

Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente – Método de ensaio

Autor: Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR

Processo: 50600.010318/2021- 41

Origem: Revisão da Norma DNIT 434/2021 – ME

Aprovação pela Diretoria Colegiada do DNIT na reunião de 06/09/2022.

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:

Vida de fadiga, tensão controlada, compressão diametral, base estabilizada quimicamente

Nº total de páginas

11

Resumo

Este documento estabelece os procedimentos para determinar o comportamento de materiais estabilizados quimicamente, quanto à fadiga, usando o ensaio de compressão diametral, sob carregamento repetido à tensão controlada. O carregamento gera uma tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada que provoca a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical. A vida de fadiga é o número total de aplicações de carga que provoca a ruptura do corpo de prova a cada nível de tensão. Esta estimativa de laboratório é utilizada para camadas de base ou sub-base, estabilizadas quimicamente com o objetivo de prever a área trincada no dimensionamento de pavimentos asfálticos quando comparada ao número N avaliado em projeto.

Abstract

This document establishes the procedures to determine the fatigue behavior of chemically stabilized materials using the indirect tensile test, under controlled repeated loading. The loading generates a tensile stress perpendicular to the direction of the applied load which causes the specimen's rupture along the central part of the vertical plane. Fatigue life is the total number of load applications that causes the rupture of test specimen to rat each stress level. This laboratory estimate is used in design of base or sub-base chemically stabilized layers

aiming to predict cracked area in asphaltic pavements design of when compared with the N number evaluated in the road design.

Sumário

Prefácio	2
1 Objetivo	2
2 Referências normativas	2
3 Definições	2
4 Aparelhagem.....	3
5 Amostra.....	4
6 Ensaio	5
7 Resultados	5
8 Relatório de ensaio	6
Anexo A (Normativo) – Forma do pulso e duração do carregamento	7
Anexo B (Normativo) – Equipamento para determinação de fadiga	8
Anexo C (Normativo) – Exemplo de preparação dos corpos de prova.....	9
Anexo D (Informativo) – Bibliografia.....	10
Índice Geral.....	11

Prefácio

A presente norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas em Transportes – IPR/DPP, para servir como documento base, visando estabelecer os procedimentos para a realização de ensaio de fadiga por compressão diametral em materiais de bases e sub-bases estabilizadas quimicamente. Está formatada de acordo com a norma DNIT 001/2009 – PRO. Esta norma cancela e substitui a norma DNIT 434/2021 – ME.

1 Objetivo

Esta norma estabelece o modo pelo qual se determina o comportamento de materiais de bases e sub-bases estabilizadas quimicamente quanto à fadiga sob um carregamento repetido, à tensão controlada, usando o ensaio de tração indireta por compressão diametral.

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 (incluindo emendas):

- a) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134 – ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.
- b) _____. DNIT 135 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.
- c) _____. DNIT 136 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.
- d) _____. DNIT 183 – ME: Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio.

3 Definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e definições:

3.1 Fadiga

Redução da resistência de um material sob um carregamento repetido, de magnitude inferior à sua resistência sob o carregamento estático.

3.2 Vida de fadiga em bases estabilizadas quimicamente

Definida pelo volume de tráfego expresso pelo número equivalente do eixo padrão (N) que a camada de base estabilizada quimicamente pode suportar antes que o dano observado, em termos de queda no seu módulo de resiliência, atinja um determinado valor convencional, em geral, correspondente a 10 % do valor original da camada construída.

3.3 Critério de ruptura convencional

No ensaio de fadiga à tensão controlada, utiliza-se a ruptura completa do corpo de prova como critério para a definição do número de ciclos correspondentes à ruptura para cada nível de carregamento aplicado.

NOTA 1: Existem outros critérios de ruptura, mas este é o critério convencional no País, para este tipo de ensaio.

3.4 Vida de fadiga de um corpo de prova

Número de ciclos de carga correspondente ao critério de ruptura nas condições do ensaio (frequência, modo de carregamento e nível de tensão). A vida de fadiga no ensaio à tensão controlada pode ser expressa em relação às tensões aplicadas comparadas à resistência à tração estática, ou com base na deformação resiliente inicial (ϵ_i). Para materiais estabilizados quimicamente é mais usual expressar a vida de fadiga em termos de tensões.

3.5 Pulso de carga

Ciclo de carregamento vertical que deverá ter a forma mais próxima possível da função $P = (1 - \cos \theta)/2$, com magnitude variando desde a carga de contato (P_c)

até a carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) e duração de 0,1 s, conforme ilustrado na Figura A1 do Anexo A.

3.6 Carga Cíclica (P)

Carga aplicada repetidamente ao corpo de prova.

3.7 Ciclo de carregamento

Tem duração de 1,0 s, composto por pulso de carga completo com duração de 0,1 s e período de repouso com duração de 0,9 s, onde é mantida a P_c , conforme ilustrado na Figura A2 do Anexo A.

3.8 Deslocamento horizontal

Resulta do carregamento vertical pulsante e corresponde à medida na posição do diâmetro horizontal do corpo de prova.

3.9 Tensão horizontal

Tensão de tração resultante do carregamento de compressão vertical pulsante, calculada na posição diametral horizontal do corpo de prova.

3.10 Resistência à tração por compressão diametral

Resistência do material quando aplicado um carregamento vertical diametral, que gera uma tensão de tração perpendicular à direção da carga aplicada e provoca a ruptura do corpo de prova ao longo da parte central do plano diametral vertical.

3.11 Estabilização química

Consiste na adição de um ou mais produtos químicos (agente estabilizador), que ao reagirem com as partículas de solo, brita, agregados naturais, resíduos ou materiais reciclados, formam estruturas que podem diminuir os vazios do material, aumentar sua rigidez e aumentar a resistência aos danos causados pela água.

3.12 Material estabilizado quimicamente

Refere-se à mistura íntima de solo, brita, agregados naturais, resíduos ou materiais reciclados, ou combinações destes, com produtos químicos que promovam a cimentação da maioria das partículas minerais, promovendo mudança radical do

comportamento mecânico do material, em comparação com sua condição natural.

4 Aparelhagem

A aparelhagem necessária é a que segue:

- a) Prensa: hidráulica ou pneumática, servo-controlada ou não, com capacidade para gerar os carregamentos previstos no ciclo de ensaio (ver subseção 3.7). A carga deve ser aplicada verticalmente, de cima para baixo (atuador na parte superior da prensa). A prensa pode ser a mesma utilizada para a determinação do módulo de resiliência e da fadiga de misturas asfálticas, de acordo com as normas DNIT 135 – ME e DNIT 183 – ME, respectivamente (Ver Figuras do Anexo B).
- b) Sistema de carregamento composto de:
 - Regulador de pressão, para aplicação da carga vertical repetida (P);
 - Válvula de três vias de transmissão da carga vertical;
 - Cilindro de pressão, pistão de carga e friso;
 - Temporizador eletrônico, para controle do tempo de abertura (ou carregamento) da válvula e frequência de aplicação da carga vertical.
- c) Sistema de aquisição de dados: dispositivos de medição e armazenamento de dados capazes de adquirir os dados em tempo real, permitindo o acompanhamento dos deslocamentos e da carga ao longo do ensaio.
- d) Sensor tipo LVDT: para medição dos deslocamentos deve ser utilizado sensor tipo LVDT, ou outro, com resolução mínima de 0,0004 mm e escala compatível com o nível de deslocamento previsto para o ensaio. O ensaio deve ser realizado medindo-se o deslocamento horizontal do corpo de prova nos primeiros ciclos. Para a medida do deslocamento horizontal a colocação do sensor é feita utilizando-se uma alça de referência solidária ao corpo de prova, que pode comportar um ou dois sensores, conforme a Figura B2 do Anexo B.

NOTA 2: Outros tipos de sensores podem ser utilizados para medida do deslocamento, desde que mantida a precisão estipulada.

e) Célula de carga eletrônica: para medição da carga aplicada ao longo de cada ciclo de ensaio. Deve ser utilizada célula de carga eletrônica ou outro sistema de regulação (por exemplo, manômetro digital), com capacidade compatível com a carga máxima de ensaio e sensibilidade mínima de 0,5 % da carga máxima de ensaio ($P_{m\acute{a}x}$).

f) Frisos de carga: são os dispositivos que transmitem o carregamento da prensa ao corpo de prova, sendo um na parte superior e outro na parte inferior (apoio). Devem ser confeccionados em aço, sendo a superfície de contato com o corpo de prova côncava, com raio de curvatura compatível com as dimensões do corpo de prova e sua largura de 12,70 mm. As bordas dos frisos devem ser suavizadas, evitando que danifiquem o corpo de prova ao longo do ensaio.

NOTA 3: Outros tipos de equipamentos podem ser utilizados, desde que atendam aos critérios de execução do ensaio.

5 Amostra

5.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova podem ser preparados em laboratório da seguinte forma:

a) Seguir o procedimento de compactação da Norma DNIT 134 – ME, utilizando o molde cilíndrico tripartido com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A curva de compactação do material, para a energia estipulada, também deve ser obtida conforme a Norma DNIT 134 – ME.

b) Após a compactação, retirar, cuidadosamente, o molde metálico tripartido e envolver a amostra compactada com um molde partido de PVC, de diâmetro compatível, para proteger a amostra e facilitar o manuseio. Em seguida, colocar a amostra em um saco plástico hermeticamente fechado e condicionar em câmara úmida pelo tempo de cura necessário. Ver esquema ilustrativo da Figura C1 do Anexo C.

c) Após o tempo de cura, serrar os corpos de prova com serra circular, sem uso de água, para obter amostras com alturas apropriadas para o ensaio de fadiga, conforme a subseção 5.2.

NOTA 4: O tempo de cura necessário depende do tipo de agente estabilizador utilizado, devendo, assim, ser respeitado o tempo indicado pelo fornecedor.

NOTA 5: Considerando que a resistência à fadiga dos materiais estabilizados quimicamente sofre forte influência do tempo de cura e que um corpo de prova pode levar vários dias para romper, especialmente nos níveis mais baixos de tensão, os corpos de prova devem ser moldados com intervalos de tempo compatíveis entre eles, de forma a serem ensaiados em idades próximas, evitando-se a distorção na avaliação dos resultados obtidos.

5.2 Dimensões dos corpos de prova

Os corpos de prova para a determinação da curva de fadiga devem ter altura entre 50 mm e 70 mm e diâmetro de 100 mm, para agregados de tamanho nominal máximo de 25 mm. Devem ser medidas e anotadas as dimensões e o peso de cada corpo de prova, para garantir que apresentem valores próximos, mantendo a representatividade do conjunto.

5.3 Quantidade de corpos de prova

A partir de uma amostra com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, pode-se obter, após a serragem, até três corpos de prova com as dimensões descritas na subseção 5.2. Portanto, devem-se compactar amostras de 100 mm x 200 mm em quantidade suficiente para se obter, após a serragem, pelo menos, 15 corpos de prova, com energia de compactação, granulometria, teor de material estabilizante, teor de umidade e massa específica, conforme procedimento de dosagem. São necessários 12 corpos de prova para o ensaio de fadiga e três para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

6 Ensaio

Os passos do procedimento de ensaio de fadiga são os que seguem:

- a) Determinar a resistência à tração por compressão diametral de três corpos de prova, escolhidos aleatoriamente entre os moldados e obter a média dos resultados, de acordo com a norma DNIT 136 – ME;
- b) Calcular, de acordo com o equipamento disponível para o ensaio, a carga a ser aplicada, de forma a gerar, em um conjunto de três corpos de prova por vez, quatro níveis de tensão escolhidos entre 50 % e 90 % (por exemplo: 55 %, 65 %, 75 %, 85 %) do valor da resultante da resistência à tração por compressão diametral da amostra;
- c) Posicionar cada corpo de prova no friso de carga inferior;
- d) Assentar o pistão de carga com o friso superior em contato com o corpo de prova diametralmente oposto ao friso inferior, ambos colocados no plano diametral vertical, de forma que o deslocamento seja perpendicular ao eixo dos frisos de carga. Alinhar os frisos de carga com uma placa de alumínio;
- e) Aplicar uma carga (F) que induza tensão de tração horizontal, entre 50 % e 90 % da resistência à tração por compressão diametral previamente determinada, conforme descrito na alínea b. Devem ser ensaiados três corpos de prova por nível de tensão selecionado;
- f) A frequência de aplicação das cargas deve ser de 1 Hz (60 ciclos por minuto), com tempo de carregamento de 0,1 segundo e 0,9 segundo de descarregamento;
- g) Durante todo o ensaio, a carga inicial deve ser mantida controlada até a ruptura completa do corpo de prova;
- h) O contador de pulsos deve registrar desde o início do ensaio o número de ciclos de carregamento (N) sofrido pelo corpo de prova até sua ruptura;

- i) Devem ser determinadas as expressões da vida de fadiga por tensão inicial, por plotagem dos pontos experimentais e regressão numérica, para obter os modelos matemáticos utilizados para análise da vida de fadiga.

7 Resultados

A vida de fadiga, expressa pelo número N de solicitações necessárias para o fim do ensaio, é expressa pela relação entre a tensão aplicada, pela resistência à tração estática, por modelo do tipo exponencial, dado pela equação:

$$N_{fad} = 10^{(K_1 + K_2 \cdot \%RF)} \quad (1)$$

Onde:

N_{fad} é o número de repetições de carga necessárias à ruptura do corpo de prova (vida de fadiga);

k_1 e k_2 são parâmetros experimentais;

$\% RF$ é a razão entre a tensão de tração aplicada (σ_t) e a resistência à tração à ruptura estática do material (σ_r), expressa em Megapascal (MPa).

A tensão de tração gerada no centro de cada corpo de prova cilíndrico ensaiado à compressão diametral é calculada com a mesma fórmula empregada no ensaio de resistência à tração por compressão diametral estática:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi dt} \quad (2)$$

Onde:

σ_t é a tensão de tração aplicada, expressa em Megapascal (MPa);

F é a força aplicada, expressa em newtons (N);

d é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

t é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

A vida de fadiga deve ser determinada como o número total de aplicações de carga que causa a completa ruptura de cada corpo de prova. Se o coeficiente de determinação (R^2) da curva, resultante de 12 corpos de prova, for menor que 0,8, deve-se aumentar o número de corpos de prova ensaiados, na tentativa de melhorar o ajuste.

NOTA 6: O modelo de fadiga deve ser ajustado ao observado em campo, usando uma função de transferência, estabelecida para cada equação usada para representar o ensaio de fadiga.

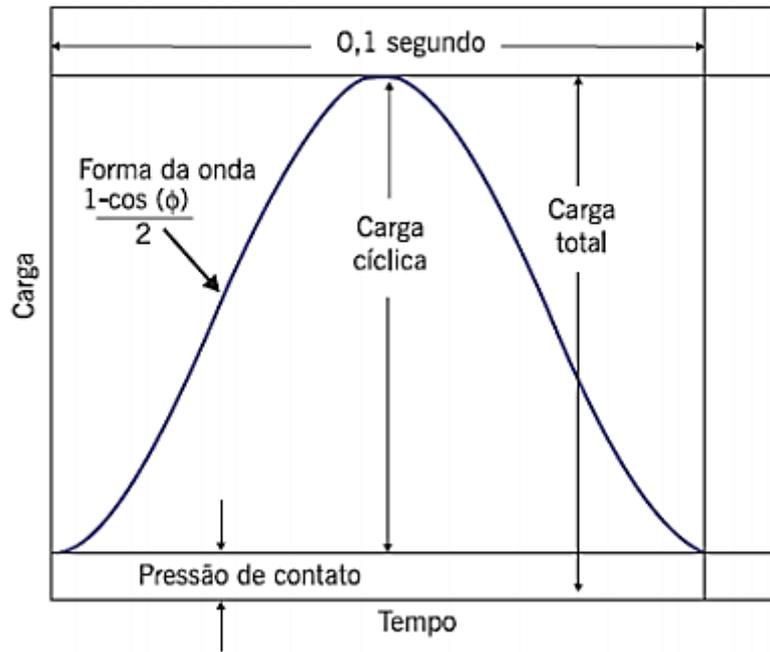
8 Relatório de ensaio

O resultado do ensaio de fadiga deve se basear, no mínimo, em medidas feitas em 12 corpos de prova individuais e quatro níveis de tensão. Deve ser apresentado relatório que contenha as seguintes informações:

- a) Identificação da Amostra;
- b) Data de realização do ensaio;
- c) Características de cada corpo de prova;
- d) Método de moldagem do corpo de prova (tipo de compactação ou extração);
- e) Condições do ensaio (tempo de carregamento, frequência);
- f) Número de ciclos de cada corpo de prova até a ruptura;
- g) Representação gráfica e matemática da vida de fadiga;
- h) Coeficiente de correlação;
- i) Observações que possam ter efeito nos resultados.

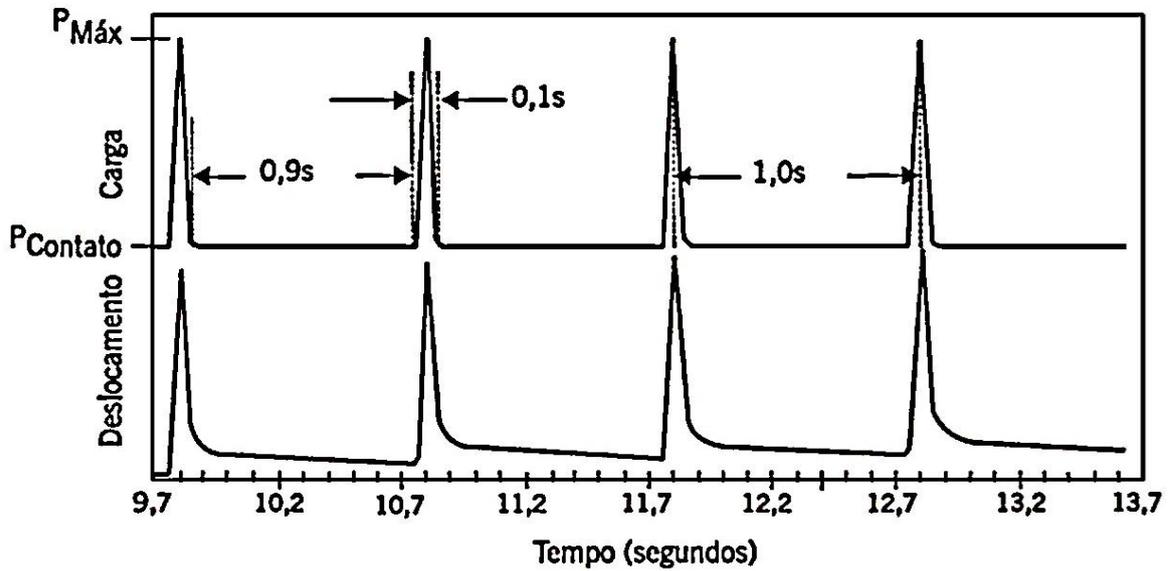
_____ / Anexo A

Anexo A (Normativo) – Forma do pulso e duração do carregamento



Fonte: Bernucci *et al*, 2010.

Figura A1 – Forma do pulso de carregamento



Fonte: Bernucci *et al*, 2010.

Figura A2 – Duração dos tempos de carregamento e repouso

Anexo B (Normativo) – Equipamento para determinação de fadiga

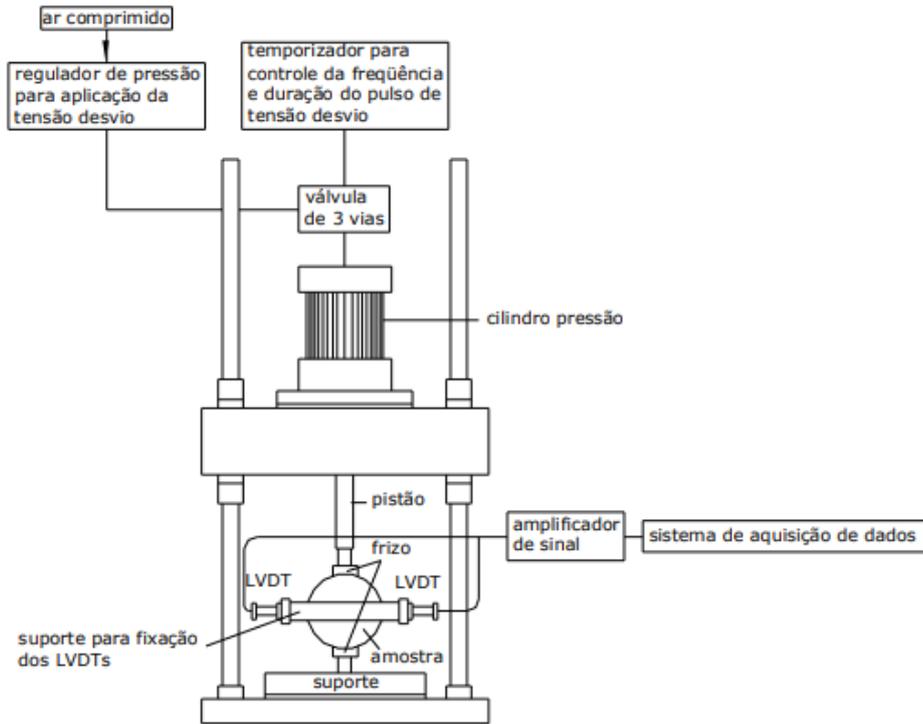


Figura B1 – Aparelhagem para determinação de fadiga em bases estabilizadas quimicamente



Fonte: CCR NOVA DUTRA, 2015.

Figura B2 - Equipamento para previsão de fadiga, inicialmente realizado com LVDT externo preso ao corpo de prova por alça de referência

Anexo C (Normativo) – Exemplo de preparação dos corpos de prova



Figura C1 – Sequência de fotos desde a compactação do corpo de prova até o condicionamento para cura

Anexo D (Informativo) – Bibliografia

- a) BALBO, J. T. Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semirrígidos. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- b) BALBO, J. T. Relações entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concretos secos e plásticos. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Vol. 6, nº 6, ISSN 1983-4195. São Paulo, 2013.
- c) BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2010.
- d) CCR Nova DUTRA. Relatório CCR-ND-BGTC-RTF-Nov/2015. Estudo da Influência do Teor de Cimento Portland, da Energia de Compactação e da Umidade no Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados. São Paulo, 2015.
- e) MOTTA, L. M. G. e UBALDO, M. O. Discussão sobre valores de módulo de resiliência de brita graduada tratada com cimento (BGTC). Em: Anais da 43ª RAPV, Reunião Anual de Pavimentação. Maceió Alagoas.
- f) NASCIMENTO, R. S. Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Sergipe. São Cristóvão, 2017.
- g) NASCIMENTO, R. S. e ALBUQUERQUE, F. S. Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE. Revista Transportes. Vol. 26, nº 1, ISSN 2237-1346. 2018.
- h) SUZUKI, C.Y. Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada). Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

Índice Geral

Abstract.....	1	Índice Geral	11
Amostra.....	5.....4	Material estabilizado quimicamente.....	3.12.....3
Anexo A (Normativo) – Forma do pulso e duração do carregamento.....	7	Objetivo	1.....2
Anexo B (Normativo) – Equipamento para determinação de fadiga	8	Prefácio	2
Anexo C (Normativo) – Exemplo de preparação dos corpos de prova	9	Preparação dos corpos de prova.....	5.1.....4
Anexo D (Informativo) – Bibliografia.....	10	Pulso de carga.....	3.5.....2
Aparelhagem.....	4.....3	Quantidade de corpos de prova	5.3.....4
Carga Cíclica (P).....	3.6.....3	Referências normativas	2.....2
Ciclo de carregamento	3.7.....3	Relatório de ensaio.....	8.....6
Critério de ruptura convencional	3.3.....2	Resistência à tração por compressão diametral.	3.10.....3
Definições	3.....2	Resultados.....	7.....5
Deslocamento horizontal.....	3.8.....3	Resumo	1
Dimensões dos corpos de prova.....	5.2.....4	Sumário	1
Ensaio	6.....5	Tensão horizontal	3.9.....3
Estabilização química.....	3.11.....3	Vida de fadiga de um corpo de prova.....	3.4.....2
Fadiga	3.1.....2	Vida de fadiga em bases estabilizadas quimicamente	3.2.....2