# Apresentação e análise de resultados

### 4.1

4

### Introdução

Neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios descritos no capítulo três, feitos nos três dormentes de plástico reciclado, são apresentados e analisados. Inicialmente analisamos os gráficos carga versus deslocamento, carga versus tempo e carga versus deformação. Em seguida, fazemos um ensaio baseado em um carregamento estático e um carregamento de impacto. Também fazemos a comparação da carga de ruptura obtida experimentalmente com a carga de ruptura que foi apresentada na literatura estudada nos itens 2.10 e 2.11, que tratam das aceitações da qualidade do material a ser usado nas vias férreas.

### 4.2

### Ensaio de fluência no dormente D.P.1.0.E.F.1.C.6

Os resultados deste ensaio estão divididos em seis ciclos de carregamento, crescentes em cada um deles. Neste ensaio foram determinados os deslocamentos medidos como descritos no item 3.6, devidos a um carregamento crescente no tempo por cada ciclo aplicado. Apresentamos, também, os resultados de cada um dos ciclos de carga. Na Figura 4-1 mostramos os deslocamentos totais no tempo do ensaio, e tais deslocamentos corresponderam aos LVDTs localizados nas arestas do centro do vão depois de ser feita uma correção do corpo rígido (expressão 4-1) com os valores medidos dos deslocamentos dos LVDTs posicionados nas extremidades. Na Figura 4-1- observou-se o material do dormente após a aplicação de um carregamento. O deslocamento aumenta com o tempo, e houve um comportamento viscoelástico em cada ciclo de carga, observando-se que o material tem um deslocamento remanescente logo após a liberação do carregamento.

$$d_{corrigido} = \frac{d_c - (d_e + d_d)}{2} \tag{4-2}$$

Onde:

*d<sub>c</sub>=deslocamento no centro do vão* 

 $d_e$ =deslocamento na esquerda

 $d_d$ =deslocamento na direita



Figura 4-1 Curvas deslocamento versus tempo dos ciclos de carga e descarga dos LVDT4 e LVDT5 feita a correção por corpo rígido.

A seguir descrevemos o ensaio de fluência para cada ciclo de carga, analisando os resultados de força versus deslocamentos.

### 4.2.1

#### Ciclo de carregamento 1-2-3

Como foi descrito no item 2-9, foram posicionados seis LVDTs (Figura 3-20) na face superior do dormente, a fim de medir os deslocamentos nos pontos mais representativos e determinar o comportamento mecânico do dormente. Foram numerados os LVDTs da seguinte maneira: LVDT1 e LVDT6 colocados nas extremidades do dormente, LVDT2 e LVDT3 na parte superior dos apoios e os LVDT4 e LVDT5 dispostos nas arestas do centro do vão. Na figura 4-2 encontram-se os resultados medidos nos LVDT4 e LVDT5 causados por uma força de 50kN.



Figura 4-2 Força versus deslocamentos no centro do vão LVDT54 e LVDT5.

Na Figura 4-2 mostramos como foi o comportamento dos deslocamentos medidos pelos LVDT4 e LVDT5. Observamos que o dormente teve uma rigidez maior na posição do LVDT4. Isto quer dizer que o corpo sofreu uma deformação não proporcional em cada extremo do dormente e que não houve um comportamento igual na sua seção transversal. Na Tabela 4-1 são apresentados os cálculos das rigidezes de cada LVDT. Em 4-2 dividimos a carga de cada ciclo, entre a variação do deslocamento produzida pela força aplicada.

$$k_i = \frac{P_i}{\delta_i} \tag{4-2}$$

Onde

 $K_i = rigidez$ 

 $P_i$ = carregamento

<sup>8</sup>*i*=Variação do deslocamento por ciclo

Rigidez durante o carregamento (kN/mm)									
Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6				
65,50	41,02	74,22	32,39	17,84	86,63				
65,68	39,80	74,85	32,21	15,28	86,95				
65,45	38,66	73,30	30,77	14,37	85,32				

Tabela 4-1 Rigidez de cada ponto dos três primeiros ciclos de carga.

Para o LVDT4 aplicamos o primeiro ciclo de carregamento e assim que o retiramos, houve um deslocamento residual de 0,1 mm nos dois primeiros ciclos de carga. Para o terceiro ciclo de carga houve um deslocamento permanente de 0,7 mm no dormente. O comportamento do LVDT5 apresentou um deslocamento maior ao que o LVDT4, sendo 1,6 mm para o primeiro ciclo de carregamento com 1,7 mm para o ciclo dois e 2,3 mm para o ciclo três, conforme mostrado na Figura 4.2.



Figura 4-3 Força versus deslocamentos nas extremidades dos dormentes LVDT1 e LVDT6.

Para retirarmos os deslocamentos de corpo rígido posicionamos os LVDT1 e LVDT6 nas extremidades do dormente. O LVDT1 iniciou a leitura com um carregamento de 5 kN enquanto no LVDT6 a leitura foi instantânea para os três primeiros ciclos de carga. Na leitura do LVDT6 foi apresentado um deslocamento remanescente de 0,1mm, que não é representativo no comportamento mecânico do dormente, Figura 4-3.



Figura 4-4 Força versus deslocamentos nos pontos onde estão os apoios dos LVDT2 e LVDT3.

Na Figura 4-4 observamos que houve o mesmo padrão de histereses do comportamento apresentado nos LVDT1 e LVDT6. As rigidezes são mostradas na Tabela 4.1. Os deslocamentos dos LVDT2 e LVDT3 só iniciam quando há um carregamento de 18,5kN e de 5kN, respectivamente. Para complementar a aquisição dos dados, apresentamos nas figura 4-5, 4-6 e 4-7 o gráfico de tempo versus deslocamento e de força versus tempo. Nestas figuras observamos que o dormente é mais afetado quando a carga atua diretamente na face, embora o comportamento viscoelástico do dormente se conservasse com um deslocamento na seção transversal não simétrica.



Figura 4-5 Curvas deslocamento versus tempo e força no dormente D.P.1.0.E.F.1.C.6.

Na Figura 4-5 mostramos o aumento do deslocamento com o aumento no tempo devido ao carregamento de 50kN em todos os LVDTs. O diagrama da Figura 4-7 ilustra como a carga foi mantida no tempo nos três primeiros ciclos. Com uma duração de 18 horas para o ciclo três e de 15 minutos para os ciclos 1 e 2.



Figura 4-6 Curva força versus tempo nos ciclos 1, 2 e 3.

## 4.2.2 Ciclo de carregamento 4

O ciclo de carregamento quatro teve um carregamento de 100 kN que foi mantido por 6 horas com uma velocidade de aplicação de carga de 10 kN/mim. Na Figura 4-7 apresentamos as leituras dos seis LVDTs. Observamos que o dormente é mais rígido onde está posicionado o LVDT 5 que no extremo onde está o LVDT 4, com uma rigidez inicial de 33,56 kN/mm até 20,41 kN/mim no LVDT4 e com uma rigidez que iniciou em 30,77 kN/mm até 15 kN/mm para o ponto 5. Na tabela 4-2 proporcionamos as rigidezes dos pontos de medição no dormente com uma carga de 100 kN.

Tabela 4-2 Rigidez dos pontos onde foram colocados os LVDTs para o ciclo 4 de carregamento

Rigidez durante o carregamento (kN/mm)									
Carga no Ponto1		Ponto 2	Ponto 3	Ponto-4	Ponto -5	Ponto 6			
Inicio	112,36	50,76	70,92	33,56	30,77	98,30			
Fianal	98,04	37,31	42,37	20,41	15,87	97,50			

Na figura 4-7 são descritos os resultados do gráfico de força versus deslocamento dos LVDT4 e LVDT5. A leitura do LVDT4 inicia no instante que a carga é aplicada com uma pendente que é continua durante aaplicação da mesma até chegar aos 100kN. O LVDT 4 chegou até um deslocamento máximo de 4,78 mm com uma recuperação da flecha de 2,78 mm após a retirada da carga. Para o LVDT5 o deslocamento foi iniciado quando o carregamento chegou até o valor de 19,8 kN, com um deslocamento máximo de 6,3 mm e uma recuperação de 2,23 mm após a retirada da carga. No gráfico também percebemos que os dois extremos tinham uma rigidez igual para um deslocamento de 1,98 mm. O dormente teve uma deformação residual em cada uma das arestas onde o deslocamento foi medido.



Figura 4-7 Curvas força versus deslocamento nos LVDTs no centro do vão.

A leitura do LVDT1 foi de 0,82mm até 1,02mm e para o LVDT6 de 0,875 até 0,89mm. Observou-se que os valores das flechas nas extremidades mostram que houve um maior deslocamento de corpo rígido no dormente. A Figura 4-8 ilustra a flecha das extremidades com um carregamento de 100kN. As leituras dos deslocamentos nas extremidades logo depois de a carga ter sido retirada não apresentaram um deslocamento remanescente, voltando-se a leitura a zero.



Figura 4-8 Curvas força versus deslocamento dos LVDTs nas extremidades do dormente.

A Figura 4-9 ilustra a variação dos deslocamentos distribuídos nos pontos dos apoios. Observa-se que as leituras começam com uma carga de 20kN para o LVDT2 que está em cima do apoio de primeira ordem, com um deslocamento final de 2,01 mm e uma flecha remanente de 0,65mm. Para o LVDT3 o inicio da leitura foi para um carregamento de 15,56kN com um deslocamento final de 2,5mm e um deslocamento remanescente de 0,75mm. Os valores dos deslocamentos foram maiores que nos três primeiros ciclos devido ao fato de já ter havido um rearranjo do corpo de prova.



Figura 4-9 Curvas força versus deslocamentos dos LVDTs nos apoios do dormente.

Nos gráficos Figura 4-10 notamos que houve uma deformação contínua no tempo em todos os LVDTs do dormente até que a carga fosse retirada, exceto nos LVDT1 e LVDT6 nos quais o deslocamento não teve mudança significativa. Na Figura 4 -11 mostramos como foi mantido o carregamento durante todo o ciclo de carga, com pequenas variações devido ao controle manual da bomba hidráulica. O material do dormente teve um comportamento viscoelástico, já que sua flecha continuou aumentando no tempo para os LVDTs posicionados nas extremidades no centro do vão.

67



Figura 4-10 Curvas deslocamento versus tempo em todos os LVDTs no ciclo 4.



Figura 4-11 Curva força versus tempo do ciclo 4.

## 4.2.3

### Ciclo de carregamento 5

Para o ciclo de carregamento 5, o carregamento que se aplicou foi de 100kN, e o tempo de aplicação de carga foi de 6 horas, com uma descarga posterior de 18 horas. Na Figura 4-12 apresentamos os gráficos de leitura dos LVDTs. Os deslocamentos para os LVDT4 e LVDT5 foram de 4,4mm e 4,3mm, respectivamente, com uma recuperação de 2,2mm para o LVDT4 e 1,44mm LVDT5.



Figura 4-12 Curvas força versus deslocamento dos LVDTs para o ciclo 5.

No inicio da aplicação do carregamento na aresta onde foi posicionado o LVDT4 houve uma rigidez menor que na aresta onde estava posicionado o LVDT5, por que as leituras do LVDT4 se iniciaram no mesmo momento da aplicação do carregamento enquanto o LVDT5 teve a leitura iniciada quando a força era de 40,2 kN. Na Figura 4-13 observamos claramente a diferença entre as inclinações até chegarmos ao carregamento final. Quando o carregamento foi estabilizado, o ponto 5 teve uma rigidez de 38,46kN/mm até 23,80kN/mm, enquanto no ponto 4 as rigidezes durante a carga foram de 35,74 kN/mm até 21,05 kN/mm. Na Tabela 4-3 apresentamos as rigidezes dos LVDT4 e LVDT5.

Tabela 4-3 Rigidez dos pontos onde foram colocados os LVDTs para o ciclo 4 de carregamento

Rigidez durante o Cerramento (kN/mm)						
Carga no	Ponto 4	Ponto 5				
Inicio	35,74	38,46				
Final	21,05	23,80				



Figura 4-13 Gráfico de deslocamento versus força nos LVDT4 e LVDT5.



Figura 4-14 Gráfico de força versus deslocamento dos LVDT 1 e LVDT 6 para o ciclo de carregamento 5.

Os diagramas das Figuras 4-14 e 4-15 apresentam os resultados dos devidos deslocamentos nos LVDT2, LVDT3, LVDT1 e LVDT6. Na Tabela 4-4 ilustramos os valores dos deslocamentos.

Tabela 4-4 Deslocamento nos LVDT 1-2-3-6.

Deslocamento em (mm)							
T_Desloc-1	LVDT2	LVDT3	LVDT6				
0,85	1,97	1,46	1,02				
1,15	2,44	1,86	1,2				



Figura 4-15 Gráfico de força versus deslocamento para os LVDT2 e LVDT3.

## 4.2.4 Ciclo de carregamento 6

O ciclo de carregamento 6 foi carregado com 150 kN. Na Figura 4-18 apresentamos o crescimento do deslocamento devido à força aplicada. O deslocamento aumenta durante todo o tempo que a força de 150 kN é aplicada, e, uma vez retirada a força, os deslocamento voltam à posição inicial nos LVDT 1-2-3-6.



Figura 4-16 Gráfico de força versus deslocamento no ciclo 6.

Na Figura 4-19 observamos que ficou uma flecha residual com valores de 5,75mm para o LVDT5 e 3,64mm para o LVDT4. Devemos observar que o dormente teve uma deformação assimétrica em sua seção transversal, que já é característica dos ciclos de carga anteriores.



Figura 4-17 Gráfico de força versus deslocamento dos LVDT4 e LVDT5 que estão no centro do vão.

Para complementar a aquisição de dados, os LVDT1 e LVDT6 que foram posicionados nas extremidades não tiveram um deslocamento residual, voltando a zero após a carga ter sido retirada, como nos mostra a Figura 4-20.



Figura 4-18 Gráfico de força versus deslocamento nos LVDT1 e LVDT6.



Figura 4-19 Gráfico de deslocamento versus tempo nos LVDTs na face do dormente.

A figura 4-21 nos mostra que o comportamento do material do dormente teve um comportamento viscoelástico e o deslocamento foi aumentando para os LVDT4 e LVDT5 no tempo até o final da aplicação da carga. Também podemos observar como o deslocamento nos LVTD1, 2, 3 e 6 não aumentou significativamente, mantendo-se numa faixa de 3mm para os LVDT3 e LVDT2 e de 1,02 para os LVDT6 e LVDT1.

#### 4.3

#### Ensaio de flexão sem placa de base no dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5

Neste ensaio foram obtidos os valores de deslocamento máximo a que o dormente chegou antes da ruptura. Inicialmente o ensaio foi projetado para um carregamento de 6 ciclos com um valor máximo de carga de 60 kN segundo Dumont e Campos, (2006). Na Figura 4-22 observamos que a trinca se iniciou na parte inferior onde o dormente sofreu tração, evidenciado pela parte esbranquiçada, tendo maior capacidade de absorver energia na parte que o dormente teve maior rigidez, propagando-se ao longo da seção inferior até que o dormente se rompesse. Iniciamos com a aplicação de um carregamento de 7kN que foi descarregado e, novamente, foi aplicado uma carga de 7kN, sendo este o valor máximo a que o dormente resistiu antes de falhar. Na Figura 4-23 vemos que foi gerada uma curva de histereses para todas as leituras dos LVDTs. Na figura 4-23 notamos as curvas força versus deslocamentos para todos os LVDTs posicionados no dormente.



Figura 4-20 Dormente D.P.1.1.E.F.1.C.6 após a ruptura no centro falhando por tração na seção branca do dormente.

De acordo com o item 2.10, o deslocamento do dormente no meio do vão e a tensão máxima numa fibra do dormente são dados pela expressão (2-1) em função da inercia de sua seção transversal. Para os deslocamentos é feita uma correção por deslocamento de corpo rígido. Pela expressão (4-1) obtivemos os valores apresentados na Tabela 4-5 de acordo com ASTM D 6109 e AREMA (2003), seção 5-3, para um valor mínimo para o módulo de elasticidade inicial que o material do dormente deve apresentar e uma tensão mínima que deve ocorrer na ruptura.

Tabela 4-5 Propriedades mecânicas do dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5

	Dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5	Dormente wisewood (2006) (momento Positivo)	Dormente wisewood (2006) (momento negativo)	Tabela 30-5-1 Arema (2006)
E	0,51 GPa	2,84 GPa	2,64 GPa	1,17 GPa
$\sigma_{m \acute{a} x}$	3,39 MPa	23,8 MPa	28,5 MPa	1,38 MPa

Na figura 4-23 podemos ver os valores obtidos no ensaio de flexão em todos os LVDTs; a força foi mantida alguns minutos antes que o dormente falha-se. Na tabela 4-3 notamos que o módulo de elasticidade teve uma redução considerável em comparação ao módulo obtido por Dumont e Campos (2006), mudando de 2,84GPa para 0,51 GPa, que igualmente acontece com a tensão que mudo de 23,8 MPa para de 3,39 Mpa calculada para o dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5.



Figura 4-21 Curvas força versus deslocamento no ensaio de fluência com um vão de 167,4 cm em todos os LVDTs.

Houve uma diminuição de 83,04%, portanto menos energia foi liberada. Esta comparação foi feita com os valores obtidos no ensaio de flexão (Dumont e Campos, 2006) realizados nos mesmos dormentes proporcionados pela empresa Wisewood em 2006.



Figura 4-22 Curvas força versus deslocamento medidos no centro do vão para os LVDT 1 e 6.

A Figura 4-24 ilustra o comportamento dos deslocamentos no centro do vão medidos pelos LVDT1 e LVDT6, com um deslocamento residual de 7mm para o primeiro ciclo de carregamento. As inclinações dos dois deslocamentos são quase iguais para os dois extremos do dormente; este dormente teve uma rigidez igual em toda a sua seção transversal.

As Figuras 4-25 e 4-26 ilustram os deslocamentos das posições dos extremos sobre os apoios. Observamos que o dormente teve um deslocamento de 20mm com uma carga de 7kN em seu estágio mais avançado antes da ruptura, o que foi muito menor ao estudado por Dumont e Campos(2006), de 110mm no estágio antes da ruptura com um carregamento de 58,7kN. No ensaio que foi realizado nos mesmos dormentes no ano de 2006 observamos que o dormente teve propriedades mecânicas maiores que as apresentadas nos dormentes que foram ensaiados. O tempo de armazenamento foi de 5 anos o que é provável que algumas características mecânicas tenham mudado considerávelmente .



Figura 4-23 Curvas força versus deslocamento medidos no centro do vão para os LVDT 2 e 4..



Figura 4-24 Curvas força versus deslocamento medidos no centro do vão para os LVDT 3 e 5..

## 4.4 Ensaio de flexão no dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5

As curvas da Figura 4-27 descrevem as histereses do carregamento aplicado no dormente. Os resultados apresentados nas Figuras 4.30 e 4.31 mostram a variação do deslocamento de 80mm e de 78mm para os LVDTs 1 e 6 com o carregamento. Neste ensaio fizemos um ajuste de corpo rígido com a expressão 4.2. Por ser uma viga que está trabalhando em flexão, obtemos o módulo de elasticidade pela expressão 1.1. Obtemos, ainda, um módulo de elasticidade de **3,38 Mpa,** muito menor ao valor pesquisado na bibliografia de 2,84 Gpa, em um ensaio similar no mesmo dormente.



Figura 4-25 Gráficos força deslocamento para todos os LVDTs para o ensaio de flexão.



Figura 4-26 Gráficos força deslocamento para o ensaio de flexão no LVDT1 e LVDT6.

Os deslocamentos para o carregamento podem ser vistos na Tabela 4-6 até o ponto de ruptura. Nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 são apresentados os deslocamentos nos pontos de apoio e nas extremidades, além da duração de cada ciclo de carga.

-	Deslocamentos nos Ciclos (mm)									
	Carga kN	Des-2	Des-3	Des-4	Des-5	Des-6	Des-7			
	5,03	19,97	2,12	0,96	1,50	1,44	22,97			
	6,01	28,87	2,34	2,82	1,45	1,39	32,17			
	7,00	33,53	2,54	3,94	1,79	1,72	36,70			
	9,04	73,57	2,65	11,10	3,43	3,31	77,37			



Figura 4-27 Gráfico dos deslocamentos dos LVDT nos apoios do dormente.





Figura 4-29 Deslocamento versus força. Mostra como a força foi aplicada nos diferente ciclos.



Figura 4-30 Modo de aplicação da força no tempo.



Figura 4-31 Tempo versus força no ensaio de flexão.

## Ensaio de fluência no dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5-1

Neste ensaio foram colados três medidores de deformações e 12 LVDTs na face superior e inferior do dormente. Dois dos medidores de deformação foram colocados a 10 centímetros da borda da placa que transmitiu o carregamento ao dormente, e o terceiro foi colado na parte inferior central do dormente. O ensaio foi iniciado com um carregamento inicial de 50kN que foi mantido por 10 minutos, e, em seguida, a carga foi aumentando para 100kN, 150kN até chegar aos 200kN.

Neste ensaio foram obtidos deformações e deslocamentos de um corpo de prova que tem uma montagem como descrita no item 3.4. Na figura 4-34 apresentamos as curvas força versus deformações, observando claramente que o material tem um comportamento viscoelástico. Também é observada uma alta absorção de energia dada pela área entre o ponto inicial até o ponto final de cada ciclo. As curvas da Figura 4-23 mostram os medidores de deformação situados paralelamente entre as faces do dormente: um deles na parte superior do dormente e outro na parte inferior. Ambos têm o mesmo comportamento, o que significa que a tração e compressão tem a mesma grandeza de deformação. O medidor de deformação 2, que foi posicionado a dez centímetros da placa de aplicação de carga, apresenta uma deformação residual após a carga ser retirada.

4.5



Figura 4-32 Gráficos força versus deformações para o dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5-1.

As curvas da Figura 4-35 apresentam a variação do deslocamento devido à aplicação de uma força. Os LVDT 3 e LVDT4 que foram posicionados na face inferior do centro do vão descrevem uma curva simétrica para com o LVDT2, o que significa que o material do dormente nesta parte teve um comportamento homogêneo, para o LVDT1 que tem uma diferença com o LVDT, o que significa que houve um rearranjo do material antes de absorver a energia de deformação (Figura 4-36).



Figura 4-33 Gráficos força versus deslocamento dos 10 LVDTs posicionados na face superior e nas extremidades inferiores do centro do vão LVDT4 LVDT3.



Figura 4-34 Gráficos força versus deslocamento dos LVDTs posicionados no centro do dormente.

Foram calculadas as rigidezes para cada um dos LVDTs em todos os seus estados de carga. Na Tabela 4-3 são apresentadas as rigidezes de cada um dos LVDTs. As colunas dos valores dos LVDT1 e LVDT3 e as suas rigidezes discrepam nos valores, enquanto os valores dos LVDT2 E LVDT4 são quase os mesmos. As rigidezes em todos os pontos onde foram posicionados descrevem como o dormente teve estas são variáveis ao longo de toda a seção transversal.Na Tabela 4-7 apresentamos as rigidezes de cada ciclo de carga no dormente nos seus 10 pontos (mesmos pontos onde foram possicionados os LVDTs)

		Rigidez Durante o carregamento kN/mm									
Carga (kN)		Ponto- 1	Ponto - 2	Ponto- 3	Ponto - 4	Ponto - 5	Ponto - 6	Ponto - 7	Ponto - 8	Ponto- 9	Ponto - 10
	50	15,46	22,15	17,20	23,28	28,59	99,66	27,02	28,13	44,41	37,88
	100	18,79	26,50	20,82	27,46	53,95	191,5	47,22	36,22	65,96	58,28
	150	20,67	28,00	22,62	29,51	80,32	423,	69,56	42,23	92,08	80,40
	200	21,80	29,02	23,95	30,30	133	1484	92,88	47,59	127,5	108
	250	22,22	29,22	24,67	29,91	239	17005	117	51,93	191	145
	285	20,39	27,13	23,86	26,60	1143	2970	136	51	364	196

Tabela 4-7 Rigidezes do ensaio de carregamento no dormente que foi levado à ruptura.

## 4.5.1 Ensaio de flexão no dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5-1-b

Este ensaio levou o dormente até a ruptura na mesmo montagem do ensaio de fluência para o dormente D.P.1.2.E.F.1.C.5-1. O dormente teve uma falha com uma carga de 263 kN. Como o dormente funciona como uma viga curta nestas condições, consideramos os deslocamentos devido ao cisalhamento expressão (4-3):

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{KPl}{GA} \tag{4-3}$$

Com a metade de um dormente ensaiado no ensaio de flexão pegamos o módulo de elasticidade E=3,38 Mpa e assim obtivemos o módulo de cisalhamento G, e fizemos um média dos deslocamentos no centro do vão do dormente igual **G=0,38GPa.** 

Nas Figuras 4-37, 4-38, 4-39, 4-40 são dadas as informações de cada leitura dos LVDts que foram usados no ensaio. Dos três extensometros, dois deles estão colocados a 10 cm do centro do dormente no mesmo eixo central, e o outro foi colado embaixo do centro do dormente.



Figura 4-35 Gráficos força versus deslocamento nos LVDTs no ensaio que levou o dormente à ruptura.



Figura 4-36 Gráficos força versus deslocamento nos LVDT1 e LVDT4 que estão no centro do vão do dormente. D.P.1.2.E.F.1.C.5-1-b.



Figura 4-37 Gráficos força versus deslocamento nos LVDT5, LVDT7 LVDT8 LVDT9 que estão na face superior do dormente. D.P.1.2.E.F.1.C.5-1-b.



Figura 4-38 Gráficos força versus deformações do ensaio de flexão. P.1.2.E.F.1.C.5-1-b.

## 4.6

### Ensaio de carga estática

Conforme o item 2-11, o dormente foi carregado com uma carga de 500 kN com uma velocidade de 50kN/min. Foram medidos deslocamentos no centro do dormente, onde aplicamos a carga, e os valores do deslocamento são apresentados na Tabela 4-8 para os dormentes **D.P.1.1.E.F.1.C.6.C.E.1**, **D.P.2.1.E.F.1.C.5-2.C.E.2** e **D.P.3.0.E.C.E.3**.

Tabela 4-8 Deslocamento nas extremidades dos dormentes.

	Dormente (esmagamento em mm)						
Carregamento em kN	D.P.1.1.E.F.1.C.6.C.E. 1	D.P.2.1.E.F.1.C.5- 2.C.E.2	D.P.3.0.E.C.E. 3				
0	0,00	0,00	0,00				
50	1,87	1,76	1,55				
100	2,77	2,87	2,67				
150	3,44	3,67	3,66				
200	4,08	4,00	3,98				
250	4,70	5,00	5,50				
300	5,34	5,56	5,70				

350	6,07	6,70	7,45
400	6,94	7,30	7,44
450	7,87	7,90	7,67
500	8,70	9,67	9,78
0	2,00	1,70	2,30

Segundo Gupta (2003) o dormente poderá ser aceito já que não apresentou nenhuma trinca após a aplicação do carregamento, mantido durante 5 minutos. No item 2.11 Gupta (2003) apresentou resultados de ensaios de carga estática em dormentes fabricados pela Polywood e Tietek . Os resultados no término dos deslocamentos foram satisfatórios para os dormentes fabricados pela empresa Wisewood. Na Figura 4-40 apresentamos as marcas deixadas pela placa de transferência de carga marcadas na parte esbranqueçida da parte superior do dormente.



Figura 4-39 Marca da placa onde o carregamento foi aplicado. Não há fissuras no dormente D.P.1.1.E.F.1.C.6.C.E.1.



Figura 4-70 Marca da placa onde o carregamento foi aplicado. Não há fissuras no dormente D.P.1.1.E.F.1.C.5-2C.E.F.2.

Segundo Gupta (2003), todos os dormentes estão em condições de serem usados nas vias férreas, já que são suficientemente rígidos para suportar o peso e flexíveis para absorver as vibrações causadas pelo movimento do trem. Como é observado na Figura 4-40 e 4-41, os dormentes tiveram um bom desempenho.

### 4.7

### Ensaio de carga de impacto

O objetivo deste ensaio é determinar a qualidade do dormente devido às cargas de descarrilhamento. Foram ensaiados três dormentes e cada um deles foi impactado uma única vez. Na tabela 4-9 apresentamos os resultados das medidas da mossa deixadas devido ao peso.

		Tamanho da ranhura depois da queda do peso em mm							
No	Tipo de dormente	Depois da primeira queda				Depoi	s da se	gunda	queda
	Tipo de dormente	а	b	С	d	а	b	С	d
1	Dormente 1	25	23	35	15	0	0	0	0
2	Dormente 2	30	30	25	35	0	0	0	0
3	Dormente 3	45	50	24	12	0	0	0	0

Os resultados foram comparados com resultados da literatura estudada no item 3.6.2. Segundo os comentários de Gupta (2003) os dormentes fabricados pela empresa Wisewood tiveram uma boa capacidade de absorção de energia, já que a mossa não foi maior que a dos ensaios feitos em dormentes aprovados para serem usados em vias férreas fabricados pela empresa Tietek Sleeper e também pela Polywood Sleeper. Todos os corpos de prova foram impactados uma única vez, visto que o eletroímã parou de funcionar após o impacto no terceiro dormente. Nas Figura 4-42 e 4-43 ilustramos o tamanho da mossa deixada pelo peso, e, assim, observamos que o tamanho é maior na aresta e diminui ao longo da face do dormente devido à sua inclinação. É importante observar que todo o equipamento foi feito no laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio.



Figura 4-41 Ranhura depois do ensaio de impacto no dormente D.P.3.0.E.C.E.3-1.



Figura 4-42 Ranhura depois do ensaio de carga estática no dormente D.P.3.0.E.C.E.3-2



Figura 4-43 Ranhura depois do impacto do peso no dormente D.P.3.0.E.C.E.3-3.

Nas Figuras 4-44, 4-45, 4-46 e 4-47 mostramos com detalhes o tamanho da mossa deixado pelo peso, e, além disso, foram tomadas as medidas da impressão como descreveu Gupta (2003). O tamanho da impressão sempre foi maior na aresta devido à inclinação do dormente, mas não foi apresentada nenhuma fissura logo após o primeiro impacto em nenhuma das faces comprometidas onde o dormente foi impactado. Não é possível saber se o dormente vai apresentar fissuração no segundo impacto, mas é muito possível que não devido à composição do material. Este tipo de ensaio vem sendo exigido no Brasil para dormentes de concreto protendido, apesar de não estar nem na ABNT NBR 11709 (2009) nem na AREMA (2003). (Dumont e Campos, 2006).



Figura 4-44 Detalhe do dormente D.P.3.0.E.C.E.3-2 após do primeiro impacto.



Figura 4-45 Detalhe do dormente D.P.3.0.E.C.E.3-1 após do primeiro impacto.



Figura 4-86 Detalhe do dormente D.P.3.0.E.C.E.3-3 após do primeiro impacto.