

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
DORMENTES PRISMÁTICOS DE EUCALIPTO CITRIODORA  
SUBMETIDOS A SOLICITAÇÕES DINÂMICAS**

RODOLFO DÉCIO FERREIRA

CAMPINAS  
JUNHO DE 2002

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

## **PARECER**

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por **RODOLFO DÉCIO FERREIRA** e aprovada pela Comissão Julgadora em 11 de junho de 2002.

Campinas, 18 de outubro de 2002.



**Prof. Dr. ANTONIO LUDOVICO BERALDO**  
Presidente da Banca

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
DORMENTES PRISMÁTICOS DE EUCALIPTO CITRIODORA  
SUBMETIDOS A SOLICITAÇÕES DINÂMICAS**

Dissertação submetida à banca examinadora para  
obtenção do título da Mestre em Engenharia  
Agrícola na área de concentração em Construções  
Rurais e Ambiência.

**RODOLFO DÉCIO FERREIRA**  
**Orientador: Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo**

CAMPINAS  
JUNHO DE 2002

UNIDADE BC  
Nº CHAMADA T/UNICAMP  
F 413 a  
V EX  
TOMBO BC/ 51447  
PROC 16.837/02  
C DX  
PREÇO R\$ 11,00  
DATA 12/11/02  
Nº CPD

CM00176417-7

31B ID 266945

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ferreira, Rodolfo Décio

~~F413a~~  
F413 a  
Análise do comportamento mecânico de dormentes prismáticos de eucalipto citriodora submetidos a solicitações dinâmicas / Rodolfo Décio Ferreira.-- Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Antonio Ludovico Beraldo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Ferrovias. 2. Dormentes de ferrovias. 3. Testes dinâmicos. 4. Eucalipto. I. Beraldo, Antonio Ludovico. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

À minha esposa Edileuza,  
pela dedicação e carinho,  
às minhas filhas Mariana e  
Areta, por todos os bons  
momentos.

À minha mãe Ivone, pelo  
apoio concedido durante  
todas as fases de minha  
vida.

À minha tia Wanda, pelo  
incentivo nos estudos.

À minha avó Maria Palácio,  
pelos ensinamentos.

## **AGRADECIMENTOS**

À Faculdade de Engenharia Agrícola, pela minha aceitação como aluno de pós - graduação.

Ao Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo, pela orientação e paciência durante a elaboração deste trabalho.

À Profa. Dra. Raquel Gonçalves, pela atenção e disponibilidade.

Ao Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin, pelo incentivo, estima e, principalmente, a amizade durante a realização dos ensaios, sem os quais, eu não teria obtido êxito neste trabalho.

Ao Dr. Antonio Arlindo Guidetti Porto, pelo apoio, amizade e disponibilidade sempre demonstrada.

Aos amigos, engenheiros Edson José de Oliveira e Mário Valter Albertini, do Centro de Tecnologia da UNICAMP, pela ajuda e apoio demonstrados durante o trabalho.

Às secretárias Vanessa, Deise, Aninha e Marta, pela atenção dada a mim.

A todos os funcionários do Centro de Tecnologia da UNICAMP, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização da pesquisa.

## SUMÁRIO

	Página
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xi</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>03</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>04</b>
3.1    Madeira de eucalipto.....	04
3.2    Dormentes de eucalipto.....	05
3.3    Ensaios de caracterização da madeira de eucalipto citriodora.....	11
3.4    Fadiga da madeira.....	13
3.4.1    Conceitos importantes.....	13
3.4.2    Ciclos de tensões.....	14
3.4.3    Curvas S-N e $\varepsilon$ -N.....	18
3.4.4    Influência da frequência.....	21
3.4.5    Fluência.....	21
3.5    Análise da situação estática e de carregamento para os dormentes de madeira.....	25
3.6    Dormentes de madeira- modelagem teórica do comportamento .....	33
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
4.1    Materiais.....	35
4.1.1    Dormentes.....	35
4.1.2    Placas de apoio.....	35
4.1.3    Tirefons.....	35
4.1.4    Trilhos.....	36
4.1.5    Caixa de brita.....	36

4.2	Métodos.....	37
4.2.1	Ensaios dos dormentes.....	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1	Ensaios dinâmicos.....	47
(a)	Deslocamentos.....	47
(b)	Deformações específicas.....	52
6.	CONCLUSÕES.....	65
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
8.	ANEXOS.....	70

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Dormente prismático - Dimensões nominais, em cm, para bitola métrica (NBR 7511, 1982).....	06
Figura 2 Dormente rolio- Dimensões nominais, em cm, para bitola métrica (ANAIS DO I ENCONTRO BRASILEIRO EM PRESERVAÇÃO DE MADEIRAS, 1982).....	07
Figura 3 Dormente dupla face- Dimensões nominais, em cm, para bitola métrica (ANAIS DO I ENCONTRO BRASILEIRO EM PRESERVAÇÃO DE MADEIRAS,1982).....	07
Figura 4 Posições de avaliação da deformação específica da madeira com extênsometros elétricos) no ensaio de compressão paralela às fibras (BALLARIN, 1999).....	12
Figura 5 Ciclo regulares de tensões - tensão reversa ( SOUZA,1982).....	15
Figura 6 Ciclo regulares de tensões - tensão repetida, campo da tração (SOUZA,1982).....	16
Figura 7 Ciclo regulares de tensões - tensão repetida, campo da tração e compressão (SOUZA, 1982).....	16
Figura 8 Ciclo irregular de tensões - tensão aleatória, campo da tração e compressão (DIETER, 1981).....	17
Figura 9 Ilustração de curva S-N ou $\epsilon$ -N (MACÊDO, 2000).....	19
Figura 10 Diagrama de Woeler ou S-N para diferentes materiais (HANSEN, 1991)....	20
Figura 11 Efeito da duração da carga, até a falha, na resistência à flexão em vigas de madeira (GRÁF, 1938).....	23
Figura 12 Curva típica de fluência com a recuperação após o descarregamento (MADSEN, 1992).....	24
Figura 13 Situação estática da via férrea, assumindo-se o modelo da viga contínua sobre apoio elástico, com resistência específica " $\mu$ " (BALLARIN, 1999)....	25

Figura 14	Distribuições ideais de pressão sob o dormente, a - logo após a socaria, b - decorrido longo tempo após a socaria (BALARIN,1999).....	28
Figura 15	Anotação dos eixos geométricos dos dormentes (X,Y e Z) e dos eixos principais de elasticidade da madeira (L, R e T) (BALLARIN,1999).....	34
Figura 16	Vista parcial da caixa de britas.....	36
Figura 17	Vista geral do pórtico e dos atuadores servohidráulicos.....	37
Figura 18	Esquema de carregamento dos dormentes prismáticos.....	38
Figura 19	Detalhe do posicionamento dos extensômetros elétricos e dos relógios comparadores nos ensaios dinâmicos dos dormentes.....	41
Figura 20	Detalhe da instrumentação dos dormentes com extensômetros elétricos....	42
Figura 21	Posição geral dos relógios comparadores para avaliação dos deslocamentos dos dormentes.....	42
Figura 22	Vista da parte posterior do sistema de aquisição de dados ADS 2000.....	43
Figura 22 b	Vista do sistema de aquisição de dados ADS 2000.....	43
Figura 23	Planilha utilizada para o registro de dados nos ensaios dinâmicos dos dormentes.....	44
Figura 24	Ensaio dinâmico - variação do carregamento (amplitude e freqüência).....	46
Figura 25	Rotina de carregamento de ensaio dinâmico.....	46
Figura 26	Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa inicial do ensaio, após 1080.000 ciclos, antes da aplicação de carregamento dinâmico, PDT- 01.....	49
Figura 27	Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa final do ensaio, após aplicação de 3000.000 ciclos, PDT- 01.....	49
Figura 28	Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa inicial do ensaio, após 1080.000 ciclos, antes da aplicação de carregamento dinâmico, PDT- 02.....	50
Figura 29	Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa final do ensaio, após aplicação de 3000.000 ciclos, PDT- 02.....	50
Figura 30	Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa inicial do ensaio, após 1080.000 ciclos, antes da aplicação de carregamento dinâmico, STD - 02.....	51

Figura 31	Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa final do ensaio, após aplicação de 3000.000 ciclos, STD - 02.....	51
Figura 32	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1H, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	55
Figura 33	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E4, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	55
Figura 34	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E2, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	56
Figura 35	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E5, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	56
Figura 36	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1V, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	57
Figura 37	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R2V, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	57
Figura 38	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E1, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	58
Figura 39	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1H, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	59
Figura 40	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E4, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	59
Figura 41	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E2, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	60
Figura 42	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R2V, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	60
Figura 43	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E1, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	61

Figura 44	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1H, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	62
Figura 45	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E4, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	62
Figura 46	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E2, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	63
Figura 47	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E5, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	63
Figura 48	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R2V, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	64
Figura 49	Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E1, obtidas nas diferentes etapas de ensaio dinâmico.....	64

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 Características fisico- mecânicas de madeiras de uso na dormentação.....	08
Tabela 2 Valores médios de algumas propriedades de agrupamentos de madeiras....	08
Tabela 3 Resultado de ensaios de durabilidade de dormentes tratados.....	09
Tabela 4 Propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de eucalipto.....	10
Tabela 5 Valores do multiplicador "t" da distribuição, em função do quartil.....	30
Tabela 6 Deslocamentos máximos dos dormentes nos ensaios dinâmicos - exemplar PTD-01.....	47
Tabela 7 Deslocamentos máximos dos dormentes nos ensaios dinâmicos - exemplar PTD-02.....	48
Tabela 8 Deslocamentos máximos dos dormentes nos ensaios dinâmicos - exemplar SDT-02.....	48
Tabela 9 Deformações específicas máximas (em $\mu\epsilon$ ) para cargas de 200 kN.....	53

## RESUMO

Tendo a ferrovia a característica de arcar com as despesas de manutenção da via, alguns Centros de Pesquisas, Universidades e fabricantes têm trabalhado no desenvolvimento de diversos materiais e componentes ferroviários com o propósito de minimizar esses custos, a fim de tornar esse modal mais competitivo.

Uma dessas iniciativas de desenvolvimento foi a análise teórica dimensional de dormentes de madeira de reflorestamento, com o auxílio do método dos elementos finitos, que vem se desenvolvendo, desde 1992, na Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP de Botucatu - SP.

Com o intuito de fornecer subsídios para uma possível calibração do modelo matemático adotado por essa Faculdade, BALLARIN (1999), em sua tese (livre - docência) - *Desempenho mecânico de dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora*, constatou que, através da análise dos resultados obtidos nos ensaios estáticos e dinâmicos realizados em dormentes prismáticos de madeira de Eucalipto citriodora, em laboratório, seria possível reduzir as dimensões básicas dos dormentes.

Visando complementar os ensaios anteriores, já realizados por BALLARIN (1999) até 1.080.000 ciclos, o presente trabalho teve como propósito a realização de ensaios laboratoriais normalizados, conduzidos conforme recomendações da norma AREMA, com cargas cíclicas regulares senoidais, de compressão, até 3.000.000 ciclos, em dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora, para avaliar qualitativamente o comportamento mecânico desses, quando submetidos a solicitações dinâmicas com maior número de ciclos.

**Palavras chave:** Dormente; ensaio dinâmico; comportamento mecânico.

## SUMMARY

Once a railway has the feature of assuming all the expenses with track maintenance, some research centres, universities and manufacturers have been working in the development of several materials and railway components in order to minimise these costs and make more competitive this modal of transportation.

One of the advances was the theoretical dimensional analysis of ties made of reforestation wood, with the aid of the method of finite elements, which has been developed, since 1992, in the Faculty of Agronomy Sciences of UNESP, Botucatu - SP, this way lacking of laboratory tests for the validation of this theoretical analysis.

With the purpose of providing subsidies for a possible calibration of the mathematical model adopted by this Faculty, BALLARIN (1999), in his thesis - *Mechanical Performance of Prismatic Ties of Citriodora Eucalyptus*, observed that, by means of the analysis of the result obtained in the static and dynamic laboratory tests performed with prismatic wood ties of citriodora Eucalyptus it should be possible to reduce the basic dimensions of the tie.

In order to complete the previous tests performed by BALLARIN (1999) until 1,080,000 cycles, this work had the scope of carrying out standard tests, performed now until 3,000,000 cycles inside a laboratory, according to recommendations of AREMA standard, with regular sinusoidal compression loads on prismatic ties of Eucalyptus Citriodora, thus evaluating qualitatively the mechanical performance of them when submitted to dynamic loads with a higher number of cycles.

Key words: sleeper, dynamic test, mechanical performance.

## **1 . INTRODUÇÃO**

No mundo moderno o transporte se caracteriza, como uma atividade essencial na vida das pessoas. A eficiência dos sistemas de transportes é um dos indicadores do grau de desenvolvimento e qualidade de vida de uma nação. As várias modalidades de transporte dispõem de características próprias, competindo entre si, com vantagens e desvantagens, dependendo da demanda e da estrutura disponível.

Dentre as principais modalidades utilizadas como meio de transporte pode-se destacar: o Modal Rodoviário, o Ferroviário, o Naval, e o Aerooviário. Deve-se salientar que o Modal ferroviário, tanto no transporte de passageiros, como no de cargas, torna-se necessário como um elo logístico muito importante para a economia de um país que se caracterize como um grande produtor agrícola, apresentando uma enorme extensão territorial e possuindo grandes concentrações populacionais nas regiões urbanas. Este é caso do Brasil.

Não desmerecendo a importância dos demais modais para a economia brasileira e para a qualidade de vida da população, pode-se enfatizar algumas das vantagens que o modal ferroviário apresenta sobre os demais modais citados.

Tendo a ferrovia uma natureza tecnológica que se caracteriza por um baixo atrito, resultante da rodagem de aço sobre aço, ela oferece a possibilidade de se formarem comboios extensos, rebocados por uma única unidade motora, proporcionando grande economia de energia.

Com as altas velocidades alcançadas pelos trens atuais, pode-se percorrer grandes distâncias em um curto período de tempo, com maior número de passageiros e quantidade de cargas, a um custo reduzido.

Já o transporte metroviário, uma das modalidades do modal ferroviário, além de proporcionar maior conforto ao passageiro, consegue, também, de forma eficaz, oferecer maior segurança e pontualidade, o que não se viabiliza facilmente, através do modal rodoviário, nas grandes cidades.

Embora apresente esses aspectos positivos, a ferrovia ainda não consegue ser competitiva com outros modais, principalmente com o modal rodoviário, porque os custos para manutenção da ferrovia, no que tange à via permanente, são demasiadamente elevados, além de serem mantidos pelas próprias concessionárias, ao contrário do que acontece com o modal rodoviário, cuja maior responsabilidade deve-se ao governo, exceção feita às rodovias privatizadas.

Avaliando esta característica, peculiar da ferrovia, de arcar com as despesas de manutenção da via, alguns Centros de Pesquisas, Universidades e fabricantes têm trabalhado no desenvolvimento de diversos materiais e componentes ferroviários, com o propósito de minimizar esses custos, a fim de tornar esse modal mais competitivo. Uma dessas iniciativas foi o desenvolvimento da análise teórica dimensional de dormentes de madeira (que é o mais barato entre os dormentes utilizados na via permanente), com o auxílio do método dos elementos finitos, o que vem sendo realizado desde 1992, na Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP de Botucatu - SP.

BALLARIN (1999), em sua tese (livre-docência) - *Desempenho mecânico de dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora*, realizou ensaios estáticos e dinâmicos em protótipos de dormentes de madeira de reflorestamento, com o intuito de balizar e validar a análise teórica dimensional adotada. Sugeriu ainda o prosseguimento nessa linha de pesquisa, pela necessidade da realização de novos ensaios laboratoriais, alcançando-se um número maior de ciclos de carregamento dinâmico, para uma análise efetiva da fadiga do material.

## **2 . OBJETIVO**

No Brasil, as derrubadas e queimadas de árvores, de forma indiscriminada, como tem sido feita atualmente, têm colaborado para a redução da quantidade de madeiras nobres ou de lei. Este fato tem provocado a substituição paulatina dos dormentes de madeira de lei por dormentes de madeira de reflorestamento, a qual pode ser plantada em regiões de acesso mais fácil. Contudo, a utilização de dormentes de madeira na via permanente tem sido feita apenas com base na experiência de profissionais da área, necessitando, portanto, de informações mais confiáveis que justifiquem determinados procedimentos, tais como a exigência de dimensões mínimas para os dormentes e o seu comportamento sob carregamento de cargas cíclicas.

BALLARIN (1999), constatou que, através da análise dos resultados obtidos nos ensaios estáticos e dinâmicos realizados em dormentes prismáticos de madeira de Eucalipto citriodora, em laboratório (para a validação da análise teórica dimensional adotada), seria possível reduzir as dimensões básicas do dormente em função das deformações específicas (sensivelmente baixas) observadas. O referido autor sugeriu que fossem realizados novos ensaios laboratoriais, alcançando-se um número maior de ciclos de carregamento dinâmico, para uma análise efetiva da fadiga do material.

O presente trabalho teve, como propósito, a realização de ensaios normalizados, conforme recomendações da norma AREMA (1996), com cargas cíclicas regulares de forma senoidal, com valores máximos e mínimos, de compressão, até 3.000.000 ciclos (complementando o trabalho de BALLARIN (1999), que realizou carregamentos cíclicos até 1.080.000 ciclos), em dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora, em laboratório, com o intuito de avaliar qualitativamente o comportamento mecânico desses elementos quando submetidos a solicitações dinâmicas com maior número de ciclos.

### **3 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Madeira de Eucalipto**

De acordo com KOLLMANN & CÔTÉ JR (1968), a madeira, por ser um material fibroso e com estrutura porosa, possui "efeito de entalhe interno inerente" e é, portanto, menos sensível aos entalhes externos e às cargas repetidas do que os corpos sólidos homogêneos cristalinos, como o aço. Os limites de resistência à fadiga em relação à resistência à ruptura da madeira parecem ser, como regra, maiores do que aqueles observados na maioria dos metais.

O eucalipto é hoje uma importante matéria-prima para diversos setores da economia brasileira. RIZZINI (1971) comentou que o eucalipto, de origem australiana, foi introduzido no Brasil por volta de 1850 e só a partir de 1903 começou a ser cultivado em áreas de florestamento e reflorestamento, pelo fato de possuir excelentes características mecânicas, físicas e crescimento rápido, mesmo em solos considerados pobres para a agricultura, podendo atingir 40 m de altura e 120 cm de diâmetro. Suas sementes mantém um poder germinativo por volta de 10 anos.

A necessidade de obter vigas econômicas, de comportamento satisfatório e de elevada rigidez, levou HELLMEISTER (1978) a efetuar o estudo de vigas compostas por postes de Eucalipto citriodora, com compensação dos seus pequenos diâmetros por meio da solidarização com anéis metálicos.

AMATTO (1982) analisou o desempenho de postes de madeira no sistema Eletropaulo, e considerou que o Eucalipto citriodora apresentava melhor desempenho do que os demais, utilizados nas especificações da Eletropaulo. A espécie Eucalipto citriodora, apresentou durabilidade de até 30 anos em serviço.

SALES & LAHR (1992), ao estudarem cinco espécies de eucalipto, constataram que suas propriedades apresentavam valores médios que evidenciavam a possibilidade de emprego na construção de estruturas para diversas finalidades.

NOGUEIRA & LAHR (1992), em estudo mais abrangente com dezesseis espécies de eucalipto, ressaltaram potencialidades para o seu uso na construção civil.

### **3. 2. Dormentes de Eucalipto**

Segundo ANDRADE (1961), a antiga Companhia Paulista de Estradas de Ferro extraiu árvores de Eucalipto *globulus* (*E. globulus*), com 17 anos de idade, plantadas em seu próprio horto situado em Jundiaí - SP, e fez confecção de dormentes para serem utilizados na via permanente, a título de experiência. Esses dormentes foram assentados na via em julho de 1906 e apresentaram vida útil superior a 9 anos.

SCHRAMM (1977) apresentou algumas vantagens do dormente de madeira em relação aos demais tipos utilizados na ferrovia, sendo elas:

- Menor massa específica aparente (em relação aos dormentes de concreto);
- Trabalhável por meio de ferramentas simples, tais como: serras, furadeiras, plainas, entalhadeiras;
- isolante elétrico;
- Durabilidade em relação às agressões químicas e ambientais;
- Suporta muito bem todos os tipos de supersolicitações (tráfego, transporte, carregamento);
- Têm boa elasticidade, o que resulta em um rodar mais suave da composição;
- Além disso, em caso de descarrilamento da composição, os dormentes de madeira limitam a propagação dos esforços, contrariamente ao que ocorre com dormentes de outros materiais.

NIEDERAUER (1982) comentou que os primeiros dormentes utilizados no Brasil, em larga escala, foram empregados na construção da estrada de ferro Madeira - Mamoré, pela

firma May, Jacky & Randolph, de Nova York, em 1907. Na ocasião, por paradoxal que seja, foram importados 80.000 dormentes de Eucalipto da Austrália, para construção do leito dessa via. Desde então, dormentes prismáticos de eucalipto vêm sendo aplicados nas principais ferrovias nacionais em larga escala como na antiga FEPASA, onde até 1971 foram utilizados cerca de 700 mil e na RFFSA, cerca de 500 mil. Na SR.6 (Superintendência Regional 6 da RFFSA) foram efetuadas observações quanto à durabilidade de dormentes prismáticos de eucalipto, sem tratamento, colocados no Ramal de Montenegro, em 1960. Esses dormentes, ao serem retirados da linha após 13 anos, devido à erradicação do trecho, apresentavam condições de reemprego em 40% das peças.

Os dormentes de madeira são confeccionados em três formatos diferentes: de forma prismática, que é a mais utilizada (figura 1), de forma roliça (figura 2) e de dupla face (figura 3).

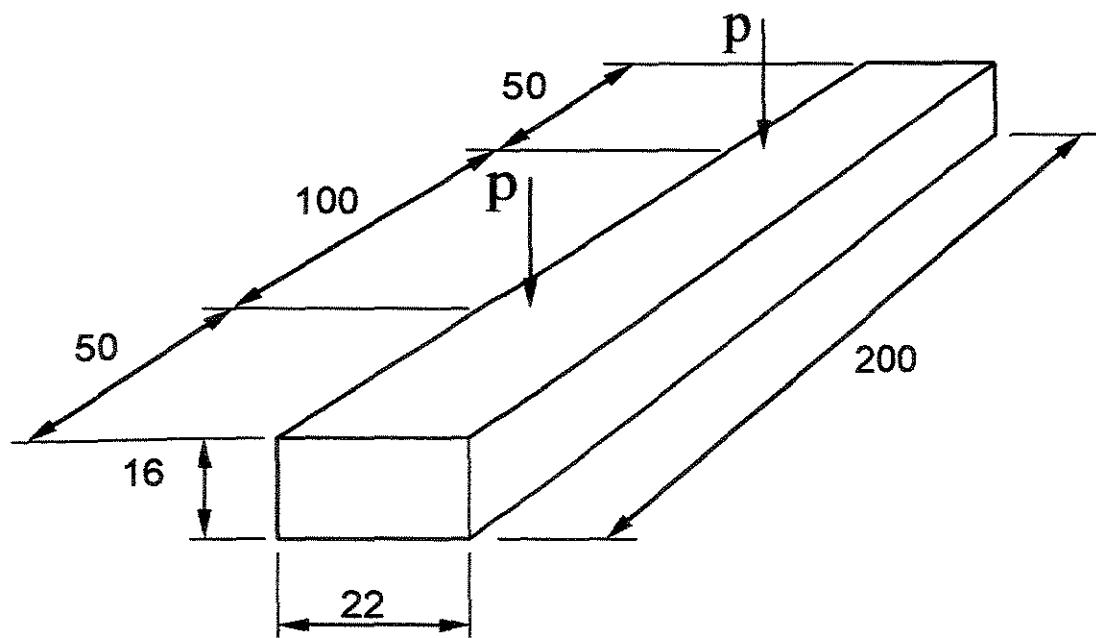


Figura 1 - Dormente prismático – Dimensões nominais, em cm, para bitola métrica.  
Fonte: NBR 7511(1982)

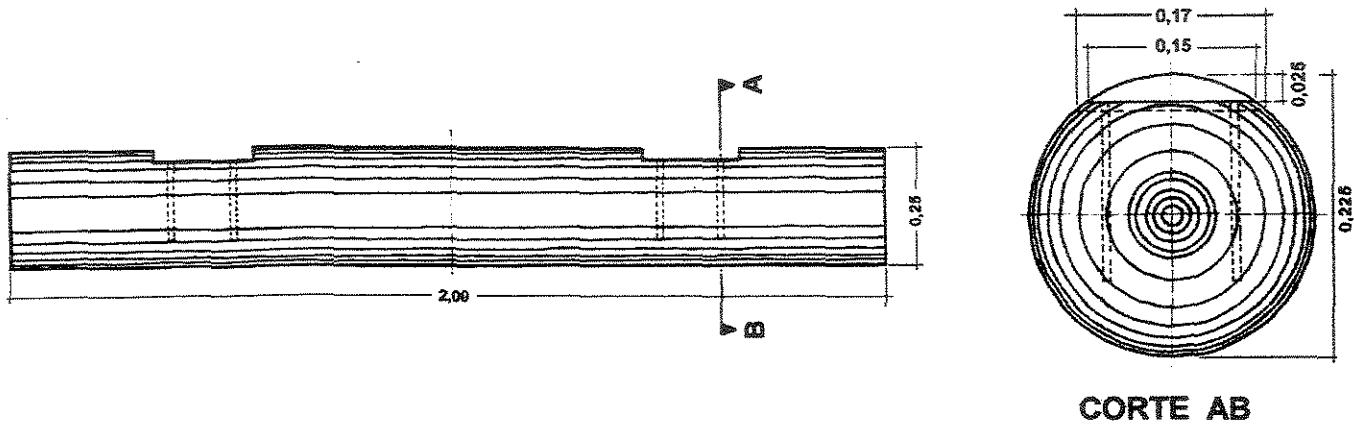


Figura 2 - Dormente roliço – Dimensões nominais, em cm, para bitola métrica.

Fonte: NIEDERAUER (1982)

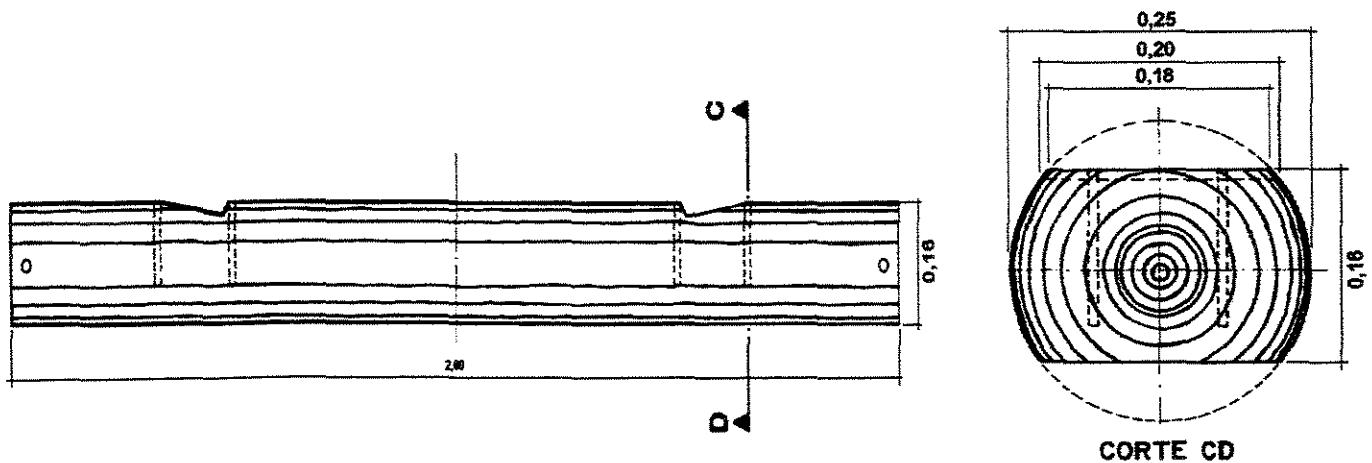


Figura 3 - Dormente dupla face - Dimensões nominais, em cm, para bitola métrica.

Fonte: NIEDERAUER (1982)

NIEDERAUER (1982) apresentou, em tabelas comparativas (Tabelas 1 e 2), o desempenho físico e mecânico de madeiras de algumas espécies de eucalipto, madeiras de lei e madeiras brancas, utilizadas como dormentes.

Tabela 1 - Características fisico-mecânicas de madeiras de uso na dormentação.

Nome Vulgar <sup>1</sup>	M. Espec. (t/m <sup>3</sup> )	Flexão Estática		Módulo de Elasticidade		Flexão Dinâmica (kgf.m)	Dureza Janka (MPa)	Arranc. Frontal	
		Mad. Verde (MPa)	Mad. 15% (MPa)	Compressão (MPa)	Flexão (MPa)			Grampo (kN)	Tirefão (kN)
<b>Angico-vermelho</b>	0,97	104,2	143,4	13.130	12.445	6,8	101	34,2	-
<b>Grapia</b>	0,83	95,3	120,0	15.030	11.780	4,3	72	31,1	-
<b>Canafistula</b>	0,87	102,8	120,9	17.220	12.240	2,6	88	35,4	75
<b>Canela de veado</b>	0,89	103,4	135,2	13.486	13.202	4,6	76	29,6	-
<b>Peroba-rosa</b>	0,87	99,0	109,6	14.600	19.060	2,6	81	-	-
<b>Canela-imbúia</b>	0,65	78,4	93,4	9.000	7.890	2,1	44	-	-
<b>E. citriodora</b>	0,98	150,0	167,3	21.000	17.700	7,2	91	34,5	-
<b>E. maculata</b>	0,93	125,5	154,6	21.069	18.420	7,1	87	24,8	-
<b>E. paniculata</b>	1,11	148,1	187,1	23.497	21.488	7,2	111	37,1	-
<b>E. siderophloia</b>	1,11	133,3	181,7	21.311	18.865	6,1	107	36,2	-
<b>E. tereticornis</b>	0,95	127,0	157,6	16.380	13.320	6,0	84	30,4	-

Fonte: NIEDERAUER (1982)

Tabela 2 – Valores médios de algumas propriedades de agrupamentos de madeiras.

Madeira	M. Espec. (t/m <sup>3</sup> )	Dureza Janka (MPa)	Arranc. Frontal (kN)	Flexão Estática (MPa)
<b>Genêro Eucalyptus<sup>2</sup></b>	<b>0,88</b>	<b>87,1</b>	<b>29,8</b>	<b>155</b>
<b>Madeiras de lei<sup>3</sup></b>	<b>0,84</b>	<b>77,1</b>	<b>32,6</b>	<b>120</b>
<b>Madeiras brancas<sup>4</sup></b>	<b>0,73</b>	<b>58,1</b>	<b>26,5</b>	<b>107</b>

Fonte: NIEDERAUER (1982)

Quanto à durabilidade, NIEDERAUER (1982) apresentou dados comparativos de dormentes tratados que justificam o emprego de dormentes de espécies de eucalipto na via permanente (Tabela 3).

<sup>1</sup> No trabalho fonte, não constam os nomes científicos.

<sup>2</sup> Consideração exclusiva das espécies mais indicadas para o uso como dormentes, segundo NIEDERAUER(1982).

<sup>3</sup> Angico-vermelho, grapia, canafistula, canela-de-veado, peroba-rosa, canela-embúia.

<sup>4</sup> Açucará, açóita,canela-amarela, canela-lageana, canela-loura, cangerana, camboatá, guatambú, guajuvira, marmeleiro-do-mato,maria-preta,pequiá,rabo-de-bugio, sapopema

Tabela 3 – Resultados de ensaios de durabilidade de dormentes tratados.

Madeira	Tipo de dormente	Tratamento em Auto - clave	Retenção média (kg/m <sup>3</sup> )	Vida útil Provável (anos) <sup>5</sup>
Eucalipto	Prismático	Wolmanit - CB - 4%	2,24	27,0
		Pentaclorofenol - 5%	28,67	17,5
		Creosoto	31,22	22,0
	Duas faces	Pentaclorofenol - 5%	61,92	17,5
	Roliço	Pentaclorofenol - 5% <sup>6</sup>	71,24	15,0
		Pentaclorofenol - 5% <sup>7</sup>	80,00	10,5
		Sal CCB - 4,3%	9,16	
Madeira branca (1º grupo) <sup>8</sup>	Prismático	Sal Wolman UAR - 4%	Var.	10,0
		Pentaclorofenol Creosoto	Var.	20,0
			Var.	23,5
Madeira branca (2º grupo) <sup>9</sup>	Prismático	Sal CCB - 4,0%	Var.	6,0
		Pentaclorofenol - 5%	Var.	12,0
		Creosoto	Var.	15,0

Fonte : Niederauer (1982)

Na Tabela 4 encontram-se os resultados, em valores médios, das principais propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de eucalipto, conforme as recomendações da NBR 7190 (ABNT/1997).

<sup>5</sup> Estimativa feita com base no diagrama de Mac Lean (NIEDERAUER, 1982).

<sup>6</sup> Experiência na SR-6 Trecho Porto Alegre-Santa Maria.

<sup>7</sup> Experiência na Superintendência Tubarão-Ramal de Urussanga.

<sup>8</sup> Açucará, canafistula, canela-do-brejo, cangerana, guatambú, rabo-de-bugio, marmeiro-do-brejo, canela-amarela, canela-guaicá, canela-lageana, canela-louro, canela-preta, canela-raposa.

<sup>9</sup> Açucará, canafistula, cangerana, guatambú, rabo-de-bugio, marmeiro-do-brejo, canela-amarela, canela-guaicá, canela-lageana, canela-louro, canela-preta, canela-raposa.

Tabela 4 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas espécies de eucalipto.

Nome comum (dicotiledônia)	Nome científico	$\rho_{ap\ (12\%)}\ (kg/m^3)$	$f_{c0}$ (MPa)	$f_{t0}$ (MPa)	$f_{90}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)	$E_{c0}$ (MPa)	n
E. alba	<i>Eucalyptus alba</i>	705	47,3	69,4	4,6	9,5	13409	24
E. camaldulensis	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	899	48,0	78,1	4,6	9,0	13286	18
E. citriodora	<i>Eucalyptus citriodora</i>	999	62,0	123,6	3,9	10,7	18421	63
E. cloesiana	<i>Eucalyptus cloesiana</i>	522	51,8	90,8	4,0	10,5	13963	21
E. dunnii	<i>Eucalyptus dunnii</i>	690	48,9	139,2	6,9	9,8	18029	15
E. grandis	<i>Eucalyptus grandis</i>	640	40,3	70,2	2,6	7,0	12813	103
E. maculata	<i>Eucalyptus maculata</i>	931	63,5	115,6	4,1	10,6	18099	53
E. maidene	<i>Eucalyptus maidene</i>	924	48,3	83,7	4,8	10,3	14431	10
E. microcorys	<i>Eucalyptus microcorys</i>	929	54,9	118,6	4,5	10,3	16782	31
E. paniculata	<i>Eucalyptus paniculata</i>	1087	72,7	147,4	4,7	12,4	19881	29
E. propinqua	<i>Eucalyptus propinqua</i>	952	51,6	89,1	4,7	9,7	15561	63
E. punctata	<i>Eucalyptus punctata</i>	948	78,5	125,6	6,0	12,9	19360	70

As propriedades de resistência e rigidez foram determinadas pelos ensaios realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeiras (LAMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo.

$\rho_{ap\ (12\%)}$  = massa específica aparente a 12% de umidade;

$f_{c0}$  = resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{t0}$  = resistência à tração paralela às fibras;

$f_{90}$  = resistência à tração normal às fibras;

$f_v$  = resistência ao cisalhamento;

$E_{c0}$  = módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras;

n = número de corpos-de-prova ensaiados - coeficiente de variação para solicitações normais  $\delta = 18\%$   
- coeficiente de variação para solicitações normais  $\delta = 28\%$

Fonte: NBR 7190 (ABNT,1997)

### **3.3 Ensaios de caracterização da madeira de Eucalipto citriodora**

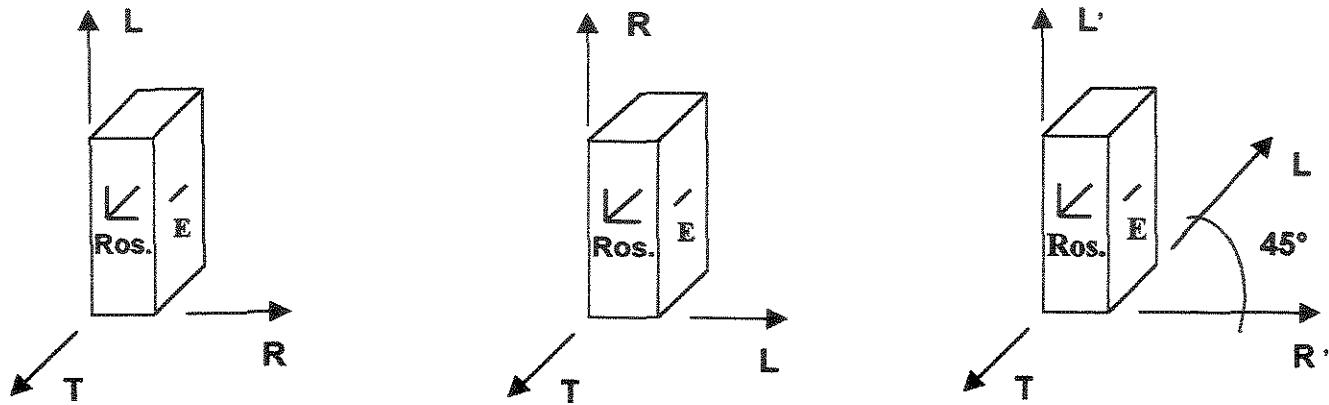
BALLARIN (1999) efetuou a caracterização global dos parâmetros elásticos da madeira de *E. citriodora*, através de ensaios de compressão paralela às fibras. Essa propriedade mecânica da madeira, considerada “pura”, é a que mais tem sido utilizada na caracterização elástica do material.

Para a modelagem matemática da resistência mecânica dos dormentes, BALLARIN considerou o dormente como sendo um elemento estrutural plano, disposto no plano LR. O autor realizou ensaios de compressão paralela às fibras, compressão radial em relação às fibras e compressão inclinada em relação às fibras, num ângulo de 45° em relação ao eixo R, no plano LR.

Nos procedimentos de ensaio como; o tipo de equipamento utilizado, as velocidades de carregamento e os métodos para determinação do módulo de elasticidade, adotou-se as recomendações da NBR 7190 (ABNT,1997). Os ensaios para determinação dos parâmetros elásticos da madeira (módulo de elasticidade longitudinal  $E_L$ , radial  $E_R$ , e coeficientes de Poisson  $\nu_{LR}$  e  $\nu_{RL}$ ), foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, onde o autor utilizou uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 1200 kN.

BALLARIN (1999), demonstrou todo o embasamento teórico da caracterização elástica da madeira de *E. citriodora* e realizou ensaios objetivando a determinação de algumas propriedades de resistência e os principais parâmetros elásticos envolvidos na situação estudada. Nesses ensaios, considerando-se a maior variabilidade dos resultados, já esperada, foram utilizados seis corpos-de-prova para cada situação (compressão longitudinal, radial e inclinada).

Os corpos-de-prova foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência KYOWA KFG 20 -120 - Cl - 11 (unidirecional) e KYOWA KFG 5 -120 - D 17 -11 (em roseta), conforme ilustrado na Figura 4



**Figura 4**-Posições de avaliação da deformação específica da madeira (com extensômetros elétricos) no ensaio de compressão paralela às fibras utilizado na caracterização elástica do material. **E** - extensômetro unidirecional, **Ros.** - extensômetro em roseta.

Fonte: BALLARIN (1999).

Nesses ensaios a medição da carga foi feita com uma célula de carga com capacidade igual a 100 kN. A aquisição dos dados de carregamento e da deformação específica, nas diversas etapas de carregamento previstas, foram feitas através de um sistema de aquisição de dados - System 5000, Model 5100 Scanner da empresa Vishay Measurements Group. Os extensômetros foram ligados no sistema de  $\frac{1}{4}$  de ponte, sem compensação de temperatura.

A caracterização global das propriedades de resistência da madeira foi feita através de ensaios de tração paralelas às fibras, compressão paralela e normal às fibras e cisalhamento paralelo às fibras. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Resistência dos Materiais do Departamento de Engenharia Rural - FCA - UNESP, com o uso de uma máquina universal de ensaio EMIC-DL 10.000, servo-controlada, com acionamento eletro-mecânico e capacidade de carga de 100 kN. Essa máquina é dotada de sistema de aquisição de dados

acoplado diretamente a um computador, sendo os resultados básicos de ensaio processados diretamente através de software específico.

Normalmente para esse caso, a metodologia de ensaio, no tocante ao número de corpos-de-prova, velocidade de carregamento e métodos para a determinação das resistências, atendeu às recomendações da NBR 7190 (ABNT,1997).

### **3.4 Fadiga da madeira**

#### **3.4.1 Conceitos Importantes**

Para uma melhor compreensão do assunto tratado neste estudo é importante o conhecimento de alguns conceitos básicos. Portanto, neste item são apresentadas as definições das propriedades e dos parâmetros abordados nos demais itens do trabalho.

Em partes estruturais de madeira, em aviões durante o mergulho, por alguns segundos, podem ocorrer tensões que iriam levar a uma provável falha no material se continuassem por um tempo mais longo. Durante a flexão por impacto, onde a carga atua somente por alguns milésimos de segundo, ocorrem tensões iguais a cerca de duas vezes as tensões limites de testes estáticos normais de flexão, conforme MARKWARDT (1930).

Desde 1850, é conhecido o fato de que um material submetido a uma tensão repetida ou flutuante romperá a uma tensão muito inferior àquela necessária para ocasionar fratura devido à aplicação de uma carga estática. As falhas mecânicas decorrentes dessas condições de carregamento dinâmico são chamadas falhas por fadiga, em virtude de serem observadas geralmente após um período de serviço considerável, segundo DIETER (1981).

Segundo SOUZA (1982), o limite de resistência determinado pelo ensaio de tração é função da carga máxima atingida durante o teste, após a qual ocorre a ruptura do material. Ficou então estabelecido que o material não se romperá com uma carga menor do que aquela, quando submetido a esforços estáticos. Entretanto, quando são aplicados esforços dinâmicos, repetidos ou flutuantes à um material, este pode romper-se com uma carga bem inferior à carga máxima atingida, seja este de tração ou de compressão. Neste caso, tem-se a chamada ruptura por fadiga do material.

A ASTM E 1150 (1987) definiu fadiga como sendo o processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva, que ocorre em um material sujeito a variação de tensões e deformações no mesmo ponto ou pontos, e que pode culminar em fissuras ou rupturas completas após um número suficiente de variações de tensões.

De acordo com CLORIUS & PEDERSEN (1996), o termo fadiga pode ser definido como sendo a ruptura que ocorre como resultado de ações de carga repetida em nível inferior à resistência estática do material.

De acordo com RODRIGUES JUNIOR (1997), a fadiga de um componente de uma estrutura é o processo progressivo de dano que evolui até a ruptura, produzido por carregamentos repetidos que induzem tensões de intensidades variáveis ao longo do tempo. A tensão máxima apresenta valor menor que a resistência do componente.

### **3.4.2 Ciclos de Tensões**

SOUZA (1982) recomenda para o ensaio de fadiga em laboratório, três dos diversos ciclos de tensões possíveis encontrados na prática, ilustrados nas Figuras 5 a 7.

Esses ciclos são do tipo regular, isto é, repetitivos ou alternativos, e com todas as demais características constantes. Tais ciclos são encontrados na maioria das máquinas de ensaio de fadiga, as quais mantêm uma velocidade constante durante o teste.

Ciclos do tipo irregular ou aleatório (figura 8) são utilizados em estudos específicos, por exemplo, em uma asa de avião, que está sujeita a sobrecargas imprevisíveis devido às correntes de vento.

Um ciclo de tensão é a menor parte da função tensão-tempo que é periódica e identicamente repetida. Os ciclos das Figuras 5 a 7 são completamente reversos e de forma senoidal, sendo que a Figura 5 mostra um ciclo onde as tensões máximas são iguais e de sinais opostos. Uma tensão de tração é considerada positiva e uma tensão de compressão é considerada negativa.

A Figura 6 mostra um ciclo onde todas as tensões são positivas e as tensões máximas e mínimas são desiguais; já, no ciclo da Figura 7, as tensões máxima e mínima são desiguais e de sinais opostos.

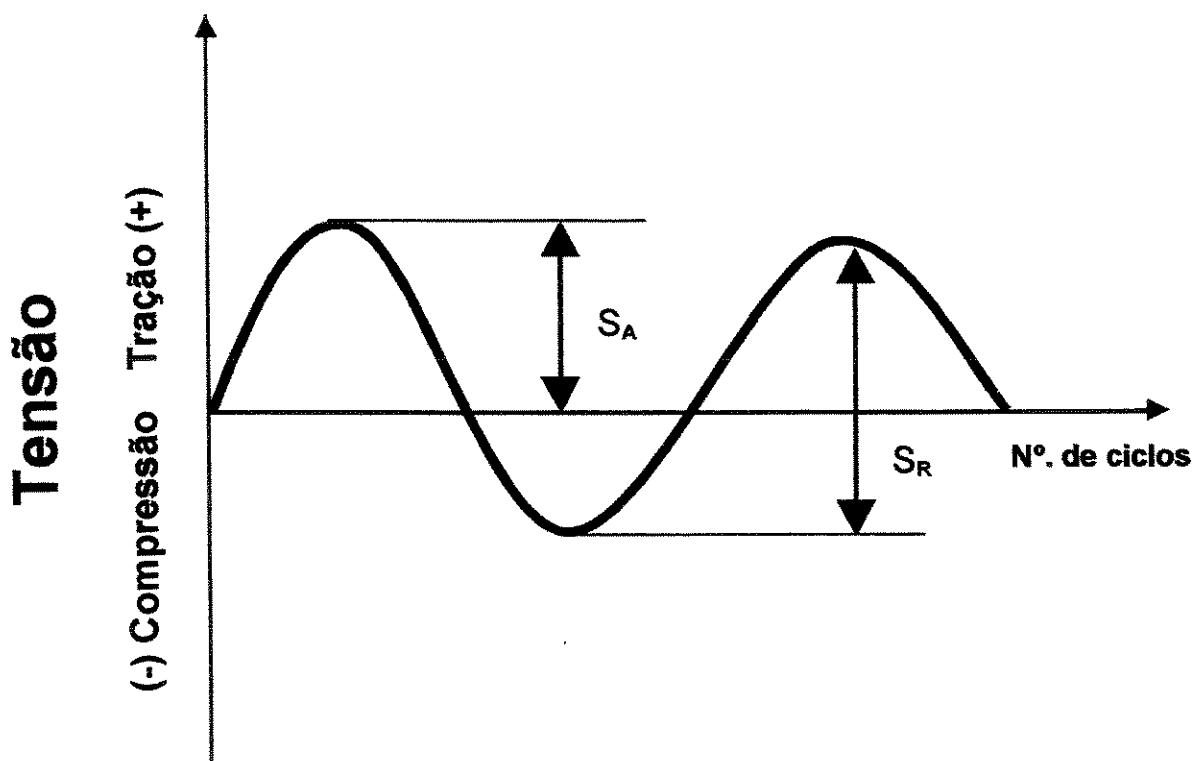


Figura 5 – Ciclos regulares de tensões – tensão reversa.

Fonte: SOUZA (1982).

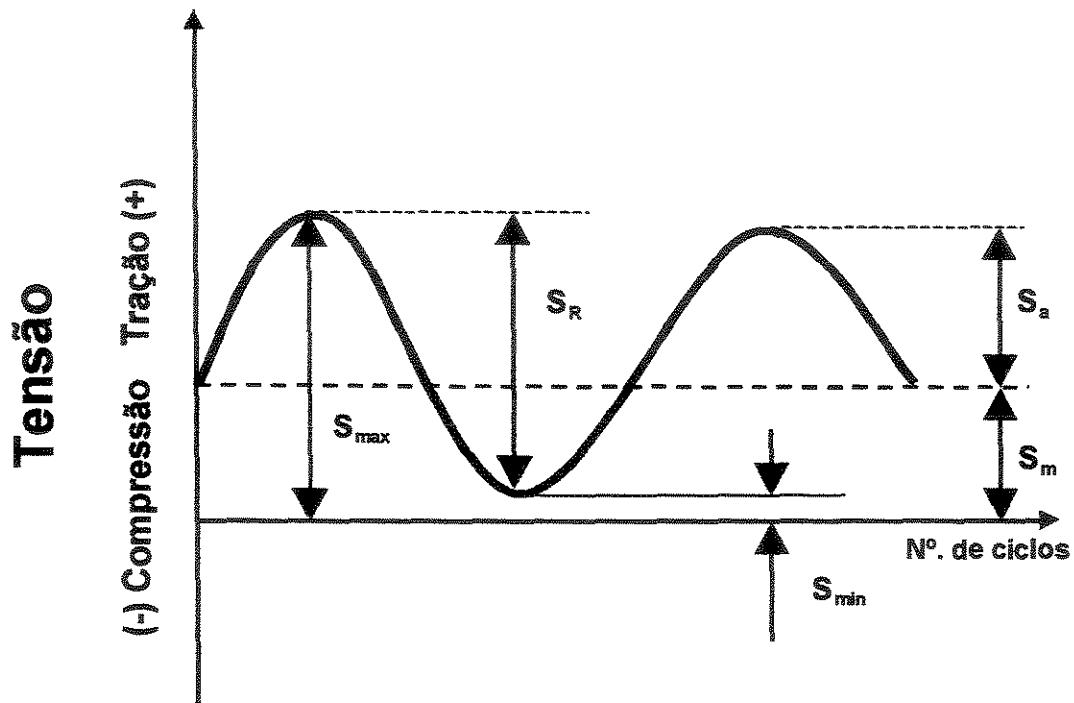


Figura 6 – Ciclos regulares de tensões – tensão repetida (campo da tração).

Fonte: SOUZA (1982).

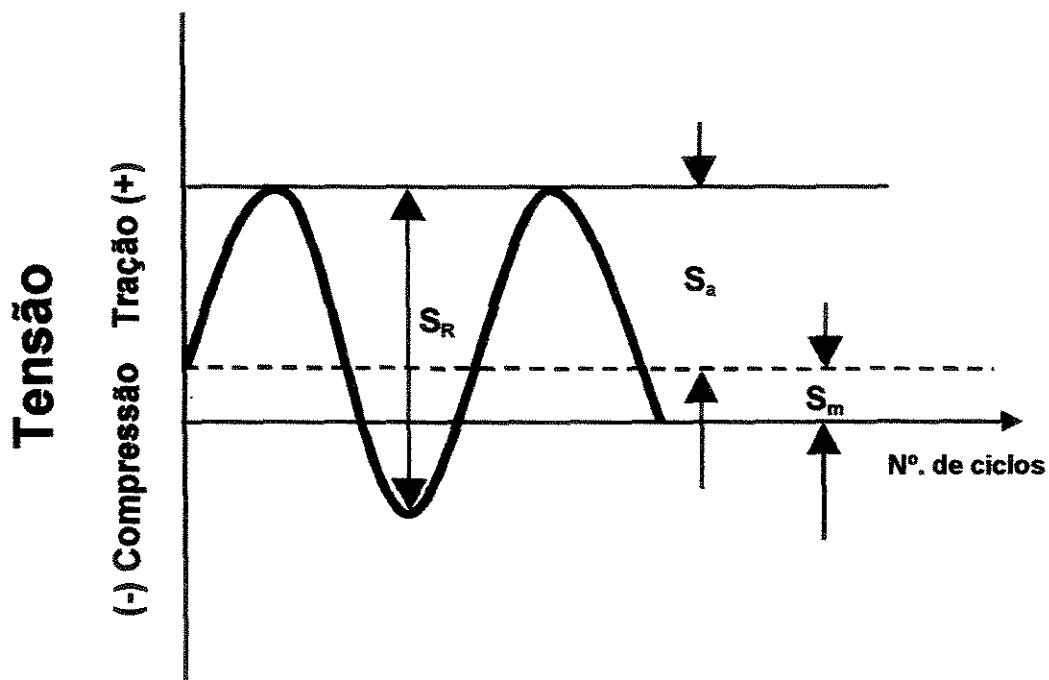


Figura 7 – Ciclos regulares de tensões – tensão repetida (campos da tração e compressão).

Fonte: SOUZA (1982).

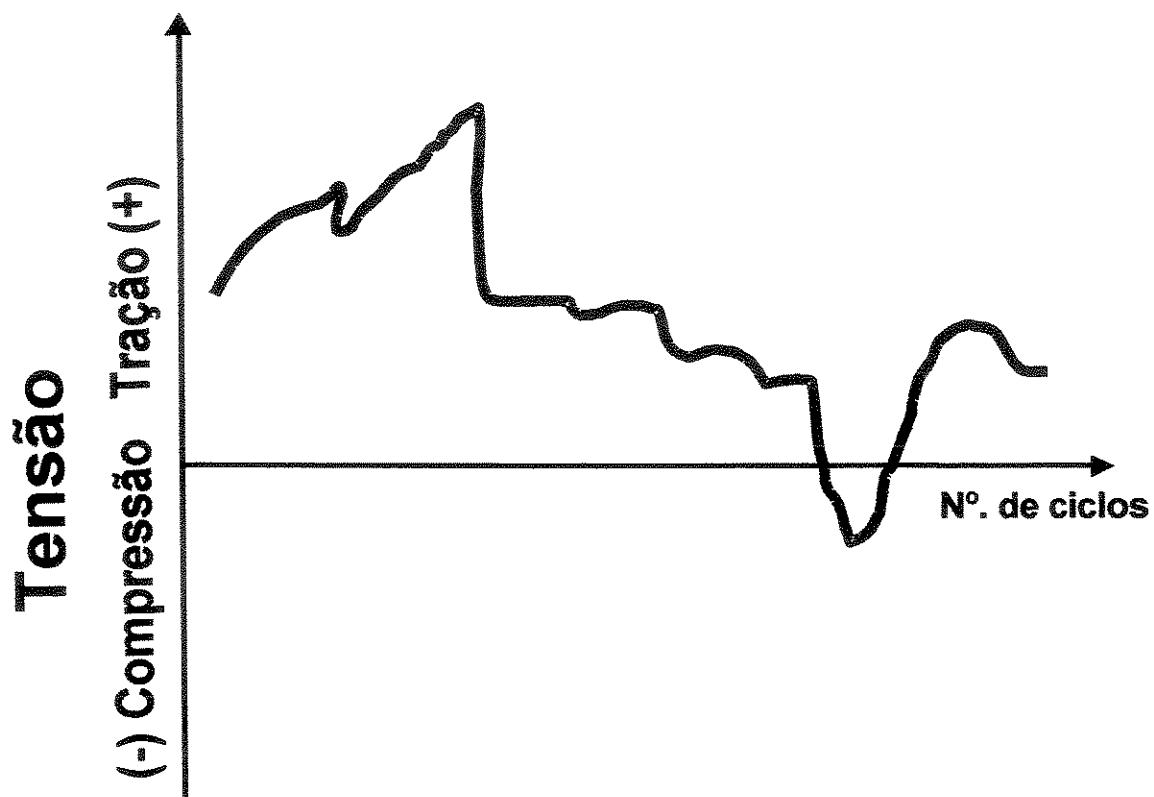


Figura 8 – Ciclos irregulares de tensões - tensão aleatória (campos da tração e compressão).

Fonte: DIETER (1981).

A tensão máxima ( $\sigma_{\max}$ ) é o maior valor algébrico da tensão no ciclo, e a tensão mínima ( $\sigma_{\min}$ ) é o menor valor algébrico. O intervalo de tensão ( $\sigma_r$ ) é a diferença entre ( $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ ), conforme descrito na equação (1); a amplitude de tensão variável ( $\sigma_a$ ) é a metade de ( $\sigma_r$ ), conforme descrito na equação (2); a tensão média, ( $\sigma_m$ ) é a média algébrica entre ( $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ ), conforme descrito na equação (3).

Segundo ASTM E 1150 (1987), a relação R (razão de carga) em carregamento de fadiga é denominada como relação algébrica dos dois parâmetros de carregamento de um ciclo, conforme descrito na equação (4).

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (4)$$

### 3.4.3 Curvas S-N e $\varepsilon$ -N

O método mais tradicional e usado na determinação das características de fadiga de um determinado material é representado na forma de curvas S-N,  $\varepsilon$ -N, ou diagramas de Wöhler (Figura 9), sendo o parâmetro S [símbolo de stress (tensão)], o nível de tensão,  $\varepsilon$  o nível de deformação e N o nº de ciclos.

O diagrama S-N, ou  $\varepsilon$ -N, é determinado com a carga ou deformação variando harmonicamente dentro de um dado intervalo, de carga ou deslocamento, para uma freqüência constante. Há três modos de construir o diagrama da curva S-N, variando as escalas dos eixos cartesianos, a saber, S x N, S x logN e logS x logN.

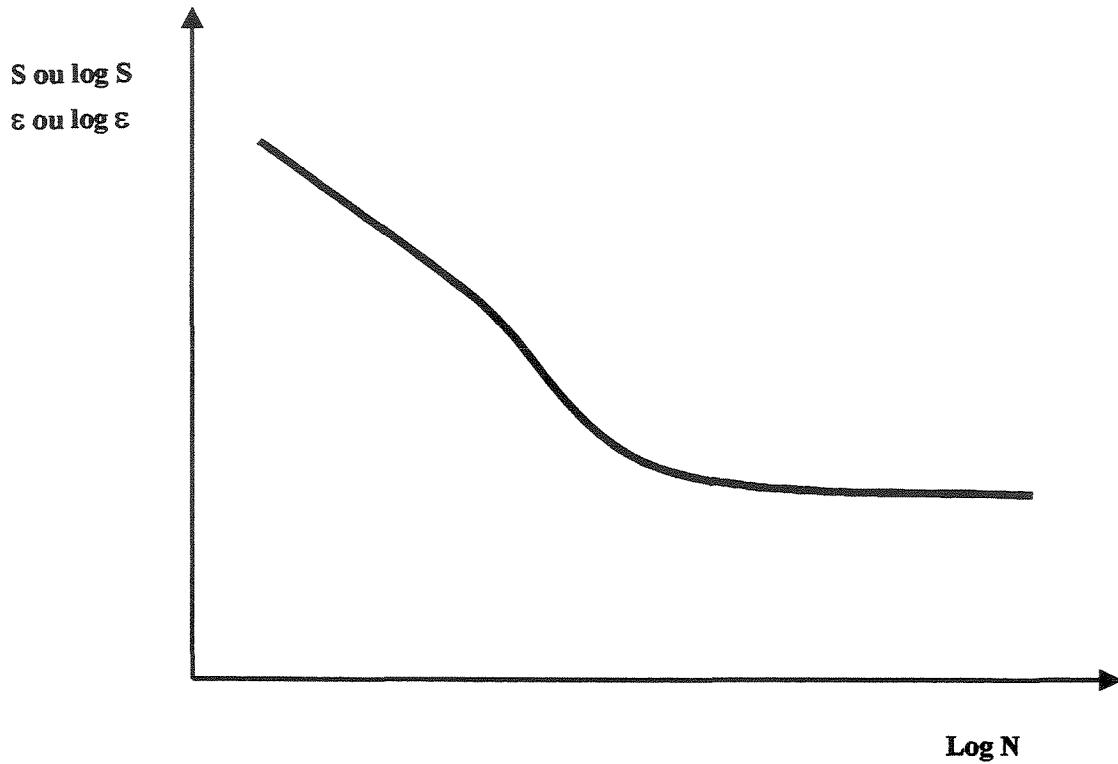
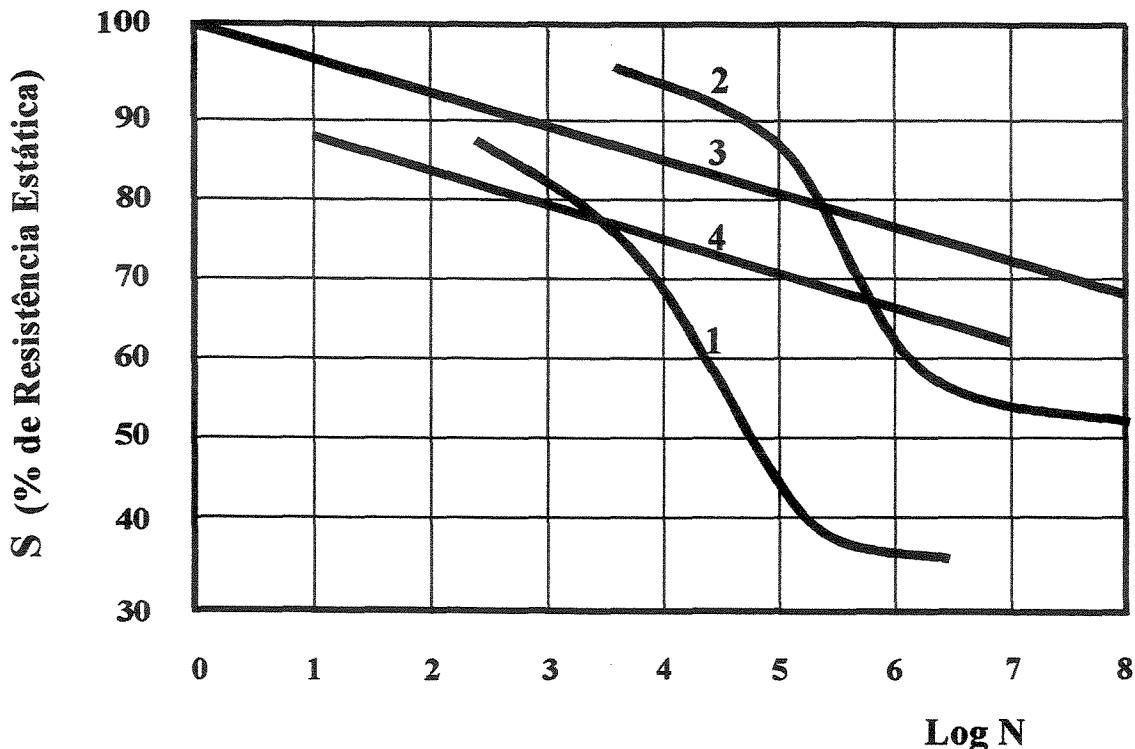


Figura 9 - Ilustração de uma curva S-N ou  $\epsilon$ -N

Fonte: MACÊDO (2000).

As curvas S-N ou  $\epsilon$ -N podem ser obtidas para vários materiais com diferentes níveis de tensão e número de ciclos (Figura 10). Normalmente N é plotado na abscissa em escala logarítmica, e S e  $\epsilon$  como ordenadas. O nível de tensão S é, na maioria das vezes, normalizado como um percentual da resistência estática do material.



**1- aço doce, 2- liga de alumínio, 3- concreto e 4- madeira.**

Figura 10 - Diagrama de Wöhler ou S-N para diferentes materiais.

Fonte: HANSEN (1991).

DIETER (1981) comentou que o procedimento usual para a determinação de uma curva S-N consiste em testar o primeiro corpo-de-prova a uma tensão alta, com a qual se espera que ocorra fratura num número de ciclos bastante pequeno, por exemplo, cerca de dois terços do limite de resistência estático do material. A tensão do ensaio é diminuída gradativamente para cada corpo-de-prova que se sucede, até que uma ou duas amostras não se rompam no número de ciclos especificados, geralmente  $10^7$  ciclos. A maior tensão para a qual não se verificou a fratura é considerada como sendo o limite de fadiga. Para os materiais que não apresentam limite de resistência à fadiga, o ensaio é interrompido, normalmente, para considerações práticas, em uma baixa tensão onde a vida em fadiga seja cerca de  $10^8$  ou  $5 \times 10^8$  ciclos. A curva S-N é determinada geralmente com a utilização de 8 a 12 corpos-de-prova.

Normalmente se observa uma dispersão razoável nos resultados experimentais, embora seja possível, sem muita dificuldade, realizar o traçado de uma curva suave abrangendo os pontos obtidos.

Exceto nos casos onde a resistência à fadiga deva ser determinada através de ensaios específicos, os carregamentos deverão ser semelhantes à situação real para a qual o elemento será submetido. O comportamento à fadiga dos materiais estruturais é geralmente estudado por meio de ensaios simplificados. Nestes ensaios, os materiais seriam submetidos à variações de cargas de amplitude constante até serem atingidas deformações excessivas, limites de número de ciclos nos ensaios "run outs" ou ruptura.

#### 3.4.4 Influência da freqüência

HANSEN (1991) comentou que ensaios com freqüência da ordem de 30 Hz, em madeira, devem ser evitados porque ocorre uma elevação na temperatura da mesma e um aquecimento adiabático, conduzindo a um decréscimo do teor de umidade e maiores resistências à fadiga podem ser alcançadas.

O aquecimento adiabático em amostras de madeira é um consenso durante o ensaio de fadiga, porque o carregamento cíclico da madeira resulta em histerese, a qual eleva a geração de calor. Segundo BOND & ANSEL (1998), também ocorrerá aquecimento friccional em localizações tais como ligações de superfície. Esses dois efeitos conjugados com o baixo coeficiente de dispersão térmica da madeira conduz a um considerável acréscimo de calor, principalmente quando as freqüências de ensaio são aumentadas.

A norma AREMA (1996) recomenda, para teste de carga cíclica no apoio do trilho, em dormentes monobloco de concreto, a freqüência de 10 Hz. Para testes em dormentes monobloco de concreto, envolvendo fixação (placa de apoio, grampos, isoladores e palmilha elastomérica), a norma recomenda a freqüência de 5 Hz.

#### 3.4.5 Fluênciа

DIETER (1981) comentou que a deformação progressiva de um material sob tensão constante é chamada de fluênciа. Para se determinar a curva de fluênciа de um material, aplica-se a um corpo-de-prova uma carga constante, mantendo-se a temperatura constante, e

determina-se sua deformação em função do tempo. Embora a medida de resistência à fluência seja, em princípio, bastante simples, na prática ela exige um aparato de laboratório considerável.<sup>10</sup> O tempo de duração desses ensaios pode se estender a vários meses, podendo, inclusive, alguns ensaios alcançarem mais de 10 anos.

De acordo com SOUZA (1982), fluência é a deformação plástica que ocorre em um material sob tensão constante ou praticamente constante em função do tempo. Particularmente com relação aos materiais metálicos, a temperatura exerce uma enorme influência no fenômeno. Assim, os resultados de um ensaio de tração em um metal ou liga metálica de aplicação em Engenharia, realizado na temperatura ambiente, são praticamente invariáveis; no entanto, esse efeito só aparece após 50 °C para diversos materiais.

KOLLMANN & CÔTÉ JR (1968) relataram, nos capítulos que tratam de resistência à tração e ao esmagamento, que o limite de carga ou tensão possui um efeito marcante no comportamento mecânico de madeiras. Vigas submetidas a cargas permanentes exercido ao longo de um período de anos, por exemplo em coberturas de armazéns e depósitos, podem falhar com tensões da ordem de 50 a 75% do módulo de ruptura estático.

ROTH (1935) determinou o carregamento devido ao peso próprio, para madeira "Douglas Fir" como sendo, 65 a 70% da carga de ruptura estática de curta duração.

GRAF (1938) chegou a resultados próximos ao autor precedente, para vigas estruturais contendo entalhes próximo ao ponto de falha, evidenciado na Figura 11.

<sup>10</sup> W.V. Green. Creep and Stress Rupture Testing. em R.F. Bunshaw (ed.). Techniques of Metals Research. Vol. V.pt. 1, cap. 6. Interscience Publishers. Inc. . New York, 1971.

Carga em % da carga de falha determinada  
em um ensaio de flexão estática normalizado

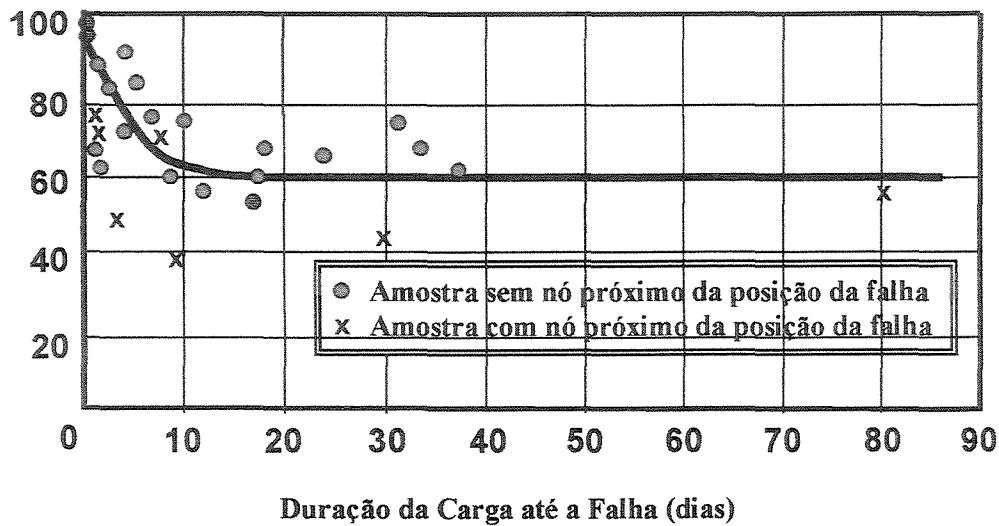


Figura 11 - Efeito da duração da carga, até a falha, na resistência à flexão em vigas de madeira.

Fonte: GRAF (1938).

A madeira é conhecida por apresentar um comportamento de fluênci visco-elástica (comportamento do material é dependente do tempo), portanto, em um instante qualquer sob carga, seu desempenho será uma função do seu passado histórico. Este comportamento de fluênci visco- elástica pode ser representada pela lei de Clouser, conforme ilustrado na Figura 12, juntamente com a curva de fluênci típica.

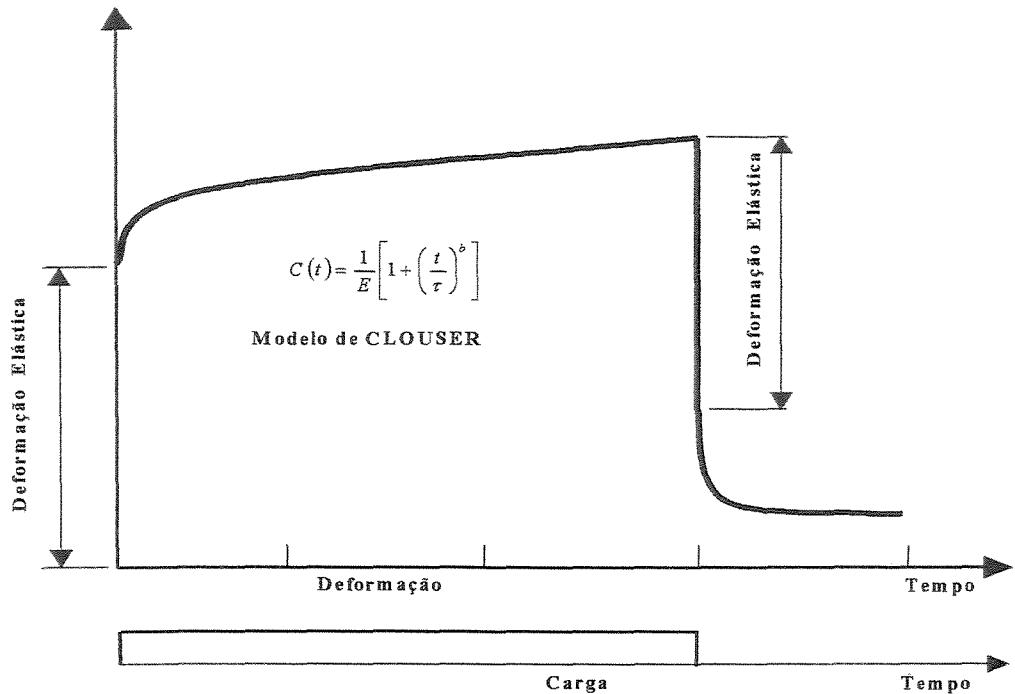


Figura 12 – Curva típica de fluência com a recuperação após o descarregamento.

Fonte: MADSEN (1992).

Na Figura 12,  $t$  é o tempo e  $\tau$  é chamado tempo de duplicação, ou tempo para o qual a deformação dobra em relação à deformação inicial.

O nível de fluência depende do teor de umidade (maior fluência para madeira úmida) e da temperatura (maiores temperaturas implicam em maior nível de fluência). Os parâmetros usados na lei de Clouser devem ser selecionados de maneira a refletir o meio ambiente no qual o elemento estrutural será utilizado.

Um tratamento mais completo e comprehensivo estabelecido para madeira como um material visco-elástico, incluindo tanto a ruptura por ações de cargas permanentes quanto por carregamento de fadiga, foi apresentado por NIELSEN (1984). No modelo de NIELSEN, o

comportamento mecânico da madeira só pode ser descrito, com suficiência de detalhes, quando as teorias de visco-elasticidade e mecânica da fratura são reunidas.

### 3.5. Análise da situação estática e de carregamento para os dormentes de madeira

Vários são os tratamentos dados à situação estática e do carregamento da via férrea, na busca da determinação precisa das tensões e deformações existentes na superestrutura da via permanente. No caso em questão, o tratamento usualmente empregado – sendo embasado por opiniões de cientistas e instituições, como por exemplo TIMOSHENKO (1966), PORTO (1982 e 1984), AREMA (1996) e GUIMARÃES et al. (1996), entre outros – é o de viga sobre apoio elástico contínuo.

No equacionamento de viga sobre apoio elástico contínuo, TIMOSHENKO (1966) e PORTO (1982) assumem que o meio elástico exerce em cada seção da viga uma reação de apoio diretamente proporcional ao deslocamento vertical “y” sofrido pela seção. A reação vertical do meio elástico é expressa por “ $\mu y$ ”, onde “ $\mu$ ” é a resistência específica do meio. Os principais dados da situação podem ser observados na Figura 13 .

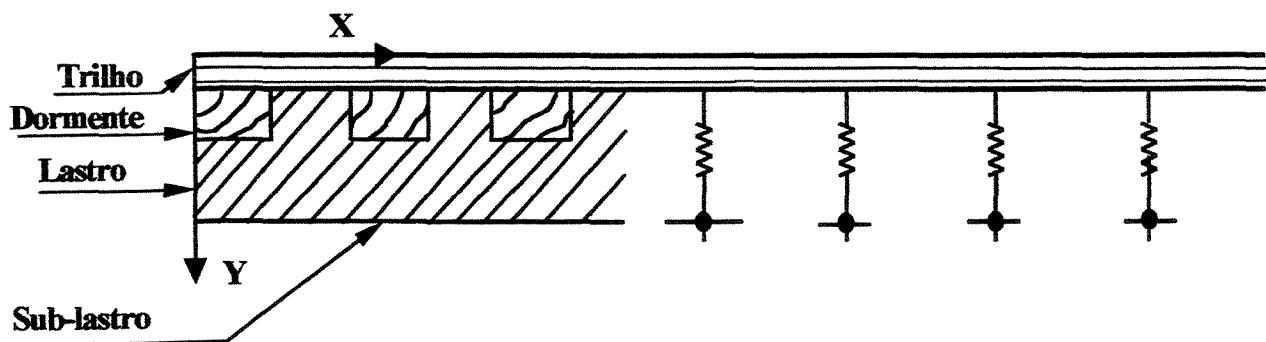


Figura 13 - Situação estática da via férrea, assumindo-se o modelo da viga contínua sobre apoio elástico, com resistência específica “ $\mu$ “.

Fonte: BALLARIN (1999).

Segundo PORTO (1984), muitos pesquisadores têm se dedicado à modelagem matemática do fenômeno, com uso do método dos elementos finitos, embora o problema seja passível de solução algébrica.

NICKEL & SECOR (1972), DAVIS et al. (1972) e THOMAS & ABBAS (1975) têm trabalhado na sofisticação da modelagem do fenômeno. Em trabalho mais recentemente, GUIMARÃES et al. (1996) apresentaram uma proposta de modelagem da via férrea para solicitações dinâmicas.

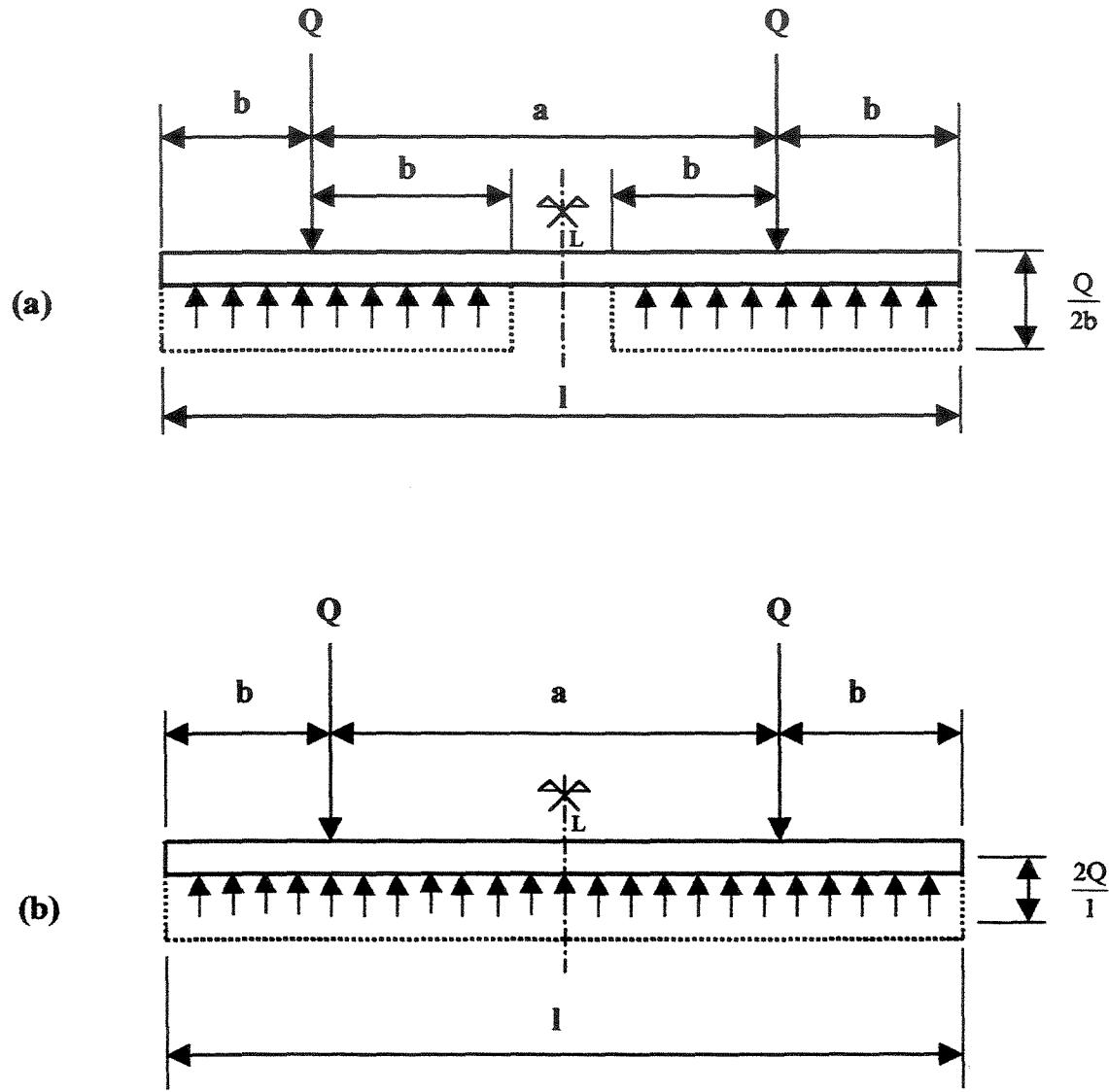
Nos estudos desenvolvidos pelos autores retocitados, a via permanente foi modelada tendo como base a ligação entre seus elementos (trilho, fixações, dormentes, lastro). Assim, o dormente, na maioria das vezes, foi representado simplificadamente por uma massa aglomerada, conectada ao trilho e ao lastro.

De acordo com BALLARIN (1999), na análise do fluxo de tensões através dos dormentes, não há necessidade de se proceder a discretização completa do leito ferroviário. Pode-se assumir a via férrea (trilho+fixações) apoiada sobre os dormentes e estes, convenientemente discretizados com elementos finitos e caracterizados mecanicamente, através de suas constantes elásticas, apoiadas sobre um substrato inferior (lastro e sub-lastro), que pode novamente ser assumido como sendo um meio elástico com sua resistência específica. A avaliação experimental da resistência específica do meio é feita com a medição dos recalques na via, provocados por carregamentos conhecidos.

A resistência específica do meio “ $\mu$ ”, pode ser avaliado teoricamente utilizando-se de algumas variáveis ferroviárias, como o coeficiente de lastro (C), ou módulo de via (U). Essas variáveis estão descritas em quase todas as publicações da área ferroviária (RAYMOND, 1978; PORTO, 1982; BRINA, 1988; QUEIROZ, 1990; BALLARIN, 1995; PORTO, 1997).

BALLARIN (1995) realizou um estudo teórico, através de modelagem matemática plana, pelo método dos elementos finitos, para avaliar as distribuições de tensões ao longo do comprimento de dormentes de madeira. Os dormentes foram considerados como sendo elementos ortotrópicos, apoiados em base elástica (lastro de brita), caracterizada por um coeficiente de mola “k”, obtido a partir do módulo de via. Da análise das situações envolvidas, dentre os diversos valores analisados, BALLARIN (1995) acabou por contabilizar a resistência específica do meio com o valor final  $k=17.500 \text{ kgf/cm}$ .

No tocante à distribuição de pressão sob o dormente, RAYMOND (1978), em trabalho experimental, submeteu a um carregamento dinâmico de (1.000.000 ciclos) dormentes de “madeira dura” igualmente distribuído nos dois trilhos com carga de 27,5 tf. Aumentando-se em seguida esta carga para 42 tf, e aplicando-se mais 150.000 ciclos. Inicialmente, a pressão medida pelas as células de pressão localizadas sob a linha de ação dos trilhos eram significativamente maiores do que aquelas observadas nas células de pressão localizadas sob a parte mediana do dormente. Observou-se no entanto que após 90.000 ciclos, a distribuição de pressão sob o dormente passou a ser praticamente uniforme, sendo verificada a máxima pressão na região entre o assento do trilho e o meio do dormente. Com base nessa situação, pode-se admitir que a distribuição de pressões sob o dormente, depende das condições de socaria da linha, sendo possível, ocorrer as duas situações distintas ilustradas na Figura 14.



**Figura 14 - Distribuições ideais de pressão sob o dormente, a - logo após a socaria, b - decorrido longo tempo após a socaria.**

Fonte: BALLARIN (1999).

No estudo teórico de BALLARIN (1995) foram avaliados os efeitos das duas distribuições de pressão do lastro sobre os esforços solicitantes nos dormentes ilustrados na (Figura 14).

BRINA (1988) devido a complexidade da questão, dividiu-os em carregamentos verticais longitudinais e transversais.

Já a NBR 7189 (ABNT, 1983), utiliza para o dimensionamento dos dormentes, simplificando as complexas condições de carregamento, as seguintes classes de carregamento :

**TB 360** - para ferrovias sujeitas a transporte de minério de ferro e outros carregamentos equivalentes;

**TB 270** - para ferrovias sujeitas a transporte de carga em geral;

**TB 240** - para ser adotado somente na verificação da estabilidade e projeto de reforço de obras existentes;

**TB 170** - para vias sujeitas exclusivamente ao transporte de passageiros em regiões metropolitanas ou suburbanas.

A nomenclatura **TB 270**, representa a carga nominal por eixo, em 270 kN.

Dentre as Diversas são as metodologias utilizadas para transformar a carga teórica nominal por eixo para a carga que efetivamente atua sobre o dormente. As duas metodologias mais utilizadas são; a proposta pela AREMA - American Railway Engineering and Maintenance of Way Association e a metodologia de Eisenmann, para estimar a dinâmica da via.

A AREMA (1996) propôs a seguinte formulação, para dormentes de concreto:

$$F = f_v \cdot f_t (1 + f_i) \cdot f_d \cdot Q \quad (5)$$

onde:

**F** - carga transmitida ao dormente;

**f<sub>v</sub>** - fator de velocidade;

**f<sub>t</sub>** - fator de tonelagem (varia em função da tonelagem transportada por ano pela via);

**f<sub>i</sub>** - fator de impacto;

**f<sub>d</sub>** - fator de distribuição (considera o efeito enrijecedor do trilho, mobilizando o comportamento conjunto dos dormentes adjacentes);

**Q** - carga teórica nominal por roda (igual à metade de carga teórica nominal por eixo).

A AREMA (1996) apresentou tabelas das quais se extraem os valores de cada um dos fatores intervenientes na equação.

A utilização dessa metodologia é praticada por diversas ferrovias nacionais ferroviárias, que é prática e direta. Para o caso específico de dormentes de madeira, sugerem o impacto ( $f_i$ ) com variação entre 0,30 a 0,46.

Eisenmann desenvolveu método empírico de cálculo da força transmitida ao dormente ( $F$ ), que leva em conta o estado da via e o aspecto dinâmico do fenômeno.

De acordo com esse método, a carga média ( $F_{med}$ ) é independente da velocidade da composição e pode ser muito bem estimada pelo procedimento de Zimmermann (eq. 7 e 8). Porém, a variação aleatória da força é dependente da velocidade da composição e do estado da via, seguindo uma distribuição normal.

O equacionamento pode ser dado por:

$$F = F_{med} (1 + t.s) \quad (6)$$

sendo:

**F**- carga máxima transmitida ao dormente (é dependente da velocidade da composição e do estado da via);

**F<sub>med</sub>** - carga média transmitida ao dormente (é independente da velocidade da composição);  
**s**- desvio padrão, dependente da velocidade da composição, e dado por:

**s** = 0,1φ - para via muito boa

**s** = 0,2φ - para via boa

**s** = 0,3φ - para via ruim, onde:

**φ<sub>E</sub>** - fator para influência da velocidade, e dado por:

$$\varphi_E = 1 \quad \text{para } v < 60 \text{ km/h}$$

$$\varphi_E = 1 + (v - 60)/140 \quad \text{para } 60 \text{ km/h} \leq v \leq 200 \text{ km/h}$$

**t** - multiplicador, definido em função do quartil estabelecido na distribuição normal, de acordo com a Tabela 5.

**Tabela 5** - Valores do multiplicador “t” da distribuição, em função do quartil.

<b>P %</b>	0	68,3	95,5	99,7
<b>t</b>	0	1,00	2,00	3,00

O valor  $F_{med}$  é dado por:

$$F_{med} = \frac{Qa}{2} \sqrt{\frac{bC}{4EJ}} \quad \text{onde:} \quad (7)$$

$F_{med}$  - carga média transmitida ao dormente;

$Q$  - carga por roda (metade da carga teórica nominal por eixo);

$a$  - espaçamento entre dormentes;

$b$  - largura equivalente do dormente;

$C$  - coeficiente de lastro;

$E$  - módulo de elasticidade do trilho;

$J$  - momento de inércia do trilho.

Expressando a largura equivalente ( $b$ ) em termos de área útil do dormente ( $A = 2.b.a$ ), pode-se reescrever a equação (7) como:

$$F_{med} = Qa \sqrt{\frac{AC}{128aEJ}} \quad (8)$$

Para as duas metodologias utilizadas tanto da AREMA (1996) quanto a de Eisenmann, tem os valores finais das cargas médias transmitidas aos dormentes variando de 40% a 50% da carga teórica nominal por roda ( $F = 0,40$  a  $0,50$   $Q$ ).

QUEIROZ (1990) apresentou, em experimento com dormentes submetidos a carregamento dinâmico de 1.000.000 de ciclos, baseando-se em antiga metodologia da AREMA, um coeficiente de distribuição da carga igual a 0,50 e um coeficiente de impacto igual a 1,30, resultando num fator final igual a 0,65.

BRINA (1988) citou, para efeito dinâmico do carregamento, valores do coeficiente de majoração das cargas estáticas de 20% a 85% .

PORTE (1982) sugeriu que a carga dinâmica para dormente de concreto, fosse obtida através da carga nominal, multiplicando-a por um fator “ $\phi_p$ “ dependente exclusivamente da velocidade, tal que:

$$Q_d = Q_n \cdot \phi_p$$

Sendo:

$Q_d$  - carga dinâmica por roda;

$Q_n$  - carga nominal por roda;

$\phi_p$  - coeficiente de majoração, dado por:

$$\phi_p = 1,5 \text{ para } v \leq 140 \text{ km/h};$$

$$\phi_p = 1,75 \text{ para } v = 200 \text{ km/h}.$$

PORTE (1982) comentou que o esforço aplicado no trilho pode chegar a três vezes a carga nominal por roda, para rodas apresentando defeitos, mesmo nos casos de tráfego em baixa velocidade. Este esforço pode atingir sete vezes a carga nominal por roda, relatado em estudo realizado pela British Railway para o caso de uma junta de trilhos desnivelada, à uma velocidade de 200 km/h

Os trilhos são assentados diretamente sobre os dormentes ,quando não se utiliza placas de apoio, Neste caso, a solicitação aos dormentes é definida pela área de apoio do perfil do trilho. Quando se utiliza placa de apoio, a distribuição do carregamento sobre o dormente é assumida como sendo um dispositivo metálico rígido para carregamentos perpendiculares ao seu plano, sendo que a área da placa a responsável pela distribuição do carregamento no dormente.

PORTE (1982) comentou que o dimensionamento da via em tangente satisfaz automaticamente às solicitações da via em curva segundo procedimento de projeto utilizado pelos Estados Unidos , no entanto, para a análise das condições de sobrelevação da via em curva, o autor comentou que devido as solicitações laterais impostas ao boleto do trilho, a adoção desta hipótese simplificadora depende do ângulo de ataque da roda na curva.

### **3.6. Dormentes de madeira - modelagem teórica do comportamento estrutural .**

As relações tensão- deformação e a caracterização elástica dos materiais são tratadas em diversas referências bibliográficas. LEKHNITSKII(1981), citado por BALLARIN (1999), assim como outros autores, desenvolveu o equacionamento dessas relações partindo de uma situação genérica (material sem qualquer simetria elástica) e particularizando-a, em função das hipóteses simplificadoras de simetria que os materiais apresentam.

FUSCO (1989), citado por BALLARIN (1999), dentre outros, sugeriu a validade de utilização do modelo ortotrópico (hipótese simplificadora de três planos principais de simetria elástica) à madeira. MASCIA (1991), em trabalho teórico-experimental, comprovou a adequação desse modelo ao material. BODIG & JAYNE (1993), citados por BALLARIN (1999), frisaram que, para o caso da madeira, a despeito de sua estrutura anatômica mais complexa, pode-se, simplificadamente, assumir ortotropia retilínea.

Para o caso dos dormentes utilizou-se a referência adotada por BALLARIN (1999), tomando-se como base a coincidência entre os eixos geométricos e eixos principais de elasticidade (Figura 15), e assumindo-se análise plana, particularizada para os eixos L (longitudinal) e R (radial) da madeira, a lei constitutiva do material expressa em termos de 4 constantes elásticas ( $E_L$ ,  $E_R$ ,  $V_{LR}$ ,  $G_{LR}$ ). A mesma análise, conduzida para o caso tridimensional, leva à determinação de, pelo menos, 9 constantes elásticas ( $E_L$ ,  $E_R$  e  $E_T$ ,  $v_{LT}$ ,  $v_{TR}$ , e  $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$  e  $G_{TR}$ ).

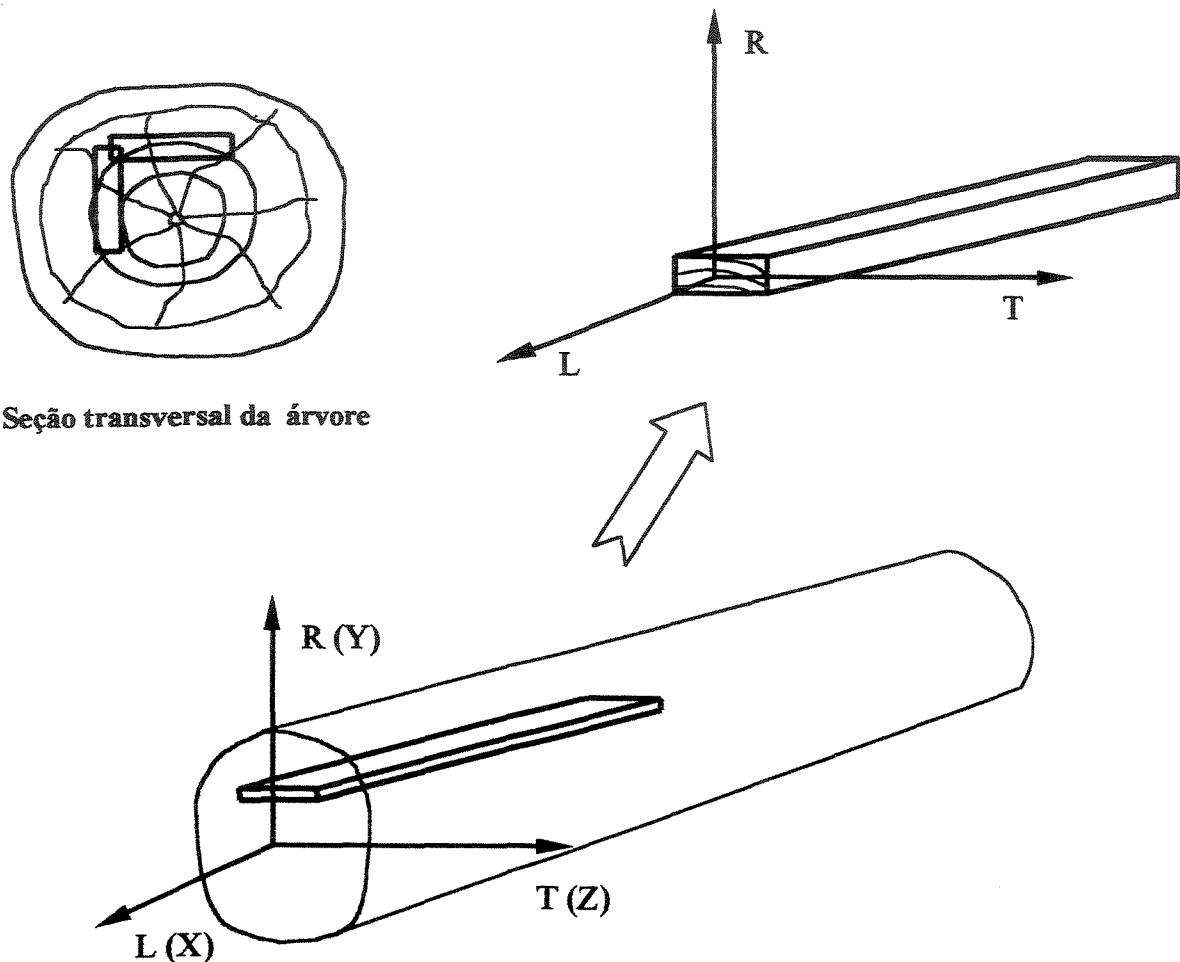


Figura 15 - Anotação dos eixos geométricos dos dormentes (X, Y e Z) e dos eixos principais de elasticidade da madeira(L, R e T).

Fonte: BALLARIN (1999).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Materiais**

#### **4.1.1 Dormentes**

Os dormentes de madeira de Eucalipto citriodora foram cedidos pelo Horto Florestal “Navarro Andrade”, da antiga FEPASA, situado no município de Rio Claro - SP. Foi derrubada uma única árvore, de um plantio de 1935, da coleção em linha do arboreto. A árvore apresentou altura comercial de 28 m, com diâmetro da base (“pé”) de 0,90 m e diâmetro de topo de 0,47 m. Dessa árvore foram extraídos os dormentes, num total de vinte e sete exemplares, com as seguintes dimensões: comprimento de 2,00 m, 22 cm de largura e 16 cm de altura, que são as dimensões adotadas para via permanente com bitola métrica.

#### **4.1.2 Placas de apoio**

As placas de apoio utilizadas em parte dos ensaios foram do tipo Pandrol PA-68, de aço fundido modular, com as seguintes dimensões; 41cm de comprimento, 18 cm de largura e 1,8 cm de espessura.

#### **4.1.3 Tirefons**

Foram utilizados tirefons - parafusos de fixação do trilho ou da placa no dormente, com as seguintes dimensões: diâmetro de 2,1 cm e comprimento de 15 cm.

#### **4.1.4 Trilhos**

Foram fixados aos dormentes ensaiados, trilhos do tipo TR-68, com comprimento de 50 cm.

#### **4.1.5 Caixa de brita**

Os dormentes foram ensaiados dentro de uma “caixa de brita”, confeccionada em aço, com as seguintes dimensões nominais: 4,00 m de comprimento, 0,60 m de largura e 0,70 m de profundidade. A caixa foi preenchida com brita n.º 3, e revestida em seu fundo com uma manta elastomérica de 1,5 cm de espessura, objetivando uma reprodução real do comportamento do lastro e sub-lastro da via permanente (Figura 16).

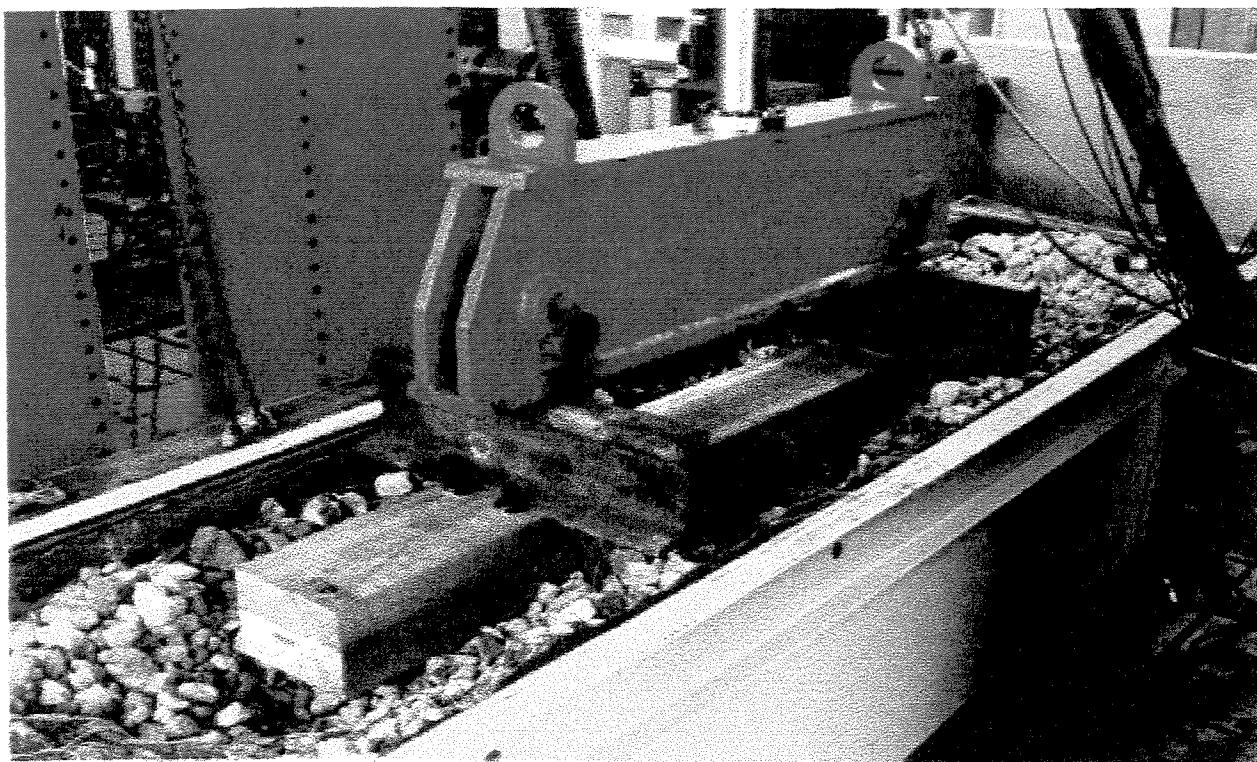


Figura 16 - Vista parcial da caixa de brita onde foram realizados os ensaios.

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Ensaios dos dormentes

Todos os ensaios dos dormentes foram realizados no Centro de Tecnologia da UNICAMP, no Departamento de Engenharia de Sistemas e Ferroviária, utilizando-se de um sistema de atuadores servohidráulicos de cargas programadas, conforme ilustra a Figura 17.

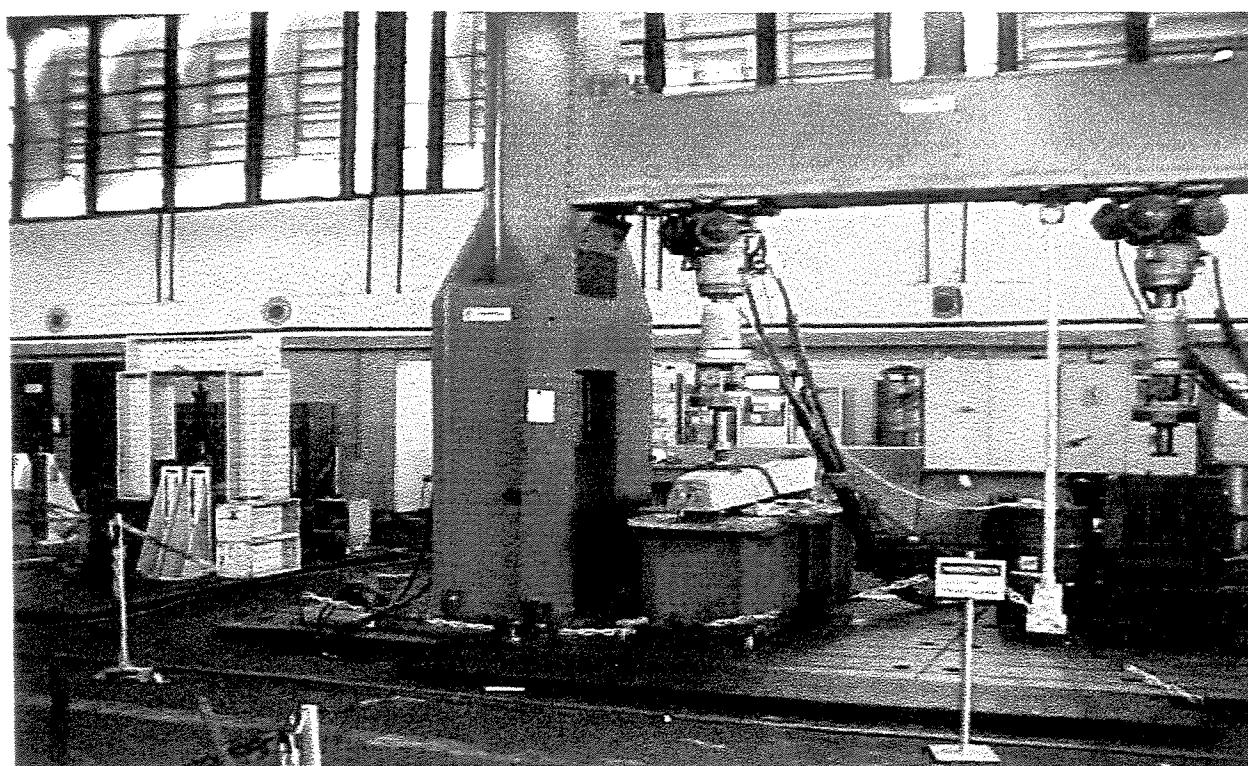


Figura 17 - Vista geral do pórtico e dos atuadores servohidráulicos.

Os dormentes foram posicionados na caixa de brita, de acordo com esquema estático de viga sobre apoio elástico, conforme ilustrado na Figura 18. O apoio elástico, já comentado, constituiu-se de um lastro de brita confinado em uma caixa metálica - caixa de brita (Figura 16).

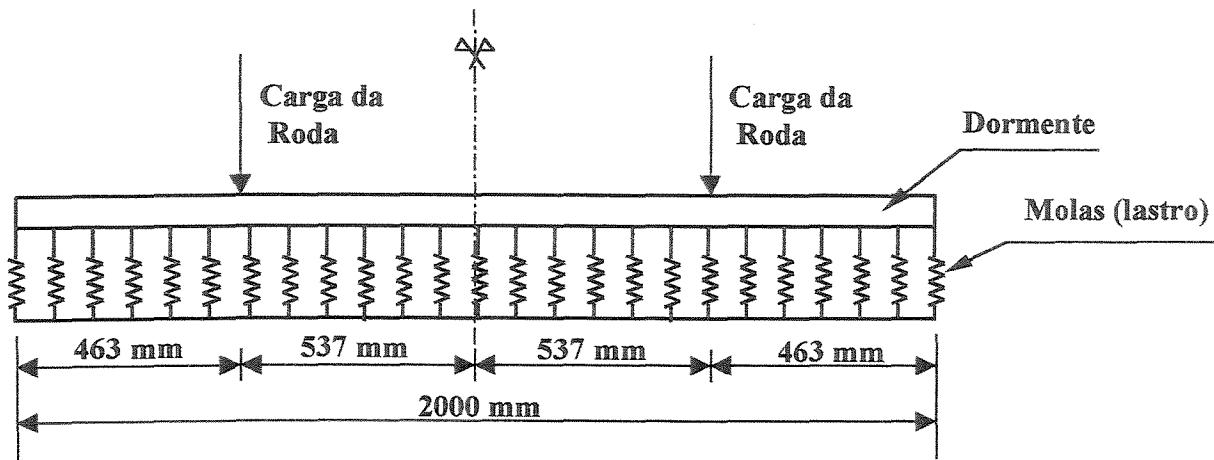


Figura 18 - Esquema de carregamento dos dormentes prismáticos.

Com base nos resultados obtidos por BALLARIN (1995) para o assentamento do trilho no dormente foram consideradas duas situações: assentamento do trilho diretamente sobre o dormente – sem a utilização de placas de apoio, e assentamento do trilho com a utilização de placas do tipo PANDROL. Os dormentes foram ensaiados conforme a situação (b) ilustrada na Figura 14, ou seja, apoiado integralmente sobre o lastro. Foram realizados ensaios dinâmicos em três exemplares de dormentes, sendo dois exemplares com placa de apoio e um exemplar sem placa de apoio.

Não foi possível realizar ensaios dinâmicos com mais exemplares de dormentes porque o laboratório onde foram realizados estes ensaios (Departamento de Engenharia de Sistemas e Ferroviária do Centro de Tecnologia da UNICAMP), presta serviço às empresas do ramo e já havia agendado vários outros serviços, não havendo tempo disponível para o encaixe dos ensaios nos intervalos entre os serviços, e também pelo custo de cada ensaio dinâmico ser demasiadamente caro.

As séries de ensaio receberam as seguintes denominações:

PTD - Dormente com placa Pandrol e apoio total no lastro - (dois exemplares);

STD - Dormente sem placa e apoio total no lastro - (um exemplar).

a) Ensaio estático nas etapas do carregamento dinâmico dos dormentes

A carga máxima transmitida ao dormente ( $F$ ), foi calculada tomando-se como base o método clássico de Eisenmann, eq. (8), página 32. A carga teórica nominal utilizada foi aquela prevista na NBR 7189 ABNT (1983), trem-tipo TB 270 (carga por roda de 135 kN), carga esta utilizada para ferrovias sujeita a transportes em geral, a qual atende perfeitamente as condições de tráfego das ferrovias paulistas. Para esses cálculos foi assumido uma afastamento entre dormentes de 62,5 cm (situação equivalente ao emprego de 1600 dormentes por quilometro de via).

Adotando-se, pois:

$$Q = 13,5 \text{ tf} \text{ (carga por roda);}$$

$$a = 62,5 \text{ cm;}$$

$$A = 22 \times 100 = 2.200 \text{ cm}^2;$$

$$E = 2.100.000 \text{ kgf/cm}^2;$$

$$C = 10 \text{ kgf/cm}^3;$$

$$J = 3.950 \text{ cm}^4;$$

tem-se, pela eq. (8):

$$F_{med} = 13.500 \times 62,5 \sqrt{\frac{2.200 \times 10}{128 \times 62,5 \times 2.100.000 \times 3.950}}$$

$$F_{med} = 3.600 \text{ kgf}$$

Tomando-se, ainda:

$$s = 0,2 \varphi \quad (\text{via boa});$$

$$\varphi = 1,14 \quad (v = 80 \text{ km/h});$$

$$t = 3,0 \quad (\text{quartil de } 99,7\%);$$

tem-se:

$$F = (1 + 3 \times 0,23) F_{med} = 1,69 F_{med}$$

Portanto, a carga máxima transmitida por roda ao dormente é:

$$F = 1,69 \times 3.600 = 6.084 \text{ kgf}$$

Essa carga foi aumentada em 40%, para se levar em conta a superposição de outras rodas do “truck” ferroviário, conforme procedido em trabalhos dessa natureza. Assim:

$$F_{ensaio} = 1,4 \times F = 1,4 \times 6.084 \approx 8.500 \text{ kgf} = 85 \text{ kN}$$

Como a carga aplicada ao dormente foi obtida por intermédio de um único atuador servohidráulico (Figura 16), adotou-se ( $2 \times F_{ensaio}$ ), como sendo o valor de referência das etapas de ensaio. Com o intuito de compatibilizar os valores de carga adotados no presente trabalho, com aqueles praticados por QUEIROZ (1990) e BALLARIN (1999), estendeu-se o ensaio estático, nas etapas do carregamento dinâmico dos dormentes, até um carregamento máximo de 200 kN, ou seja, 100 kN por trilho.

A instrumentação adotada para os dormentes foi a mesma, tanto para os ensaios estáticos, como para os ensaios dinâmicos. Essa instrumentação foi planejada em função dos resultados preliminares obtidos no estudo técnico de BALLARIN (1995). Dessa maneira, a localização dos pontos onde foram colados os extensômetros elétricos utilizados para avaliação de deformações específicas ocorridas nos dormentes ensaiados, está ilustrada nas Figuras 19a e 20.

Os extensômetros elétricos de resistência unidirecional (E) - KYOWA KFG 20-120-CI-11 ( pontos E1 a E6 ), estão localizados na face direita do dormente em relação à chapa de identificação. Os extensômetros em roseta (R) - KYOWA KFG 5-120- D17-11), ponto R1 está localizado na face direita, em relação à chapa de identificação, e ponto R2 está localizado na face esquerda, em relação à chapa de identificação.

Com o intuito de detectar possíveis deslocamentos e eventuais torções dos dormentes ao longo dos ensaios, foram posicionados relógios comparadores nos eixos, indicados na figura 19 (b), com sensibilidade de 0,01mm e faixa de medição de 30 mm.

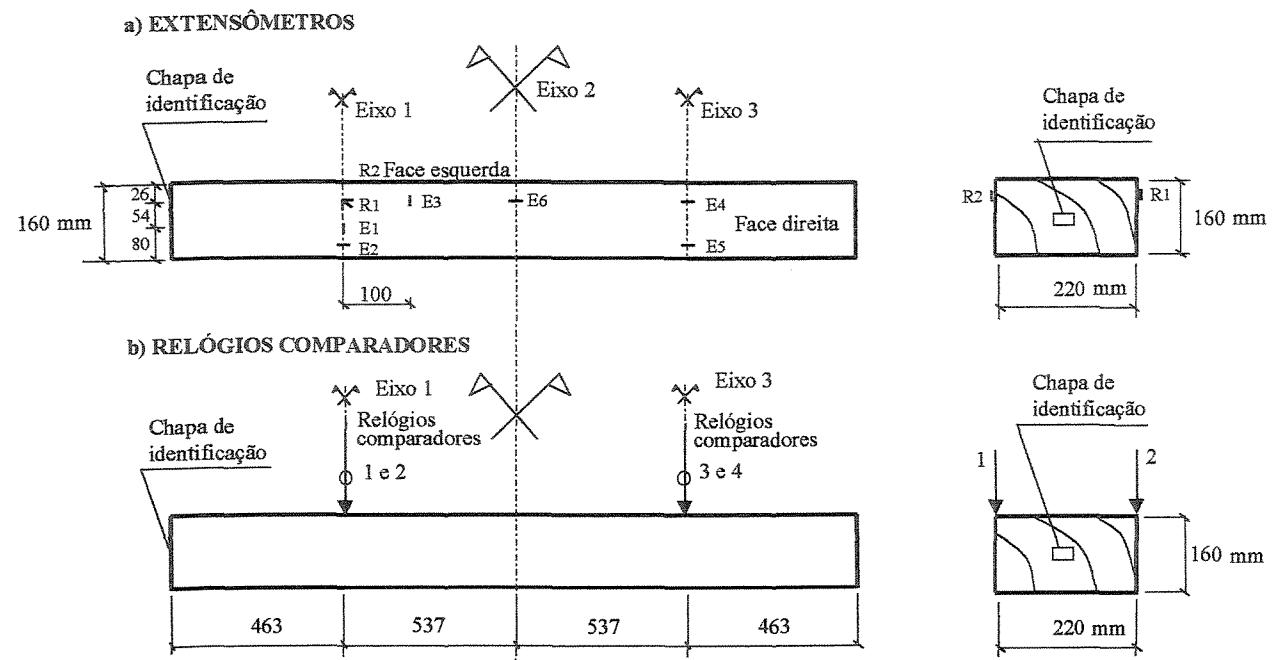


Figura 19 - Detalhe do posicionamento dos extensômetros elétricos e dos relógios comparadores nos ensaios dinâmicos dos dormentes.

Fonte: BALLARIN (1999).

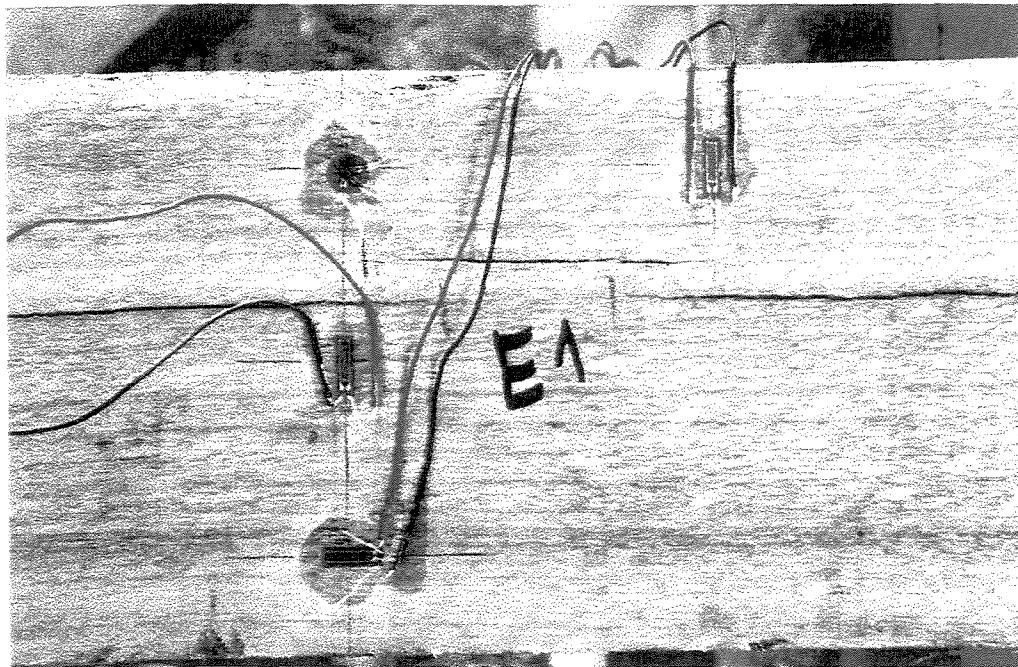


Figura 20 - Detalhe da instrumentação dos dormentes com extensômetros elétricos.

Pela dificuldade encontrada em posicionar os relógios comparadores exatamente na face superior dos dormentes, estes foram posicionados sobre o trilho (Figura 21).

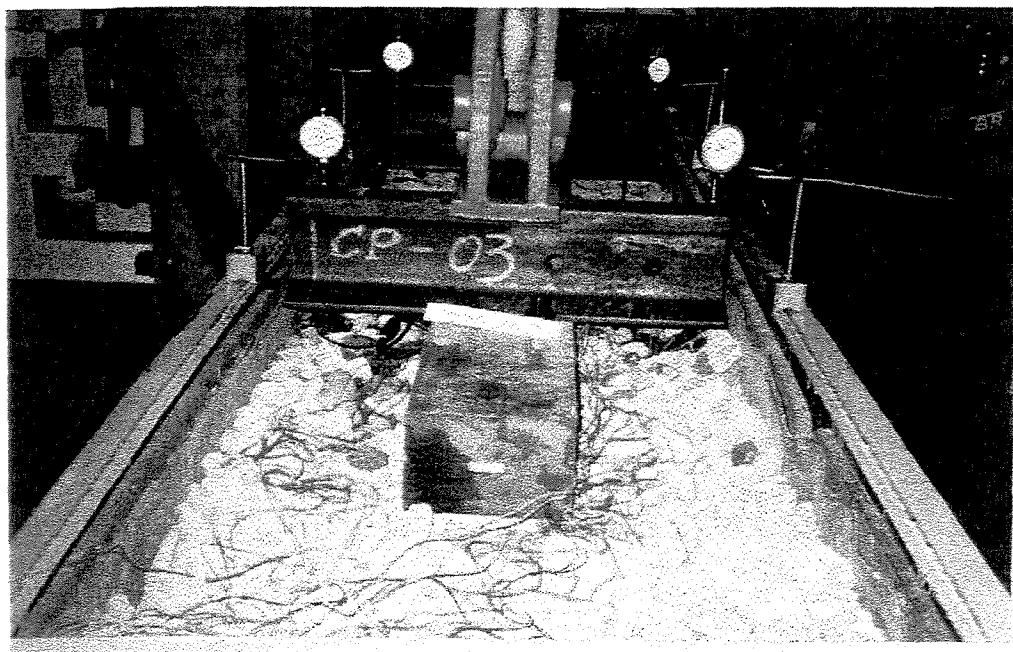


Figura 21 - Posição geral dos relógios comparadores para avaliação dos deslocamentos dos dormentes. Em primeiro plano mostram-se os relógios comparadores 1 (esquerda) e 2 (direita), mais ao fundo, mostram-se os relógios comparadores 3 (esquerda) e 4 (direita).

A aquisição dos dados dos doze canais de extensometria e do canal de carga foi feita por intermédio de um sistema de aquisição de dados ADS 2000 da Lynux Tecnologia Eletrônica Ltda. Figuras (22 a e 22 b).

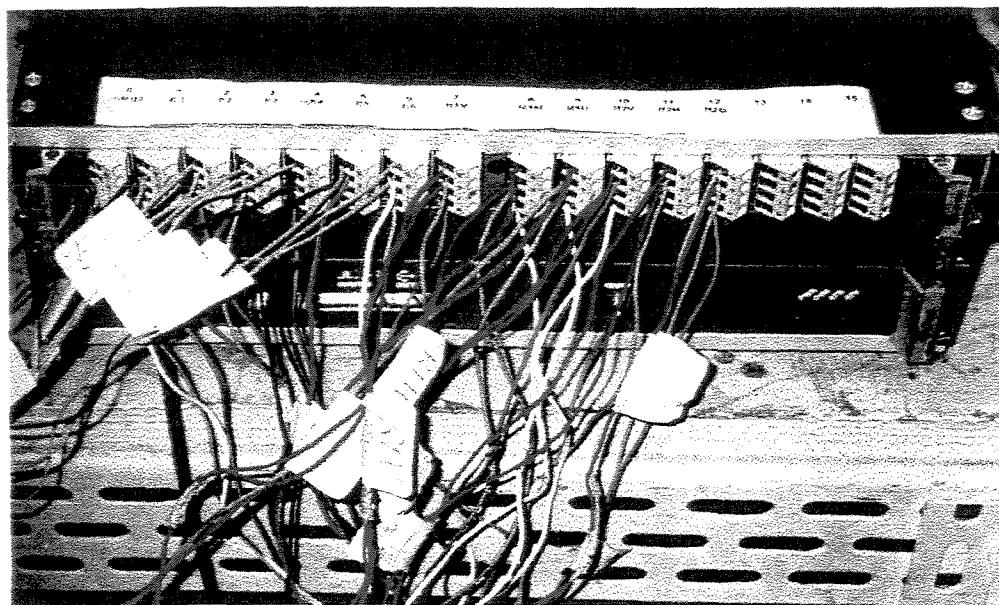


Figura 22 a - Vista da parte posterior do sistema de aquisição de dados ADS 2000, onde se observa a ligação dos treze canais de extensometria, sendo doze canais de deformação específica e um canal de carga- canal 00.

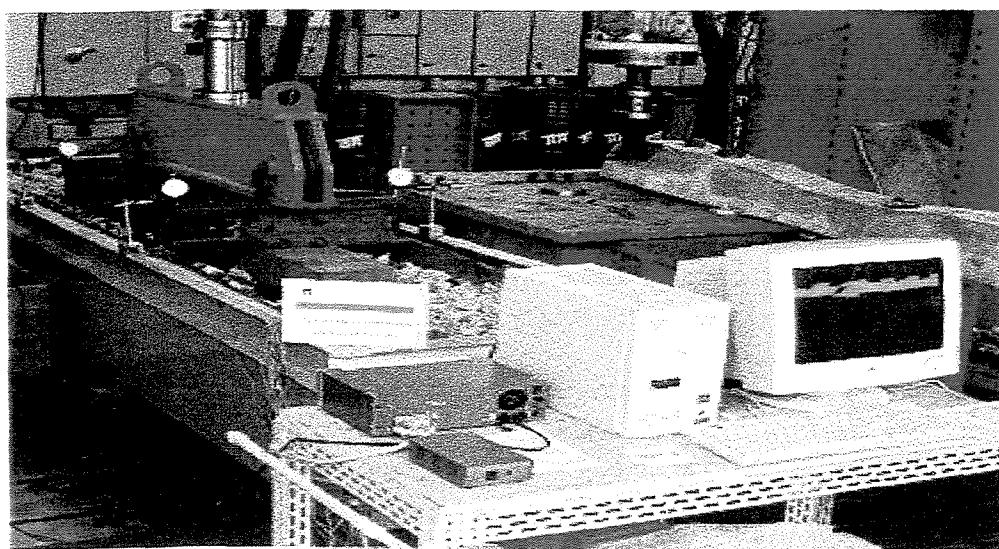


Figura 22b- Vista do sistema de aquisição de dados ADS 2000.

Para cada etapa de carregamento característica do ensaio (planilha da Figura 23) procedeu-se uma varredura dos treze canais, com duração de 1 s, a 5 Hz de freqüência, apresentando como resultado cinco valores de leitura por canal, tendo como valor final obtido a média desses cinco valores. Os dados dos deslocamentos, em cada etapa, registrados pelos relógios comparadores, foram anotados nas planilhas utilizadas para aquisição de dados (Figura 23).

<b>MEMÓRIA DE ENSAIO DE DORMENTE</b>												
Local: CT - UNICAMP/DESF												
<b>DADOS DE ENSAIO</b>												
Dormente: PDT- 01												
<b>INÍCIO</b>	Data:	Horário:	Afastamento inicial (relógio Comparador)									
<b>TÉRMINO</b>	Data:	Horário:	D1:	cm	D3:	cm	D2:	cm	D4:	cm		
Afastamento final (relógio Comparador)												
D1: _____ cm      D3: _____ cm												
D2: _____ cm      D4: _____ cm												
<b>Deflexão(x 10<sup>-2</sup> mm)</b>												
Etapa	Tot. Ciclos	Freq.	Fase	Horário/Dia		Carga (kN)	Arq. Leit.	D1	D2	D3	D4	Obs
0	1.080.000		Estática	8:30/1	0	PDT- 01 00						
					40	PDT- 01 01						
					80	PDT- 01 02						
					120	PDT- 01 03						
					170	PDT- 01 04						
					200	PDT- 01 05						
1	1.200.000	4,44	Dinâmica	Início	9:00/1							
				Intermed.			PDT- 01 06					
				Término	16:30/1							
2			Estática	16:31/1	0	PDT- 01 07						
					40	PDT- 01 08						
					80	PDT- 01 09						
					120	PDT- 01 10						
					170	PDT- 01 11						
					200	PDT- 01 12						
3	1.440.000	4,30	Dinâmica	Início	17:00/1							
				Intermed.			PDT- 01 13					
				Término	8:30/2							
4			Estática	8:31/2	0	PDT- 01 14						
					40	PDT- 01 15						
					80	PDT- 01 16						
					120	PDT- 01 17						
					170	PDT- 01 18						
					200	PDT- 01 19						
<b>E assim sucessivamente até 3.000.000 ciclos</b>												

Figura 23 - Planilha utilizada para o registro de dados nos ensaios dinâmicos dos dormentes (exemplo do PTD-01).

b) Ensaio dinâmico

Acompanhando tendências apresentadas na revisão bibliográfica e, conforme recomendações da norma AREMA (1996), os ensaios foram planejados para atingir 3.000.000 de ciclos, em sua etapa final, iniciando em 1080.000 ciclos (de 0 a 1080.000 ciclos, ensaio já executado por BALLARIN em 1999). Além disso, obedecendo aos padrões de ensaios dinâmicos rotineiramente executados no Centro de Tecnologia da UNICAMP, para ferrovias em geral, estipulou-se a freqüência de aplicação dos carregamentos em torno de 5 Hz.

Conforme já apresentado na página 42 desse trabalho, a carga máxima teórica de ensaio resultou em 170 kN, valor adotado, no presente trabalho, como máximo para o ensaio dinâmico.

Idealmente, a carga mínima de ensaio deve ser o valor mais próximo possível de ser atingido sem comprometer a estabilidade do arranjo estrutural adotado. Contudo, em ensaios dinâmicos, a carga mínima de ensaio normalmente resulta da combinação de variáveis inicialmente adotadas (no caso em questão, a freqüência de ensaio, a rigidez do sistema de ensaio - dormente + lastro e a carga máxima). Com os atuadores servohidráulicos do Centro de Tecnologia da UNICAMP- e os dados inicialmente fixados, foi possível obter cargas mínimas de ensaio da ordem de 40 kN (20 kN por trilho). O diagrama de carregamento dinâmico ao longo do tempo é apresentado na Figura 24.

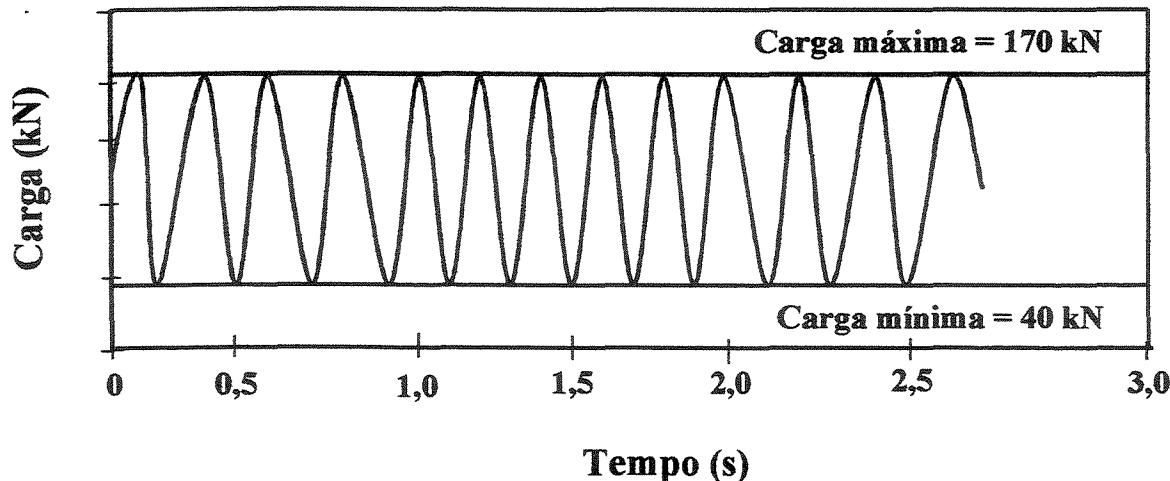


Figura 24- Ensaio Dinâmico – Variação do carregamento (amplitude e freqüência).

Em função do horário de trabalho dos funcionários do Centro de Tecnologia da UNICAMP, optou-se por realizar o ensaio dinâmico ao longo de 107 horas, com uma pequena alteração da freqüência de ensaio nos períodos noturnos. Foram cumpridos 120.000 ciclos no período diurno (cerca de 7,5 horas de duração) e 240.000 ciclos no período noturno (cerca de 15,5 horas de duração). Em cada etapa característica, tendo início em 1.080.000 ciclos (1.200.000 ciclos, 1.440.000 ciclos, 1.560.000 ciclos, 1.800.000 ciclos, 1.920.000 ciclos, 2.160.000 ciclos, 2.280.000 ciclos, 2.520.000 ciclos, 2.640.000 ciclos, 2.880.000 ciclos, 3.000.000 ciclos) o ensaio dinâmico era interrompido, realizando-se, em seguida, conforme esquema representado na figura 24, o ensaio estático. Após a realização do ensaio estático, retomava-se rapidamente o ensaio dinâmico e assim sucessivamente. A Figura 25 ilustra a rotina do ensaio dinâmico.

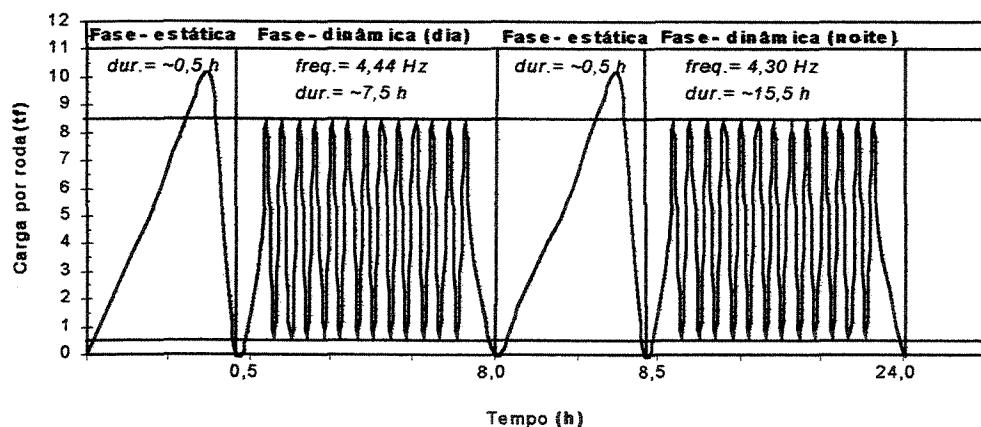


Figura 25 - Rotina de carregamento de ensaio dinâmico.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Ensaios dinâmicos

Conforme comentado anteriormente, foram realizados ensaios dinâmicos nos exemplares de dormentes das séries PTD-01 (dormente com placa Pandrol e apoio total no lastro), PTD-02 e STD-02 (dormente sem placa e apoio total no lastro), a partir de 1.080.000 ciclos, até atingir 3.000.000 ciclos, com um exemplar por série.

#### a) Deslocamentos

Os deslocamentos atingidos pelos dormentes dessas séries são apresentados em tabelas e figuras.

- série PTD: Tabelas 6 e 7 e Figuras 26 a 29.
- série STD: Tabela 8 e Figuras 30 e 31.

Tabela- 6 - Deslocamentos máximos dos dormentes nos ensaios dinâmicos - exemplar PTD – 01

Ciclos	Carga teórica (kN)	Carga efetiva (kN)	Deslocamentos máximos ( x 10 <sup>-2</sup> mm )				
			1	2	3	4	Valor Médio
1.080.000	0	0,0	0	0	0	0	0
	40	37,9	73	119	104	96	98
	80	78,3	193	323	213	189	229
	120	117,4	283	413	277	246	305
	170	166,4	373	503	395	349	405
	200	196,3	413	543	458	416	457
3.000.000	0	0,0	0	0	0	0	0
	20	39,4	47	38	53	78	54
	40	79,5	112	85	79	91	92
	80	119,3	143	97	89	100	107
	170	167,4	155	109	117	118	125
	200	197,3	183	136	155	139	153

Tabela-7 - Deslocamentos máximos dos dormentes nos ensaios dinâmicos - exemplar PTD - 02

Ciclos	Carga teórica (kN)	Carga efetiva (kN)	Deslocamentos máximos ( x 10 <sup>-2</sup> mm )				
			1	2	3	4	Valor Médio
1.080.000	0	0,0	0	0	0	0	0
	40	38,9	164	93	104	82	111
	80	77,4	336	293	148	155	233
	120	117,8	436	386	302	269	348
	170	165,3	529	471	386	347	433
	200	194,3	576	514	428	386	476
3.000.000	0	0,0	0	0	0	0	0
	20	39,4	59	68	48	39	54
	40	79,5	105	85	66	70	82
	80	119,3	129	97	71	93	96
	170	167,4	142	109	95	99	111
	200	197,3	153	136	107	125	130

Tabela-8 - Deslocamentos máximos dos dormentes nos ensaios dinâmicos - exemplar STD - 02

Ciclos	Carga teórica (kN)	Carga efetiva (kN)	Deslocamentos máximos ( x 10 <sup>-2</sup> mm )				
			1	2	3	4	Valor Médio
<sup>11</sup> 0	0	0,0	0	0	0	0	0
	40	37,7	127	85	90	77	95
	80	78,3	141	152	167	165	156
	120	131,0	174	193	229	209	201
	170	166	230	255	353	343	295
	200	194,3	274	345	412	423	364
1.920.000	0	0,0	0	0	0	0	0
	20	38,6	43	59	39	44	46
	40	69,3	86	112	77	84	90
	80	118,7	136	128	167	145	144
	170	168,5	159	163	193	183	175
	200	194,5	266	207	223	231	232

<sup>11</sup> Os valores dos deslocamentos em 1.080.000 ciclos não foram lidos, sendo assim, assumiu-se uma nova referência para os deslocamentos iniciais dos relógios comparadores.

Para o carregamento máximo aplicado, os dormentes apresentaram deslocamentos verticais variando de 2 a 4 mm. Os deslocamentos verticais, medidos por BALLARIN (1999), apresentaram valores variando de 6 a 10 mm.

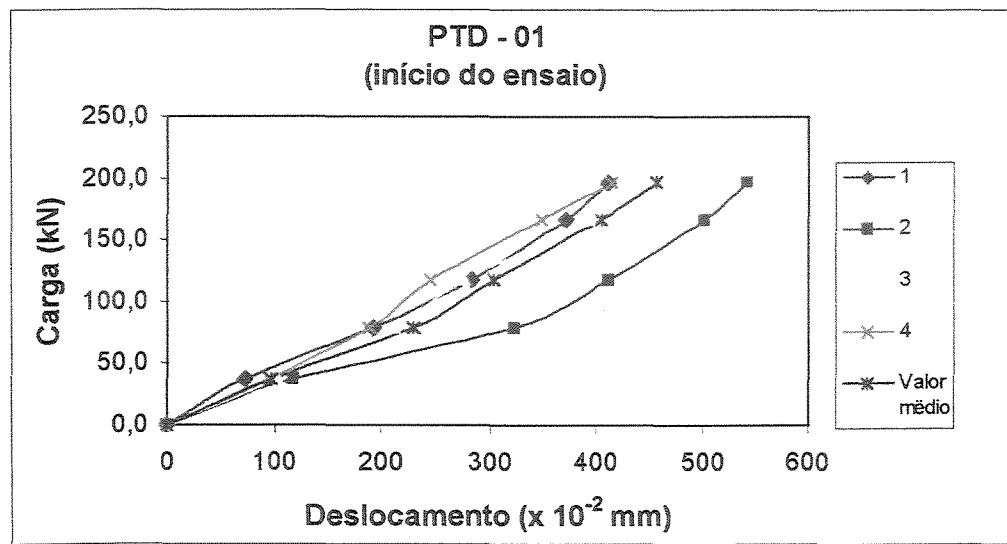


Figura 26 - Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa inicial do ensaio, após 1080.000 ciclos, antes da aplicação de carregamento dinâmico.

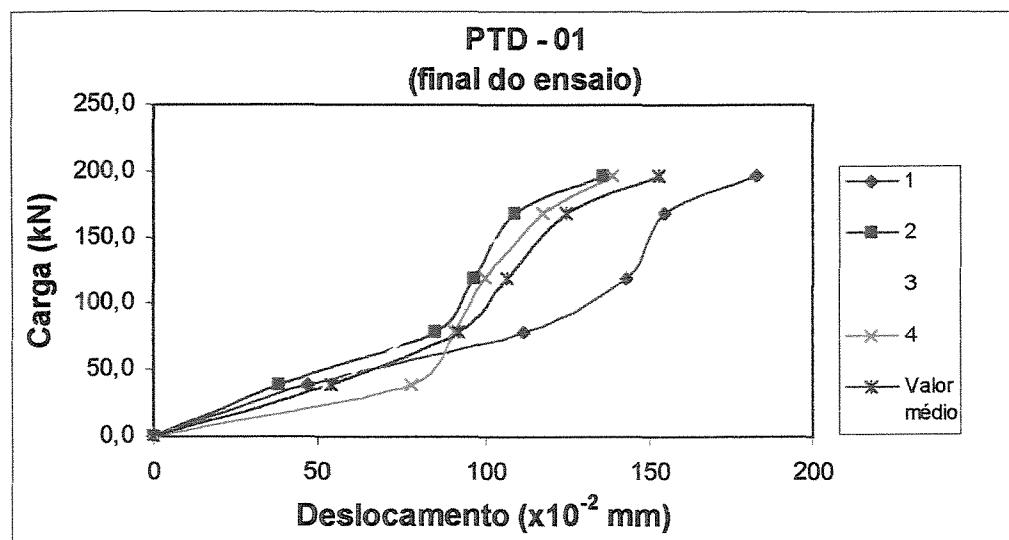


Figura 27 - Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa final do ensaio, após aplicação de 3.000.000 ciclos.

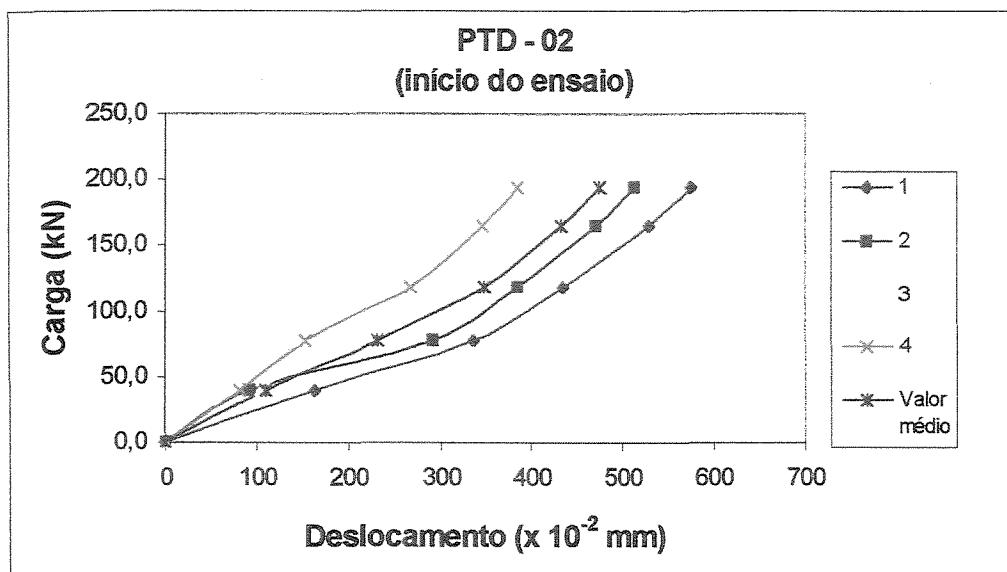


Figura 28 - Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa inicial do ensaio, após 1080.000 ciclos, antes da aplicação de carregamento dinâmico

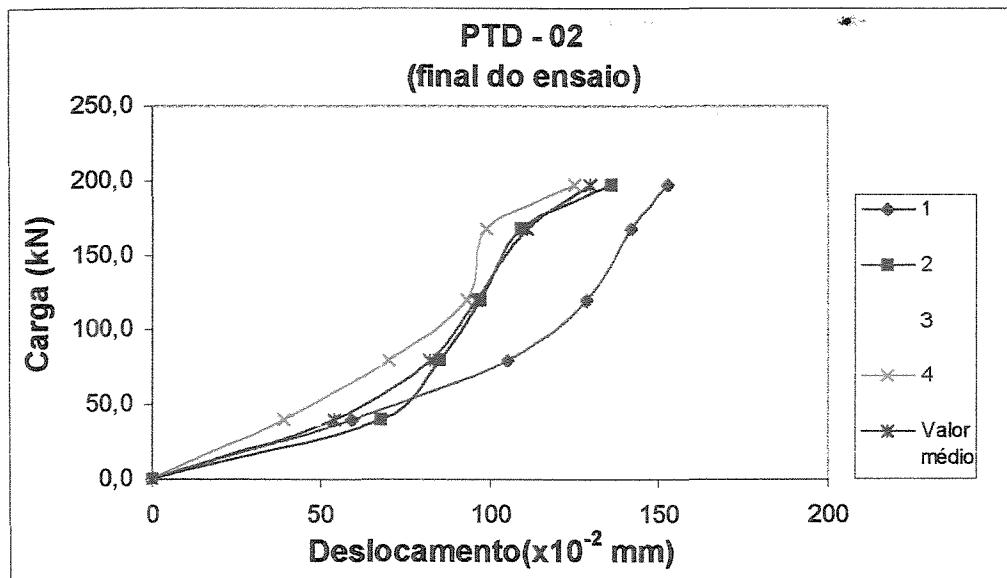


Figura 29 - Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa final do ensaio, após aplicação de 3.000.000 ciclos.

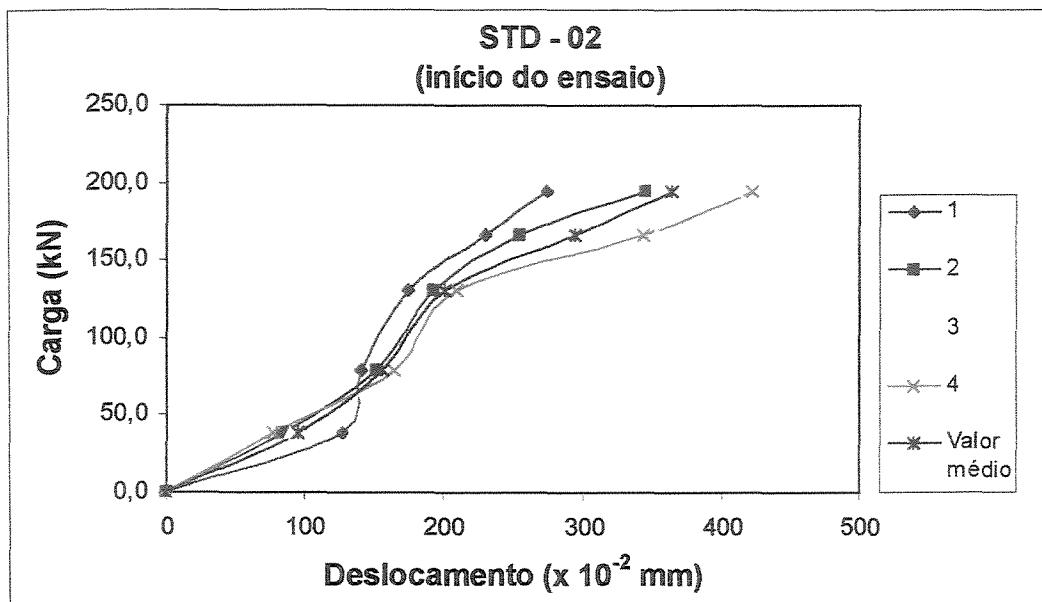


Figura 30 - Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa inicial do ensaio, após 1080.000 ciclos, antes da aplicação de carregamento dinâmico

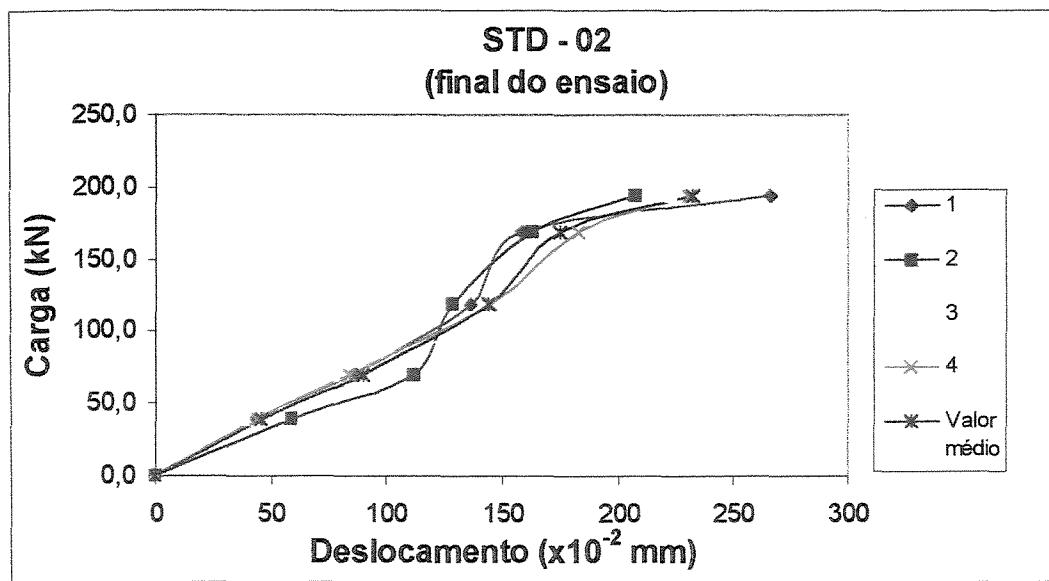


Figura 31 - Deslocamentos do dormente em função do carregamento. Etapa final do ensaio, após aplicação de 3.000.000 ciclos.

Na modelagem teórica de BALLARIN (1995), a constante de mola do lastro foi assumida como sendo igual a 175 kN/cm. Isso implica que, para carregamentos da ordem de 170 kN, o dormente sofreria um deslocamento médio de 1,0 cm (10 mm).

Observou-se que os deslocamentos verticais máximos ocorridos nos três exemplares ensaiados ficaram próximos de 4 mm, valor bem abaixo do valor teórico encontrado no modelo (10 mm). Isto se deve ao fato de ter ocorrido uma acomodação do lastro confinado na "caixa de britas", em consequência do número de ciclos aplicados, no carregamento dinâmico.

Na situação de carregamento máximo [(carga de ensaio de 200 (kN)] a diferença máxima ocorrida entre os deslocamentos para os pontos 1 e 4, 2 e 3 (que poderiam proporcionar uma torção no dormente) foi de 0,5 mm. Não foi observado qualquer ocorrência que pudesse caracterizar uma eventual torção do dormente, no transcorrer dos ensaios, devido ao seu apoio irregular no lastro.

#### b) Deformações específicas

Os resultados obtidos ao longo das etapas de carregamento dos exemplares ensaiados dinamicamente, em termos de deformações específicas (avaliadas e referidas em micro-strain -  $\mu\epsilon$ ), encontram-se nas Tabelas 10 a 12, apresentadas no anexo A. Convencionou-se que, para cada coluna das tabelas (10 a 12), logo abaixo da indicação do ponto ou canal de leitura da deformação específica (conforme Figura 19a), a terminologia “compressão” ou “tração” indicou o tipo de deformação que era inicialmente esperada por BALLARIN (1999). Sinal positivo indica concordância com essa expectativa e o sinal negativo indica discordância.

Os resultados desses ensaios, em forma de figuras, são também apresentados no anexo A.

### EXTENSÔMETROS.

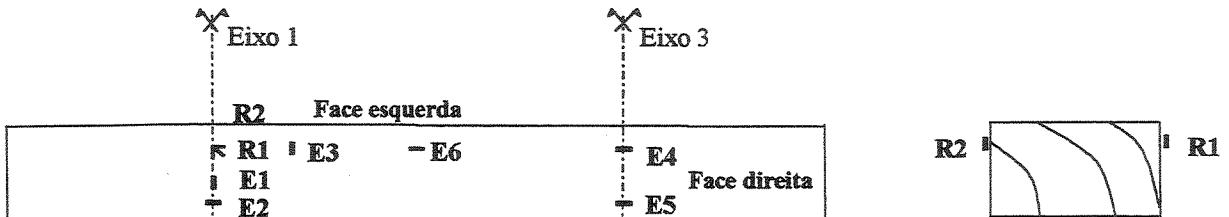


Tabela - 9 - Deformações específicas máximas (em  $\mu\epsilon$ ), para cargas de 200 kN.

Dormentes	Compressão				Tração				Compressão normal				Compressão normal	
	RH1		E4		E2		E5		R1V		R2V		E1	
	Início	final	Início	final	Início	final	Início	final	Início	final	Início	final	Início	final
PTD-01	34	102	67	107	337	376	344	455	303	349	194	183	338	378
PTD-02	212	265	86	100	249	240	-	-	-	-	420	427	138	125
STD-01	34	106	59	82	161	236	183	259	-	-	-229	-257	263	371
* BALLARIN	525		-525		515		515		972		972		967	

\* Valores teóricos apresentados por BALLARIN (1999), para carga de 200kN.

Fazendo-se uma análise global dos resultados das deformações específicas obtidas, observou-se que não ocorreram variações das deformações específicas no mesmo ponto, ao longo dos ciclos de carregamento do ensaio dinâmico. Constatou-se que, em valores absolutos, as deformações específicas foram maiores na fase final (3.000.000 ciclos) em relação à fase inicial (1.080.000 ciclos), para a maioria dos exemplares ensaiados (Figuras 32 a 49).

No caso das deformações de compressão, caracterizando flexão no dormente, representadas pelos pontos R1H e E4 (deformação de compressão na face superior do dormente, na linha de centro do apoio do trilho), para o carregamento máximo de 200 kN, observaram-se valores que variaram de 14 a 72  $\mu\epsilon$ , entre as fases inicial e final do ensaio. (Figuras 32, 33, 39, 40, 44 e 45).

Não foi possível fazer uma comparação com os ensaios estáticos de BALLARIN (1999) para os pontos R1H e E4, devido à grande dispersão das deformações específicas obtidas pelo citado autor. Para as deformações de tração na flexão (pontos E2 e E5), na face inferior do dormente, na linha de centro do apoio do trilho, observou-se valores que variaram de 1 a 111  $\mu\epsilon$ , para o carregamento máximo de 200 kN, entre a fase inicial e final do ensaio (Figuras 34, 35, 41, 46 e 47).

O valor máximo de deformação específica para os pontos E2 e E5, obtido no carregamento de 200 kN, na fase final do ensaio, foi de  $455 \mu\epsilon$ , no ponto E5 da série PTD-01. Comparando-se os valores dessas deformações com os resultados encontrados por BALLARIN (1999), na fase estática, evidenciaram-se, na média, deformações da mesma ordem de grandeza.

Para as deformações que caracterizam a compressão transversal do dormente (pontos R1V, R2V e E1), observou-se valores que variaram de 7 a  $108 \mu\epsilon$ , para o carregamento máximo de 200 kN, entre a fase inicial e final do ensaio (Figuras 36, 37, 42, 48 e 49).

O valor máximo (em valores absolutos) de deformação específica para os pontos R1V e R2V, obtido no carregamento de 200 kN, foi de  $427 \mu\epsilon$ , no ponto R2V da série PTD-02, e o valor mínimo foi de  $205 \mu\epsilon$ , no ponto R2V da série PTD-01. Comparando-se os valores dessas deformações com os resultados encontrados por BALLARIN (1999), na fase estática, notou-se, na média, deformações da mesma ordem de grandeza. Na série STD-01, não foi possível realizar a leitura do canal R1V, pois o mesmo apresentou problemas.

Na série STD-01, ponto R2V, as deformações específicas foram de tração, resultado contrário ao esperado, pois esperava-se que fossem de compressão. O banco de ensaio (caixa metálica preenchida com brita nº 3, revestida com manta elastomérica de 1,5 mm de espessura), comportou-se muito bem durante a aplicação de carga cíclica (40kN a 170kN). Não ocorreu qualquer ressonância no sistema como um todo, o que poderia acarretar erro na leitura dos resultados.

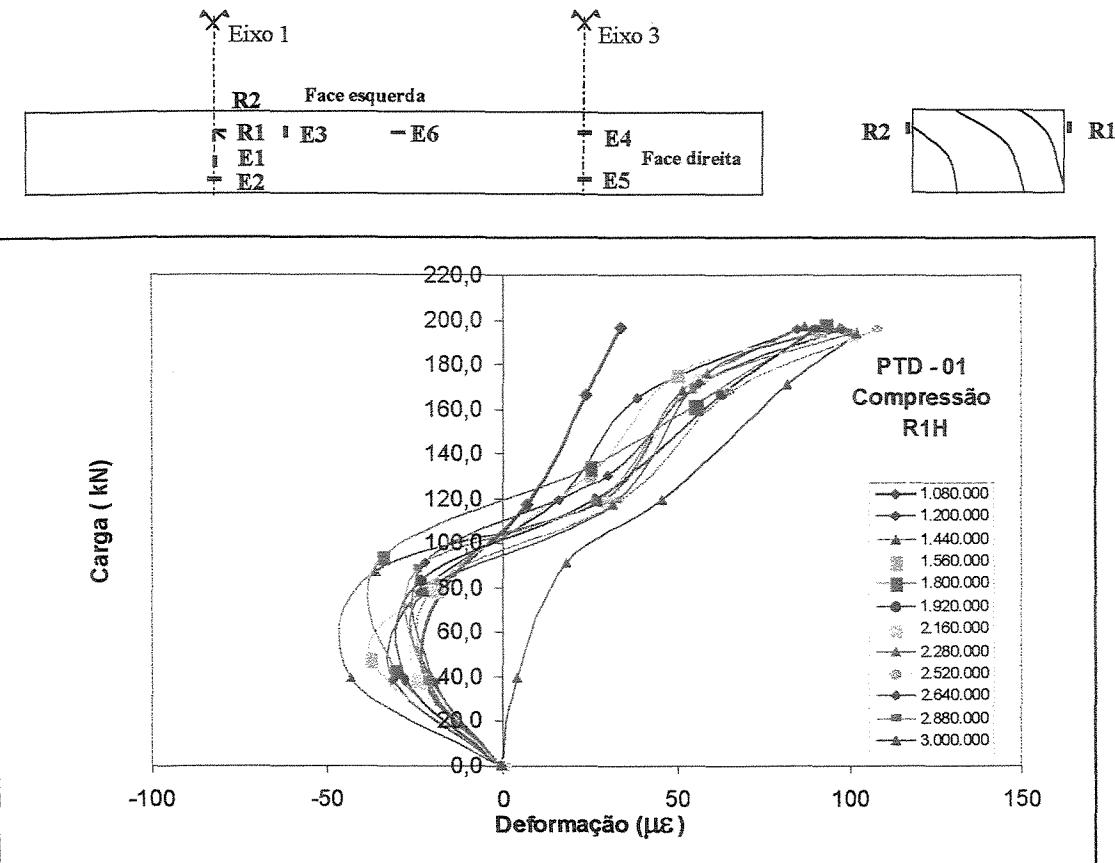


Figura 32 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1H, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

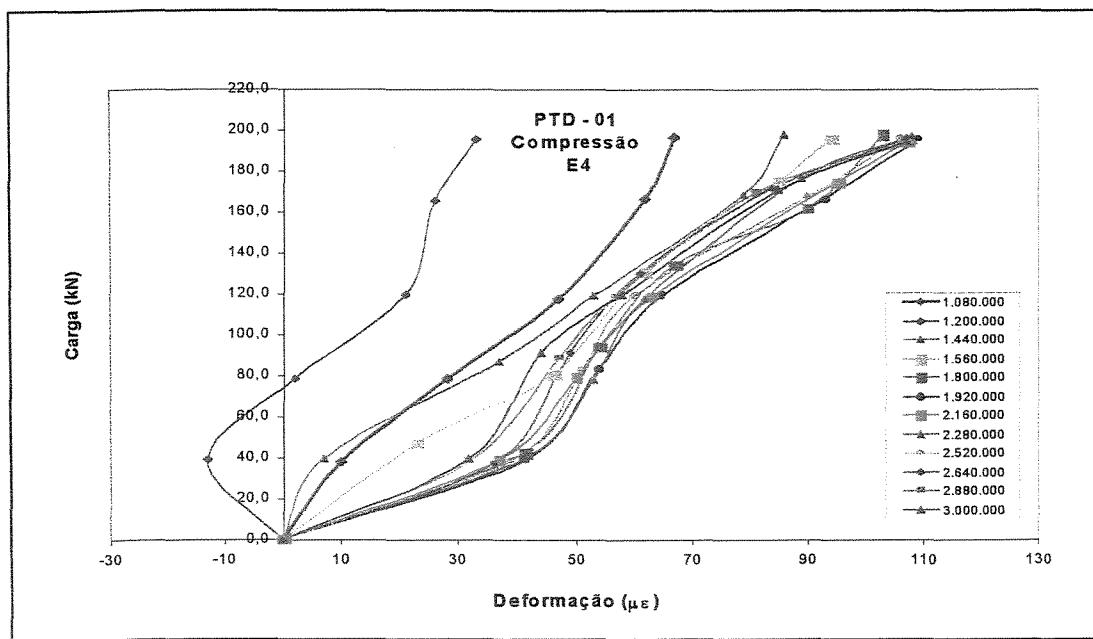


Figura 33 – Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E4 obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

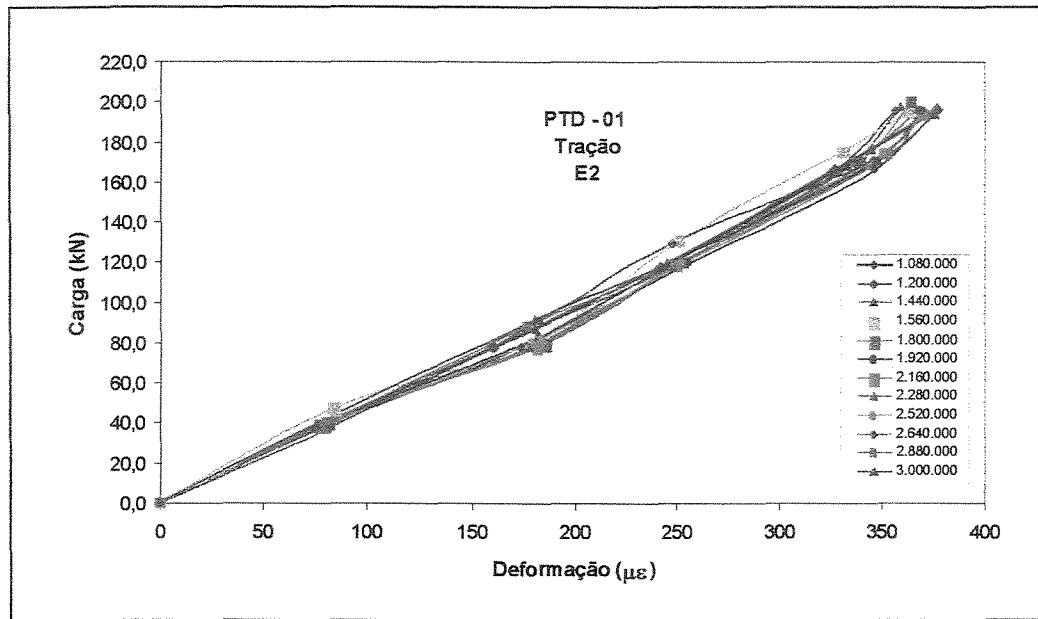
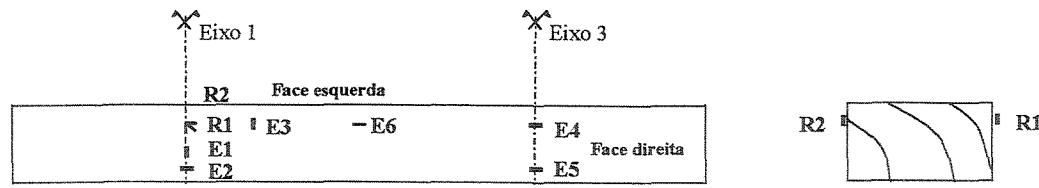


Figura 34 – Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E2, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

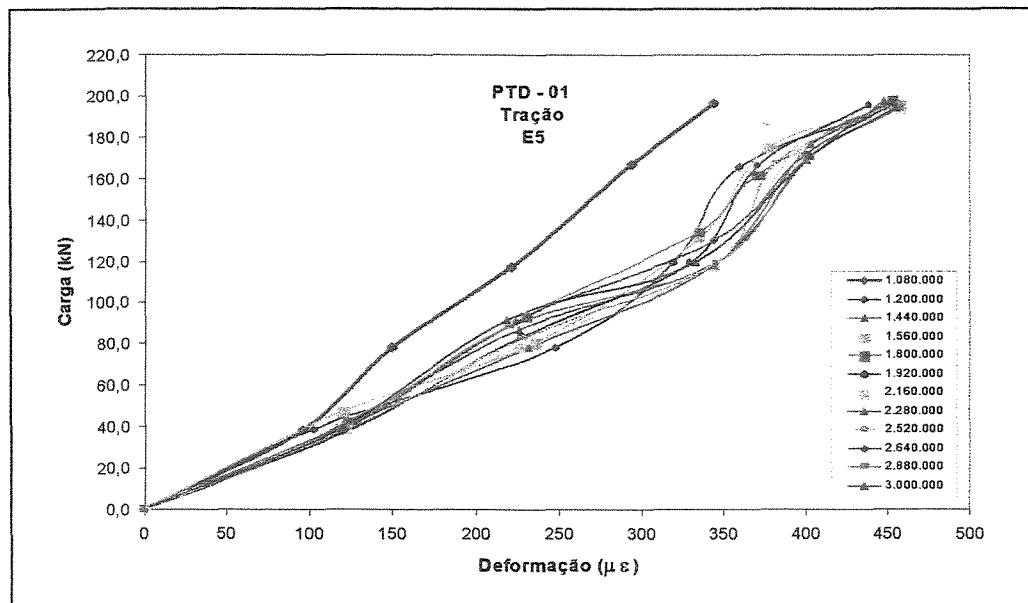


Figura 35 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E5, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

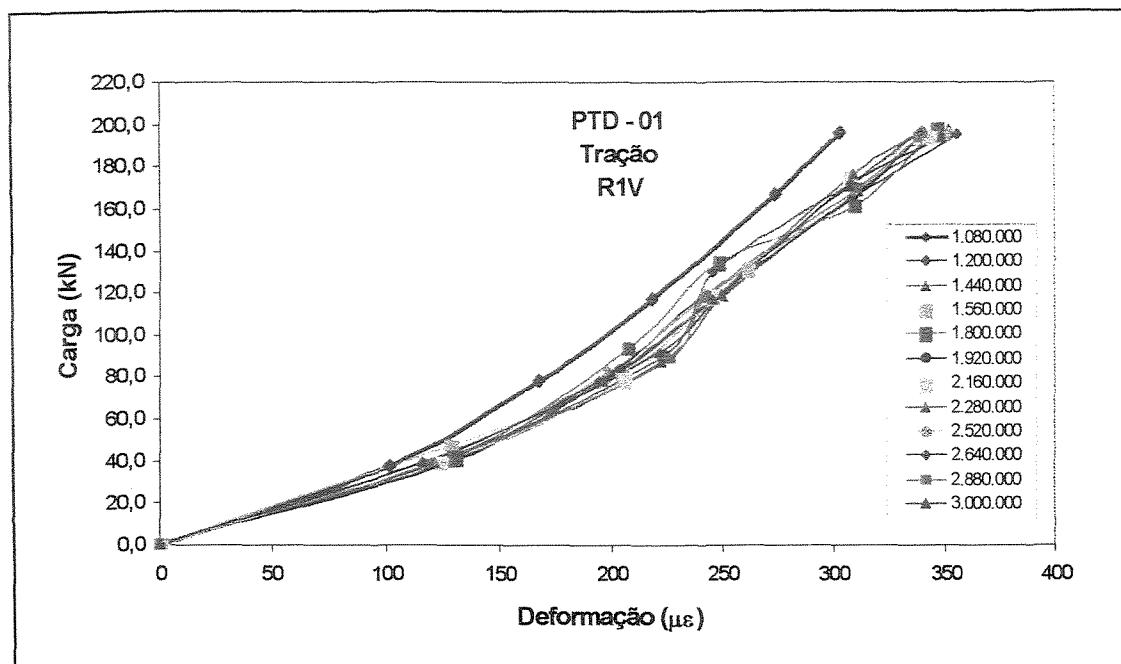
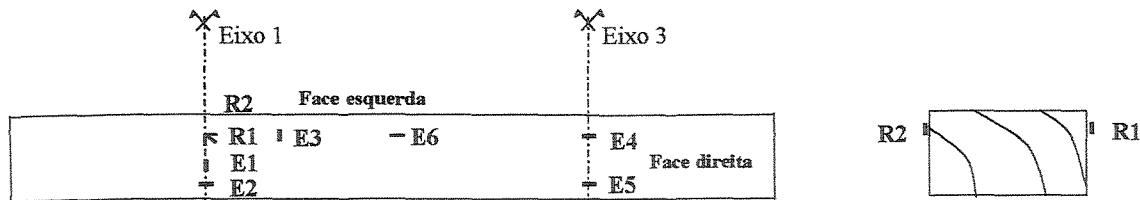


Figura 36 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1V, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

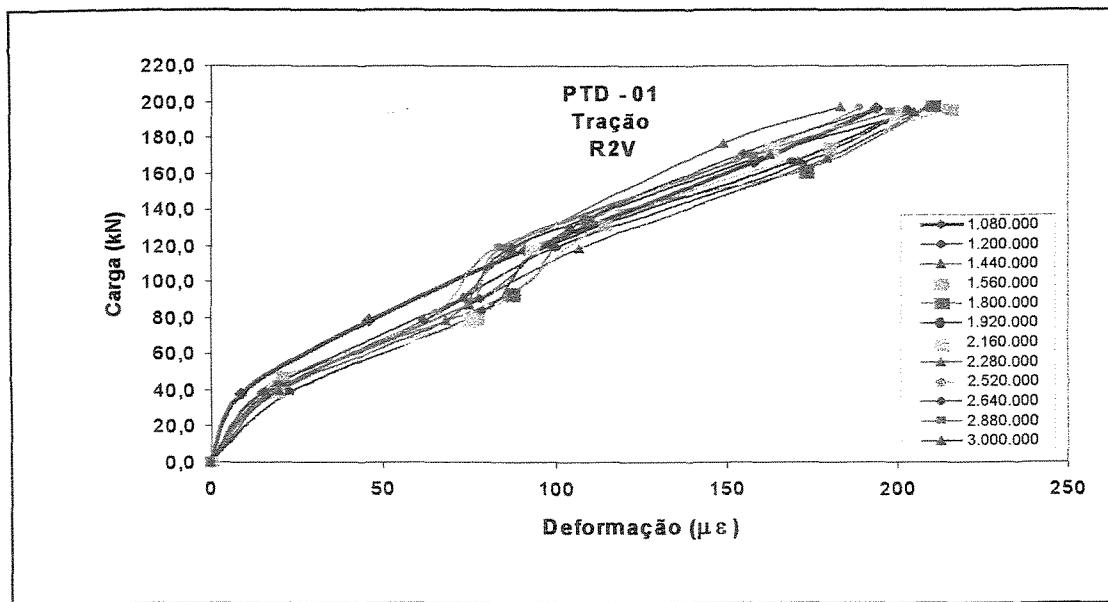


Figura 37 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R2V, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

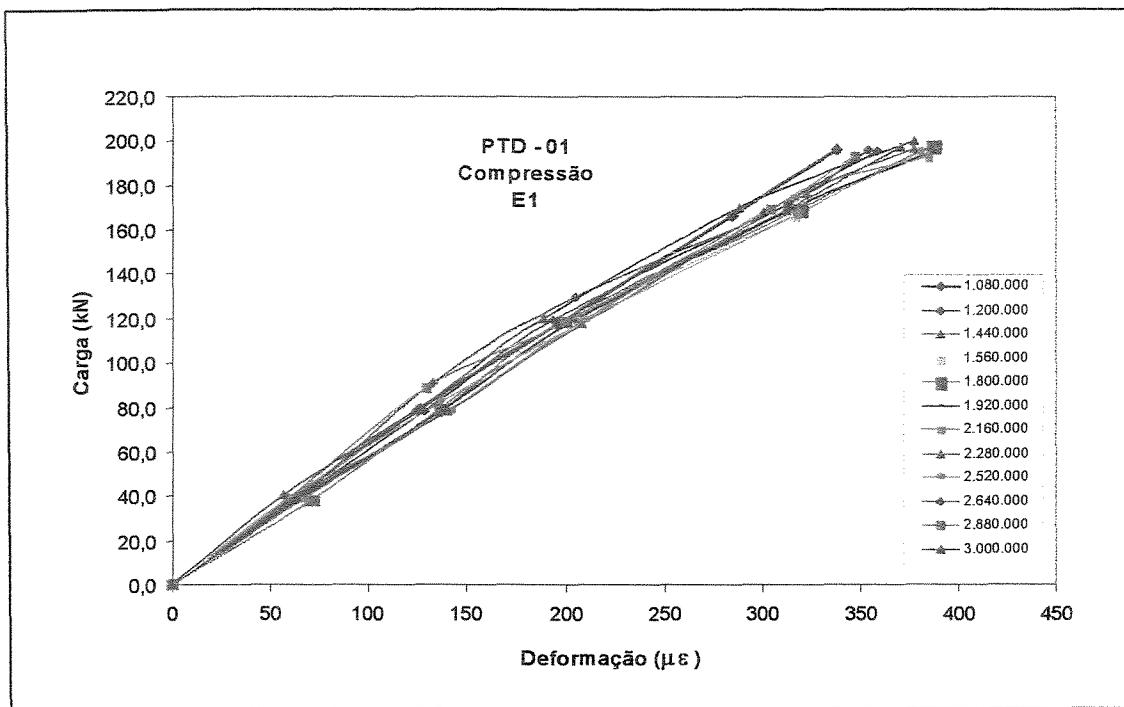
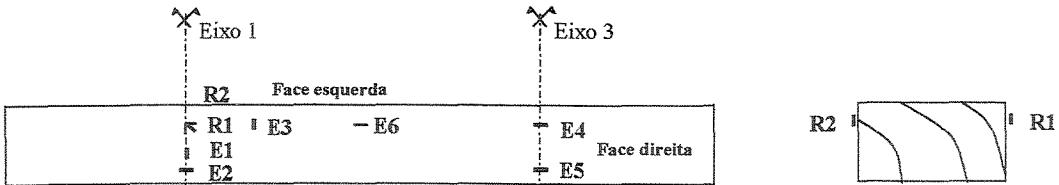


Figura 38 – Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E1, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

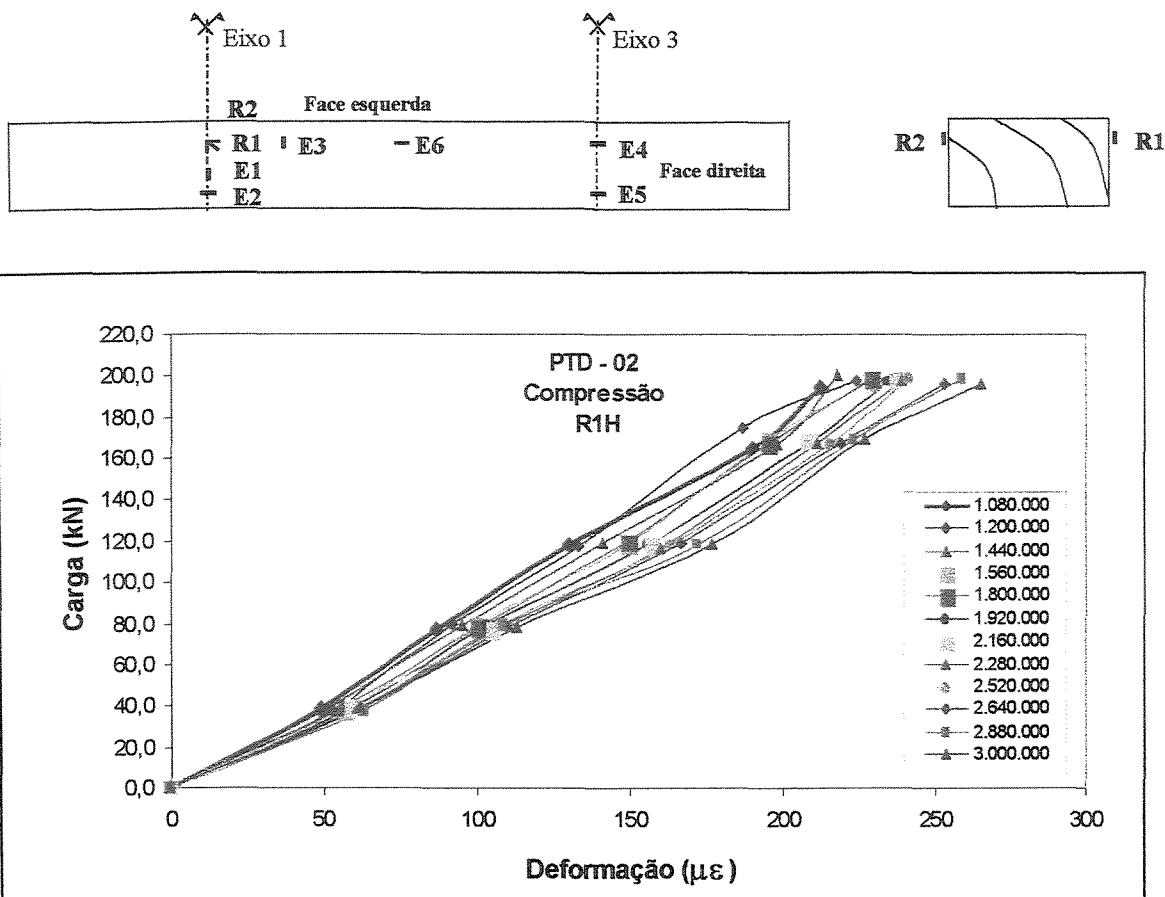


Figura 39 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1H, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

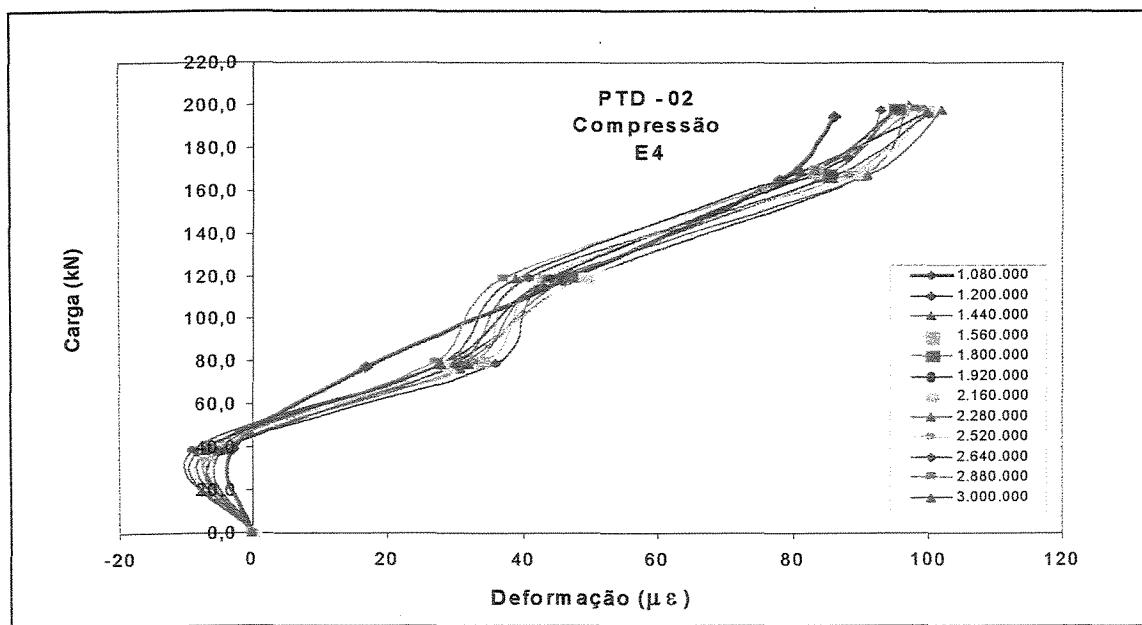


Figura 40 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E4, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

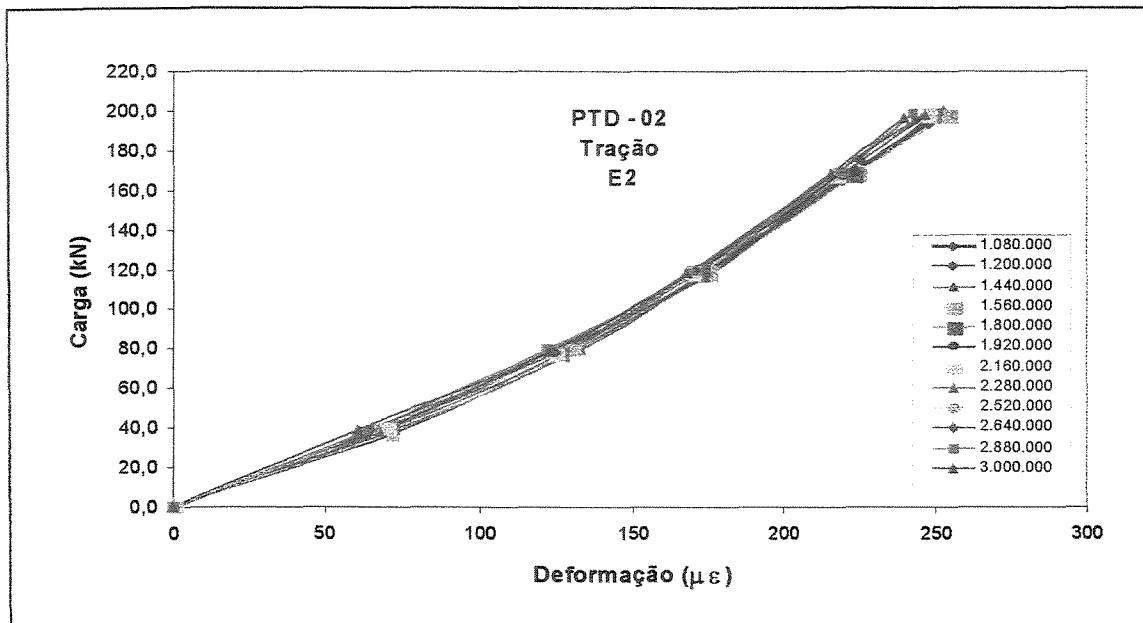
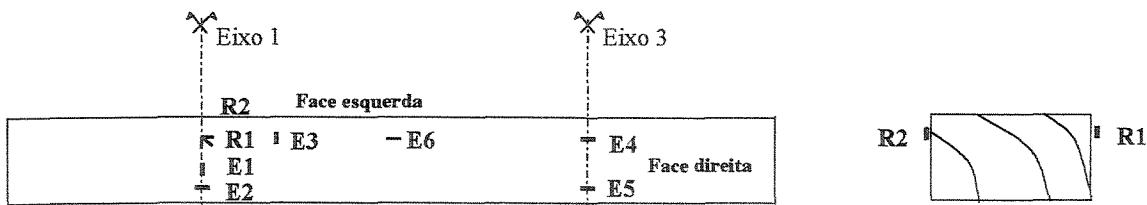


Figura 41 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E2, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

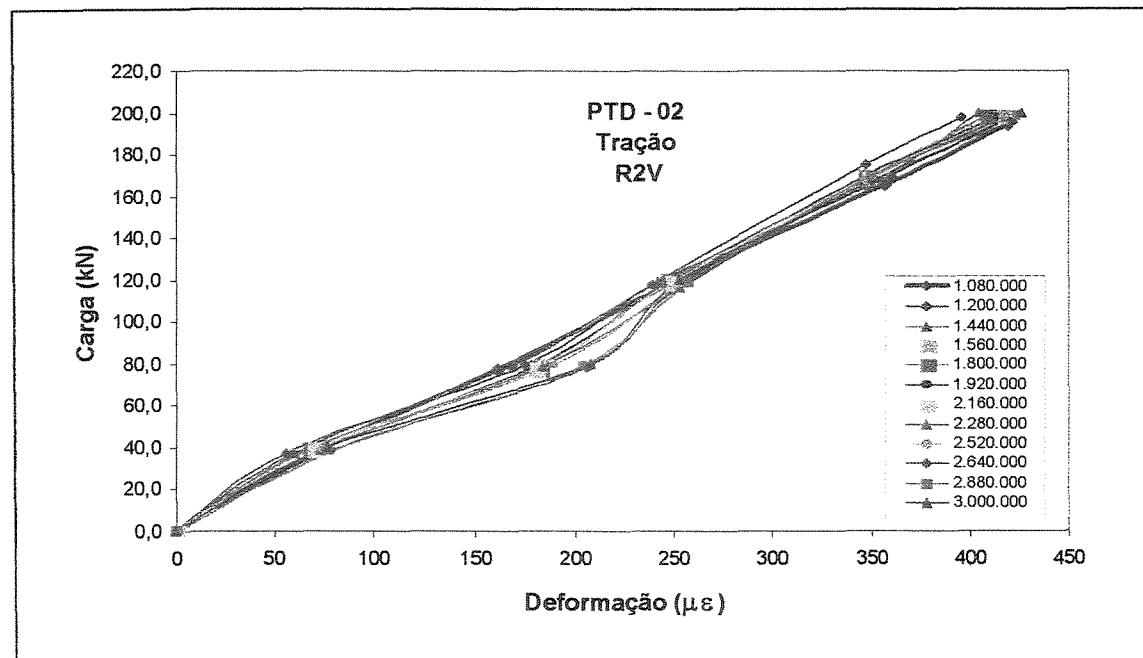


Figura 42 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R2V, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

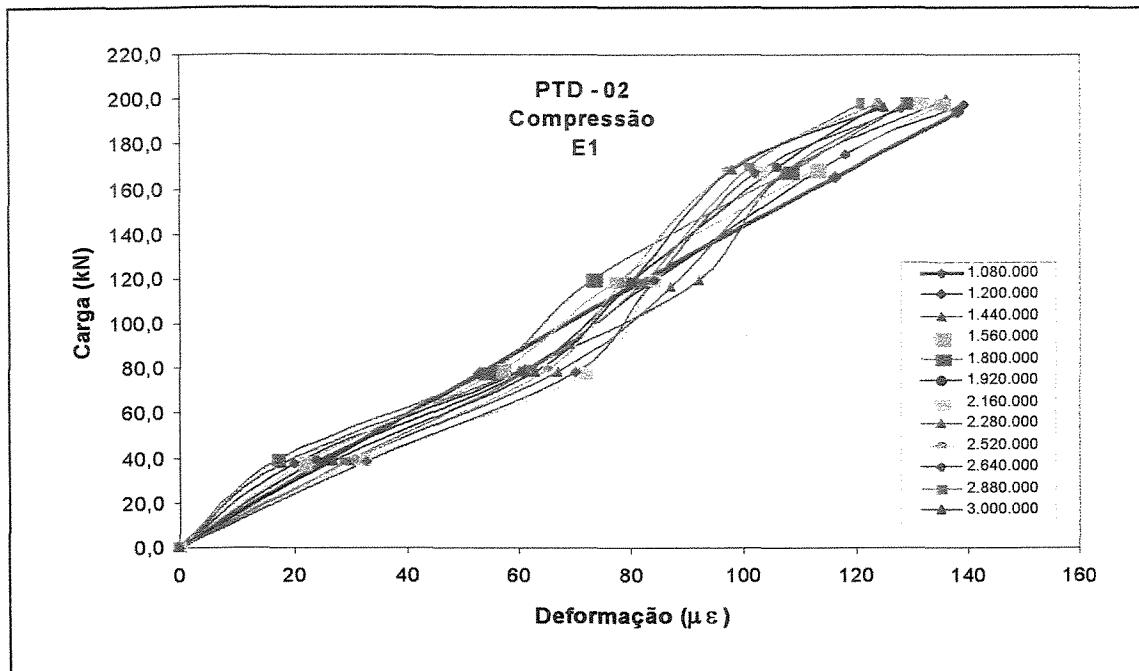
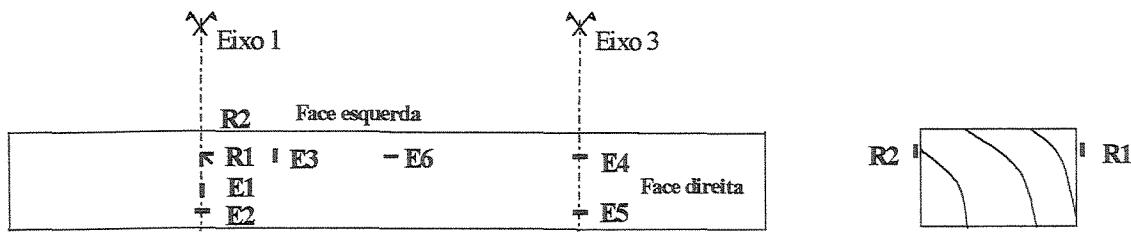


Figura 43 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E1, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

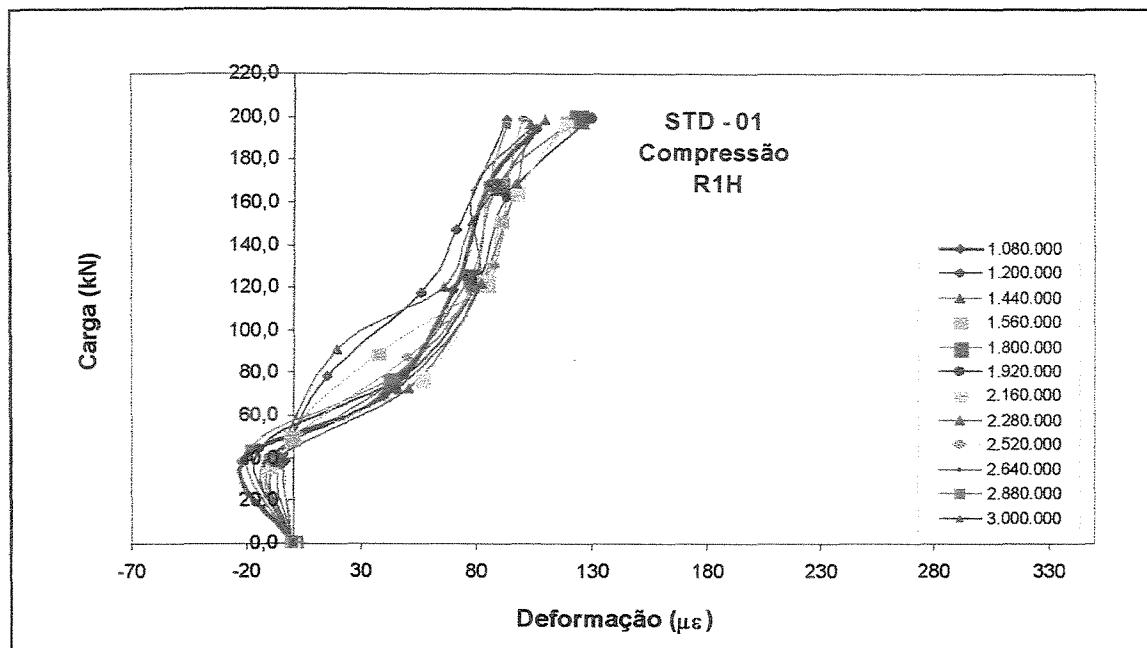
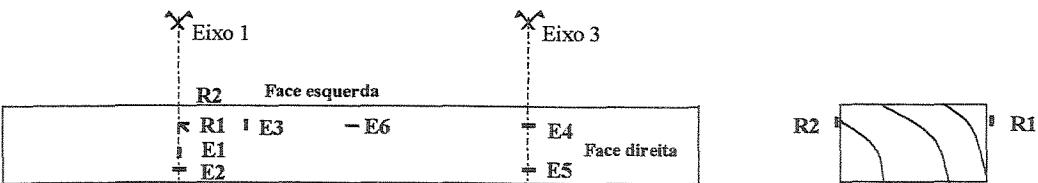


Figura 44 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R1H, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

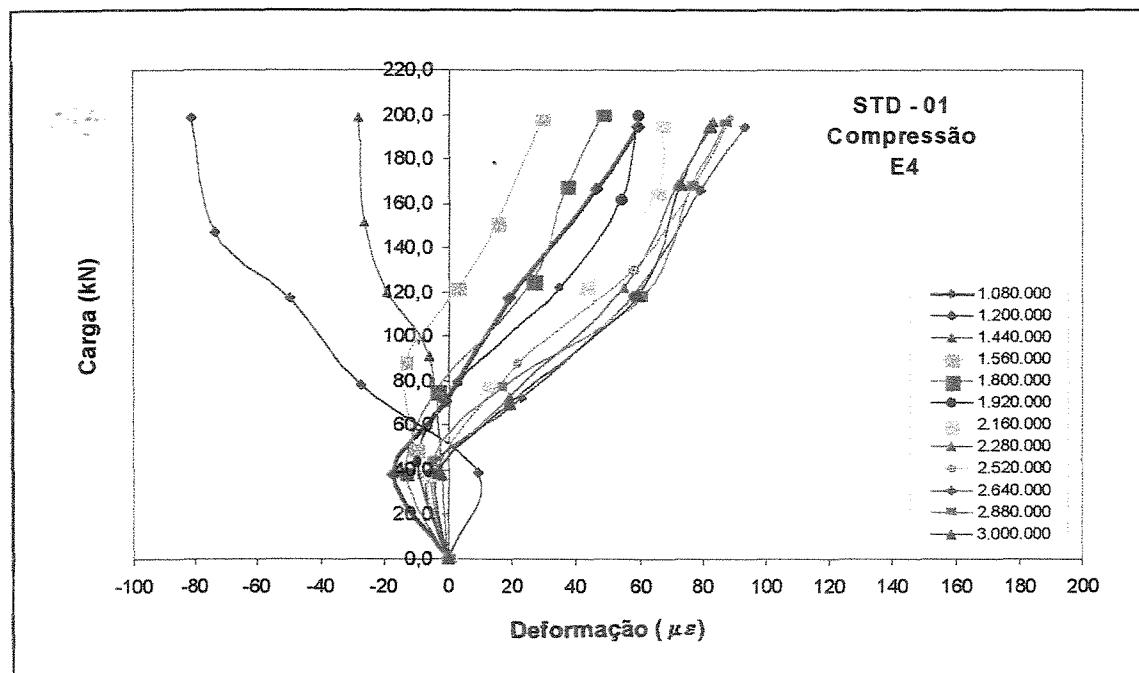


Figura 45 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E4, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

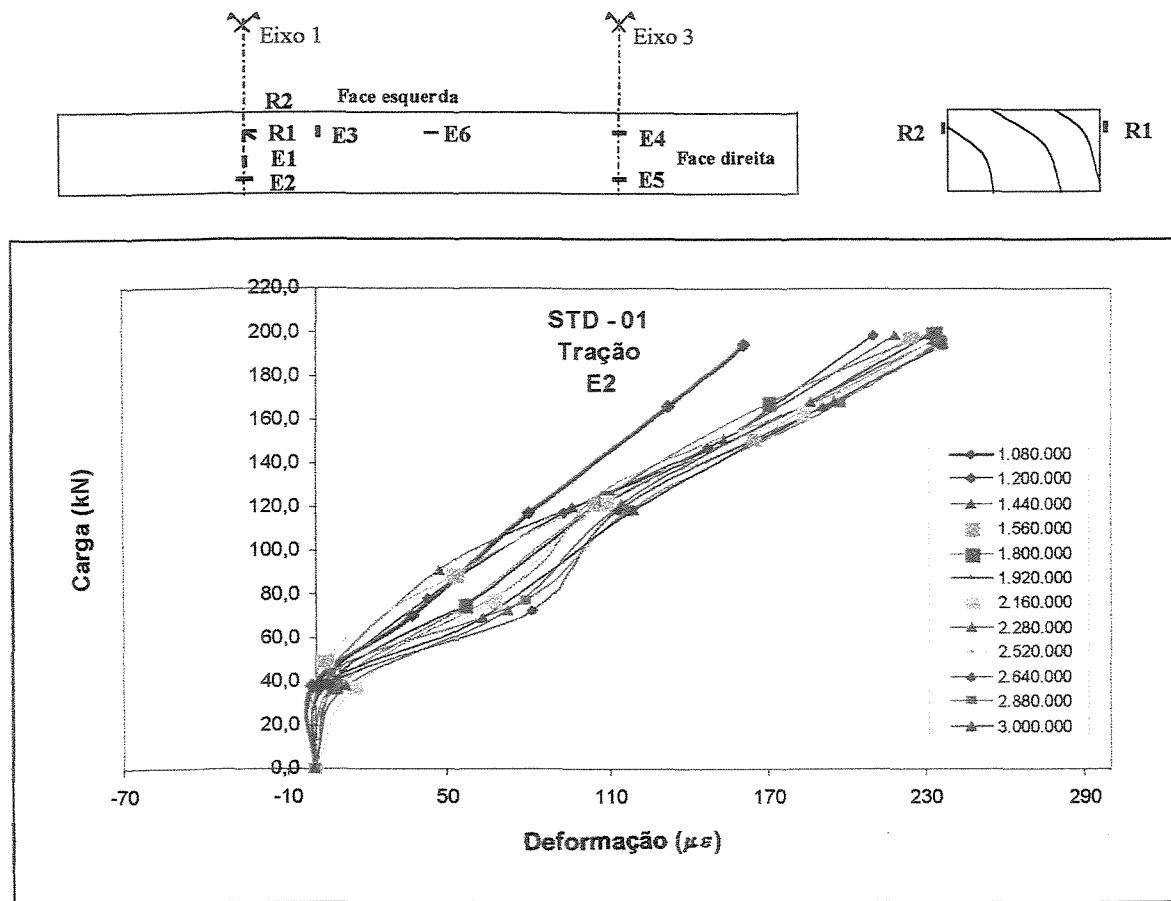


Figura 46 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E2, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

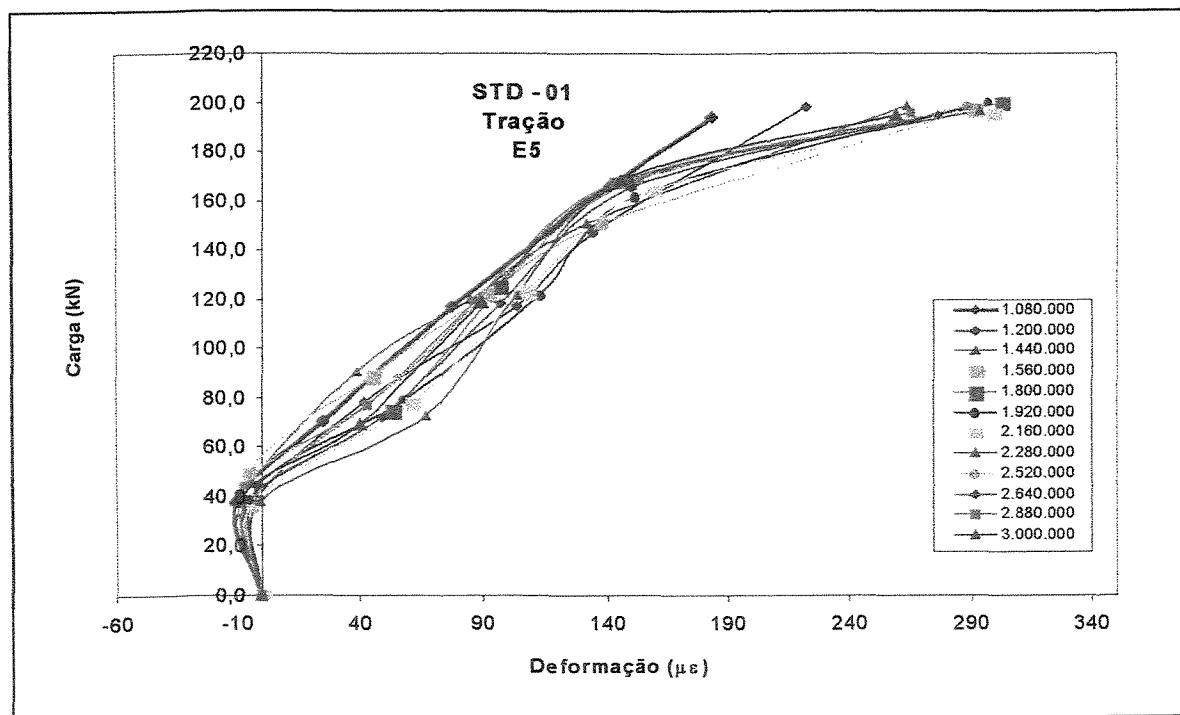


Figura 47 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E5, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

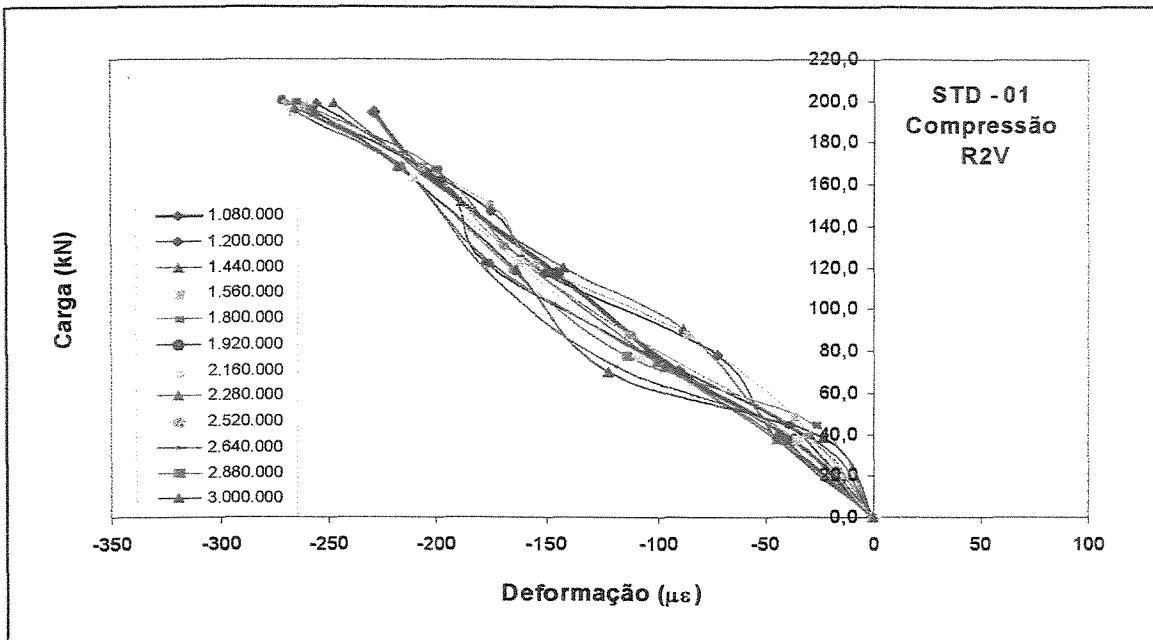
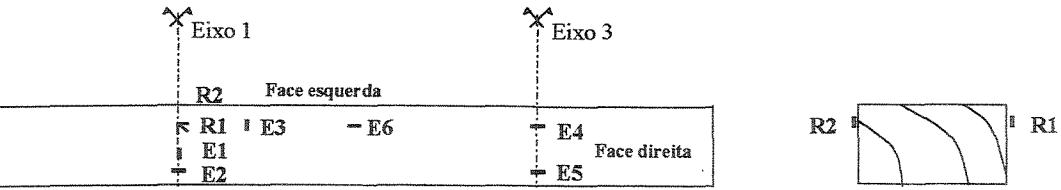


Figura 48 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto R2V, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

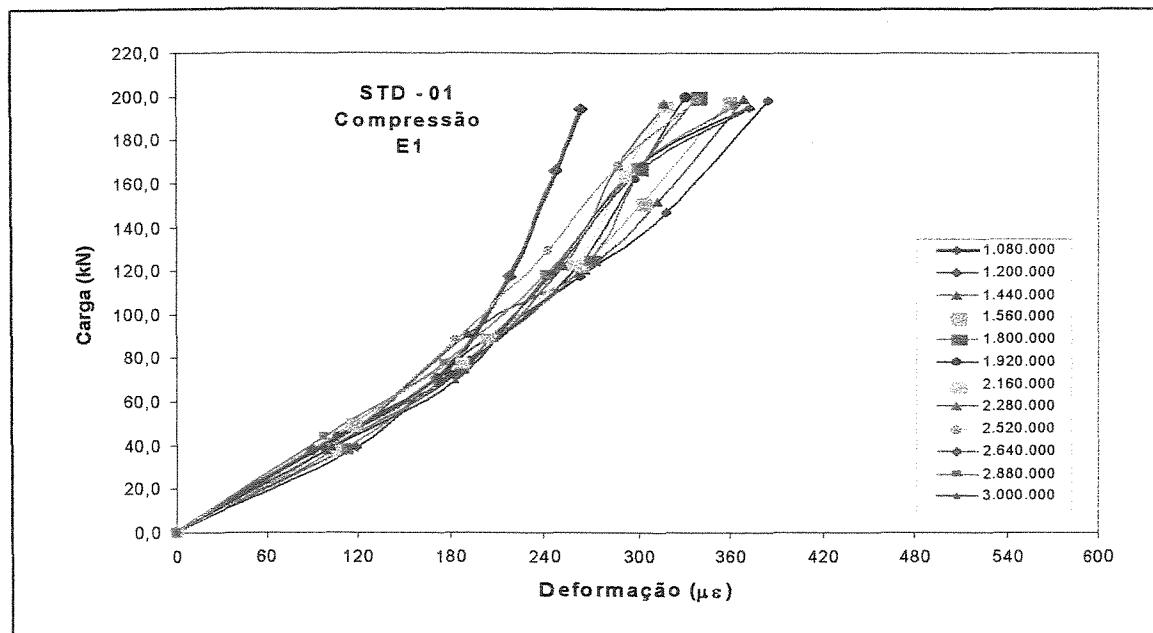


Figura 49 - Curvas de deformações específicas em função do carregamento, no ponto E1, obtidas nas diferentes etapas do ensaio dinâmico.

## 6 . CONCLUSÕES

Estudou-se, neste trabalho, o comportamento mecânico de dormentes de madeira de E. citriodora, quando submetidos a solicitações dinâmicas, em ensaios laboratoriais, sendo adotado o limite de 3.000.000 de ciclos, estabelecido por normas ferroviárias.

Os ensaios laboratoriais permitiram concluir que:

- O modelo teórico, adotado por BALLARIN (1999), estimou com razoável aproximação as tensões de tração na flexão do dormente;
- No modelo matemático adotado, a constante de mola do lastro pode ser admitida com valores da ordem de 175 kN/cm a 200 kN/cm;
- Ocorreu um aumento, não substancial, na fase final (3.000.000 ciclos), das deformações específicas, na maioria dos exemplares ensaiados, com relação à fase inicial (1.080.000 ciclos), porém, menor do que o da fase inicial dos ensaios (0 ciclos);
- Observou-se um aumento das deformações específicas durante os primeiros ciclos de carregamento dinâmico nos dormentes, devido ao assentamento dos mesmos no lastro;
- As variações das deformações específicas para os dormentes com placa de apoio (PTD-01 e PTD-02), comparadas com aquelas relativas ao dormente sem placa de apoio (STD-01), não foram relevantes ao final dos 3.000.000 ciclos aplicados.

Após uma análise das ocorrências retrocitadas, pode-se concluir que os dormentes de E. citriodora apresentaram valores das deformações específicas menores do que aqueles sugeridos na modelagem teórica de BALLARIN, após a realização dos ensaios dinâmicos (3.000.000 ciclos), sendo também os valores dessas deformações superiores aos ensaios

estáticos de BALLARIN. Para a utilização na via permanente, pode-se otimizar o desempenho estrutural desses dormentes, com ensaios normalizados, realizando apenas os ensaios estáticos, excluindo assim os ensaios dinâmicos para homologação de protótipos de dormentes, os quais são onerosos e demorados.

Além disso, sendo essas deformações específicas sensivelmente baixas, pode-se perfeitamente otimizar as dimensões básicas do dormente, dimensões estas normalizadas e adotadas pelas ferrovias nacionais.

**Recomendações para outras pesquisas:**

- realização de ensaios laboratoriais, com carregamento dinâmico até 3.000.000 ciclos, em maior quantidade de dormentes, para que se obtenha um embasamento estatístico;
- realização de ensaios laboratoriais (dinâmicos) em protótipos de dormentes com tratamento preservativo;
- realização de ensaios laboratoriais utilizando as cargas máximas ocorridas em trechos ferroviários específicos;
- realização de ensaios laboratoriais com outros tipos de fixação (placa de apoio + palmilha pastilhada + palmilha microcelular);
- realização de ensaios laboratoriais (dinâmicos), com cargas oblíquas, simulando o ângulo de ataque da roda sobre o trilho.

## **7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDRADE, Edmundo Navarro. In: **O Eucalipto**. 2.ed. Jundiaí: Oficinas Tipográficas da Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 617 – 36, 1961.

AMATTO, Agostinho. Desempenho de postes de madeira no sistema ELETROPAULO. In: I Encontro Brasileiro em Preservação de Madeiras, 4, 1982, São Paulo. Anais... São Paulo: IBDF, IPT, ABPM, V.1, p.251, 1982.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. Manual for railway engineering. S.1., 1996. 2v.

ASTM E 1150. Standard definitions of terms relating to fatigue. American Society for Testing Materials, May, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7511: Dormentes de madeira. Rio de Janeiro, 1982. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7189: Cargas móveis para o projeto de obras ferroviárias. Rio de Janeiro, 1983. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

BALLARIN, Adriano Wagner. **Análise dimensional de dormentes prismáticos de madeira de reflorestamento**. 84 p. Relatório apresentado à CPRT/UNESP, Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 1995.

BALLARIN, Adriano Wagner. **Desempenho mecânico de dormentes prismáticos de Eucalipto citriodora**. 115 p. Tese (Livre – Docência)- Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu, 1999.

BOND,I.P; ANSELL,M.P. **Fadique properties of jointed wood composites**:Part 1 Statistical analysis, fatigue master curves and constant life diagrams. **Jornal of Materials Science**,33.p2751-2762,jun,1998.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de ferro: via permanente**. 2ed. Belo Horizonte: UFMG, 1988.

CLORIUS, Cristian Odin; PEDERSEN, Martin Uhre. **Fatigue damage in wood: An investigation of frequency influence on fatigue development in wood**. 103p. (M.Sc Thesis)-

Technical University of Denmark, Institute of Structural Engineering and Materials, Denmark, 1996.

DAVIS, R; HENSHELL, R.D; WARBURTON,G.B. A Timoshenko beam element. *Journal of Sound and Vibration*, v.22.p.475-487,1972.

DIETER, G.E. *Metalurgia Mecânica*. 2ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 1981.

GUIMARÃES, C.A.B; PAIVA, C.E.L; RODRIGUES Filho, F. Modelagem da via férrea para solicitações dinâmicas. In: Congresso Internacional de Material Rodante, Via Permanente e seus Acessórios, 1,1996, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Metro/RJ,CB-06/ABNT, p.1-11,1996.

HANSEN, L.P. Experimental investigation of fadique properties of laminated wood beams. *Proceedings... of the International Timber Engineering Conference London*, p. 4.220-4.222, 1991.

HELLMEISTER, J.C. *Pontes de eucalipto citriodora*. São Carlos: EESC,USP, 85p.,1978.

KOLLMANN, F.F.P; CÔTÉ JR,W.A. *Principes of Wood Science and Tecnology*, New York: p.376-377, 1968.

MACÊDO, Alcebíades, Negrão. *Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada*.196p tese (doutorado em engenharia de estruturas)- Escola de Engenharia de São Carlos , Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MADSEN, B. *Structural behaviour of timber*. Timber Engineering Ltda, North Vancouver, British Columbia, Canada, 1992.

MARKWARDT, L.J. *Aircraft Woods*: Their properties, selection and characteristics. Nat Advisory Comm. Aeron., Rep. n.º 354, 1930.

MASCIA, N.T. *Considerações a respeito da anisotropia da madeira*. 293p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,São Paulo, 1991.

NIEDERAUER. Francisco Ronald. *Emprego da madeira de eucalipto como dormente*. In: Encontro Brasileiro em Preservação de Madeiras, 1, 1982, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Preservadores de Madeira, p.203-32,1982.  
NIELSEN, L. F. Power law creep as related to relaxatation elasticity, damping, rheological spectra and creep recovery-whith special reference to wood. *Proceedings... Meeting of IUFRO S5.02*, Xalapa, México. 1984.

NICKEL, R; SECOR, G. Convergence of consistently derived Timoshenko beam finite element. *International Journal of Numeral Methods in Engineering*, p.243-253,1972.

NOGUEIRA, M.C.J.A; LAHR, Francisco, Antonio Rocco. Indicações para o emprego de dezesseis espécies de eucalipto na construção. In: Encontro Brasileiro de Madeiras e em Estruturas de Madeira, 4, 1992, São Carlos. Anais...São Carlos: LAMEM, EESC USP, V.1, p.37-48, 1992.

PORTO, Antônio Arlindo Guidetti. **Método de Eisenmann para estimar a dinâmica da via.** Campinas: Centro de Tecnologia, UNICAMP, 7p., 1997. (não publicado).

PORTO, T.G. Solicitações em dormentes de concreto. **Revista Ferrovia**, São Paulo, n.º 92, p.17-22, 1982.

PORTO, T.G. A mecânica da via férrea. **Revista Ferrovia**, São Paulo, n.º 96, p.14-16, 1984.

QUEIROZ, R. **Estudo experimental de tensões e deformações em camadas da infraestrutura e superestrutura ferroviária.** 223p. Tese (Doutorado em Geotecnia)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

RIZZINI, Carlos Toledo. Árvores e madeiras úteis do Brasil, **Manual de Dendrologia Brasileira**: Edgard Blucher Ltda, p.234, 1971.

RODRIGUES JUNIOR, M. S. **Efeitos da repetição de carregamentos na rigidez e resistência de ligações mecânicas com pinos das estruturas de madeira.** Exame de qualificação (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ROTH, P. H. Dauerbeanspruchung von eichenholz und tannerholzprismen in faserrichteng durch konstante und durch wechselnde druckkraefte und dauerbiege- beanspruehung vo tannenholzbalken. Diss. Tech. Hochschule Kalsruhe, 1935.

GRAF, O. Traegfaehigkeit der bauholzer und der holzverbildungen. Mitt. Fachaussch. Holzfragen, h20, Berlin, vgl.auch, 1938.

SALES. Almir ; LAHR. Francisco; ANTONIO. Rocco. Característica de resistência mecânica de espécies de eucalipto do Estado de São Paulo. In: Encontro Brasileiro de Madeiras e em Estruturas de Madeira, 4, 1992, São Carlos. Anais...São Carlos: LAMEM,EESC USP, V.3, p.91-101, 1992.

SCHRAMM, Gerhard. **Técnica e economia na via permanente.** Rio de Janeiro,1977.

SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos.** 5ed. São Paulo: Edgard Bluecher, 1982.

THOMAS, J; ABBAS, B.A.H Finite element model for dynamic analysis of Timoshenko beam. Journal of Sound and Vibration,v.4,n.º,p.291-299,1975.

TIMOSHENKO, Stephen. P. **Resistência dos materiais.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1966.

## **ANEXO A**

### **RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DOS DORMENTES**

**Tabela-10- Deformações específicas ocorridas nas etapas dos ensaios dinâmicos - Dormente PTD - 01**

Ciclos	Carga Teórica	Carga Efetiva	Deformações ( $\mu\epsilon$ )																					
			E1		E2		E3		E4		E6		R1V		R1H		R1D		R2V		R2H		R2D	
			Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão		
11 1.080.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	40	37,9	60	76	17	10	96	59	102	-22	44	9	-5	-60										
	80	78,3	126	161	42	28	150	68	168	-17	32	46	8	-72										
	120	117,4	196	242	74	47	221	82	219	7	40	91	24	-58										
	170	166,4	285	327	108	62	294	100	274	24	54	158	43	-42										
	200	196,3	338	377	127	67	344	113	303	34	62	194	41	-37										
1.200.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	40	38,7	64	82	35	-13	103	73	117	-31	57	15	1	10										
	80	78,2	129	174	54	2	248	83	195	-23	87	62	15	63										
	120	119,3	194	247	87	21	320	107	243	16	101	100	56	44										
	170	165,3	301	325	138	26	360	121	309	39	73	172	68	83										
	200	195,5	359	357	147	33	457	128	356	85	153	203	73	92										
1.440.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	40	39,3	67	79	39	7	116	79	127	-43	60	19	-2	-1										
	80	87,1	136	181	57	37	226	87	223	-36	72	75	22	22										
	120	118,7	197	249	103	53	344	112	251	28	89	107	58	12										
	170	168,4	312	333	149	79	401	134	311	52	95	179	67	51										
	200	197,3	371	369	157	66	448	143	352	87	127	209	79	71										
1.560.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	40	47,5	68	84	41	23	120	81	129	-37	63	21	3	-18										
	80	80,8	139	179	61	46	236	92	205	-20	93	77	27	7										
	120	131,1	204	251	92	62	335	121	262	25	78	114	63	-3										
	170	175,2	316	330	151	85	378	141	308	50	80	180	76	17										
	200	195,1	389	363	160	94	458	147	349	91	100	215	83	25										
1.800.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	40	42,4	71	81	43	41	123	80	130	-30	59	20	5	-27										
	80	83,7	137	186	59	54	230	93	208	-34	77	87	23	-3										
	120	134,4	200	253	98	67	335	123	249	25	83	109	55	-18										
	170	161,6	319	338	143	90	370	136	310	55	75	173	64	-9										
	200	197,8	387	364	163	103	453	148	346	93	98	210	86	3										
1.920.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	40	38,4	65	77	45	41	125	79	127	-27	65	23	7	-53										
	80	83,2	140	183	63	54	227	90	204	-23	80	78,8	25	-32										
	120	119,5	205	256	100	65	330	119	248	27	73	98	47	-29										
	170	166,2	314	347	151	93	371	136	310	63	84	169	70	-17										
	200	195,5	388	370	162	109	439	146	341	90	98	203	87	-10										

<sup>11</sup> Valor das deformações específicas obtidas por BALLARIN em 1.080.000 ciclos

**Tabela-10 - Deformações específicas ocorridas nas etapas dos ensaios dinâmicos - Dormente PTD - 01 (continuação)**

Ciclos	Carga Teórica	Carga Efetiva	Deformações ( $\mu\epsilon$ )																	
			E1		E2		E3		E4		E5		E6		R1V	R1H	R1D	R2V	R2H	R2D
			Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão							
2.160.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	38,7	67	79	41	37	122	75	125	-24	61	19	9	-72						
	80	78,8	142	182	64	50	226	94	206	-19	79	75	27	-76						
	120	118,3	207	250	95	63	345	117	245	30	85	93	51	-83						
	170	174,4	316	351	154	95	398	139	307	57	87	163	69	-59						
	200	193,5	385	370	163	107	458	148	343	101	100	189	89	-47						
2.280.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	39,4	64	78	47	41	120	76	122	-20	58	20	8	-85						
	80	78,1	141	178	59	53	232	96	197	-22	76	68	23	-90						
	120	117,5	208	248	99	62	344	119	246	32	79	87	47	-94						
	170	176,3	323	345	149	89	403	137	309	59	90	149	67	-79						
	200	196,6	378	367	163	108	453	146	340	97	103	183	87	-70						
2.520.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	38,8	60	81	43	39	123	73	121	-21	56	17	6	-83						
	80	82,8	138	184	57	51	228	91	199	-18	78	65	24	-104						
	120	119,4	210	253	89	60	346	117	244	34	82	83	46	-109						
	170	167,7	319	344	151	90	382	134	310	65	89	153	69	-85						
	200	195,7	382	371	162	106	456	146	341	108	99	189	92	-58						
2.640.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	37,6	63	83	41	36	120	70	119	-19	52	17	7	-77						
	80	90,8	133	183	60	49	224	94	225	-22	74	78	22	-94						
	120	130	205	247	92	61	344	117	246	30	83	104	55	-88						
	170	171,6	313	346	148	84	400	135	308	57	85	156	74	-79						
	200	198	354	369	163	107	454	146	339	98	96	194	95	-62						
2.880.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	38,3	59	78	39	32	119	72	120	-21	53	18	6	-83						
	80	88,5	130	177	58	47	220	93	227	-24	70	75	25	-101						
	120	118,5	200	246	95	57	348	119	243	27	81	84	44	-109						
	170	169,8	304	347	150	81	401	136	311	55	92	158	79	-83						
	200	193,5	347	375	164	108	457	147	338	100	97	198	99	-76						
3.000.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	39,4	57	76	38	32	121	71	117	3,8	49	16	5	-80						
	80	91,3	127	181	61	44	218	93	222	18	65	73	21	-98						
	120	119,3	189	245	90	58	333	120	250	46	77	87	47	-103						
	170	170,7	288	348	146	85	403	135	307	82	87	163	57	-87						
	200	194	378	376	166	107	455	148	349	102	100	205	88	-83						

**Tabela-11- Deformações específicas ocorridas nas etapas dos ensaios dinâmicos - Dormente PDT- 02**

Ciclos	Carga Teórica	Carga Efetiva	Deformações ( $\mu\epsilon$ )																	
			E1		E2		E3		E4		E5		E6		R1V	R1H	R1D	R2V	R2H	R2D
			Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Compressão	Compressão	Compressão	Compressão	
11 1.080.000	0	0,0	0	0	0	0	0	não lido	0	não lido	0	não lido	0	0	0	0	0	0	0	
	40	38,9	26	68	64	-3			-7		49		75	65	16					
	80	77,4	53	127	118	17			1		87		162	119	14					
	120	117,8	81	173	171	46			11		130		247	164	8					
	170	165,3	116	220	235	78			19		190		357	214	11					
	200	194,3	138	248	272	86			30		212		420	232	14					
1.200.000	0	0,0	0	0	0				0		0		0	0	0					
	40	37,4	20	73	67	-5			-5		53		56	70	22					
	80	79,3	61	129	101	36			1		92		175	116	15					
	120	117,7	83	170	175	44			12		133		239	183	19					
	170	175	118	226	242	88			18		187		348	240	12					
	200	197,8	139	247	258	93			32		224		396	269	15					
1.440.000	0	0,0	0	0	0				0		0		0	0	0					
	40	37,4	18	70	57	-8			-5		50		60	67	18					
	80	79,2	60	133	110	29			-1		95		170	121	27					
	120	119,3	92	175	172	49			13		141		242	177	18					
	170	166,4	107	222	200	90			17		198		350	245	17					
	200	200	136	253	267	97			34		218		405	287	27					
1.560.000	0	0,0	0	0	0				0		0		0	0	0					
	40	37,6	22	72	59	-7			-6		54		71	71	27					
	80	79,4	57	130	116	34			-2		97		176	124	20					
	120	118,6	77	176	170	43			14		145		245	182	13					
	170	169,3	113	225	233	83			20		192		356	247	13					
	200	197,8	135	255	263	96			35		227		374	344	18					
1.800.000	0	0,0	0	0	0				0		0		0	0	0					
	40	39,2	17	71	53	-6			-4		57		68	73	21					
	80	77,8	54	127	113	30			-1		100		182	127	19					
	120	119,7	73	173	171	47			13		149		247	179	24					
	170	167,6	108	223	237	85			22		195		347	243	21					
	200	198,3	129	250	262	95			37		229		409	311	12					
1.920.000	0	0,0	0	0	0				0		0		0	0	0					
	40	38,4	24	69	56	-9			-3		59		74	73	23					
	80	78,6	61	123	111	28			-3		103		180	126	25					
	120	118,4	80	169	168	44			16		156		248	180	16					
	170	169,5	106	224	210	83			24		210		347	245	20					
	200	197,3	124	249	260	95			38		234		415	341	15					

<sup>11</sup> Valor das deformações específicas obtidas por BALLARIN em 1.080.000 ciclos.

**Tabela-11- Deformações específicas ocorridas nas etapas dos ensaios dinâmicos - Dormente PDT- 02 (continuação)**

Ciclos	Carga Teórica	Carga Efetiva	Deformações ( $\mu\epsilon$ )																	
			E1		E2		E3		E4		E5		E6		R1V	R1H	R1D	R2V	R2H	R2D
			Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	não lido	0	não lido	0	0	0	0	
2.160.000	0	0	0	0	0	0	0	0	não lido	0	não lido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	40	39,3	32	70	51	-5			-4		59			70	71	20				
	80	77,5	72	125	108	29			-2		105			181	126	24				
	120	119,3	84	170	165	49			17		157			249	178	15				
	170	168,7	103	218	213	90			25		208			349	244	18				
	200	198,3	131	248	258	100			38		237			418	341	17				
	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				
	40	38,3	30	68	55	-5			-5		61			73	72	19				
	80	78,6	67	124	106	32			-2		109			184	127	20				
	120	116,2	87	174	167	43			18		160			253	175	17				
2.280.000	170	167,4	107	220	218	91			27		211			348	246	15				
	200	197,7	129	247	256	102			39		239			419	339	13				
	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				
	40	39,6	31	67	53	-4			-3		62			75	70	18				
	80	79,4	65	123	107	33			-2		108			189	121	23				
	120	118,6	78	172	163	40			15		163			254	179	18				
	170	167,8	97	217	216	88			28		215			348	243	19				
	200	198,3	124	243	255	99			42		241			417	340	14				
	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				
	40	38,5	33	65	54	-4			-4		62			79	68	18				
2.520.000	80	78,3	70	125	109	30			-1		110			206	123	21				
	120	119,4	84	171	166	41			18		167			255	176	19				
	170	167,3	102	216	209	86			29		219			351	244	20				
	200	195,8	128	244	256	100			40		253			422	341	15				
	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				
	40	37,8	29	63	52	-6			-3		63			79	69	17				
	80	79,5	62	122	108	27			-1		109			204	120	24				
	120	118,3	82	169	165	37			19		172			257	165	20				
	170	169,4	101	219	211	83			30		223			350	241	23				
	200	198,3	121	243	249	98			43		259			424	339	12				
2.640.000	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				
	40	38,5	33	65	54	-4			-4		62			79	68	18				
	80	78,3	70	125	109	30			-1		110			206	123	21				
	120	119,4	84	171	166	41			18		167			255	176	19				
	170	167,3	102	216	209	86			29		219			351	244	20				
	200	195,8	128	244	256	100			40		253			422	341	15				
	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				
2.880.000	40	37,8	29	63	52	-6			-3		63			79	69	17				
	80	79,5	62	122	108	27			-1		109			204	120	24				
	120	118,3	82	169	165	37			19		172			257	165	20				
	170	169,4	101	219	211	83			30		223			350	241	23				
	200	198,3	121	243	249	98			43		259			424	339	12				
	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				
3.000.000	40	38,5	27	61	51	-7			-2		62			77	67	16				
	80	78,2	63	123	108	28			-2		113			208	120	20				
	120	118,5	80	168	163	39			20		177			253	166	22				
	170	168,7	98	216	210	81			33		227			361	243	21				
	200	196,6	125	240	247	100			45		265			427	340	13				
	0	0	0	0	0	0			0		0			0	0	0				

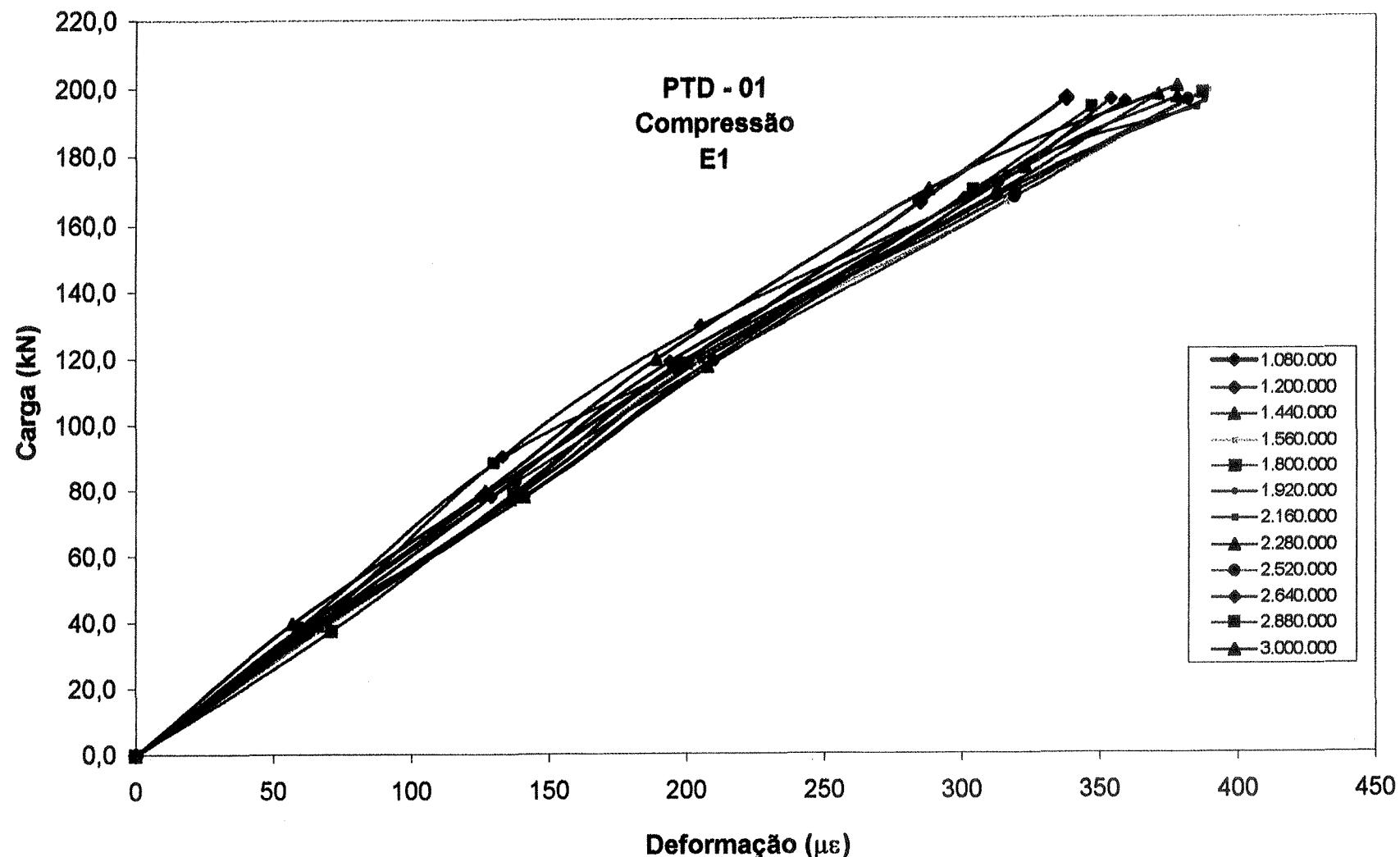
**Tabela-12 - Deformações específicas ocorridas nas etapas dos ensaios dinâmicos - Dormente STD - 01**

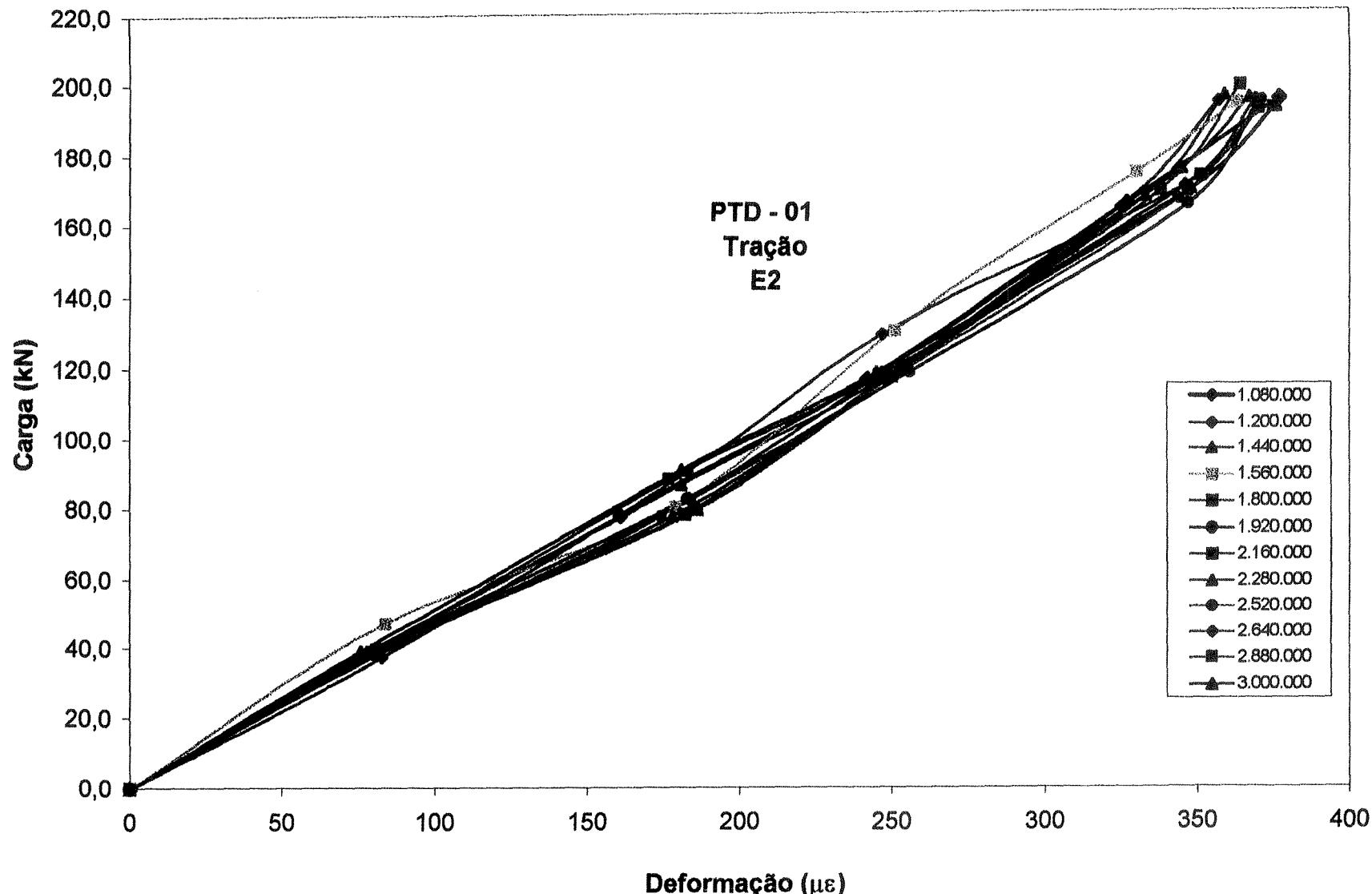
Ciclos	Carga Teórica	Carga Efetiva	Deformações ( $\mu\epsilon$ )																			
			E1		E2		E3		E4		E5		E6		R1V	R1H	R1D	R2V	R2H	R2D		
			Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	não lida	0	0	0	0	0			
11 1.080.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	não lida	0	0	0	0	0	0		
	40	37,7	90	-1	36	172	37	101	-1	25	19	77	207		-13	90	-37	11	-64			
	80	70,6	172	37	101	117,3	218	80	148	19	46	141	244		0	146	-90	32	-112			
	120	117,3	218	80	148	166	247	132	203	46	141	244	262		13	206	-146	57	-170			
	170	166	247	132	203	194,3	263	161	237	59	183	183	262		24	279	-205	72	-239			
	200	194,3	263	161	237										34	326	-229	81	-280			
1.200.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		
	40	38,4	119	3	-14	9	38,4	183	43	-7	-27	42	163		-2	134	-3	203	-45	4	-23	
	80	78	183	43	-7	-27	80	117,3	263	93	-9	-50	103	190		15	266	-72	16	-104		
	120	117,3	263	93	-9	-50	120	146,9	318	147	32	-74	134	213		56	292	-151	27	-148		
	170	146,9	318	147	32	-74	170	198,3	385	210	44	-81	222	232		71	390	-175	36	-183		
	200	198,3	385	210	44	-81	200									93	435	-256	51	-262		
1.440.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		
	40	37,2	102	1	3	-2	37,2	191	47	20	-6	39	188		-9	139	-6	193	-40	-1	-36	
	80	90,8	191	47	20	-6	80	120	266	96	45	-19	85	202		19	282	-88	27	-116		
	120	120	266	96	45	-19	120	151	312	153	78	-26	131	235		66	315	-143	36	-147		
	170	151	312	153	78	-26	170	198,5	369	218	89	-28	263	249		78	407	-189	48	-185		
	200	198,5	369	218	89	-28	200									109	443	-248	63	-279		
1.560.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		
	40	49,4	117	4	41	-10	49,4	203	52	83	-13	45	180		-5	148	-1	185	-37	6	-49	
	80	88,7	203	52	83	-13	80	122,1	263	104	3	92	199		45	188	37	287	-87	36	-114	
	120	122,1	263	104	103	3	120	151	302	164	119	15	137	228		92	199	84	305	-156	46	-156
	170	151	302	164	119	15	170	197,6	359	223	139	29	291	247		137	228	90	385	-176	55	-200
	200	197,6	359	223	139	29	200									291	247	118	408	-263	79	-288
1.800.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		
	40	38,2	111	7	59	-13	38,2	187	56	127	-4	53	191		-6	155	-9	180	-43	13	-56	
	80	75,1	187	56	127	-4	80	124,9	269	108	137	26	97	208		53	191	43	288	-101	49	-100
	120	124,9	269	108	137	26	120	167,7	301	170	154	37	144	232		97	208	77	307	-162	61	-149
	170	167,7	301	170	154	37	170	200	338	232	173	48	302	256		154	232	89	380	-201	74	-203
	200	200	338	232	173	48	200									302	256	123	412	-266	85	-272
1.920.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		
	40	44	107	10	62	-9	44	193	61	132	3	58	187		-2	155	-15	176	-39	19	-59	
	80	78,7	193	61	132	3	80	121,7	261	107	162	35	112	200		58	187	49	279	-105	54	-116
	120	121,7	261	107	162	35	120	161,7	297	175	181	54	151	246		112	200	80	310	-177	73	-162
	170	161,7	297	175	181	54	170	200	330	233	190	59	297	267		181	246	93	343	-198	84,4	-206
	200	200	330	233	190	59	200									297	267	129	385	-272	93	-286

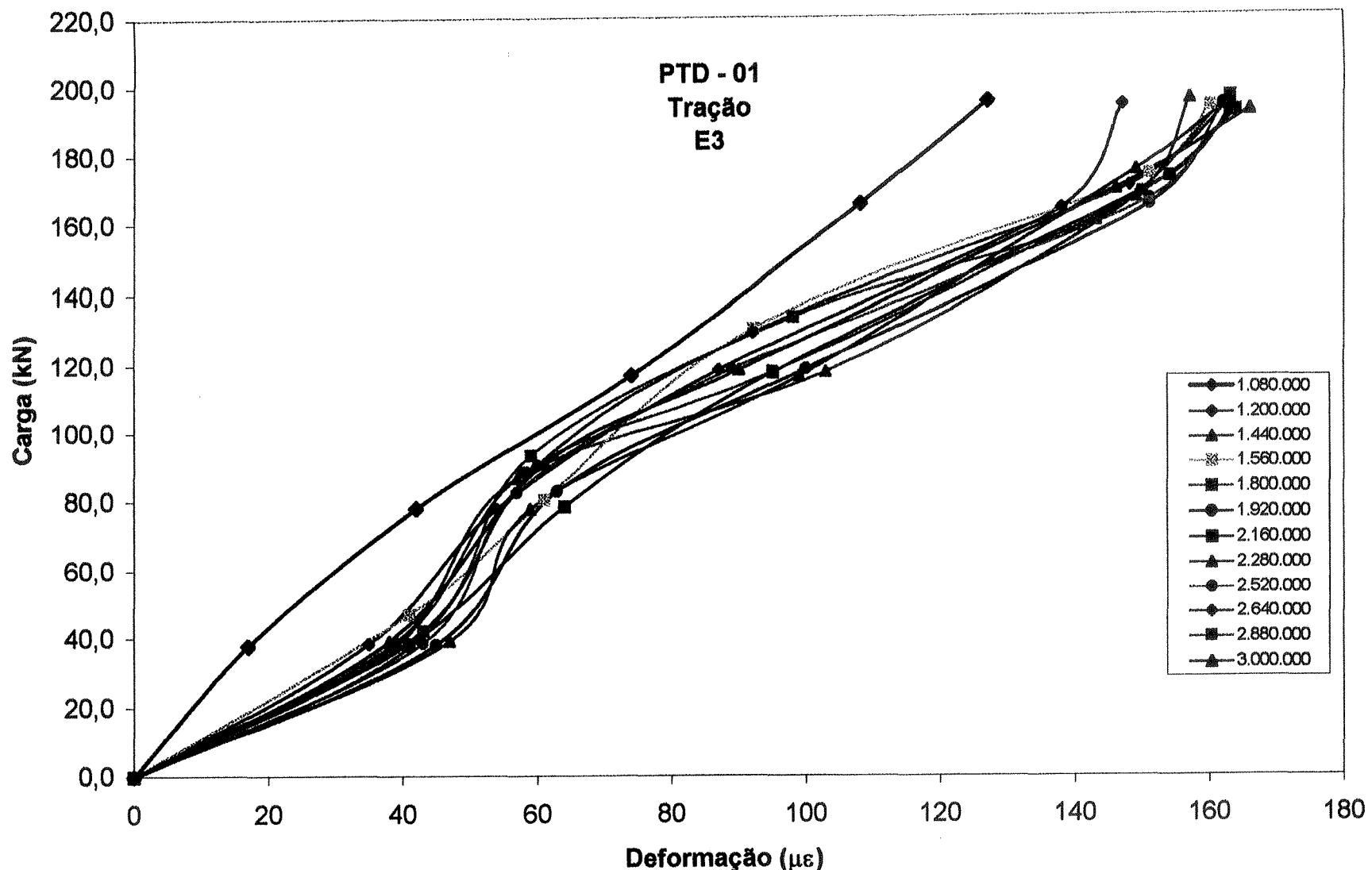
<sup>11</sup> Valor das deformações específicas obtidas por BALLARIN em 1.080.000 ciclos.

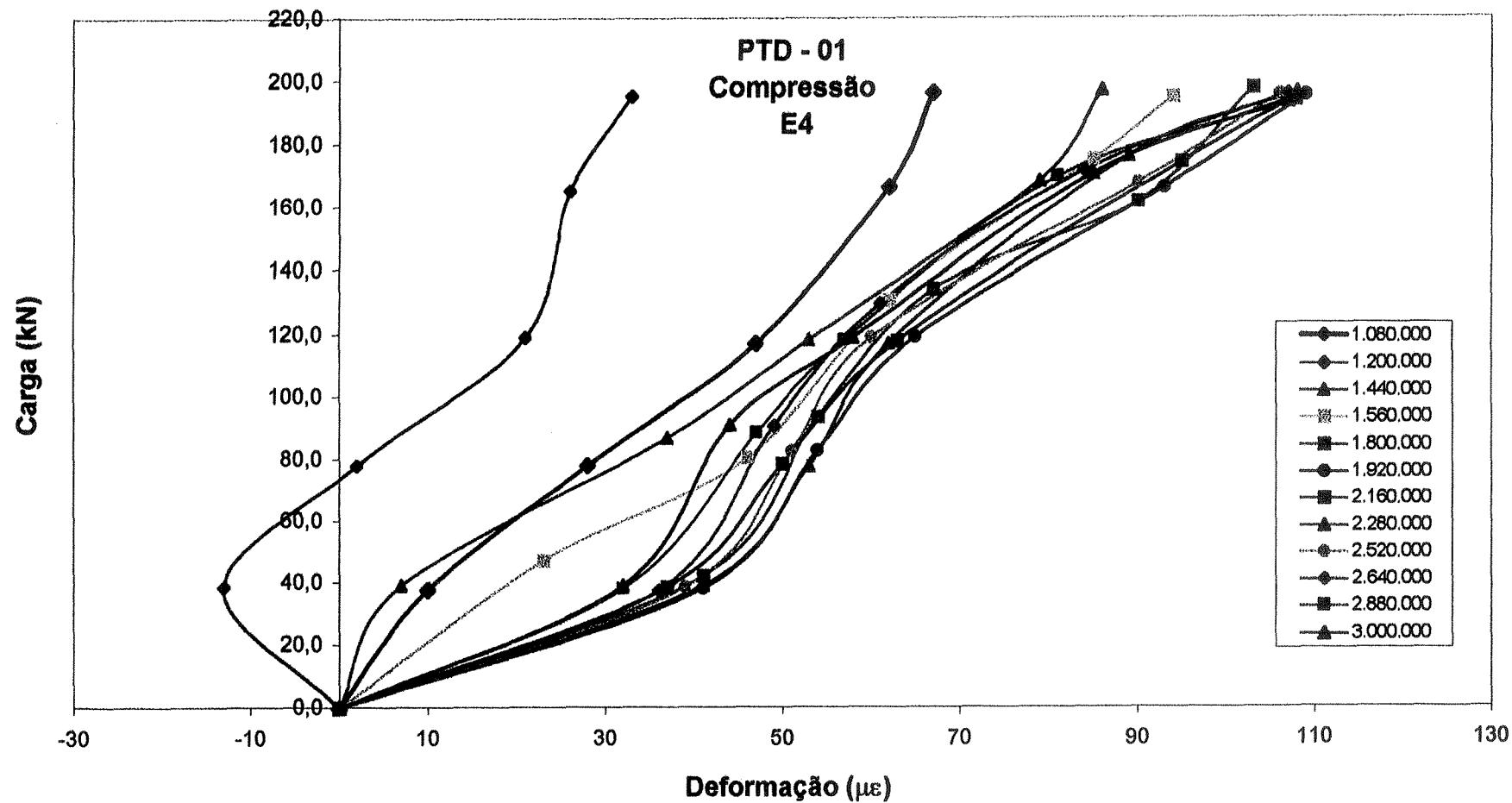
**Tabela-12 - Deformações específicas ocorridas nas etapas dos ensaios dinâmicos - Dormente STD - 01 (continuação)**

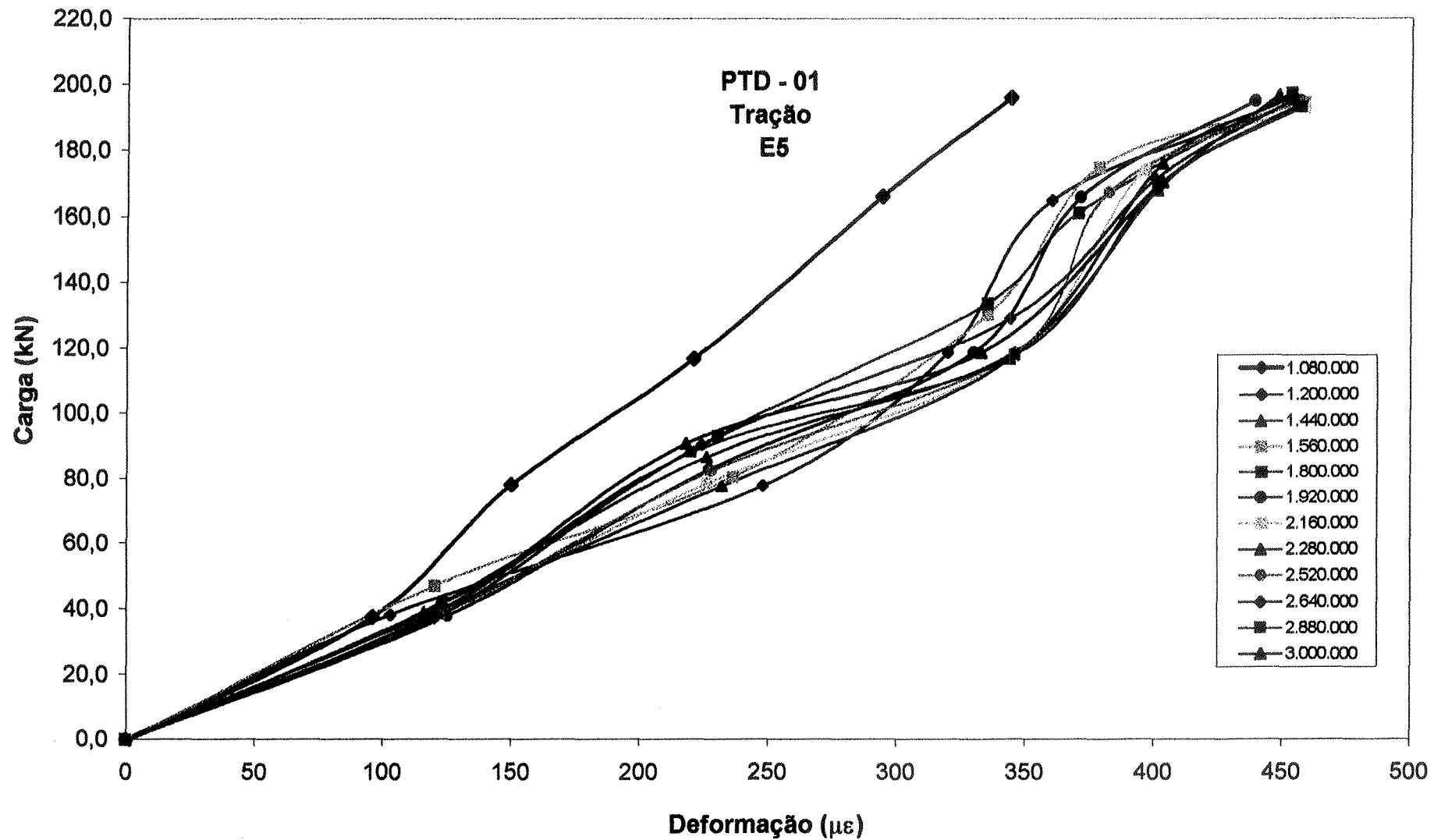
Ciclos	Carga Teórica	Carga Efetiva	Deformações ( $\mu\epsilon$ )																	
			E1		E2		E3		E4		E6		E8		R1V	R1H	R1D	R2V	R2H	R2D
			Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tração	Compressão	Tracão	Compressão	Compressão	Tracão	Compressão	Compressão	
2.160.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	não lido	0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	37,3	103	15	58	-6	-4	150				-11	157	-36	26	-48				
	80	77,6	187	67	127	12	61	199				56	260	-110	48	-125				
	120	123,1	259	109	165	43	107	216				83	287	-163	70	-172				
	170	164,2	291	183	196	65	159	256				97	333	-211	79	-222				
	200	195,3	316	235	212	67	299	282				118	391	-268	106	-291				
2.280.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	37,7	99	12	55	-3	-1	153				-7	156	-45	29	-57				
	80	72,6	185	72	130	19	67	208				51	248	-97	56	-117				
	120	121,7	252	114	161	55	103	227				82	267	-175	75	-183				
	170	168,2	287	186	192	72	150	264				97	301	-216	90	-247				
	200	196,6	316	233	217	83	293	291				103	366	-266	116	-307				
2.520.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	38,8	101	9	51	-4	-3	149				-10	143	-30	25	-68				
	80	87,5	183	78	127	22	56	215				50	233	-113	50	-139				
	120	130	243	110	165	58	100	231				87	260	-169	76	-196				
	170	168,7	287	189	203	77	153	263				93	294	-206	87	-261				
	200	198,5	338	236	252	89	288	297				100	352	-270	107	-301				
2.640.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	38,4	97	6	45	-6	-5	153				-12	138	-28	19	-72				
	80	72,2	180	81	116	23	49	211				45	227	-119	46	-127				
	120	118,3	245	113	159	58	97	234				80	241	-177	73	-201				
	170	165,7	300	191	210	79	150	273				78	283	-214	94	-273				
	200	194,5	373	235	265	93	276	301				103	343	-265	116	-323				
2.880.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	43,8	98	7	43	-5	-7	147				-19	142	-26	23	-86				
	80	77,2	177	79	118	17	43	219				43	189	-114	53	-129				
	120	118,6	241	117	163	61	86	243				77	239	-165	71	-195				
	170	167,7	299	197	215	76	143	285				85	297	-216	89	-265				
	200	195,8	363	235	270	87	265	301				93	363	-259	117	-317				
3.000.000	0	0,0	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0	
	40	38,6	103	5	45	-3	-9	151				-22	145	-23	20	-83				
	80	69,3	183	63	122	19	40	227				40	191	-123	57	-128				
	120	118,7	244	119	174	59	89	251				70	230	-163	77	-205				
	170	168,5	301	195	221	73	145	288				84,6	301	-218	94	-278				
	200	194,5	371	236	275	82	259	310				106	365	-257	115	-325				

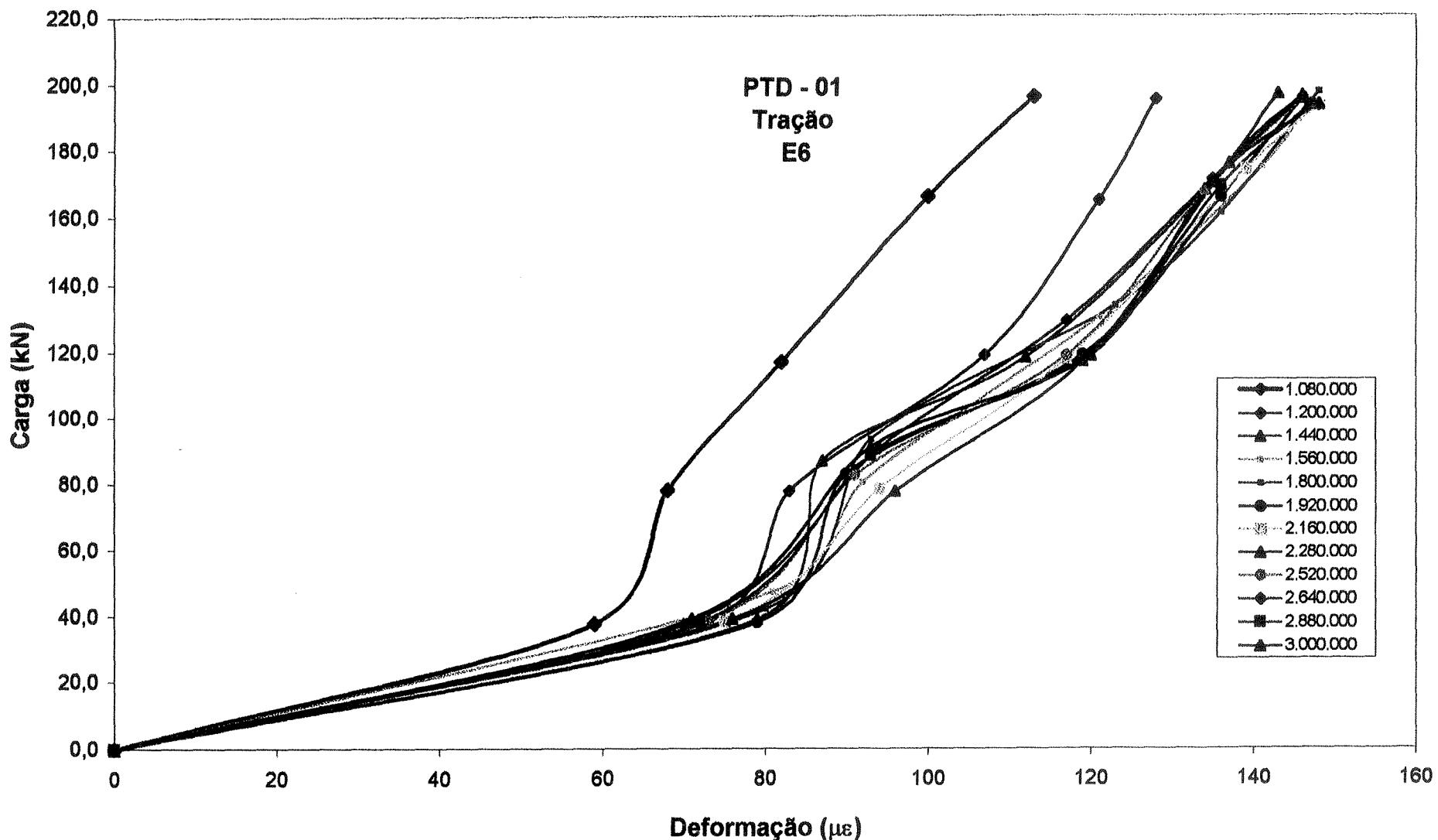


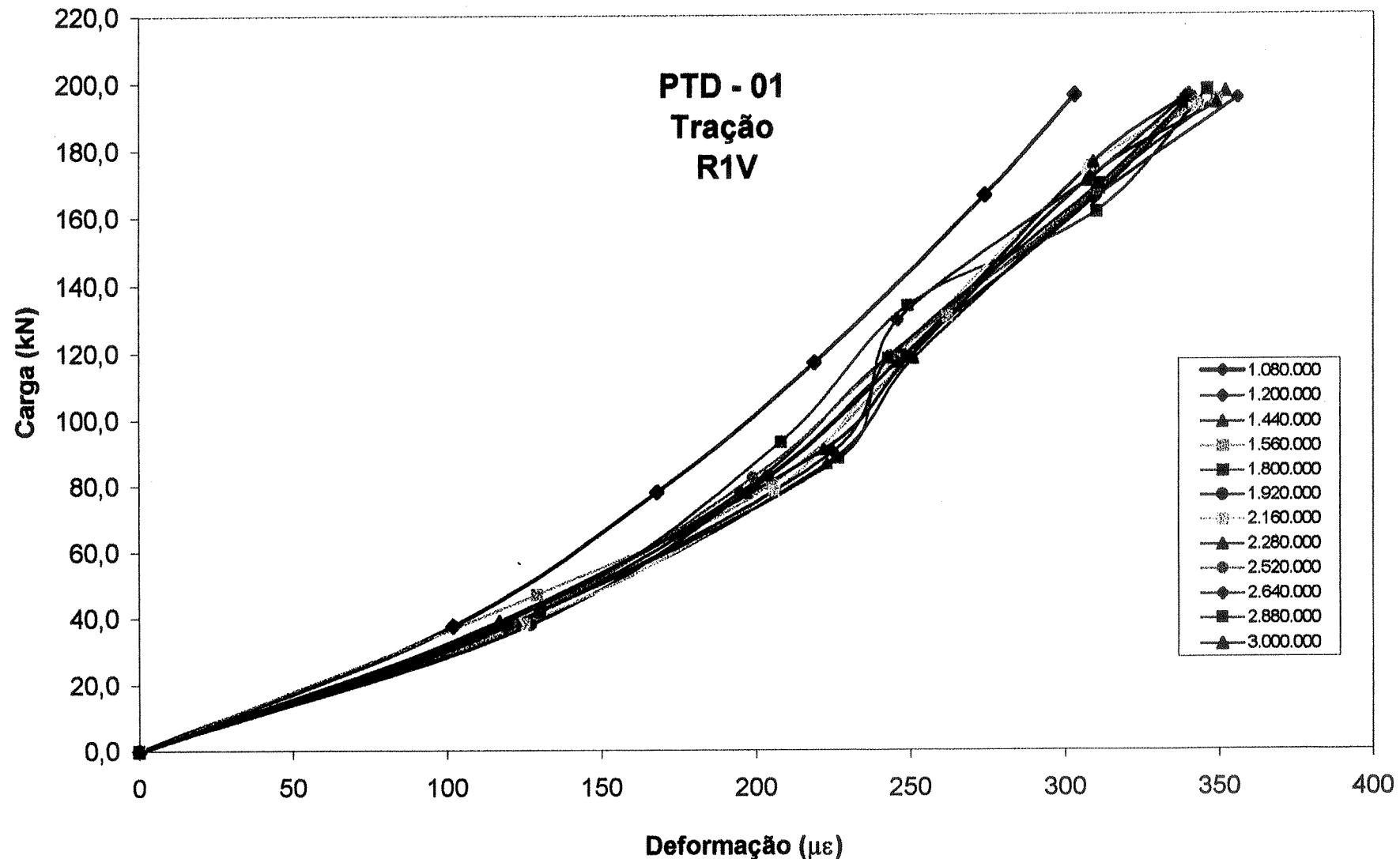


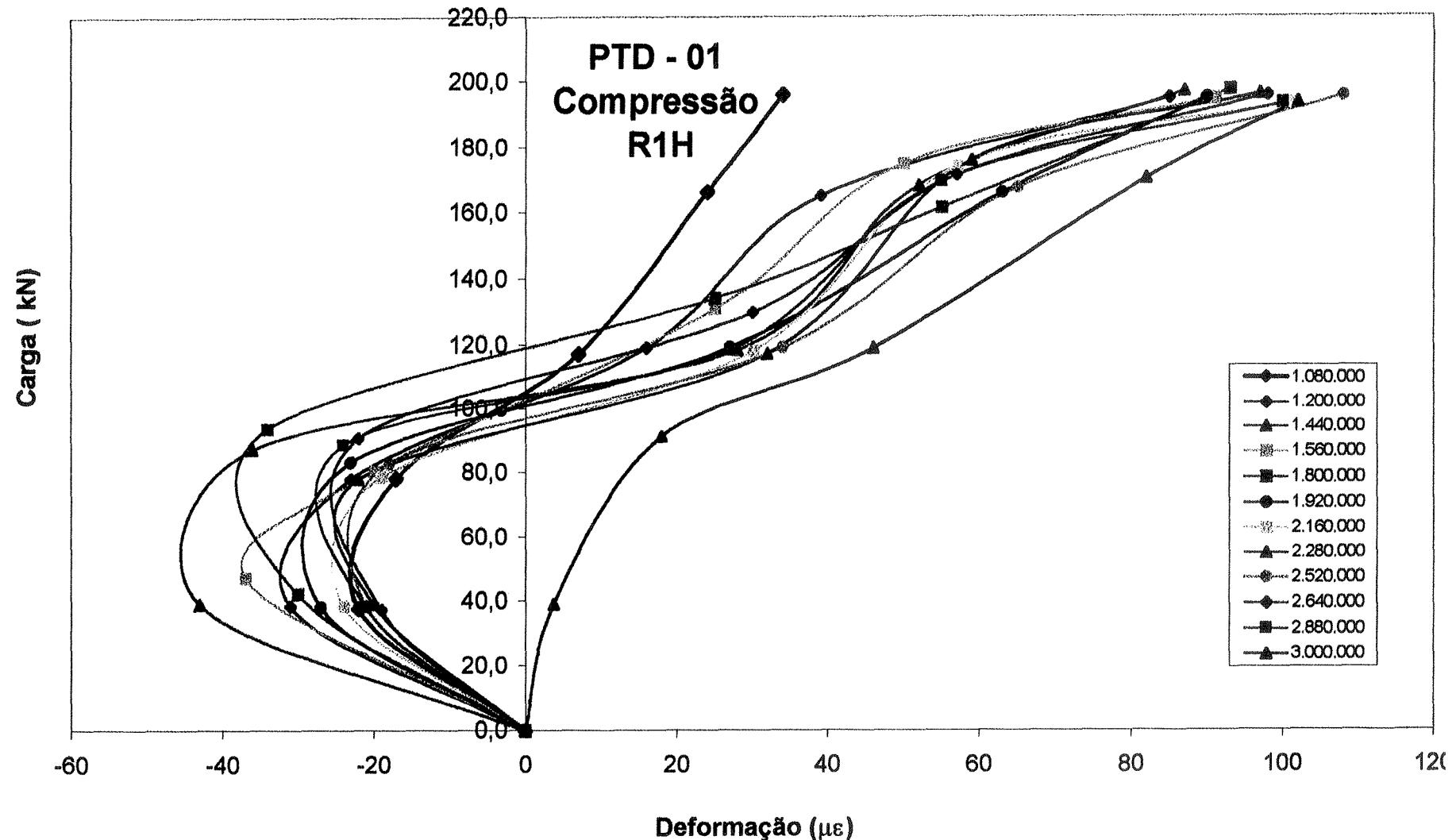


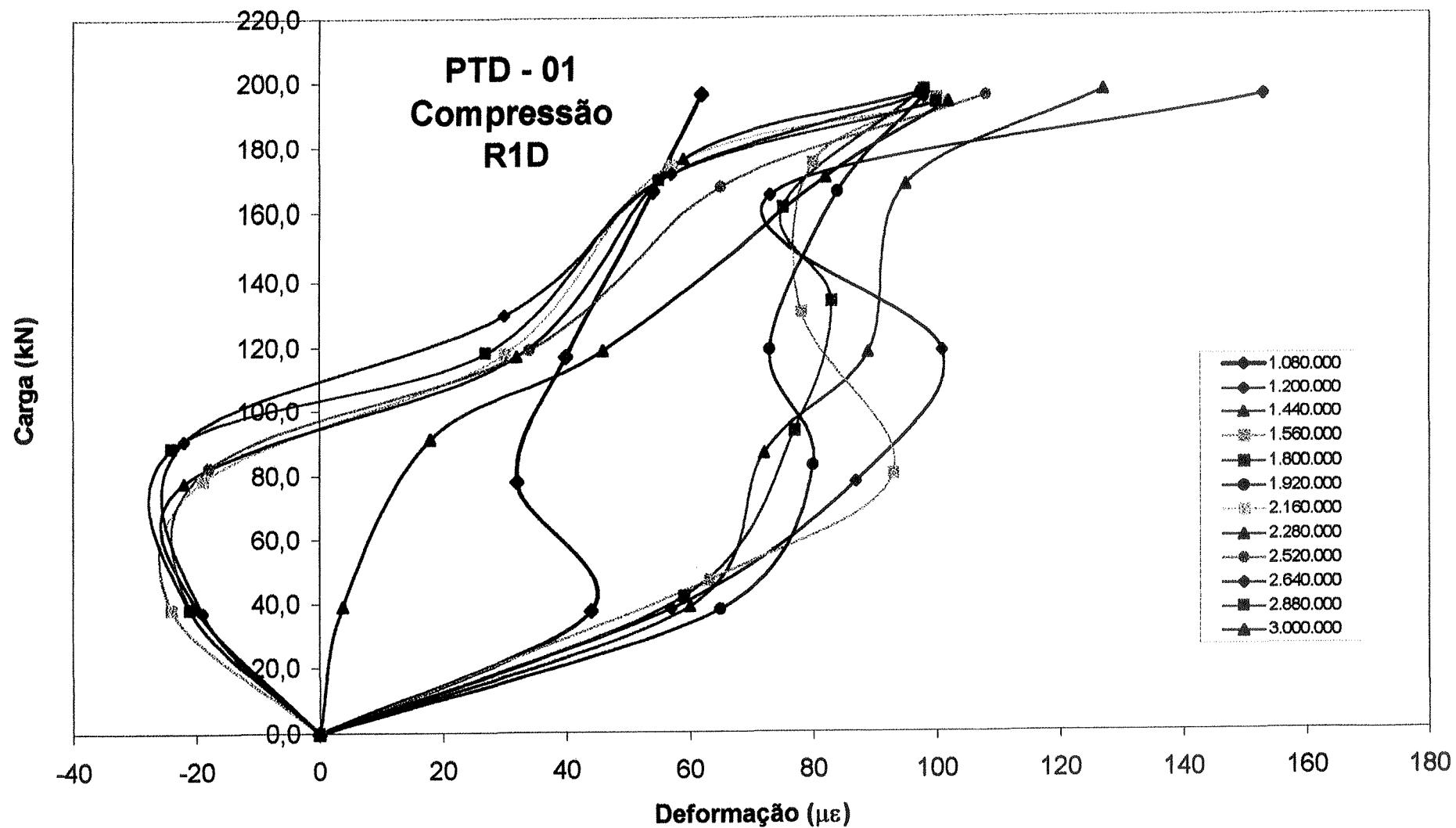


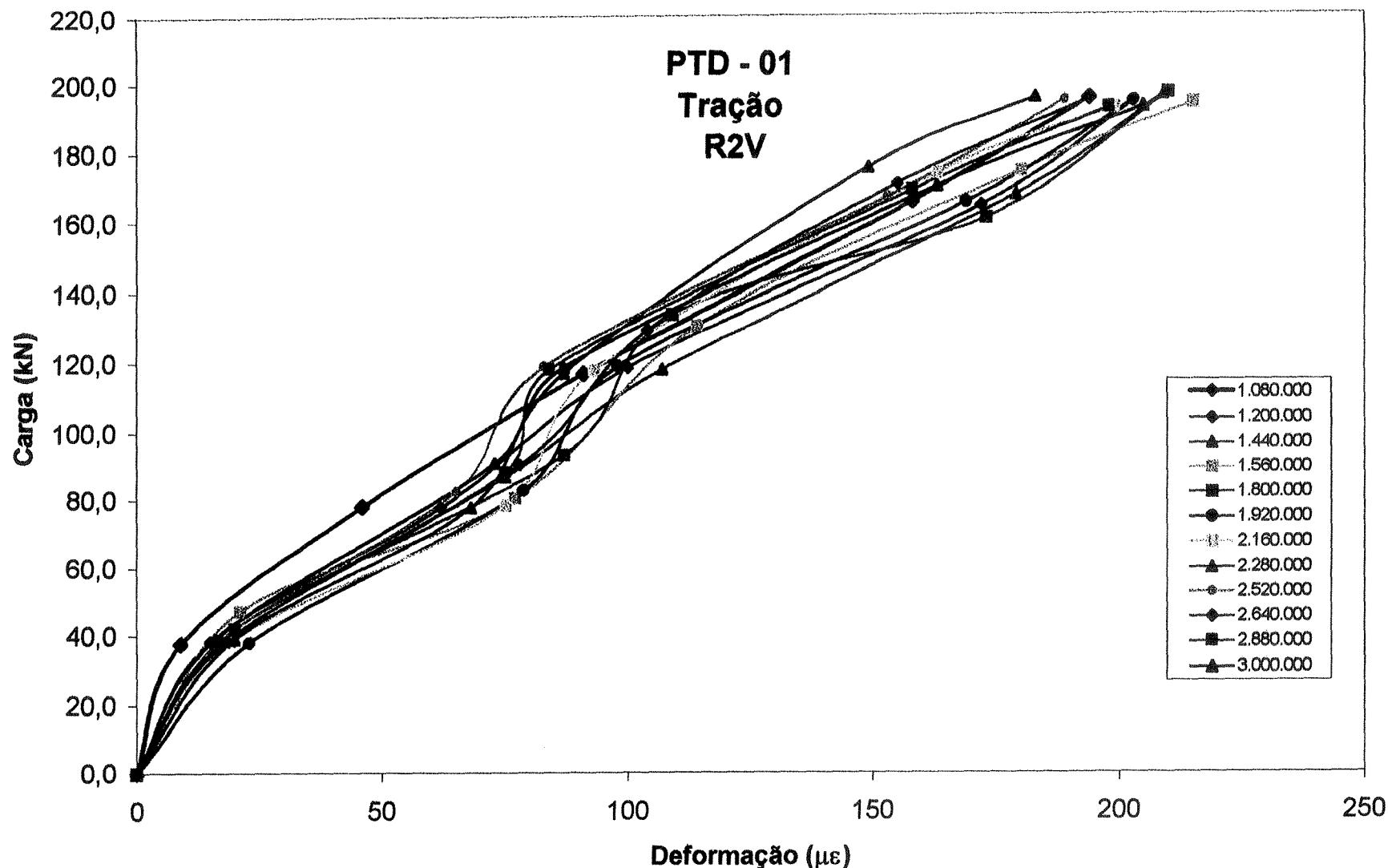


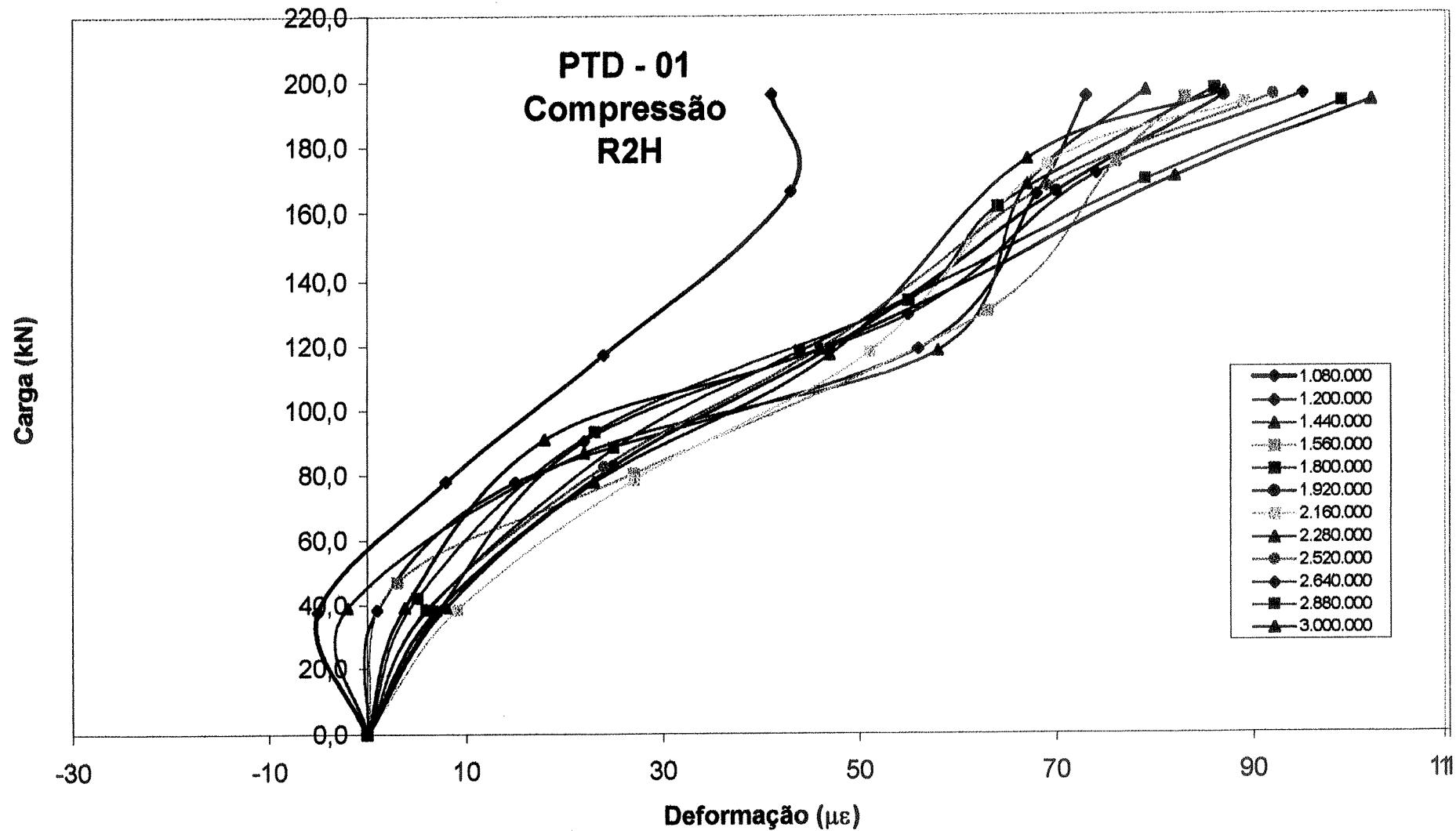


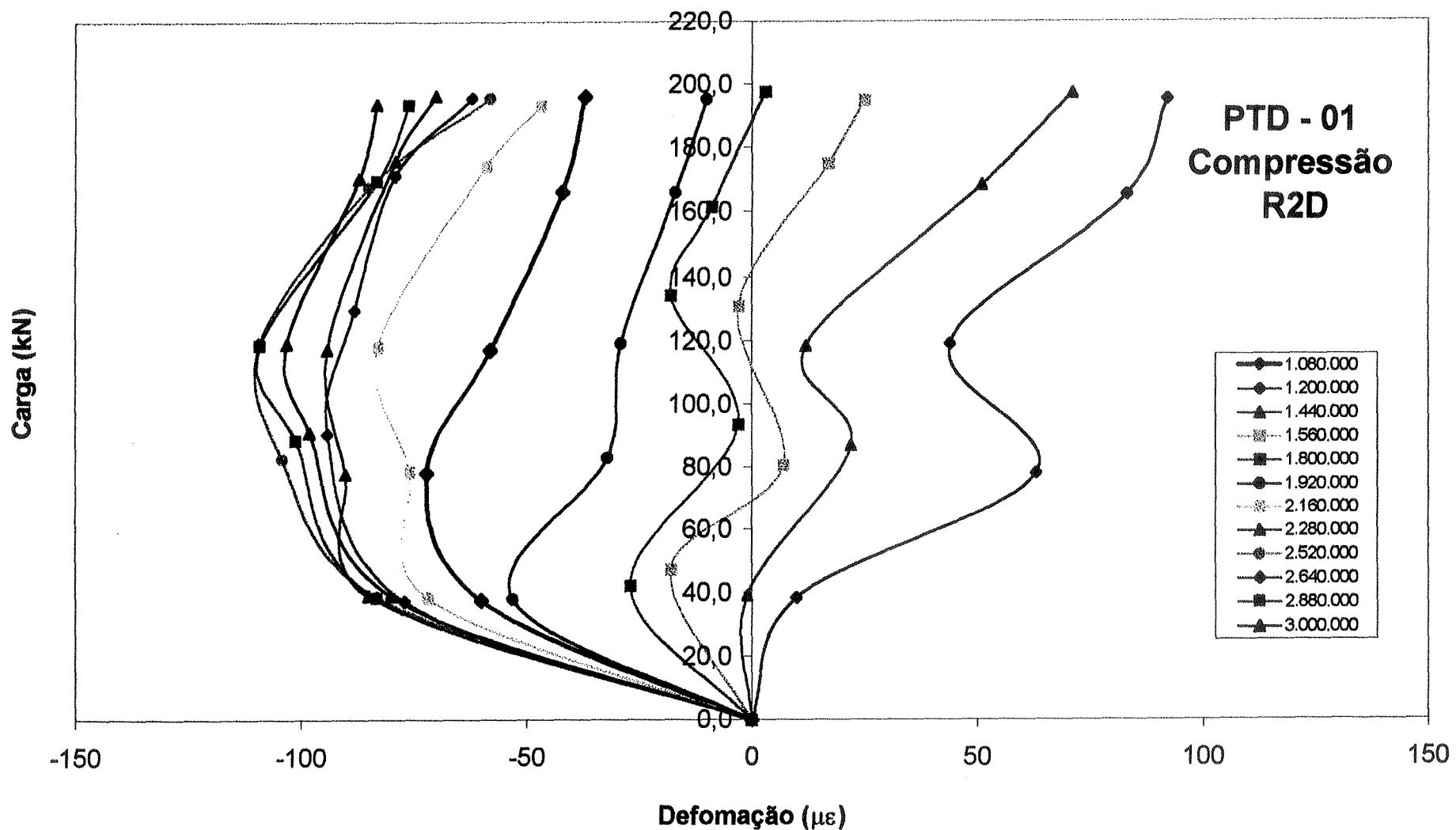


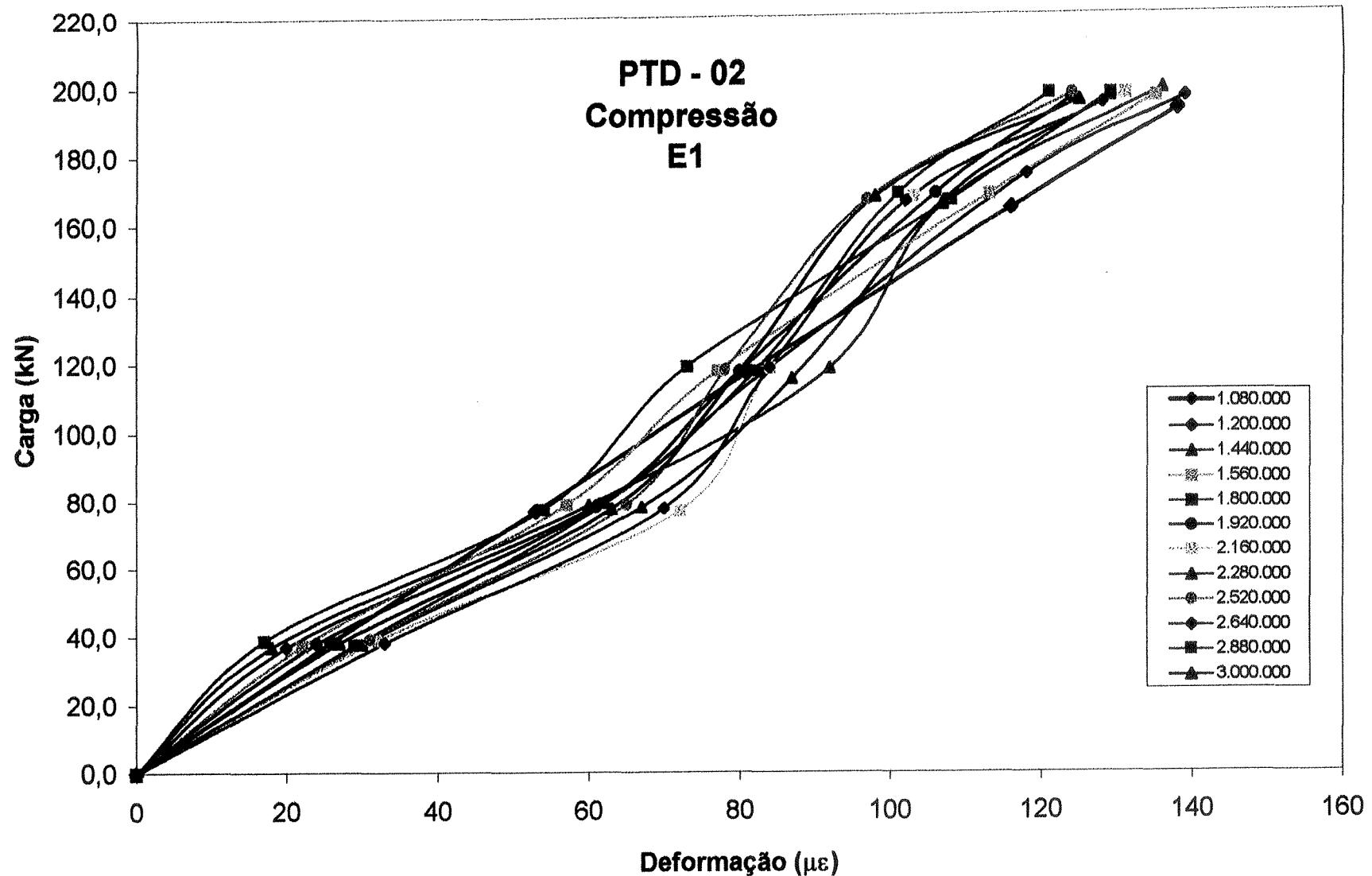


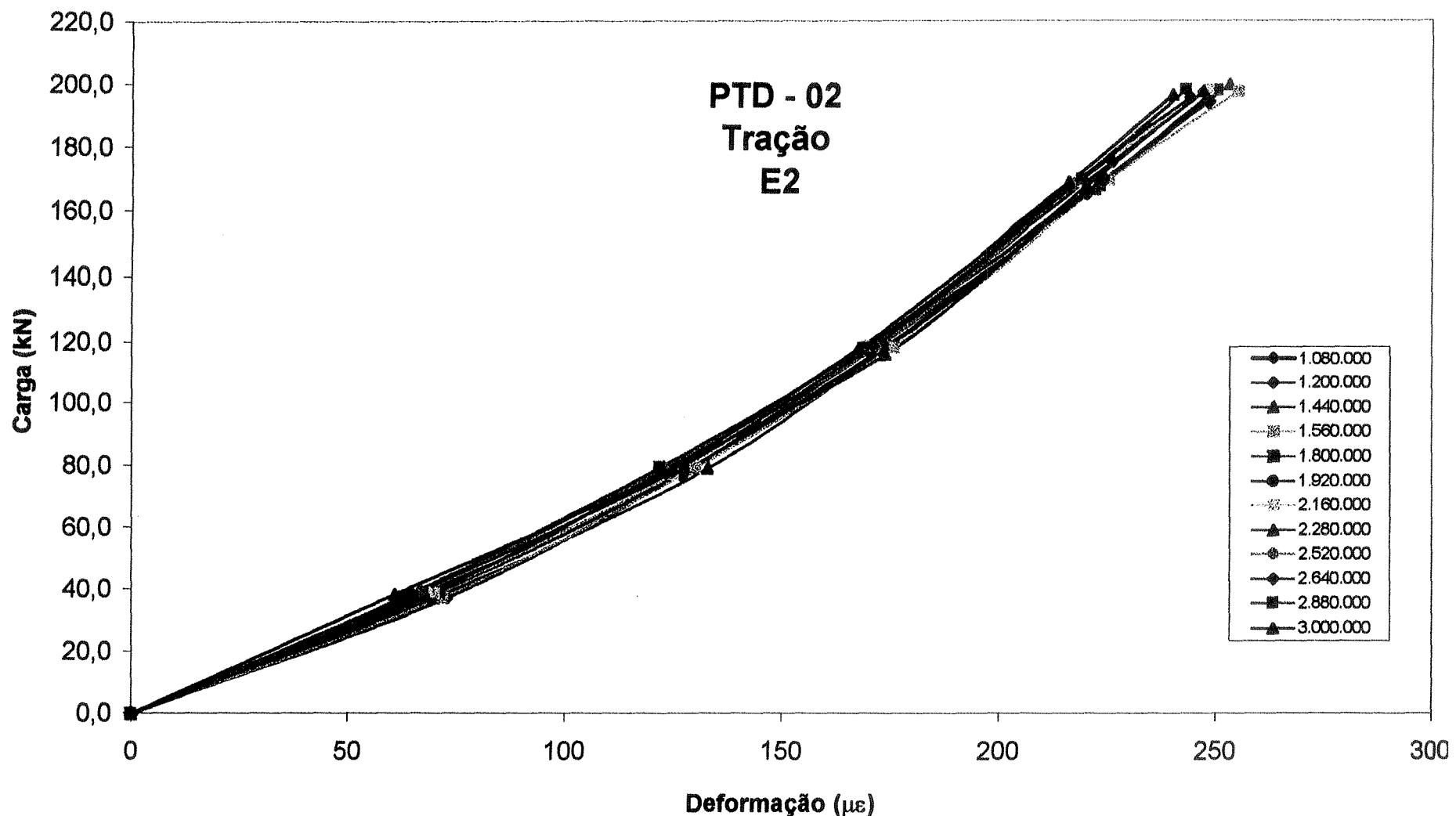


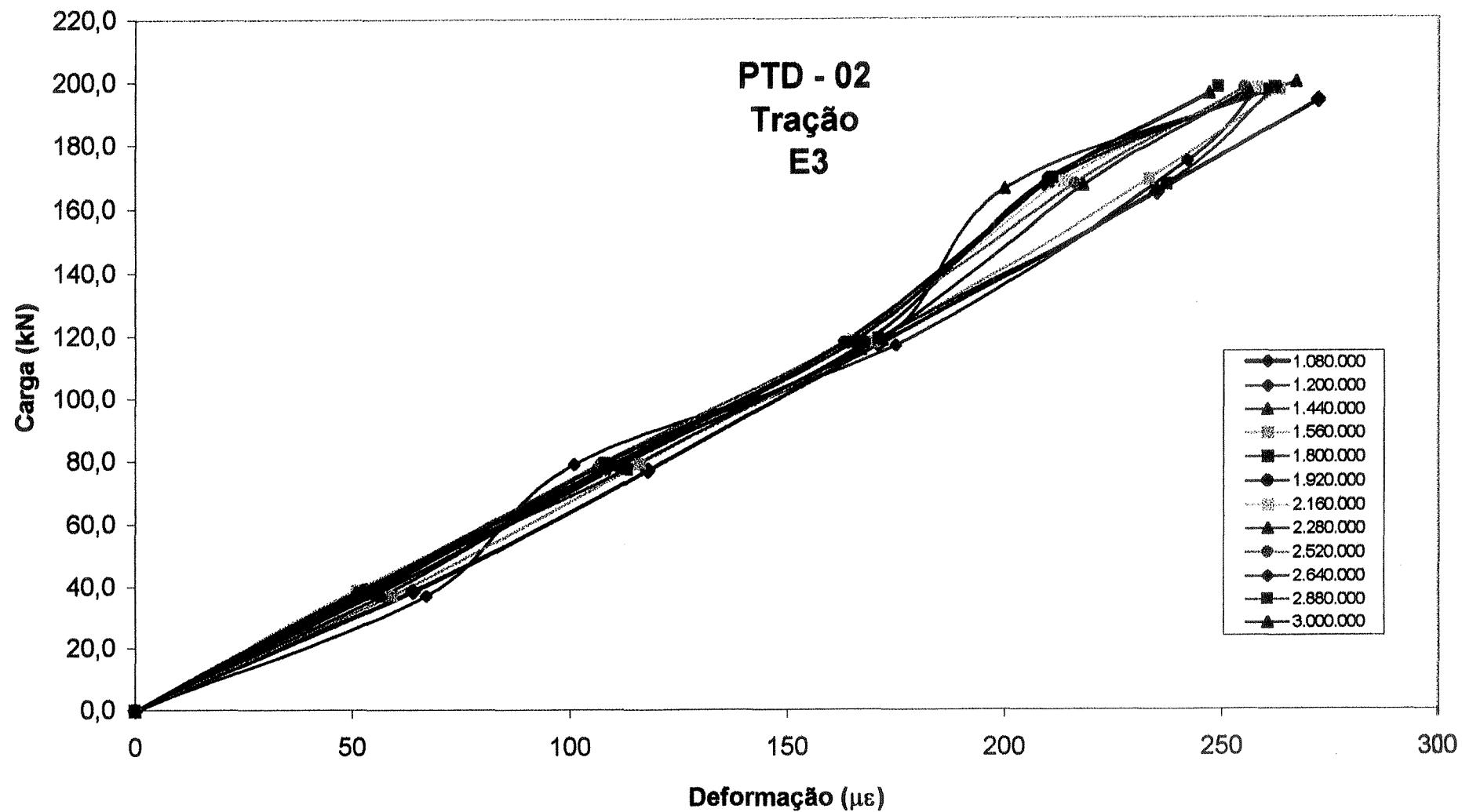


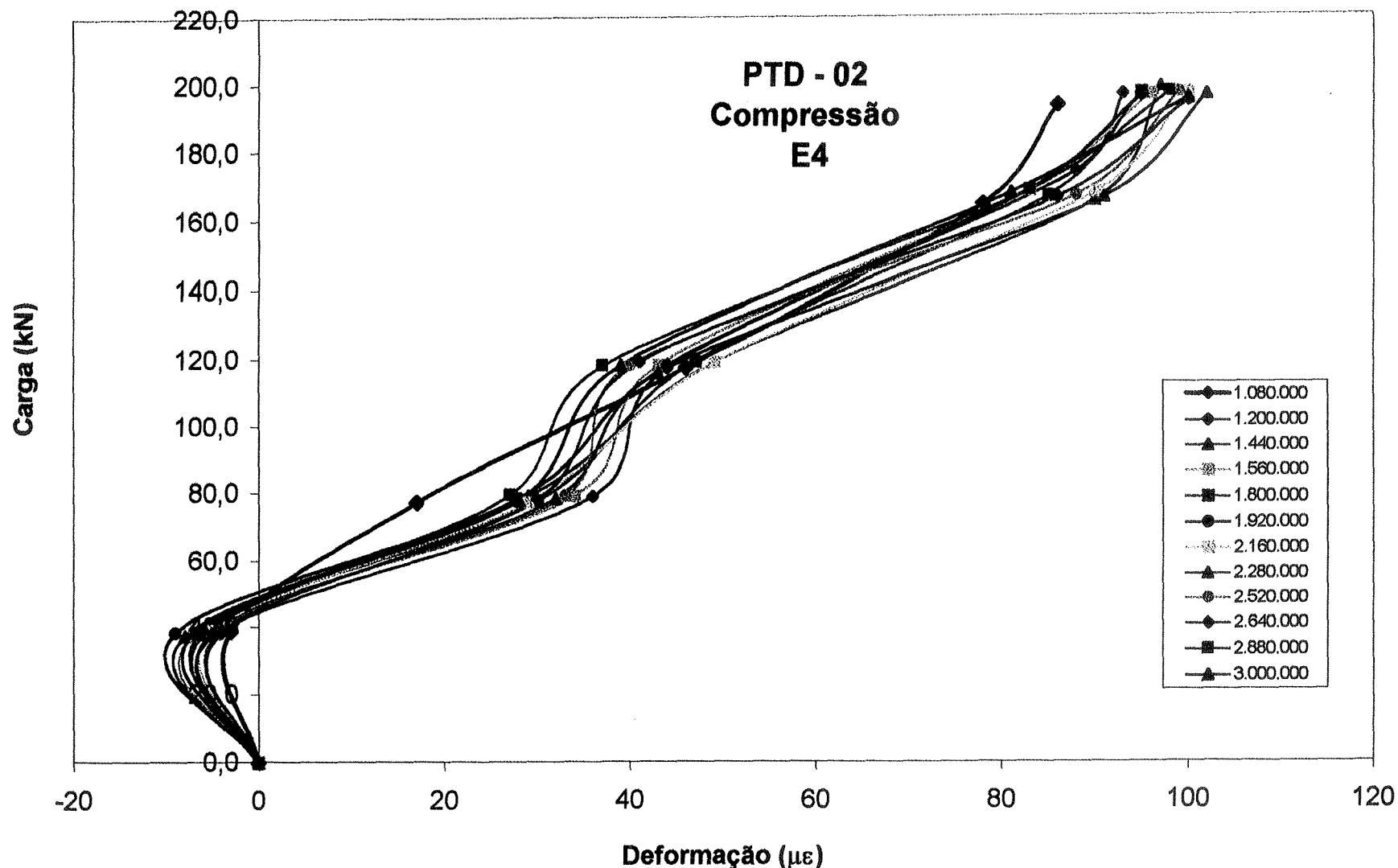












## Análise do comportamento mecânico de dormentes de *E. citriodora*

### Resultado dos ensaios dos dormentes

