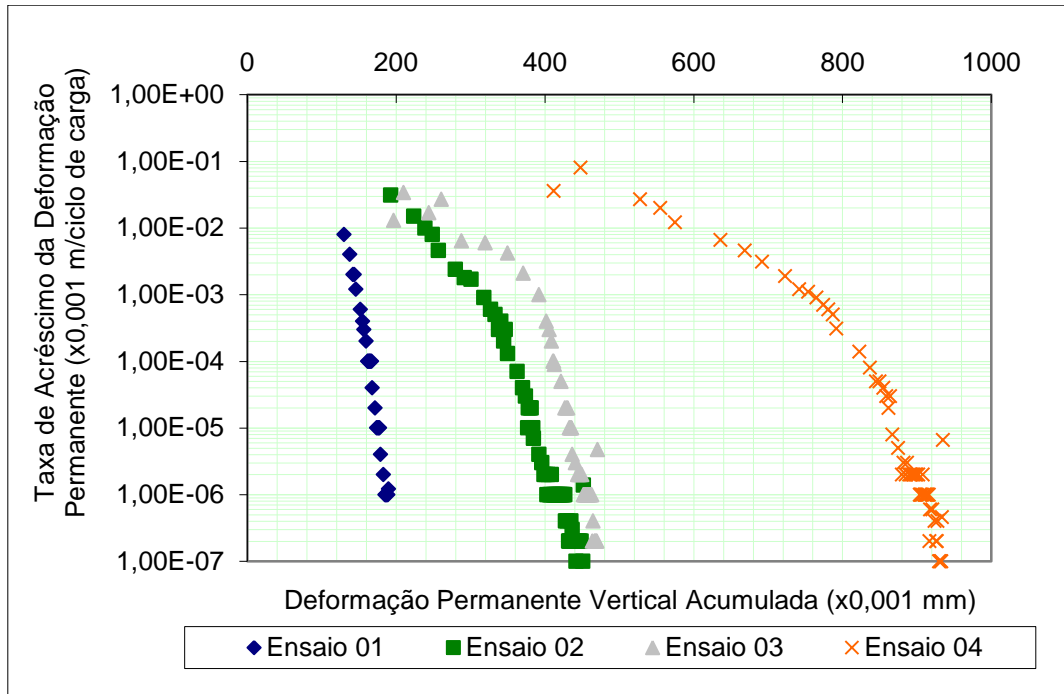
14 - Tela do sistema de aquisição de dados.



15 - Peças do cilindro tripartido

Anexo H (Informativo) – Figura

Exemplo de pesquisa de comportamento ao acomodamento de uma laterita. Os ensaios 1, 2 e 3 mostram comportamento tipo A e o ensaio 4 é do tipo AB



Anexo I (Informativo) – Bibliografia

- a) AUSTRROADS. *AG:PT T-053:2007*: Determination of permanent deformation and resilient modulus characteristics of unbound granular materials under drained conditions. Sidney, 2007.
- b) BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS EN 13286-7:2004*: Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. London, 2004.
- c) MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- d) REDE TEMÁTICA DE ASFALTO. Procedimento Rede nº 03/2010: Deformação permanente em solos e britas. In: _____. *Manual de execução de trechos monitorados da rede temática de asfalto: Anexo digital – Procedimento Rede*. p. 21-25. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2010.

_____ /Índice geral

Índice geral

Abstract	.....1	Duração do ciclo de carga repetida	3.2 2
Amostra	5 4	Frequência	3.3 2
Anexo A (Normativo)	..... 10	Índice geral	..... 20
Anexo B (Normativo)	.....11	Interpretação	10.2 8
Anexo C (Normativo)	.....12	Modelo de deformação permanente	10.1 8
Anexo D (Normativo)	.....13	Montagem do ensaio	7 6
Tabela	.....13	Objetivo	1 2
Anexo E (Normativo)	.....14	Prefácio	..... 2
Anexo F (Informativo) Fotos.....	15	Preparação da amostra para n corpos de prova	5.2 5
Anexo G (Informativo) Fotos.....	16	Preparação da amostra para um corpo de prova	5.1 5
Anexo H (Normativo)	.....18	Preparação do corpo de prova	6 5
Anexo I (Informativo)	.....19	Procedimento inicial	8.2 6
Bibliografia	.....19	Pulso	3.1 2
Aparelhagem	4 .....3	Referências normativas	2 2
Aplicação das cargas repetidas	8 6	Resultados	10 8
Cálculo	9 7	Resumo	..... 1
Condições de aplicação	8.1 6	Sumário	..... 1
Definições	3 2	Tabela 1 – Procedimento inicial	..... 7
Deformação permanente específica	3.7 3	Tabela 2 – Estados de de tensões indicados para determinação da deformação permanente	..... 7
Deformação resiliente ou recuperável	3.6 3		
Deslocamento plástico ou permanente total	3.5..... 3		
Deslocamento resiliente / recuperável	3.4 2		
Deslocamento total ou deformação permanente total do pavimento	3.8 3		
Determinação da deformação permanente	8.3 7		