

Setembro/2010	NORMA DNIT 132/2010 - PRO
Pavimentos – Calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” - Procedimento	
Autor: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR Processo: 50607.001.298/2009-61 Aprovação: pela Diretoria Colegiada do DNIT na reunião de 21/09 /2010.	
<i>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.</i>	
Palavras-chave: Pavimentos, calibração e controle, deflectômetro FWD	Nº total de páginas 21

Resumo

Este documento define o procedimento a ser utilizado na calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”.

Abstract

This document presents the procedure for calibrating the load cell and deflection sensors for the deflectometer “Falling Weight Deflectometer (FWD)”.

Sumário

Prefácio.....	1
1 Objetivo.....	1
2 Referências normativas	2
3 Definições	2
4 Instalações, equipamentos e pessoal para as calibrações.....	2
5 Preparações para as calibrações	3
6 Procedimentos para as calibrações de referência.....	6
7 Procedimento para calibração relativa dos sensores de deflexão.....	9
8 Relatório de calibração	12

Anexo A (Informativo) – Recomendações para o Relatório de calibração do Deflectômetro

de Impacto..... 13

Anexo B (Informativo) Fotos

Índice geral

Prefácio

A presente Norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DIREX e estabelece a sistemática a ser empregada na calibração e controle de deflectômetro do tipo “Falling Weight Deflectometer” (FWD). Foi elaborada tomando como base a norma AASHTO-R32-03 (2008/1): Standard recommended practice for calibrating the load cell and deflection sensor for a “Falling Weight Deflectometer”.

Está formatada de acordo com a Norma DNIT 001/2009-PRO.

1 Objetivo

Fixar os procedimentos necessários para a calibração da célula de carga e de sensores de deflexão dos deflectômetros do tipo FWD, utilizado na medição de deflexões nos pavimentos de rodovias.

Estes procedimentos resultam em fatores de calibração que são colocados no software dos deflectômetros do tipo FWD como multiplicadores para correção das deflexões medidas. Quando as medidas dos

deflectômetros são multiplicadas pelos fatores de calibração, o resultado é um conjunto de medidas aferidas e consistentes com a instrumentação do deflectômetro do tipo FWD, lembrando que cada conjunto de fatores de calibração é próprio de cada equipamento.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados nesta seção 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).

- a) AASHTO-R32-03(2008)1: Standard recommended practice for calibrating the load cell and deflection sensor for a "Falling Weight Deflectometer". Washington, D.C.
- b) AASHTO R 33-03 (2008): Standard Practice for Calibrating the reference Load Cell Used for Reference Calibrations for Falling Weight Deflectometer. Washington, D.C.
- c) DNIT 001:2009 - PRO – Elaboração e apresentação de normas do DNIT - Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2009.
- d) IRWIN, L. H. et all. The FWD Calibration on Center and Operational Improvements: Redevelopment of the calibration protocol and equipment. Georgetown Pike, 2009. Washington, D. C.: FHWA, 2009. (FHWA – HRT – 07-040).

3 Definições

Para efeito desta Norma, aplicam-se as seguintes definições:

3.1 Sistema de aquisição de dados

Compreende condicionador de sinal, placa de aquisição de dados, software de aquisição de dados, computador e cabeamento.

3.2 Fator intermediário de calibração do sensor de deflexão

Fator de calibração do sensor de deflexão, resultante da calibração de referência. Esse fator deve ser revisado com base nos resultados da calibração relativa, para se obter o fator de calibração final.

3.3 Fator de calibração final

Fator resultante derivado do procedimento de calibração relativa dos sensores de deflexão. O fator de calibração final deve ser inserido no programa operacional do deflectômetro de impacto, como fase final do processo de calibração dos sensores.

3.4 Sensor de deflexão do deflectômetro tipo FWD

Dispositivo utilizado para medir a resposta de deflexão de uma dada carga.

3.5 Célula de carga do deflectômetro tipo FWD

Dispositivo localizado sob o mecanismo de aplicação da carga em um deflectômetro de impacto que mede a resposta de carga do sistema do mesmo.

3.6 Calibração de referência

Termo utilizado para descrever a calibração da célula de carga do deflectômetro de impacto ou do sensor de deflexão, em contraste com um sistema de medição de referência separado. Para a calibração da célula de carga, o sistema de referência deve ser uma célula de carga padronizada devidamente aferida; para os sensores de deflexão, deve ser um transformador diferencial variável linear (LVDT).

3.7 Célula de carga de referência

Dispositivo de referência aferido, que pode ser colocado diretamente abaixo da placa de carga do deflectômetro de impacto. Para sua calibração devem ser seguidos os procedimentos descritos na AASHTO R33-03.

3.8 Calibração relativa

Termo utilizado para descrever um procedimento de calibração, no qual os sensores de deflexão são calibrados entre si. Nenhum sistema de referência externo deve ser utilizado, os sensores são simplesmente comparados entre si.

4 Instalações, equipamentos e pessoal para as calibrações

4.1 Instalações necessárias para calibração

Espaço fechado e coberto com acesso fácil para o deflectômetro de impacto e veículo de reboque, piso nivelado e amplo o suficiente, a fim de que o trailer do deflectômetro de impacto e o veículo de reboque possam ficar em nível de repouso durante o teste, a uma temperatura razoavelmente constante (entre 10 e 38 °C) e umidade de 40 a 90% da umidade relativa do ar,

proporcionando um ambiente seguro e funcional para o equipamento de calibração.

Este local deve conter as seguintes instalações:

4.1.1 Bloco de concreto - Suporte de Teste, medindo 5,0 m por 5,0 m de área, com espaço amplo de 2,5 m em torno do perímetro (para manobras do deflectômetro de impacto e do Sistema de Aquisição de Dados de Referência), com superfície lisa e sem trincas acentuadas.

Nota: Uma quantidade pequena de trincas bem finas pode ser aceitável. Se o Bloco Suporte de Teste desenvolver trincas visivelmente abertas (1,5 mm ou mais), deve ser reconstruído.

4.1.2 O Bloco Suporte de Teste deve ser isolado (por separador de feltro impregnado, ou serragem de junta, ou junta calafetada) da área onde o Bloco de Concreto de Suporte da Viga de Referência de alumínio deve se assentar.

4.1.3 O Bloco Suporte de Teste deve ter uma deflexão, na superfície, de pelo menos 400 microns, devido à carga de 70 kN, da posição do Suporte de Sensor de Deflexão, quando o Deflectômetro de Impacto estiver na posição específica de calibração.

Nota 1 - Cálculos de fadiga indicam que uma deformação aceitável pode ser obtida com um bloco de concreto de cimento Portland de 125 mm de espessura, apoiado em base de brita, de granulometria aberta de 200 mm de espessura.

Nota 2 - Uma camada de tecido de filtro deve ser colocada imediatamente abaixo da camada de base, para protegê-la de intrusão de material fino da camada de subleito. Para obter deflexões adequadas, o módulo de resiliência da camada de subleito deve ser menor que 80 MPa, e este deve estar distante do leito de rocha mais profundo de 7,0 a 9,0 m. Onde houver horizonte de rocha com profundidade de 4,0 a 8,0 m, é necessário um módulo de resiliência da camada de subleito de 50 MPa, ou menor. Os Blocos Suportes de Teste, localizados onde o leito de rocha é inferior a 4,0 m de profundidade, são propensos a serem muito sensíveis a variações pequenas de umidade da camada de assentamento, não sendo, portanto, recomendáveis.

4.1.4 O Suporte do Sensor deve ser colocado a, no mínimo, 150 mm de distância da borda do Bloco Suporte de Teste, mas não é necessário que o Bloco Suporte de Teste venha a ter deflexão uniforme por toda a área do Suporte. Isto porque o bloco inerte, dando suporte à viga de referência de alumínio, deve ser colocado adjacente, mas não sobre o Bloco Suporte de Teste de Calibração.

4.2 Equipamentos

- 4.2.1 Bloco de Concreto Inerte, pesando pelo menos 18 kN;
- 4.2.2 Viga de Referência, de alumínio, com 1,5 metro de comprimento;
- 4.2.3 Suportes isolantes de borracha, com célula atmosférica de baixa frequência;
- 4.2.4 Mecanismos de Montagem do Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT);
- 4.2.5 Conjunto do Suporte do Sensor de Deflexão para até 10 sensores;
- 4.2.6 Ponta Magnética para o Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT);
- 4.2.7 Transformador Diferencial Variável Linear DC, golpe (curso) 3,175 mm, Modelo Schaevitz GCD-121-125, com conexão Cannon ou similar;
- 4.2.8 Calibrador de Transformador Diferencial Variável Linear métrico Schaevitz C-41M ou similar;
- 4.2.9 Condicionador de sinal Vishay Modelo 2310 do Measurements Group Inc., com alteração de fábrica para + 15 VDC e - 15 VDC de excitação ou similar;
- 4.2.10 Placa de aquisição de dados Keithley KUSB-3108 e cabos ou placa Keithley-MetraByte Modelo DAS-16G A/D, com placa terminal de parafusos STA-16 e cabo de cinta C-1800 ou igual. A versão G2 da placa de aquisição de dados é recomendada para computadores IBM PC-XT e PC-AT e compatíveis; a versão G1 pode ser aceitável. Uma placa modelo μ DAS-16G, ou equivalente, deve ser utilizada com computadores IBM PS/2 (barra em microcanais);
- 4.2.11 Cabos de Conexão Vishay para Transformador Diferencial Variável Linear, Vishay para MetraByte e Vishay para Célula de Carga;

- 4.2.12 Célula de Carga de Referência customizada (300,0 mm de diâmetro, capacidade de 180 kN), com calibração anual, para capacidade de 106kN;
- 4.2.13 Computador – com processador 80386 ou maior, com acelerador de processador de 25 MHz ou mais veloz, co-processador, se aplicável, mínimo de 1 megabyte de RAM, 100 megabytes de hard drive, expansão de 8 bits para placa de MetraByte, monitor colorido, (VGA é recomendado, mas EGA pode ser aceitável), e uma impressora;
- 4.2.14 Software para aquisição de dados do tipo WinFWDCal e programa conversor de entrada de dados PDDX convert;
- 4.2.15 Suporte de calibração relativa de deflectômetro de impacto, com o mesmo número de posições que o número de sensores de deflexão ativos, em conformidade com o relatório FHWA-HRT-07-040;
- 4.2.16 Ancoramento de junta em bola padronizado, conforme FHWA-HRT-07-040.

4.3 Pessoal necessário

A calibração do deflectômetro do tipo FWD requer duas pessoas para realizar os procedimentos. Uma pessoa deve ser o operador do deflectômetro de impacto. O operador de deflectômetro de impacto deve ser responsável por assegurar que o mesmo esteja em ordem para fazer adequadamente a calibração. Durante a calibração, essa pessoa opera o deflectômetro de impacto, remove e substitui os sensores nos seus suportes.

A outra pessoa é o operador de calibração (um técnico certificado). Este se certifica das condições gerais de manutenção do equipamento e suas necessidades de calibração. Durante a calibração do FWD, essa pessoa deve ser responsável pela operação do computador de calibração e do software especializado utilizado na calibração do deflectômetro de impacto. Além disso, o operador de calibração deve ser o responsável por fornecer a documentação do exercício/manobra da calibração (Relatório de Calibração).

Antes de começar a calibração, o operador do deflectômetro de impacto deve apresentar uma lista de verificações, documentando os passos tomados na preparação da calibração, indicando certas preferências no que diz respeito à forma que a calibração deve ser

realizada (conforme Apêndice I do Protocolo FHWA – HRT-07 – 040 (2009)). O operador do deflectômetro de impacto deve ser responsável por programar o computador do deflectômetro de impacto para executar o procedimento solicitado. O operador do deflectômetro de impacto deve fornecer o histórico dos resultados de calibração anteriores.

Durante a calibração, a movimentação de sensores e a operação do equipamento especializado deve ser uma responsabilidade compartilhada com o operador de calibração, tendo controle primário sobre o equipamento de calibração. O operador do deflectômetro de impacto deve ser responsável por transferir os dados do computador do deflectômetro de impacto em um formato do tipo Excel ou Access.

5 Preparações para as calibrações

5.1 Preparação do deflectômetro

- O deflectômetro do Tipo FWD deve estar em boas condições operacionais antes da execução da calibração de referência. Deve-se dar atenção especial à limpeza das bases dos sensores de deflexão, para certificar-se de que estão assentados apropriadamente. Além disso, deve-se certificar de que a placa de carga do deflectômetro de impacto está presa firmemente à célula de carga. Todas as conexões elétricas devem ser inspecionadas e, se necessário, limpas e assentadas com firmeza.
- O deflectômetro do tipo FWD deve ficar em temperatura ambiente e deve estar ajustado, como utilizado em procedimentos normais de testes.
- Uma série de quedas do peso deve ser executada com o deflectômetro do tipo FWD, como aquecimento, imediatamente antes de começar a calibração, a fim de assegurar que o sistema de amortecimento de carga tenha sido totalmente condicionado.
- Ajustar o peso e as alturas de quedas do deflectômetro do tipo FWD, para produzir cargas dentro de ± 10 por cento de 27, 40, 53 e 71 kN.

Nota: Para alguns deflectômetros de impacto, é possível ficar dentro dessa tolerância com a carga mais alta, e ainda assim ter uma altura de queda ajustada muito grande. Antes de colocar a célula de carga de referência sob a

placa de carga e com massa posicionada na altura de queda quatro (posição mais alta), deve-se certificar que há um espaço de pelo menos 100 mm entre o ponto mais alto sobre o subconjunto do peso e o lado inferior da braçadeira, entre as duas colunas que cercam os cilindros que levantam e abaixam a placa de carga. Se o espaço for muito pequeno, deve ser reposicionado o alvo da quarta altura de queda, para obter o espaço necessário. Isso garante que haja espaço adequado, quando a célula de carga de referência estiver na posição sob a placa de carga. Um mínimo de três níveis de carga e um máximo de quatro são exigidos, sendo que a carga máxima a ser utilizada não deve ultrapassar $80 \text{ kN} \pm 10\%$, ou seja, carga máxima de 72 a 88 kN.

- e) Antes de começar qualquer trabalho de calibração, é necessário que não haja filtro de dados na operação do deflectômetro do tipo FWD.

5.2 Preparação da célula de carga de referência

- a) Todo equipamento de calibração, incluindo a célula de carga de referência e o sistema de aquisição de dados, deve estar na temperatura de trabalho, como estabelecido na seção 4 - Instalações, equipamentos e pessoal para calibração.
- b) Se a célula de carga de referência não tiver sido recalibrada nos últimos 12 meses, então deve ser recalibrada de acordo com AASHTO R33-03.
- c) Deve-se posicionar o deflectômetro de impacto, de forma que o prato de carga fique perto do centro do suporte de teste de calibração, ou sobre qualquer outra superfície lisa e firme. Deve-se certificar de que não haja areia ou outros detritos soltos sob a célula de carga de referência.
- d) Colocar o cabo do condicionador de sinal/sistema de aquisição de dados na célula de carga de referência. Posicionar a célula de carga de referência abaixo da placa de carga do deflectômetro do tipo FWD, certificando-se de que as três guias estão alinhadas em torno da placa.
- e) Zerar o condicionador de sinal com o prato de carga na posição alta, de forma que não haja nenhuma carga externa sobre a célula de carga de referência.

Para resultados precisos, é extremamente importante que a célula de carga de referência seja zerada com o prato de carga do deflectômetro de impacto em uma posição elevada. Além disso, a excitação e a amplificação do condicionador de sinal devem estar ajustadas exatamente nos níveis em que a célula de carga de referência foi calibrada.

Nota: Depois da aplicação de três cargas de aquecimento, não deve ser possível passar um pedaço de papel por baixo do prato de carga em nenhum ponto ao redor de seu perímetro ou embaixo do suporte da célula de carga de referência.

5.3 Preparação da calibração do sensor de deflexão

- a) Todos os equipamentos de calibração, inclusive o transformador diferencial variável linear e o sistema de aquisição de dados, devem estar na temperatura estabelecida na seção 4 - Instalações, equipamentos e pessoal para calibração. Esse sistema de aquisição de dados deve, também, ser aquecido por, aproximadamente, uma hora antes de começar o processo de calibração.
- b) Limpar a ponta da carga de mola do transformador diferencial variável linear. Utilizar um limpador de contato, sem lubrificante, em spray, para limpar a manga do suporte, até que a ponta se move para dentro e para fora sem fricção visível. Se o transformador diferencial variável linear (LVDT) não puder operar suavemente, não continuar com a calibração.
- c) Utilizar o calibrador de micrômetro para calibrar o transformador diferencial variável linear. O transformador diferencial variável linear precisa ser calibrado no início de cada dia (antes da calibração do sensor) e novamente após quatro horas.
- d) O transformador diferencial variável linear deve, primeiramente, ser posicionado no calibrador e ajustado ao ponto nulo (voltagem zero de saída), com o micrômetro ajustado para 5 mm. O micrômetro deve, primeiramente, ser avançado levemente para além de 5 mm e depois retornado a 5 mm.
- e) O micrômetro deve ser avançado levemente para além de 7 mm e retornado para a marca de 7 mm.

Certificar-se de que a placa MetraByte lê entre ± 30 bits e - 2000 bits. Se preciso, ajustar o botão de Amplificação (Gain) no condicionador de sinal 2310 na quantidade diferencial 0,1 (por exemplo, de um ajuste de $1,50 \times 1$ para um ajuste de $1,40 \times 1$), a fim de atingir a leitura necessária. Deve-se registrar a voltagem de saída e a leitura do micrômetro (7 mm) do transformador diferencial variável linear (LVDT).

f) O micrômetro deve ser movido em 0,5 mm de quantidade diferencial, para uma leitura final de 3,0 mm, com a leitura do micrômetro e a voltagem de saída do transformador diferencial variável linear, registradas a cada 0,5 mm. Virar o tambor do micrômetro em uma direção somente, para evitar erros devido à inércia.

g) Analisar os dados resultantes, utilizando regressão linear, para determinar o coeficiente m na seguinte equação:

$$Y = mX + b \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

Y = a posição da ponta do transformador diferencial variável linear, em microns, como medido pelo micrômetro;

X = a voltagem de saída correspondente em bits, como lido pela placa de aquisição de dados do computador;

m = a inclinação m deve ser de aproximadamente - 1,00 microns por bit. O erro padrão de inclinação deve ser inferior a $\pm 0,0010$. Se um erro padrão superior for obtido, a calibração do transformador diferencial variável linear deve ser repetida.

h) Colocar os resultados da calibração do transformador diferencial variável linear (LVDT) no sistema de aquisição de dados do computador. Após colocar os resultados da calibração, a amplificação do condicionador de sinal não deve ser alterada sem recalibrar o transformador diferencial variável linear (LVDT).

i) Firmar o transformador diferencial variável linear (LVDT) em seu suporte, na viga de alumínio do sistema de referência, de forma que fique perto do ponto nulo (ex.: zero de voltagem de saída). Certificar-se, com um nível de bolha de ar, de que o transformador diferencial variável linear está vertical no suporte. Se não estiver vertical, ajustar a

posição da viga de alumínio, para obter a verticalidade. Isso pode requerer calçar a viga onde estiver apafusada ao bloco de concreto.

6 Procedimentos para calibrações de referência

6.1 Calibração anual da célula de carga do deflectômetro de impacto

- a) A calibração de referência da célula de carga do deflectômetro de impacto deve ser realizada em pelo menos, duas repetições. Considerando-se que não é possível executar uma calibração relativa na célula de carga, devem ser executados múltiplos testes de calibração e ser feita uma média dos resultados. Os critérios de aceitação, baseados na repetitividade do fator de calibração, são identificados na subseção 6.2, adiante. Se, de acordo com os critérios de aceitação, as falhas nos resultados persistirem, então, a causa de resultados erráticos deve ser identificada e corrigida.
- b) O sistema de aquisição de dados deve ser inicializado, pelo menos uma hora antes de começar as calibrações, e a informação específica do Deflectômetro de Impacto deve ser registrada via impressões das telas do programa operacional de dados do deflectômetro de impacto (ex.: mostrando o número de série atual da célula de carga e o fator de calibração).
- c) Com a célula de carga de referência colocada abaixo da placa de carga do deflectômetro de impacto, com a placa de carga baixa, completar a seguinte sequência de quedas para um único teste:
 - três quedas de assentamento (seating drops) na altura 3 (dados não registrados), seguidas de pausa;
 - seis quedas na altura 1, com pausa após cada queda;
 - seis quedas na altura 2, com pausa após cada queda;
 - seis quedas na altura 3, com pausa após cada queda;
 - seis quedas na altura 4, com pausa após cada queda, exceto a parada após a última queda (placa permanece baixa).

Nota: Devem ser programadas seis quedas em cada altura, ao invés de cinco, portanto,

uma pode ser considerada “sobressalente”, no caso de uma queda ser perdida pelo sistema de aquisição de dados. Se as primeiras cinco quedas forem registradas com sucesso, os dados da sexta queda podem ser descartados.

- d) A placa não deve ser elevada em nenhum momento durante a sequência.
- e) Os dados da célula de carga do deflectômetro do tipo FWD e do sistema de referência das cinco quedas de cada altura de queda devem ser registrados e os dados das três quedas de assentamento (seating drops) podem ser descartados.

6.2 Cálculos de ajuste da célula de carga

- a) Calcular o fator de calibração da célula de carga, através da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, até zero, para todos os dados da sequência de dados. O resultado dessa análise da regressão deve ser o coeficiente de uma equação do tipo:

$$Y = mX \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

Y = resposta do sistema de referência;

X = resposta do dispositivo de medição do Deflectômetro do Tipo FWD;

m = inclinação da linha de regressão.

Ambos, X e Y , devem ser registrados no mesmo sistema de unidades.

- b) O coeficiente m , determinado na Equação 2, representa o fator de ajuste do fator de calibração no programa de campo do Deflectômetro de Impacto. O novo fator de calibração deve ser computado através da multiplicação do antigo fator de calibração pelo coeficiente m .
- c) Executar a calibração de referência da célula de carga duas vezes. Se os dois fatores de calibração ficarem entre $\pm 0,003$, então deve-se fazer a média dos resultados dos dois testes. Se ficarem fora desse limite, então, uma terceira calibração da célula de carga deve ser executada. Se o desvio padrão dos três resultados for menor que $\pm 0,003$ (baseado no $n - 1$ graus de liberdade), então deve

ser feita a média dos três resultados. Se o desvio padrão exceder os limites de $\pm 0,003$, então todos os fatores de calibração devem ser descartados e o procedimento de calibração da célula de carga deve ser repetido.

- d) A presença de uma ou mais das seguintes condições invalida os resultados dos testes de calibração da célula de carga:
 - Mensagens de ruído excessivo para quedas das alturas 2, 3 ou 4. O ruído elétrico ou de vibrações mecânicas, só é preocupante se resultar em valor zero errado ou uma leitura de pico errada. Os gráficos históricos de tempo devem ser vistos, para determinar se o ruído é motivo de preocupação, antes de rejeitar a calibração;

Nota: Para altura baixa de queda [ex.: 27 kN (6000 lb) de nível de carga], raramente há tempo suficiente de queda livre para a vibração causada pela liberação da massa se atenuar, antes dos amortecedores baterem nas placas. Assim, mensagens de ruído excessivo em altura baixa de queda podem, em geral, ser descartadas.

- O desvio padrão das cinco leituras, a qualquer altura de queda, que diferirem, em mais de um fator de três, entre o conjunto de dados do sistema de referência e o conjunto de dados do Deflectômetro de Impacto;
- Erro padrão do fator de ajuste (m) superior à tolerância de $\pm 0,0020$;
- Falha em satisfazer os critérios de repetição para múltiplos testes de calibração;

Se alguma das condições desta alínea “d” ocorrer, o procedimento de teste de calibração da célula de carga deve ser repetido, após identificação da fonte do problema e este ser corrigido.

- e) Colocar o fator de calibração da célula de carga no programa de aquisição de dados do deflectômetro de impacto.
- f) Após conclusão do teste de calibração, elevar a placa de carga do deflectômetro de impacto e remover a célula de carga de referência.

6.3 Calibração anual dos sensores de deflexão

- a) Cada sensor de deflexão deve ser calibrado uma vez por ano. Após todos os sensores de deflexão serem calibrados, os fatores intermediários de calibração devem ser colocados no computador do Deflectômetro de Impacto, antes de executar a calibração relativa.
- b) O sistema de aquisição de dados deve ser inicializado por, pelo menos, uma hora antes de começar o processo de calibração e a informação específica do deflectômetro de impacto deve ser registrada via impressões das telas do programa operacional de dados do deflectômetro de impacto (ex.: mostrando os números de série atuais do sensor de deflexão e o fator de calibração).
- c) Posicionar o trailer do deflectômetro de impacto, de forma que a placa de carga fique o mais perto possível do suporte do sensor de deflexão. É importante, entretanto, que o deflectômetro de impacto não entre em contato com a viga ou qualquer outra parte do sistema de referência, durante o teste.
- d) Remover os sensores de deflexão de seus suportes na viga do deflectômetro de impacto e certificar-se de que estão livres de sujeira e fuligem, que possam afetar adversamente seu assentamento no suporte do sensor de deflexão do sistema de referência. Se necessário, passar a base magnética em um pedaço de lixa fina, que esteja em uma superfície lisa e firme, para assegurar de que esteja limpa.
- e) Colocar um sensor de deflexão no suporte do sensor e posicionar o suporte do transmissor diferencial variável linear, de forma que transmissor diferencial variável linear e o deflectômetro de impacto fiquem alinhados.
- f) Colocar o segundo sensor de deflexão no topo do suporte do transmissor diferencial variável linear, de forma que venha a medir o movimento do final da viga (portanto, o protetor do transmissor diferencial variável linear).
- g) Completar a seguinte sequência de quedas, em um único teste:
 - três quedas de assentamento (*seating drops*) na altura 3 (dados não registrados), seguidas de uma pausa;
 - seis quedas na altura 1, com uma pausa após cada queda;
 - seis quedas na altura 2, com uma pausa após cada queda;
 - seis quedas na altura 3, com uma pausa após cada queda;
 - seis quedas na altura 4, com uma pausa após cada queda, exceto a parada após a última queda (placa permanece baixa).

Nota: Devem ser programadas seis quedas a cada altura, ao invés de cinco, a fim de que uma possa ser considerada “sobressalente”, para o caso de uma queda ser perdida pelo sistema de aquisição de dados. Se as primeiras cinco quedas forem registradas com sucesso, os dados da sexta queda devem ser descartados.
- h) A placa de carga não deve ser elevada em nenhum momento, após as quedas de assentamento, até que o teste esteja concluído.
- i) Um gráfico histórico do deflectômetro de impacto deve ser estudado a cada queda de altura das cinco quedas, para certificar-se de que a viga de calibração não se moveu durante o período de teste.
- j) A presença de qualquer uma das condições seguintes invalida os dados de calibração:
 - Movimento da viga de calibração, como medida pelo sensor de deflexão, apoiado no topo do suporte do transmissor diferencial variável linear de referência, antes, ou simultaneamente, à leitura do pico de deflexão do dispositivo sob teste;

Nota: É possível que haja algum movimento da viga, posto que a onda de deflexão passa sob o bloco inerte de concreto. O critério importante é se a viga se moveu antes da hora em que sensor de deflexão no piso registrou sua leitura de pico. O movimento da viga pode ser determinado pela investigação dos arquivos de dados históricos do deflectômetro de impacto. No momento em que o sensor, sendo calibrado, mostrar sua

leitura de pico, o sensor na viga de referência apresenta não mais que ± 2 microns ($\pm 0,08$ mils) de deslocamento.

- Mensagens de ruído excessivo nas alturas de queda 2, 3 ou 4. O ruído elétrico ou de vibrações mecânicas, só é preocupante se resultar em valor zero errado ou uma leitura de pico errada;

Nota: Para baixa altura de queda (ex.: 27kN (6000lb) de nível de carga), raramente há tempo suficiente de queda livre para a vibração causada pela liberação da massa, para atenuar antes dos amortecedores baterem nas placas. Assim, mensagens de ruído excessivo em altura baixa de queda podem, em geral, ser descartadas.

- Os padrões de desvio das cinco leituras, a qualquer altura de queda, que diferirem em mais de um fator de três, entre o conjunto de dados do sistema de referência e o conjunto de dados do deflectômetro de impacto;
- Erro padrão do fator de ajuste fora da tolerância de $\pm 0,0020$;

Se alguma dessas condições ocorrer, o procedimento de teste de calibração do sensor de deflexão deve ser repetido, após identificação da fonte do problema, o qual deve ser corrigido.

6.4 Cálculos de ajuste do sensor de deflexão

Proceder como se segue:

- Fazer regressão linear pelo método dos mínimos quadrados até zero, para todos os dados de cada dispositivo de medição (ex.: 20 pares de dados por teste – cinco repetições de cada um dos quatro níveis de carga). O resultado dessa regressão é o coeficiente da equação:

$$Y = mX \quad \text{Equação 3}$$

onde:

Y = a resposta do sistema de referência;

X = a resposta do dispositivo de medição do deflectômetro de impacto;

m = a inclinação da linha de regressão.

Ambos, X e Y , devem ser registrados no mesmo sistema de unidades.

- O coeficiente m representa o fator de ajuste para o fator de calibração no programa de campo do Deflectômetro de Impacto. O novo fator de calibração deve ser computado através da multiplicação do fator de calibração anterior pelo coeficiente m ;
- O erro padrão do fator de ajuste deve ser menor que $\pm 0,0020$. Se um erro padrão maior for obtido por qualquer sensor, a calibração de referência daquele sensor deve ser repetida;
- Colocar os novos fatores de calibração de todos os sensores de deflexão no programa do deflectômetro de impacto, antes de proceder com a calibração relativa. O novo fator de calibração dos sensores de deflexão do deflectômetro de impacto são fatores “intermediários”, que devem ser mais tarde refinados com a calibração relativa.

7 Procedimentos para calibração relativa dos sensores de deflexão

As calibrações relativas devem ser executadas nos sensores de deflexão, pelo menos, uma vez por mês, ou imediatamente após a substituição de um sensor de deflexão.

- O processo envolve rotação de sete sensores de deflexão através de sete posições no suporte de calibração. Cada combinação de sensores e níveis é considerada um “conjunto”, portanto, há sete conjuntos de dados. O ponto do teste deve ser “condicionado”, antes de começar o procedimento de calibração, para reduzir a possibilidade de o conjunto ser significativo na análise dos dados. Sensores devem ser rodados de cima para baixo do suporte.

Alguns deflectômetros de impacto têm menos ou mais que sete sensores de deflexão ativos. Se tiverem, esses procedimentos devem ser modificados para calibrar o verdadeiro número de sensores ativos em uso no Deflectômetro de Impacto.

Nota: Nesta Norma estão sendo considerados sete sensores para fins de ilustração. Qualquer número de sensores funciona, contanto que o suporte de calibração os aceite.

- b) Remover todos os sensores de deflexão de seus suportes no deflectômetro de impacto. Certificar-se de que os sensores estão rotulados (ex.: de um a sete), no que diz respeito às suas posições normais no deflectômetro de impacto.

Posicionar os sete sensores de deflexão no suporte para o primeiro dos sete testes.

- c) Manter o suporte do sensor em uma posição vertical e marcar o lugar onde o suporte fica, de forma que possa ser recolocado precisamente no mesmo lugar. Isso pode ser feito colando-se uma arruela no pavimento ou fazendo-se uma pequena marca no pavimento com um cinzel.
- d) Selecionar a altura de queda do deflectômetro de impacto e a distância da placa de carga para o suporte do sensor, a fim de permitir deflexões da ordem de 400 a 600 microns (16 a 24 mils).

Nota: Se as deflexões não puderem ser atingidas nesse escopo, então pode ser necessário reposicionar o deflectômetro de impacto em um pavimento diferente. Em geral, um pavimento de concreto, com um subsolo relativamente fraco, permite a deflexão necessária. Na maioria dos casos, o suporte de teste da calibração de referência deve ser utilizado para a calibração relativa.

- e) Aquecer o sistema de amortecimento de carga do deflectômetro de impacto e condicionar o ponto de teste, repetindo a sequência das dez quedas, até que as cargas e as deflexões registradas estejam quase uniformes. As deflexões, em uma sequência de dez quedas, não devem apresentar uma tendência estável crescente ou decrescente.

Se liquefação ou compactação for indicada nos dados de aquecimento, reposicione o deflectômetro de impacto para outro pavimento.

- f) Abaixar a placa de carregamento do Deflectômetro de impacto. Não elevar a placa de carregamento ou mover o deflectômetro de impacto durante o teste de calibração relativa. Isso assegura uma distância constante entre o centro da placa de carga e a base do suporte do sensor.

- g) Para cada conjunto, executar duas quedas de assentamento (*seating drops* – sem dados registrados), seguidas de cinco repetições de queda

(para as quais se registram dados), enquanto mantiver o suporte na posição vertical. Com sete quedas e cinco repetições de quedas, são necessários dados para um total de 35 quedas.

7.1 Análise dos dados da calibração relativa dos sensores de deflexão

7.1.1 Avaliação dos dados

Uma análise de três formas de variação deve ser utilizada para avaliar os dados. Isso divide a variação em quatro fontes: (1) que levem ao número do sensor; (2) que levem à posição; (3) que levem ao conjunto; e (4) que levem a erro aleatório de medição. Nessa análise, a deflexão é a variável dependente e o número do sensor, a posição e o conjunto são os três fatores principais. As três hipóteses que podem ser testadas são:

- O número do sensor é uma fonte significativa de erro;
- O número de conjunto de dados é uma fonte significativa de erro;
- A posição no suporte é uma fonte significativa de erro.

Assim, será possível determinar se o erro aleatório devido ao número do sensor, devido à posição no suporte de calibração, ou devido ao número do conjunto é estatisticamente significativo.

O único fator que resulta em uma mudança nos fatores de calibração do sensor de deflexão é o número do sensor.

- a) Se o erro aleatório devido ao número do sensor for considerado estatisticamente significativo, devem ser feitos ajustes calculados nos fatores de calibração para cada sensor.

Caso o fator de calibração de um sensor seja alterado, os fatores de calibração para todos os sensores devem ser alterados, de acordo com os cálculos.

- b) Se a posição no suporte for estatisticamente significativa, é provável que o suporte não tenha sido mantido na posição vertical em todos os conjuntos durante o teste ou que uma conexão no suporte estivesse frouxa. O problema deve ser corrigido e o teste deve ser repetido.

- c) Se o conjunto for estatisticamente significativo, pode ter havido uma alteração sistemática nas propriedades dos materiais do pavimento, como por exemplo, compactação ou liquefação. O teste deve ser repetido após o local do teste ser mais “condicionado”, de acordo com o procedimento. Se as leituras de deflexão não se tornarem relativamente constantes durante o condicionamento, outro local deve ser selecionado para os testes.

O simples fato de a posição ou o conjunto ou ambos serem significativos não invalida necessariamente a calibração relativa. Deve-se fazer um julgamento para avaliar se esses fatores terão ou não significado físico suficiente (em oposição ao significado estatístico), para haver necessidade de repetição da calibração relativa ou de seleção um novo local de teste.

7.1.2 Erro padrão de medição

O erro padrão de medição (ex.: raiz quadrada do erro médio quadrático devido ao erro) deve ser da ordem de ± 2 microns ($\pm 0,08$ mils) ou menor, se o sistema estiver funcionando apropriadamente e o teste de calibração for conduzido cuidadosamente.

7.1.3 Análise dos dados e determinação dos fatores de calibração

A análise dos dados obtidos na calibração relativa e o método para determinar fatores de calibração revisados são os seguintes:

- Computar a média de medição de deflexão, x_i , para cada sensor (média dos sete conjuntos) e a média geral, x_0 , da média de todos os sensores juntos.
- Computar a razão do ajuste, R_i , da média geral para a média do sensor em cada sensor:

$$R_i = x_0/x_i \quad (x_0 \text{ sobre } x_i) \quad \text{Equação 4}$$

7.2 Ajuste dos Fatores de Calibração

7.2.1 Calibração relativa realizada em conjunto com a calibração de referência.

- Quando a calibração relativa é conduzida juntamente com a calibração de referência, o procedimento deve ser repetido.
- Se os dois conjuntos de fatores de calibração estiverem no intervalo até 0,003 de cada sensor

de deflexão, então deve ser feita a média dos resultados dos dois testes. Se estiverem fora do limite, então, uma terceira calibração relativa deve ser feita.

- Se o desvio padrão dos três resultados (baseado em $n - 1$ graus de liberdade) for inferior a $\pm 0,003$, o procedimento de calibração relativa deve ser repetido.
- A média dos fatores de calibração finais deve ser computada e o fator de cada sensor de deflexão deve ser colocado no programa operacional do deflectômetro de impacto.

7.2.2 Realização da calibração relativa em separado da calibração de referência

Quando a calibração relativa é feita sozinha, o ajuste dos fatores de calibração no programa operacional do deflectômetro de impacto deve ser feito somente quando tais mudanças sejam significativas e verificada sua necessidade.

7.3 Diretrizes para avaliação da necessidade de ajuste dos fatores de calibração

As seguintes diretrizes devem ser utilizadas para avaliar a necessidade de ajuste dos fatores de calibração:

- Razões de ajuste de sensor computadas, R_i , entre 0,997 e 1,003, inclusive, sejam consideradas equivalentes à razão de 1,000. Em outras palavras, os ajustes necessários são triviais e não precisam ser feitos.
- Quando as razões de um ou mais sensores estiverem fora do intervalo 0,997 e 1,003, o processo de calibração deve ser repetido. Se ambos os conjuntos de dados estiverem no intervalo até 0,003, as amplificações devem ser ajustadas em todos os sensores.
- A média final dos fatores de calibração é calculada pela multiplicação do fator de calibração atual de um dado sensor, i , pela sua razão de ajuste, R_i .

Se quaisquer fatores de calibração forem alterados, o processo de calibração relativa deve ser repetido para verificar a precisão dos valores finais. As razões de ajuste resultantes devem estar dentro do intervalo 0,997 e 1,003 em todos

os sensores. Se não estiverem, o procedimento de teste deve ser repetido.

Nota : De acordo com as recomendações dos fabricantes de Deflectômetro de impacto, um fator de calibração final inferior a 0,98 ou superior a 1,02 possivelmente indica um sensor danificado, que deve ser consertado pelo fabricante ou substituído. Os fatores finais de calibração que estiverem nesse intervalo devem ser colocados no *software* de coleta de dados do Deflectômetro de impacto.

8 Relatório de calibração

Deve ser elaborado em 2 (duas) vias um Relatório de Calibração do Deflectômetro de Impacto, contendo todas as informações pertinentes. Os itens recomendados para compor o Relatório de Calibração são apresentados no Anexo A (Informativo).

/Anexo A

Anexo A (Informativo)

Recomendações para elaboração do Relatório de Calibração do Deflectômetro de Impacto

Dados de entrada	Modo de Entrada	Fonte
Centro de Informação		
Local do Centro de Calibração	Automática	Arquivo de Configuração do Centro
Nome do Operador de Calibração	Automática	Arquivo de Configuração do Centro
Data e Hora da Calibração	Automática	Computador da Calibração
Temperatura na Calibração	Automática	Sistema de Aquisição de Dados
Número de Série da Célula de Carga de Referência	Automática	Arquivo de Configuração do Centro
Constantes da Célula de Carga de Referência	Automática	Arquivo de Configuração do Centro
Data da Calibração da Célula de Carga de Referência	Automática	Arquivo de Configuração do Centro
Número de Série do Acelerômetro de Referência	Automática	Arquivo de Configuração do Centro
Constantes da Calibração do Acelerômetro de Referência (diárias)	Computada	Software WinFWDCal
Data da Calibração do Acelerômetro de Referência	Automática	Computador da Calibração
Informação do Deflectômetro de Impacto		
Proprietário do Deflectômetro de Impacto	Manual	Operador do Deflectômetro de Impacto
Nome do Operador do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX*	Computador do Deflectômetro de Impacto
Número de Série/ID do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador do Deflectômetro de Impacto
Fabricante do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador do Deflectômetro de Impacto
Número de Série da Célula de Carga do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador ou Operador do Deflectômetro de Impacto
Números de Série do Sensor de Deflexão do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador ou Operador do Deflectômetro de Impacto
Fator de Amplificação Inicial para a Célula de Carga do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador do Deflectômetro de Impacto
Fatores de Amplificação Inicial para os Sensores de Deflexão do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador do Deflectômetro de Impacto
Histórico dos Resultados Anteriores da Calibração	Arquivo histórico	Computador do Deflectômetro de Impacto**

Dados de Calibração		
Sistema Utilizado na Calibração	Manual	Operador do Deflectômetro de Impacto
Números dos Níveis de Carga	Manual	Operador do Deflectômetro de Impacto
Números de Reiteração de Quedas	Computados	Software <i>WinFWDCal</i>
Leituras da Célula de carga de Referência	Computadas	Software <i>WinFWDCal</i>
Leituras da Célula de carga do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador do Deflectômetro de Impacto
Leituras do Acelerômetro de Referência	Computadas	Software <i>WinFWDCal</i>
Leituras da Deflexão do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador do Deflectômetro de Impacto
Fatores de Amplificação de Intervalo da Calibração de Referência	Computados	Software <i>WinFWDCal</i>
Dados de Calibração Relativa do Deflectômetro de Impacto	Arquivo PDDX	Computador do Deflectômetro de Impacto
Fatores de Ajuste da Calibração Relativa	Computados	Software <i>WinFWDCal</i>
Fatores de Amplificação Finais	Computados	Software <i>WinFWDCal</i>

*) O arquivo do PDDX é criado pelo software *WinFWDCal* a partir da saída original do Deflectômetro de Impacto.

**) Para a primeira calibração, o Operador de Calibração deve fornecer o histórico das calibrações anteriores, se houver alguma disponível.

_____/Anexo B

Anexo B (Informativo)

Fotos

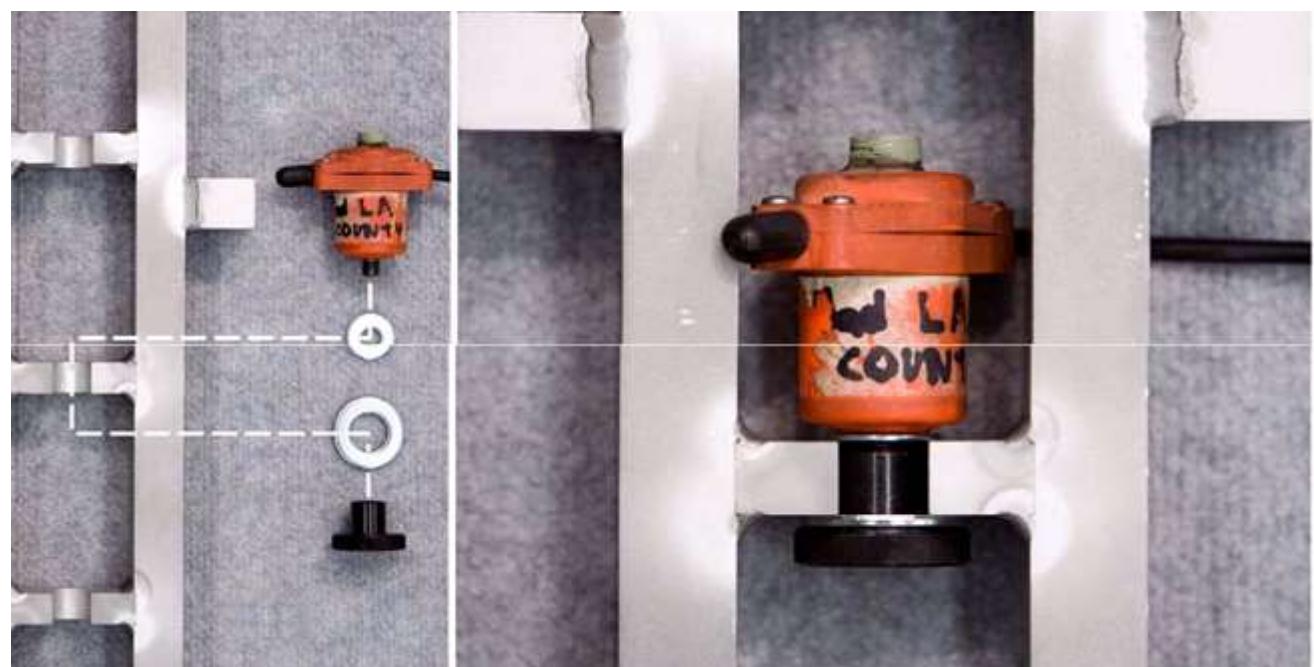
Foto 1- Acoplamento de um geofone Dynatest no suporte de calibração**Foto 2- Acoplamento de um geofone JILS no suporte de calibração**

Foto 3- Acoplamento de um geofone KUAB no suporte de calibração

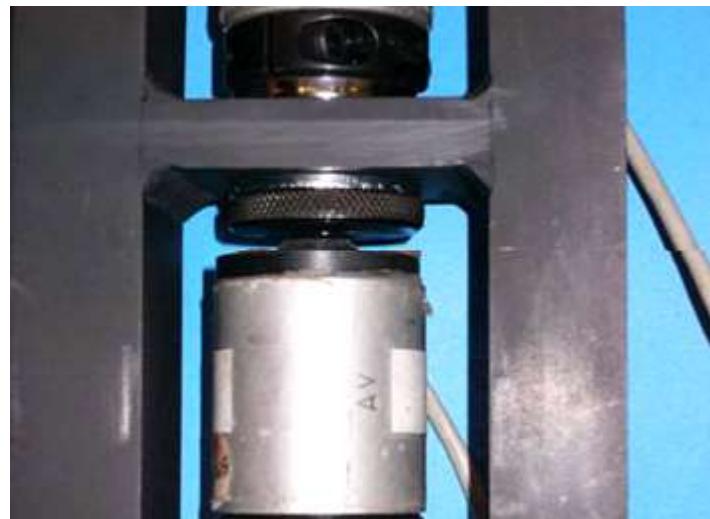


Foto 4- Acoplamento de um geofone Carl Bro no suporte de calibração



Foto 5 – Calibração de um FWD – (Hawaii DOT Materials Lab)



Foto 6- Sismômetros instalados no suporte com os sensores ligados

(Usados na calibração do FWD KUAB)



Foto 7 – Viga de Calibração e Bloco Inercial



índice geral

Índice geral

Abstract	1	Fator de calibração final	3.3	2
Ajuste dos fatores de calibração	7.2	Fator intermediário de calibração do sensor de deflexão	3.2	2
Análise dos dados da calibração relativa dos sensores de deflexão	7.1	Índice geral		21
Análise dos dados e determinação dos fatores de calibração	7.1.3	Instalações necessárias para calibração	4.1	2
Anexo A (Informativo)	-	Instalações, equipamentos e pessoal para as calibrações	4	2
Recomendações para o Relatório de calibração do Deflectômetro de Impacto		Objetivo	1	1
Anexo B (Informativo) - Fotos	13	Pessoal necessário	4.3	3
Avaliação dos dados	7.1.1	Prefácio		1
Cálculos de ajuste da célula de carga	6.2	Preparação da calibração do sensor de deflexão	5.3	5
Cálculos de ajuste do sensor de deflexão	6.4	Preparação da célula de carga de referência	5.2	5
Calibração anual da célula de carga do deflectômetro de impacto	6.1	Preparação do deflectômetro	5.1	3
Calibração anual dos sensores de deflexão	6.3	Preparações para as calibrações	5	3
Calibração de referência	3.6	Procedimentos para calibração relativa dos sensores de deflexão	7	9
Calibração relativa	3.8	Procedimentos para calibrações de referência	6	6
Célula de carga de Referência	3.7	Realização da calibração relativa em separado da calibração de referência	7.2.2	11
Célula de carga do deflectômetro tipo FWD	3.5	Referências normativas	2	2
Definições	3	Relatório de calibração	8	12
Diretrizes para avaliação da necessidade de ajuste dos fatores de calibração	7.3	Resumo		1
Equipamentos	4.2	Sensor de deflexão do deflectômetro tipo FWD	3.4	2
Erro padrão de medição	7.1.2	Sistema de aquisição de dados	3.1	2
	11	Sumário		1