

Ministério da Educação e do Desporto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais

Estudo de Tensões em Rodas Ferroviárias

Rosa Irene Terra Pinto
Engenheira Mecânica

Porto Alegre

1997

Ministério da Educação e do Desporto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,
Metalúrgica e de Materiais

Estudo de Tensões em Rodas Ferroviárias

Rosa Irene Terra Pinto
Engenheira Mecânica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM.

Porto Alegre

1997

Estudo de Tensões em Rodas Ferroviárias

DISSERTAÇÃO

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais- PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Por:

Rosa Irene Terra Pinto
Engenheira Mecânica

1997

iii

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Ciência dos Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Francisco José Kiss, PPGEM, UFRGS

Prof. Dr. Henner Alberto Gomide, DEM, UFU

Prof. Dr. Waldir Terra Pinto, DMC, FURG

Coordenador do PPGEM:

Prof. Dr. Luis Frederico Pinheiro Dick

Agradecimentos

Em um trabalho como este, muitas pessoas auxiliam, seja de forma direta ou não. Assim, tenho realmente muito a agradecer.

À CAPES e ao CNPq.

Ao Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker.

Ao Prof. Dr. Francisco José Kiss.

Aos colegas do LAMEF e do GAT em particular.

Especialmente aos amigos Gilnei Furtado Leticia Guimarães, Rubem e Gabriel Pardo.

Ao amigo Jurani e seu sorriso que nos deixaram tão cedo e com tanta saudade.

Aos meus Pais, Francisco e Irene, no fundo os grandes responsáveis pela minha história e por ser quem sou.

Aos meus irmãos Ana e Waldir, caríssimos e inspiradores.

A Emerson, meu amigo e companheiro inseparável em todos os momentos. Não bastasse ter sido o maior colaborador técnico deste trabalho, tornou possível nossa maior realização, nosso filho.

A essa energia forte e misteriosa a qual costumamos chamar Deus, que torna tudo possível, inclusive a vida.

*São os homens eternamente
inconformados que tornam possível o
desenvolvimento da humanidade por buscarem sempre mais.
(adaptação livre)*

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE O CONTATO MECÂNICO EM RODAS FERROVIÁRIAS	4
3.1 UTILIZAÇÃO E DEFEITOS EM RODAS FERROVIÁRIAS	4
3.2 TENSÕES DE CONTATO	8
3.2.1 <i>Determinação das tensões de contato</i>	9
3.3 O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	15
3.3.1 <i>Considerações gerais</i>	16
3.3.2 <i>O Método de elementos finitos aplicado a problemas de contato</i>	17
3.3.3 <i>O programa ABAQUS</i>	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 DETERMINAÇÃO DO MATERIAL E SUAS PROPRIEDADES	19
4.2 ENSAIO COM O MATERIAL SINTÉTICO	22
4.2.1 <i>Construção do corpo de prova</i>	23
4.2.2 <i>Realização dos ensaios</i>	25
4.4 MÉTODOS COMPUTACIONAIS	27
4.4.1 <i>Modelo finito - Ensaio</i>	27
4.4.2 <i>Modelo finito - Roda 38"/trilho</i>	29
4.4.3 <i>Modelo finito - Condições de contorno</i>	29
4.4.4 <i>Considerações sobre o modelamento</i>	29

5. RESULTADOS	31
5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	31
5.2. RESULTADOS DA ANÁLISE COMPUTACIONAL	42
5.2.1 <i>Resultados referentes à roda em resina</i>	43
5.2.2 <i>Resultados referentes ao contato roda-trilho em aço</i>	48
6. DISCUSSÃO	53
7. CONCLUSÕES	57
8. SUGESTÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE - LISTAGEM DO ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS PARA O PROGRAMA ABAQUS	62

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 - Composição dos materiais sintéticos testados	20
TABELA 4.2 - Propriedades do material escolhido, A	21
TABELA 4.3 - Dimensões dos modelos finitos gerados	28
TABELA 5.1 - Resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, em deformação relativa ..	32
TABELA 5.2 - Resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, em deformação relativa ..	34
TABELA 5.3 - Resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, em deformação relativa ..	37
TABELA 5.4 - Resultados do ensaio 02 do corpo de prova 03, em deformação relativa ..	40
TABELA 5.5 - Coordenadas dos nós utilizados para monitorar a deformação na análise ..	43

Lista de Figuras

FIGURA 3.1 - Ilustração da geometria de parte de uma roda ferroviária, representada por meio de uma malha de elementos finitos	5
FIGURA 3.2 - Esquema das componentes de carga em uma roda ferroviária [8]	6
FIGURA 3.3 - Ampliação da seção transversal do aro de uma roda ferroviária com spalling [2]	7
FIGURA 3.4 - Seção transversal do aro de uma roda ferroviária com shelling	7
FIGURA 3.5 - Análise de tensões de contato	11
FIGURA 3.6 - Linha de contato entre corpos cilíndricos	11
FIGURA 3.7 - Curvas mostrando a variação das tensões principais, máxima tensão cisalhante e tensão cisalhante octaédrica com a variação da distância da superfície de contato, $\nu = 0,25$	13
FIGURA 3.8 - Coeficientes de tensão e deflexão para dois corpos em contato num ponto	14
FIGURA 4.1 - Modelo em resina epóxi do corpo de prova	23
FIGURA 4.2 - Esquema da montagem para posicionamento dos extensômetros no corpo de prova	24
FIGURA 4.3 - Montagem do molde	24
FIGURA 4.4 - Vista dos extensômetros dentro do corpo de prova pronto	25
FIGURA 4.5 - Montagem do ensaio	26
FIGURA 4.6 - detalhe do corpo de prova sob carga	26
FIGURA 4.7 - Malha de elementos finitos. (a) Corpo de prova (b)Conjunto roda-trilho ...	28
FIGURA 5.1 - Sistema de referência utilizado no ensaio	31
FIGURA 5.2 - Esquema do posicionamento dos extensômetros no corpo de prova	32
FIGURA 5.3 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, deformações tangenciais	33
FIGURA 5.4 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, deformações longitudinais	33
FIGURA 5.5 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, deformações radiais	34

FIGURA 5.6 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações tangenciais	35
FIGURA 5.7 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações longitudinais	35
FIGURA 5.8 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações radiais	36
FIGURA 5.9 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, deformações tangenciais	38
FIGURA 5.10 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, deformações longitudinais	38
FIGURA 5.11 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, deformações radiais	39
FIGURA 5.12 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações tangenciais	41
FIGURA 5.13 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações longitudinais	41
FIGURA 5.14 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações radiais	42
FIGURA 5.15 - Gráfico dos resultados do modelamento do corpo de prova, deformações tangenciais	43
FIGURA 5.16 - Gráfico dos resultados do modelamento do corpo de prova, deformações longitudinais	44
FIGURA 5.17 - Gráfico dos resultados do modelamento do corpo de prova, deformações radiais	44
FIGURA 5.18 - Distribuição das deformações na direção tangencial	45
FIGURA 5.19 - Distribuição das deformações na direção radial	45
FIGURA 5.20 - Distribuição das deformações na direção longitudinal	46
FIGURA 5.21 - Distribuição da tensão cisalhante S_{12}	46
FIGURA 5.22 - Distribuição da tensão equivalente de Tresca	47
FIGURA 5.23 - Deformada do corpo de prova	47
FIGURA 5.24 - Detalhe da ampliação utilizada para visualização dos resultados da análise computacional	48

FIGURA 5.25 - Distribuição da tensão cisalhante no plano de simetria da roda ferroviária	49
FIGURA 5.26 - Distribuição das deformações radiais na roda ferroviária	49
FIGURA 5.27 - Distribuição das deformações tangenciais (direção do rolamento)	50
FIGURA 5.28 - Distribuição das deformações transversais ao raio da roda ferroviária e à direção de rolamento	50
FIGURA 5.29 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises	51
FIGURA 5.30 - Distribuição da tensão equivalente de Tresca	51
FIGURA 5.31 - Área de contato, distribuição de pressão	52
FIGURA 5.23 - Deformada da roda ferroviária	52
FIGURA 6.1 - Detalhe do corpo de prova em resina após o ensaio, houve nucleação de uma trinca interna	54

Lista de Símbolos

Lista de Símbolos

A, B -	coeficientes funções positivas determinadas por Hertz
C_{σ} , C_{τ} , C_G -	coeficientes de tensão
a -	raio maior da elipse
b -	raio menor da elipse
c _{press} -	pressão de contato
d -	distância de contato
E -	módulo de elasticidade
E_{11} -	deformação na direção 1
E_{22} -	deformação na direção 2
E_{33} -	deformação na direção 3
l, m, n -	normais unitárias dos eixos principais x, y e z, respectivamente
Mises -	tensão equivalente de von Mises
Tresca -	tensão equivalente de Tresca
P -	força
R_1 , R_2 -	raios de curvatura
S_{12} -	tensão cisalhante σ_{xy}
u_1 , u_2 -	direções auxiliares
x -	coordenada na direção xx ou direção 1
y -	coordenada na direção yy ou direção 2
z -	coordenada na direção zz ou direção 3, linha de ação da força P
z_1 , z_2 -	distâncias medidas na direção zz ou 3
α -	ângulo entre os planos que contém o raio de curvatura de dois corpos em contato
σ_{xx} -	tensão principal em x
σ_{yy} -	tensão principal em y
σ_{zz} -	tensão principal em z
σ_{xy} -	tensão cisalhante
σ_r -	tensão de ruptura
τ_{\max} -	tensão cisalhante máxima

- τ_{oct} - tensão cisalhante octaédrica
- τ_o - tensão cisalhante ortogonal
- Δ - relação entre os raios de curvatura, módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson de dois corpos em contato
- ν - coeficiente de Poisson

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre a distribuição de tensões em rodas ferroviárias, a fim de detectar a fonte primária dos defeitos superficiais e subsuperficiais que ocorrem neste componente. O desenvolvimento do trabalho foi baseado na utilização de uma ferramenta computacional constituída pelo Programa de Elementos Finitos ABAQUS, o qual permitiu o modelamento do contato roda-trilho. Paralelamente à simulação foram realizados ensaios experimentais em modelos simplificados construídos em uma resina sintética contendo extensômetros elétricos resistivos em seu interior, a fim de aferir o modelamento. As propriedades reais do material sintético já haviam sido determinadas em um trabalho anterior, e puderam, então, ser utilizadas diretamente na simulação computacional. As deformações calculadas pela análise computacional foram comparadas com as deformações medidas nos ensaios experimentais. A partir da existência da correlação entre estes resultados, as deformações e tensões calculadas para o conjunto roda-trilho, em aço, puderam ser avaliados e discutidos.

Abstract

The Aim of this work is the study of the stress distribution in railway wheels in order to detect the primary source of surface and subsurface damage that occur in the wheel. The development of the study has been based in the evaluation of the wheel/rail contact stresses by Finite Element Method using the program ABAQUS/Aqua. Besides, synthetic material specimens has been constructed with inner strain gages so that the strain concentration could be compared with computational analysis results. Since the correlation between both approaches has been determined, the stresses and strains calculations for wheel/rail contact model could be assessed and discussed. Finally, these results was related with the failure mechanisms models considered in the case of the wheel/rail contact.

1 Introdução

Existem, no Brasil, várias ferrovias cuja utilização principal é o escoamento de minérios, sobretudo o minério de ferro. Entre elas enquadra-se a Estrada de Ferro Carajás (EFC), da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), ligando as minas de minério ferro da Serra de Carajás no Pará ao porto de Itaqui no Maranhão. A linha da EFC tem, aproximadamente, 900km, operando com uma carga média de 120t por vagão (cerca de 1200kN/vagão), a uma velocidade entre 60 e 80km/h. A temperatura ambiente média é de 35°C. A estas condições de operação bastante severas somam-se as inclinações da via, condição na qual os freios precisam ser acionados.

Por si, as condições de montagem da via (trilhos) já mereceria atenção sob a forma de uma série de estudos sobre tensão da linha, processos de soldagem dos segmentos de trilho, material, etc. No entanto, inúmeros problemas tanto ou mais urgentes tem surgido no par de componentes roda/trilho. Inclui-se como problemas tanto dos trilhos quanto das rodas o shelling (espécie de escamação da superfície de contato) e a excessiva deformação plástica das camadas superficiais. A roda tem ainda um outro problema que gera a escamação de sua superfície, o spalling. Podem ocorrer outros problemas de origem térmica como a flambagem, a fadiga térmica, formação de pits, os quais podem transformar-se em spalls. Como o custo deste componente é significativo, uma vez que danos no mesmo acarretam prejuízos à linha permanente (trilhos), além do problema de segurança operacional, torna-se essencial aumentar sua vida útil.

A maioria dos trabalhos realizados referem-se ao estudo dos trilhos e dos aspectos térmicos dos problemas das rodas, pois as solicitações oriundas da frenagem são extremamente altas. No entanto, pouco tem sido feito sob o ponto de vista do contato em rodas ferroviárias, embora hoje este seja reconhecidamente [1][2][3] o principal fator de geração e propagação de defeitos, em função da alta frequência do carregamento.

Por estes motivos este trabalho é dedicado ao estudo do contato roda/trilho, com ênfase às rodas. O objetivo é elaborar uma correlação entre os defeitos existentes em

rodas ferroviárias, principalmente o shelling, e o campo de tensões devido ao contato roda/trilho, determinando a área e a pressão de contato através da análise por Elementos Finitos, métodos analíticos comparando os resultados com os obtidos em ensaios experimentais.

Para tanto o trabalho foi estruturado de modo a relacionar as técnicas computacionais e experimentais para definir os pontos mais propícios à nucleação de defeitos sob o ponto de vista mecânico, isto é, considerando as regiões de concentração de tensão. A partir destes resultados será possível estabelecer a relação entre os defeitos encontrados na EFC com o carregamento utilizado.

Assim, no capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica resumida dos problemas frequentes em rodas ferroviárias, da teoria da elasticidade aplicada ao contato e da técnica computacional empregada.

O capítulo 4 é dedicado à descrição das técnicas experimentais e computacional empregadas. A primeira parte deste capítulo refere-se à qualificação de um material capaz de possibilitar a utilização de extensometria para a obtenção de deformações internas aos corpos de prova. Embora esta etapa não corresponda ao objetivo deste trabalho, foi de fundamental importância para a realização do mesmo, o que fica evidenciado no decorrer do texto com a descrição da construção dos corpos de prova, realização dos ensaios e das simulações numéricas.

Os resultados do ensaios e das simulações são apresentados o longo do capítulo 5 e discutidos no capítulo 6. As etapas finais de conclusões deste trabalho e sugestões para estudos futuros estão nos capítulos 7 e 8, respectivamente.

Grandes avanços em relação aos trabalhos referidos na bibliografia são esperados devido a possibilidade de empregar técnicas experimentais para aferir a concentração de tensões calculada por elemento finitos. Propõe-se que o conjunto de técnicas já bem conhecidas como elementos finitos e extensometria aplicadas desta forma passarão a constituir uma ferramenta extremamente poderosa para solução de problemas de contato, independentemente da geometria dos corpos em contato. Somando-se a isto a versatilidade do programa de elementos finitos utilizado, o ABAQUS, pode-se atingir resultados extremamente interessantes.

2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é elaborar uma correlação entre os defeitos existentes em rodas ferroviárias, principalmente o shelling, e o campo de tensões devido ao contato roda-trilho, determinando a área e a pressão de contato através da análise por elementos finitos e pela realização de experimentos capazes de informar o nível de tensões desenvolvidas internamente aos corpos de prova.

A especificação deste objetivo é importante para que se possa compreender a utilização de certas técnicas experimentais, bem como a manutenção de alguns resultados de ensaios nos quais ocorreu a falha do corpo de prova, o que será amplamente explicado nos capítulos subseqüentes.

3. Fundamentos teóricos sobre o contato mecânico em rodas ferroviárias

Para estabelecer o grau de comprometimento de um componente ou estrutura sob a ação de um determinado sistema de cargas é necessário escolher um critério de falha adequado ao problema em estudo. Para tanto precisa-se conhecer as propriedades do material, as características geométricas e as condições de carregamento (tipo de cargas e pontos de aplicação) e dos vínculos. Estes dados fornecem as informações necessárias para determinar qual tensão irá dominar o mecanismo de falha. Por este motivo, serão apresentados a seguir o critério de falha e a técnica utilizada neste trabalho, para determinar o nível de solicitação das rodas ferroviárias, sendo necessário conhecer as características dos problemas de contato para justificá-los.

3.1 Utilização e problemas das rodas ferroviárias

a) *Solicitações:* As rodas recomendadas para a utilização em vias férreas de altas capacidades de carga, até 150kN por roda, possuem de 838 a 965mm de diâmetro nominal, o que equivale a 838 a 965mm, e peso entre 4050 e 4800N [10]. A geometria de uma roda é ilustrada na Figura 3.1.

As rodas ferroviárias são fabricadas por dois processos, forjamento ou fundição, seguidos por um tratamento térmico que implica em um resfriamento rápido do aro, que induzem tensões residuais compressivas nesta região, a fim de dificultar a nucleação e propagação de trincas devido às solicitações na superfície de rolamento. Estas solicitações podem ser classificadas, segundo sua origem em solicitações mecânicas devido à carga de eixo (peso do veículo e da carga), solicitações mecânicas durante a tração ou frenagem e carga térmica devido ao aporte térmico durante a

frenagem. As tensões residuais são compressivas nas direções radial e circunferencial do aro, e são consideradas uniformemente distribuídas [4].

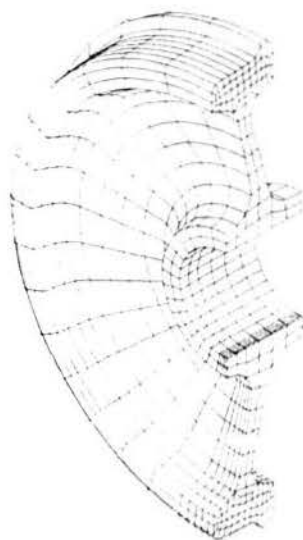


Figura 3.1 - Ilustração da geometria de parte de uma roda ferroviária, representada por meio de uma malha de elementos finitos.

Sabe-se, de estudos anteriores [16][21], que as tensões oriundas de cargas térmicas são de intensidade superior às tensões oriundas das cargas mecânicas devido ao contato roda/trilho. No entanto, estas tensões mecânicas são tensões cíclicas de alta frequência quando comparadas às tensões térmicas, as quais podem ser consideradas axissimétricas em condições normais de aplicação dos freios, com boa aproximação nos resultados [4]. Isto faz com que as tensões mecânicas tenham um papel fundamental na propagação dos defeitos, uma vez que um trem trafegando a 40km/h, por exemplo, atinge 10^6 ciclos em apenas 170 horas de operação. As tensões mecânicas oriundas do contato tem sido estudadas segundo a distribuição de Hertz (pressão de contato de Hertz), de forma que acrescentam tensões de compressão às residuais já existentes. Tradicionalmente, tem sido considerado que as solicitações mecânicas que atuam na pista de rolamento das rodas são divididas em três componentes, sendo força longitudinal, força lateral e força normal [1][8], como está mostrado na Figura 3.2.

Quando ocorrem flutuações nas tensões térmicas, devido a defeitos no sistema de freios ou vício do maquinista em aplicar os freios de forma intermitente, estas tensões somam-se às tensões de contato aumentando a amplitude da solicitação cíclica. Este fenômeno é conhecido como fadiga térmica [12].

Através do estudo isolado de cada uma destas solicitações pode-se chegar à causa de determinado defeito nas rodas. Sabe-se, porém, que a combinação de todas elas é que irá provocar a propagação dos defeitos e a eventual falha catastrófica da roda.

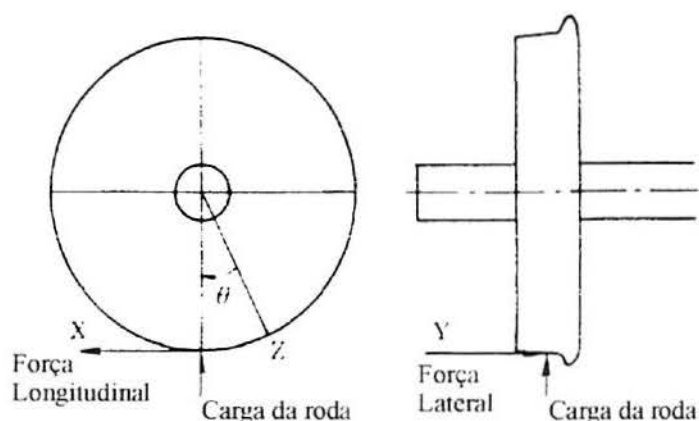


Figura 3.2 - Esquema das componentes de carga em uma roda ferroviária [8].

Um fator agravante na flutuação das solicitações é a presença de defeitos nos trilhos [8], os quais podem induzir o aumento significativo da magnitude das cargas, estabelecendo uma situação de carregamento de impacto.

b) Defeitos

O material que compõe a roda ferroviária é um aço de alto carbono, aproximadamente 0,8%, ou seja de composição eutetóide. Possui alta resistência mecânica e, devido ao processo de fabricação, tem alta dureza superficial no aro. As tensões residuais impostas pelo processo de fabricação permitem a absorção de uma maior carga sem a nucleação de defeitos, sendo este é um benefício limitado, isto é, o fator repetição do carregamento irá provocar, em algum tempo, fadiga no material e a conseqüente falha.

A ocorrência de defeitos em rodas ferroviárias é função, principalmente, do tipo de operação do trem (carga ou passageiro) e da topografia vencida pela via-férrea.

Os defeitos mais comumente encontrados nas rodas ferroviárias são *shelling*, *spalling*, inversão de tensões residuais e flambagem. *Spalling* e *shelling* provocam a "escamação" da roda e se diferenciam, basicamente, pela sua origem,

sendo necessária uma análise metalográfica para diferenciá-los [1][2], constituindo-se em danos localizados.

O *spalling*, mostrado na Figura 3.3, surge a partir de trincas térmicas superficiais nucleadas durante um ciclo de frenagem, sendo mais freqüente em carros que operam com baixas cargas, como os carros de passageiros, os quais são mais propícios à ocorrência de deslizamento da roda sobre o trilho, devido à baixa aderência. O aporte térmico resultante deste deslizamento ou mesmo de uma frenagem convencional, pode provocar um aquecimento extremamente localizado, causando o surgimento de pontos (“pits”) de martensita não revenida no resfriamento subsequente. O *spalling* consiste na formação de cavidades na pista de rolamento devido à propagação das trincas iniciadas nestes *pits*, sendo que esta propagação é grandemente auxiliada pelas tensões mecânicas cíclicas. De qualquer forma, sempre haverá formação de microtrincas térmicas na banda de rolamento, mas a grande maioria delas será retirada pelo desgaste normal do aro.

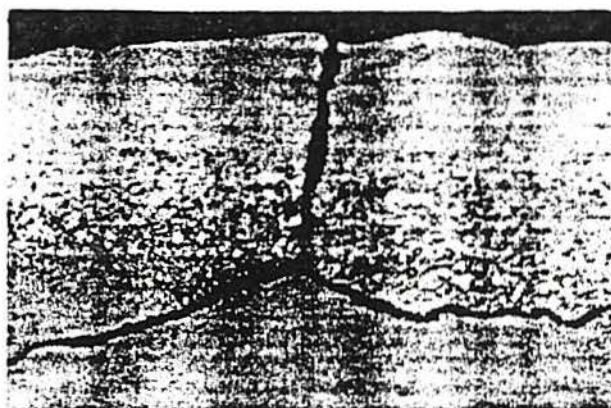


Figura 3.3 - Ampliação da seção transversal do aro de uma roda ferroviária com *spalling* [2].

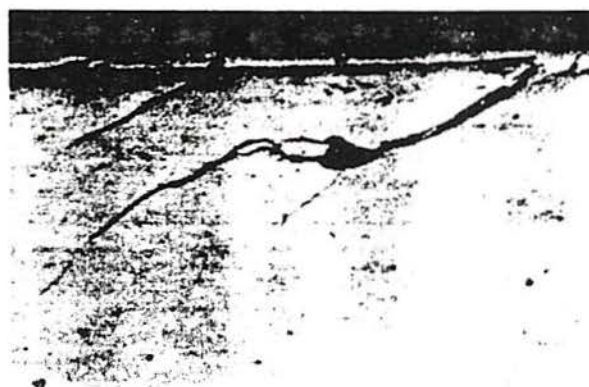


Figura 3.4 - Seção transversal do aro de uma roda ferroviária com *shelling* [1].

Quando ocorre a aplicação severa dos freios por longos períodos, pode ocorrer a inversão das tensões residuais na roda. Isto significa que porções próximas à banda de rolamento escoam sob compressão devido às tensões térmicas geradas durante o aquecimento. Ao resfriar, esta região ficará trativa, facilitando a propagação de trincas, conseqüentemente a falha generalizada da roda [16]. Um exemplo deste tipo de falha é a flambagem que seria um grau mais avançado, onde a ação dos freios é efetuada durante longos períodos de tempo, produzindo temperaturas críticas que provocam o escoamento generalizado da roda e diminuição nas suas propriedades mecânicas. Isto pode fazer com que a roda simplesmente saia do alinhamento com o trilho e quebre.

O *shelling* (Figura 3.4) é originado em uma região subsuperficial do aro devido à concentração de tensões oriundas da fadiga por contato nesta região, quase sempre combinado com algum defeito prévio do material, como inclusões, etc. Esta "pré-trinca" evolui propagando-se até a superfície segundo a direção da máxima tensão cisalhante, que é de aproximadamente 45° [2][9][20]. Obviamente, o *shelling* é mais comum em rodas de veículos de carga, sendo um dano tipicamente mecânico, embora seja facilitado pelas tensões térmicas e pela eventual diminuição nas propriedades do material devido à temperatura.

Do ponto de vista da teoria de Hertz do contato mecânico, há uma zona de alta tensão cisalhante abaixo da superfície de contato, exatamente na região onde as análises metalográficas detectam a origem dos defeitos (*shells*).

3.2 Tensões de contato

As tensões de contato são causadas pela pressão de um sólido contra outro em uma área limitada chamada área de contato, sendo extremamente localizadas na superfície de contato e logo abaixo dela [13][24].

Em alguns tipos de aplicações, as tensões geradas pelo contato entre dois corpos devido às cargas externas são extremamente altas, constituindo a principal causa de falha em um ou ambos os corpos. As falhas são precedidas, normalmente, por excessiva deflexão elástica e escoamento. Um dos casos práticos que pode ser

considerado crítico é exatamente o contato entre a roda e o trilho ferroviário, pois como foi colocado anteriormente as condições de serviço são severas.

As solicitações podem ser estáticas, isto é, com contato sempre no mesmo ponto ao longo do tempo, ou cíclicas, o que pode levar os componentes à falha por fadiga, que se inicia por uma fratura localizada ou trinca devido às tensões localizadas. Além disso, existem outras peculiaridades quanto à distribuição das tensões nos problemas de contato. Algumas tensões máximas ocorrem no interior do corpo, há uma certa distância da superfície de contato, existindo uma clara relação deste fato com os defeitos encontrados na prática em rodas ferroviárias, trilhos, dentes de engrenagens, cilindros de laminação, etc.

As três tensões principais máximas localizam-se na superfície de contato e são compressivas. Isto faz com que a tensão cisalhante máxima e a tensão octaédrica cisalhante máxima sejam sempre menores que a metade da máxima tensão principal. Nos problemas de contato entre dois corpos cilíndricos estas tensões são ligeiramente menores que um terço da máxima tensão principal. Considerando que a magnitude das tensões principais é bastante alta, conclui-se que os valores das tensões cisalhantes são significativos no estudo das causas das falhas dos componentes em contato. Neste ponto surge um novo problema que é a dificuldade de quantificar estas tensões, pois o comportamento do material é influenciado por inúmeros fatores, como deslizamento e/ou fricção, efeito do lubrificante, efeito de cargas repetidas, ocorrência de escoamento próximo à superfície de contato, entre outros.

A metodologia para o cálculo da distribuição destas tensões consiste em determinar as tensões de contato, tensões principais, tensões cisalhantes e tensões octaédricas considerando a forma das superfícies em contato dos corpos e as propriedades do material destes corpos.

3.2.1 Determinação das tensões de contato

Quando dois corpos em contato são pressionados por uma força P , como mostrado na Figura 3.5, ocorre uma deformação elástica na região em torno do ponto inicial de contato, a qual é mostrada na Figura 3.5b. Torna-se necessário determinar a relação entre a carga P e a máxima tensão compressiva na área de contato e as tensões

principais em qualquer ponto do corpo na linha de ação da carga, designada por eixo z , bem como a máxima tensão cisalhante e sua localização. Na Figura 3.5c são mostradas as tensões principais, σ_{xx} , σ_{yy} e σ_{zz} , atuando num cubo elementar num ponto do eixo z . A máxima tensão cisalhante no ponto é $\tau_{\max} = 1/2(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$, onde σ_{zz} e σ_{xx} são as tensões principais máxima e mínima no ponto, respectivamente.

A análise considerará as seguintes hipóteses:

- i. Os materiais dos corpos em contato são homogêneos, isotrópicos e elásticos, de acordo com a Lei de Hooke.
- ii. Antes do carregamento os corpos em contato possuem um plano tangente comum que passa pelo ponto de contato, sendo o plano de referência para o cálculo das distâncias entre os pontos correspondentes nas superfícies. Os pontos correspondentes são pontos que podem potencialmente entrar em contato, pois possuem uma perpendicular comum ao plano tangente. As equações que expressam estas duas distâncias, z_1 e z_2 , perpendiculares ao plano tangente comum são utilizadas para determinar as deformações dos dois corpos próximas ao ponto inicial de contato. A distância total é $d = z_1 + z_2$ para quaisquer dois corpos em contato e pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$d = Ax^2 + By^2 \quad (3.1)$$

onde x e y são coordenadas nos eixos x e y com origem no ponto de contato e que pertencem ao plano tangente. A e B são funções positivas determinadas por Hertz, que relacionam os raios de curvatura das superfícies de ambos os corpos no ponto de contato e o ângulo α entre os planos que os contém, dadas na equação 3.2. Pode-se visualizar nas Figuras 3.5d e 3.5e que a equação 3.1 representa uma elipse.

$$B, A = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1} \right) + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2} \right) \right]^2 - 4 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2} \right) \sin^2 \alpha} \quad (3.2)$$

- a) **Forma da superfície de contato após o carregamento:** Após o carregamento forma-se uma pequena área de contato (ver Figura 3.5b) devido à deformação elástica de ambos os corpos. Da equação 3.1 conclui-se que os pontos em contato formam uma elipse em torno do ponto inicial - a chamada elipse de contato.

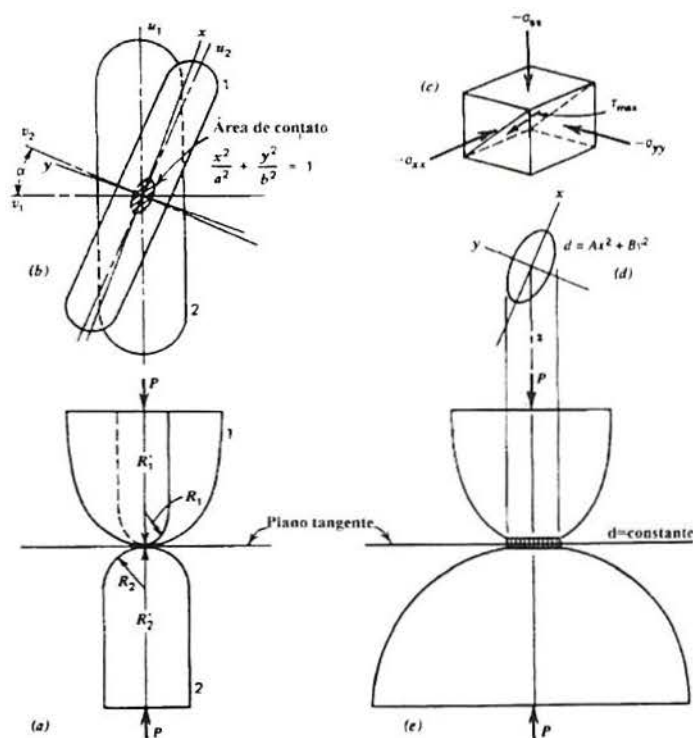


Figura 3.5 - Análise de tensões de contato.

- b) **Tensões principais:** As tensões principais são máximas na superfície de contato e são compressivas.

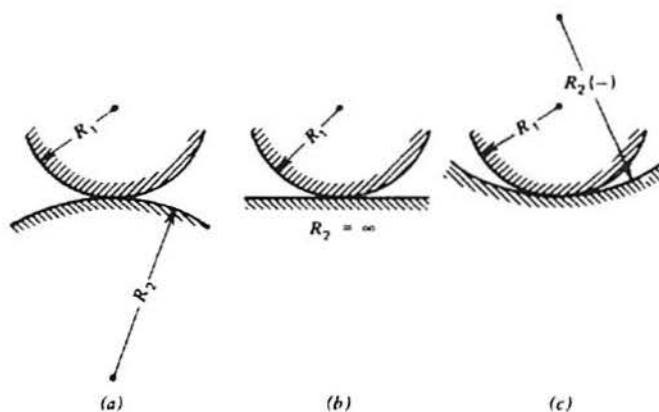


Figura 3.6 - Linha de contato entre corpos cilíndricos.

É conveniente salientar que se existem dois cilindros em contato cujos eixos longitudinais são ortogonais tem-se que $B/A = 1$ e $\alpha = 0$. Isto é importante porque as tensões principais são calculadas a partir da determinação gráfica de coeficientes em função de B/A , parâmetros de material e carga. Assim, para o caso em que há dois corpos em contato com carga normal à área de contato, as tensões principais nos pontos sobre o eixo z a várias distâncias z/b são dadas por:

$$\sigma_{yy} = -2\nu \left[\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2} - \frac{z}{b} \right] \frac{b}{\Delta} \quad (3.3a)$$

$$\sigma_{xx} = - \left[\frac{\left(\sqrt{1 + (z/b)^2} - z/b \right)^2}{\sqrt{1 + (z/b)^2}} \right] \frac{b}{\Delta} \quad (3.3b)$$

$$\sigma_{zz} = - \left[\frac{1}{\sqrt{1 + (z/b)^2}} \right] \frac{b}{\Delta} \quad (3.3c)$$

onde:

$$b = \sqrt{\frac{2w\Delta}{\pi}} \quad (3.4)$$

$$\Delta = \frac{1}{(1/2R_1) + (1/2R_2)} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (3.5)$$

R_1 e R_2 são os raios de curvatura das superfícies cilíndricas em contato;

E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade dos materiais das respectivas superfícies.

ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson dos respectivos materiais.

Na Figura 3.6 são apresentadas as configurações para o contato entre corpos cilíndricos, com o detalhe da consideração dos raios R_1 e R_2 .

- c) **Tensões cisalhantes:** A importância das tensões cisalhantes no estudo de problemas de contato deve-se ao fato de que elas atingem seus valores máximos no interior dos corpos, próximas a superfície de contato. As tensões de interesse são a máxima tensão cisalhante octaédrica e a máxima tensão cisalhante ortogonal.

A máxima tensão cisalhante num ponto é $\tau_{max} = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$. Na Figura 3.7 as curvas mostram que as magnitudes de σ_{xx} e σ_{yy} caem mais rapidamente que σ_{zz} , nos pontos justamente abaixo da superfície de contato. Devido a isto, a máxima tensão

cisalhante nestes pontos aumenta de valor e atinge seu máximo $\frac{1}{2}(\sigma_{zz_s} - \sigma_{yy_s})$ em z_s , como mostrado na curva τ .

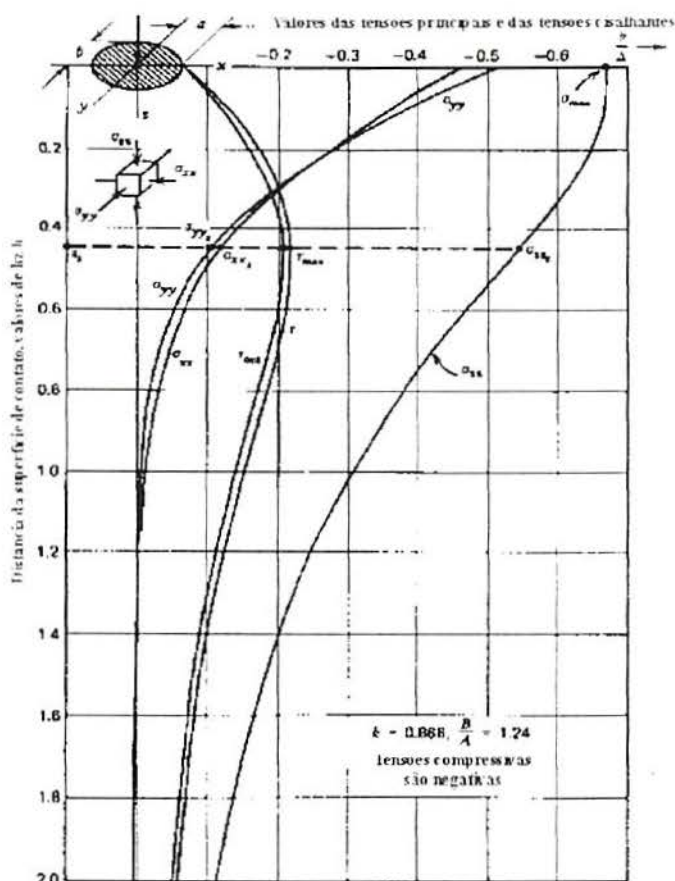


Figura 3.7 - Curvas mostrando a variação das tensões principais, máxima tensão cisalhante e tensão cisalhante octaédrica com a variação da distância da superfície de contato, $\nu = 0,25$.

- d) **Tensão cisalhante octaédrica máxima e tensão cisalhante ortogonal máxima:** A tensão cisalhante octaédrica τ_{oct} é a tensão cisalhante associada a uma família de oito planos cujas normais unitárias satisfazem a relação $l^2 = m^2 = n^2 = \frac{1}{3}$ com relação aos eixos principais. Esta tensão é dada por:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2} \quad (3.6)$$

Os valores de τ_{oct} foram calculadas por essa equação para muitos pontos ao longo do eixo z e são plotados como ordenadas da curva τ_{oct} .

Como se nota pela observação desta curva, os valores máximos de tensão octaédrica cisalhante situam-se em pontos equidistantes do plano tangente ao contato,

numa linha perpendicular ao centro da área de contato. E estes valores máximos são considerados significativos no critério de falha de Von Mises.

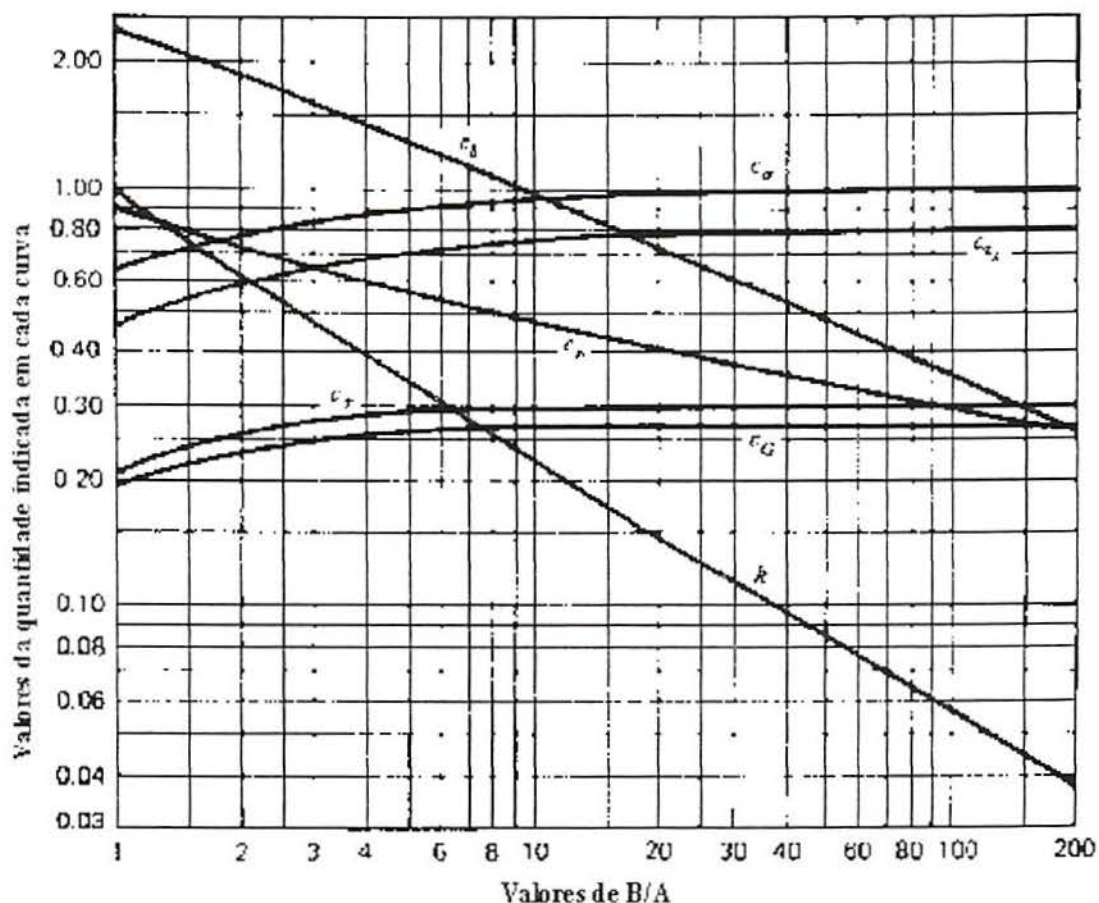


Figura 3.8 - Coeficientes de tensão e deflexão para dois corpos em contato num ponto.

As componentes de tensão cisalhante que são significativas na falha de cilindros em contato com rolamento são as que ocorrem nos planos paralelo e perpendicular ao plano tangente ao contato, chamadas de tensões cisalhantes ortogonais. Por exemplo, com referência as Figuras 3.5b e d, as componentes de tensão cisalhante ortogonal σ_{xz} e σ_{yz} atuam nos planos perpendiculares ao plano tangente ao contato, e valem zero no eixo z, onde τ_{\max} ocorre. A máxima tensão ortogonal cisalhante, τ_o ou $\sigma_{xz\max}$, ocorre em pontos do interior dos corpos em contato localizados no plano x-z equidistantes do eixo z. Embora τ_o seja menor do que τ_{\max} , τ_o para um dado ponto no corpo em contato, muda de sinal durante o rolamento, de forma que a variação total é de $2\tau_o$, que é maior do que τ_{\max} . As Figuras 3.5 mostram curvas utilizadas para a determinação destas tensões. O valor e a localização de τ_o é função da elipsidade do problema, isto é de a e b, e da orientação da elipse de contato com

respeito a direção de rolamento (Moyar e Morrow, 1964). Isto significa que para cada valor de B/A , os valores máximos das tensões podem ser obtidos pelas equações:

$$\sigma_{\max} = -C_{\sigma} \left(\frac{b}{\Delta} \right) \quad (3.7a)$$

$$\tau_{\max} = C_{\tau} \left(\frac{b}{\Delta} \right) \quad (3.7b)$$

$$\tau_{\text{oc1,max}} = C_G \left(\frac{b}{\Delta} \right) \quad (3.7c)$$

A observação dos gráficos mostrados anteriormente e a análise das equações (3.3) para tensões torna claro três pontos de extrema importância para a avaliação das falhas de componentes em contato:

- a condição de contato induz uma forte concentração de tensões na região abaixo da área de contato;
- a distribuição das tensões não é linear;
- a distribuição das tensões cisalhantes na região subsuperficial deve ser calculada para obter o grau de comprometimento das rodas.

Esta teoria é baseada na teoria de Hertz (1882), a qual considera análise plana das tensões, tem-se conseguido resultados bastante bons com a sua aplicação. No entanto, com o advento dos computadores e do desenvolvimento de poderosas ferramentas numéricas, pode-se fazer análises complexas em três dimensões

3.3 O método de elementos finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um método numérico utilizado para resolver problemas que envolvam meios contínuos. Neste método o meio contínuo é dividido em regiões, ou elementos, definidas por pontos chamados nós. A variável é definida para cada nó como uma combinação linear de funções de interpolação adequadamente escolhidas. Os valores destas variáveis ou suas derivadas são especificados para cada nó. As equações diferenciais são transformadas em equações de elementos finitos (locais) por princípios variacionais ou pelo método de resíduos ponderados. Estas equações descrevem o comportamento da variável contínua

dentro de cada elemento. Finalmente as equações locais são reunidas num sistema global de equações diferenciais e algébricas, cujas condições de contorno e/ou iniciais são impostas. A solução do sistema global é feita numericamente utilizando-se um computador.

A base do MEF consiste em que qualquer quantidade contínua (deslocamento, temperatura, etc) pode ser aproximada por modelos discretos compostos por funções contínuas por partes definidas em um número finito de subdomínios. Para especificar estes subdomínios segue-se uma seqüência de passos definida:

- discretização do domínio: definição dos nós e elementos;
- definição da função do elemento para cada elemento;
- combinação destas funções para obter uma função contínua por partes para a região inteira;
- cálculo do sistema de equações usando a minimização de um funcional relacionado ao problema físico;
- solução do sistema de equações para os valores nodais;
- cálculo dos elementos resultantes.

3.3.1 Considerações gerais

A discretização da região em subregiões não possui base teórica, dependendo exclusivamente da experiência do engenheiro. Contudo este passo é de fundamental importância para a precisão da solução, isto é, uma discretização mal feita conduzirá a erros nos resultados.

O modelo discreto é composto por funções contínuas por partes definidas sobre os elementos. A forma mais comum destas funções é a polinomial, cuja ordem depende do número de itens conhecidos sobre a função contínua para cada nó do elemento.

De acordo com a ordem da função polinomial, os EF podem ser classificados em três grupos: simples, complexos e múltiplos. No caso da utilização de programas comerciais, a formulação se encontra definida para cada tipo de elemento,

de forma que existem elementos disponíveis para cada tipo de análise específica, seja contato, transferência de calor, etc. Por este ponto de vista, pode-se dizer que os programas são, de certa forma, inteligentes, desde que o problema físico seja definido corretamente, pois possuem ferramentas prontas e apropriadas para a construção do modelo finito.

3.3.2 O método de elementos finitos aplicado a problemas de contato

Sabe-se que o problema de contato envolve uma não-linearidade geométrica devido aos grandes deslocamentos que ocorrem na região do contato (ver item 3.2), o que torna impossível a utilização das equações clássicas de Teoria da Elasticidade Linear que foram obtidas pela suposição de que só deformação infinitesimal estava ocorrendo. Isto demanda certos cuidados no modelamento. O ABAQUS possui artifícios que possibilitam considerar esta não-linearidade localizada de forma transparente. A formulação para problemas de contato usada pelo ABAQUS garante resultados bastante precisos para a área de contato. Isto é possível devido ao esquema escolhido para a integração. Oden e Kikuchi (1980) apresentaram a regra de integração de Simpson como solução para os problemas de oscilação dos resultados para a distribuição de pressão em elementos de segunda ordem [25]. O software utiliza esta técnica.

Há também a necessidade de informar ao programa as condições do contato, se é estático ou dinâmico, se existe rolamento e/ou deslizamento (o que implicaria em forças de atrito atuantes). Normalmente a palavra contato em EF é usada para fazer referência a qualquer tipo de interação entre corpos, sendo o *contato mecânico* um tipo particular de contato.

3.3.3 O programa Abaqus

O Abaqus possui duas formas para modelar contato: definição das superfícies que podem potencialmente entrar em contato ou utilização de elementos especiais. Em ambos os casos não deverá ocorrer interpenetração entre as superfícies.

Por este motivo o Abaqus utiliza o conceito *master-slave*, o qual significa que os nós da superfície *slave* devem deformar-se segundo a superfície *master*, por exemplo, no caso do contato entre o punção de uma prensa e uma chapa que deverá ser conformada, a superfície do punção será a *master* e a chapa será a *slave*. A ordem em que elas são definidas na análise informa ao programa quem é a superfície *master* e quem é a *slave*. Podem ser modelados problemas bi ou tri-dimensionais.

O ABAQUS oferece três formulações para considerar a possibilidade de movimento relativo entre duas superfícies que formam um *par de contato*: *small sliding*, *finite sliding* e *infinitesimal sliding*. A aproximação mais geral é a formulação *finite sliding*, a qual pode considerar qualquer movimento relativo entre as superfícies, incluindo separação, rotação e deslizamento arbitrário. A formulação *small sliding* é uma particularização da anterior, onde os nós da superfície *slave* continuam podendo sofrer grandes deslocamentos arbitrários, mas deverão interagir com a mesma área local da superfície *master* por toda a análise. Este recurso torna a análise computacional mais econômica uma vez que não requer monitoramento do contato de um nó *slave* com a superfície *master* inteira.

A formulação *infinitesimal sliding* é uma especialização maior ainda do primeiro caso, na qual não é utilizada a opção de não linearidade geométrica, e onde o contato é monitorado para cada nó *slave* em função da sua posição relativa a um determinado nó *master*. O algoritmo sempre usa o mesmo nó *master* como referência. Isto pode ser feito sempre que o deslizamento relativo durante a deformação puder ser desprezado (for *infinitesimal*). Essa aproximação é mais comumente usada para solução de problemas clássicos, como o problema de contato de Hertz.

4 Materiais e Métodos

O objetivo deste capítulo é descrever a realização dos ensaios experimentais capazes de aferir e calibrar o modelo numérico e definir os parâmetros do próprio modelamento matemático. Como já foi visto na revisão bibliográfica, as tensões de interesse para análise de problemas de contato localizam-se no interior dos corpos envolvidos e, para medir tais tensões, torna-se necessário inserir sensores de deformação nestas regiões, o que inviabiliza a utilização de corpos de prova em aço. Assim, optou-se pela utilização de um material sintético, que pudesse ser moldado ou vazado em um molde.

4.1 Determinação do material e suas propriedades

O material sintético a ser utilizado deveria ter comportamento linear elástico e bom desempenho sob carga, ou seja, mesmo com baixa resistência mecânica deveria apresentar uma quantidade de deformação mecânica miscível pelos instrumentos a serem utilizados. Seria interessante, também, que apresentasse transparência, pois isso possibilitaria a visualização de eventuais defeitos de endurecimento da resina e verificação do posicionamento dos extensômetros. Por outro lado, era necessário que alguns problemas, como a contração de volume acentuada, presença de bolhas e, principalmente, a formação de trincas, fossem evitados durante o endurecimento. E finalmente, a forma de posicionamento dos extensômetros não deveria incluir heterogeneidades no corpo de prova, pois isto levaria a um comportamento anisotrópico indesejado no material e a possíveis interferências nas medidas realizadas.

Assim, foram feitos testes com cinco materiais cujo procedimento está detalhado em “Caracterização de um material sintético para medição de deformações internas em sólidos” [18], a ser publicado. A seguir os desempenhos serão apresentados resumidamente a fim de proporcionar uma visão geral do comportamento dos materiais em questão.

Os testes iniciais foram feitos com dois tipos de resina poliéster. Um deles apresentou alto índice de bolhas, enquanto o segundo apresentou boa homogeneidade. No entanto, este material possui uma reação de polimerização altamente exotérmica, o que provoca o trincamento total das peças durante a “cura” de quantidades maiores. Tentou-se, então, fazer corpos de prova maiores vazando pequenas quantidades de material a cada vez. Como resultado foram observadas, claramente, as interfaces entre as camadas. Este problema inviabilizou sua utilização pois não seria possível obter corpos de prova com comportamento isotrópico.

Partiu-se, então, para testes com as resinas epóxi (comercialmente conhecidas como araldite) XGY1109 e CY208, juntamente com o endurecedor HY2954, fornecidos por Aralsul Ltda. Os testes com três composições diferentes apresentaram bons resultados visuais com ausência de bolhas e sem problemas com trincas mesmo em maiores quantidades de resina. Isto foi conseguido pela utilização de uma bomba de vácuo para promover a retirada das bolhas da mistura resina/endurecedor. As composições utilizadas são apresentadas na tabela 4.1. A utilização da resina CY208 em adição à mistura A, pode ser considerada como um teste secundário, feito para tentar corrigir a aparência demasiado frágil desta mistura.

Tabela 4.1 - Composição dos materiais sintéticos testados.

Denominação do Material	Resina XGY1109 (% em peso)	Resina CY208 (% em peso)	Endurecedor HY2954 (% em peso)
A	100	-	30
B	50	50	30
C	70	30	30

A fim de determinar as propriedades mecânicas dos compostos em questão foram construídos corpos de prova segundo as normas ABNT NBR 8974, 8975 e 9622

que orientam a realização de ensaios de tração. Os ensaios foram realizados em uma máquina INSTRON (de 5kN) no Instituto de Ensaio de Materiais da Faculdade de Engenharia do Uruguai, e a determinação das propriedades módulo de elasticidade (E), tensão de ruptura (σ_r) e coeficiente de Poisson (ν) feitas a partir da instrumentação dos corpos de prova com extensômetros elétricos resistivos.

Foi constatado que a mistura A era a mais adequada ao trabalho, por apresentar comportamento linear elástico ao longo da maior faixa de solicação, como pode ser observado pelo gráfico 4.1. As propriedades médias do material A são apresentadas na tabela 4.2.

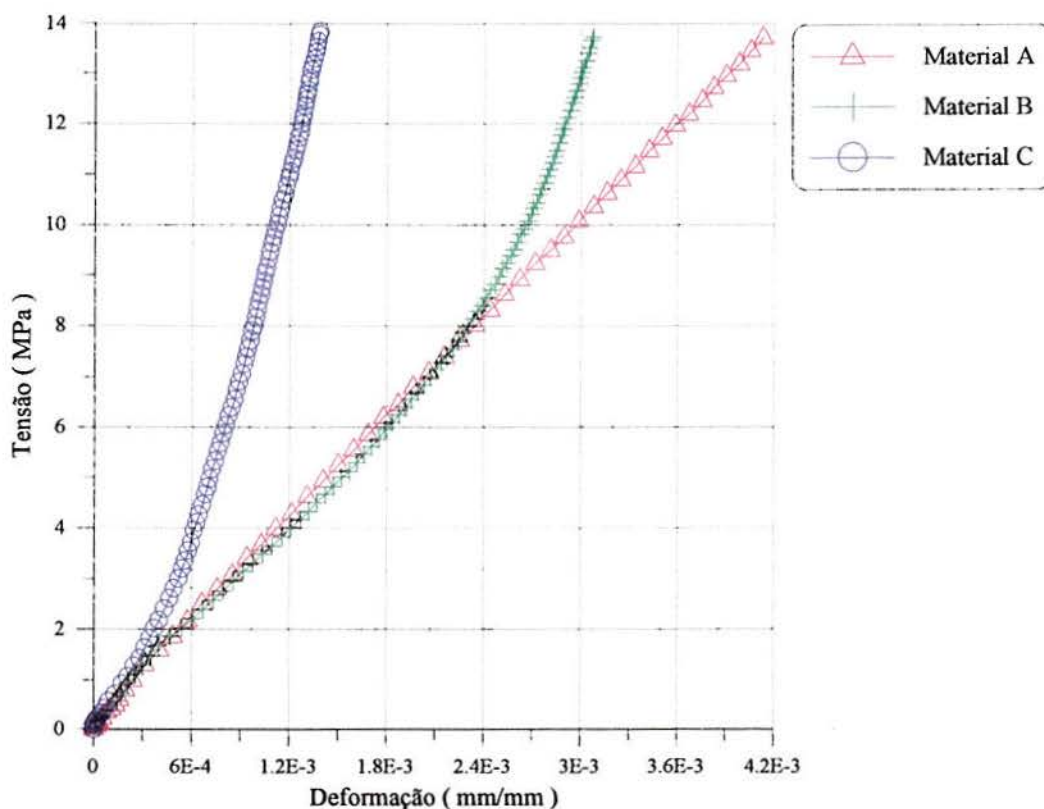


Gráfico 4.1 - Curvas tensão-deformação dos materiais sintéticos testados.

Tabela 4.2 - Propriedades do material escolhido, A.

Material	Tensão de ruptura σ_r (N/mm ²)	Módulo de elasticidade E (N/mm ²)	Coefficiente de Poisson, ν
A	7,9	3319	0,23

Durante o período em que se trabalhou com as resinas epóxi constatou-se a suscetibilidade deste material às condições de armazenamento e fabricação dos compostos. Há, na bibliografia [14][24], um consenso de que os polímeros em geral caracterizam-se por sua suscetibilidade às condições de temperatura e umidade do ambiente, podendo sofrer modificações em suas propriedades mecânicas. No caso de resinas epóxi, um importante fator de perda de cadeias poliméricas reativas é a umidade, o que pode até mesmo impedir a “cura” completa do material [14].

O passo seguinte foi determinar a forma de posicionamento dos extensômetros no molde. As opções eram colá-los em uma pequena placa do mesmo material ou posicioná-los sozinhos, sem o auxílio da placa. Para resolver o problema foram construídos dois cilindros, cada um com um extensômetro interno posicionado de uma destas formas. Foi feito ensaio de compressão em ambos e as curvas carga-deslocamento foram praticamente idênticas. Devido à facilidade de manuseio optou-se pela utilização da plaqueta de resina como suporte para os extensômetros.

4.2 Ensaio com o material sintético

As características desejadas em qualquer experimento são confiabilidade nas medições e repetibilidade das condições de ensaio. Isto significa que deve ser possível repetir o ensaio de um mesmo corpo de prova diversas vezes de forma idêntica e obter os mesmos resultados. Considerando as solicitações das rodas ferroviárias em serviço descritas no capítulo 2, torna-se claro que o ensaio deve permitir a obtenção de tensões de contato. Por este motivo, o ensaio de compressão entre uma roda e um segmento de trilho seria o mais adequado. No entanto a experiência em ensaios anteriores demonstrou que a simulação experimental do contato roda/trilho apresenta um sério problema de repetibilidade devido à complexidade das suas geometrias.

A solução mais viável foi, então, projetar um corpo de prova com uma geometria simples, que pudesse ser moldado em resina epóxi e proporcionar a repetibilidade do ensaio. O corpo de prova seria modelado por elementos finitos simulando as condições do ensaio e assim, a técnica de modelamento estaria aferida. Depois bastaria modelar a geometria real da roda em aço.

4.2.1 Construção do corpo de prova

Foi escolhida a geometria de meia roda mostrada na Figura 4.1 para o corpo de prova, cujo raio é de 80mm. O molde utilizado era de alumínio com repartição em acrílico. Os extensômetros foram posicionados em plaquetas de resina, construídas a partir de moldes de silicone.



Figura 4.1 - Modelo em resina epóxi do corpo de prova.

Em cada corpo de prova foram empregadas duas fitas de extensômetros tipo KFG-1-120-D9 e uma tipo KFG-1-120-D19 do fabricante KYOWA. Cada fita possuía 5 extensômetros de 1mm o que possibilitou a realização de 5 medidas de deformação em cada direção (longitudinal, radial e tangencial). O posicionamento das plaquetas com os extensômetros foi feito com o auxílio de um suporte para relógio comparador com base magnética e de um dispositivo para fixação das mesmas. O esquema da montagem é mostrado na Figura 4.2.

Para garantir um bom acabamento superficial e com isso boa transparência foi usada uma cera desmoldante CERIT CV 6004. Após a aplicação de 10 camadas de cera no molde e do posicionamento dos extensômetros foi preparada a resina (ver Figura 4.3). Esta etapa incluiu a mistura da resina com o endurecedor, exposição da

mistura ao vácuo para efetuar a retirada das bolhas. A colocação da mistura no molde foi feita lentamente de forma a não gerar bolhas.

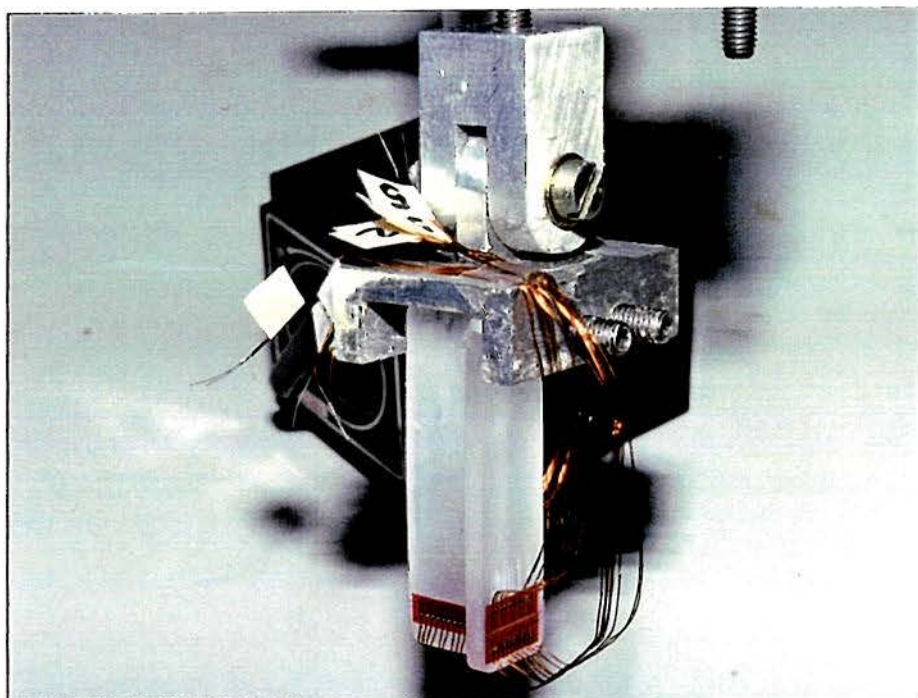


Figura 4.2 - Esquema da montagem para posicionamento dos extensômetros no corpo de prova.

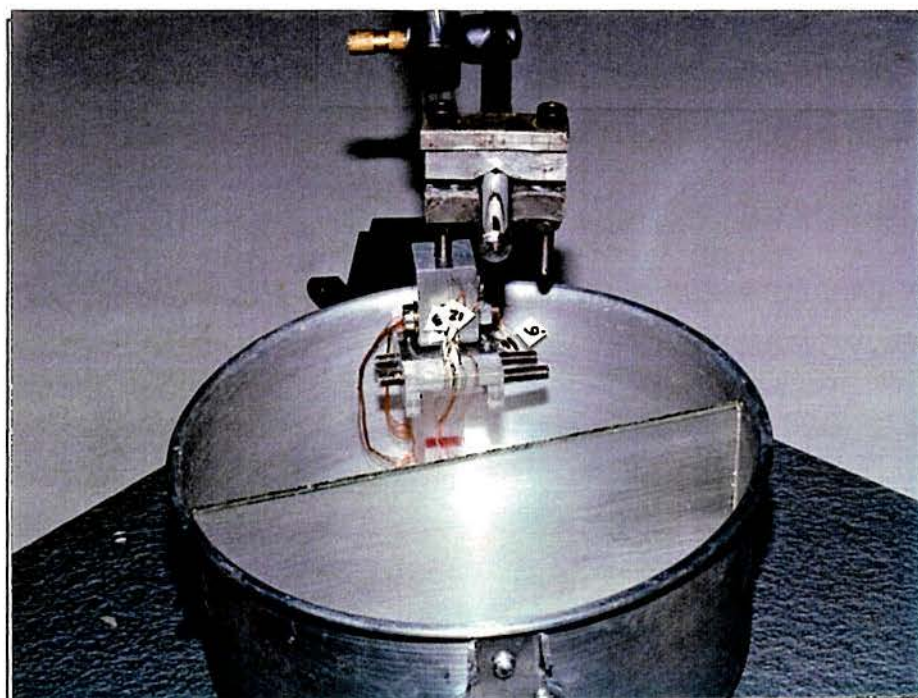


Figura 4.3 - Montagem do molde.

O endurecimento das peças compreendeu um período de 3 a 4 dias, após o qual os corpos de prova foram desmoldados. Constatou-se que a qualidade dos mesmos era bastante boa. Na Figura 4.4 estão mostrados os extensômetros dentro da resina já endurecida, bem como os fios para ligação dos extensômetros, devidamente identificados.

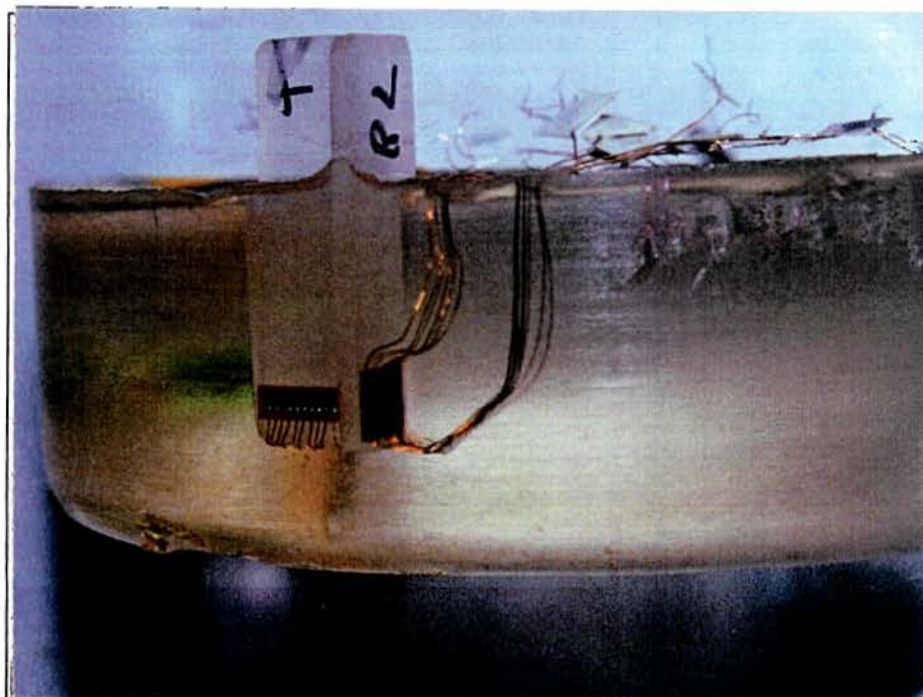


Figura 4.4 - Vista dos extensômetros dentro do corpo de prova pronto.

4.2.2 Realização dos ensaios

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios com capacidade de 100kN, utilizando fundo de escala de 20kN. a transmissão da carga às peças foi feita pelo próprio cabeçote da máquina. A leitura dos sinais elétricos relativos à deformação foi feita através do condicionador de sinais UPM 100 - *Multipoint Measure Unit*, da HBM, o qual possibilitou a leitura dos 15 extensômetros simultaneamente. A tensão usada para alimentar os extensômetros foi de 0,5V, pois como a resina epóxi possui baixa condutividade térmica, havia dificuldade de dissipação do calor gerado na grade pela corrente elétrica, o que poderia conduzir a erros de magnitude do sinal indicado ou até mesmo danificação dos sensores.

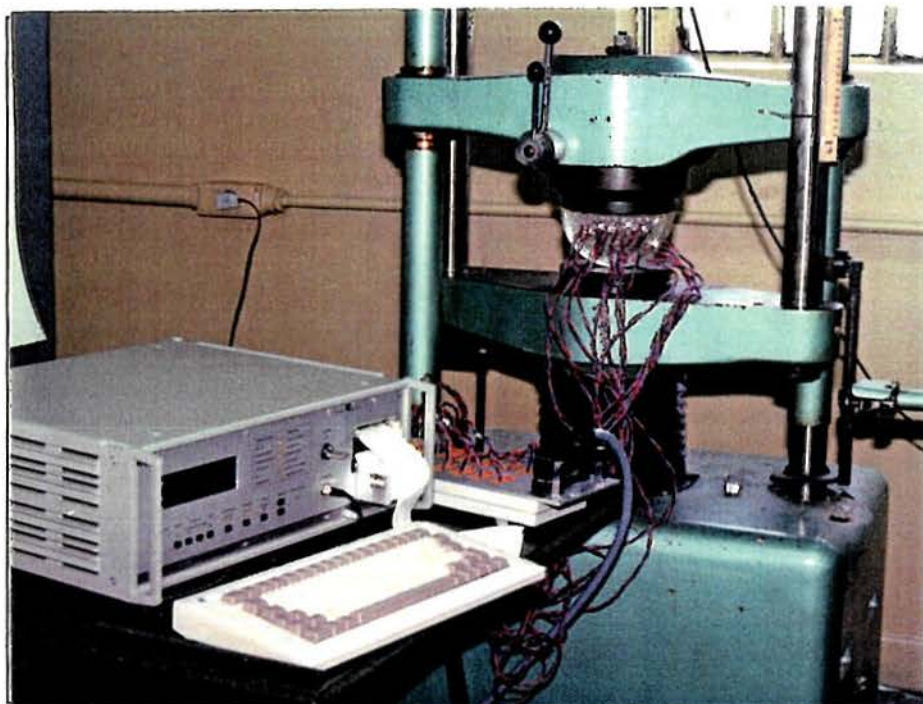


Figura 4.5 - Montagem do ensaio.

Na Figura 4.6 é mostrado o detalhe do corpo de prova sob carga. Os resultados dos ensaios serão apresentados no item 5.1.



Figura 4.6 - Detalhe do corpo de prova sob carga.

Os ensaios foram montados conforme indicado na Figura 4.5. A carga máxima aplicada foi de 1200N, a qual foi utilizada em uma análise grosseira prévia a fim de verificar tão somente se haveria problemas de ruptura.

4.4 Métodos computacionais

Nesta etapa do trabalho foi empregada a técnica de Elementos Finitos para calcular a distribuição de tensões na roda ferroviária e a área aproximada de contato. Isto foi feito através do programa ABAQUS.

Os modelos gerados foram os seguintes:

- Modelamento da roda simples em resina submetida ao ensaio descrito no item anterior;
- Modelamento do contato roda/trilho em aço considerando o trilho como uma superfície rígida;

O procedimento geral de uma análise por Elementos Finitos foi descrita no item 3.3.2. A seguir serão apresentadas as considerações feitas durante a construção dos modelos.

4.4.1 Modelo finito - ensaio

Um modelo finito é o conjunto formado pela malha (nós e elementos), cargas e restrições, também chamadas de condições de contorno, e propriedades de material.

O modelo gerado sobre a geometria da roda simples em resina, nós e elementos, pode ser reduzido devido à simetria geométrica e do carregamento em relação ao eixo yy . A base metálica da prensa foi considerada rígida, o que pode ser realmente suposto devido a grande diferença entre os módulos de elasticidade da resina e do aço.

As dimensões da geometria modelada são mostradas na Figura 4.2. Foram utilizados elementos sólidos tipo C3D20 para a região da roda que poderia

potencialmente entrar em contato com a base da prensa e elementos do tipo C3D20R para o restante do corpo, ambos possuindo 3 graus de liberdade por nó. A base metálica foi modelada com o elemento rígido tipo R3D4, com 6 graus de liberdade no nó de referência. A malha, mostrada na Figura 4.7a, foi gerada no pré-processador ABAQUS-Pre. As dimensões do modelo são apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dimensões dos modelos finitos gerados

Modelo	Roda deformável		Corpo rígido	
	Número de elementos	Número de nós	Número de elementos	Número de nós
Roda simples em resina/placa rígida	1219	3029	6	13
Roda ferroviária em aço/trilho rígido	2806	14468	126	145

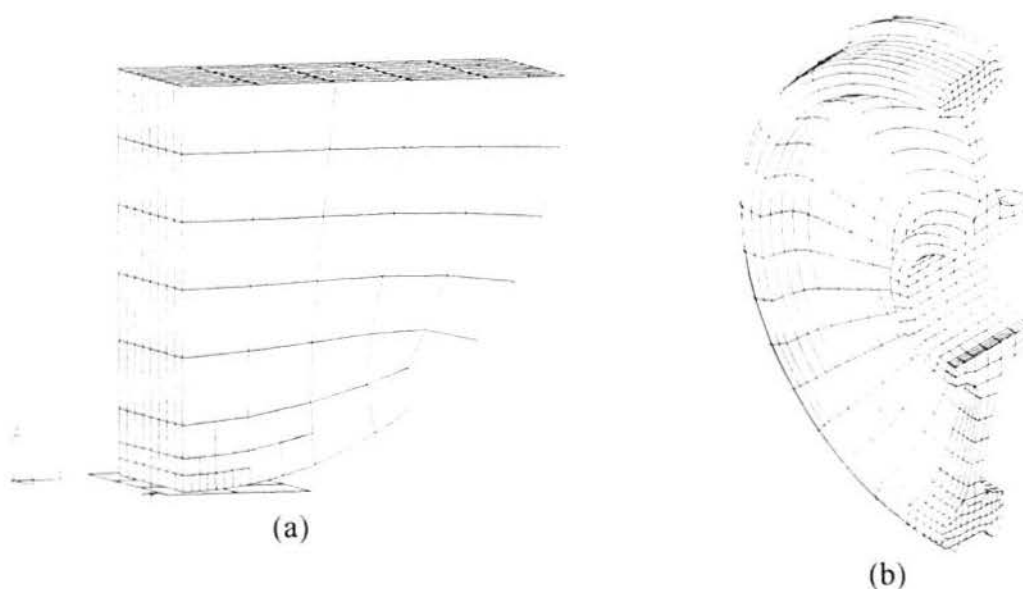


Figura 4.7 - Malha de elementos finitos. (a) Corpo de prova (b) Conjunto roda-trilho

4.4.2 Modelo finito - roda em aço/trilho

Os elementos utilizados foram os mesmos do modelo anterior para a roda, ou seja, C3D20 para a região de contato e C3D20R para o restante, e R3D4 para o boleto do trilho. As dimensões deste modelo é mostrada na tabela 4.3 e o modelo tridimensional pode ser visto na Figura 4.7b. Foi modelada somente uma metade da roda devido à condição de simetria citada anteriormente.

4.4.3 Modelo finito - condições de contorno

No modelo relacionado com o ensaio foi aplicada carga em forma de pressão na face superior do corpo de prova. Na face em que existe simetria isto foi indicado. Faltaria, ainda, uma restrição para condicionar o modelo, esta é representada pelo próprio contato, o qual restringe o deslocamento do corpo na direção xx . A placa considerada rígida foi totalmente vinculada através do nó de referência.

No modelo da roda em aço/trilho foram utilizadas, basicamente, as mesmas restrições nas regiões correspondentes. Já a carga de eixo foi aplicada como pressão variável segundo Shigley [26] no cubo da roda. O valor de carga utilizado foi o valor médio de uma ferrovia de alta carga, 120tnf (1200kN), o que significa 15tnf (150kN) por roda.

As análises foram desenvolvidas em uma estação de trabalho SUN-Sparc 20, com 48Mb de memória RAM e 4Gb de disco rígido. Os resultados destas análises serão apresentados no capítulo 4.

4.4.4 Considerações sobre o modelamento

Note-se que, neste trabalho em momento algum se falou em transmissão da carga, ou reação, do trilho para a roda. Isto ocorreu porque o que está sendo simulado é o contato físico entre dois sólidos, os quais irão se deformar conforme a carga for sendo aplicada. Desta forma tem-se uma maior fidelidade ao fenômeno físico em análise. Maiores detalhamentos, embora possíveis, não puderam ser realizados em

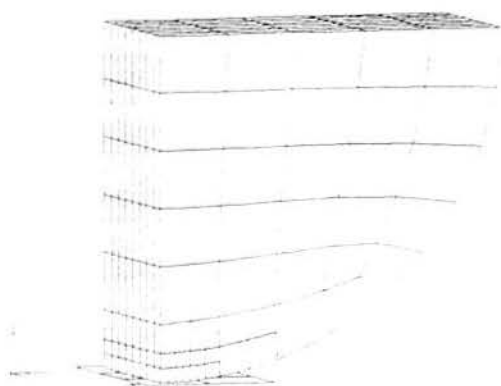
função do período relativamente curto em que o programa ABAQUS esteve à disposição. Estes detalhamentos incluem a técnica de submodelamento e análise elasto-plástica, na qual podem ser consideradas tensões residuais, movimento e falha por fadiga, e até mesmo análise de propagação de defeitos.

5 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais, das simulações numéricas.

5.1 Resultados referentes aos ensaios experimentais

Os resultados referentes a quatro ensaios serão apresentados sempre sob a forma tabular e sob a forma gráfica. O primeiro e o segundo ensaio apresentaram problemas relativos a propagação de uma trinca interna (geradas respectivamente, na desmoldagem do primeiro corpo de prova e por aplicação súbita de carga no segundo durante o ensaio) e seus resultados serão também apresentados a fim de que uma comparação com os ensaios bons possa ser estabelecida. Pois, devido à natureza do defeito, os resultados podem ser considerados qualitativamente valiosos. Na Figura 5.1 é apresentado o esquema que mostra as direções referidas nos gráficos e tabelas e a Figura 5.2 mostra o esquema do posicionamento dos extensômetros no corpo de prova.



Convenção para as direções do ensaio:

Direção 1: Dir. tangencial

Direção 2: Dir. radial

Direção 3: Dir. longitudinal

Figura 5.1 - Sistema de referência utilizado no ensaio.

As tabelas 5.1 e 5.2 contêm os resultados referentes ao ensaio de compressão do corpo de prova 1. Os resultados referentes à tabela 5.1 estão representados nos gráficos das Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 e os referentes à tabela 5.2 estão representados nos gráficos 5.6, 5.7 e 5.8.

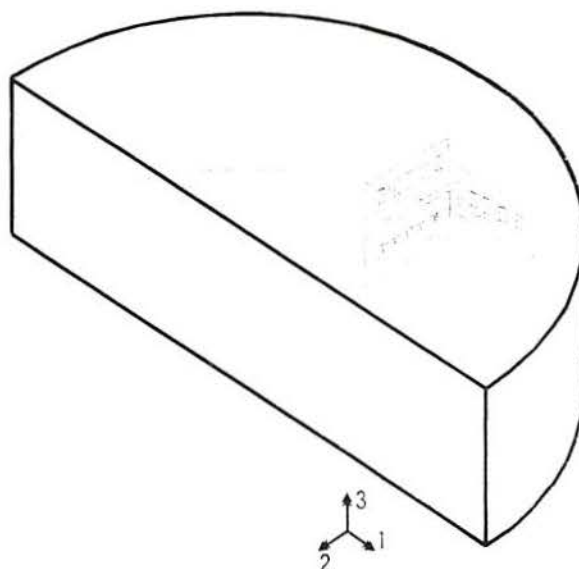


Figura 5.2 - Esquema do posicionamento dos extensômetros no corpo de prova.

Tabela 5.1 - Resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, em deformação relativa.

P (N)	Def. Tangenciais ($\mu\text{m}/\text{m}$)					Def. Longitudinais ($\mu\text{m}/\text{m}$)					Def. Radiais ($\mu\text{m}/\text{m}$)				
	Ext. 00A	Ext. 01A	Ext. 02A	Ext. 03A	Ext. 04A	Ext. 05A	Ext. 06A	Ext. 07A	Ext. 08A	Ext. 09A	Ext. 10A	Ext. 11A	Ext. 12A	Ext. 13A	Ext. 14A
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	156	118	41	-17	-51	126	138	117	93	78	-47	-70	-91	-102	-104
1000	326	237	71	-45	-108	272	307	257	198	159	-126	-147	-184	-210	-211
1500	528	396	124	-81	-180	446	477	406	318	258	-227	-273	-323	-359	-356
2000	690	517	184	-93	-270	680	676	638	511	395	-283	-327	-432	-461	-450
2300	815	602	212	-110	-320	806	752	710	602	477	-395	-439	-522	-583	-555
2600	946	690	242	-126	-364	937	852	779	674	552	-512	-558	-607	-669	-666
2900	1104	797	279	-141	-412	1085	980	882	764	635	-659	-715	-756	-799	-793
3400	1293	923	322	-159	-468	1258	1128	1008	874	731	-826	-928	-935	-962	-929
3450	1327	946	330	-164	-481	1278	1145	1019	887	743	-858	-964	-971	-994	-947
3900	1561	1111	395	-176	-544	1481	1323	1168	1015	858	-1086	-1207	-1203	-1217	-1140
4300	1750	1243	449	-184	-592	1635	1463	1285	1117	950	-1288	-1415	-1394	-1401	-1289
4700	1938	1378	504	-191	-640	1780	1595	1397	1214	1038	-1516	-1644	-1593	-1596	-1458
5000	2124	1501	557	-197	-689	1922	1725	1508	1312	1128	-1713	-1854	-1787	-1784	-1620

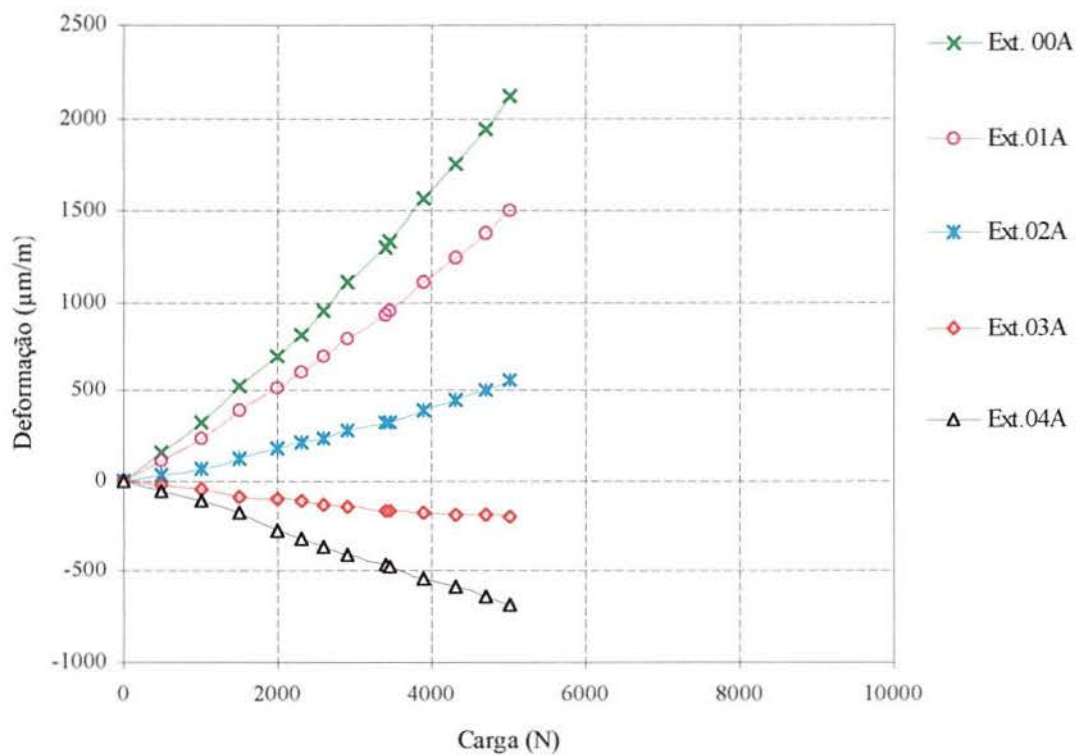


Figura 5.3 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, deformações tangenciais.

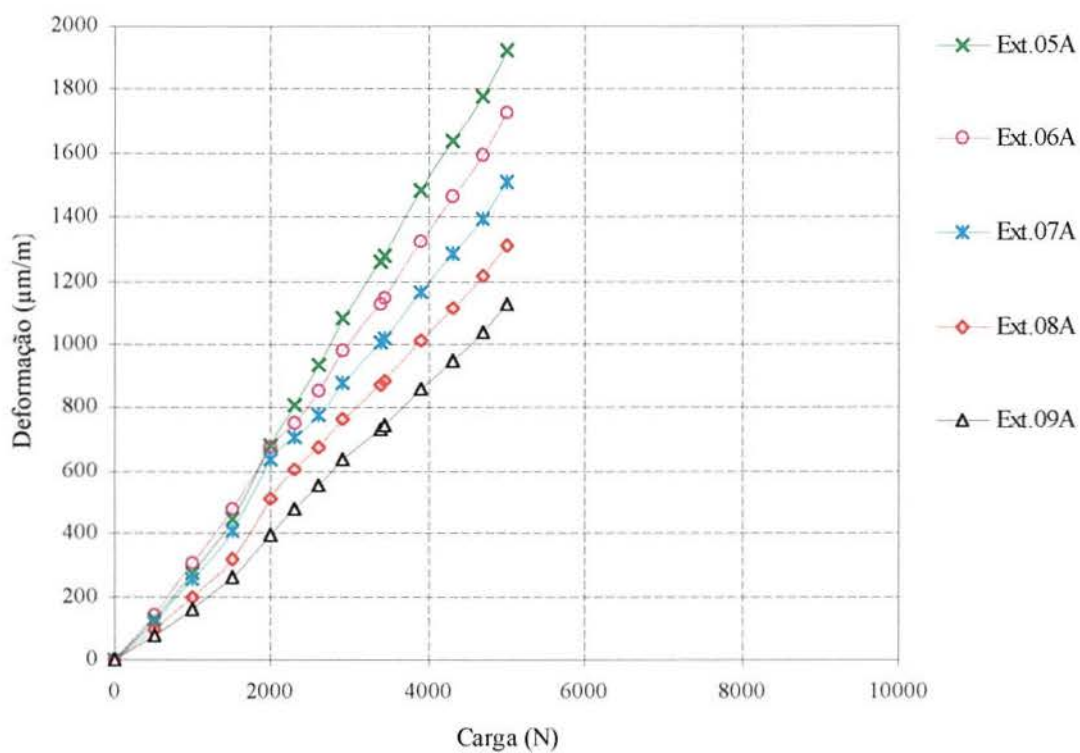


Figura 5.4 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, deformações longitudinais.

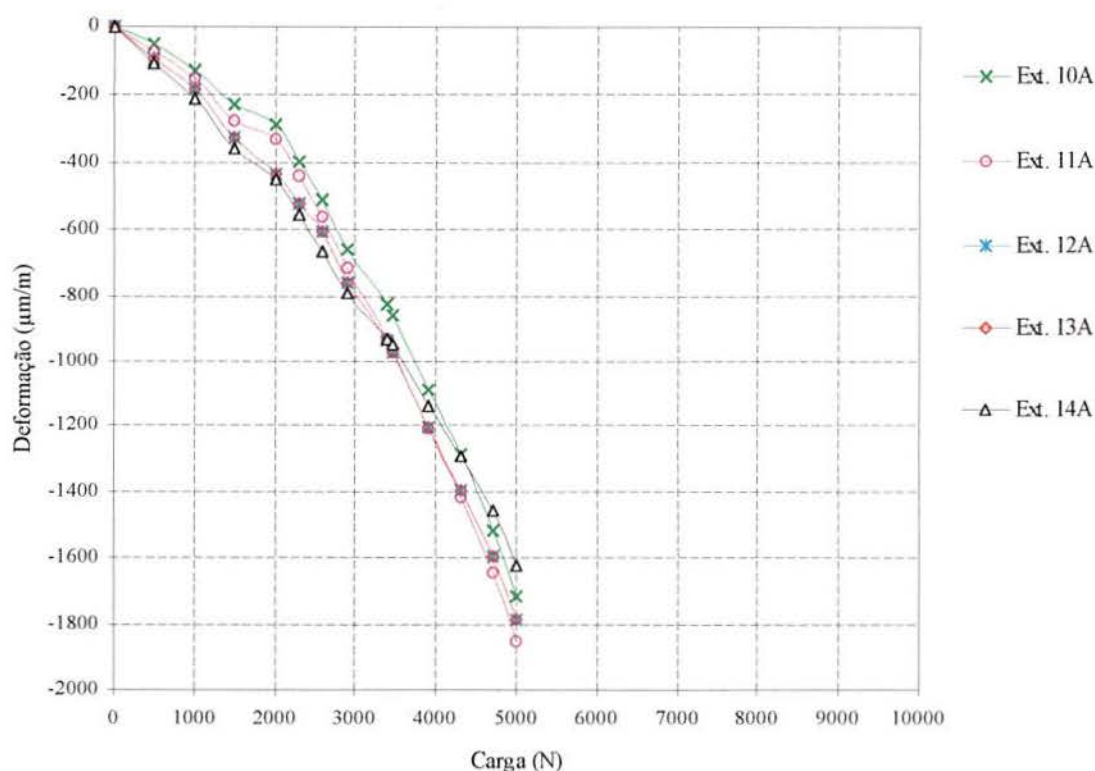


Figura 5.5 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 02, deformações radiais.

Tabela 5.2 - Resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, em deformação relativa.

P (N)	Def. Tangenciais (µm/m)					Def. Longitudinais (µm/m)					Def. Radiais (µm/m)				
	Ext. 00A	Ext. 01A	Ext. 02A	Ext. 03A	Ext. 04A	Ext. 05A	Ext. 06A	Ext. 07A	Ext. 08A	Ext. 09A	Ext. 10A	Ext. 11A	Ext. 12A	Ext. 13A	Ext. 14A
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
550	160	139	59	-13	-61	131	129	127	120	101	-20	-33	-55	-84	-93
1150	344	284	118	-30	-130	326	303	282	261	217	-57	-99	-140	-187	-202
1700	576	457	191	-39	-200	559	500	450	407	343	-134	-211	-271	-334	-346
2300	824	632	261	-48	-264	792	700	617	550	467	-246	-351	-421	-495	-498
2900	1163	875	351	-71	-354	1093	960	831	734	633	-467	-591	-665	-741	-724
3700	1552	1157	457	-95	-456	1420	1245	1060	922	813	-766	-911	-978	-1045	-999
4200	1833	1360	536	-113	-531	1647	1451	1231	1062	943	-1007	-1176	-1232	-1289	-1213
5200	2325	1718	684	-133	-650	2024	1785	1503	1255	1123	-1469	-1684	-1746	-1731	-1604

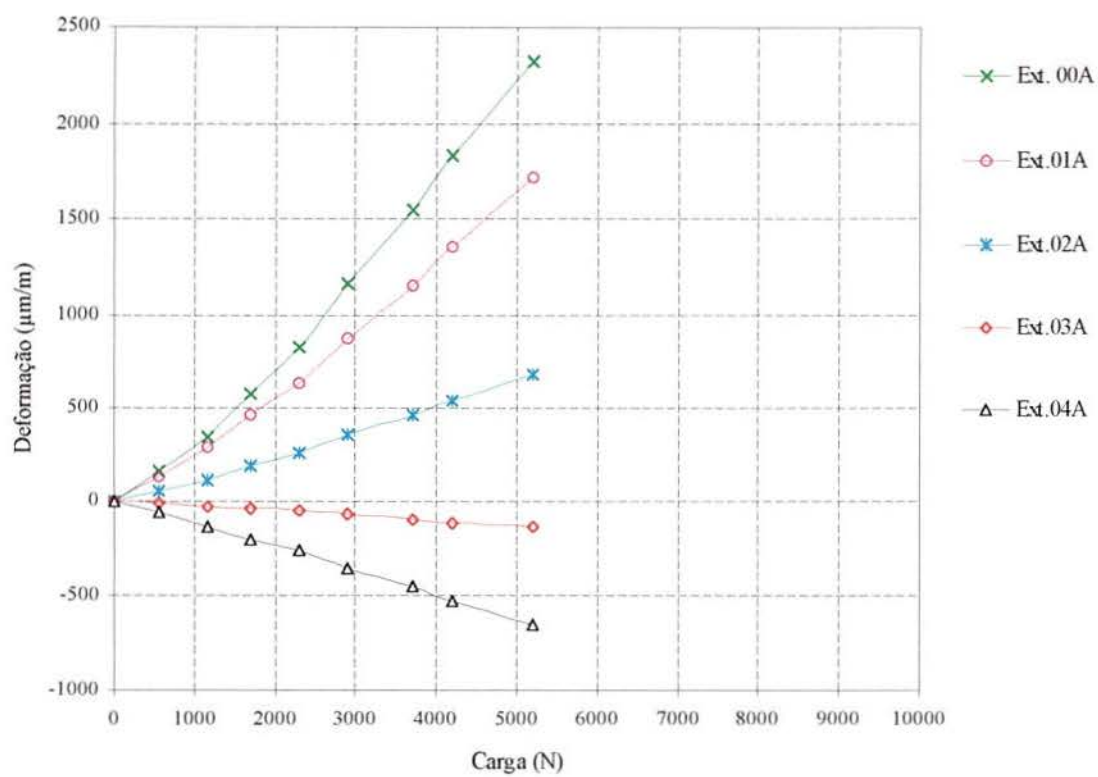


Figura 5.6 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações tangenciais.

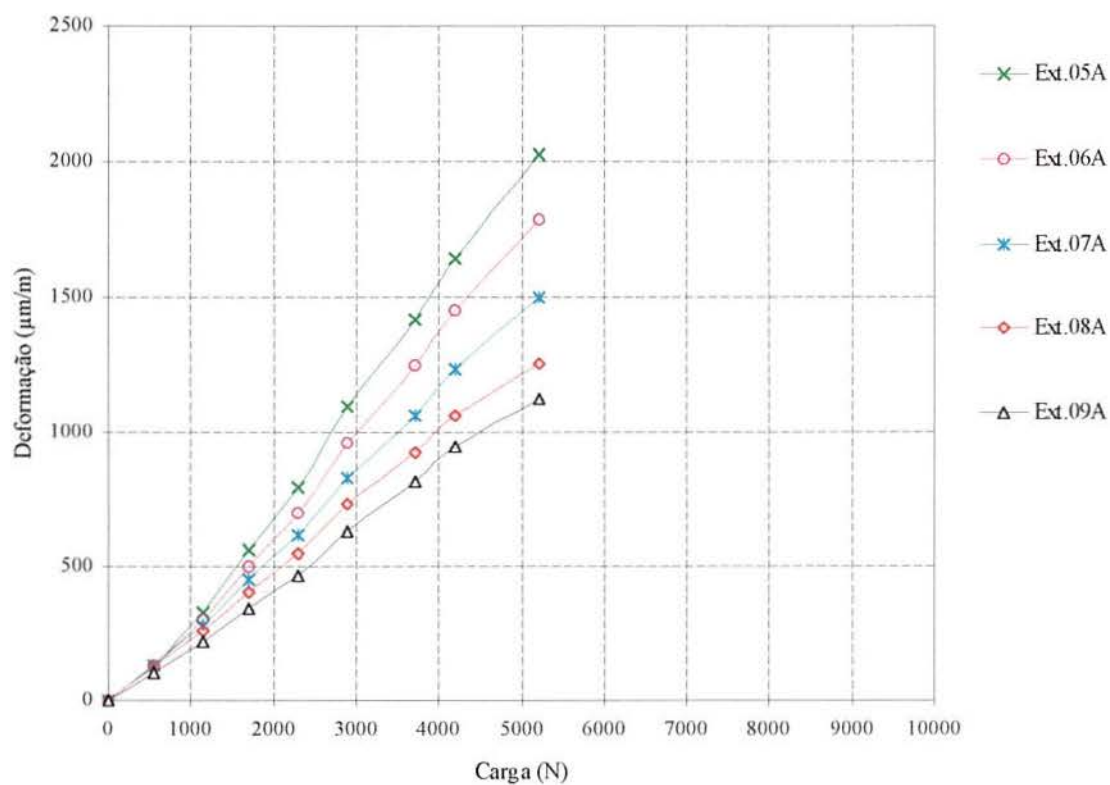


Figura 5.7 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações longitudinais

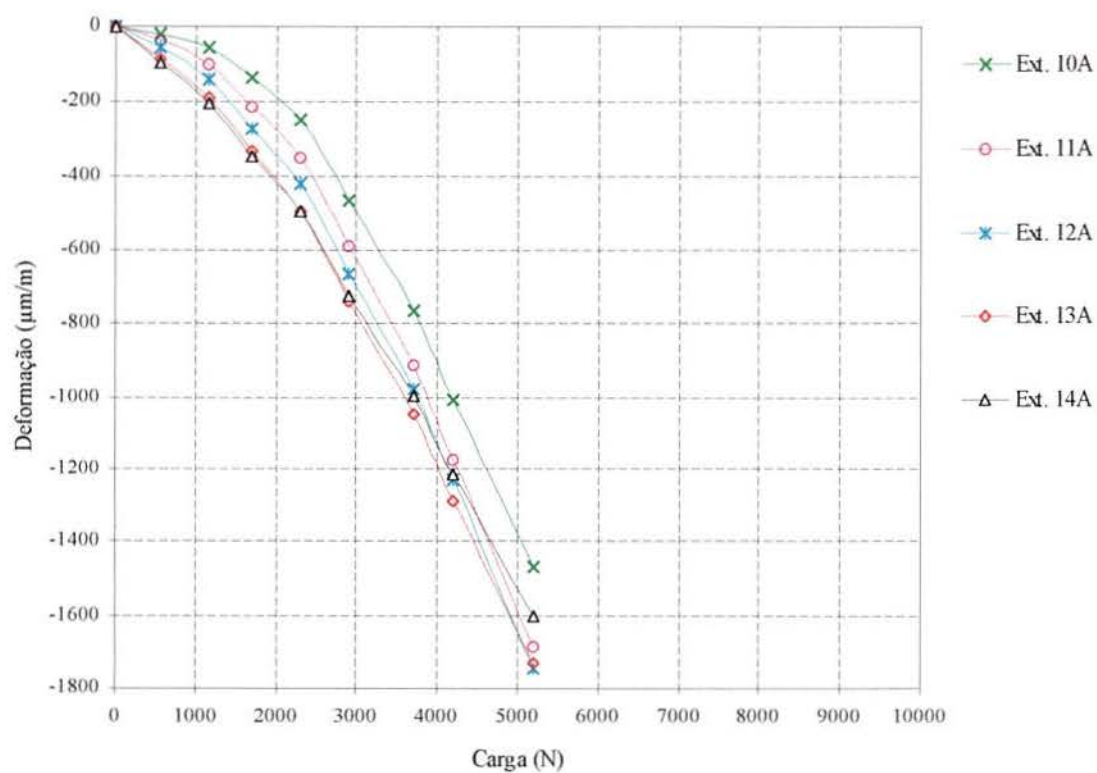


Figura 5.8 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 02, deformações radiais.

As tabelas 5.3 e 5.4 contêm os resultados referentes ao ensaio de compressão do segundo corpo de prova. Os resultados referentes à tabela 5.3 estão representados nos gráficos 5.8, 5.9 e 5.10 e os referentes à tabela 5.4 estão representados nos gráficos 5.11, 5.12 e 5.13.

Tabela 5.3 - Resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, em deformação relativa.

P (N)	Def. Tangenciais ($\mu\text{m}/\text{m}$)					Def. Longitudinais ($\mu\text{m}/\text{m}$)					Def. Radiais ($\mu\text{m}/\text{m}$)				
	Ext. 00A	Ext. 01A	Ext. 02A	Ext. 03A	Ext. 04A	Ext. 05A	Ext. 06A	Ext. 07A	Ext. 08A	Ext. 09A	Ext. 10A	Ext. 11A	Ext. 12A	Ext. 13A	Ext. 14A
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	-26	-19	0	29	47	28	16	16	17	20	-20	-61	-91	-104	-102
600	-50	-32	13	78	114	53	34	35	39	45	-42	-123	-182	-206	-204
1000	-90	-52	34	157	223	88	60	64	72	81	-79	-222	-322	-360	-356
1500	-149	-87	55	269	387	131	97	108	121	135	-136	-369	-524	-578	-566
2050	-215	-126	69	378	560	169	136	155	173	190	-201	-527	-729	-790	-768
2550	-290	-178	83	511	775	223	193	220	237	257	-291	-719	-968	-1033	-995
3050	-346	-216	94	615	946	266	242	273	290	310	-365	-874	-1155	-1220	-1168
3550	-434	-277	109	780	1223	348	330	364	377	393	-484	-1112	-1437	-1498	-1423
4000	-524	-342	117	940	1502	435	426	462	467	481	-602	-1343	-1710	-1765	-1666
4550	-610	-405	125	1092	1772	526	524	560	557	566	-716	-1560	-1963	-2012	-1891
5000	-700	-471	133	1251	2052	627	632	665	653	655	-838	-1783	-2221	-2262	-2119
5500	-808	-548	140	1428	2360	732	748	780	759	754	-975	-2024	-2498	-2532	-2364
6000	-885	-603	150	1560	2587	809	835	868	839	829	-1076	-2200	-2701	-2730	-2545
6500	-1008	-690	167	1775	2949	933	973	1006	966	947	-1239	-2478	-3022	-3041	-2829
7000	-1080	-737	190	1927	3201	1029	1079	1113	1061	1038	-1357	-2680	-3254	-3267	-3035
7550	-1177	-799	216	2117	3513	1144	1205	1239	1180	1147	-1502	-2921	-3535	-3542	-3286
8000	-1260	-850	242	2279	3771	1235	1307	1344	1278	1240	-1626	-3121	-3767	-3769	-3493
8500	-1348	-902	272	2446	4036	1325	1410	1451	1380	1337	-1764	-3336	-4015	-4010	-3714
9000	-1414	-941	301	2591	4266	1408	1501	1545	1467	1420	-1873	-3509	-4222	-4212	-3898

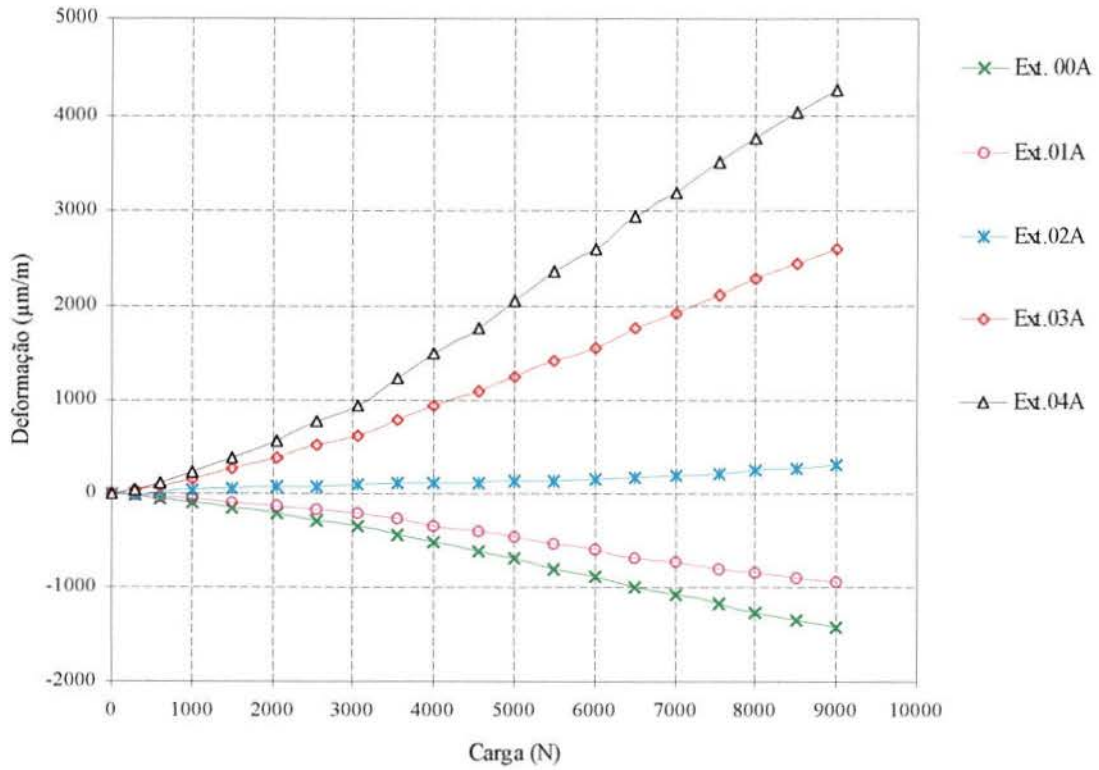


Figura 5.9 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, deformações tangenciais

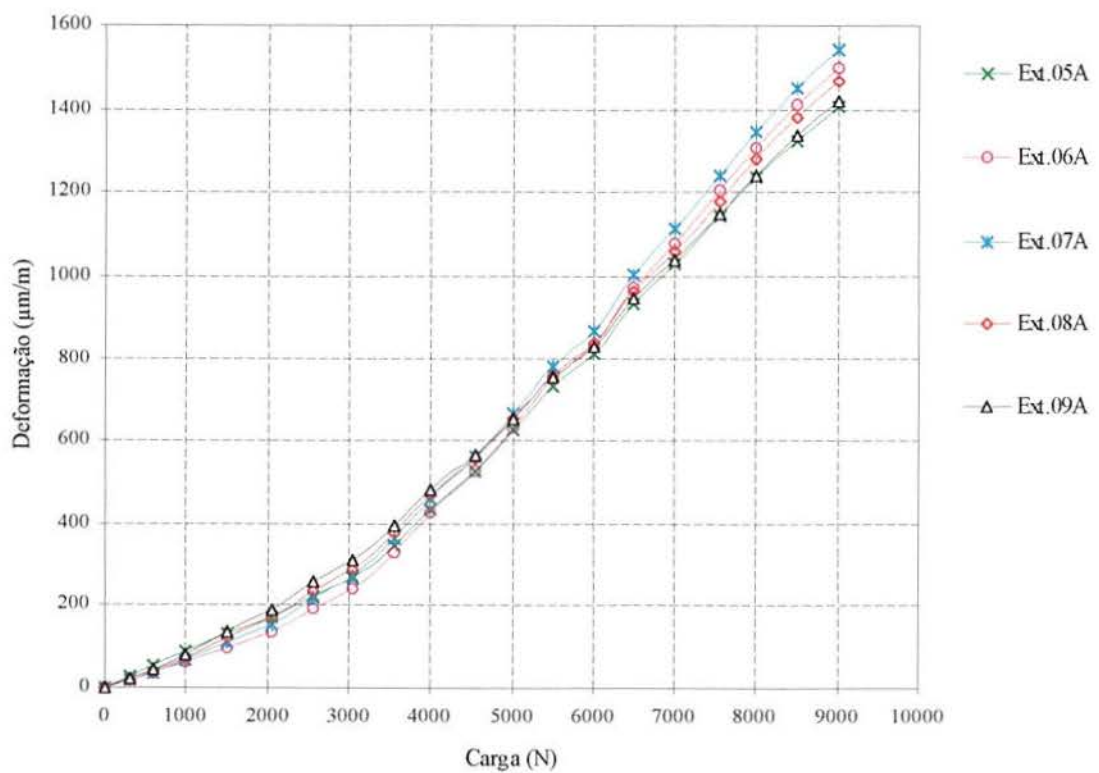


Figura 5.10 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, deformações longitudinais.

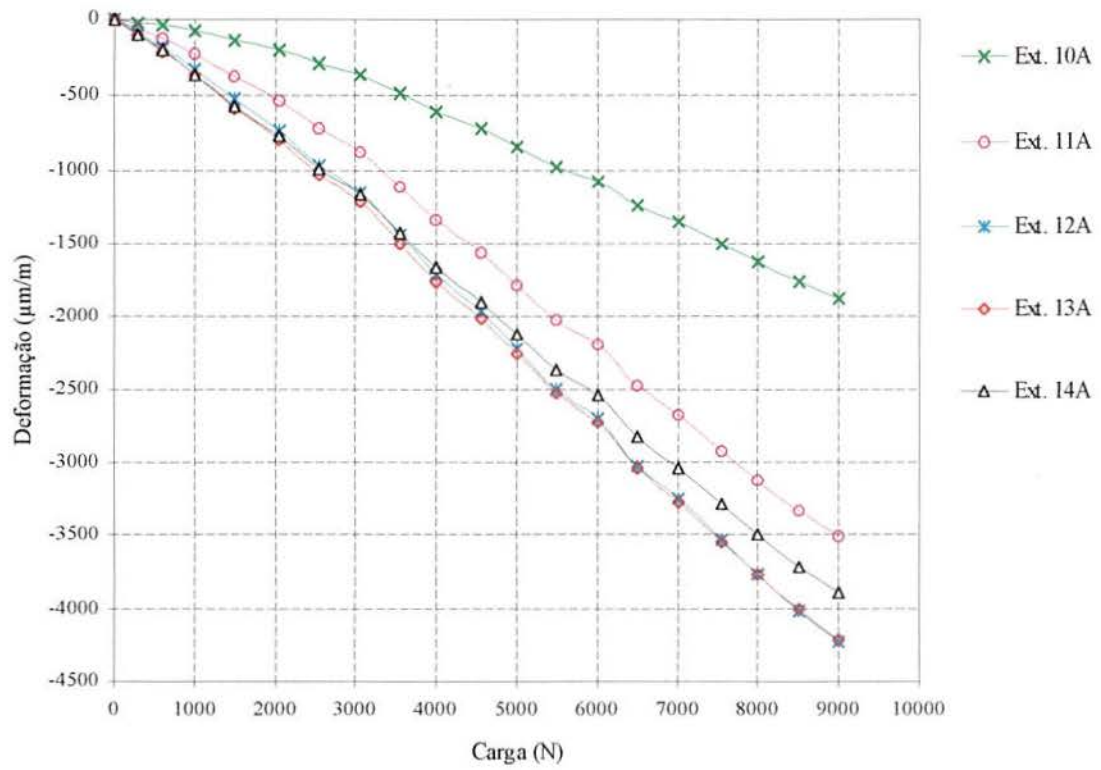


Figura 5.11 - Gráfico dos resultados do ensaio 01 do corpo de prova 03, deformações radiais.

Tabela 5.4 - Resultados do ensaio 02 do corpo de prova 03, em deformação relativa.

P (N)	Def. Tangenciais ($\mu\text{m/m}$)					Def. Longitudinais ($\mu\text{m/m}$)					Def. Radiais ($\mu\text{m/m}$)				
	Ext. 00A	Ext. 01A	Ext. 02A	Ext. 03A	Ext. 04A	Ext. 05A	Ext. 06A	Ext. 07A	Ext. 08A	Ext. 09A	Ext. 10A	Ext. 11A	Ext. 12A	Ext. 13A	Ext. 14A
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
450	-46	-23	13	69	104	-2	-6	5	17	28	-17	-99	-160	-184	-184
650	-63	-33	19	96	141	6	-2	11	25	39	-30	-138	-217	-248	-248
1050	-102	-53	35	165	239	25	11	30	51	70	-57	-227	-347	-392	-391
1500	-164	-86	60	275	395	51	34	63	93	119	-105	-368	-545	-609	-601
2000	-226	-126	75	379	555	85	66	103	135	165	-170	-520	-744	-816	-798
2550	-317	-183	99	539	801	126	116	167	207	241	-267	-745	-1029	-1110	-1073
3000	-384	-226	115	656	987	162	161	220	261	297	-345	-909	-1231	-1314	-1263
3550	-478	-288	137	830	1256	222	233	300	340	377	-455	-1132	-1499	-1581	-1507
4000	-556	-340	156	977	1486	278	299	371	409	444	-549	-1315	-1716	-1795	-1703
4550	-651	-404	176	1154	1763	353	386	466	494	526	-662	-1529	-1967	-2042	-1930
5000	-761	-479	200	1361	2087	453	497	571	594	619	-800	-1774	-2251	-2319	-2180
5500	-878	-556	231	1582	2425	562	618	692	704	722	-947	-2032	-2548	-2608	-2444
6000	-978	-620	262	1775	2714	658	725	798	801	812	-1073	-2247	-2796	-2850	-2664
6500	-1081	-684	295	1971	3003	755	834	907	899	903	-1201	-2462	-3042	-3090	-2882
7000	-1180	-743	331	2159	3278	850	940	1012	995	992	-1327	-2669	-3280	-3322	-3094
7600	-1295	-811	378	2386	3606	960	1066	1139	1112	1101	-1482	-2918	-3567	-3601	-3349
8050	-1401	-870	428	2595	3901	1061	1182	1257	1222	1205	-1631	-3151	-3832	-3861	-3586
8500	-1475	-906	475	2768	4141	1156	1284	1360	1317	1294	-1752	-3340	-4050	-4074	-3781
9050	-1565	-951	529	2966	4413	1255	1394	1474	1423	1394	-1896	-3559	-4302	-4319	-4005

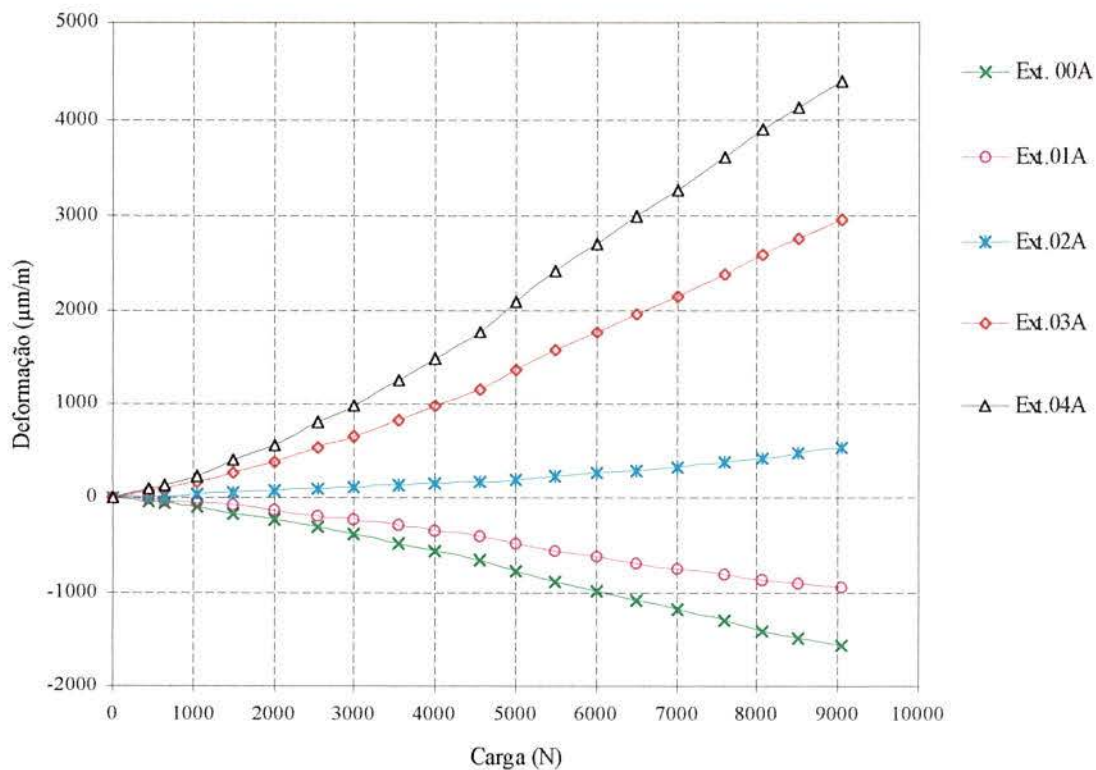


Figura 5.12 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 03, deformações tangenciais.

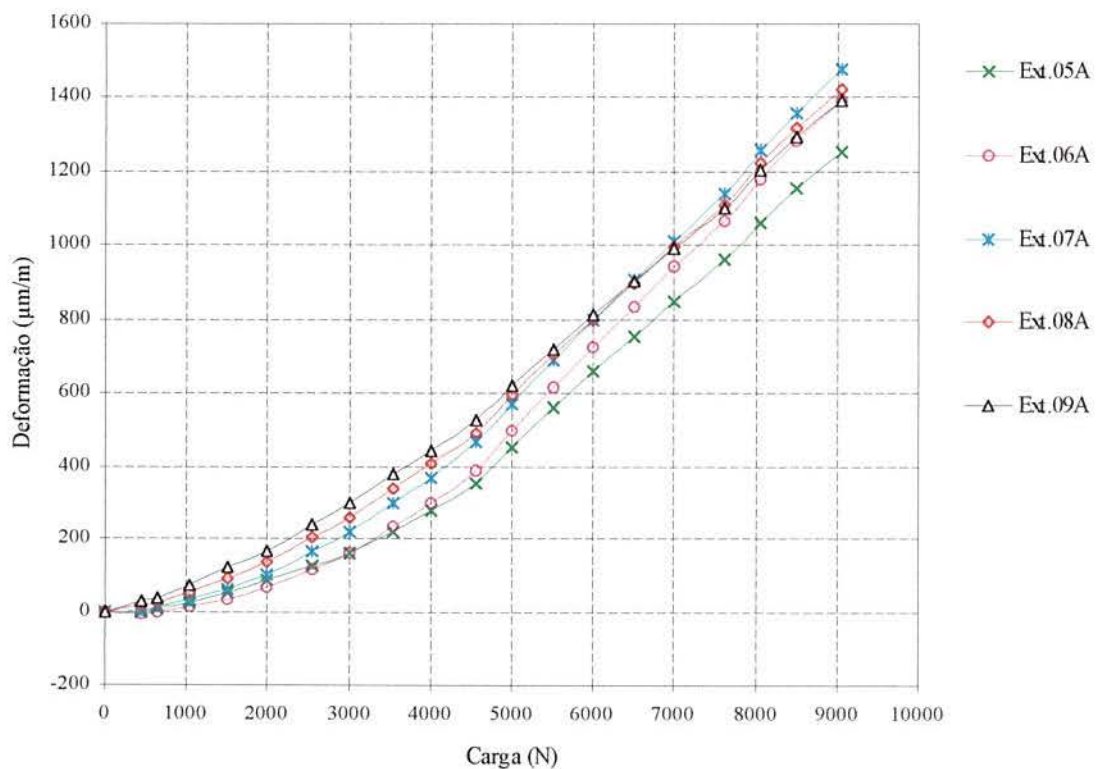


Figura 5.13 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 03, deformações longitudinais.

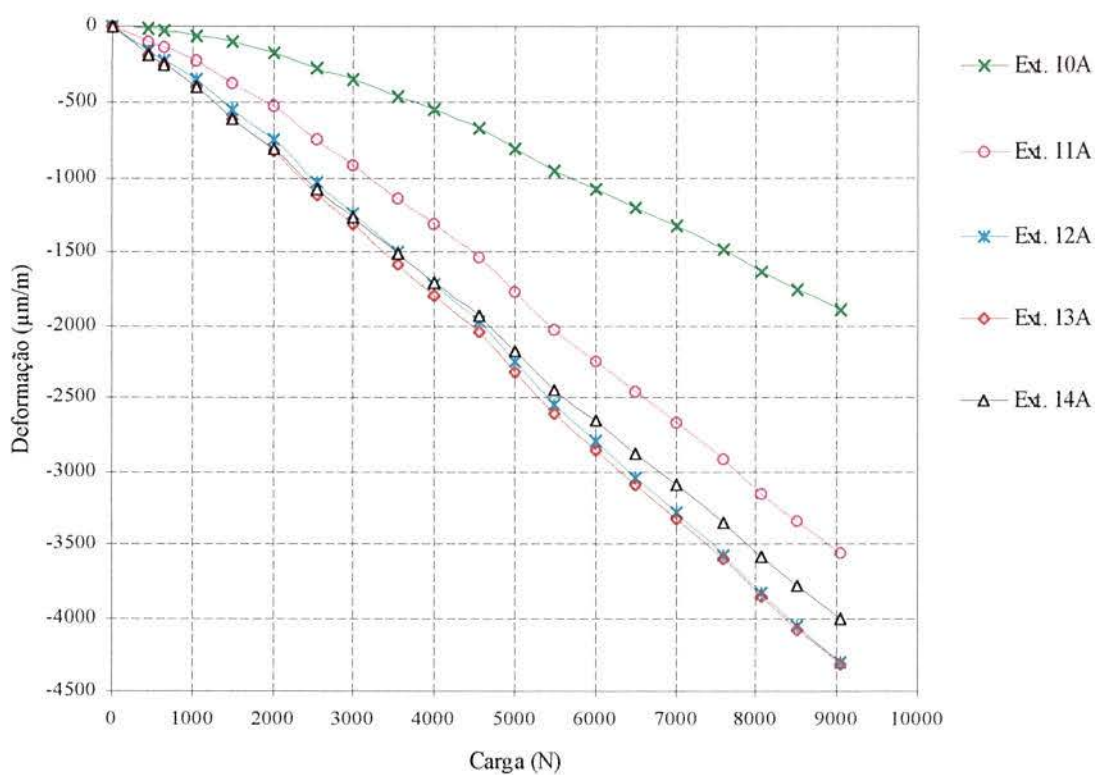


Figura 5.14 - Gráfico dos resultados do ensaio 02 do corpo de prova 03, deformações radiais.

5.2 Resultados referentes à análise computacional

A seguir serão apresentados os resultados da análise computacional referentes aos modelos finitos do ensaio com a roda sintética e do contato roda-trilho. Estes resultados serão apresentados sob a forma de mapas da distribuição das tensões, deformações e deslocamentos nos sólidos respectivos. Os resultados de deformações para o modelo do corpo de prova em resina serão representados sob a forma gráfica a fim de permitir uma melhor comparação com os resultados experimentais. Posteriormente, estes resultados serão discutidos.

5.2.1 Resultados referentes à roda em resina

Os dados apresentados nos gráficos das figuras 5.15, 5.16 e 5.17 a fim de permitir a comparação com os resultados dos ensaios referem-se a nós localizados em posições próximas às dos extensômetros, sendo suas coordenadas mostradas na tabela 5.5. Os nós utilizados para montar o gráfico de deformações tangenciais foram os seguintes, 4124, 4376, 4375, 4627 e 4626 e os utilizados para montar os gráficos de deformações longitudinais e radiais foram 4171, 4124, 4127, 4109 e 4112.

Tabela 5.5 - Coordenadas dos nós utilizados para monitorar a deformação na análise.

Nó	Coord na direção 1	Coord na direção 2	Coord na direção 3
4124	-3,35121E-6	-76,6667	20
4376	-3,35121E-6	-76,6667	22,5
4375	-3,35121E-6	-76,6667	25
4627	-3,35121E-6	-76,6667	27,5
4626	-3,35121E-6	-76,6667	30
4171	3,42406E-6	78,3333	20
4127	3,27836E-6	-75	20
4109	-3,2055E-6	-73,3333	20
4112	-3,0598E-6	-70	20

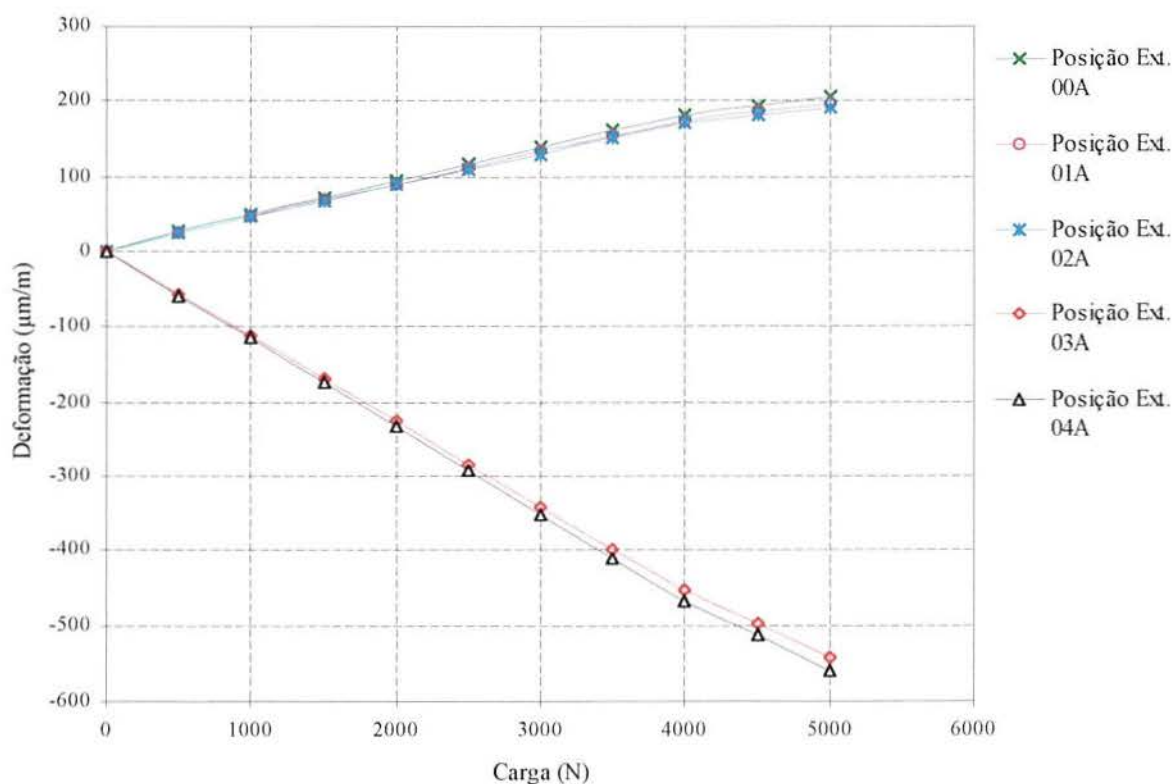


Figura 5.15 - Gráfico dos resultados do modelamento do corpo de prova, deformações tangenciais.

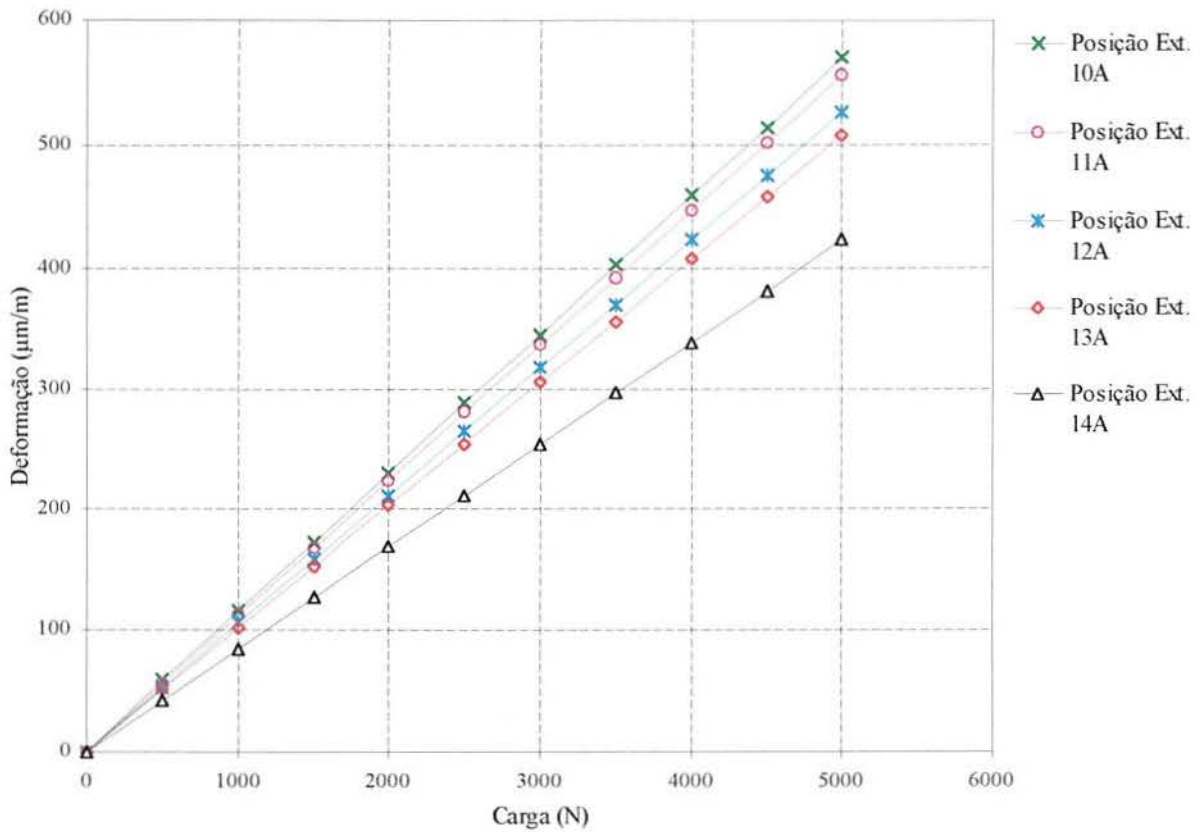


Figura 5.16 - Gráfico dos resultados do corpo de prova, deformações longitudinais.

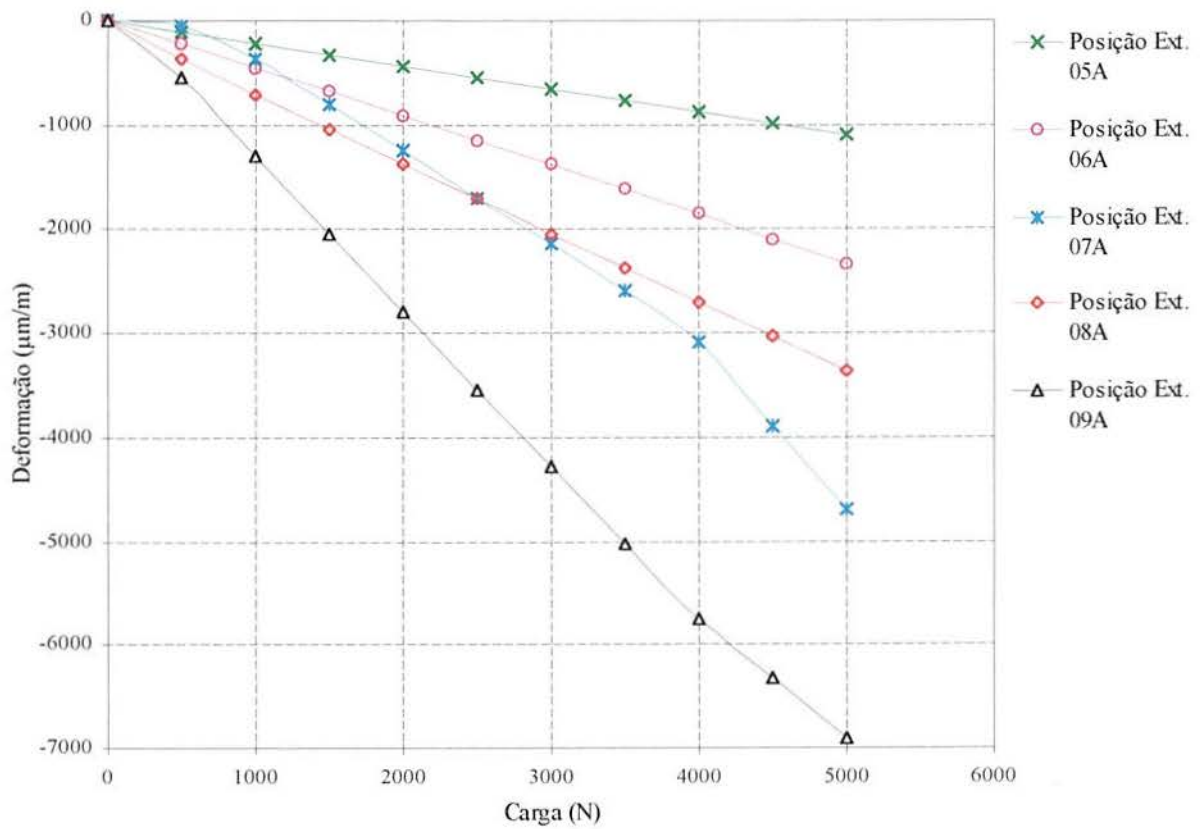


Figura 5.17 - Gráfico dos resultados do corpo de prova, deformações radiais.

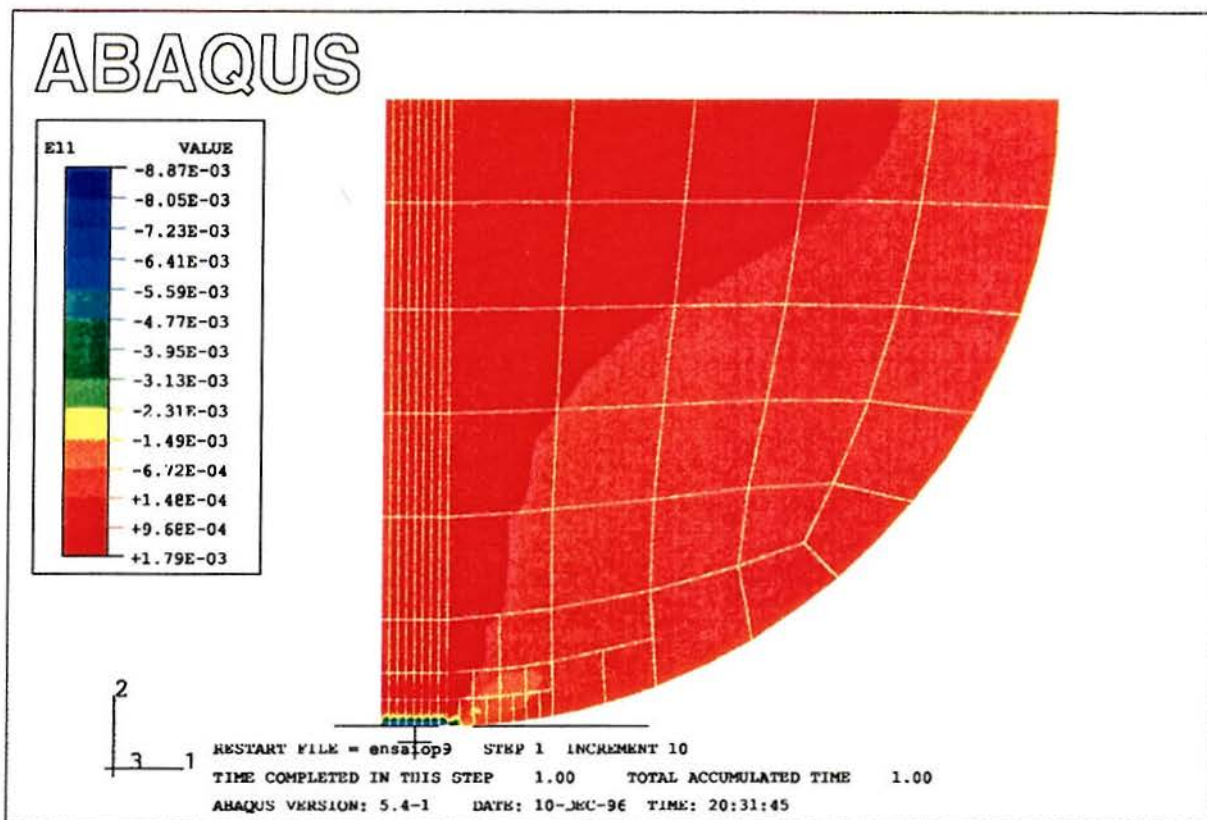


Figura 5.18 - Distribuição das deformações na direção tangencial.

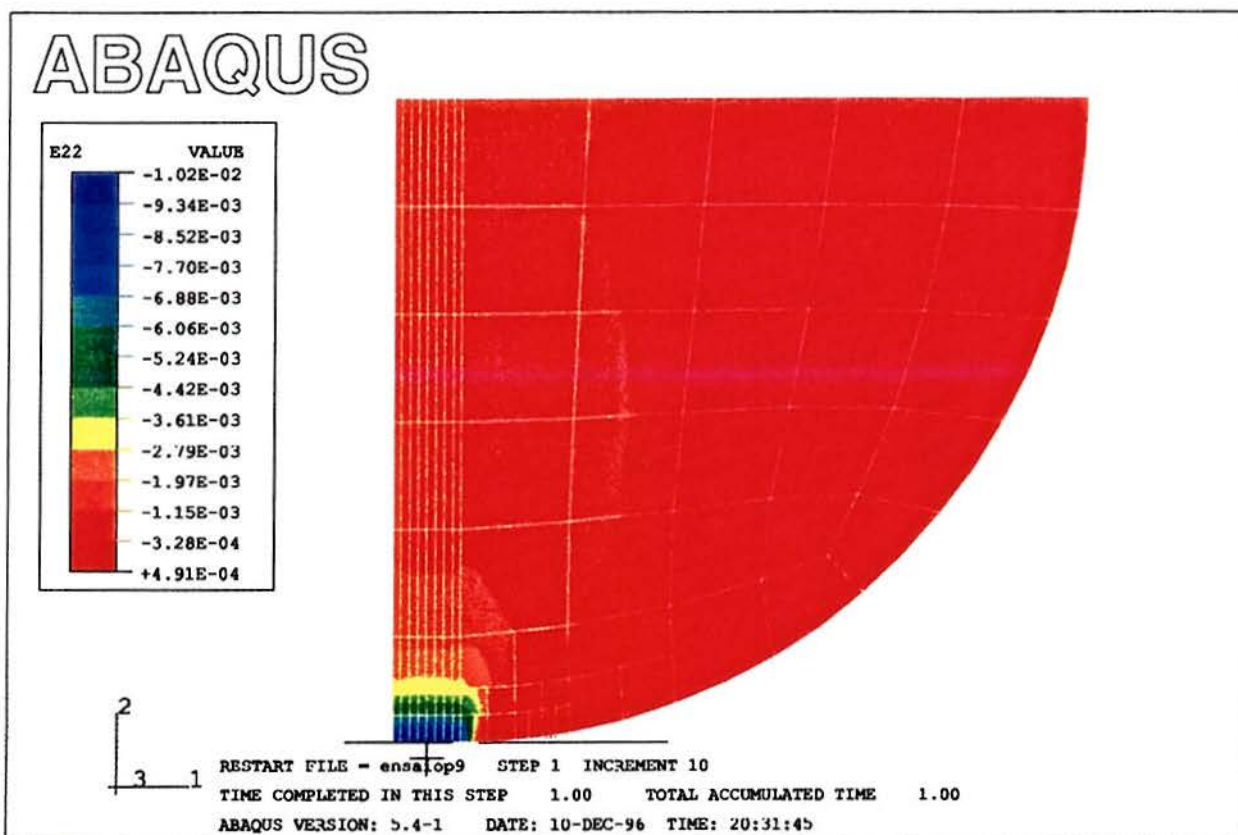


Figura 5.19 - Distribuição das deformações na direção radial.

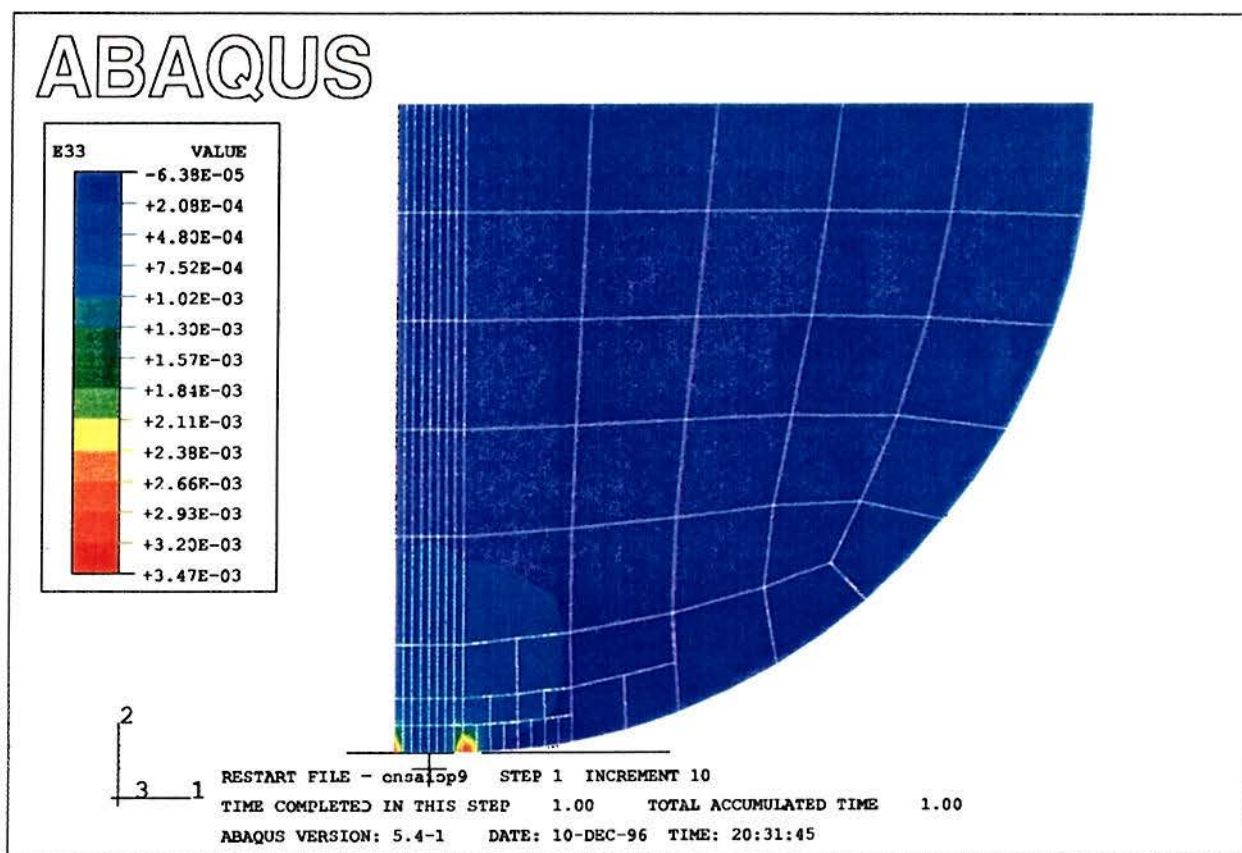


Figura 5.20 - Distribuição das deformações na direção longitudinal.

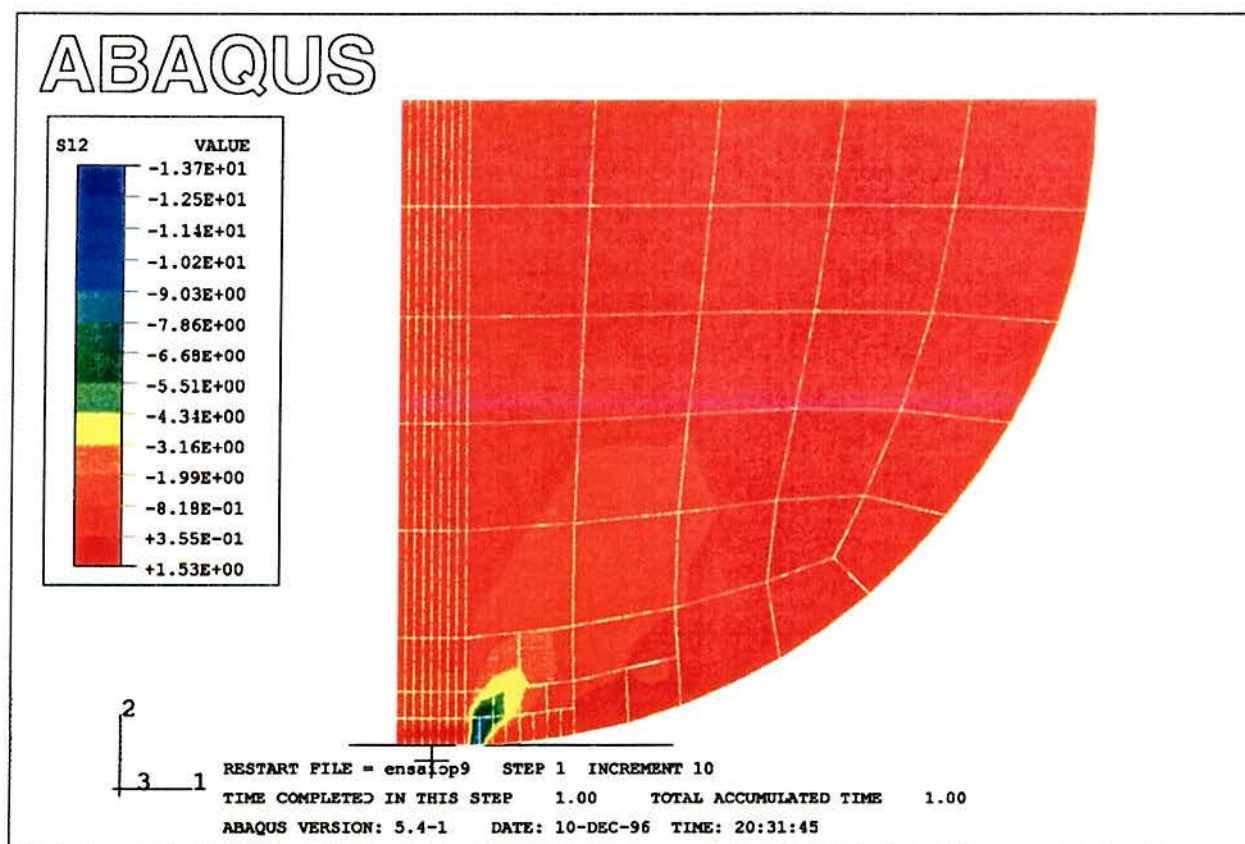


Figura 5.21 - Distribuição da tensão cisalhante S12.

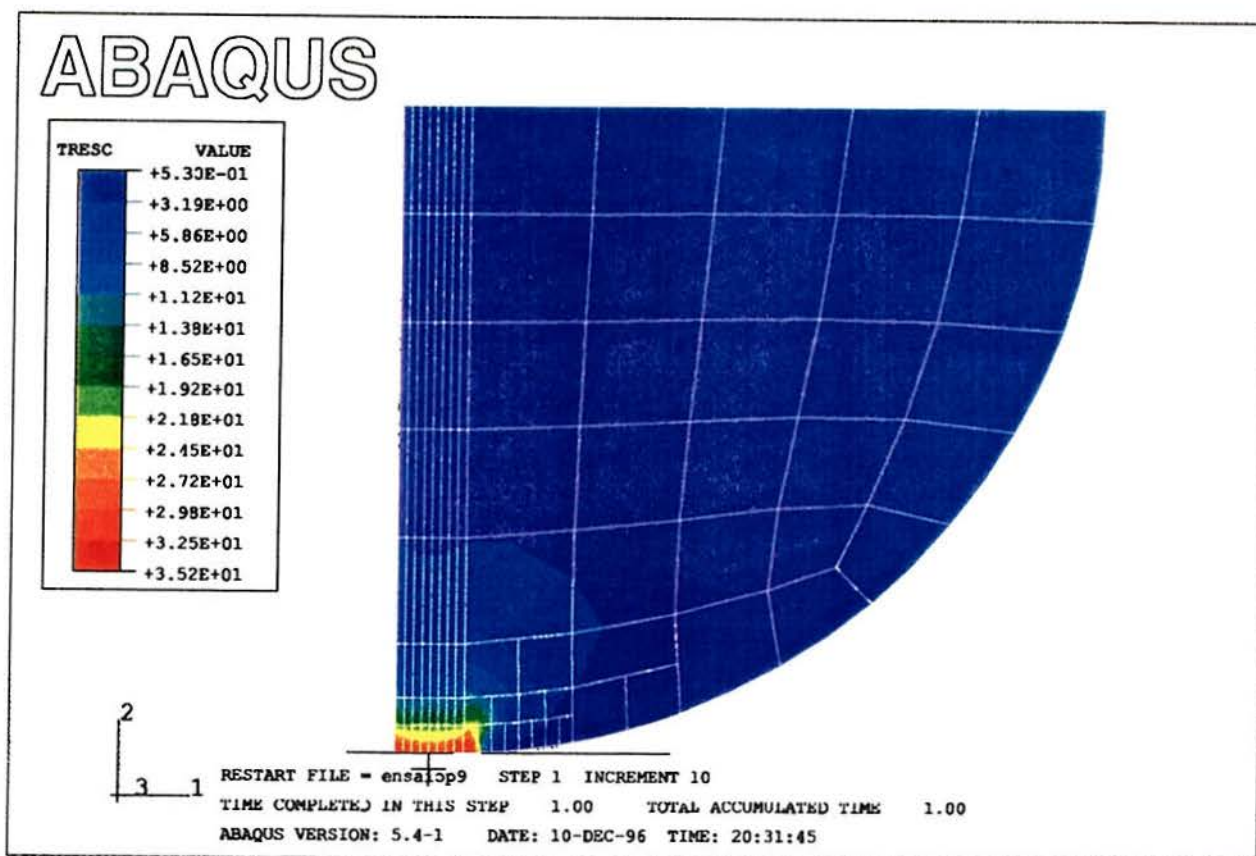


Figura 5.22 - Distribuição da tensão equivalente de Tresca.

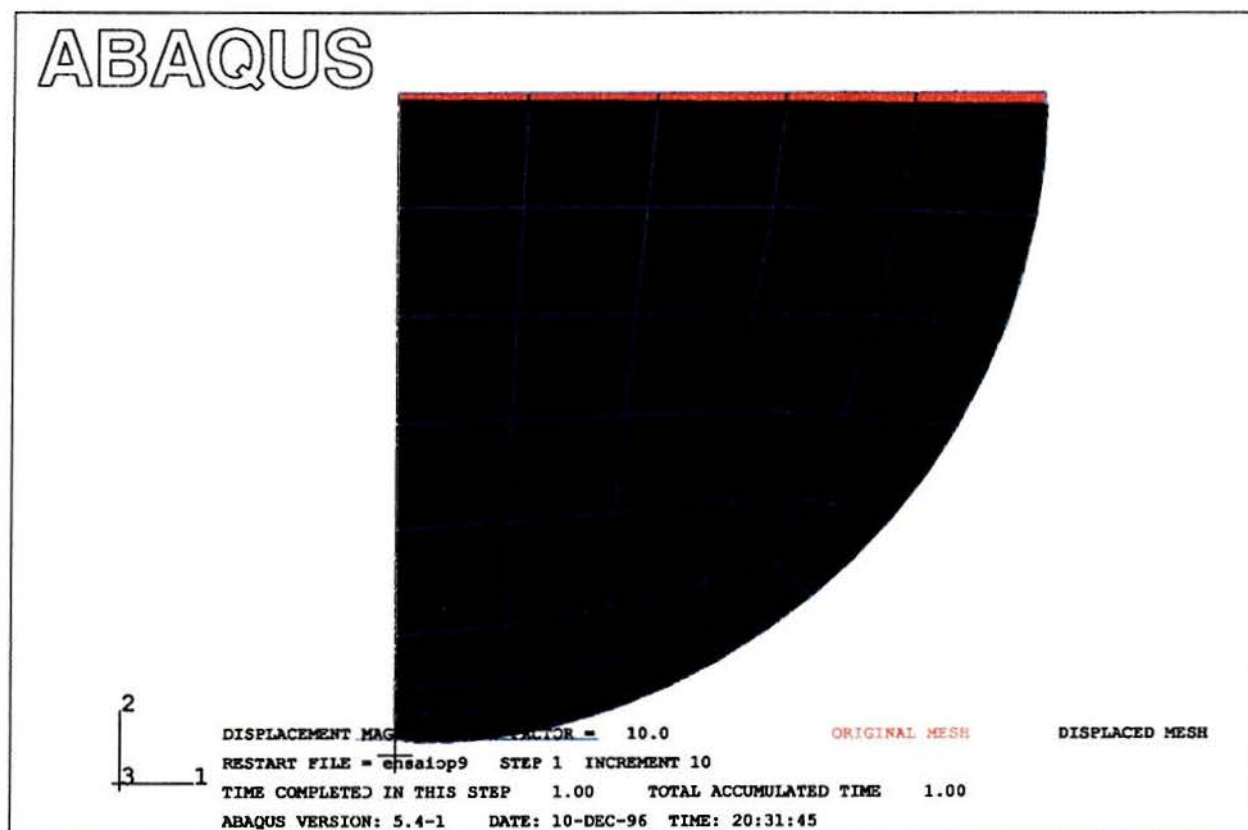


Figura 5.23 - Deformada do corpo de prova. Malha deformada em preto. Malha original em vermelho.

5.2.2 Resultados referentes ao contato roda-trilho em aço

Os resultados referentes à análise do contato roda-trilho serão apresentados sob a forma de mapas da distribuição de tensão e deformação. A Figura 5.24 mostra o detalhe da ampliação da região próxima ao contato entre a roda e o trilho feita para melhorar a visualização da concentração de tensão e deformação nesta região.



Figura 5.24 - Detalhe da ampliação utilizada para visualização dos resultados da análise computacional.

As figuras 5.25 a 5.32 mostram os resultados da análise computacional dos valores de deformação e tensão na roda ferroviária.

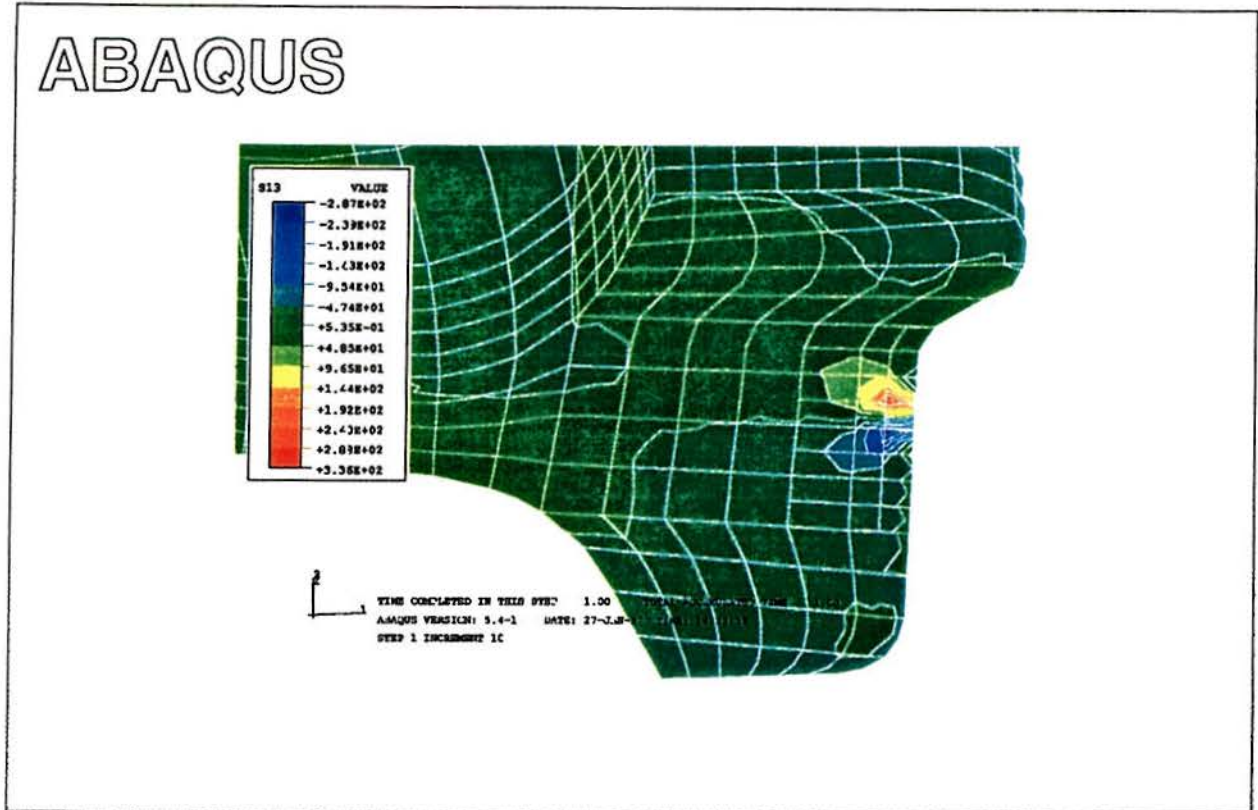


Figura 5.25 - Distribuição das tensões cisalhantes no plano de simetria da roda ferroviária.

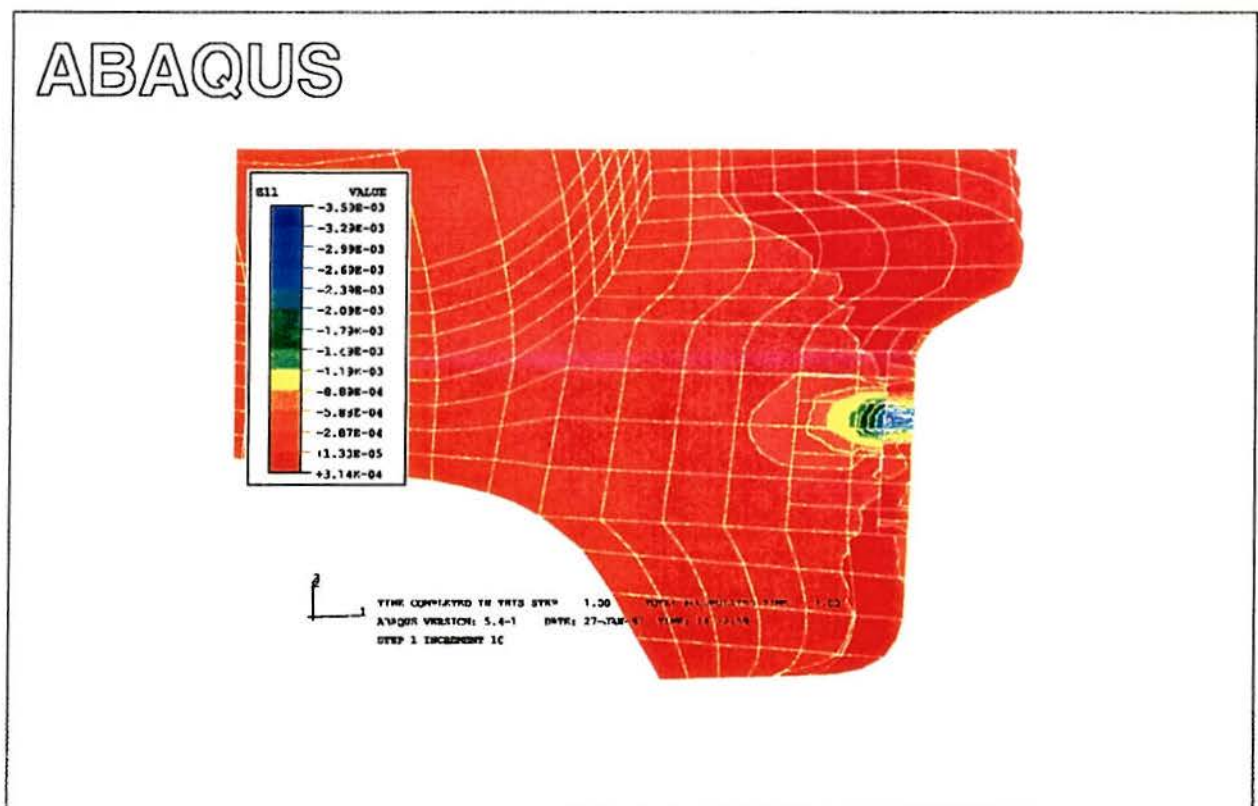


Figura 5.26 - Distribuição das deformações radiais na roda ferroviária.

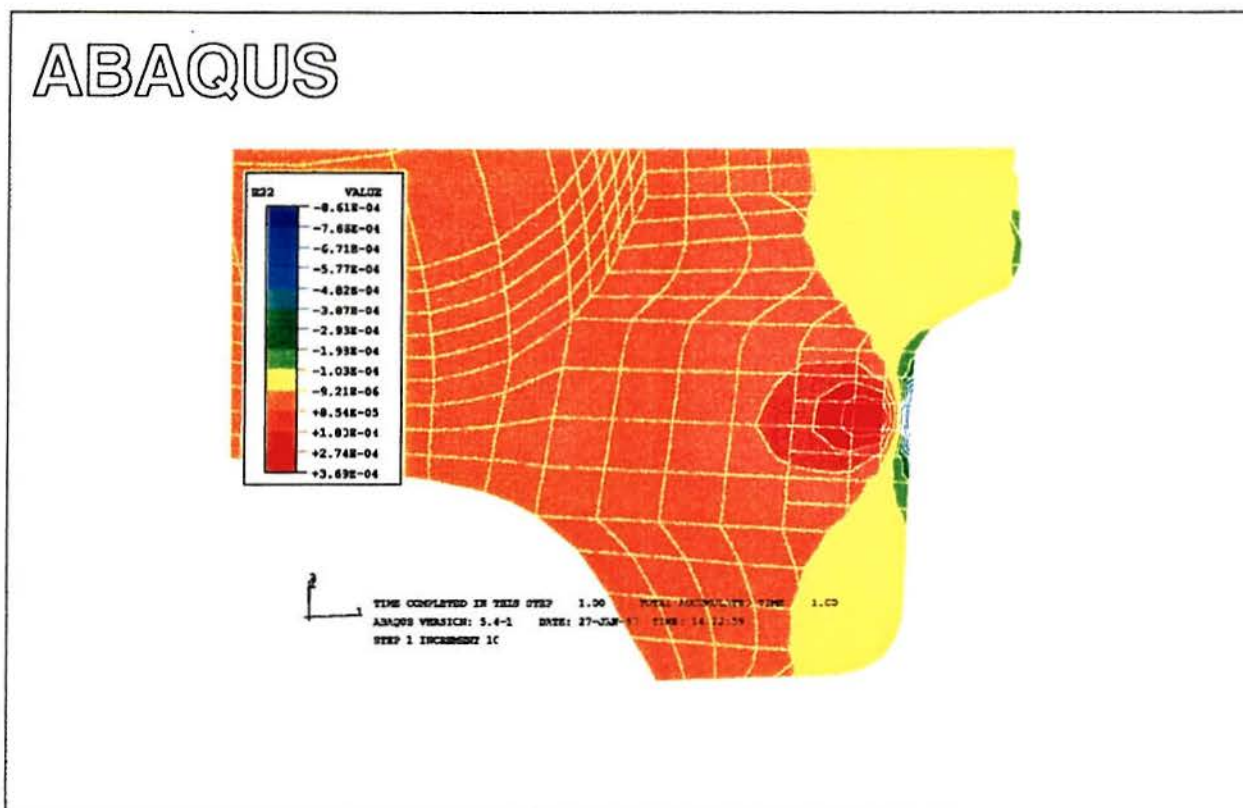


Figura 5.27 - Distribuição das deformações tangenciais (direção do rolamento).

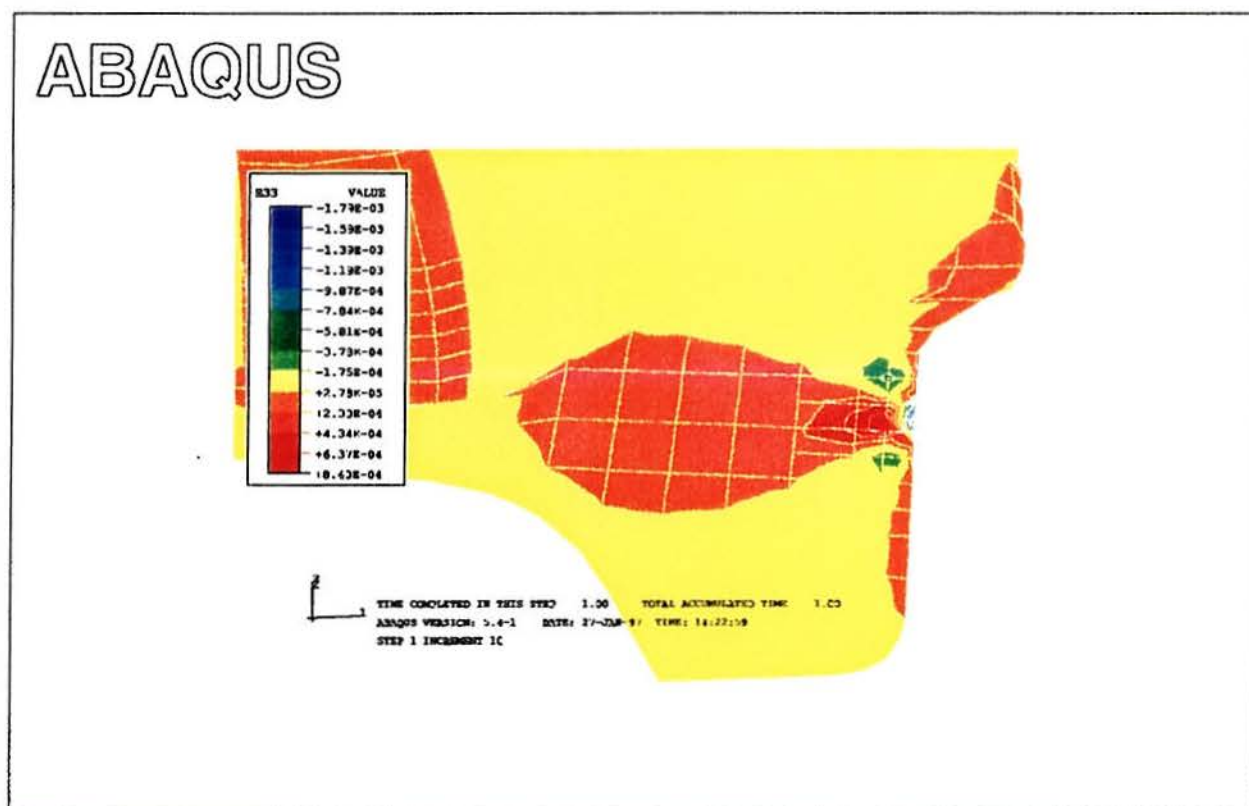


Figura 5.28 - Distribuição das deformações transversais ao raio da roda ferroviária e à direção de rolamento.

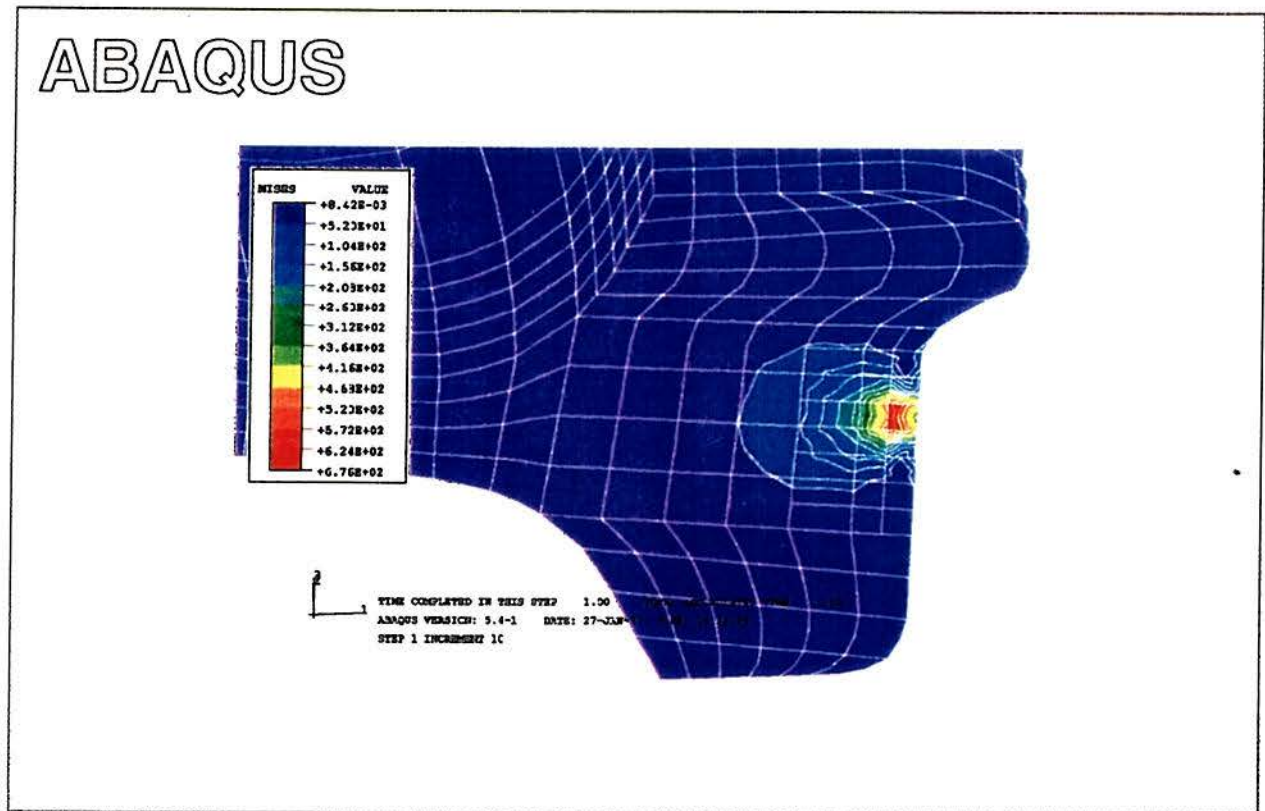


Figura 5.29 - Distribuição da tensão equivalente de von Mises.

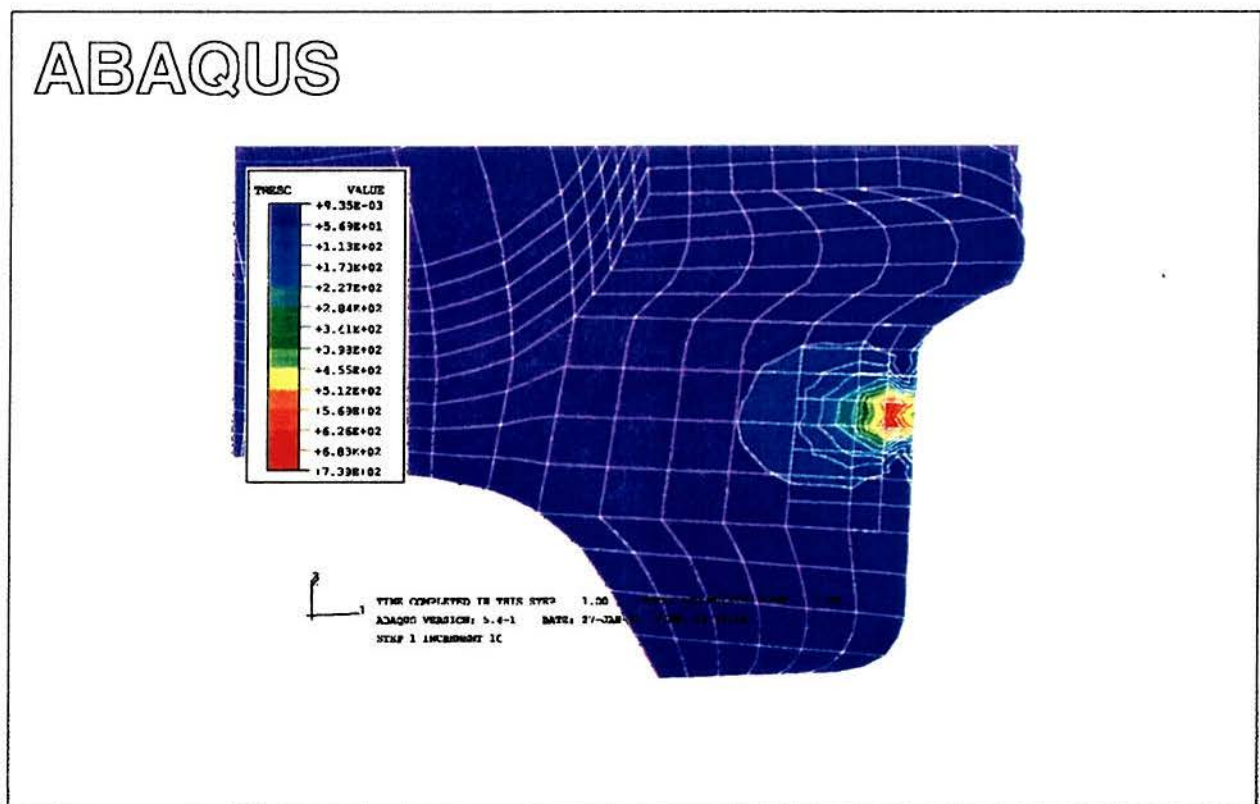


Figura 5.30 - Distribuição da tensão equivalente de Tresca.

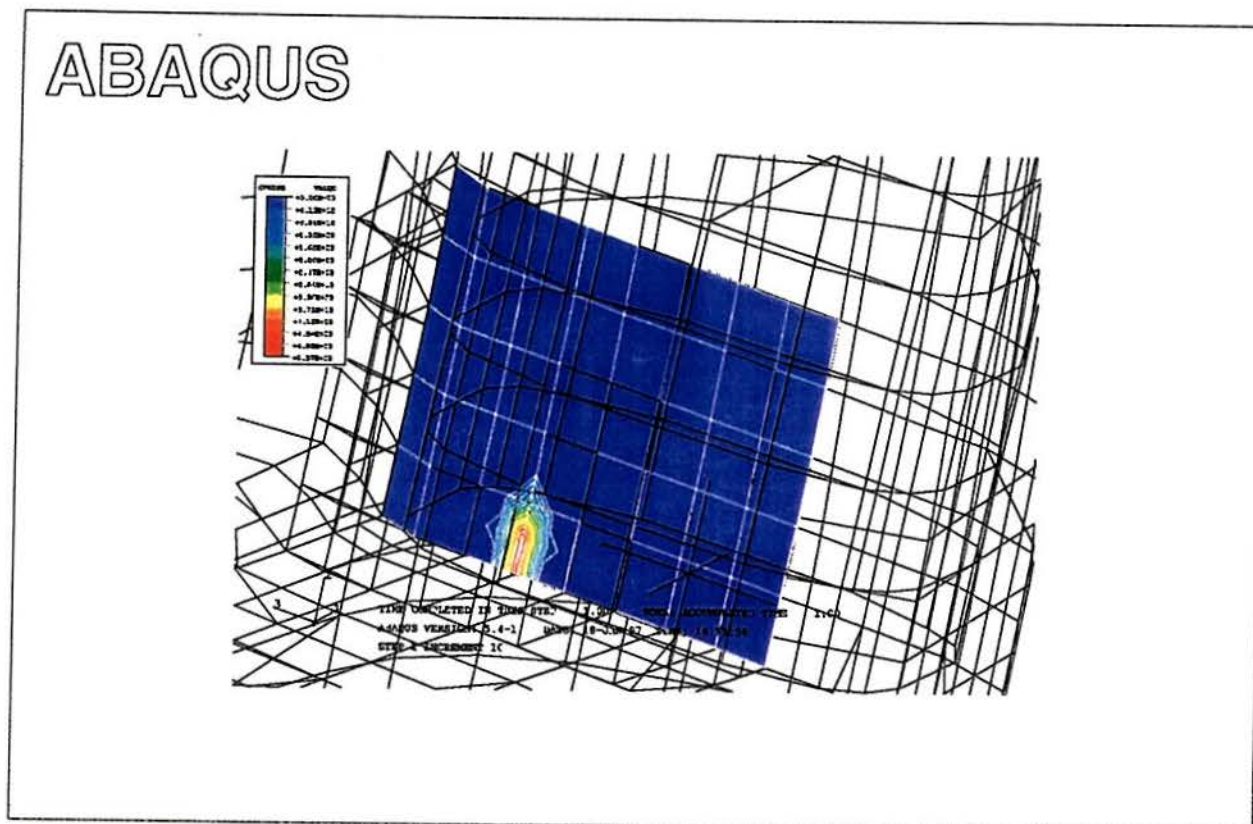


Figura 5.31 - Área de contato, distribuição de pressão.

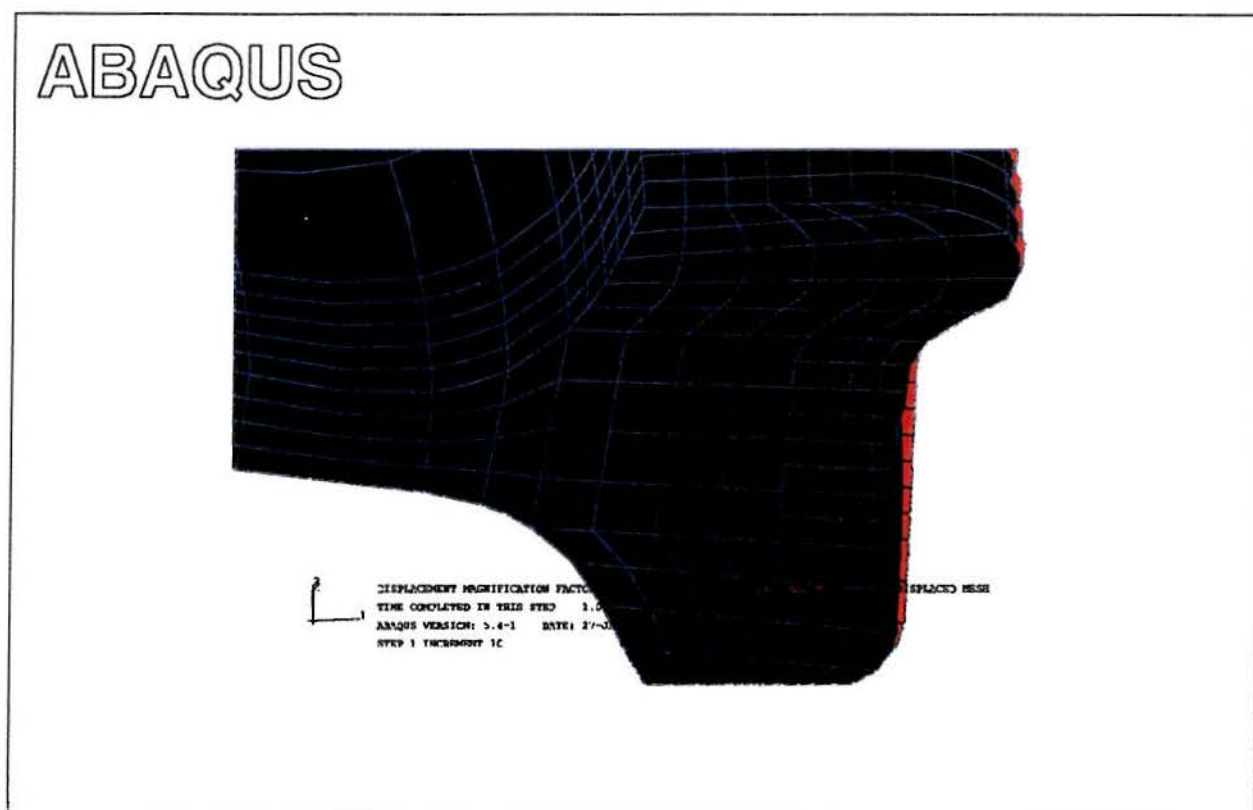


Figura 5.32 - Deformada da roda ferroviária. Malha deformada em preto. Malha original em vermelho.

6 Discussão

Até aqui foram apresentadas as técnicas aplicadas a este trabalho com os respectivos resultados. Agora é necessário efetuar a verificação dos mesmos sob a ótica dos objetivos do trabalho discutindo sua validade.

Os resultados dos ensaios (item 5.1) foram bastante próximos, considerando os valores dados nas tabelas 5.3 e 5.4 e representados, respectivamente, nos gráficos 5.9 a 5.11 e 5.12 a 5.14. A variação média foi inferior a 10%, o que confirma a repetibilidade no procedimento de ensaio e no processo de construção dos corpos de prova. Os altos valores de deformação obtidos nos 2 primeiros ensaios não se aplicam a comparação com resultados da análise computacional, no entanto, foram mantidos e apresentados por contribuírem para a compreensão do problema real da existência de um defeito interno, pois devido a um erro na velocidade de aplicação da carga, foi introduzido o defeito mostrado na Figura 6.1. Este detalhe será discutido com maior profundidade mais adiante.

Como o principal objetivo dos ensaios é aferir o modelamento numérico, será feita a comparação entre as deformações obtidas nos ensaios (tabelas 5.3 e 5.4) com as obtidas via simulação. Podem ser analisados dois pontos na comparação entre os resultados experimentais e os resultados da simulação computacional que são a forma da distribuição das deformações e o valor das mesmas. A forma da distribuição das deformações mostrada nos gráficos resultantes dos ensaios é a mesma vista nos gráficos resultantes da análise computacional. Nos resultados dos dois primeiros ensaios houve uma amplificação das deformações em função dos defeitos internos introduzidos durante a aplicação da carga. Estes defeitos ficaram posicionados na região onde os extensômetros estavam medindo, interrompendo a condição de continuidade do material. Esta descontinuidade local provocou uma concentração de tensões e deformações, bem captada pelos extensômetros. Sabe-se que os defeitos subsuperficiais

são originados em defeitos prévios do material, como inclusões, muitas vezes combinados ao fato de coexistirem com as tensões trativas subsuperficiais, que equilibram a alta compressão na superfície, e propagam-se até a superfície graças a atuação da tensão cisalhante.

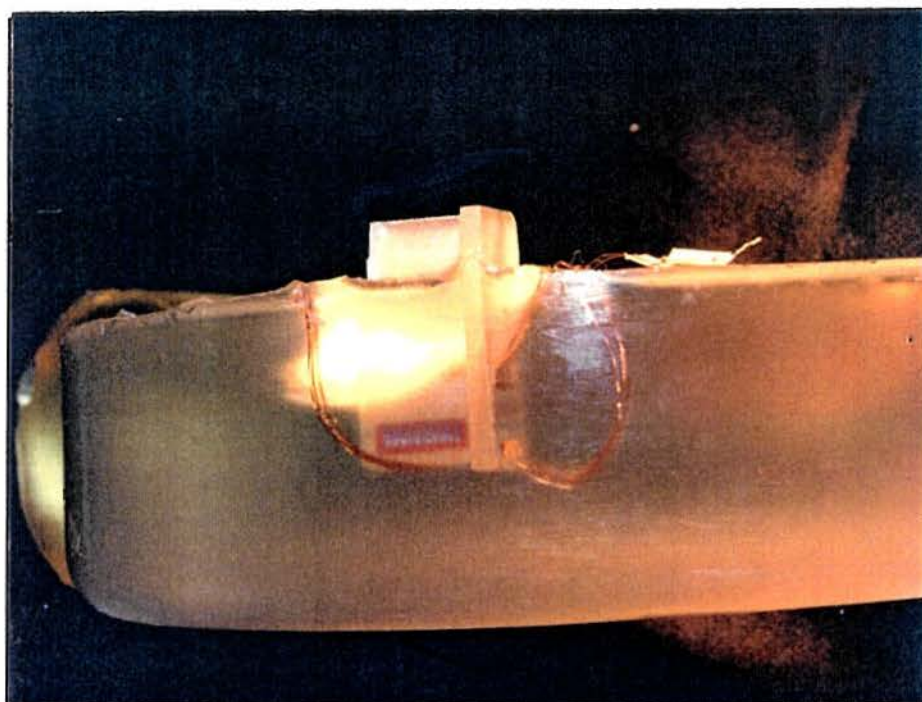


Figura 6.1 - Detalhe do corpo de prova em resina após o ensaio, houve nucleação de uma trinca interna.

A média das deformações medidas pelos extensômetros mais próximos da zona de concentração de tensões, 00A-deformação tangencial, 05A-deformação longitudinal e 10A-deformação radial, para carga de ensaio de 5000N, foram respectivamente, -730,5 $\mu\text{m}/\text{m}$, 540 $\mu\text{m}/\text{m}$ e -819 $\mu\text{m}/\text{m}$. As deformações calculadas correspondentes a estes pontos, foram, respectivamente -580 $\mu\text{m}/\text{m}$, 560 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 839 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Percebe-se que a diferença não é significativa, pois pode haver uma pequena desfazem entre a posição dos pontos de medição e o ponto onde foi feito o cálculo por elementos finitos. Embora isto possa parecer relevante, vale salientar que, por tratar-se de uma análise em que não há linearidade na distribuição de deformações na região afetada pela pressão de contato, uma pequena diferença geométrica entre as posições comparadas pode apontar valores bem diferentes de deformações e, conseqüentemente, de tensões.

As distribuições mostradas nas Figuras 5.18 a 5.23 referem-se ao modelamento do ensaio com a roda em resina. A Figura 5.20 certifica que as condições

de contorno estão corretas, pois há simetria na distribuição das deformações na direção longitudinal, sendo os maiores deslocamentos localizados exatamente nas bordas. Isto ocorre por não se tratar de um caso de deformação plana, o qual é mais comumente utilizado para o estudo de cilindros longos. Nota-se na Figura 5.21, que a máxima tensão cisalhante ocorre abaixo da superfície. Quando existir rolamento e atrito (caso de um cilindro de laminação), esta tensão será ligeiramente deslocada para o interior do corpo e aumentada em valor absoluto, contribuindo ainda mais para o processo de deterioração superficial da peça[1][13][24].

Os resultados do modelamento por Elementos Finitos para a roda em aço com geometria real, são apresentados pelos gráficos 5.25 a 5.32. Nota-se que há uma severa concentração de tensão devido ao contato sobre uma área tão pequena gerada pela carga de trabalho de 150kN. Obviamente os valores de tensão normal na superfície não são reais, pois a análise linear elástica efetuada não é capaz de considerar o “esmagamento” superficial que ocorre em rodas ferroviárias de ferrovias de alta carga.

As tensões equivalentes máximas que ocorrem a uma distância entre 5 e 10mm da superfície, também deverão mover-se em caso de considerar-se o rolamento e o atrito, o que pois poderá impor uma velocidade ainda maior de propagação dos defeitos[1][13][24].

A última análise visou comparar os resultados do contato roda/trilho com uma situação onde a área de contato fosse maior, para isso foi simplesmente eliminado o trilho e aplicada uma pressão correspondente a uma área maior. Nota-se que as tensões máximas foram reduzidas consideravelmente nesta situação. O valor prático desta comparação deve-se a conclusão de que a geometria tanto da roda quanto do trilho na região do contato são de extrema importância, embora não sejam dados muito fáceis de se obter devido ao processo de recuperação das rodas e dos trilhos, onde as rodas são usinadas e os trilhos reperfilados, além do próprio desgaste. Assim, nem sempre se conhece o “gradiente” de perfis em operação ao longo da vida útil de ambos.

A área de contato calculada por Elementos Finitos, mostrada na Figura 5.31, é da ordem de 105mm^2 , um pouco menor do que a prevista pela teoria de Hertz que é de 119mm^2 . Esta diferença pode ser explicada pela necessidade de definir melhor a geometria da superfície do trilho.

A discussão sobre a natureza dos defeitos existentes em rodas ferroviárias feita no capítulo 3, é reforçada pelos resultados apresentados, uma vez que as tensões

máximas ocorrem realmente na região subsuperficial. Esta é realmente a grande questão que envolve as rodas ferroviárias, ou seja, detectar as causas específicas dos defeitos, de forma a criar procedimentos de inspeção e de manutenção mais eficientes. Assim, se as tensões de contato ajudam a nuclear e propagar defeitos, e se o aumento da área de contato, por menor que seja, é capaz de reduzir significativamente o valor das tensões oriundas do contato, então é conveniente propor que se ajuste os parâmetros de usinagem das rodas e reperfilamento dos trilhos de modo a aumentar a área de contato.

Obviamente análises mais sofisticadas, envolvendo contato elasto-plástico e malhas bastante refinadas ou a técnica de superelementos, são necessárias para determinar o nível real de deformações. E também em quanto tempo será atingido o *shakedown* - quando a plastificação máxima ocorre durante um certo número de ciclos de carga, após os quais o componente retorna ao estado de solitação puramente elástico, em função da presença de tensões residuais. Ou se, por outro lado, será atingido o *ratcheting*, que é a instabilidade elástica ou o incremento contínuo da região deformada plasticamente até o colapso generalizado do componente.

7 Conclusões

Considerando o que foi discutido anteriormente, pode-se enumerar as conclusões finais do trabalho.

A técnica experimental se mostrou adequada para aplicações em problemas de contato, uma vez que é possível controlar muito bem todas as etapas do processo de construção do corpo de prova e da realização do ensaio. Além disso, hoje já são conhecidos os fatores que possuem maior influência, como o posicionamento das plaquetas que contêm os extensômetros e os parâmetros geométricos dos corpos de prova.

A boa aproximação entre as deformações medidas experimentalmente e as calculadas via Elementos Finitos possibilitaram prosseguir com os modelamentos, extrapolando a metodologia para componentes constituídos de outros materiais. Os resultados, em valores de tensão, do modelamento do conjunto roda-trilho conduziram às seguintes conclusões:

- os valores máximos de tensão ocorrem abaixo da superfície, coincidindo com a região na qual tem-se observado a nucleação de defeitos, conforme os dados presentes na literatura[1][2][3], o que permite afirmar que o *shelling* é realmente promovido pelas tensões de contato. É importante salientar ainda que a presença de eventuais defeitos metalúrgicos nesta região irá beneficiar muito a nucleação dos defeitos, uma vez que ele atuam como concentradores adicionais de tensão
- embora as tensões nos ensaios experimentais onde houve problemas de trincamento interno (ver Figura 6.1) não tenham sido calculadas, é possível notar pelos valores de deformação e pelos gráficos referentes aos dois primeiros ensaios a influência das tensões de contato na propagação dos defeitos, sejam *shelling* ou *spalling*. Note-se, a diferença de cerca de 300% no valor da deformação máxima na direção longitudinal, direção mais afetada pela abertura da trinca sob carga. É claro que devem ser efetuadas outras considerações para avaliar com segurança o

grau desta influência, como análise elasto-plástica, consideração do movimento relativo de rotação com algum deslizamento, atrito e variações na direção do contato, situação de curvas, por exemplo.

- a área de contato passa a ter uma grande importância, uma vez que pequenas variações em seu valor podem produzir variações significativas no valor das tensões máximas. Em função disto, é necessário tomar cuidado a fim de considerar fielmente a geometria das superfícies de contato, tanto durante a construção dos modelos finitos, quanto nos procedimentos de manutenção que incluem a usinagem das rodas e o reperfilamento por esmerilhamento dos trilhos.
- o programa Abaqus mostrou-se adequado e suficientemente poderoso para ser utilizado em análises futuras, como a que iria englobar as considerações sugeridas anteriormente. Isto porque tais considerações elevam extremamente a complexidade da análise.

8 Sugestões

Após o desenvolvimento deste trabalho em sua totalidade, desenvolvendo o material sintético dos corpos de prova, construindo os corpos de prova e os modelos finitos, realizando pessoalmente cada ensaio e cada modelamento, é possível fazer algumas sugestões tanto sobre novos pontos a ser explorados como sobre o melhoramento das técnicas aplicadas.

Análises mais sofisticadas, envolvendo contato elasto-plástico e malhas bastante refinadas ou a técnica de superelementos, são necessárias para determinar o nível real de deformações. E também em quanto tempo será atingido o *shakedown* - quando a plastificação máxima ocorre durante um certo número de ciclos de carga, após os quais o componente retorna ao estado de sollicitação puramente elástico, em função da presença de tensões residuais. Ou se, por outro lado, será atingido o *ratcheting*, que é a instabilidade elástica ou o incremento contínuo da região deformada plasticamente até o colapso generalizado do componente.

Devem ser efetuadas outras considerações para avaliar com segurança o grau de influência dos defeitos internos além da análise elasto-plástica, consideração do movimento relativo de rotação com algum deslizamento, atrito e variações na direção do contato, situação de curvas, por exemplo.

Nos ensaios podem ser utilizados corpos de prova com geometrias mais complexas, chegando a uma geometria mais semelhante à da roda ferroviária. Isto traz o benefício de poder simular experimentalmente a mudança na região de contato.

Referências Bibliográficas

1. Stone, D.H.; Moyer, G.J.; Wheel Shelling and Spalling - An Interpretative Review, p. 19-30.
2. Stone, D.H.; Moyer, G.J. et al. Theoretical and Experimental Study of Wheel Spalling in Heavy Haul Hoppe Cars. **International Wheelset Congress**, Austrália, p. 1-8, 1992.
3. Cheng, W. et al. Surface Crack Initiation Under Contact Fatigue: Experimental Observation and Contact Analysis. **Journal of Tribology**, Vol. 115, p. 658-665, 1993.
4. Rodrigues Fº, F. et al. Fadiga em Rodas Ferroviárias. **IX Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste**, Pará, Brasil, pp. 478-481.
5. Clayton, P. et al. Recent Research on Wear, Deformation and Fatigue of Steels in Rolling Contact. **Rail Steels Symposium Proceedings**, p. 161-1774, 1992.
6. Fiset, P.; Samin, J.C. A New Wheel/Rail Contact Model for Independent Wheels. **Archive of Applied Mechanics** 64, p. 180-191, 1994.
7. Meioso, A.M.; Sevillano, J.G. Life Prediction of Thermally Cracked Railway Wheels: Growth Estimation of Cracks with Arbitrary Shape. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics** 9, North Holland, p. 1123-139, 1988.
8. Ishida, H. et al. A New Continuous Measuring Method of Wheel/Rail Contact Forces. **QR of RTRI**, v. 35, n.º 2, p. 105-111, 1994.
9. Chiu, Y.P., Liu, J.Y. An Analytical Study of the Stress Concentration Around a Furrow Shaped Surface Defect in Rolling Contact. **Journal of Lubrication Technology**, p. 258-263, 1970.
10. Santos Jr., A.A.; Rodrigues Fº, F.; Tensões Térmicas em Rodas Ferroviárias. **XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Brasil, p. 1403-1406, 1993.
11. Martin, J.A.; Ederhardt, A.D. Identification of Potential Failure Nuclei in Rolling Contact Fatigue. **Winter Annual Meeting of the ASME**, 1967.
12. Shigley, J.E.; Mischke, C.R. **Mechanical Engineering Design**. 50ª ed., McGraw-Hill, 1989.
13. Boresi, A.P.; Schmidt, R.J.; Sidebottom, O.M. **Advanced Mechanics of Materials**. 50ª ed., John Wiley & Sons, 1993.

14. Williams, J.G. **Fracture Mechanics of Polymers**. Ellis Horwood Limited, p. 162-167, 1987.
15. Rice, R.C.; Leis, B.N.; Tuttle, M.E. An Examination of the Influence of Residual Stresses on the Fatigue and Fracture of Railroad Rail. **Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776**, American Society for Testing and Materials, p. 132-157, 1982.
16. Ferreira, N.F. **Análise Térmica de Rodas Ferroviárias**. Porto Alegre, PPGEM/UFRGS, 1996.
17. Klein, L.B. **Estudo de Tensões em Trilhos Ferroviários**. Porto Alegre, PPGEM/UFRGS, 1995.
18. Pinto, R.T.; Klein, L.B. Caracterização de um Material Sintético para Medição de Deformações Internas em Sólidos. Publicação interna do PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, 1997.
19. Hendricks, R.W.; Swanson, R.E.; Foutz, R.V. Tensões Residuais em Rodas Ferroviárias. **Advances in X-Ray Analysis**, New York, V.34, C.S. Barret, 1991.
20. Kigawa, T.; Kimoto, E. Experimental Reproduction of Wheel-Flat and the Flat-Induced Shelling. **International Wheelset Congress**, Austrália, p.15-20, 1992.
21. Santos Jr., A.A.; Rodrigues Fº, F. Problemas Decorrentes das Tensões Térmicas nas Rodas Ferroviárias. **XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Brasil, p. 482-485, 1994.
22. Wei, Y.J.; Optimized Design and Computation of Wheel Diameter and Web fo 25t Axle Load Wagon. **International Wheelset Congress**, Austrália, p.21-20, 1992.
23. Catot, B.; Demilly, F. Contribution to Improved Steel Grades for Wheels for Heavy Freight Traffic. **International Wheelset Congress**, Austrália, p.229-230, 1992.
24. Johnson, K.L. **Contact Mechanics**. Cambridge university Press, 1985.
25. Bonilha, J.Z. **Textos Didáticos de Engenharia**. Biblioteca da Escola de Engenharia/UFRGS, Porto Alegre, 1996.

Apêndice

Listagem do arquivo de entrada para o Programa Abaqus

```

*HEADING
ABAQUS job created on 28-Nov-96 at 18:42:30 - ENSAIOP9.INP
**
**RESTART, WRITE, FREQUENCY=1
**
*NODE
  3000,      -5.,      -80.,      -5.
  3001,      -5.,      -80.,     11.6667
  3002,      -5.,      -80.,     28.3333
  3003,      -5.,      -80.,       45.
  3004,      10.,      -80.,      -5.
  3005,      10.,      -80.,     11.6667
  ...
  5208,     13.8492,    -77.0928,     40.
  5209,     12.129,    -77.3519,     40.
  5210,     11.2296,   -75.7568,     40.
  5211,     11.3067,   -79.197,     40.
**
**
*ELEMENT, TYPE=R3D4, ELSET=RIGIDO
  550,      3000,      3001,      3005,      3004
  551,      3001,      3002,      3006,      3005
  552,      3002,      3003,      3007,      3006
  553,      3004,      3005,      3009,      3008
  554,      3005,      3006,      3010,      3009
  555,      3006,      3007,      3011,      3010
*ELEMENT, TYPE=C3D20, ELSET=SOLIDO
  609,      3033,      3030,      3026,      3024,      3205,      3212,      3210,
  3207,      3031,      3027,      3025,      3028,      3216,      3214,      3215,
  3209,      3206,      3213,      3211,      3208
  ...
  952,      4854,      4906,      4900,      4895,      5105,      5157,      5151,
  5146,      4884,      4908,      4904,      4905,      5135,      5159,      5155,
  5156,      5106,      5158,      5152,      5149
  953,      4879,      4915,      4913,      4871,      5130,      5166,      5164,
  5122,      4919,      4917,      4918,      4912,      5170,      5168,      5169,
  5163,      5162,      5167,      5165,      5123
  954,      4877,      4921,      4915,      4879,      5128,      5172,      5166,
  5130,      4924,      4923,      4919,      4920,      5175,      5174,      5170,
  5171,      5129,      5173,      5167,      5162
  955,      4873,      4930,      4928,      4869,      5124,      5181,      5179,
  5120,      4934,      4932,      4933,      4927,      5185,      5183,      5184,
  5178,      5177,      5182,      5180,      5121
  956,      4871,      4913,      4930,      4873,      5122,      5164,      5181,
  5124,      4918,      4936,      4934,      4935,      5169,      5187,      5185,
  5186,      5123,      5165,      5182,      5177
  957,      4892,      4943,      4941,      4886,      5143,      5194,      5192,
  5137,      4947,      4945,      4946,      4940,      5198,      5196,      5197,
  5191,      5190,      5195,      5193,      5138
  958,      4869,      4928,      4943,      4892,      5120,      5179,      5194,
  5143,      4933,      4949,      4947,      4948,      5184,      5200,      5198,
  5199,      5121,      5180,      5195,      5190
  959,      4888,      4954,      4906,      4884,      5139,      5205,      5157,
  5135,      4958,      4956,      4957,      4953,      5209,      5207,      5208,
  5204,      5203,      5206,      5158,      5136
  960,      4886,      4941,      4954,      4888,      5137,      5192,      5205,
  5139,      4946,      4960,      4958,      4959,      5197,      5211,      5209,
  5210,      5138,      5193,      5206,      5203
*ELSET, ELSET=MIDLE
  785,      786,      787,      788,      789,      790,      791,      792,
  793,      794,      795,      796,      797,      798,      799,      800,
  801,      802,      803,      804,      805,      806,      807,      808,
  809,      810,      811,      812,      813,      814,      815,      816,
  817,      818,      819,      820,      829,      830,      831,      832,
  833,      834,      835,      836,      837,      838,      839,      840,
  841,      842,      843,      844,      845,      846,      847,      848,
  849,      850,      851,      852,      853,      854,      855,      856,
  857,      858,      859,      860,      861,      862,      863,      864,
  873,      874,      875,      876,      877,      878,      879,      880,
  881,      882,      883,      884,      885,      886,      887,      888,
  889,      890,      891,      892,      893,      894,      895,      896,
  897,      898,      899,      900,      901,      902,      903,      904,
  905,      906,      907,      908,      917,      918,      919,      920,
  921,      922,      923,      924,      925,      926,      927,      928,
  929,      930,      931,      932,      933,      934,      935,      936,
  937,      938,      939,      940,      941,      942,      943,      944.

```

945,	946,	947,	948,	949,	950,	951,	952
*NSET, NSET=DESLOC							
3016,	3017,	3018,	3019,	3020,	3021,	3022,	3023,
3024,	3025,	3026,	3207,	3208,	3210,	3211,	3215,
3245,	3246,	3247,	3272,	3273,	3274,	3299,	3300,
3301,	3322,	3323,	3324,	3458,	3459,	3461,	3462,
3466,	3496,	3497,	3498,	3523,	3524,	3525,	3550,
3551,	3552,	3573,	3574,	3575,	3709,	3710,	3712,
3713,	3717,	3747,	3748,	3749,	3774,	3775,	3776,
3801,	3802,	3803,	3824,	3825,	3826,	3960,	3961,
3963,	3964,	3968,	3998,	3999,	4000,	4025,	4026,
4027,	4052,	4053,	4054,	4075,	4076,	4077,	4211,
4212,	4214,	4215,	4219,	4249,	4250,	4251,	4276,
4277,	4278,	4303,	4304,	4305,	4326,	4327,	4328,
4462,	4463,	4465,	4466,	4470,	4500,	4501,	4502,
4527,	4528,	4529,	4554,	4555,	4556,	4577,	4578,
4579,	4713,	4714,	4716,	4717,	4721,	4751,	4752,
4753,	4778,	4779,	4780,	4805,	4806,	4807,	4828,
4829,	4830,	4964,	4965,	4967,	4968,	4972,	5002,
5003,	5004,	5029,	5030,	5031,	5056,	5057,	5058,
5079,	5080,	5081					
*NSET, NSET=RIGIDO							
3000,	3001,	3002,	3003,	3004,	3005,	3006,	3007,
3008,	3009,	3010,	3011,	3015			
*ELSET, ELSET=MPC							
636,	637,	638,	639,	640,	641,	642,	643,
644,	645,	646,	647,	648,	649,	650,	651,
652,	680,	681,	682,	683,	684,	685,	686,
687,	688,	689,	690,	691,	692,	693,	694,
695,	696,	724,	725,	726,	727,	728,	729,
730,	731,	732,	733,	734,	735,	736,	737,
738,	739,	740,	768,	769,	770,	771,	772,
773,	774,	775,	776,	777,	778,	779,	780,
781,	782,	783,	784,	812,	813,	814,	815,
816,	817,	818,	819,	820,	821,	822,	823,
824,	825,	826,	827,	828,	856,	857,	858,
859,	860,	861,	862,	863,	864,	865,	866,
867,	868,	869,	870,	871,	872,	900,	901,
902,	903,	904,	905,	906,	907,	908,	909,
910,	911,	912,	913,	914,	915,	916,	944,
945,	946,	947,	948,	949,	950,	951,	952,
953,	954,	955,	956,	957,	958,	959,	960
*ELSET, ELSET=MPC1							
638,	639,	640,	641,	643,	644,	645,	646,
647,	648,	649,	650,	651,	652,	682,	683,
684,	685,	687,	688,	689,	690,	691,	692,
693,	694,	695,	696,	726,	727,	728,	729,
731,	732,	733,	734,	735,	736,	737,	738,
739,	740,	770,	771,	772,	773,	775,	776,
777,	778,	779,	780,	781,	782,	783,	784,
814,	815,	816,	817,	819,	820,	821,	822,
823,	824,	825,	826,	827,	828,	858,	859,
860,	861,	863,	864,	865,	866,	867,	868,
869,	870,	871,	872,	902,	903,	904,	905,
907,	908,	909,	910,	911,	912,	913,	914,
915,	916,	946,	947,	948,	949,	951,	952,
953,	954,	955,	956,	957,	958,	959,	960
*ELSET, ELSET=MPC2							
638,	639,	640,	641,	645,	646,	647,	648,
649,	650,	651,	652,	682,	683,	684,	685,
689,	690,	691,	692,	693,	694,	695,	696,
726,	727,	728,	729,	733,	734,	735,	736,
737,	738,	739,	740,	770,	771,	772,	773,
777,	778,	779,	780,	781,	782,	783,	784,
814,	815,	816,	817,	821,	822,	823,	824,
825,	826,	827,	828,	858,	859,	860,	861,
865,	866,	867,	868,	869,	870,	871,	872,
902,	903,	904,	905,	909,	910,	911,	912,
913,	914,	915,	916,	946,	947,	948,	949,
953,	954,	955,	956,	957,	958,	959,	960
*ELSET, ELSET=MPC3							
645,	646,	647,	648,	649,	650,	651,	652,
689,	690,	691,	692,	693,	694,	695,	696,
733,	734,	735,	736,	737,	738,	739,	740,
777,	778,	779,	780,	781,	782,	783,	784,
821,	822,	823,	824,	825,	826,	827,	828,
865,	866,	867,	868,	869,	870,	871,	872,
909,	910,	911,	912,	913,	914,	915,	916,
953,	954,	955,	956,	957,	958,	959,	960
*ELSET, ELSET=CONTATO							

```

    645,    646,    647,    648,    649,    650,    651,    652,
    689,    690,    691,    692,    693,    694,    695,    696,
    733,    734,    735,    736,    737,    738,    739,    740,
    777,    778,    779,    780,    781,    782,    783,    784,
    821,    822,    823,    824,    825,    826,    827,    828,
    865,    866,    867,    868,    869,    870,    871,    872,
    909,    910,    911,    912,    913,    914,    915,    916,
    953,    954,    955,    956,    957,    958,    959,    960
**
** xsim
**
*NSET, NSET=XSIM
    3016,    3112,    3113,    3114,    3115,    3116,    3117,    3118,
    3119,    3120,    3121,    3122,    3123,    3130,    3131,    3144,
    3180,    3322,    3323,    3325,    3326,    3328,    3329,    3330,
    3332,    3333,    3334,    3336,    3337,    3338,    3340,    3341,
    3342,    3344,    3356,    3357,    3359,    3371,    3372,    3374,
    3415,    3416,    3418,    3573,    3574,    3576,    3577,    3579,
    3580,    3581,    3583,    3584,    3585,    3587,    3588,    3589,
    3591,    3592,    3593,    3595,    3607,    3608,    3610,    3622,
    3623,    3625,    3666,    3667,    3669,    3824,    3825,    3827,
    3828,    3830,    3831,    3832,    3834,    3835,    3836,    3838,
    3839,    3840,    3842,    3843,    3844,    3846,    3858,    3859,
    3861,    3873,    3874,    3876,    3917,    3918,    3920,    4075,
    4076,    4078,    4079,    4081,    4082,    4083,    4085,    4086,
    4087,    4089,    4090,    4091,    4093,    4094,    4095,    4097,
    4109,    4110,    4112,    4124,    4125,    4127,    4168,    4169,
    4171,    4326,    4327,    4329,    4330,    4332,    4333,    4334,
    4336,    4337,    4338,    4340,    4341,    4342,    4344,    4345,
    4346,    4348,    4360,    4361,    4363,    4375,    4376,    4378,
    4419,    4420,    4422,    4577,    4578,    4580,    4581,    4583,
    4584,    4585,    4587,    4588,    4589,    4591,    4592,    4593,
    4595,    4596,    4597,    4599,    4611,    4612,    4614,    4626,
    4627,    4629,    4670,    4671,    4673,    4828,    4829,    4831,
    4832,    4834,    4835,    4836,    4838,    4839,    4840,    4842,
    4843,    4844,    4846,    4847,    4848,    4850,    4862,    4863,
    4865,    4877,    4878,    4880,    4921,    4922,    4924,    5079,
    5080,    5082,    5083,    5085,    5086,    5087,    5089,    5090,
    5091,    5093,    5094,    5095,    5097,    5098,    5099,    5101,
    5113,    5114,    5116,    5128,    5129,    5131,    5172,    5173,
    5175,
**
** zzbc
**
*NSET, NSET=ZZBC
    3016,    3322,    3323,    3573,    3574,    3824,    3825,    4075,
    4076,    4326,    4327,    4577,    4578,    4828,    4829,    5079,
    5080
*SOLID SECTION, ELSET=SOLIDO, MATERIAL=RESINA
    1.,
**
** MPC_ID=1
**
*MPC
QUADR,    3132,    3121,    3110,    3105
**
** MPC_ID=2
**
*MPC
QUADR,    3126,    3121,    3110,    3105
**
** MPC_ID=3
**
*MPC
QUADR,    3355,    3341,    3343,    3318
**
** MPC_ID=4
**
*MPC
QUADR,    3598,    3592,    3596,    3569
**
** MPC_ID=5
**
*MPC
QUADR,    3606,    3592,    3596,    3569
**
** MPC_ID=6
**
*MPC
QUADR,    3347,    3341,    3343,    3318

```



```

**
** MPC_ID=7
**
*MPC
QUADR, 3857, 3843, 3845, 3820
**
** MPC_ID=8
**
*MPC
QUADR, 3849, 3843, 3845, 3820
**
** MPC_ID=9
**
*MPC
QUADR, 4108, 4094, 4096, 4071
**
** MPC_ID=10
**
*MPC
QUADR, 4100, 4094, 4096, 4071
**
** MPC_ID=11
**
*MPC
QUADR, 4359, 4345, 4347, 4322
**
** MPC_ID=12
**
*MPC
QUADR, 4351, 4345, 4347, 4322
**
** MPC_ID=13
**
*MPC
QUADR, 4610, 4596, 4598, 4573
**
** MPC_ID=14
**
*MPC
QUADR, 4602, 4596, 4598, 4573
**
** MPC_ID=15
**
*MPC
QUADR, 4861, 4847, 4849, 4824
**
** MPC_ID=16
**
*MPC
QUADR, 4853, 4847, 4849, 4824
**
** MPC_ID=17
**
*MPC
QUADR, 5112, 5098, 5100, 5075
**
** MPC_ID=18
**
*MPC
QUADR, 5104, 5098, 5100, 5075
**
** MPC_ID=19
**
*MPC
CBIQU, 3346, 3121, 3341, 3318, 3105, 3342, 3343, 3319, 3110
**
** MPC_ID=20
**
*MPC
CBIQU, 3597, 3341, 3592, 3569, 3318, 3593, 3596, 3570, 3343
**
** MPC_ID=21
**
*MPC
CBIQU, 3848, 3592, 3843, 3820, 3569, 3844, 3845, 3821, 3596
**
** MPC_ID=22
**
*MPC
CBIQU, 4099, 3843, 4094, 4071, 3820, 4095, 4096, 4072, 3845

```

```

**
** MPC_ID=23
**
*MPC
CBIQU, 4350, 4094, 4345, 4322, 4071, 4346, 4347, 4323, 4096
**
** MPC_ID=24
**
*MPC
CBIQU, 4601, 4345, 4596, 4573, 4322, 4597, 4598, 4574, 4347
**
** MPC_ID=25
**
*MPC
CBIQU, 4852, 4596, 4847, 4824, 4573, 4848, 4849, 4825, 4598
**
** MPC_ID=26
**
*MPC
CBIQU, 5103, 4847, 5098, 5075, 4824, 5099, 5100, 5076, 4849
**
** MPC_ID=27
**
*MPC
CBIQU, 3361, 3122, 3356, 3350, 3124, 3357, 3358, 3351, 3135
**
** MPC_ID=28
**
*MPC
CBIQU, 3376, 3124, 3350, 3348, 3106, 3351, 3352, 3349, 3133
**
** MPC_ID=29
**
*MPC
CBIQU, 3612, 3356, 3607, 3601, 3350, 3608, 3609, 3602, 3358
**
** MPC_ID=30
**
*MPC
CBIQU, 3627, 3350, 3601, 3599, 3348, 3602, 3603, 3600, 3352
**
** MPC_ID=31
**
*MPC
CBIQU, 3863, 3607, 3858, 3852, 3601, 3859, 3860, 3853, 3609
**
** MPC_ID=32
**
*MPC
CBIQU, 3878, 3601, 3852, 3850, 3599, 3853, 3854, 3851, 3603
**
** MPC_ID=33
**
*MPC
CBIQU, 4114, 3858, 4109, 4103, 3852, 4110, 4111, 4104, 3860
**
** MPC_ID=34
**
*MPC
CBIQU, 4129, 3852, 4103, 4101, 3850, 4104, 4105, 4102, 3854
**
** MPC_ID=35
**
*MPC
CBIQU, 4365, 4109, 4360, 4354, 4103, 4361, 4362, 4355, 4111
**
** MPC_ID=36
**
*MPC
CBIQU, 4380, 4103, 4354, 4352, 4101, 4355, 4356, 4353, 4105
**
** MPC_ID=37
**
*MPC
CBIQU, 4616, 4360, 4611, 4605, 4354, 4612, 4613, 4606, 4362
**
** MPC_ID=38
**
*MPC
CBIQU, 4631, 4354, 4605, 4603, 4352, 4606, 4607, 4604, 4356

```

```

**
** MPC_ID=39
**
*MPC
CBIQU, 4867, 4611, 4862, 4856, 4605, 4863, 4864, 4857, 4613
**
** MPC_ID=40
**
*MPC
CBIQU, 4882, 4605, 4856, 4854, 4603, 4857, 4858, 4855, 4607
**
** MPC_ID=41
**
*MPC
CBIQU, 5118, 4862, 5113, 5107, 4856, 5114, 5115, 5108, 4864
**
** MPC_ID=42
**
*MPC
CBIQU, 5133, 4856, 5107, 5105, 4854, 5108, 5109, 5106, 4858
**
** MPC_ID=43
**
*MPC
CBIQU, 3392, 3106, 3348, 3298, 3096, 3349, 3389, 3388, 3169
**
** MPC_ID=44
**
*MPC
CBIQU, 3643, 3348, 3599, 3549, 3298, 3600, 3640, 3639, 3389
**
** MPC_ID=45
**
*MPC
CBIQU, 3894, 3599, 3850, 3800, 3549, 3851, 3891, 3890, 3640
**
** MPC_ID=46
**
*MPC
CBIQU, 4145, 3850, 4101, 4051, 3800, 4102, 4142, 4141, 3891
**
** MPC_ID=47
**
*MPC
CBIQU, 4396, 4101, 4352, 4302, 4051, 4353, 4393, 4392, 4142
**
** MPC_ID=48
**
*MPC
CBIQU, 4647, 4352, 4603, 4553, 4302, 4604, 4644, 4643, 4393
**
** MPC_ID=49
**
*MPC
CBIQU, 4898, 4603, 4854, 4804, 4553, 4855, 4895, 4894, 4644
**
** MPC_ID=50
**
*MPC
CBIQU, 5149, 4854, 5105, 5055, 4804, 5106, 5146, 5145, 4895
**
** MPC_ID=51
**
*MPC
QUADR, 3175, 3106, 3169, 3096
**
** MPC_ID=52
**
*MPC
QUADR, 3171, 3106, 3169, 3096
**
** MPC_ID=53
**
*MPC
QUADR, 3399, 3348, 3389, 3298
**
** MPC_ID=54
**
*MPC
QUADR, 3393, 3348, 3389, 3298

```

```

**
** MPC_ID=55
**
*MPC
QUADR, 3650, 3599, 3640, 3549
**
** MPC_ID=56
**
*MPC
QUADR, 3644, 3599, 3640, 3549
**
** MPC_ID=57
**
*MPC
QUADR, 3901, 3850, 3891, 3800
**
** MPC_ID=58
**
*MPC
QUADR, 3895, 3850, 3891, 3800
**
** MPC_ID=59
**
*MPC
QUADR, 4152, 4101, 4142, 4051
**
** MPC_ID=60
**
*MPC
QUADR, 4146, 4101, 4142, 4051
**
** MPC_ID=61
**
*MPC
QUADR, 4403, 4352, 4393, 4302
**
** MPC_ID=62
**
*MPC
QUADR, 4397, 4352, 4393, 4302
**
** MPC_ID=63
**
*MPC
QUADR, 4654, 4603, 4644, 4553
**
** MPC_ID=64
**
*MPC
QUADR, 4648, 4603, 4644, 4553
**
** MPC_ID=65
**
*MPC
QUADR, 4905, 4854, 4895, 4804
**
** MPC_ID=66
**
*MPC
QUADR, 4899, 4854, 4895, 4804
**
** MPC_ID=67
**
*MPC
QUADR, 5156, 5105, 5146, 5055
**
** MPC_ID=68
**
*MPC
QUADR, 5150, 5105, 5146, 5055
**
** MPC_ID=69
**
*MPC
QUADR, 3145, 3122, 3135, 3124
**
** MPC_ID=70
**
*MPC
QUADR, 3139, 3122, 3135, 3124

```

```

**
** MPC_ID=71
**
*MPC
QUADR, 3158, 3124, 3133, 3106
**
** MPC_ID=72
**
*MPC
QUADR, 3152, 3124, 3133, 3106
**
** MPC_ID=73
**
*MPC
QUADR, 3370, 3356, 3358, 3350
**
** MPC_ID=74
**
*MPC
QUADR, 3362, 3356, 3358, 3350
**
** MPC_ID=75
**
*MPC
QUADR, 3385, 3350, 3352, 3348
**
** MPC_ID=76
**
*MPC
QUADR, 3377, 3350, 3352, 3348
**
** MPC_ID=77
**
*MPC
QUADR, 3621, 3607, 3609, 3601
**
** MPC_ID=78
**
*MPC
QUADR, 3613, 3607, 3609, 3601
**
** MPC_ID=79
**
*MPC
QUADR, 3636, 3601, 3603, 3599
**
** MPC_ID=80
**
*MPC
QUADR, 3628, 3601, 3603, 3599
**
** MPC_ID=81
**
*MPC
QUADR, 3872, 3858, 3860, 3852
**
** MPC_ID=82
**
*MPC
QUADR, 3864, 3858, 3860, 3852
**
** MPC_ID=83
**
*MPC
QUADR, 3887, 3852, 3854, 3850
**
** MPC_ID=84
**
*MPC
QUADR, 3879, 3852, 3854, 3850
**
** MPC_ID=85
**
*MPC
QUADR, 4123, 4109, 4111, 4103
**
** MPC_ID=86
**
*MPC
QUADR, 4115, 4109, 4111, 4103

```

```

**
** MPC_ID=87
**
*MPC
QUADR, 4138, 4103, 4105, 4101
**
** MPC_ID=88
**
*MPC
QUADR, 4130, 4103, 4105, 4101
**
** MPC_ID=89
**
*MPC
QUADR, 4374, 4360, 4362, 4354
**
** MPC_ID=90
**
*MPC
QUADR, 4366, 4360, 4362, 4354
**
** MPC_ID=91
**
*MPC
QUADR, 4389, 4354, 4356, 4352
**
** MPC_ID=92
**
*MPC
QUADR, 4381, 4354, 4356, 4352
**
** MPC_ID=93
**
*MPC
QUADR, 4625, 4611, 4613, 4605
**
** MPC_ID=94
**
*MPC
QUADR, 4617, 4611, 4613, 4605
**
** MPC_ID=95
**
*MPC
QUADR, 4640, 4605, 4607, 4603
**
** MPC_ID=96
**
*MPC
QUADR, 4632, 4605, 4607, 4603
**
** MPC_ID=97
**
*MPC
QUADR, 4876, 4862, 4864, 4856
**
** MPC_ID=98
**
*MPC
QUADR, 4868, 4862, 4864, 4856
**
** MPC_ID=99
**
*MPC
QUADR, 4891, 4856, 4858, 4854
**
** MPC_ID=100
**
*MPC
QUADR, 4883, 4856, 4858, 4854
**
** MPC_ID=101
**
*MPC
QUADR, 5127, 5113, 5115, 5107
**
** MPC_ID=102
**
*MPC
QUADR, 5119, 5113, 5115, 5107

```

```

**
** MPC_ID=103
**
*MPC
QUADR, 5142, 5107, 5109, 5105
**
** MPC_ID=104
**
*MPC
QUADR, 5134, 5107, 5109, 5105
**
** MPC_ID=105
**
*MPC
QUADR, 3182, 3130, 3148, 3137
**
** MPC_ID=106
**
*MPC
QUADR, 3178, 3130, 3148, 3137
**
** MPC_ID=107
**
*MPC
QUADR, 3189, 3137, 3146, 3134
**
** MPC_ID=108
**
*MPC
QUADR, 3185, 3137, 3146, 3134
**
** MPC_ID=109
**
*MPC
QUADR, 3196, 3134, 3161, 3150
**
** MPC_ID=110
**
*MPC
QUADR, 3192, 3134, 3161, 3150
**
** MPC_ID=111
**
*MPC
QUADR, 3203, 3150, 3159, 3127
**
** MPC_ID=112
**
*MPC
QUADR, 3199, 3150, 3159, 3127
**
** MPC_ID=113
**
*MPC
QUADR, 3414, 3371, 3373, 3365
**
** MPC_ID=114
**
*MPC
QUADR, 3406, 3371, 3373, 3365
**
** MPC_ID=115
**
*MPC
QUADR, 3429, 3365, 3367, 3363
**
** MPC_ID=116
**
*MPC
QUADR, 3421, 3365, 3367, 3363
**
** MPC_ID=117
**
*MPC
QUADR, 3442, 3363, 3386, 3380
**
** MPC_ID=118
**
*MPC
QUADR, 3434, 3363, 3386, 3380

```

```

**
** MPC_ID=119
**
*MPC
QUADR, 3453, 3380, 3382, 3378
**
** MPC_ID=120
**
*MPC
QUADR, 3447, 3380, 3382, 3378
**
** MPC_ID=121
**
*MPC
QUADR, 3665, 3622, 3624, 3616
**
** MPC_ID=122
**
*MPC
QUADR, 3657, 3622, 3624, 3616
**
** MPC_ID=123
**
*MPC
QUADR, 3680, 3616, 3618, 3614
**
** MPC_ID=124
**
*MPC
QUADR, 3693, 3614, 3637, 3631
**
** MPC_ID=125
**
*MPC
QUADR, 3685, 3614, 3637, 3631
**
** MPC_ID=126
**
*MPC
QUADR, 3704, 3631, 3633, 3629
**
** MPC_ID=127
**
*MPC
QUADR, 3698, 3631, 3633, 3629
**
** MPC_ID=128
**
*MPC
QUADR, 3916, 3873, 3875, 3867
**
** MPC_ID=129
**
*MPC
QUADR, 3908, 3873, 3875, 3867
**
** MPC_ID=130
**
*MPC
QUADR, 3931, 3867, 3869, 3865
**
** MPC_ID=131
**
*MPC
QUADR, 3923, 3867, 3869, 3865
**
** MPC_ID=132
**
*MPC
QUADR, 3944, 3865, 3888, 3882
**
** MPC_ID=133
**
*MPC
QUADR, 3936, 3865, 3888, 3882
**
** MPC_ID=134
**
*MPC
QUADR, 3955, 3882, 3884, 3880

```



```

**
** MPC_ID=135
**
*MPC
QUADR, 3949, 3882, 3884, 3880
**
** MPC_ID=136
**
*MPC
QUADR, 4167, 4124, 4126, 4118
**
** MPC_ID=137
**
*MPC
QUADR, 4159, 4124, 4126, 4118
**
** MPC_ID=138
**
*MPC
QUADR, 4182, 4118, 4120, 4116
**
** MPC_ID=139
**
*MPC
QUADR, 4174, 4118, 4120, 4116
**
** MPC_ID=140
**
*MPC
QUADR, 4195, 4116, 4139, 4133
**
** MPC_ID=141
**
*MPC
QUADR, 4187, 4116, 4139, 4133
**
** MPC_ID=142
**
*MPC
QUADR, 4206, 4133, 4135, 4131
**
** MPC_ID=143
**
*MPC
QUADR, 4200, 4133, 4135, 4131
**
** MPC_ID=144
**
*MPC
QUADR, 4418, 4375, 4377, 4369
**
** MPC_ID=145
**
*MPC
QUADR, 4410, 4375, 4377, 4369
**
** MPC_ID=146
**
*MPC
QUADR, 4433, 4369, 4371, 4367
**
** MPC_ID=147
**
*MPC
QUADR, 4425, 4369, 4371, 4367
**
** MPC_ID=148
**
*MPC
QUADR, 4446, 4367, 4390, 4384
**
** MPC_ID=149
**
*MPC
QUADR, 4438, 4367, 4390, 4384
**
** MPC_ID=150
**
*MPC
QUADR, 4457, 4384, 4386, 4382

```

```

**
** MPC_ID=151
**
*MPC
QUADR, 4451, 4384, 4386, 4382
**
** MPC_ID=152
**
*MPC
QUADR, 4669, 4626, 4628, 4620
**
** MPC_ID=153
**
*MPC
QUADR, 4661, 4626, 4628, 4620
**
** MPC_ID=154
**
*MPC
QUADR, 4684, 4620, 4622, 4618
**
** MPC_ID=155
**
*MPC
QUADR, 4676, 4620, 4622, 4618
**
** MPC_ID=156
**
*MPC
QUADR, 4697, 4618, 4641, 4635
**
** MPC_ID=157
**
*MPC
QUADR, 4689, 4618, 4641, 4635
**
** MPC_ID=158
**
*MPC
QUADR, 4708, 4635, 4637, 4633
**
** MPC_ID=159
**
*MPC
QUADR, 4702, 4635, 4637, 4633
**
** MPC_ID=160
**
*MPC
QUADR, 4920, 4877, 4879, 4871
**
** MPC_ID=161
**
*MPC
QUADR, 4912, 4877, 4879, 4871
**
** MPC_ID=162
**
*MPC
QUADR, 4935, 4871, 4873, 4869
**
** MPC_ID=163
**
*MPC
QUADR, 4927, 4871, 4873, 4869
**
** MPC_ID=164
**
*MPC
QUADR, 4948, 4869, 4892, 4886
**
** MPC_ID=165
**
*MPC
QUADR, 4940, 4869, 4892, 4886
**
** MPC_ID=166
**
*MPC
QUADR, 4959, 4886, 4888, 4884

```

```

**
** MPC_ID=167
**
*MPC
QUADR, 4953, 4886, 4888, 4884
**
** MPC_ID=168
**
*MPC
QUADR, 5171, 5128, 5130, 5122
**
** MPC_ID=169
**
*MPC
QUADR, 5163, 5128, 5130, 5122
**
** MPC_ID=170
**
*MPC
QUADR, 5186, 5122, 5124, 5120
**
** MPC_ID=171
**
*MPC
QUADR, 5178, 5122, 5124, 5120
**
** MPC_ID=172
**
*MPC
QUADR, 5199, 5120, 5143, 5137
**
** MPC_ID=173
**
*MPC
QUADR, 5191, 5120, 5143, 5137
**
** MPC_ID=174
**
*MPC
QUADR, 5210, 5137, 5139, 5135
**
** MPC_ID=175
**
*MPC
QUADR, 5204, 5137, 5139, 5135
**
** MPC_ID=176
**
*MPC
CBIQU, 3405, 3130, 3371, 3365, 3137, 3372, 3373, 3366, 3148
**
** MPC_ID=177
**
*MPC
CBIQU, 3420, 3137, 3365, 3363, 3134, 3366, 3367, 3364, 3146
**
** MPC_ID=178
**
*MPC
CBIQU, 3433, 3134, 3363, 3380, 3150, 3364, 3386, 3381, 3161
**
** MPC_ID=179
**
*MPC
CBIQU, 3446, 3150, 3380, 3378, 3127, 3381, 3382, 3379, 3159
**
** MPC_ID=180
**
*MPC
CBIQU, 3656, 3371, 3622, 3616, 3365, 3623, 3624, 3617, 3373
**
** MPC_ID=181
**
*MPC
CBIQU, 3671, 3365, 3616, 3614, 3363, 3617, 3618, 3615, 3367
**
** MPC_ID=182
**
*MPC
CBIQU, 3684, 3363, 3614, 3631, 3380, 3615, 3637, 3632, 3386

```

```

**
** MPC_ID=183
**
*MPC
CBIQU, 3697, 3380, 3631, 3629, 3378, 3632, 3633, 3630, 3382
**
** MPC_ID=184
**
*MPC
CBIQU, 3907, 3622, 3873, 3867, 3616, 3874, 3875, 3868, 3624
**
** MPC_ID=185
**
*MPC
CBIQU, 3922, 3616, 3867, 3865, 3614, 3868, 3869, 3866, 3618
**
** MPC_ID=186
**
*MPC
CBIQU, 3935, 3614, 3865, 3882, 3631, 3866, 3888, 3883, 3637
**
** MPC_ID=187
**
*MPC
CBIQU, 3948, 3631, 3882, 3880, 3629, 3883, 3884, 3881, 3633
**
** MPC_ID=188
**
*MPC
CBIQU, 4158, 3873, 4124, 4118, 3867, 4125, 4126, 4119, 3875
**
** MPC_ID=189
**
*MPC
CBIQU, 4173, 3867, 4118, 4116, 3865, 4119, 4120, 4117, 3869
**
** MPC_ID=190
**
*MPC
CBIQU, 4186, 3865, 4116, 4133, 3882, 4117, 4139, 4134, 3888
**
** MPC_ID=191
**
*MPC
CBIQU, 4199, 3882, 4133, 4131, 3880, 4134, 4135, 4132, 3884
**
** MPC_ID=192
**
*MPC
CBIQU, 4409, 4124, 4375, 4369, 4118, 4376, 4377, 4370, 4126
**
** MPC_ID=193
**
*MPC
CBIQU, 4424, 4118, 4369, 4367, 4116, 4370, 4371, 4368, 4120
**
** MPC_ID=194
**
*MPC
CBIQU, 4437, 4116, 4367, 4384, 4133, 4368, 4390, 4385, 4139
**
** MPC_ID=195
**
*MPC
CBIQU, 4450, 4133, 4384, 4382, 4131, 4385, 4386, 4383, 4135
**
** MPC_ID=196
**
*MPC
CBIQU, 4660, 4375, 4626, 4620, 4369, 4627, 4628, 4621, 4377
**
** MPC_ID=197
**
*MPC
CBIQU, 4675, 4369, 4620, 4618, 4367, 4621, 4622, 4619, 4371
**
** MPC_ID=198
**
*MPC
CBIQU, 4688, 4367, 4618, 4635, 4384, 4619, 4641, 4636, 4390

```

```

**
** MPC_ID=199
**
*MPC
CBIQU, 4701, 4384, 4635, 4633, 4382, 4636, 4637, 4634, 4386
**
** MPC_ID=200
**
*MPC
CBIQU, 4911, 4626, 4877, 4871, 4620, 4878, 4879, 4872, 4628
**
** MPC_ID=201
**
*MPC
CBIQU, 4926, 4620, 4871, 4869, 4618, 4872, 4873, 4870, 4622
**
** MPC_ID=202
**
*MPC
CBIQU, 4939, 4618, 4869, 4886, 4635, 4870, 4892, 4887, 4641
**
** MPC_ID=203
**
*MPC
CBIQU, 4952, 4635, 4886, 4884, 4633, 4887, 4888, 4885, 4637
**
** MPC_ID=204
**
*MPC
CBIQU, 5162, 4877, 5128, 5122, 4871, 5129, 5130, 5123, 4879
**
** MPC_ID=205
**
*MPC
CBIQU, 5177, 4871, 5122, 5120, 4869, 5123, 5124, 5121, 4873
**
** MPC_ID=206
**
*MPC
CBIQU, 5190, 4869, 5120, 5137, 4886, 5121, 5143, 5138, 4892
**
** MPC_ID=207
**
*MPC
CBIQU, 5203, 4886, 5137, 5135, 4884, 5138, 5139, 5136, 4888
**
** MPC_ID=208
**
*MPC
CBIQU, 3379, 3106, 3348, 3400, 3108, 3349, 3378, 3401, 3127
**
** MPC_ID=209
**
*MPC
CBIQU, 3630, 3348, 3599, 3651, 3400, 3600, 3629, 3652, 3378
**
** MPC_ID=210
**
*MPC
CBIQU, 3881, 3599, 3850, 3902, 3651, 3851, 3880, 3903, 3629
**
** MPC_ID=211
**
*MPC
CBIQU, 4132, 3850, 4101, 4153, 3902, 4102, 4131, 4154, 3880
**
** MPC_ID=212
**
*MPC
CBIQU, 4383, 4101, 4352, 4404, 4153, 4353, 4382, 4405, 4131
**
** MPC_ID=213
**
*MPC
CBIQU, 4634, 4352, 4603, 4655, 4404, 4604, 4633, 4656, 4382
**
** MPC_ID=214
**
*MPC
CBIQU, 4885, 4603, 4854, 4906, 4655, 4855, 4884, 4907, 4633

```

```

**
** MPC_ID=231
**
*MPC
QUADR, 4957, 4854, 4884, 4906
**
** MPC_ID=232
**
*MPC
QUADR, 5140, 5105, 5135, 5157
**
** MPC_ID=233
**
*MPC
QUADR, 5208, 5105, 5135, 5157
**
** MPC_ID=234
**
*MPC
QUADR, 3672, 3616, 3618, 3614
**
** resina
**
**
*MATERIAL, NAME=RESINA
**
*ELASTIC, TYPE=ISO
      3319., 0.23
*RIGID BODY, ELSET=RIGIDO, REF NODE=3015
*SURFACE DEFINITION, NAME=SRIG
RIGIDO, SPOS
*SURFACE DEFINITION, NAME=SDEF
CONTATO, S4
*CONTACT PAIR, INTERACTION=HERTZ, SMALL SLIDING
SDEF, SRIG
*SURFACE INTERACTION, NAME=HERTZ
*BOUNDARY
XSIM, 1,1
ZZBC, 3,3
3015, 1,6
** step 1,Default
**
*STEP, INC=10
**
Este load case considera deslocamento prescrito.
**
*STATIC, DIRECT
.1,1.
*DLOAD, OP=NEW
  609, P5, 0.78
  614, P6, 0.78
  620, P6, 0.78
  626, P6, 0.78
  631, P6, 0.78
  653, P5, 0.78
  658, P6, 0.78
  664, P6, 0.78
  670, P6, 0.78
  675, P6, 0.78
  697, P5, 0.78
  702, P6, 0.78
  708, P6, 0.78
  714, P6, 0.78
  719, P6, 0.78
  741, P5, 0.78
  746, P6, 0.78
  752, P6, 0.78
  758, P6, 0.78
  763, P6, 0.78
  785, P5, 0.78
  790, P6, 0.78
  796, P6, 0.78
  802, P6, 0.78
  807, P6, 0.78
  829, P5, 0.78
  834, P6, 0.78
  840, P6, 0.78
  846, P6, 0.78
  851, P6, 0.78
  873, P5, 0.78
  878, P6, 0.78

```

884, P6,	0.78
890, P6,	0.78
895, P6,	0.78
917, P5,	0.78
922, P6,	0.78
928, P6,	0.78
934, P6,	0.78
939, P6,	0.78

**
*PRINT, CONTACT=YES
*NODE PRINT, FREQ=1
U
RF
*NODE FILE, FREQ=1
U
RF
**
*EL PRINT, FREQ=1
S
E
*CONTACT FILE, MASTER=SRIG, SLAVE=SDEF, FREQ=1
**
*END STEP