AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MEDIDAS DE TENSÕES RESIDUAIS POR EXTENSOMETRIA
EM COMPONENTES USADOS NO SETOR DA MOBILIDADE

FRANCISCO CARLOS CIONE

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi.

São Paulo

2012

MEDIDAS DE TENSÕES RESIDUAIS POR EXTENSOMETRIA EM COMPONENTES USADOS NO SETOR DA MOBILIDADE

FRANCISCO CARLOS CIONE

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi.

São Paulo

2012

CIONE, Francisco Carlos

Medidas de tensões residuais por extensometria em componentes usados no setor da mobilidade.

Francisco Carlos Cione

Número de páginas 118

Dissertação – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nuclear - IPEN. São Paulo, 2012

CCTM – Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais

Orientador: Prof.Dr. Jesualdo Luiz Rossi

1. Tensão residual 2. Fadiga de material 3. Medidores de deformação

“A fundamental aspect of engineering is the desire to design artifacts that exploit materials to a maximum in terms of performance under working conditions and efficiency of manufacture”.

J. Bonet, R. D. Wood

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que elas acontecem. Por isso existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis”

Fernando Pessoa

“Só conseguiremos construir um palácio se dermos valor aos tijolos”

Aniello Cione

Aos meus pais Therezinha e Aniello Cione
(*in memoriam*)
e aos meus filhos por nossas conquistas
passadas e futuras.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pela oportunidade de crescimento cultural e profissional de realizar este estudo.

Ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) pela bolsa, incentivo que tornou este trabalho possível de ser realizado com dedicação exclusiva.

Ao Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi, pela valiosa e imprescindível orientação neste trabalho, tarefa oferecida com dedicação, profissionalismo, presença e amizade. Estes foram fatores fundamentais para êxito desta pesquisa.

A empresa HBM e a FEI - Faculdade de Engenharia Industrial, na pessoa do prof. Sérgio Delijaicov, dedicado e generoso, pela oportunidade de parceria e oferta de sua excelente estrutura de ensino, ideal para o treinamento, desenvolvimento e aprendizado das técnicas de extensometria.

Aos amigos Marco Antonio Colosio, José Carlos Santos, J.Barbosa e Fábio Rola, respectivamente das empresas General Motors do Brasil, Alujet e Magmasoft pela generosa e valiosa parceria tecnológica, sempre investindo com suporte material e também sendo fonte de informação objetiva e aplicada as quais muito contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos amigos Marco Antonio P. Carmignotto e Adriano Axel Pliopas, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), pela colaboração com as valiosas orientações experimentais e contribuições de ordem prática junto aos experimentos de laboratório, ajuda esta que contribuiu de maneira notável ao avanço das etapas nos ensaios experimentais e de coleta de dados realizadas neste trabalho.

Aos professores das disciplinas de pós-graduação e pesquisadores do IPEN; L.G. Martinez, C.S. Mucsi, C.G.Schön, J.R. Berreta, W.A. Monteiro, D.R.R. Lazar, os quais com dedicação, preparo ensinaram, difundiram os saberes tão necessários para viabilização e concretização deste trabalho.

Aos funcionários da oficina do Instituto de Física da USP, Srs. Marcos, Pedro, Otávio sempre prontos a prestar o auxílio necessário ao desenvolvimento e execução de etapas onde foi necessário a utilização de máquinas e equipamentos.

Ainda a todos aqueles que de forma direta ou indireta participaram e ajudaram no desenvolvimento e conclusão desse estudo, aos quais deixo aqui meus sinceros agradecimentos.

Medidas de tensões residuais por extensometria em componentes usados no setor da mobilidade

Francisco Carlos Cione

RESUMO

Muitas especificações de engenharia, procedimentos de fabricação, inspeção e controle de qualidade já começam a exigir que a análise da tensão residual de determinado componente seja avaliada. Isto está se tornando tão corriqueiro quanto às exigências referentes às propriedades mecânicas. No país existem poucos laboratórios de pesquisa qualificados para execução destes ensaios e também é constatada uma preocupante falta de mão de obra qualificada. A relevância do estudo e pesquisas em tensões residuais, ressalta para o desenvolvimento científico, tecnológico e inovação nos processos de fabricação de componentes para a indústria. Novos ferramentais e instrumentações para a investigação de microestrutura dos materiais, disponíveis em laboratórios de pesquisas tanto em instituições governamentais como em instalações privadas necessitam de pesquisadores habilitados o que está associado à formação de pessoal especializado dedicado a medidas de tensões residuais, ao desenvolvimento de procedimentos experimentais e técnicas de preparação de amostras que envolvam extensometria. A tensão residual, em componentes metálicos e ligas, tem origem em decorrência de processos de fabricação (fundição, tratamento térmico, usinagem, conformação mecânica) pelo qual se obtém a conformação estrutural do componente desejado. Estudar a formação e arranjo dos campos de tensões residuais podem permitir, entre outros ganhos, a elaboração de simulações por modelagem matemática mais refinada. Assim pode-se inferir, com maior detalhamento o comportamento destes componentes somando ganhos na resiliência à fadiga, sobrevida, segurança e redução de custo operacional de equipamentos e máquinas. O uso de extensometria na investigação de tensões residuais em rodas na indústria automotiva contribuirá para a formação de uma maior base de dados que permitirá obter softwares de simulação FEM, com melhor índice da relação com modelagem matemática com o componente físico real.

Measurements of residual stresses with strain gages for components used in the mobility sector

Francisco Carlos Cione

ABSTRACT

Many engineering specifications, manufacturing procedures, inspection and quality controls have begun to require that the residual stress analysis of a particular component is evaluated. This is becoming as common place as the demands on the mechanical properties. In the country there are few research laboratories qualified to perform these tests and also found a disturbing lack of skilled labor. The relevance of the study and research on residual stresses, stresses the development of science, technology and innovation in manufacturing components for the industry. New tools and instrumentation for the investigation of microstructure of materials available in research laboratories both in governmental institutions such as private facilities in need of qualified researchers which is associated with the training of specialists dedicated to measurements of residual stresses, the development of experimental procedures and sample preparation techniques involving gages. The residual stress in metal and alloy components arises as a result of manufacturing processes (casting, heat treatment, machining and mechanical forming) by which to obtain the structural form of the desired component. Study the formation and arrangement of residual stress fields may allow, among other gains, the development of mathematical modeling simulations more refined. Thus it can be inferred, in more detail the behavior of these components by adding gains in resilience to fatigue, survival, security and operational cost reduction of equipment and machinery. The use of strain gage in the investigation of residual stresses in automotive wheels contribute to the formation of a larger database that will allow for FEM simulation software, with a better index of mathematical modeling with respect to the real physical component.

LISTA DE SIGLAS

$a; a_o, a_c$	Comprimentos da amostra
b	Dimensão da amostra
B	Espessura da amostra
C	Constante de material
D	Dimensão do círculo preenchendo um defeito
e	Flexibilidade
$ep; eq$	Deformações principais
h	Altura
h_p	Zona plástica
K	Constante de barreiras microestruturais
k'	Parâmetro determinado por elementos finitos
K	Fator de intensidade de tensão
K	Constante do material
K_{res}	Fator de intensidade de tensão no campo de tensões residuais
K_o	Limiar do fator de intensidade de tensão
K_g	Constante de material
K_ϵ	Fator de concentração de deformação inelástica
L	Comprimento da trinca
L	Momento de inércia
L_1 e c	Comprimentos de secções da barra de controle
n	Constante de abertura total da trinca
N	Vida da amostra de ciclos
N_f	Número de ciclos final para falha
P	Função de probabilidade
Q	Constante do material
$r_{pc(w)}$	Constante de material
R	Razão de tensão
R	Confiabilidade
R	Raio de furo
RT	Limite de resistência a ruptura
Rz	Parâmetro de rugosidade
S	Tensão máxima de carregamento no ciclo

S_{nom}	Tensão nominal
W	Largura da amostra
W_0	Metade do tamanho de grão
$\varepsilon_1, \varepsilon_2 \text{ e } \varepsilon_3$	Deformações principais
ε_θ	Deformação a um determinado ângulo
ε	Deformação
σ_a	Amplitude de tensão
σ_x	Tensão normal na direção x
σ_y	Tensão normal na direção y
σ_{xy}	Tensão de cisalhamento na direção xy
σ_R	Tensão residual (ASTM E837)
σ_{rg}	Tensão residual global
σ_{rl}	Tensão residual local
σ_m	Tensão média
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
σ_s^{rc}	Tensão residual compressiva superficial
σ_{max}^{rc}	Máxima tensão residual compressiva superficial
σ_{Ult}	Limite de resistência do material
$\sigma_{vonMises}$	Tensão de von Mises
$\sigma_{0,2}$	Limite de escoamento do material
σ_{xel}	Tensão elástica em x
σ_{yc}	Tensão de escoamento cíclico
σ_w	Limite de fadiga de amostra com defeito
σ_{ult}	Limite de resistência do material
σ_ϕ	Direção da tensão residual
$\Delta\sigma$	Variação de tensões
β	Parâmetro de forma ou coeficiente de inclinação da reta
η	Parâmetro de escala ou vida característica
f	Função correção de efeito plasticidade
f_{el}	Função correção de efeito plasticidade elástica
W	Parâmetro de função correção de efeito plasticidade

δ	Parâmetro de função correção de efeito plasticidade
Ω	Parâmetro de função correção de efeito plasticidade
τ_{wo}	Tensão proporcional corrigida
τ	Tensão de cisalhamento
τ_{xy}	Tensões elásticas de cisalhamento em x e y
AlSi	Aluminium silicium alloy
CAD	Computer auxiliar design
CAM	Computer auxiliar manufacturing
CAE	Computer auxiliar engenieering
FEA	Finit element analisys

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO GERAL	2
3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
4	REVISÃO TEÓRICA	3
4.1	Sobre medição da deformação, tensão, fadiga.....	4
4.1.1	Deformação	5
4.1.2	Tensão e tensor de tensão	10
4.1.3	Relação entre tensão e deformação.....	13
4.1.4	Fadiga.....	16
4.2	Corpo de forças.....	19
4.3	Momento e forças de flexão	20
4.4	Campos de tensão	25
4.5	Circulo de Mohr.....	28
4.5.1	Mudança de coordenadas	29
4.5.2	Aplicações do Ciclo de Mohr	30
4.6	Sobre o comportamento elastoplástico dos materiais	31
4.7	Módulo de rigidez.....	32
5	Tensão Residual.....	32
5.1	Natureza da tensão residual	32
5.2	Análise experimental de tensão residual.....	33
6	Modelagem matemática em Elementos Finitos.....	33
6.1	Elemento infinitesimal de volume	34
6.2	Ação de campo de tensão sobre o elemento de volume.....	35
6.3	Simulação computacional e o uso de elementos finitos (FEA).....	37
6.4	Programação e simulação computacional.....	38

6.5	Modelagem dinâmica e simulação de volume de um corpo.....	39
6.6	Análise por Elementos Finitos FEA (Finite Element Analysis).	41
7	Extensometria.	42
7.1	Técnicas de extensometria	46
7.1.1	Dispositivos mecânicos	46
7.1.2	Dispositivos elétricos	46
7.2	Difração de raios-X (DRX).....	47
7.3	Difração de nêutrons	48
7.4	Dispositivos extensômetros (<i>strain gage</i>).....	48
7.5	Tipos de extensômetros	50
7.6	Ponte de Wheatstone.....	51
7.7	Aplicação da extensometria.	53
7.8	Aquisição de dados em extensometria.....	53
7.9	Análise da tensão residual nos pontos críticos	53
7.10	Efeitos indesejáveis no método do Furo Cego.....	56
8	MATERIAIS E MÉTODOS	59
8.1	Rodas usadas adquiridas no mercado	59
8.1.1	Rodas novas fornecidas por indústria do setor da mobilidade	59
8.2	Metodologia para os ensaios	61
8.2.1	Montagem de uma barra controle.....	61
8.2.2	Procedimentos de ensaios	63
8.3	Aquisição de dados de tensão residual.....	64
8.3.1	Rodas usadas - limpeza e preparo da superfície.....	65
8.3.2	Alívio de tensão pelo método do corte.....	67
8.4	Obtenção da tensão residual por extensometria.....	69
8.4.1	Procedimento inicial de limpeza	69
8.4.2	Adesivagem do extensômetro na superfície de ensaio.	70

8.4.3	Adesivagem dos terminais e extensômetro	71
8.4.4	Soldagem dos terminais de conexão.....	71
8.4.5	Testes de conformidade eletrônica dos extensômetros.....	72
8.4.6	Conexões ao equipamento de aquisição de dados.	74
8.5	Aquisição dos dados usando o equipamento DAQ	74
8.5.1	Calibração inicial e aquisição de dados.....	74
8.5.2	Ensaio experimentais nas rodas novas.	77
8.5.3	Ensaio experimentais por seccionamento	77
8.5.4	Ensaio experimentais por furo cego.....	79
9	RESULTADOS	84
10	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	92
10.1	Análise dos dados experimentais pela técnica de corte.	92
10.2	Análise dos dados experimentais por extensometria.....	93
11	CONCLUSÕES.....	97
12	Sugestão para trabalhos futuros e de continuidade.....	98
13	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	102

1 INTRODUÇÃO

O uso de programas computacionais (CAD/CAE/CAM) vem sendo cada vez mais comum na indústria. Um dos maiores benefícios é poder utilizar dados e informações armazenadas de projetos desenvolvidos anteriormente e que podem ser editados para a obtenção de novos projetos. Esta grande massa de dados gerada torna possível, também, a realimentação dos mesmos sistemas, incrementando sua base de dados [1]. A aplicação dos softwares de modelagem e análise matemática por elementos finitos (FEA), permitem o uso do cumulativo potencial dos dados armazenados [1,2]. O emprego de técnicas de ensaios em laboratórios, experimentações e testes em campo possibilitam programar, na base de dados, ajustes de parâmetros físicos e mecânicos, bem como novas características permitindo o uso de FEA para projetar e simular ensaios em protótipos que não precisam necessariamente ser produzidos [3,4]. Embora o principal objetivo das simulações em FEA seja tornar possível inferir sobre o comportamento real em operação de um protótipo, continuam sendo necessários ensaios experimentais para validação de similaridade e equivalência entre a simulação e o comportamento físico (operacional) dos protótipos [2,3,4].

Com a possibilidade de serem processadas simulações, cada vez mais aprimoradas em detalhamento, diminuem a necessidade de protótipos físicos para testes operacionais. Esta dinâmica e eficácia obtida na fase de desenvolvimento de quaisquer produto pela aplicação de ferramentas computacionais promove grande redução de tempo nas fases de projeto, produção de unidades cabeça-de-série e principalmente redução de tempo e custo na produção [1,3,5].

Um sistema com uma base de dados robusta pode operar com maior refinamento nas malhas FEA, assim os pontos críticos em novos projetos serão simulados com maior detalhamento [6]. Neste contexto se insere a extensometria, como parte de um ferramental disponível para ensaios experimentais fornecendo dados e informações quantitativa e qualitativa, sobre as variações dimensionais de materiais e componentes. Ensaios experimentais serão sempre necessários para verificação das semelhanças entre comportamento físico de modelos protótipos e modelos de simulação que fornecem as inovações [6]. As informações geradas por extensometria irão

prover estas inovações de confiabilidade, dando ao projeto final garantias de sucesso na linha de produção do produto.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o estudo de procedimentos para analisar campos de tensões residuais em rodas produzidas pela indústria automotiva. Feitos especificamente em rodas de liga-leve A356 (AlSi7) de uso em veículos (automóveis e pickup's), constituídos em dois conjuntos de rodas. Um primeiro conjunto composto por rodas adquiridas no comércio paralelo de rodas e um segundo conjunto composto por rodas retiradas da linha de produção de uma indústria do setor automobilístico.

A principal técnica utilizada na realização dos ensaios experimentais na obtenção dos valores de tensão residual foi a do Furo Cego (*hole drilling method*) [3]. Esta técnica utilizou extensômetros (*strain gages* do tipo roseta) para realizar a medição da tensão residual superficial. O método para tratamento dos dados gerados foi o método integral, com correções utilizando o critério de von Mises, quando necessário [7,8,9]. Foram utilizados os métodos de alívio de tensões em cortes setoriais e difração de raios X com a finalidade de obter dados complementares para tratar a acurácia do método do Furo Cego.

3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Na técnica do Furo Cego [3] utilizou-se de simulações computacionais FEA empregadas na fabricação das rodas. Parte do sistema computacional FEA permite simular e apontar os máximos valores para os campos de tensão residual. Estes valores de máximo também são considerados como indicadores para posicionamento dos extensômetros porque é considerada região crítica, onde outras tensões que se originam das cargas operacionais somam-se às tensões residuais podendo resultar em fraturas. Tornou-se necessário o entendimento básico do software FEA e de suas simulações para auxiliar o processo de decisão dos métodos experimentais a serem utilizados e também da interpretação dos dados obtidos nos ensaios experimentais para estabelecer a melhor correlação entre a simulação e os dados obtidos nos ensaios experimentais

Utilizou-se como ensaio complementar para validação e verificação da existência na correlação dos dados experimentais e simulações, ensaios

experimentais para aquisição dos valores de tensão residual pela utilização da técnica de difração de raios-X. A técnica de raios-X impõe algumas restrições operacionais sobre o tamanho da amostra a ser utilizada. Estas restrições forçaram a utilização combinada de outros métodos de obtenção da tensão residual, como o método do seccionamento, onde os valores obtidos para a tensão residual só serão considerados como pontuais, isto é, os valores obtidos são considerados como valores locais. Os valores podem ser comparados com os valores obtidos pela técnica do furo cego porque os valores da média obtida na região crítica são de mesma ordem de grandeza dos valores obtidos pela média dos valores locais.

4 REVISÃO TEÓRICA

O projeto das rodas em estudo foi realizado por simulações e análise em elementos finitos (FEA) e com os parâmetros de entrada utilizados, indicaram a possibilidade de nucleação de trincas em regiões específicas apontadas como crítica. Para a roda constituída na sua totalidade estas regiões, porém, tem valores críticos que necessitam de verificação experimental [10]. O uso da extensometria nos pontos críticos fornecidas por simulação FEA deverá verificar a existência ou não da relação de reciprocidade e de convergência entre as simulações e a análise de dados de ensaios experimentais.

Obteve-se informações qualitativas sobre a natureza da tensão residual (compressiva ou de tração) pelo uso das técnicas de simples corte. Após estes testes iniciais foram feitos, também, ensaios experimentais quantitativos os quais forneceram valores de amplitude da tensão residual pelo alívio e relaxamento das tensões. Nos ensaios experimentais são utilizados “strain gages” resistivos (extensômetros) para coletar dados da ocorrência de deformações [7].

Em um momento futuro os dados experimentais poderão ser utilizados como realimentação dos parâmetros de entrada no sistema FEA. Esta contribuição numérica adicional dos ensaios experimentais à base de dados FEA permite aprimorar os dados de saída em novas simulações. Ao realizar ajustes em dados de entrada dos softwares FEA, as simulações adquirem maior proximidade com a realidade física, e os processos de simulação se aproximam do comportamento destes componentes em operação real. Nesta sinergia, melhorando progressivamente, as simulações FEA permitem, com maior

precisão, prever pontos críticos de tensões residuais, nucleações, fadiga cíclica, etc. [2,11].

Softwares FEA permitem análise detalhada de projeto. As informações fornecidas para produção aperfeiçoam a fase de desenvolvimento de produtos, reduzindo gastos com procedimentos de cálculos individualizados, preparação e ensaio de diversos protótipos, redução da necessidade de ensaios destrutivos sobre protótipos [11,12].

A Fig. 1, a seguir, apresenta um diagrama simplificado do processo de desenvolvimento e fabricação das rodas de liga-leve para a indústria automotiva.

Figura 1 – Diagrama de produção auxiliado por FEA.

A extensometria pode ser localizada, no diagrama apresentado, como ferramenta de ensaio experimental e estará sendo utilizada como fonte de informação, participando do bloco (5) de controle da qualidade.

4.1 Sobre medição da deformação, tensão, fadiga.

O comportamento dos materiais expostos a ação de esforços tem comportamento previsível e é possível quantificar as relações deste comportamento pelo modelamento através de curvas de comportamento tensão-deformação. Em operação estas tensões aplicadas podem, também, sofrer

variações de amplitude agindo ou não sobre a deformação, eventualmente resultando em fadiga [13,15,16].

4.1.1 Deformação

Os materiais sob ação de uma carga podem sofrer alteração elástica e ou plástica e assumir diversas formas. Em geral, para os metais e ligas existe certa região da curva tensão-deformação que apresenta comportamento linear possível de ser representado pela lei de Hooke. Assim tem-se uma correlação e possível análise da deformação elastoplástica dos materiais. Esta relação entre a deformação (ϵ) e a tensão (σ) é linear podendo ser considerada como discreta, ou uma pequena deformação relacionada atuante em um corpo contínuo e homogêneo [13,14]. A Fig. 2 a seguir, geralmente representa o comportamento físico de metais para o qual se observa a correlação existente entre a lei de Hooke e o módulo de elasticidade de Young [15,13,14].

Embora o comportamento, dentro da região elástica possa ser modelado e aproximado por uma reta, ocorre também outros modelos de comportamento. Cada metal ou liga tem comportamento físico em resposta a aplicação de tensão diferenciados os quais podem ter suas curvas representadas por polinômios de graus maiores que um, porém de possível linearização [16]. Outros modelamentos cujo comportamento só será representado pelo somatório de polinômios de grau enésimo impedindo a representatividade por modelos lineares [14,16,17]. Decorre disso que o ponto que indica o Limite Proporcional pode variar dentro da região elástica porque o limite de comportamento linear depende do material. Neste trabalho estaremos analisando ligas que são bem comportadas dentro da modelagem linear, que é a região primária de interesse para análise. Nesta região é possível aplicar o módulo de Young e por conseguinte o uso de ensaio experimental por extensometria [8].

Figura 2 – Curva tensão x deformação para Al puro [15].

A equação que estabelece a relação linear da deformação e a carga aplicada resultando no módulo de Young E , é dada por:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Equação 01}$$

onde; σ é a tensão aplicada (*stress*); E é o coeficiente de elasticidade; ε é o valor da deformação (*strain*).

Nota-se que o comportamento, na região linear, implica impreterivelmente numa deformação elástica que permanece constante ao longo do período em que a tensão ou forças estiverem atuando sobre o corpo. O retorno do corpo a sua condição inicial, anterior a deformação, acontece quando ocorre a relaxação das forças externas que atuavam sobre o corpo, sem causar alterações dimensionais no corpo [15,18]. Próximo a região do limite proporcional, ocorre na prática, que o comportamento não é somente elástico (linear) em função do tempo. Pode ocorrer dependência resultante da ação da força a qual o corpo ficou sujeito. Esta dependência compromete o retorno da deformação à condição inicial, ainda que retirada o total da carga externa aplicada [19,14,17]. O limite proporcional ajusta o ponto a partir do qual o comportamento elástico único deixa de existir, passando o corpo a apresentar comportamento plástico. Isto é, aplicada uma tensão além deste ponto, ainda que retirada essa tensão (carregamento), a deformação do corpo já não retornará a condição inicial

[15,20]. Esse valor limite é definido como capacidade de resistência do corpo onde não há alterações dimensionais permanentes. A partir do valor limite, entrando o corpo no regime de deformação irreversível e ocorrendo a aplicação de esforços em regime cíclico poderá levar o corpo à fadiga seguida de ruptura [21].

A Fig. 3, ilustra o módulo de Young onde a variação da tensão e da deformação sobre um dado ponto do corpo pode ocorrer nos dois sentidos, porém em somente uma direção, denotada principal. A variação em módulo do valor da carga aplicada sobre o ponto pode resultar em fadiga frequentemente levando à ruptura do corpo [15,17].

Figura 3 – Gráfico tensão x deformação e módulo de Young [15].

Ao considerar-se um elemento de área sob um estado plano de tensão, pode-se observar a ocorrência de deformação em uma dada direção determinado um ângulo onde houve variações de valores de tensão em relação à direção principal de medição. A Fig. 4 procura ilustrar que a relação da expressão $\sigma = E\varepsilon$ é verdadeira somente para medições sobre a direção principal na qual a carga está sendo aplicada, mas não é verdadeira em nenhuma das outras direções. Para um ângulo de 60° , partindo do eixo y, a tensão é de amplitude apreciável, mas a deformação é nula. Para o ângulo

correto da direção da deformação primária, onde a tensão é zero, o valor da deformação é $-\mu\varepsilon$, para a qual μ é o coeficiente de Poisson [13,14,21,22].

A Fig. 4 ilustra graficamente porque não se pode simplesmente multiplicar a deformação como medida para qualquer direção arbitrária pelo módulo de elasticidade E e calcular a tensão nesta direção. A relação linear só é verdadeira sobre o plano de tensões no sentido principal da deformação. Antes que a tensão possa ser calculada, será necessário obtermos algumas informações adicionais sobre o plano de tensão [12,14,23]. Para determinar deformação total em qualquer direção deve-se considerar a combinação de três porções de deformação separadas e distintas: a primeira, deformação devido as mudanças de temperatura, segundo, a deformação decorrente do efeito Poisson que não é acompanhado da respectiva tensão; e em terceiro a deformação primária que é diretamente relacionada com a tensão aplicada e indicada pela lei de Hooke [24].

Figura 4 – Amplitude relativa entre tensão e deformação sobre um plano uniaxial [22].

A deformação principal, de maneira análoga, coincide à de tensão principal, tem seus valores máximos e mínimos mutuamente perpendicular, assim a direção de tensão principal coincide com a direção principal de deformação e os planos de cada um deles, certamente, atuam de maneira similar.

Outra propriedade dos planos principais é que neles não agem tensão ou deformação por cisalhamento [12,14,16]. A Fig. 5 procura ilustrar o estado plano de tensão, que à exceção de condições de casos particulares, não existe um fácil relacionamento de proporcionalidade entre tensão e deformação. Assim como sempre se espera encontrar a condição de tensão, o problema reside em estabelecer uma relação entre a medição da deformação e sua correspondência com a tensão principal.

Figura 5 – Amplitude dos campos de tensão e deformação biaxial [16].

O sistema de coordenadas retangular é comumente usado em extensometria na análise de deformação local em um corpo contínuo, o que permite medição da distância relativa entre dois pontos. Para tal, indica-se no corpo da Fig 5, dois pontos vizinhos denotados como P e P' representados e localizados por suas respectivas coordenadas x_i e x_i+dx_i ($i=1,2,3$). Obtém-se o quadrado de sua distância por $ds^2 = \sum_i (dx_i)^2$, supondo que cada ponto deste corpo homogêneo (só lido e contínuo) sofra um deslocamento $\vec{u}(x_i)$ definido de maneira única e dependente das coordenadas do ponto vizinho, tem-se que;

P se desloca para o ponto vizinho Q de coordenadas $X_i = x_i + u_i$

P' se desloca para Q' de coordenadas $X'_i = x_i + dx_i + u_i + du_i \Rightarrow X_i + dX_i$

Agora se verifica que o quadrado da distância de dois pontos deslocados QQ' pode ser fornecido pela equação $dS^2 = \sum_i (dX_i)^2$, assim conclui-se que houve deformação local se $dS^2 \neq ds^2$, pois se $dS^2 = ds^2$, só existe um deslocamento rígido do conjunto. Sendo o deslocamento $\vec{u}(x_i)$ uma função contínua e derivável das coordenadas x_i , pode-se reescrever como $dX_k = dx_k + du_k = dx_k + \sum_i \frac{\partial u_k}{\partial x_i} dx_i$, de tal forma que calculando dS^2 e ds^2 é possível obter o

deslocamento mínimo entre os pontos P e P' na forma de deformações infinitesimais $dS^2 - ds^2 = \sum_{ij} 2\epsilon_{ij} dx_i dx_j$, onde;

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Equação 02}$$

Quando os deslocamentos $\vec{u}(x_i)$ são dados, um conjunto das nove grandezas ϵ_{ij} forma um tensor de segunda ordem, denominado tensor de deformação. Como a resposta de um sólido à uma força aplicada é governada pela lei que relaciona o tensor de tensão ao tensor de deformação, este último deverá apresentar também seis componentes independentes, ou seja, deverá apresentar característica de simetria. Estes seis componentes do tensor foram definidos a partir dos três componentes u_i do deslocamento, portanto existe relação entre os ϵ_{ij} verificados quando as deformações decorrem dos deslocamentos. Assim sendo estas relações foram denominadas equações de compatibilidade e são representadas por seis equações de segunda ordem em derivadas parciais, como segue [14,21,25];mude 30 p/ 29

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{ij}}{\partial x_k \partial x_l} + \frac{\partial^2 \epsilon_{kl}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \epsilon_{ik}}{\partial x_j \partial x_l} + \frac{\partial^2 \epsilon_{jl}}{\partial x_i \partial x_k} \quad \text{Equação 03}$$

4.1.2 Tensão e tensor de tensão

Conceitualmente um determinado corpo em repouso, quando sujeito a ação de forças externas, sofrerá alguma deformação. Como consequência, existirão forças internas oferecendo uma reação às forças aplicadas, conforme a terceira lei de Newton. Como a resultante das forças (internas e externas) podem e tendem a se anular, o corpo estará total ou parcialmente assumindo um estado de relaxamento da deformação [13,22]. Muskhelishvili separa as forças atuantes sobre o corpo categorizando-as em forças volumétricas, como sendo as forças que agem sobre todos os elementos de volume do corpo, e forças de contato [20].

Na prática verifica-se que não há maneira de tratar independente tensão residual, deformação e tensão, porque decorrem de um mesmo fenômeno físico, ação de uma força externa e energia interna do sistema. Por isso, estes conceitos estão intimamente vinculados, embora na literatura pode-se encontrar referências conceituais independentes para estas ocorrências [20,22]. Fica-se com o entendimento de que mesmo sem ação de forças externas de

carregamento, as quais componentes de estruturas serão submetidas, os fatores de tensão não estarão ausentes, sendo intrínsecos aos materiais utilizados na produção das partes e elementos das complexas estruturas mecânicas [20,22,26]. Geralmente, quando em operação também estarão sob de estados diferenciados, tais como pressão e temperatura, os quais irão direta e indiretamente alterar as propriedades mecânicas dos materiais e suas condições dimensionais.

Diversos ensaios para o estudo do comportamento em materiais, quanto a sua resistência às deformações, são efetuados sob aplicação de tensões ou campo de tensões, tecnicamente chamados de carregamento [20,22]. Existem três principais modos do carregamento que se pode aplicar, como; tração, compressão, e cisalhamento. Pode-se pensar em torção como uma forma de cisalhamento [13,24].

Parte-se da idéia de um corpo estático, considerando-o um sólido contínuo e em equilíbrio quando sob ação de forças exteriores. Estas forças exteriores podem ter ação superficial ou volumétrica sobre o sólido. Isola-se deste corpo, um elemento volumétrico dV , o interior deste sólido estará limitado, por sua vez, a um elemento de superfície dS , observa-se que para o corpo ainda manter o equilíbrio estático dS deverá estar sob ação de parte das forças anteriormente aplicadas sobre a superfície S do sólido. Para uma breve análise, utilizando-se deste elemento de volume dV , onde se encontra no elemento de superfície dS um ponto centrado M para o qual se tem a normal à dS orientado positivamente para o exterior do volume V deste sólido. Neste ponto tem-se um força aplicada $\vec{T}dS$, aplicada ao elemento de superfície na vizinhança do ponto M [20,22].

O vetor tensão emerge do lado positivo da superfície elementar passando por M , tendo a força $\vec{T}$ atuando por unidade de área, na parte do elemento de sólido do lado da normal positiva. Fazendo uso de um sistema de coordenadas ortogonal, com origem em M onde o vetor $d\vec{S}$ define o elemento de superfície dS com orientação positiva para $d\vec{S}$, o lado externo do volume V de componentes dS_j . Com este sistema de coordenadas, constrói-se um elemento de volume tetraédrico, sendo três de suas faces compostas pelos planos da tríade de eixos que tem origem em M . A quarta face é a superfície dS_j sob o plano que

intercepta os pontos x_i, y_i, z_i . Neste tetraedro uma força de forma $\sigma_{ji} S_j$ atua sobre a face do tetraedro segundo a componente x_i (Fig. 7).

Figura 5 – Tensão $\sigma_{ji} S_j$ atuante em elemento superficial $d\vec{S}$

No sólido em equilíbrio, o tetraedro infinitesimal estará em equilíbrio ainda que sob ação das forças nas superfícies e no volume. Admitindo-se que o tetraedro infinitesimal esteja sob ação das forças gravitacional, ainda que desprezíveis, a resultante das forças somam zero e podem ser escritas como sendo a soma das projeções das forças sobre os eixos [21].

$$-T_i dS + \sum_j \sigma_{ji} dS_j = 0 \quad \text{ou} \quad T_i = \sum_j \sigma_{ji} n_j \quad \text{Equação 04}$$

com $dS_j = n_j dS$ onde n_j são os cossenos diretores do vetor unitário da normal.

As nove quantidades de σ_{ji} são denominadas tensões na origem, em M, σ_{ji} representa o componente segundo o eixo X_i do vetor tensão em M ligado ao elemento de superfície perpendicular ao eixo X_j , desta dimensão vetorial ressalta-se que não há como definir tensão em um ponto, se assim fosse o caso, haveria de se indicar à qual componente a tensão estaria associada.

Sua aplicação a problemas práticos são comumente expressos mediante equações que contêm grandezas escalares, vetoriais e grandezas denominadas tensores. Os tensores são grandezas intimamente relacionadas com as propriedades físicas do meio. Um tensor pode ser denominado tensor de tensão

em M quando suas componentes, σ_{ji} , são de segunda, como indicado na matriz a seguir.

$$M = \begin{pmatrix} V_{ijk}\sigma_{ji} & V_{ijk}\sigma_{ji} & V_{ijk}\sigma_{ji} \\ V_{ijk}\sigma_{ji} & V_{ijk}\sigma_{ji} & V_{ijk}\sigma_{ji} \\ V_{ijk}\sigma_{ji} & V_{ijk}\sigma_{ji} & V_{ijk}\sigma_{ji} \end{pmatrix}$$

Os componentes diagonais σ_{ii} do tensor são chamados tensões normais e os componentes não diagonais, onde $i \neq j$, representam as tensões tangenciais ou de cisalhamento [21].

Agora se pode escrever as equações de equilíbrio para o corpo de volume V sujeito às forças de superfície $T_i dS = \sum_j \sigma_{ji} dS_j$ exercidas pelo resto do sólido sobre o volume V .

$$\int_{(S)} \sum_j \sigma_{ji} dS_j = 0 \quad \text{Equação 05}$$

Utilizando o teorema de Green podemos transformar uma integral de superfície em uma integral de volume [21,27].

$$\int_{(S)} \sum_j \sigma_{ji} dS_j = \int_{(V)} \sum_j (\text{div} \sigma_{ji})_i dV \quad \text{Equação 06}$$

Como o divergente do tensor σ_{ji} tem como i -ésimo componente $(\text{div} \sigma_{ji}) = \sum_j \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j}$, ao comparar-se com a equação 05 de onde se obtém $\sum_j \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} = 0$ ou ainda $(\text{div} \sigma_{ji}) = 0$, resultando assim nas condições de equilíbrio do corpo. O requisito de equilíbrio estático onde não há aceleração angular, resultando zero para qualquer elemento de volume está satisfeito pela relação $\sigma_{ji} = \sigma_{ij}$, na qual pelo princípio de simetria as componentes independentes ficam reduzidas a seis [21,27].

4.1.3 Relação entre tensão e deformação

A existência de uma relação linear entre a tensão e a deformação, pode ser dada pela Lei de Hooke, na ausência de deformação plástica, fluência ou alterações de temperatura. Para um sólido elástico, os seis componentes do tensor de tensão estarão linearmente e bi univocamente relacionados aos seis componentes de deformação, daí qualquer mudança ocorrida em um componente afetará linearmente seu correspondente, logo;

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} C_{ijkl} \epsilon_{kl} \text{ e } \epsilon_{ij} = \sum_{kl} S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad \text{Equação 07}$$

Assim para os 36 valores possíveis para C_{ijkl} formam uma matriz 6X6 que representam os módulos de elasticidade do meio, e nem todos são independentes. A simetria entre os tensores σ_{ij} e ϵ_{ij} permitem a notação matricial que consiste em substituir cada par de índices ij e kl por um único índice de acordo com a regra

$$\begin{aligned} 11 &\Rightarrow 1, 12 \Rightarrow 6, 13 \Rightarrow 5, \\ 21 &\Rightarrow 6, 22 \Rightarrow 2, 23 \Rightarrow 4, \\ 31 &\Rightarrow 5, 32 \Rightarrow 4, 33 \Rightarrow 3. \end{aligned}$$

Assim

Este conjunto de números poderá ainda ser reduzido de acordo com a simetria da estrutura cristalina do sólido; quanto maior a simetria cristalina, menor o número de constantes. A matriz dos coeficientes C_{ij} muda quando o eixo das coordenadas para a tensão e deformação é alterada em relação aos eixos de simetria do cristal. As constantes elásticas para um cristal em sua orientação padrão são chamadas constantes características do material cristalino [14,28]. Exemplificando a forma da matriz tomando a forma padrão, quando os três eixos das coordenadas coincidem com os três eixos de um cubo, assumindo-se simetria notamos somente três constantes elásticas;

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{pmatrix} \quad \text{Equação 08}$$

Finalmente para os materiais que são macroscopicamente isotrópicos (substância não cristalina ou policristalino), ainda tem-se somente duas constantes. Estas duas constantes elásticas, ditas λ e μ são chamadas de coeficientes de Lamé. Os coeficientes de Lamé determinam a relação tensão-deformação (lei de Hooke) [21].

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \sum_k \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

para;

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{se } i \neq j \\ 1 & \text{se } i = j \end{cases} \quad \text{equação 09}$$

As constantes elásticas são expressas em termos do módulo de Young E , do modo de cisalhamento G , e da razão de Poisson ν , ao invés dos coeficientes de Lamé. A relação entre os módulos elásticos convencionais e os coeficientes de Lamé são;

$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}, \quad \text{equação 10}$$

sendo ainda

$$G = \mu \quad \text{e} \quad \text{equação 11}$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} \quad \text{equação 12}$$

Os valores E, G e ν não são independentes e sim relacionados por

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{equação 13}$$

Manipulando algebricamente as equações 10 e 11 junto à equação 12, mantendo $i=j$ usando a equação $\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = (3\lambda + 2\mu) \cdot (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33})$ usando a equação 12 na equação 09 com $i \neq j$ resolvendo as deformações, obtém-se;

$$\epsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})]$$

$$\epsilon_{22} = \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu(\sigma_{11} + \sigma_{33})] \quad \epsilon_{33} = \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{11})] \quad \text{equação 14}$$

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{2G} \sigma_{12}$$

$$\epsilon_{13} = \frac{1}{2G} \sigma_{13} \quad \text{equação 15}$$

$$\epsilon_{23} = \frac{1}{2G} \sigma_{23}$$

Outra grandeza física a ser considerada, além dos alongamentos causados pelas tensões aplicadas, é a temperatura, que também causa deformações normais, assim tem-se a equação da componente térmica $(\epsilon_{23})_{\text{térmica}} = \alpha \Delta T$. A temperatura não causa deformações de cisalhamento. Tem-se o coeficiente de deformação térmica linear (α) e ΔT que é o aumento da temperatura em relação a uma dada temperatura de referência. Para se obter a

deformação total utiliza-se a equação da componente térmica dada adicionada a cada uma das componentes das deformações normais [21,24].

A deformação de um sólido decorrente das tensões aplicadas significa que foi realizado trabalho no material. Este trabalho é armazenado no meio como energia interna ou energia de deformação elástica. Esta energia por unidade de volume é representada pela equação $E_{el} = \frac{1}{2} \sum_{ij} \sigma_{ij} \epsilon_{ij}$. Finaliza-se ressaltando que o comportamento de um sólido sob ação de tensões aplicadas é determinado pela aplicação simultânea das condições de equilíbrio, das condições de compatibilidade e de uma relação tensão deformação. Deformação e deslocamentos estão relacionados pelos componentes do tensor deformação [14,20,21].

4.1.4 Fadiga

A fadiga mecânica ou fadiga em materiais é definida como sendo resposta à ação de forças dinâmicas atuantes externamente, isto ocorre usualmente como resultado de forças cíclicas aplicadas, e também devido às forças intrínsecas do material. A fadiga pode ser estudada pelo seu tipo ou origem, como segue:

- a) tipo: fadiga normal e fadiga por cisalhamento;
- b) origem: tensão, compressão, torção, flexão, fadiga residual e térmica.

A origem da fadiga mencionada em (b) poderá também ser caracterizada como do tipo mencionado em (a). Quando se estuda resistência dos materiais, é interessante considerar o tipo da fadiga e suas causas, assim como delimitar a região e correta orientação para instrumentação e medição das deformações e cálculo das tensões envolvidas [13]. Adicionalmente tem-se praticado subdivisões, ou seja; fadiga uniaxial, biaxial, tri axial e condição espacial de fadiga. Fadigas mecânicas não são diretamente acessíveis para medições [24,29]. Técnicas que utilizam de raios X, são uma exceção, pois a fadiga do material pode ser examinada em uma região microscópica, podendo ser determinadas distorções nos arranjos das estruturas cristalinas ou mudanças relativas nas separações Inter atômicas. O processo fica restrito às camadas superficiais entre 5 μm a 15 μm de profundidade [30,31]. A fadiga pode ser determinada tanto pela teoria da resistência dos materiais ou medida por técnicas de extensometria, que é um método baseado na Lei de Hooke [19,14].

As limitações de elasticidade e plasticidade de um material sob ação de cargas e sua capacidade suportar forças deve ser sempre expressa em termos de tensão. Isto se faz verdadeiro em ambos os casos, para a capacidade máxima de carregamento e carga de trabalho. As características de um material em geral, tais como, o limite de proporcionalidade, ponto dúctil, e certamente a força de ruptura, todas são expressas em termos de tensão. Tensão, entretanto, não é uma grandeza fundamental, mas antes uma quantidade derivada. Sendo tensão uma quantidade impossível de ser medida, ela deve ser calculada assim como as forças e a área envolvida, como na tração e compressão e nas considerações de deformação e sua distribuição, flexão e torção. Na ocorrência de deformação normal estas são quantidades possíveis de serem medidas pelas mudanças na dimensão do corpo. A deformação por esforço transversal ou cisalhamento é uma mudança no ângulo e também pode ser medida, mas não tão facilmente como a deformação normal [20,32]. Desde que a tensão é a quantidade universalmente utilizada para expressar a resistência dos materiais, se faz necessário a mudança das quantidades medidas em termos de deformação para quantidades em termos de tensão para que possa ser entendida mais facilmente. Este processo de tradução de deformação para tensão tem uma passagem complicada pelo efeito de deformação de Poisson [8,14,23]. Quando uma deformação primária é produzida na direção do eixo x por uma força nesta direção, secundária, ou de Poisson, simultaneamente são produzidas no sentido do eixo y e na direção do eixo z normais a deformação primária. Este ponto é frequentemente selecionado para a medição da deformação [33].

No caso de tensão uniaxial, a qual podemos representar simplesmente por tração (Fig.6a) ou compressão (Fig.6b) sobre um componente a deformação primária estará relacionada à tensão pela lei de Hooke da proporcionalidade. Deste modo, a tensão produzida na direção da força aplicada é igual ao produto do módulo de elasticidade e da deformação primária, decorrente do limite de proporcionalidade, desde que o limite do material não seja ultrapassado. Em todas as outras direções essa relação não é aplicável devido ao efeito de deformação de Poisson [13,17].

Figura 6 – Corpos simples sobre ação de força uniaxial [13].

Nos casos mais complexos em que se observa ação de tensão biaxial, onde a deformação primária existe em ambas as direções dos eixos x e y , a relação simples entre as forças, tensão e deformação anteriormente ilustrada na Fig. 6, já não encontra correspondência em nenhuma das direções. Isto ocorre porque o efeito de deformação de Poisson ocorre em todas as direções.

Desta maneira, ao simplificar o tratamento conceitual se contextualiza à aplicação dos conceitos aplicados em uma modelagem de elemento volumétrico infinitesimal, inicialmente ilustrado na Fig 7.

Figura 7 – Corpo simples sobre ação de força em um plano biaxial [22].

Ainda a ação da carga sobre o elemento volumétrico ou corpo pode ser estática se ela se altera de maneira relativamente lenta ao longo do tempo e é aplicada uniformemente sobre uma secção reta ou superfície do corpo, o comportamento mecânico pode ser verificado mediante um simples ensaio de tensão-deformação. Tais ensaios são, geralmente, conduzidos com os corpos na temperatura ambiente. Nota-se três maneiras principais segundo as quais uma

carga pode ser aplicada: tração, compressão e cisalhamento. A distinção leva em conta a natureza vetorial da força [16,24].

4.2 Corpo de forças

Para entender-se as bases do desenvolvimento por modelagem será necessário entender como um elemento finito é formulado e como suas características são multiplicadas até adquirir um contorno de componente discreto. No projeto de componentes automotivos inicia-se na análise dos elementos envolvidos para modelar a ação das forças sobre o corpo.

Segundo Muskhelishvili [20], as forças atuantes sobre um corpo (*body forces*) vistas na mecânica como corpos contínuos, se faz distinção de dois tipos de forças: 1. Forças do corpo, as que agem nos elementos de volume ou massa do corpo; 2. Tensão, agindo internamente nos elementos de superfície, ou na fronteira superficial do corpo. Schön [12] as define como: 1. Forças volumétricas; 2. Forças de contato. Detalhando essa diferença, tendo-se um corpo de forma geométrica arbitrária e de volume V , nele estará agindo a força peso ou forças fictícias (de origem inercial, tais como a centrípeta e centrífuga), neste caso, as forças estarão atuando sobre qualquer elemento de volume infinitesimal (dV) do corpo sólido, ou atuando sobre a massa contida nestes elementos de volume. Assumindo que estas forças tem a forma $\vec{F}dV$ onde $\vec{F}$ é um vetor finito, qualquer ponto (x,y,z) do elemento de volume dV poderá ser escolhido como ponto de aplicação do vetor força $\vec{F}$. O vetor $\vec{F}$ é chamado de força do corpo [14,20], em referencia à unidade de volume. Sendo ρ a representação da densidade (quantidade de massa contida em uma unidade de volume), para um dado ponto do corpo, o vetor $\vec{F}/\rho$ irá representar a força do corpo por unidade de massa. No caso da força gravitacional o vetor $\vec{F}$ estará orientado verticalmente para baixo e sua magnitude será igual a ρg , onde g é a aceleração devido a gravidade. Em geral o vetor $\vec{F}$ depende da posição do elemento de volume dentro do corpo, ou em outras palavras, das coordenadas x,y,z do ponto no qual se encontra o elemento de volume infinitesimal, sendo que o vetor $\vec{F}$ também é dependente do tempo.

Em sua definição das forças de contato, Schön define que estas forças atuam sobre a superfície do elemento de volume, sendo que a distinção se deve fundamentalmente ao alcance destas forças. Forças de contato tem origem nas

forças moleculares de coesão, que tem alcance muito limitado, geralmente da ordem de algumas distâncias Inter atômicas, portanto, como se tais forças atuassem apenas sobre a superfície do elemento de volume. Forças volumétricas por outro lado teriam maior alcance [12,20].

Schön, ainda, representa as forças volumétricas pelo vetor $\mathbf{f} = (f_1, f_2, f_3)$ em unidades de volume ou se forem expressas em unidades de massa, onde a resultante das forças volumétricas, $\mathbf{F}$, atuando sobre qualquer volume finito, V' , do corpo sólido será dada por:

$$\mathbf{F} = \iiint_{V'} \mathbf{f} dV \quad \text{Equação 16}$$

No caso das forças de contato, estas atuam fundamentalmente sobre a superfície do elemento de volume, podendo, aqui serem escritas como o divergente de um tensor de ordem 2:

$$f_i^c = \sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad \text{Equação 17}$$

onde σ_{ij} recebe o nome de tensor de tensão (*stress tensor*) [12,20].

Com base na definição do tensor de tensão, podemos escrever a força atuando sobre um elemento de volume dV do corpo como:

$$\int f_i^c dV = \int \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV = \oint \sum_{j=1}^3 \sigma_{ij} dS_j \quad \text{Equação 18}$$

onde dS_j são os componentes do elemento de superfície dS orientado de acordo com a normal. Escolhendo um elemento de volume de formato cúbico, com as normais das faces apontando ao longo dos eixos x_i nota-se que σ_{ij} corresponde ao i-ésimo componente da força atuando sobre o elemento de área orientado com a normal ao longo do eixo x_j .

4.3 Momento e forças de flexão

No caso de flexão em uma barra, uma solução rigorosa para a distribuição da tensão pode ser obtida assumindo-se que a secção transversal da placa permaneça com sua geometria plana, atuando como uma fina placa, durante a flexão e rotação em relação ao seus eixos de neutralidade, bem como continue sempre normal à curva de deflexão [20]. A combinação de cada flexão em duas direções perpendiculares resultará na flexão pura das placas finas. Iniciando

pela flexão pura de uma placa retangular onde a ação do momento estará uniformemente distribuída ao longo das bordas laterais da placa como ilustrado na Fig. 8. O plano médio entre as faces da placa, denominada por plano médio da placa, a qual se tem o plano formado pelos eixos XY e adota-se a direção dos eixos posicionado ao longo das bordas do plano como ilustrado na figura de mesmo número. O eixo Z está perpendicular ao plano, podendo ser deslocado ao longo deste, e assume-se seu sentido positivo como estando na direção contrária ao convencional, no caso apontando para baixo. Para M_z adota-se o momento fletor por unidade de comprimento em paralelas às bordas do eixo Y e para M_y o momento fletor por unidade de comprimento estará paralelo à borda do eixo X .

Figura 8 – Momento fletor atuando sobre uma placa fina [16].

Estes momentos serão considerados positivos quando estiverem produzindo compressão na superfície da placa e negativo caso estejam produzindo tração. A espessura da placa será denotada por h e consideraremos essa dimensão muito pequena em relação às demais dimensões. Agora se considera uma placa (elemento de superfície ou mesmo plano cristalino), dentre um par de placas destacada de um elemento de volume, considerados planos paralelos por XZ e YZ (Fig.9) [20].

Figura 9 – Par de planos paralelos em um elemento de volume [20].

Define-se que durante a flexão da placa, o elemento permaneça plano rotacionando sobre o eixo neutro **n-n** e que se mantém na normal em relação ao plano da superfície de deflexão, isto leva a concluir que na região central do plano da placa não haverá deformação durante esta flexão e permanecerá como uma superfície neutra. Agora se tem $1/r_x$ e $1/r_y$ como representando a superfície curvada, dita positiva, assim se a flexão aplicada impõe uma forma convexa (para baixo). Ainda sendo a sua superfície neutra, apresentará secções paralelas aos planos formados pelos eixos **XZ** e **YZ** respectivamente, onde a unidade de alongamento estará na direção de **X** e **Y** do elemento laminar **abcd** (Fig.9), por uma distância **Z** da superfície neutra. Encontra-se situação semelhante a de um plano que pode ser representado pelas expressões;

$$\epsilon_x = \frac{Z}{r_x} ; \quad \epsilon_y = \frac{Z}{r_y}. \quad \text{Equação 19}$$

Aplicando-se a Lei de Hooke, pode-se obter;

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y); \quad \epsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x), \quad \text{Equação 20}$$

obtendo, então, que a tensão correspondente atuando sobre a lâmina **abcd**, será;

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{E_z}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_x} + \nu \frac{1}{r_y} \right) \\ \sigma_y = \frac{E_z}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r_y} + \nu \frac{1}{r_x} \right) \end{cases} \quad \text{Equação 21}$$

Estas quantias são proporcionais a distância em **Z** da lâmina **abcd** até a superfície neutra e depende da curvatura da placa submetida à flexão. Essa

tensão está normalmente distribuída pelos lados do elemento plano ilustrado na Fig.9, podendo ser reduzido aos pares os quais devem ser iguais ao momento externo. Deste modo, obtém-se as expressões:

$$\begin{cases} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dy dz = M_x dy; \\ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dy dz = M_y dx. \end{cases} \quad \text{Equação 22}$$

Procedendo as operações de substituição por σ_x e σ_y entre as equações 21 e 22, obtendo-se;

$$M_x = D \left(\frac{1}{r_x} + \nu \frac{1}{r_y} \right) \quad \text{Equação 23}$$

$$M_y = D \left(\frac{1}{r_y} + \nu \frac{1}{r_x} \right) \quad \text{Equação 24}$$

Onde;

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \int_{-h/2}^{h/2} z^2 dz = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Equação 25}$$

Essa quantidade é denominada “rigidez da placa” [20].

Nesta premissa, admitiu-se que não existe deformação na superfície central da placa durante flexão. Usualmente este modelo é preciso o suficiente enquanto as deflexões na placa são relativamente pequenas quando comparadas à espessura h . Se a condição acima não for satisfeita, haverá deformação na superfície central da placa. Considera-se ainda, deflexão da superfície como sendo uma superfície revelável, por exemplo, uma superfície cilíndrica ou cônica deva ser considerada na investigação de distribuição da tensão sobre a placa.

Utilizando-se a notação ω , para a deflexão pode-se aproximar as expressões como curvatura das placas, análogo ao conhecido para a fórmula de curvatura de uma barra, assim tem-se;

$$\frac{1}{r_x} = - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad \text{Equação 26}$$

$$\frac{1}{r_y} = - \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \quad \text{Equação 27}$$

assim procedendo ao substituir-se nas equações 26 e 27, obtém-se;

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad \text{Equação 28}$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \quad \text{Equação 29}$$

Estas equações definem a superfície de deflexão da placa envolta pelos momentos dados M_x e M_y . Um caso particular será quando o momento $M_y = 0$, para uma placa retangular, como a da figura 3.6, sendo dobrada como uma barra. Neste caso pela equação 27, obtém-se o seguinte resultado;

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = -\nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad \text{Equação 30}$$

Indicando que a placa tem duas curvaturas em direções opostas, o que se reconhece por dobramento de superfície anti-elástica.

A flexão pode ocorrer distribuída uniformemente entre os momentos M_x e M_y (Fig.8), a energia de deformação acumulada em cada elemento planar de um sólido (Fig.9), será obtida pelo cálculo do trabalho realizado pelos momentos $M_x dy$ e $M_y dx$ em cada elemento durante a flexão da placa. Ainda que os lados do elemento permaneçam plano, o trabalho feito pelos momentos $M_x dy$ será obtido tomando-se metade do produto do elemento antes da flexão [14,20].

Desde que a derivada de segunda ordem, $-(\partial^2 \omega / \partial x^2)$, representa aproximadamente a curvatura da placa no plano **XZ**, o ângulo correspondente para o momento $M_x dy$ será $-(\partial^2 \omega / \partial x^2) dx$, e o trabalho realizado por este momento será;

$$-\frac{1}{2} M_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} dx dy \quad \text{Equação 40}$$

Uma expressão análoga também é obtida do trabalho produzido pelos momentos $M_y dx$, onde o trabalho total será igual a energia potencial do elemento, ou seja:

$$dV = -\frac{1}{2} (M_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + M_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}) dx dy \quad \text{Equação 41}$$

Agora se promovendo as substituições algébricas pelas expressões do momento obtidas nas equações 39 e 40, a energia de deformação do elemento de volume será representada pela seguinte expressão:

$$V = \frac{1}{2} D \iint \left[\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right] dx dy \quad \text{Equação 42}$$

4.4 Campos de tensão

Os campos de tensões decorrem das singularidades físicas dos cristais em materiais cristalinos. A essencial causa da deformação plástica está intimamente atrelada ao deslocamento de discordâncias [15]. Um tipo particular de discordância pode ser visualizado como sendo um plano atômico que termina no interior de um cristal, o que provoca um rearranjo dos planos seguintes sem possibilidade de reversibilidade [15,13,34]. Denomina-se, então, discordância à última fileira de átomos associada a esta região do cristal. As discordâncias podem ser caracterizadas pela direção de dois vetores, um principal e outro tangencial. Ao vetor principal, denomina-se vetor de Burgers $\vec{b}$ e seu vetor tangente $\vec{t}$ a direção de ambos, podem conferir aspectos de hélice, cunha ou caso sejam diferentes destas serão denominadas discordâncias mistas [12,35]. A medida da energia presente na região está relacionada à $(\vec{b})^2$ por unidade de comprimento. Esta região de discordância estará sujeita a um campo de tensão elástica [21].

A teoria da elasticidade vem acompanhada por um tratamento com rigor matemático, onde o comportamento dos meios sólidos contínuos é mais bem entendido pela introdução de um ente matemático chamado tensor. Neste trabalho, espera-se um entendimento geral da teoria da elasticidade, tratando os campos de tensão e tensores de modo simplificado. Os tensores em seu sentido físico são considerados caso particular do espaço euclidiano tridimensional, para o qual se utiliza dos eixos cartesianos [14,24].

Quando utilizada na física e nas engenharias, a noção de tensor está atrelada a uma grandeza física representada e de como essa grandeza pode sofrer transformações em sua representatividade por uma mudança de coordenadas [27].

Assim um escalar ou tensor de ordem zero (zero) tem, por exemplo, como grandeza física de força, velocidade definida por um único número, independente de um sistema de coordenadas [21]. Bem como um tensor de ordem 1 (um) pode ser definido por três componentes no eixo de coordenadas,

que em uma ocorrência de mudança de sistema de coordenadas ou simplesmente de eixos, se transformam seguindo a lei;

$$V'_i = \sum_j a_{ij} V_j \quad \text{Equação 43}$$

Onde os a_{ij} são elementos de uma matriz que opera a mudança de eixos representando uma grandeza diretiva, no nosso caso força, velocidade.

Já um tensor de ordem 2 (dois) é definido por um conjunto de 9 números T_{ij} , sendo $(i,j = 1,2,3)$, podendo ser representado por uma matriz quadrada:

$$\begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix}$$

Caso $T_{ij} = T_{ji}$ diz-se que o tensor é simétrico. Para representar grandezas vetoriais sob um mesmo sistema de coordenadas, sendo cada componente função linear das outras três componentes, deve-se considerar este caso como um tensor de ordem 2 (dois).

A soma de tensores de ordem diferentes, seja $T_1=p$ e $T_2=q$, em geral, pode ser representada de um tensor de ordem $p+q$. Os componentes T_{ij} de um tensor podem ser transformados por uma mudança de sistemas de coordenadas seguindo a lei;

$$T'_{ij} = \sum_{kl} a_{ik} a_{jl} T_{kl} \quad \text{Equação 44}$$

onde os a_{ik} são os elementos da matriz de mudança no sistema de coordenadas.

Um tensor de tensão das constantes elásticas, da mesma forma, será um tensor de ordem 4 (quatro) sofrerá a transformação segundo a lei;

$$C'_{ijkl} = \sum_{mnop} a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} C_{mnop} \quad \text{Equação 45}$$

Assim como um tensor de tensão de segunda ordem é representado por uma matriz quadrada, pode-se encontrar um sistema de coordenadas tal que essa matriz possa ser escrita na forma diagonal. As direções do sistema de coordenadas serão então chamadas direções principais, e os componentes diagonais encontrados pelos valores principais do tensor (T_1, T_2, T_3) , expressos em notação matricial como [16,20,21]:

$$\begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix}$$

Complementando a noção geral sobre o tensor de tensão:

- i. Assim como no caso do tensor de deformação, o tensor tensão é formalmente equivalente a uma matriz quadrada de dimensão 3.
- ii. Atribuir valores aos elementos desta matriz corresponde a definir um estado de tensão.
- iii. Como no caso do tensor de deformação, em certas ocasiões pode-se reduzir o problema à análise das tensões em um determinado plano interior do sólido, nestes casos a matriz fica reduzida à dimensão 2.

A demonstração de simetria $T_{ij} = T_{ji}$, ou $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ implica em demonstrar que simetria é dependente do equilíbrio de momentos de rotação no elemento de volume. O momento de rotação em torno do eixo x_1 imposto pelas forças volumétricas ao elemento de volume V e pelas forças de contato à superfície S que contém um volume V .

$$M_1 = \iiint_V (x_2 f_3 - x_3 f_2) dV' + \iint_S (x_2 f_3^c - x_3 f_2^c) dS' \quad \text{Equação 46}$$

Usando o teorema de Green [27], entretanto, pode-se transformar a integral de superfície em uma integral de volume e a equação 46 pode ser reescrita como:

$$M_1 = \iiint_V \left\{ x_2 \left(f_3 + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} \right) - x_3 \left(f_2 + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} \right) \right\} + \sigma_{32} - \sigma_{23} dV' \quad \text{Equação 47}$$

Os termos entre parênteses, entretanto, correspondem respectivamente a $f_3 - f_3^c$, e $f_2 - f_2^c$. Como o sólido está em equilíbrio, estes termos devem se anular e o momento M_1 será dado por:

$$M_1 = \iiint_V (\sigma_{32} - \sigma_{23}) dV' \quad \text{Equação 48}$$

Utiliza-se o equilíbrio do corpo sólido para demonstrar que o momento $M_1 = 0$. Esta condição somente será satisfeita para qualquer elemento de volume do sólido se o argumento da integral se anular identicamente em

qualquer ponto do corpo sólido. Isto demonstra que o tensor de tensão deve ser simétrico, como inicialmente proposto [16,12]. Schön emprega o uso das componentes diagonais do tensor em correspondência com as forças atuando perpendicularmente às superfícies do elemento de volume, sendo denominadas tensões normais. Os termos não diagonais, por sua vez, correspondem a forças atuando paralelamente à superfície do elemento de volume, sendo denominadas, portanto tensões de cisalhamento [13,21].

4.5 Círculo de Mohr.

O círculo de Mohr é uma ferramenta gráfica, desenvolvida para auxiliar aos estudos do estado plano de tensão e análise da deformação, muito útil também na redução do trabalho de cálculo de estados de tensão biaxial, tri axial e de deformação em corpos sólidos, onde geralmente se faz necessária a mudança de referencial. Tem-se aplicação prática quando já se sabe o estado de tensão, ou as tensões principais são dadas. Ao estudar-se estados tri axiais de tensão frequentemente existe a necessidade de transformar uma integral de superfície para uma integral de volume que pode ser calculada pelo Teorema de Green [33,27].

Em um corpo sólido no estado de equilíbrio, tem-se que seu momento será nulo. Assim as componentes diagonais do campo de tensão deverão ser simétrico, correspondendo às forças perpendiculares atuando sobre a superfície do elemento de volume, sendo denominadas tensões normais. As parcelas de tensão não normais, diagonais e deformações angulares, são paralelas ao plano de superfície sendo consideradas tensões de cisalhamento. As tensões normais ao plano, tomadas como referencial são chamadas tensões principais, podendo ser diagonalizadas como tensor de tensão.

As mudanças de referenciais são largamente utilizadas nos casos onde se deseja a análise da tensão ou deformação de um sólido não restringindo ao caso biaxial de tensão. A determinação de orientação mais provável de ativação do escorregamento de discordâncias no início da deformação plástica são provocadas no referencial das tensões de cisalhamento [13,35].

4.5.1 Mudança de coordenadas

Na prática, ocorrem casos onde as componentes da tensão estão referenciadas por um antigo sistema retangular (x, y, z) até então conhecido, necessário para se determinar um novo sistema (x', y', z'). Assume-se que ambos os sistemas sejam ortogonais, porém não necessariamente cartesiano. Agora se pode determinar a tensão para os quatro planos de um mesmo ponto, (elemento infinitesimal de volume) tomando a notação n a normal aos planos do sistema de coordenadas x, y, z, que atuam nestes planos [16]. Já atuando com novas coordenadas x_n, y_n, z_n , obtém-se três equações que determinam as projeções desconhecidas;

$$\begin{aligned} X_n &= \sigma_x \cos(n, x) + \tau_{xy} \cos(n, y) + \tau_{xz} \cos(n, z) \\ Y_n &= \tau_{xy} \cos(n, x) + \sigma_y \cos(n, y) + \tau_{yz} \cos(n, z) \\ Z_n &= \tau_{xz} \cos(n, x) + \tau_{yz} \cos(n, y) + \sigma_z \cos(n, z) \end{aligned} \quad \text{Equação 49}$$

Sendo a deformação e um corpo dadas como vizinhanças de um ponto, caracterizado pelas componentes de deformação denotadas por três componentes de cisalhamento e três deformações (ϵ), onde as componentes subscritas indicam a direção, também se tem o alongamento ou encurtamento resultante da deformação denotado por (γ), com indicativo subscrito formado pelas coordenadas de direções paralelas as perpendiculares originais. Assim sendo, tem-se ϵ_x e ϵ_y como deformações em x e y, γ_{xy} representa a mudança de ângulo entre os segmentos de sua direção original [14,16].

A componente de deformação ϵ_i e $\frac{1}{2}\gamma_{xy}$ é simétrica, mantendo a notação conhecidas, x, y e z para as componentes de tensão e indicando as novas coordenadas no novo sistema de x', y' e z', pode-se obter equações transformada para o sistema cartesiano a partir da matriz de tensor de ordem dois;

$$\begin{vmatrix} \epsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \epsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \epsilon_z \end{vmatrix}$$

São usadas expressões da equação 40 as quais fazem uso de cossenos entre o ângulo formado entre os eixos dos dois sistemas para representar a projeção das tensões com direções arbitrárias à normal, como indicado abaixo;

Cossenos	x	y	z
x'	l_{11}	l_{12}	l_{13}
y'	l_{21}	l_{22}	l_{23}
z'	l_{31}	l_{32}	l_{33}

É possível empregar métodos gráficos para demonstrar a relação entre deformação por cisalhamento e deformação normal na direção de um ponto [21].

4.5.2 Aplicações do Ciclo de Mohr

O método de Mohr usa o eixo de ordenadas de seu sistema para $\gamma/2$ o que é isso? e o eixo abscissa para a deformação ϵ , desta forma somente um ponto pode representar o estado de deformação em algum plano de deformação do corpo. A Fig. 10 ilustra como uma deformação normal de $500 \times 10^{-6} \epsilon$ e $200 \times 10^{-6} \epsilon$ unidade de deformação por cisalhamento pode ser representada por um ponto A, neste sistema de coordenadas onde os valores positivos do eixo $\gamma/2$ é indicado, como no sistema retangular por ordenadas negativas crescente, -y (para baixo) [23,22].

Figura 10 – Representação gráfica do ciclo de Mohr para a magnitude de deformação [22].

O ciclo de Mohr pode ser empregado para obter-se solução para deformações da direção de três extensômetros ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 , por simples substituição nas equações;

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\varphi_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_1 \\ \epsilon_2 &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\varphi_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_2 \\ \epsilon_3 &= \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\varphi_3 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_3\end{aligned}\quad \text{Equação 50}$$

Desta forma é possível encontrar a tensão e a deformação no sentido principal e pela aplicação da Lei de Hooke e o coeficiente de elasticidade do material pode-se obter por: $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{i}n}$.

4.6 Sobre o comportamento elastoplástico dos materiais

O comportamento mecânico geral de ligas metálicas em estruturas, é estudado sob ação de forças aplicadas externamente e de forma regular de diferentes forças e tensões. As tensões estão relacionadas aos tensores por meio de relações do tipo:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = f \left(\begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \right)$$

A função f ou sua inversa f^{-1} podem ser funções das taxas de deformação, $\dot{\epsilon}_{ij}$, da temperatura, entre outras denominadas relações constitutivas do material [16,20].

Quando se está considerando a deformação de um determinado material a partir de uma tensão suficientemente baixa é perceptível, que para todos os sólidos, deixa de existir deformação se a tensão aplicada é retirada. Este processo de deformação reversível caracteriza o que se chama de regime elástico. Para a maioria dos materiais observa-se que a deformação é proporcional à tensão aplicada, assim denota-se este comportamento como elástico linear. Existem, nos sólidos, algumas exceções a este comportamento, tais como polímeros dúcteis e elastômeros [20,17].

4.7 Módulo de rigidez.

Na equação $\sigma = E\epsilon$, a constante E é a propriedade intrínseca do material de responder à ação de uma tensão normal aplicada na direção da força e é denominada Módulo de Elasticidade, Módulo de Young ou Módulo de Rigidez (*Stiffness modulus*). Schon não recomenda o uso da denominação módulo de elasticidade, argumentando que esta denominação pode levar a uma interpretação errônea desta constante [12].

O módulo de rigidez é uma propriedade intrínseca do material. Por análise dimensional, conclui-se que o módulo de rigidez tem unidades de força por área, ou seja $[E] = \frac{N}{m^2} \equiv Pa$ (*Pascal*). O módulo de rigidez assume valores típicos aproximadamente entre 10GPa e 600GPa para materiais metálicos [12,13]

O inverso do módulo de rigidez é conhecido como módulo de flexibilidade e denota-se pela letra $S \equiv E^{-1}$. Esta constante indica o quanto o material é capaz de ceder em deformação quando sob ação de uma tensão, denominada por uma palavra em inglês *compliance*, e é utilizada para descrever a deformação que o material pode sofrer [24]

5 TENSÃO RESIDUAL.

A tensão residual é inerente aos corpos físicos existentes, nele permanecendo ainda após a retirada das forças externas aplicadas. Resultado dos diversos processos sofridos pelo material durante sua conformação (laminação, fundição, tratamentos térmicos, usinagem, polimento, corte, etc.).

5.1 Natureza da tensão residual

As tensões residuais podem também ser inseridas durante a operação de componente ou estrutura por sobrecargas ocasionais, processos de montagem, etc. Estas tensões podem ser prejudiciais dependendo do comportamento mecânico do material durante sua utilização. Em geral, tensões trativas na superfície do material tende a ser prejudicial e são apontadas como principais agentes de fadiga. As tensões compressivas na superfície são geralmente benéficas, contribuindo para o aumento de resistência a fadiga [36]. A definição mais simples dada a tensão residual é que a mesma tensão ainda permanece em parte como deformação, ainda que todas as forças tenham sido removidas.

Mais especificamente a tensão deve ser não-uniforme através de uma secção do material resultando em aumento da tensão residual [29,35].

5.2 Análise experimental de tensão residual

Dos mecanismos de análise de tensão residual o mais usual são as técnicas experimentais para medir a deformação sofrida pelo componente [37]. Nas técnicas experimentais observa-se os fatores de relaxamento das tensões residuais. Um fator facilitador é o da variação da temperatura, que age como fonte ou sorvedouro de energia na movimentação na estrutura cristalina. Esta movimentação atômica fica restrita pela movimentação das discordâncias [18]. O tratamento térmico por si induz tensão residual como resultado do fenômeno de transformações térmicas, ao mesmo tempo em que altera a precipitação de fases secundárias em parte pode desenvolver discordâncias, induzindo outras componentes de tensões no sistema [38,35].

Para se obter uma análise com acurácia e representatividade é necessário ater-se às práticas indicadas para cada procedimento experimental procurando minimizar as medições com possíveis desvios e erros experimentais. Na prática, ao instrumentar um corpo de prova, observa-se posições e localidades de difícil acesso para instrumentação onde geralmente haverá ocorrência de concentração de tensão residual, tais como reentrâncias e diversas formas de descontinuidades superficiais e volumétricas. Além destes cuidados, na avaliação de risco no uso das técnicas de engenharia, considera-se o efeito de possíveis desvios tais como imprecisão e tolerância na instrumentação com, sobreposição nas medições, procedimento e metodologia na análise de dados. Isto implica diretamente na confiabilidade dos resultados obtidos [9,35].

6 MODELAGEM MATEMÁTICA EM ELEMENTOS FINITOS.

O processo de transcrição de modelo físico para modelamento computacional necessita da transformação de meios contínuos e não lineares em meios discretizados, passando por simplificações e aproximações que permitam ser codificados em linguagem computacional. Os critérios de separação de variáveis e estrutura orgânica do sistema podem ser melhor compreendidos através do seguinte fluxograma [2,4,35].

Figura 11 – Fluxograma do ciclo básico de sistema FEA [40].

6.1 Elemento infinitesimal de volume

Pretende-se chegar a um limite espacial mínimo, ainda discretizado, onde a deformação principal possa ser determinada. Isto deverá ser solucionado em algumas etapas possíveis, a saber; Primeira etapa, a relação entre tensão principal e deformação principal acoplada. As equações serão diretamente utilizadas somente se a direção da tensão principal for conhecida, nesta condição a deformação, na mesma direção, poderá ser medida [4]. Usualmente o círculo de Mohr é uma ferramenta analítica prática para esta finalidade [39].

A transição do real contínuo para o modelo discretizado necessita da geração de um elemento infinitesimal de volume, o qual mantenha as propriedades básicas desejáveis do objeto simulado. O sistema computacional torna-se viável pelo balanceamento entre o ente matemático e o elemento de

superfície que carregará consigo as propriedades do objeto contínuo. A Fig 12, mostra a discretização do ente círculo geométrico contínuo em elementos geométricos finitos e discretos superficiais (S_i) que associados permitem uma boa aproximação do ente real [5] [4].

Figura 12 – Elemento infinitesimal S_i [3].

O ente geométrico que proporciona melhor aproximação do ente real é aquele que permite uma melhor representação por conjunto mínimo de unidades denominadas nós. Ao aproximarmos por representação para área de um círculo, estaremos discretizando este círculo por áreas S_i de triângulos, onde a função $S_i = \frac{1}{2}R^2 \sin\theta$ define cada elemento finito de área do círculo. A aproximação da área total do círculo é dada por $S_n = \sum_{i=1}^N S_i = \frac{1}{2}R^2 N \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)\theta$, onde R^2 estará como número de elementos participantes da representação (N), tendendo a infinito na exaustão para representar o ente contínuo. Para a modelagem matemática, não importa a complexidade de um objeto, o objeto poderá ser representado geometricamente por um grupo de peças (elementos) [2,3,40].

6.2 Ação de campo de tensão sobre o elemento de volume

Em situações normais, entretanto, a informação da tensão principal não estará disponível, sendo necessário determinar a orientação do plano principal;

Na etapa seguinte, será necessário anotar uma relação genérica entre a deformação medida em uma dada direção e o valor encontrado em outra direção. Este procedimento possibilitará encontrar a direção para a qual a deformação terá valor máximo (valor de deformação principal). Assim com a

informação de deformação principal, poderá ser computado o valor de deformação gerado em qualquer direção. Procedendo como na etapa inicial, dado como exemplo, para determinar a relação entre a tensão principal e a deformação principal acoplada, tem-se uma figura de uma unidade cúbica de volume de material sujeita às forças tensoras acoplada na direção do eixo x, somente (Fig.13). No caso de deformação somente na direção do eixo x teremos σ_x/E e na direção dos eixos y e z teremos, $-\mu(\sigma_x/E)$. Repetindo o procedimento para as forças aplicadas somente na direção do eixo y, obteremos como resultado ϵ_y igual a σ_y/E e as componentes ϵ_x e ϵ_z iguais a $-\mu(\sigma_y/E)$. Tratando de maneira similar, as forças atuantes somente na direção do eixo z e a deformação ocorrendo na mesma direção, teremos σ_z/E e as componentes x e y iguais a $-\mu(\sigma_z/E)$ [13,14,20]

Figura 13 – Deformação por unidade cúbica de volume em tensão uniaxial [20].

Se todas as três forças são aplicadas simultaneamente, a deformação em qualquer direção poderá ser encontrada simplesmente adicionando algebricamente os valores obtidos para cada força, que está atuando separadamente. Assim tem-se,

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu\sigma_y}{E} - \frac{\mu\sigma_z}{E}, \quad \text{Equação 51}$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu\sigma_z}{E} - \frac{\mu\sigma_x}{E}, \quad \text{Equação 52}$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu\sigma_x}{E} - \frac{\mu\sigma_y}{E} \quad \text{Equação 53}$$

Se não houver tensão por cisalhamento agindo nos planos x, y, e z, a tensão e a deformação serão tensão e deformação principais. No caso do plano de duas dimensões, deformação, σ_z inicia em zero dentre as equações acima. Agora rescrevendo as equações para obter a tensão em termos de tensão principal fica-se com,

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_x + \mu\epsilon_y) \quad \text{Equação 54}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_y + \mu\epsilon_x) \quad \text{Equação 55}$$

Estas equações demonstram que σ_x é uma função de ϵ_y e ϵ_z . A mesma condição está garantida para σ_y . Assim mesmo que a tensão principal seja conhecida, então a deformação principal poderá ser medida nestas direções, ambas as deformações podem ser medidas para determinar uma ou ambas as tensões principais [13,20].

Frequentemente, entretanto, a direção da tensão principal é desconhecida, indicando que deve ser encontrada através da deformação principal em termos de deformação em qualquer direção, encontrando as relações geométricas existentes entre a deformação principal e a deformação em uma direção arbitrária.

6.3 Simulação computacional e o uso de elementos finitos (FEA).

Em uma simulação de deformação por modelagem de elementos finitos, utilizamos para a construção de um elemento infinitesimal de área ou volume algumas formas (arestas) geométricas básicas (triângulos, quadrados). A técnica de modelagem por elementos finitos consiste basicamente de dividir uma estrutura em elementos (elementos de nós e descrever o comportamento físico de cada elemento) [3,40].

Executar o agrupamento dos elementos para que os nós façam um sistema semelhante a toda estrutura real, resolver o sistema de equações que contém dados de comportamento conhecido (deslocamentos) e que inferirá sobre o valor que se deseja conhecer para cada nó (deformações, tensão e fadiga).

6.4 Programação e simulação computacional

Uma evolução dos cálculos apresentados no item anterior é necessária para podermos adquirir o conceito sobre modelagem por elementos finitos. Os elementos finitos são em última análise o menor elemento de superfície ou volume possível de ser discretizado em uma matriz, com seus representativos elementos de volume (∂x , ∂y e ∂z), onde todos os elementos contêm as propriedades mínimas que se deseja simular no modelo. Quando se deseja analisar fenômenos e propriedades em contornos de formas mais complexas é necessário sistematizar nós de malha compostos por mais de uma forma geométrica (Fig.14a, 14b e 14c).

Figura 14a – Elementos infinitesimal de volume que compõe malhas de FEA

Figura 14b – Elementos infinitesimal que compõe malhas de FEA

Figura 14c – Elemento infinitesimal geométrico que compõe malhas de FEA

6.5 Modelagem dinâmica e simulação de volume de um corpo.

O conceito de elemento de superfície e de volume faz parte do princípio da modelagem por elementos finitos. A modelagem baseia-se no ferramental matemático fornecido por equações diferenciais e integrais para operar os fenômenos físicos em meios contínuos tratando suas condições de contorno. O limite de integração, ou domínio da função, é o que determina o tamanho de cada unidade ou elemento finito. A esse limite ou divisão do domínio dá-se o nome de malha que é composto de arestas (faces) e de nós (pontos de intersecção das arestas) [1,3,5].

O uso de tratamento matemático possibilita operar dentro do universo contínuo (problemas não-lineares), utilizando-se de aproximações infinitesimais de elementos discretos (nós de malha FEA), através das variáveis dos parâmetros nodais α_j . Nestes elementos infinitesimais, são tratadas as propriedades geométricas e físicas, as quais sendo discretizadas e particularizadas, obedecendo-se o objetivo do modelo, por características primárias, secundárias e demais se houver necessidade [1,3].

$$u = \sum_{j=1}^m \alpha_j \varphi_j \quad \text{Equação 56}$$

Cada elemento de volume representado por um somatório de funções de forma φ_j e carrega as propriedades intrínsecas ao elemento material (dimensões, características microestrutural, campos de tensão, temperatura,

etc). Cada setor do componente modelado estará sendo representado por uma ou mais função aproximadora u fazendo a melhor correspondência entre o conjunto virtual e o conjunto real. Desta maneira, a função aproximadora dará ao modelo uma previsão muito bem ajustada do comportamento real. Estes elementos infinitesimais de área ou volume são processados por um sistema computacional onde ocorre o somatório de todas as funções u , por onde o programa computacional irá oferecer uma virtualização sistêmica de funcionamento do componente em projeto [1].

O programa fornece como saída, uma imagem digital que é composta de uma grande quantidade de nós de malha (menor elemento de imagem que carrega as propriedades de materiais). O limite para a definição da imagem é o refinamento de malha. O refinamento de malha implica no aumento de quantidade de funções $u = \sum_{j=1}^m \alpha_j \varphi_j$ para um mesmo volume unitário, dado $\partial V = (\partial x, \partial y, \partial z)$ [3,5,40].

O resultado final de maior número de funções u no somatório, por unidade volume é o aumento do refino de malha, que corresponde ao aumento da definição total da imagem FEA (Fig.15b) e consequentemente uma precisão relativa de localização dos pontos críticos. O maior refino de malha implica numa maior aproximação representativa possível do fenômeno físico real. A roda em operação estará sujeita a forças externas (tração, torque, momento e vínculos) (Fig.15a) e forças internas de tensão residual (Fig.15b). Contudo o modelamento matemático mais refinado exige do sistema maior capacidade computacional. A limitação será a capacidade de processamento, pois a composição de uma mesma imagem com um número significativamente maior de nós de malha impactará negativamente no tempo de resposta do computador para a composição desta imagem.

O uso de modelagem por elementos finitos para fabricação de rodas entre outros componentes tem sido apresentado como importante ferramentas de projeto de qualidade, porem são necessários testes de validação [41]. Dependendo do projeto da roda e sua aplicação, deve-se incluir ensaios experimentais que investigue tensão, tensão residual, tensão radial dinâmica e testes de impacto [2,14]. Como resultado, nos dados estatísticos de fabricantes

de rodas ocorrem muitas falhas por fadiga durante os três testes que estão normalmente relacionados com a tensão local [42].

Figuras 15(a) Estado de tensão da roda

15(b) Tensão obtida por modelagem

6.6 Análise por Elementos Finitos FEA (Finite Element Analysis).

A modelagem matemática e estatística é uma técnica numérica computacional, onde busca se encontrar soluções por derivadas parciais e integrações em funções e polinômios de aproximação. A integração com sistemas de interface gráfica permite aos cientistas e engenheiros aperfeiçoar desenvolvimentos de projetos e pesquisas com inovações, e capacidade de interação do sistema que permitem aos usuários manter o foco nos desenvolvimentos do projeto, usando dos benefícios originados pela computação de alto desempenho [3,10].

Ferramentas como o MATLAB e Mathematica estão sendo utilizadas em computadores pessoais como sistemas de desenvolvimento interativo e proporcionam algoritmos de reparo. Entretanto, o tamanho e complexidade dos problemas a serem analisados são limitados pela capacidade de processamento e memória de computadores. Em algumas situações específicas, ainda é necessário que o usuário faça uso de outras ferramentas, gastando horas em desenvolvimento de algoritmos em aplicativos do tipo C, C++, Fortran e MPI para conseguirem obter vantagens sobre a capacidade de processamento destes computadores.

A seguir estão listadas algumas das vantagens obtidas pelo uso das ferramentas de análise por computador [1,5,43].

- Sensível redução de tempo em desenvolvimento e prototipagem.
- Significativo aumento de qualidade do projeto com o incremento no refino dos algoritmos.
- Incremento da capacidade de modelagem e complexidade dos algoritmos.

- Redução na necessidade de especialização em programas de alto desempenho computacional.
- Redução no tempo total de disponibilidade para comercialização de novos projetos

Adicionalmente, sistemas de computadores para desenvolvimento, projeto, análise e integração com a produção (CAD, CAM, FEA, etc.) além de aperfeiçoarem a capacidade de processamento das arquiteturas monoprocessadas com plataforma x86, estão rodando em arquitetura cluster e servidores SGI® Altix® XE, que entregam maior desempenho e permitem flexibilidade de configuração de suas plataformas melhorando o custo efetivo das soluções com facilidade de desenvolvimento [44].

7 EXTENSOMETRIA.

A extensometria é um conjunto de técnicas que envolvem instrumentação e cálculo para medir as deformações ocorridas em corpos ou estruturas. As medidas obtidas das deformações se prestam à obter, indiretamente através de cálculos, tensões mecânicas que se originam dos processos de fabricação e conformação (térmicos, mecânicos, etc.) [39,3].

Quando a direção da tensão principal é desconhecida e não se tem evidências sobre a orientação do plano principal para um local onde o extensômetro possa ser posicionado é necessário expressar a deformação principal em termos de deformações em qualquer direção no plano. Isto pode ser conseguido observando as relações geométricas existente entre a deformação principal e a deformação em um ponto de direção arbitrária qualquer [36].

Na Fig.16, tem-se a representação de um extensômetro aplicado na direção OB fazendo um ângulo φ com o eixo X ao longo do qual se tem uma deformação ϵ_x . Pela geometria considerada por Poisson, neste ponto, não haverá introdução de deformação na direção do eixo Y.

Figura 16 - Deformação na direção do eixo X [23].

Após ocorrer deformação na direção do eixo X, considerado o segmento OA como sofrendo alongamento de tamanho δx sendo o novo valor OA', deve ocorrer deformação igual no extensômetro, que tem comprimento original l e agora está deformado cobrindo a posição OB' após uma deformação δl . Como resultado, tem-se uma deformação na direção do eixo X de $\epsilon_x = \frac{\delta x}{x}$, sendo que no extensômetro, tem-se $\epsilon_\varphi = \frac{\delta l}{l}$, assim sendo $l = \frac{x}{\cos \varphi}$ e $\delta l = \delta x \cos \varphi$ daí pode-se deduzir que $\epsilon_\varphi = \frac{\delta x \cos^2 \varphi}{x} = \epsilon_x \cos^2 \varphi$ [45].

Ao aplicar a deformação na direção do eixo Y, conforme ilustrado na Fig.17, que tem geometria análoga à Figura 16, com ϵ_y e a nova relação de deformação entre δy e ϵ_φ que será medida pelo extensômetro e podendo ser obtida como sendo de ângulo $90 - \varphi$, sendo que, as demais condições permanecem idênticas às realizadas para o caso da relação entre ϵ_x e ϵ_φ . Ao substituirmos $90 - \varphi$, ao invés de usar-se somente φ , passa-se a ter a equação:

$$\epsilon_\varphi = \epsilon_y \cos^2(90 - \varphi) = \epsilon_y \sin^2 \varphi. \quad \text{Equação 57}$$

Figura 17 - Deformação na direção do eixo X [26].

Para completar os cálculos da deformação no extensômetro, devemos fazer a indicação de cisalhamento γ_{xy} , supondo aplicada à superfície onde o extensômetro estará montado. Como ilustra a Fig.67, após aplicação da deformação por cisalhamento γ_{xy} , o extensômetro estará sobre a linha OB'e seu alongamento será de quantia δl .

Figura 18 - Deformação por cisalhamento [26]

Assim a deformação real, ocorrida no extensômetro pode ser encontrada calculando $\epsilon_{\phi} = \frac{\delta l}{l}$, porém $l = \frac{y}{\sin \phi}$ e $\delta l = \delta x \cos \phi$, daí deduzimos que $\delta x = y \tan \gamma_{xy}$, como $\delta x \cong y \gamma_{xy}$, então $\delta l = y \gamma_{xy} \cos \phi$, assim tem-se;

$$\epsilon_{\phi} = \frac{y \gamma_{xy} \cos \phi}{y / (\sin \phi)} \quad \epsilon_{\phi} = \gamma_{xy} \sin \phi \cos \phi$$

Equação 58

Agora, caso ocorra deformação ϵ_x, ϵ_y e γ_{xy} simultaneamente, o extensômetro irá reproduzir uma soma algébrica das deformações, resultando em;

$$\epsilon_\varphi = \epsilon_x \cos^2 \varphi + \epsilon_y \sin^2 \varphi + \gamma_{xy} \sin \varphi \cos \varphi \quad \text{Equação 59}$$

Esta equação demonstra que a deformação ϵ_φ , medida pelo extensômetro, é uma função de deformação por cisalhamento γ_{xy} , como também há deformação normal ϵ_x e ϵ_y . Agora se escrevendo a equação 60 em termos do dobro do ângulo, ou seja, 2φ , obtém-se;

$$\epsilon_\varphi = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\varphi + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi \quad \text{Equação 60}$$

Desde que ϵ_φ pode ser medido por extensômetro, as deformações em qualquer direção escolhida, x ou y , poderão ser determinadas. Nas equações de 61 a 63 existem três deformações desconhecidas ϵ_x, ϵ_y e γ_{xy} e existem três deformações desejadas ϵ_1, ϵ_2 e ϵ_3 . Para se obter o estado de tensão utiliza-se de 3 extensômetros para coletar as deformações ocorrida em quaisquer direção. Estas deformações podem ser medidas por três linhas que fazem ângulos φ_1, φ_2 e φ_3 , com, por escolha, eixo X, assim tem-se;

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\varphi_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_1 \quad \text{Equação 61}$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\varphi_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_2 \quad \text{Equação 62}$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\varphi_3 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi_3 \quad \text{Equação 63}$$

Agora se tem três deformações desconhecidas e três equações com as quais se pode resolver ϵ_x, ϵ_y e γ_{xy} .

7.1 Técnicas de extensometria

A técnica de ensaios experimentais por extensometria vem sendo desenvolvida durante os últimos 70 anos com avanços significativos decorrente das demais áreas científicas onde materiais, dispositivos eletrônicos e sistemas computacionais agregaram precisão e eficácia aos ensaios.

7.1.1 Dispositivos mecânicos

No princípio as medidas de deformação eram feitas com equipamentos mecânicos que utilizavam parafusos com passos de rosca micrométricos para que se pudessem medir as deformações totais sofridas pelo corpo. Como resultado as deformações medidas envolviam grandes dificuldades e pouca precisão em seus valores. Havia então a necessidade de ser utilizado um fator de segurança durante o cálculo da tensão.

Certamente o equipamento de medição deveria ser fabricado de um material mais duro do que o material ao qual ele seria aplicado para medir a deformação, isto porque não se poderia admitir que o sistema de medição entrasse no regime de deformação.

7.1.2 Dispositivos elétricos

Os dispositivos mecânicos apresentavam muitos problemas de exatidão nas medidas e grandes dificuldades de aplicação e instalação para o sistema. Os dispositivos elétricos foram construídos com as características elétricas do material utilizado, dentro da faixa de valores onde estes dispositivos apresentavam linearidade entre valores de resistência elétrica e estabelece uma correlação com as curvas de deformação elástica do corpo sob análise.

Os extensômetros resistivos apresentam grande facilidade de aplicação e boa resolução de medida. Para tornar mais prático os ensaios e as medições de micro deformações foram criado com o uso de três extensômetros resistivos um conjunto denominado Roseta, que possui a geometria apropriada para medir deformação normal e de cisalhamento.

Os cálculos são efetuados conforme demonstrado abaixo e utilizam como parâmetro o raio do extensômetro (diâmetro) da roseta [22,23].

$$r = \frac{R}{R_0}; \text{ para } (R \geq R_0)$$

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r'' - \sigma_r'$$

$$\Delta\theta_r = \theta_r'' - \theta_r'$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}'' - \tau_{r\theta}'$$

$$\sigma_x = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \varepsilon_x} ; \quad \sigma_y = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \varepsilon_y} ;$$

$$\sigma_z = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \varepsilon_z} ; \quad \tau_{xy} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \nu_{xy}}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] = \sigma_x(A + B \cos 2\alpha) \quad \text{Equação 64}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] = \sigma_\theta(-A + C \cos 2\alpha) \quad \text{Equação 65}$$

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right); \quad B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{(1+\nu)} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right]; \quad C = \frac{1+\nu}{2E} \left[-\left(\frac{4\nu}{(1+\nu)} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right]$$

$$\varepsilon_r^\nu = \sigma_y(A - B \cos 2\alpha); \quad \varepsilon_r^\nu = \sigma_x(A + B \cos 2\alpha)$$

$$\varepsilon_r = \sigma_x(A + B \cos 2\alpha) + \sigma_y(A - B \cos 2\alpha) \Rightarrow A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha$$

Para

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \Rightarrow \begin{cases} \sigma_{\text{máx}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_2 - 2\varepsilon_2)^2} \\ \sigma_{\text{mín}} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \end{cases} \quad \text{Equação 66}$$

7.2 Difração de raios-X (DRX)

A difração de raios-X é, em medidas de tensão residual, uma técnica que complementa o estudo experimental às anteriores mencionadas. Como técnica que permite o estudo da tensão residual superficial, porque seus valores de profundidade são extremamente superficiais, não sendo considerado elementos de volume. Sua análise quantitativa é possível utilizando o método de Rietveld [46]. Na técnica de raios-X, as condições do fluxo refletido bem como a energia ($E = h\lambda$) do feixe podem variar de em razão da distância entre os planos

cristalinos [28]. O comprimento de onda será alterado em função da distância, sendo mantido dentro entre valores conhecidos, pois o procedimento de medida leva em consideração a lei da difração de Bragg: ($n\lambda = 2\sin\theta$) [46,28].

7.3 Difração de nêutrons

A medida da deformação utilizando feixe de nêutrons não é uma técnica usualmente disponível por tratar-se de equipamento de uso restrito do qual a fonte de radiação pode ser de AmBe, porém mais comumente obtida de um reator nuclear de pesquisa. A difração de nêutrons é, em medidas de tensão residual, uma técnica complementar às anteriores mencionadas. Por ser a técnica que permite o estudo em elementos de volume, diferenciando dos demais que estão limitados ao estudo do estado superficial de tensão. Também é possível a análise quantitativa de fases utilizando o método de Rietveld [46,39]. No uso da técnica de nêutrons, as condições de fluxo e energia ($E = h\lambda$) do feixe podem variar de caso-a-caso em razão da sua fonte. De reator para reator, o fluxo é mantido dentro entre valores conhecidos pois o procedimento de medida leva em consideração a lei da difração de Bragg: ($n\lambda = 2\sin\theta$). A natureza apresenta o princípio da dualidade explicado pela física quântica, o que implica em dizer que a matéria pode ser observada ora como onda ora como partícula. Durante o tempo de voo o nêutron é estudado como partícula porém no processo de interação com a matéria estuda-se seu comportamento ondulatório que é primariamente utilizado quando aplicado ao fenômeno da difração em nêutrons permitindo o uso da lei de Bragg no estudo da interação física do nêutron com os planos cristalinos presentes em uma amostra policristalina [28,46].

O equipamento experimental disponível para estes ensaios é o difratômetro de nêutrons do IPEN-CNEN/SP, equipado com detector sensível à posição (PSD), e computadores para análise dos dados.

7.4 Dispositivos extensômetros (*strain gage*).

Os dispositivos extensômetros são utilizados para obter indiretamente o valor de tensão de um corpo, medindo as deformações que nele ocorrem. As características de resistividade elétrica, que obedecem à lei de ohm, $V = R \cdot I$, portando uma relação linear, foi também utilizada para correlacionar outros

fenômenos da natureza regidos total ou parcialmente por funções lineares. Dentre estes fenômenos estão a lei de Hooke que obedece a função linear, $\sigma = \varepsilon E$, a qual relaciona, como visto, a tensão como produto da deformação pelo módulo de elasticidade de um dado material [2,45].

Utilizando a correlação de propriedades e suas funções representativas obtém-se um componente eletrônico que permite atender a possibilidade de medir micro deformações quando ocorrem no regime elástico (características de linearidade). Lembrando que o comportamento resistivo de um fio é governado pela equação $R = \rho L/A$ na qual A é a secção de área do fio, se aplicarmos uma força que provoque o estiramento ou o encurtamento do fio, sua secção transversal (área) irá alterar proporcionalmente L/A , e ρ é uma constante por ser a propriedade do material que compões o fio e por isso não se altera [13]. Embora exista uma transferência direta e linear da deformação sofrida pelo corpo ao extensômetro, essa variação é muito pequena (ordem de $10^{-2}\Omega$) sendo impossível de ser medida com um ohmímetro convencional. Um circuito auxiliar deve ser acoplado ao extensômetro para amplificar e tratar o sinal, tornando possível de ser lido pelos instrumentos sensores [38].

Analogamente o extensômetro pode ser entendido como um segmento de fio, colado, perfeitamente aderido, sobre uma placa plana de qualquer metal, estando sujeito a ação de uma força externa que lhe impõe uma pequena tração dentro dos limites de deformação elástica (linearidade). O fio rigidamente colado sobre a superfície da placa irá sofrer a mesma tração e deformação da placa, quando sob ação da força externa que atua no metal. Esta deformação irá alterar o comprimento e a secção de área do fio, alterando sua resistividade em igual proporção. Ao associarmos a este fio uma fonte, e um milivoltímetro, obtém-se uma variação de tensão elétrica que será proporcional à variação da deformação sofrida pela placa, permitindo assim medir o micro deformações. O componente extensômetro é um filme fino montado e conformado como serpentina que recebe um substrato e uma base de material isolante, formando um sanduiche (Fig. 19) [8,22].

Figura 19 - Composição em camadas e vista superficial do dispositivo *strain gage*

Um único extensômetro pode oferecer a medida das deformações que estiverem ocorrendo orientadas paralelas ao seu alinhamento. As deformações transversais, que variem de ângulo $0^\circ < \theta < 90^\circ$ não estarão sendo corretamente medidas necessitando de ajustes. Porém estes ajustes só poderiam ser realizados se houvesse como identificar o vetor de ação da deformação principal [37].

7.5 Tipos de extensômetros

No estudo das tensões residuais, na existência de casos onde a deformação principal não é conhecida tampouco a ação das forças utiliza-se uma configuração geométrica específica na instalação de extensômetros, a qual, combinada com o critério do ciclo de Mohr, pode-se medir a deformação média ocorrida no local. Nesta geometria três extensômetros são montados a partir de um eixo de orientação, posicionados a 60° e 90° (Fig. 20) denominado configuração tipo roseta (*strain gages rosetta*). Os três extensômetros são montados em um único dispositivo, do qual se pode extrair a média da deformação local ocorrida sob a área coberta pelo extensômetro [22]. As rosetas são construídas, em geral por três extensômetros de grades resistivas orientadas e equidistantes do centro do dispositivo. Sua disposição geométrica particular serve para medir a deformação média que ocorre quando um furo cego, com profundidade da ordem de $5,0 \mu\text{m}$ a $15,0 \mu\text{m}$ é feito no centro do dispositivo. Este furo, que promove o relaxamento da tensão residual superficial, ocorrendo deformação sob os extensores da roseta. A deformação é proporcional a tensão residual média existente sob o local ao qual a roseta está aplicada.

Figura 20- Dispositivo contendo três extensômetros tipo roseta 90° para furo

7.6 Ponte de Wheatstone

O princípio da ponte de Wheatstone (Fig. 21) é utilizado para obter a variação de corrente que representará a deformação ocorrida no extensômetro. Neste caso a ponte de Wheatstone estará configurada como um circuito eletrônico em série, fechado, composto geralmente, por três resistores de valores idênticos conectados ao extensômetro operando como um quarto resistor de valor variável. Quando o extensômetro está com valor idêntico aos demais, a diferença de potencial será nula entre dois de seus terminais de leitura de corrente, por simetria, opostos aos de alimentação do circuito da ponte. Caso o extensômetro registre algum deslocamento ou deformação no corpo de prova seu valor de resistividade irá variar alterando o equilíbrio na ponte resultando em diferença de potencial nos seus terminais de leitura [38].

A ocorrência de uma deformação por tração provoca um alongamento na superfície do corpo de prova resultando indiretamente em um aumento da resistência elétrica nos terminais do extensômetro. Na ocorrência de uma deformação de compressão do corpo ao qual o extensômetro está acoplado será acompanhada de uma redução da resistência elétrica nos terminais do extensômetro. Utilizando um circuito elétrico fechado em ponte com diferença de potencial constante, onde observa-se que um aumento de resistência provoca uma redução de corrente pelo circuito indicando que o corpo está sob ação de forças de tração. Assim aplica-se a lei de Ohm ($U= Ri$) para obter o valor da corrente que irá representar indiretamente a variação dimensional sofrida pelo corpo.

A ponte de Wheatstone tem excelente sensibilidade sendo capaz de medir com acurácia pequenas variações de resistência usualmente na ordem de 10^{-4} até $10^{-2} \Omega/\Omega$.

Figura 21 – Diagrama elétrico para a ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone permite configurar mais que um extensômetro no circuito, podendo ser utilizada as quatro posições ocupadas com extensômetros. Quando a ponte de Wheatstone estiver assim configurado o dispositivo criado recebe o nome de ponte de Wheatstone completa (*full-bridge*). É comum o uso de dispositivos compostos por três extensômetros em um mesmo módulo. Neste dispositivo obtemos simultaneamente três leituras da deformação ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$), e pelo uso da fórmula;

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad \text{Equação 67}$$

fornecendo a tensão principal de σ_1 e σ_2 . Sua vantagem em relação a montagem experimental com extensômetros individuais é que são projetados para facilitar a medição e orientação das deformações primárias e uso pelo processo de furação (*hole drilling*) [7,9,38]. Os valores das variações individuais em um estado biaxial de tensão superficial facilitam o cálculo, determinando o tensor pelo uso do círculo de tensão de Mohr [22].

7.7 Aplicação da extensometria.

Muitas são as variáveis experimentais de aquisição de dados a serem observadas não só antes, mas durante o ensaio. Dentre tais variáveis a correta aplicação dos extensômetros estão; limpeza superficial, marcação longitudinal ao eixo de máxima deformação, escolha, preparo e adesivagem dos extensômetros, soldagem adequada, perfeita isolação elétrica, balanceamento de impedâncias da fiação de conexão, aferição e ajuste de zero da instrumentação, processo estatístico de medição dos valores e tratamento de erros e a geometria do local a ser instrumentado [22,46].

7.8 Aquisição de dados em extensometria

O procedimento de aquisição de dados em extensometria necessita de um sistema de instrumentação composto basicamente por três grupos de elementos; 1 - sensores (extensômetros, terminais e cabeamento); 2 - Equipamento de conversão e aquisição de sinal (ponte de Wheatstone e amplificadores de ganho de sinal); 3 - Equipamento ou sistema de computação para compilação de dados e gráficos (computador e programa aplicativo).

7.9 Análise da tensão residual nos pontos críticos

Alumínio é um dos metais mais utilizados em fundição devido à sua baixa temperatura de fusão e baixo peso e apresenta. Ligas de alumínio com silício são as ligas mais comuns de serem encontradas em processos de fundição. As ligas de alumínio com silício tem grande fluidez transmitida para grandes volumes pela presença do silício no alumínio eutético (AlSi), o que resulta em boa fusibilidade e soldabilidade [34,47]. Outras vantagens, são um coeficiente de expansão térmico baixo, controlado pelo baixo teor de silício e provendo uma alta resistência à corrosão [25,34]. Em alumínio o elemento de ligas silício, é adicionado para aumentar sua resistência à fadiga, porem ainda é relativamente baixa. Modificado por tratamento térmico (envelhecimento) o silício adicionado altera a microestrutura da liga ajustando as características mecânicas da liga às necessidades tecnológicas. Os valores normalmente encontrados de resistência mecânica são da ordem de 50-70 MPa [34,38].

As ligas AlSi apresentam excelentes propriedades mecânicas após os tratamentos térmicos. Desta forma, se busca novas ligas de AlSi, fazendo-se introdução de elementos substitucionais (Cu e Mg), pois de acordo com a

literatura esses elementos alteram as propriedades mecânicas da liga. Como exemplo, tem-se as ligas AlSiMg, onde pequenas quantidades de Mg induzem um maior endurecimento da liga, satisfazendo algumas propriedades de aplicação na área automotiva e aeronáutica [35, 37].

No projeto em FEA de rodas, Fig. 22a, pode-se observar a coluna de gradiente de cores à direita da figura, indicando os respectivos valores de tensão residual. Os maiores valores representativos da tensão residual, também indicam, indiretamente, os pontos de máximos das tensões residuais que a modelagem matemática calculou durante a simulação FEA [41]. A extensometria utilizou dessa indicação, Fig. 22b, para instalar os extensômetros localizando-os na região de interesse (pontos de máximo), onde o valor de tensão residual tomado pela instrumentação foi utilizado para comparar com os resultados indicados por elementos finitos [3,8]. As possíveis diferenças encontradas, tiveram significado expressivo para análise de resultados. Se o valor obtido pela extensometria estiver próximo aos valores indicados pela simulação FEA (130 ~ 175 MPa), pode-se repetir os ensaios algumas poucas vezes mais para certificar a análise.

Figura 22a – Região crítica indicada pela simulação

Figura 22b – Região crítica instrumentada

No momento da comparação dos valores obtidos destes são muito diferentes e divergem, será necessário um número maior de repetições, aprimorando os ensaios com tratamento estatístico [43]. A mudança no critério de localização dos extensômetros também pode ser relevante para obter-se um valor médio das (deformações) tensões residuais. Após a execução dos novos ensaios, será necessária uma nova comparação com os valores de FEA. Não é mencionado um valor de diferença limite considerado razoável, porém quando estes valores ultrapassar em valores referenciais de propriedades do material será necessário verificar os procedimentos experimentais. Os valores experimentais são, por princípio, mais confiáveis quando comparados aos dados fornecidos por simulação FEA, motivo de serem utilizados para validar as simulações [4,42]. Nota-se que a simulação FEA é resultante de modelagem matemática, obtida por cálculo diferencial integral aplicado a um conjunto de elementos de volume. Os elementos de volume possuem dados das propriedades do componente que se deseja modelar, porém limitados a um número finito de elementos discretos (nós da malha) Um número suficiente de nós é necessário para processar com boa aproximação a representatividade do valor contínuo de uma propriedade física do componente. Para a extensometria, a aquisição de dados é uma amostragem temporal dos valores contínuos do componente [2,3,41].

7.10 Efeitos indesejáveis no método do Furo Cego

Durante os procedimentos de execução de alívio das tensões residuais pela técnica do furo cego pode ocorrer micro regiões de plastificação nas paredes do furo em resposta a um ponto de elevado atrito mecânico entre a ferramenta de fresagem e o material removido. Nestas regiões, os valores de tensão residual podem apresentar valores excessivos, superando os valores do limite de escoamento (*yield stress*). Esta anomalia é denominada efeito plástico no furo cego [8,9,48].

Assumindo um material com característica elástica linear, a tensão residual medida pela técnica do relaxamento e deformação pode apresentar valores para a tensão residual bastante diferentes dos valores esperados em razão do efeito de plastificação ou plasticidade [9,48].

O efeito da plasticidade pode impor erro de medida no método do furo cego quando um material dúctil, a exemplo da liga A356 utilizada na fabricação das rodas de liga leve. A própria realização do procedimento de fresagem na região investigada é razão de concentração de tensão, pois se apresenta uma condição de carregamento local. Uma pequena irregularidade na geometria do furo também pode resultar em distorções na medição das tensões residuais. Sem o efeito da plasticidade, os valores obtidos em qualquer direção biaxial será muito inferior. Importante ressaltar que a grade resistiva dos extensômetros da roseta está muito próximo da região de descontinuidade (borda) onde inicia o contorno do furo, assim a plasticidade não perturba realmente a medida da deformação. Este efeito tem importância somente quando o volume de plastificado dentro do furo for excessivo e o valor obtido para a tensão residual média local poderá eventualmente ser muito superior ao valor especificado como limite de escoamento do material.

Embora os valores medidos possam estar demonstrando uma anomalia, pode-se utiliza-los após o procedimento de correção do efeito da plasticidade [9,48]. Deve-se seguir os três passos para aplicação do procedimento de correção; 1- Executar a medição da tensão residual, assumindo que o material tem característica elástica linear. 2- Calcular o parâmetro de intensidade do efeito de plasticidade. 3- Novamente reprocessar o cálculo das componentes da tensão residual inicialmente encontrada em conjunto com o fator de intensidade da plasticidade. Assim a componente elástica da tensão residual superestimada

devido à alteração na deformação pode ser devidamente compensada, mostrando a tensão residual como medida nas grades da roseta de extensômetros [48].

As equações 68 e 69 mostram ε_x e ε_y para a deformação medida nas grades do extensômetro com o relaxamento.

$$\sigma_{x,el} = -\frac{E(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{2a(1 + \nu)} - \frac{E(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{2b}$$

$$\sigma_{y,el} = -\frac{E(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{2a(1 + \nu)} + \frac{E(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{2b}$$

A componente elástica da tensão é superestimada porque a deformação é muito afetada pelo efeito da plasticidade. O fator de plasticidade “ f ” pode ser definido por cálculo como sendo:

$$f = \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{eq,i}}{\sigma_Y} \quad \text{Equação 70}$$

onde;

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad \text{Equação 71}$$

$$\sigma_{eq,i} = \sigma_Y \frac{\sqrt{1 - \Omega + \Omega^2}}{3 - \Omega} \quad (Kirsch), \quad \text{Equação 72}$$

σ_Y : *Limite de escoamento do material*

A ocorrência de valor negativo para o fator de plasticidade implica na ausência do efeito de plasticidade na totalidade do furo cego. Valores $0 \leq f \leq 1$ implica na existência de algum efeito de plasticidade, onde o valor é o índice de plasticidade, onde obtemos $f = 1$, como valor máximo para o efeito de plasticidade.

Após obter o valor de f poderemos calcular o fator de plasticidade representando a elasticidade linearizada como segue;

$$f_{el} = \frac{\sigma_{eq,el} - \sigma_{eq,i}}{\sigma_Y - \sigma_{eq,i}} \quad \text{Equação 73}$$

Onde;

$$\sigma_{eq,el} = \sqrt{\sigma_{x,el}^2 + \sigma_{y,el}^2 - \sigma_{x,el} \sigma_{y,el}} \quad \text{Equação 74}$$

O fator de plasticidade corrigido deve ser calculado a partir do fator de plasticidade elástica f_{el} que irá representar numericamente a relação encontrada [9,48].

Figura 23 – Fator da plasticidade elástica e fator corrigido de plasticidade [9]

Como o fenômeno fator de plasticidade elástica tem seu gráfico representado por $f_{el} = f + Wf^\mu$, onde o comportamento é representado pelos polinômios ;

$$W = w_1\Omega^3\delta^2 + w_2\Omega^2\delta^2 + w_3\Omega\delta^2 + w_4\delta^2 + w_5\Omega^3\delta + w_6\Omega^2\delta + w_7\Omega\delta + w_8\delta + w_9\Omega^3 + w_{10}\Omega^2 + w_{11}\Omega + w_{12} \quad \text{Equação 75}$$

$$\mu = m_1\Omega^3\delta^2 + m_2\Omega^2\delta^2 + m_3\Omega\delta^2 + m_4\delta^2 + m_5\Omega^3\delta + m_6\Omega^2\delta + m_7\Omega\delta + m_8\delta + m_9\Omega^3 + m_{10}\Omega^2 + m_{11}\Omega + m_{12} \quad \text{Equação 76}$$

a tensão residual corrigida podem ser obtida mesmo quando não temos o fator f as componentes s pelo uso invertido do fator de plasticidade, como segue;

$$\sigma_{eq} = \sigma_{eq.i} + f(\sigma_Y - \sigma_{eq.i}), \quad \sigma_x = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{1-\Omega+\Omega^2}}, \quad \sigma_y = \Omega\sigma_x \quad \text{Equação 77}$$

8 MATERIAIS E MÉTODOS

8.1 Rodas usadas adquiridas no mercado

Inicialmente foram utilizadas rodas adquiridas no mercado, em lojas de comércio, revenda de fabricantes do mercado nacional, instalação e manutenção de rodas. “As rodas adquiridas, nestas condições (Fig. 24), são rodas usadas de liga AlSi (alumínio silício), medindo 13x5”, 4 furos para os parafusos de fixação mecânica ao sistema de eixos, pintadas em tinta epóxi para auxílio na condição da estanqueidade pneumática, pintura resina esmaltada transparente (diamantação) na face externa da roda operando como tratamento de superfície contra corrosão e com tempo de uso de aproximadamente 4 anos, segundo informações da revenda.

Figura 24 – Rodas usadas (a) Face frontal (b) Banda (c) Interna

8.1.1 Rodas novas fornecidas por indústria do setor da mobilidade

Após os primeiros ensaios com rodas usadas, nos quais foi possível aprimorar as técnicas de preparo, aplicação e aquisição de dados por extensometria, foram feitos testes em rodas novas fundidas na liga A356. Estas rodas, retiradas da linha de produção em quatro das principais fases do processo de fabricação; a) como fundido e moldado; b) tratamento térmico; c) usinadas; c) acabamento e pintura. “As características técnicas gerais destas rodas, definidas em projeto, indicam a medida de 17x6”, 6 furos para os parafusos de fixação mecânica ao sistema de eixos. Estas rodas são pintadas em tinta epóxi para auxílio na condição da estanqueidade pneumática, pintura e resina esmaltada transparente (diamantadas) na face externa da roda operando como tratamento de superfície contra corrosão.

As principais etapas no processo de fabricação envolvem potenciais mudanças de temperatura que podem alterar características mecânicas

microestruturais no material na roda. O início da produção é a fusão dos lingotes de alumínio que atendem a especificação A365 em um forno elétrico que pode atingir aproximadamente 700 °C. Nesta etapa são adicionados os elementos de liga (Si, Mg, etc.) na porcentagem em massa necessárias para alteração das propriedades mecânicas da liga, tornando-a ajustada para o projeto. Após a obtenção da solução de liga injetada em baixa pressão nos moldes que conformam o desenho e modelo da roda durante a fase de resfriamento. Desta fase foram retiradas da linha de produção quatro rodas (Fig. 25-d), dentro do critério de amostragem aleatória, para serem ensaiadas experimentalmente para medição da tensão residual.

Na sequência está a etapa de tratamento térmico, especificado por projeto, onde a roda tem sua temperatura bastante elevada (aproximadamente 580 °C) por um determinado intervalo de tempo sobre uma esteira rolante que atravessa um forno resistivo contínuo, sendo resfriada por imersão em líquido à temperatura ambiente. Após esta fase foram retiradas duas amostras (Fig. 25-c) para ensaios de medida da tensão residual. Após o tratamento térmico a roda segue para a fase de usinagem onde equipamentos CNC usinam retirando cerca de 30% em massa de material da roda tratada termicamente. Da retificação das superfícies da roda, retirada de material das regiões de furos para parafusos de fixação, furação para a válvula pneumática e furação central de acoplamento ao sistema de eixo. Este procedimento além da remoção de grande parte do material superficial gera atrito e calor superficial possivelmente alterando as condições de tensão residual. Desta fase foram retiradas duas rodas (Fig. 25-b) para os ensaio de tensão residual.

A próxima etapa da produção é a aplicação da pintura epóxi na parte interna da roda e da aplicação de resina transparente (diamantação) da parte externa visível da roda. Estes procedimentos de pintura que fazem parte do acabamento promovem aumento na estanqueidade pneumática da roda. Por serem procedimentos executados a quente, duas rodas foram utilizadas desta etapa de fabricação (Fig. 25-a) como amostragem para ensaios experimentais objetivando quantificar a tensão residual superficial da roda na fase final (como acabada).

Figura 25 – Preparação das Rodas (a) Acabada; (b) Usinada; (c) Tratada termicamente; (d) Fundida (as casting).

8.2 Metodologia para os ensaios

O método usado nos ensaios experimentais foi a da extensometria e o alívio das tensões locais pela técnica do furo cego [6].

8.2.1 Montagem de uma barra controle

Durante os ensaios experimentais houve a necessidade de se utilizar três conjuntos básicos de equipamentos para fresagem do furo cego e de aquisição de dados. Montou-se uma barra de controle com o objetivo de constituir-se de um elemento de ensaio experimental com um valor de medida padrão que possibilitou calibrar os equipamentos (Fig. 26). Composta de um corpo de prova (CP) do material alumínio aeronáutico A7075, cedido pela EMBRAER, este CP teve, em um dos lados, imposta tensões residuais compressivas pela ação do método shot penning.

No CP utilizado para barra de controle foram feitos ensaios experimentais utilizando duas técnicas, difratometria de raios-X e extensometria. Em extensometria utilizou-se dois equipamentos para fresagem e dois equipamentos para aquisição de dados. Foi realizada uma sequência de ensaios experimentais comparativos alternando-se o uso dos equipamentos.

A medição comparativa entre equipamentos usando a barra controle permitiu a calibração e a verificação de similaridade entre os sistemas e equipamentos que foram utilizados para os ensaios experimentais nas rodas automotivas. Com este valor referencial pode-se avaliar a existência, ou não, de convergência entre os valores obtidos nos ensaios experimentais das rodas, ainda que utilizando equipamentos de diferentes fabricantes.

Para aquisição dos valores de tensão residual na barra controle, foi utilizado um difratômetro de raios-X utilizado foi um SHIMASZU XDR7000, com

software XRD7000 versão 5.21. O relatório de ensaio experimental em “residual stresses” com 30 kva e 30 ma, resultou -601 ± 35 MPa.

Figura 26 – Barra de Controle para ensaios de tensão residual por DRX e extensometria

Nos ensaios de extensometria, utilizou-se dois equipamentos de usinagem. Esperava-se que as diferenças mecânicas entre os equipamentos apresentem-se variações significativas entre os valores médios obtidos nos pontos na fresagem do furo cego na barra de controle. O valor obtido por difração de raios-X serviu como padrão de verificação entre os ensaios por extensometria, que indicou convergência nos dados obtidos.

Foram usados na usinagem do furo cego nos extensômetros da barra de controle um conjunto da Vishay composto pelo equipamento de usinagem pneumático Drill-RS200 (Fig. 27a) e a Trimmer elétrica Ridgid R2401 (Fig. 27b) com adaptações mecânicas nos suportes de fixação e na pinça da ferramenta de fresagem para uso experimental (apêndice B).

Figura 27 a)– Equipamentos de fresagem Vishay RS200.

Figura 27 b) – Equipamentos de fresagem Drimmer RIDGID.

Para eliminar a possibilidade de variações entre medidas foi utilizado um único equipamento para aquisição de dados dos extensômetros nos ensaios com as duas ferramentas de usinagem, o equipamento da Vishay, P3 Strain Indicator and Recorder.

8.2.2 Procedimentos de ensaios

Adotou-se uma padronização nos procedimentos dos ensaios experimentais com uma sequência de operações de intervalos de tempo definido. Definição das características do método; escolha da técnica de alívio das tensões; determinação do local e posicionamento do extensômetro na roda; sistema computacional de análise. Sequência dos procedimentos: limpeza e preparo do local; adesivagem dos extensômetros; soldagem dos terminais dos extensômetros e terminais intermediários; soldagem do cabeamento de conexão; ligação e calibração do equipamento de aquisição de dados.

Escolheu-se o equipamento de aquisição de dados e parâmetros iniciais de calibração de maneira a se obter possibilidade de repetição destes ensaios experimentais, permitindo comparação entre os dados obtidos nos pontos de máximos (maior tensão residual), com dados FEA calculados por modelagem matemática a qualquer momento. Os dados obtidos em ensaios de extensometria necessitam ter um número de repetições que permitam representação estatística mínimas para obtenção de um valor expressivo como média, no caso, das tensões residuais. Desta maneira os ensaios oferecerão

dados experimentais para verificação e corroboração dos dados informados pela simulações FEA.

Das quatro rodas inicialmente recebidas para ensaios, duas foram testadas para observar qualitativamente a ação da tensão residual (compressiva ou de tração). Isto pode ser observado durante e após o corte. A roda, quando sob ação de tensões compressivas, tende a fechar a região de corte, dificultando e eventualmente travando a serra, além de promover certo fechamento no diâmetro da roda no lado RIM da roda. Quando sob tração, em geral, os efeitos se mostram opostos ao anteriormente observado [41].

Ainda, aproveitando o seccionamento destas rodas, foram utilizadas e separadas suas regiões spoke (região entre a batata e aro), para serem feitos ensaios por difração de raios-X, extensometria e extensometria precedida de seccionamento limite. Estes ensaios forneceram dados comparativos entre as técnicas aplicadas.

A identificação das rodas novas retiradas da linha de produção e extensômetros a elas colado foram codificados considerando a sua etapa de fabricação (algarismos de 1 a 4), e a sequência como universo amostral (letra de A à D). Aos extensômetros adesivados na região crítica (algarismos de 1 a 7), e a contagem iniciou-se, obedecendo-se o sentido horário a partir do furo de válvula pneumática, e utilizado na identificação dos dados de ensaio em planilhas (anexo A) vide a Tabela 1.

8.3 Aquisição de dados de tensão residual.

Para que uma tomada de resultados em extensometria apresente qualidade e confiabilidade, diversas etapas preparatória devem ser cuidadosamente observadas para que o extensômetro possa estar recebendo integralmente a deformação sofrida pelo corpo sob ensaio. A limpeza é o primeiro e mais importante fase deste processo, porque garante perfeito acoplamento mecânico na adesivagem do extensômetro.

Tabela 1 – Ensaio experimental de secção das rodas novas

Roda	Etapa da fabricação	Região instrumentada	Ensaio	Data do Ensaio
A1	Como Fundida	Seccionamento Raio #1		20/05/2011
A1	Como Fundida	Seccionamento Raio #2		20/05/2011
A1	Como Fundida	Seccionamento Raio #3	DRX	24/08/2011
A1	Como Fundida	Seccionamento Raio #4	DRX	24/08/2011
A1	Como Fundida	Seccionamento Raio #5	DRX	24/08/2011
A1	Como Fundida	Seccionamento Raio #6	DRX	24/08/2011
B1	Como Fundida	Raio #1 (Spoke)	1	14/09/2011
B1	Como Fundida	Raio #2 (Spoke)	2	14/09/2011
B1	Como Fundida	Raio #3 (Spoke)	3	14/09/2011
B1	Como Fundida	Raio #4 (Spoke)	4	21/09/2011
B1	Como Fundida	Raio #5 (Spoke)	5	21/09/2011
B1	Como Fundida	Raio #6 (Spoke)	6	11/10/2011
C1	Como Fundida	Raio #1 (Spoke)	1	11/10/2011
C1	Como Fundida	Raio #2 (Spoke)	2	11/10/2011
C1	Como Fundida	Raio #3 (Spoke)	3	14/10/2011
C1	Como Fundida	Raio #4 (Spoke)	4	14/10/2011
D1	Como Fundida	Raio #5 (Spoke)	5	14/10/2011
A2	Tratamento Térmico	Raio #1 (Spoke)	1	16/10/2011
B2	Tratamento Térmico	Raio #4 (Spoke)	2	16/10/2011
A3	Usinada	Raio #1 (Spoke)	1	21/10/2011
B3	Usinada	Raio #4 (Spoke)	2	21/10/2011
A4	Pintura e Acabada	Raio #1 (Spoke)	1	25/10/2011
B4	Pintura e Acabada	Raio #4 (Spoke)	2	21/10/2011

8.3.1 Rodas usadas - limpeza e preparo da superfície.

As rodas em liga-leve adquiridas no comércio, usadas, continham pequenas marcas de impactos e choques mecânicos com outras superfícies, contaminações por graxa, óleo e diversos, além de terem suportado um período de envelhecimento em operação. Estes fatores não foram considerados nestes ensaios (Fig. 28a) para análise e cálculo de tensão residual, existindo a possibilidade destas rodas já apresentarem processos de fadiga cíclica pelo tempo de operação. Porém após o processo de limpeza e polimento superficial, foi feito um exame visual que buscou encontrar locais onde houvesse indícios de trincas em crescimento ou mesmo nucleação de trincas, mas nada pode ser detectado. As rodas também são usinadas para corrigir eventuais marcas de impacto, riscos ou defeitos.

Uma boa adesivagem dos extensômetros (*strain gages*) é importante para melhor acurácia na aquisição dos dados foi necessário realizar um processo de limpeza desengraxante usando removedores e de decapagem química da pintura nas rodas, permitindo acesso à superfície livre da liga de alumínio. O

processo de limpeza foi realizado, inicialmente com o uso de detergente e ou desengraxante (tensoativos aniônicos) aplicado sob a superfície, deixando em espera por 3 a 5 min sob ação de contato superficial do detergente e após foi aplicado água sob pressão para remoção dos particulados grossos e finos de graxas. A tinta epóxi foi removida da roda pelo processo de jateamento de granalha fina (Fig. 28b) permitindo maior eficácia do de ação do ataque químico (Fig. 28c). A lavagem com detergente também teve a função de evitar a contaminação pelas impurezas impregnadas na superfície da roda, deixadas pelas granalhas do equipamento de jateamento. O processo de jateamento mostrou-se necessário para a redução dos resíduos graxos superficiais restantes e aumentar a rugosidade superficial da tinta epoxi, necessário para produzir melhor eficiência do ataque químico utilizado na etapa seguinte. Foram utilizadas, no jateamento, micro granalhas de vidro.

O efeito de impacto e imposição de tensão residual superficial pelo processo de jateamento (*shot-peening*) não foi considerado devido à baixa pressão utilizada nesta etapa do processo e porque sua aplicação foi feita sobre uma superfície de tinta epóxi de 1,5 mm de espessura, em média, normalmente aplicada como proteção de superfície e auxílio a estanqueidade. O ataque químico foi à etapa da remoção da tinta epóxi (Fig. 28c), utilizando, inicialmente banho em solução desengraxante à base de solventes alifáticos e alcalinos (desengraxante, removedor e redutor) em sequência, aplicação de gel removedor (ésteres celulósicos, hidrocarbonetos aromáticos, álcoois, solventes clorados, glicóis e cetonas). Repetição do procedimento de lavagem e remoção de resíduos químicos (água e detergente biodegradável).

Figura 28 – (a) Roda Usada no estado (b) Jateamento de Granalha apectos fo equipamento (c) Ataque químico na pintura

8.3.2 Alívio de tensão pelo método do corte.

O processo de obtenção do valor de tensão residual por alívio (retirada de parte do material) foi realizado inicialmente medindo o diâmetro dos dois lados da roda sem corte (Fig. 29a). Seguiu-se identificando e marcando uma secção paralela de 2,0 cm na roda (Fig. 29b) para remoção. O processo de corte gera atrito, provocando um aumento local da temperatura. Assim sendo a temperatura, durante o procedimento, deve ser controlada e permanecer nos limites aceitáveis para não alterar as características de fabricação da roda. Foi usado um termômetro digital (Fig. 29c), com um sensor termopar tipo K para supervisão dos valores de temperatura.

Figura 29 – (a) Medida do diâmetro inicial (b) Marcação da secção para corte (c) Medida da temperatura inicial

A remoção desta secção de roda foi feita utilizando uma serra de fita tipo coluna realizando dois cortes paralelos. Durante o procedimento do primeiro corte, a temperatura máxima registrada foi de 31 ° (Fig. 30a), indicado quando a fita de corte passou na distância mínima do sensor do sensor (2,5 cm). Após finalização do primeiro corte foram realizadas medições do diâmetro da roda em ambos os lados (Fig. 30b). Os valores foram anotados para uso posterior.

Figura 30 – (a) Medida da temperatura durante o primeiro corte (b) Medição do diâmetro após primeiro corte

Durante o procedimento do segundo corte (Fig. 31a), o máximo de temperatura observado foi de 54 °C, obtido quando a fita de corte passou à distância mínima do sensor (0,5 cm). Também foi medida a temperatura da secção removida, indicando 55 °C (Fig. 31b) maior valor de temperatura registrado, na ausência de fonte de calor, foi comparado com a medida da temperatura realizada durante corte, demonstrando que a menor massa disponível tem menor capacidade de troca de calor com o meio ambiente levando maior tempo para atingir o equilíbrio térmico.

Foi, também, observada a variação da temperatura, registrando-se um gradativo incremento em relação ao avanço do corte. Assim procedendo pode-se manter a temperatura média a 55 °C durante a evolução do corte. Esse procedimento buscou evitar o aparecimento de tensões residuais de origem térmica. Estas tensões residuais ou mudanças no estado de tensão poderiam estar localizadas na região de corte as podendo se sobrepor as medidas originais que foram ensaiadas.

Figura 31 – (a) Medida da temperatura durante o segundo corte (b) Medida da temperatura na secção retirada (c) Roda com a secção removida

Após finalização dos procedimentos de corte e retirada da secção da roda, foi feita uma inspeção visual de material. Pode ser observado em algumas regiões a formação de cavidades, falhas de enchimento de metal durante o processo de fundição devido a problemas no resfriamento da roda (Fig. 32a). Também foi realizada a medida final do diâmetro em ambos os lados da roda (Fig. 32b). Constatou-se uma ligeira torção relativa na banda de rodagem (Fig. 32c).

Figura 32 – (a) Secção da roda regiões Spoke e RIM (b) Medida do diâmetro após o segundo corte c) Indicação qualitativa de torção após o segundo corte

Na Tabela 2, a seguir, estão mencionados os valores obtidos de temperatura, diâmetro inicial e final medidos durante os procedimentos de seccionamento da roda:

Tabela 2 – Resultados do ensaio experimental de secção da Roda

Geometria de Corte	Diâmetro do lado externo (face) da Roda (mm)	Diâmetro do lado interno (cubo) da Roda (mm)	Temperatura máxima durante corte ($^{\circ}\text{C}$)
Sem Corte	387,54	384,30	22
1ro. Corte	387,51	384,33	37
2do. Corte	387,43	384,50	58
Diferença observada (mm)	-0,11	+ 0,20	36

8.4 Obtenção da tensão residual por extensometria.

8.4.1 Procedimento inicial de limpeza

A remoção de escórias brutas pode ser feita utilizando removedores comerciais. A fase de lixamento deve usar uma sequência de granulação das lixas, iniciando-se pela lixa de grana 280 e reduzindo gradativamente a granulação, passando por 320, 380, 400, 600 e dependendo das irregularidades superficiais poderia utilizar lixas 1000. O processo de lixamento tem comportamento mecânico ativo como alívio de tensão residual.

Após a uniformização da superfície por lixamento, foi feito ataque químico com hidróxido de sódio (NaOH 80g/L), para retirar saliências e reentrâncias resultado do lixamento. Na sequência foram refeitas a limpeza do local com gazes limpas, alternando entre secas e embebecida em álcool isopropanol (C_3H_8O PM=60,1 g/mol) e hidrocarboneto aromático, benzeno (C_6H_6), até total remoção de resíduos. Adicionalmente marcou-se com uma caneta de tinta neutra a região de contorno onde o extensômetro será colado, facilitando o processo de localização e adesivagem.

8.4.2 Adesivagem do extensômetro na superfície de ensaio.

Medidas confiáveis dependem da correta instalação dos extensômetros que deve obedecer aos procedimentos de preparo. Garantir que os extensômetros estejam inteiras e perfeitamente aderidos à superfície do corpo de ensaio é tecnicamente importante. Só a perfeita aderência garantirá que a deformação superficial sofrida pelo corpo será igualmente transferida para as grades resistivas do extensômetro.

No processo de colagem deve-se evitar contaminação da cola para se obter perfeita aderência do extensômetro junto à superfície ensaiada. É necessário que entre a superfície de prova e a camada isolante inferior do extensômetro estejam com uniformidade de contato mecânico e regularidade na espessura de cola. Antes de iniciar os procedimentos de limpeza, verifica-se as propriedades do metal que compõe a roda para escolha do extensômetro próprio para uso. A posição de aplicação do extensômetro é a região escolhida por critério operacional ou indicada pela simulação FEA como ponto de máximo da tensão residual.

Delimita-se a região para os procedimentos de limpeza cumprindo-se quatro fases básicas; 1- Aplicação de benzina para remoção dos remanescentes de óleos e graxas; 2- Lixamento da superfície até a sua completa uniformização; 3-Remoção dos particulados resultantes do lixamento com gazes umedecidas com álcool isopropílico e ou acetona; 4- Ataque químico com hidróxido de sódio (NaOH) para homogeneização superficial; 5- Aplicação de produto neutralizante dos resíduos deixados pelas etapas anteriores; 6- Ativação da superfície por adição de catalizador que acelere a cura da cola para melhor adesivagem.

A etapa quatro (4) por ataque químico remove as micro rugosidades deixadas pela fase de lixamento, na forma de vales na superfície do metal e está associada à regularização da superfície.

Com estes procedimentos, garante-se que a superfície estará uniforme, isenta de rugosidades que interfiram na perfeita aderência superficial e correto funcionamento dos extensômetros.

8.4.3 Adesivagem dos terminais e extensômetro

Após a limpeza da superfície, adesivagem e verificação da uniformidade de contato mecânico, procedeu-se com a soldagem e conexão elétrica do extensômetro (*strain gage rosetta e PAD's*), e dos terminais de conexão.

A colagem do extensômetro permite variações de método, levando-se em consideração a geometria da superfície e as propriedades do metal. Uma boa prática é usar uma fita adesiva para capturar o gage e o conjunto de terminais, mantendo-os firmes em uma posição intermediária anteriores a colagem. Essa fita adesiva não deve deixar resíduos de cola no extensômetro sobre a região de superfície do contato elétrico. É conveniente deixar uma pequena sobra nos extremos do adesivo que suporta o conjunto para aderir à região próxima de colagem. Uma destas extremidades serve para fixar o conjunto à superfície de colagem alinhando-o com a marcação de posição anteriormente feita. A outra extremidade servirá para bascular o extensômetro de uma altura suficiente para gotejar a cola de cianoacrilato (adesivo Loctite 675 ou similar e ativador Loctite 7471).

Gotejou-se o adesivo nas superfície inferior do extensômetro e na superfície preparada da roda, cola-se o extensômetro e o terminal usando a outra extremidade da fita adesivo para ajustar a perfeita localização do extensômetro na posição desejada. Com o auxílio de uma fina placa de PVC, mantém-se o dedo pressionando a superfície do adesivo sobre o extensômetro e os terminais por cerca de 3 minutos, ou até que se perceba a boa cura do adesivo e perfeita aderência entre as superfícies.

8.4.4 Soldagem dos terminais de conexão.

Após a completa cura da cola, o extensômetro pode ser manipulado para soldar-se os fios de conexão entre os terminais intermediários (*PAD's*) e os terminais de contatos no extensômetro.

Os terminais intermediários (Fig. 33b2) oferecem resistência mecânica à fiação de conexão (cabeamento; Fig. 33d) entre os extensômetros (Fig. 33b1) e os equipamentos de coleta de dados. No procedimento de colagem (Fig. 33c), deve-se ter extremo cuidado em não transferir calor em excesso do ferro de solda aos contatos, principalmente no lado dos extensômetros, pois estes podem ser facilmente danificados pela ação do calor.

Figura 33 (a) Limpeza e preparo da superfície; (b1) Extensômetro roseta; (b2) Terminais de ligação (c) Colagem do extensômetro; (d) Soldagem dos cabos elétricos ao extensômetro

8.4.5 Testes de conformidade eletrônica dos extensômetros.

Após a soldagem dos terminais intermediários e dos fios de conexão, executou-se os testes de continuidade elétrica entre o cabeamento e o extensômetro. Este teste consiste em medir, utilizando-se de um ohmímetro (Fig. 34a), a resistência elétrica do circuito, verificando-se se os valores medidos estão em concordância com as especificações nominal para os extensômetros. Deve-se proteger os terminais soldados contra umidade e um possível curto-circuito por ação das limas de material resultante da fresagem do furo cego. Fez-se uso de um esmalte isolante aplicado sobre os contatos e terminais dos fios (Fig. 34b).

Ao usar o método do furo cego (*hole drilling*) é conveniente a contínua monitoração da temperatura no local de teste impedindo que ultrapasse a temperatura limite informada pelo fabricante do extensômetro. Por efeito joule, se a temperatura for relativamente alta, tanto o extensômetro e também a superfície de teste do metal podem ter as propriedades alteradas (quais?) mascarando as medidas. Para monitorar a variação de temperatura, instalou-se um equipamento com uma sonda termopar tipo K (Fig. 34c e Fig. 34d) próximo à região de fresagem.

Figura 34- (a) Teste de condição elétrica do extensômetro; (b) Isolação contra umidade e limalhas; (c) Fixação do sensor do termômetro; (d) Medição local da temperatura.

Após finalizar os procedimentos descritos, constatamos o perfeito contato elétrico entre os extensômetros e a extremidade do fio de conexão. O visor do multímetro (ohmímetro) apresentou resistência de $125 \, \Omega$ (Ohm) na ponta dos terminais da fiação de conexão. Foram feitas as ligações entre a fiação e o terminal do aparelho de coleta de dados (Fig. 35a). Optamos por utilizar o terceiro fio de referência nas ligações, ainda que o comprimento dos fios de ligação estivessem abaixo dos valores limite, onde se recomenda a utilização da técnica de compensação por uso do terceiro condutor [49]. O equipamento de medição utilizado nesta etapa dos ensaios experimentais disponibilizou a facilidade de usar a informação do terceiro fio para fazer as correções térmicas na impedância automaticamente.

No método do furo cego, inicialmente utilizou-se brocas convencionais com ponta cônica. Durante o procedimento de furação o deslizamento da broca sobre a superfície na região central do extensômetro foi evitado por puncionamento. Para esse procedimento utilizou-se de uma ferramenta de impacto com ponta cônica. Este procedimento provoca um pequeno rebaixamento na região de impacto guiando a ferramenta de fresagem durante a execução do Furo Cego (Fig. 35b). O extensômetro tem seus elementos resistivos de dimensões reduzidas e pouquíssima resistência mecânica, assim quaisquer deslize da ferramenta de fresagem pode danificá-lo definitivamente.

O puncionamento produz uma pequena marca em profundidade, suficiente para que a ponta da broca gire inicialmente sobre esse ponto impedindo que durante a operação de furação ela se desloque e danifique o extensômetro. O puncionamento por ação mecânica produz uma tensão no limite da região de medição do extensômetro provocando alteração local da

tensão residual. Estes valores de tensão residual adicionado pela ação do puncionamento foram registrados no sistema de aquisição de dados, para não interferir no cálculo da tensão residual.

8.4.6 Conexões ao equipamento de aquisição de dados.

Utilizou-se modelo roseta compostos por três extensômetros resistivos no mesmo dispositivos e distribuídos geometricamente formando ângulo de 90° entre os extensômetros 1 e 3 e o extensômetro 2 está a 135° do extensômetro 1. O valor de resistência nominal nos três extensômetros é de $120 \, \Omega$. Usamos estes parâmetros para calibrar-se os parâmetros (*setup*) iniciais do sistema. O dispositivo roseta tem uma marcação central para posicionamento da furadeira. Por especificação da técnica de furo cego, a profundidade do furo deve ser de $0,4D$ (diâmetro da broca). Utilizamos uma furadeira comum (340 g) com broca de 1,5 mm (Fig. 35c), em rotação de 4700 rpm = 78,3 rps e a haste limitadora de profundidade mecânica da furadeira. O equipamento não dispõe de controle de avanço de profundidade, não sendo possível obter-se precisão na medida de profundidade. Em virtude da falta de precisão no processo de furação, obteve-se a profundidade de $\cong 0,7 \, \text{mm}$ (Fig. 35d).

Figura 35- (a) Aquisição de dados do extensômetro pelo software do sistema; (b) Puncionamento no centro do extensômetro; (c) Usinagem do furo de alívio da tensão; (d) Furo no centro da roseta para alívio e medição da tensão média local

8.5 Aquisição dos dados usando o equipamento DAQ

8.5.1 Calibração inicial e aquisição de dados.

Programou-se o equipamento Lynx ADS2164, digital CDA 24 bits, para operar com frequência de amostragem de 4 kHz (4000 pulsos/segundo), amplificador de ganho de entrada em 1000x, filtro passa faixa de 500 Hz (passa

baixa), corte de frequências acima de 500 Hz (ciclos/segundo) para atenuação dos ruídos no sinal.

O sistema utiliza conexão USB na interface entre o hardware do equipamento DAQ e o Notebook (Fig. 63) onde o software aplicativo dedicado processar os dados intercambiados entre os sistemas.

Figura 36 – Equipamento de coleta e análise Lynx modelo ADC2000

O software calcula e disponibiliza na tela diversos resultados no formato de planilhas compatíveis com arquivos Excel, e também gráficos contendo os dados com valores de voltagem obtidos em função do tempo (Fig. 37).

O software pode ser parametrizado para fornecer gráficos personalizados, contendo etiquetas e traçados coloridos (*label*), facilitando que se faça distinção entre os canais de aquisição de dados. Os passos seguintes podem ser acionados para melhor impressão dos gráficos:

- 1) Adicionar um label e cores para identificar individualmente o canal de aquisição de dados que esta sendo usado, onde estão conectados os extensômetros (Fig. 37);
- 2) Cada gráfico gerado será composto com o número de curvas correspondente ao número do canal de aquisição;
- 3) Controle de aquisição de dados do sistema, disparando o processamento de entrada e gerando os gráficos de eventos relativos à deformação.

Inicializou-se o computador, o software e sistema Lynx para proceder com a calibração e parametrização inicial antes do procedimento de punção e

furação nos extensômetros. Desta forma pode-se armazenar os valores dinamicamente a partir de $t=0$ s, mostrando o comportamento de relaxamento das tensões em função do tempo. Este método permite estabelecer o mesmo valor zero para plotagem no gráfico.

Figura 37 – Gráfico resposta com identificador

O ensaio experimental coletou dados de tensão residual localizada na região da “spoke” da roda (Fig. 38a), região indicada por elementos finitos como ponto crítico de máxima tensão residual (Fig. 38b). O sistema de simulação mostra ao lado do desenho FEA, uma coluna espectral informando a relação entre côr e valor da tensão residual.

A região achurrada na Fig.38a destaca a localização do extensômetro roseta aplicado à região crítica apontada pelo FEA (Fig.38b).

Os valores de tensão residual foram obtidos por relaxamento local através da usinagem de um furo cego medindo 1,0 mm de diâmetro no centro da roseta com aproximadamente 0,6 mm de profundidade. A execução da furação não teve medição exata da profundidade do furo o que prejudicaria os resultados calculados se o sistema não fosse *real-time*.

Figura 38 - (a) Ensaio experimental por extensometria
(b) Simulação das tensões residuais em FEA apontando pontos de máximos

8.5.2 Ensaios experimentais nas rodas novas.

Os ensaios experimentais em rodas usadas além de fornecer dados relativos à tensão residual para referenciar novos trabalhos forneceu uma oportunidade para verificar a metodologia e procedimentos para os ensaios experimentais. Conseguiu-se um melhor rendimento experimental nos ensaios com as rodas novas com o uso da localização indicado pelas simulações FEA para pontos críticos de tensão residual.

8.5.3 Ensaios experimentais por seccionamento

Os ensaios experimentais por corte e seccionamento nas rodas novas, como fundida (Fig. 39a e Fig. 39b) foram feitos com uso de uma serra de fita circular com dentes espaçados para corte de ligas de alumínio, evitando alteração das características locais do material (emplastação). O corte teve supervisão de temperatura e resfriamento com ar comprimido o que permitiu manter a diferença de temperatura inferior a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{inicial}}=16\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_{\text{final}}=34,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). A relaxação global das tensões na roda pelo método do corte tem como principal objetivo a caracterização qualitativa da tensão residual (compressiva ou de tração) a partir da ocorrência de deformação. Como também se verificou nos ensaios com as rodas usadas os cálculos para obtenção da tensão residual, para este caso, não apresentam facilidade de elaboração, pela complexidade das formas geométricas envolvidas antes e depois do corte. Para obter-se uma expressão para cálculo, necessitaria promover-se um estudo dos complexos campos tensoriais que não são objetivo deste trabalho.

Inicialmente realizamos alguns ensaios experimentais com difração de raios-X em partes (spoke) das rodas como fundidas. Os valores medidos foram usados como referenciais de verificação dos valores obtidos nos ensaios por extensometria.

Dos seis raios de cada roda (região da spoke) retirados pelo método do corte, foram separados três para ensaios no método da difração por raios-X (Fig. 39c).

Figura 39 - (a,b) Ensaio experimental por Secção; (c) Ensaio experimental por DRX.

Os valores obtidos pelo método DRX, são utilizados como verificadores dos ensaios por extensometria, permitindo melhor análise dos valores obtidos de tensão residual para áreas físicas microscópicas e local (nível de grãos e contorno de grãos). A extensometria é o procedimento experimental adequado para estes ensaios na roda em sua totalidade, uma vez que o método difração de raios-X não é operacionalmente aplicável devido às dimensões da roda.

Como resultado qualitativo observado para as tensões residuais pelo método simples seccionamento (por corte), pode-se observar que a fenda produzida no talão da roda (RIM riser) tendeu ao fechamento do corte (Fig. 40a), o que caracteriza, na média global, um estado compressivo de tensões (Fig. 40b e Fig.40c).

Figura 40 - (a) Ensaio experimental por seccionamento; (b) e (c) Deformação pelo alívio global

Esta observação qualitativa pode ser comparada e verificada com a análise dos dados quantitativos obtidos pelos ensaios experimentais. Após a obtenção dos dados experimentais constatou-se convergência entre a natureza das tensões residuais qualitativa e quantitativa.

8.5.4 Ensaios experimentais por furo cego.

Durante os primeiros experimentos foram utilizados dois conjuntos de equipamentos de diferentes fabricantes. Um primeiro conjunto composto de ferramental de fresagem e leitor de dados da Vishay (RS200+P3) desenvolvido para executar a função específica de ensaios de furo cego (*hole-drilling*). O segundo conjunto foi desenvolvido dentro da abordagem tecnológica deste trabalho adaptando-se uma fresadora Ridgid R2401 para operar com a mesma ferramenta de fresa utilizada no equipamento da Vishay. Foi também modificada a mesa e sistema de avanço de profundidade para poder executar o procedimento de furo cego.

Os ensaios experimentais por furo cego para as rodas foram realizados, estabelecendo-se uma sequência para os procedimentos de testes; rodas como fundidas; tratadas termicamente; usinadas; acabamento pintadas. As posições de instalação dos extensômetros nas rodas levaram em consideração as regiões apontadas pela simulação FEA como sendo as de maior probabilidade de nucleação de trincas (regiões críticas).

A escolha da região (spoke) de pares de raios diametralmente opostos para realizar os ensaios considerou a ação do carregamento sobre estas regiões. Nota-se que o carregamento atua ciclicamente sobre um raio em particular, ora em modo tração ora em modo compressão. Este regime de carregamento cíclico pode maximizar o efeito das tensões residuais sobre a fadiga. Embora este efeito só pudesse ser apreciado em ensaios experimentais efetuados em condições operacionais reais, comparar os valores entre os raios diametralmente opostos poderia indicar valores diferentes entre as duas posições e conseqüentemente haveria de se considerar o valor mais crítico.

Foram colados os extensômetros nos raios de números 1 e 4, feitos cabeamento para conexão ao equipamento de aquisição de dados (Fig.41a). Para fixação do ferramental de usinagem da Vishay foi necessária a adaptação de pequenos blocos (tarugos) em alumínio que permitiram o alinhamento do

equipamento de furação (perfuratriz) com a anilha de marcação central da roseta extensométrica (Fig.41b). Os tarugos de alumínio foram instalados e colados sobre a superfície da roda e sobre eles as hastes ajustáveis da ferramenta, somente assim conseguiu-se o nivelamento e ortogonalidade com a superfície de realização do furo cego.

Figura 41 - (a) Cabeamento dos extensômetros
(b) Colagem de tarugos para nivelamento da fresadora

O ajuste fino de posicionamento, centralizando e alinhando a posição da ferramenta é feito opticamente pelo uso de uma luneta com régua de escala milimétrica XY que acompanha o conjunto Vishay para essa finalidade (Fig.42a). Ajustado e alinhado o centro da roseta com a ferramenta de fresa é feita a substituição da luneta pela fresadora. A fresadora Vishay é pneumática, acionada por ar comprimido podendo atingir rotação de 400.000 rpm, praticamente sem impor torque à ferramenta (Fig.42b). A ausência do torque mecânico na ferramenta reduz a possibilidade do equipamento provocar tensões residuais na região do furo. As micro deformações resultante do alívio das tensões residuais, são mecanicamente transferidas aos extensômetros alterando os valores nominais de sua resistência gerando diferenciações proporcionais no sinal elétrico. Estes sinais elétricos são coletados e enviados ao equipamento de aquisição de dados que os digitaliza e processa mostrando seu valor em micro deformações no display do equipamento Vishay P3 (Fig. 42c).

Figura 42 - (a) Ajuste da fresa (b) Alívio das tensões residuais
(c) Equipamento Vishay de aquisição

O conjunto de fresagem possui um micrômetro (Fig.43a) que permite o avanço do conjunto de furação, composto por uma broca de fresagem ponta cônica invertida (Fig.43b). O micrômetro tem divisões em passos de 20μm, permitindo o lento avanço de profundidade do sistema de alívio da tensão residual (Fig.43c).

Figura 43 - (a) e (b) Detalhe da fresadora (c) Fresagem do Furo de alívio
(d) Furo cego apontando alívio das tensões residuais

Um segundo conjunto composto de equipamento fresadora industrial RIDGID R2401 (Fig.44a) que recebeu adaptações mecânicas para, inicialmente, suprir a necessidade de equipamento de fresagem com capacidade de ajuste de passos na profundidade do furo em passos de 1/64 pol (Fig.44b), e equipamento de aquisição de dados B&K SI1526 (Fig.44c).

Figura 44 - (a) Fresadora Ridgid (b) Ajuste de profundidade
(c) Equipamento de aquisição de dados B&K

A maior parte dos ensaios experimentais tiveram seu alívio de tensão realizado pela fresadora Vishay e aquisição de dados efetuados pelo equipamento Visahy P3. Alguns dos ensaios foram realizados utilizando a combinação de fresadora Vishay e equipamento B&K ou fresadora Ridgid e equipamento de aquisição de dados Vishay P3. As leituras de ambos os conjuntos puderam ser comparadas (planilhas de dados apêndice A) com o objetivo de estabelecer uma relação de correspondência entre os conjuntos dos equipamentos de forma que pudessem ser utilizados, oferecendo confiabilidade dos dados obtidos.

A necessidade de se ter a disposição para uso um equipamento versátil e de baixo custo para fresagem do furo cego de baixo custo, levou-nos a usar este equipamento Ridgid adaptado (Fig.45a),. Para qualquer período de ensaio, ambos os equipamentos, fresadora e coletor de dados precisariam estar disponíveis (Fig.45b). Esta substituição foi necessária por não haver disponibilidade de um equipamento de fresa específico e com pequenas dimensões que permitisse o controle de profundidade na realização do furo (Fig.45c).

Figura 45 - (a) Ajuste de centro da Roseta (b) Instrumentação B&K
(c) Roseta e PAD terminal

Obter dados comparativos e de mesma ordem de grandeza entre os conjuntos de equipamento garantiu a possibilidade de uso do equipamento adaptado. Havendo a necessidade de utilizar separadamente um ou outro equipamento, esperava-se garantir veracidade nas leituras e medidas obtidas. Ambos equipamentos coletaram e forneceram dados em unidades de micro deformações.

A utilização do equipamento de aquisição de dados da B&K está restrita a configuração de uso em meia ponte Wheatstone ou ponte completa,

impossibilitando a leitura de uma única roseta completa em um único canal de aquisição de dados (manual anexo B). Assim sendo, foi necessário montar um conjunto composto de três rosetas inertes (Dummes) para utilização de um total de nove extensômetros como resistores da ponte de Wheatstone) em configuração de 3/4 de ponte (Fig.46).

Figura 46 – Conjunto de pontes (3/4) de Wheatstone Dummes para Instrumental

Cada roseta colada na roda possui três extensômetros, que forneceram independentes leituras de deformação. Cada canal do equipamento B&K foi devidamente conectado a um único extensômetro da roseta e para o qual mostrava, no display, o valor da microdeformação. Cada roseta Dummes possuindo três extensômetros que estavam colados sobre um bloco que não estava sob ação de forças, estando estabilizado e com injeção de deformação. Deste modo os valores de impedância destes três extensômetros não estavam sujeitos a variação e puderam ser utilizados como resistores R2, R3 e R4 da ponte de Wheatstone. Acoplou-se cada um dos extensômetros da roseta colada a roda a uma roseta Dumme, este como sendo o resistor R1, que foi o extensômetro responsável pela leitura de deformação sofrida (Fig. 47)

Figura 47 – Diagrama de montagem das pontes (3/4) de Wheatstone

Puderam assim serem utilizadas como acoplamento em três canais do sistema de aquisição de dados permitindo a leitura simultânea dos três extensômetros da roseta de aquisição de dados, cada uma delas fechando o circuito de ponte..

Com este procedimento de montagem ficou possível efetuar a medição simultânea das micro deformação aquisitados pelos três extensômetros em três canais do equipamento B&K. Através do seletor de canais do equipamento, um único evento de amostragem pode ser medido em tempo real fazendo-se a comutação do canal ativo no display do equipamento.

Com a utilização deste sistema e com os procedimentos adotados ficou possível realizar ensaios que forneceram as medidas de micro deformação para cada uma das três direções no ponto crítico da roda. As três direções de micro deformação (ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3) associadas à (x) direção radial, (y) direção tangencial e (xy) direção de torção (cisalhamento), permitem elaborar cálculos que determinam as tensões residuais máximas e mínimas locais [46]

9 RESULTADOS

Os dados obtidos por difração de raios-X forneceram valores utilizados como um referencial local das tensões residuais encontradas. Os valores encontrados nos quatro ensaios realizados em DRX foram plotados em um gráfico pelo método da sobreposição gráfica (Fig. 47), seus valores individuais estão disponíveis na Tabela 2. No apêndice A estão disponibilizados o conjunto de dados de entrada aplicados ao sistema aplicativo de tratamento de dados

Foxit. Também foram utilizados alguns sistemas computacionais dedicados à tarefa de executar cálculos com os valores obtidos de tensão residual e fornecer gráficos com informações quantitativas que mostram etapas evolutivas no tempo do comportamento físico ensaiado. Estes cálculos forneceram as tensões residuais máximas e mínimas para cada região analisada, por diferentes métodos. Para realizar uma análise comparativa entre os dados experimentais e os dados obtidos nas simulações FEA, foi necessário considerar o método de cálculo adotado pelo software no equipamento de aquisição de dados permitindo representá-los junto com os valores nas simulações FEA. O módulo de software de aquisição de dados para tensão residual do equipamento de raios-X utilizado fornece os resultados na forma de relatórios como apresentado para o ensaio A4_1 (Figura 47a) A utilização de sobreposição entre os gráficos resultantes do software Foxit (Figura 47b) não é usual na representação de ensaios por difração de raios-X (DRX), porém foi aqui utilizado como alternativa para auxiliar a visualização e análise dos resultados.

*** Stress Analysis ***

Comment :
 Date & Time : 09-02-11 09:29:20

Calculated Result

Stress : -19.011 (kg/mm2)
 : -186.435 (MPa)
 K - Constant : -32.440 (kg/mm2/deg)
 : -318.128 (MPa/deg)

M = 0.5860
 A = 156.3328
 Accuracy
 = 0.031982
 MaxDev
 = 0.054313
 MaxDevNo.1

Correction Data List

No.	Use	Psi (deg)	2 Theta (deg)
1	*	30.000	156.425
2	*	15.000	156.394
3	*	0.000	156.341
4	*	45.000	156.650

Figura 47a – Resultados de tensão residual em A4_1 obtidos pelo software FoxIt DRX

Figura 47b – Resultados de tensão residual obtidos pelos gráficos software FoxIt DRX

Tabela 3 – Valores médios de tensão residual por ensaios DRX

Curva	Amostra	Tensão Residual σ (MPa)
●	A1_1	-184,3
●	A1_3	72,9
●	A1_4	-186,4
●	A1_6	-40,2

O software utilizado para auxiliar na compilação e análise dos dados obtidos pela técnica do furo cego foi o Hdrill versão 3.51 da MicroMeasurements. Nele são lançados os valores das micro deformações encontradas e apontadas pelos equipamentos de aquisição de dados P3 da Vishay ou pelo B&K. Cada passo em profundidade dado pelo equipamento de fresagem fornece uma medição de micro deformação que é inserido no software, o qual processa e

fornece um perfil de distribuição em profundidade das tensões residuais. O software tem capacidade de fornecer análise em três métodos distintos; 1- Método Integral, 2- Método de série de potências e 3- Método da tensão uniforme. Extensômetros foram instalados sobre a mesma superfície analisada por DRX, desta maneira oferecendo um novo conjunto de dados sobre a mesma região. Os dados obtidos por extensometria referente aos valores das micro-deformações experimental encontradas e foram analisados pelo software Hdrill pelo método teórico integral gerando um gráfico composto dos ensaios experimentais que apresentaram os valores de dispersão máxima e mínima e com valores resultantes do processamento (Fig.48). Pode-se assim obter elementos de verificação quanto à convergência dos dados entre os métodos e tecnologias empregadas nos ensaios. Na ocorrência de desvios entre as medidas, foi possível considerar sua ordem de grandeza para constatação da existência de convergência entre os dados. A planilha de coleta de dados e planilha de ensaios estão anexadas no apêndice A.

Os dados obtidos nos ensaios experimentais foram tratados pelo software Hdrill computando pelo método integral e receberam, quando necessário para que ter seus valores normalizados, tratamento pelo critério de Von Misses,. Após o tratamento, os valores discrepantes observados no gráfico, isto é, excedem o valor de tensão de escoamento para a liga ensaiada (172 MPa), ficou possível confrontar os valores obtidos com os valores da simulação FEA. Os valores anômalos observados decorrem do efeito da plastificação em regiões do furo cego onde por ação mecânica da ferramenta de fresa pode haver excessivo aquecimento, adição de tensão residual pontual. Estas regiões plastificadas se apresentam como um novo patamar de valor (offset) na deformação elástica transferida ao extensômetro.

Figura 48 – Resultados sobre micro deformações obtidos por extensometria e pelo processamento utilizando o software HDrill

Nos ensaios experimentais, onde houve aplicação da técnica de seccionamento até obtenção de um volume mínimo praticável como na amostra ou corpo de prova (Fig.49).

Figura 49 – Amostra para análise da tensão residual pela técnica do seccionamento

Diversos cortes foram feitos nas laterais e sob o extensômetro (método exaustivo) foram, também, elaborados cálculos utilizando, diretamente, a lei de Hooke da elasticidade para o cálculo da tensão residual (Fig.50). Este procedimento reduz a área investigada à condição de se obter valores médios de tensão residual local.

Figura 50 – Resultados sobre micro deformações obtidos por cálculo

Os dados colocados em planilha foram obtidos em rodas de diferentes fases da produção, para as quais certamente o estado de tensão deve mudar em razão dos processos térmicos e mecânicos de atrito sofridos durante o tratamento térmico, usinagem e pintura para acabamento da roda.

Para realizar comparações entre a massa de dados obtidos, foram usados dados entre os gráficos gerados por cada ensaio para as rodas com mesmo tipo de processo. Os ensaios em rodas no estado como fundidas para micro deformações foram processados pelo sistema Hdrill e solicitado resultado em tensão principal (Fig.51).

Na figura 51, nota-se valores para a tensão principal que estão muito além do limite de escoamento do material (A356) que é de 172 Mpa. Essa anomalia em alguns dados encontrados nos ensaios experimentais ocorre devido ao fenômeno físico da plastificação do material na região do furo. Esta plastificação pode ocorrer pela ação mecânica do equipamento de fresagem que provoca no local, um aumento considerável nos valores obtidos na medição da tensão residual.

Figura 51 – Resultados das tensões residuais obtidas pelo software

Tratamentos matemático são empregados nos dados para correção do efeito dos desvios observados nestes dados, utilizamos entre outras ferramentas, o critério de Von-Misses permitindo obter novos valores que desconsideram o valor anômalo originado pela plastificação [9,48].

Os ensaios realizados em rodas como acabadas geraram dados para micro deformações os quais foram processados pelo sistema Hdrill resultando em tensão principal média estimada entre 100 Mpa e 180 MPa (Fig. 52).

Figura 52– Resultados pelo software HDrill das tensões residuais obtidas em rodas

10 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

10.1 Análise dos dados experimentais pela técnica de corte.

As diferenças obtidas entre as medidas do diâmetro inicial e final (retirada de uma secção da roda), nos lados externo e interno foram usados para calcular a deformação linear ocorrida em toda a roda. Este valor representa a deformação média ($\bar{\epsilon}$) ocorrida na roda. Ao aplicarmos o valor ($\bar{\epsilon}$) e o valor (E) do módulo de elasticidade na equação de Young obteremos a tensão residual média ($\bar{\sigma}$) para a roda. As ligas de alumínio tem seu valor para E e ν são tabelados, sendo seus valores pelo sistema SI de 68,7 GPa e 73,08 GPa e o valor de $\nu = 0,3$.

Linearização dimensional da área superficial da roda;

Diâmetro interno: inicial = 384,30mm
final = 384,50mm

Diâmetro externo: inicial = 387,54mm
final = 387,43mm

Os valores medidos não tem aplicabilidade quantitativa. Qualitativamente tem-se a ocorrência de encurtamento do diâmetro é ação da tensão residual média de compressão e o alongamento de diâmetro como ação de tensão residual média de tração.

10.2 Análise dos dados experimentais por extensometria.

Durante a coleta de dados o sistema permaneceu conectado (Fig. 53) durante 225 s, distribuídos em seis etapas distintas: (1) 0-45 s calibração de setup do “zero” do nível de sinal, anteriores ao processo de puncionamento; (2) 45-55 s puncionamento; (3) 55-105 s espera para o posicionamento da furadeira; (4) 105-130s posicionamento da furadeira sobre a roseta; (5) 130-150s processo de furação; (6) 150-225s estabilização da superfície.

No gráfico da Fig. 53 o eixo de ordenadas registra a variação da tensão elétrica (volts/gage) em cada gage e o eixo de abscissas registra o tempo em segundos. Para obter-se a deformação ocorrida e tensão residual correspondente será necessário usar o coeficiente elástico E do alumínio. Na fabricação de rodas de liga-leve usa-se ligas de alumínio com Silício nas proporções AlSi 7% ou AlSi 11%. Ao consultar-se uma Tabela padrão de propriedade dos materiais que forneça estes dados temos que para a liga AlSi = 7.450Kgf/mm² e o valor de $E_{\min}=7000\text{Kgf/mm}^2$. Como o equipamento de coleta opera a uma frequência de varredura de 4,0 kHz = 4000cilos/segundo ter-se um dado amostrado a cada 78,3 rps/4000 rps = 0,02 rotações da broca de usinagem. Isto quer dizer que a cada 7,2° teremos uma informação sobre alívio de tensão e a deformação local originada, Esse valor já estará sendo utilizado pelo programa de aquisição de dados para fornecer a tensão residual ou a tensão elétrica obtida pelo extensômetro devido à micro deformação ocorrida..

Figura 53 – Gráfico com resultados do extensômetro

O gráfico da Fig. 54 apresenta os valores iniciais representativos de micro-deformações em $t=0$ s sendo utilizado pelo programa de aquisição de dados para fornecer a tensão residual calculada a partir da tensão elétrica obtida pelo extensômetro. A calibração inicial para valor “zero” representando micro-deformação nula foi programada para efetuar medição após o puncionamento em $t=50$ s. Neste caso a tensão residual adicionada pelo procedimento experimental está sendo considerada nula.

Figura 54– Calibração do zero iniciando em $t= 50$ seg.

O resultado de tensão residual para o modo furo-1 pode ser obtido diretamente pelo relatório do sistema aplicativo que acompanha o sistema de aquisição de dados ou da análise dos gráficos, como indica a figura 55a e 55b. Usa-se o gráfico 55b porque ele indica diretamente os valores de tensão residual em unidade de volts, que podemos converter em Pascal (MPa) como segue;

Figura 55 (a) – Curva de coeficientes para Relação D_0/D .

Diagrama-da-Ponte-de-Wheatstone- configuração-em-1/4-de-ponte

R_G ::= Valor da resistência nominal do extensômetro

G_F ::= Fator de Gauge do extensômetro

R_L ::= Resistor casador de impedância

Figura 55 (b) – Diagrama de ponte de Wheatstone usada em cada canal de dados.

Informações gerais necessárias para efeito de cálculo.

1) Do equipamento de aquisição ADC e sistema integrado:

ganho do amplificador no sinal de entrada = $1000 \times V_{EX}$.

tensão de excitação nos gages: 5,0V.

Valor de resistência do cabeamento: $R_L = 0,2\Omega$

2) Informações da configuração experimental:

O Fator de Gage (roseta MM) $E_1 = 2,065$; $E_2 = 2,04$; $E_3 = 2,065$.

Resistência dos gages (R_G): $E_1 = E_2 = E_3 = 120,3\Omega$

Relação $D_0/D = 0,7 \text{ mm}/1,5 \text{ mm} \approx 0,467$ (aplicado ao gráfico em 55a), fornece os valores para $\bar{a} \approx 0,25$ e para $\bar{b} \approx 0,61$.

3) Informações Tabela das ou retirada dos gráficos.

Valor da tensão nos gages (fornecida pelos gráficos na Figura 55b).

Extensômetros: $V_{E1} = 0,75V$; $V_{E2} = 1,00V$; $V_{E3} = 3,10V$.

Com os valores acima informados calculamos os valores de micro deformações em cada extensômetro usando;

$$\epsilon = \frac{-4V_r}{GF(1+2V_r)} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right), \text{ onde } V_r = \frac{V_{0(final)} - V_{0(inicial)}}{V_{excitação}}$$

Para cálculo dos coeficientes de redução para tensão residual usamos os parâmetros e formulário fornecidos pelo Tech Note da Micro Measurements TN-503 que segue a normativa ASTM E837-92, ilustrado a seguir.

$$\sigma_{\min}, \sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{4\bar{A}} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2}}{4\bar{B}}; \bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E} \cdot \bar{a}; \bar{B} = -\frac{1}{2E} \cdot \bar{b}$$

Dos cálculos obtivemos como valor médio entre a profundidade de 0 mm e 1,1 mm;

$$\sigma_{\max} = 227,1 \text{ MPa} \quad e \quad \sigma_{\min} = 94,3 \text{ MPa}$$

Os resultados obtidos dos ensaios nas rodas novas, da fase acabadas, foram coletados também em duas unidades e em dois raios (raios 1 e 4) de cada uma delas. Durante a realização do processo fresagem foram realizados 40 passos em profundidade de 20 um, sendo extraído o valor de cada micro deformação. Após a inserção dos dados no sistema Hdrill foram obtidos os dados apresentados no gráfico (Fig. 57) abaixo;

Figura 57– Gráfico da tensão residual em rodas novas acabadas
colocar na sequência uma Tabela com os valores obtidos

11 CONCLUSÕES

Na análise de resultados dos diversos ensaios experimentais em rodas usadas, pode-se concluir que os métodos de seccionamento e furo cego para relaxamento das tensões local podem ser combinados para obter-se o comportamento da tensão residual. O valor de tensão residual calculado para as rodas usada, pela técnica de seccionamento, com relaxamento local, mostrou um comportamento de micro deformação em tração com valor médio calculado em 200 MPa. Porém este valor não pode ser comparado com as simulações por elementos finitos por não haver simulações para este modelo de roda.

Os ensaios experimentais onde utilizou-se a fresadora comercial Ridgid, obteve-se aceditável controle no avanço de profundidade na técnica do Furo Cego. Os dados obtidos com o uso da barra de controle mostrou a possibilidade de uso deste equipamento de baixo custo para operações onde não exista solicitação de alta precisão. Os valores medidos convergem para os valores do equipamento da Vishay, em métodos semelhantes como apresenta a Tabela-3.

Tabela 3 – Comparativo dos dados obtidos entre os métodos e técnicas utilizados

Ensaio	HDrill Integral	DRX	Furo Cego Vishay	Furo Cego Ridgid
A1_1	172,5	-184,3	155,7	198,7
A1_4	143,7	-186,4	138,2	112,9
A1_3	129,1	72,9	141,0	201,5
A1_6	96,6	-40,2	94,8	120,0

Os valores de tensão residual obtidos através dos ensaios experimentais para a região crítica (spoke), após cálculo de correção do efeito da plasticidade, apresentaram valores da tensão residual entre 95 MPa a 160 MPa, em média (para a roda em sua totalidade). Indicando existir convergência dos valores calculados pelo software de simulação FEA dentro da mesma ordem de grandeza. Numericamente poucos ensaios experimentais apresentaram condições anormais reportando valores de -800 MPa, para a tensão residual muito além dos valores para limite de escoamento da liga A356 que é de 172 MPa. Estes dados foram retrabalhados utilizando a correção do efeito da plasticidade seguindo o critério de von Mises associados a outros parâmetros.

Após a correção, os valores médios encontrados para estes ensaios, permaneceram entre 80 MPa e 120 MPa.

Finalmente, conclui-se que os dados obtidos nos ensaios experimentais corroboram os valores apresentados pela simulação FEA e podem ser utilizados como realimentação na base de dados para novas simulações em software FEA. Estes resultados experimentais promovem maior acurácia e confiabilidade para execução de novas simulações e projetos utilizando sistemas computacionais.

12 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS E CONTINUIDADE

Notou-se a necessidade de ampliar a utilização de informações sobre Tensão Residual nos diversos componentes de engenharia, refinar as técnicas e métodos já utilizados, desenvolver e aprimorar novos métodos e técnicas na investigação da causa de falhas em componentes de engenharia, treinar novos recursos humanos que possam utilizar as técnicas e métodos de análise disponíveis. Estes são desafios aguardando respostas e ações por parte dos pesquisadores nas Ciências dos materiais.

Nota-se que ainda existe uma relativa necessidade de tecnologias métodos e equipamentos que possibilitem a rápida investigação e precisa análise de fenômenos que reduzem confiabilidade e durabilidade dos componentes industrializados, fabricados para compor máquinas e equipamentos que ajudam a promover o desenvolvimento humano.

Durante este trabalho percebeu-se a dificuldade existente em equipamentos e sistemas de software para utilização e análise de ensaios experimentais, especificamente no levantamento de dados sobre tensão residual em componentes produzidos para a indústria da mobilidade. Esta é uma frente de trabalho que necessita de estudiosos e pesquisadores talentosos e dedicados que desejem promover o desenvolvimento científico.

Apêndices A - Planilhas de Coleta de dados

Apêndice B – Manual de operação do instrumento B&K SI1526

Apêndice C– Desenhos de peças modificadas para adaptação da fresa RIDGID R2401

13 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

1. ASSAN, A. E. **Métodos dos Elementos Finitos-Primeiros Passos**. Campinas - Brasil: Ed. Unicamp, 2003.
2. BONET, J.; WOOD, R. D. **Non Linear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis**. Cambridge - USA: Cambridge University Press, 1997.
3. BURNETT, D. S. **Finite Element Analysis: from Concepts to Applications**. New York City - USA: Addison Wesley Publishers, 1987.
4. LIU, Y. **Introduction to the Finite Element Method**. Cincinnati - USA: CAE Research Lab., 2003.
5. MACKERLE, J. FEM and BEM analysis and modeling of residual stresses. **Finite Elements in Analysis and Design**, Linköping - Sweden, 2001.
6. ZAROOG, O. S. et al. Modeling of residual stress relaxation of fatigue in 2024-T351 aluminium alloy. **International Journal of Fatigue**, Selangor - Malaysia, v. 33, p. 279-285, August 2010.
7. CHEN, J.; PENG, Y.; ZHAO, S. **Hole-Drilling Method Using Grating Rosette and Moiré Interferometry**. Springer, Verlag - GmbH, 10 January 2009. 389-394.
8. DELIJAICOV, S. **Extensometria elétrica**. São Paulo - Brasil: HBM do Brasil, 2008.
9. BEGHINI, M.; BERTINI, I.; SANTUS, C. **A Procedure for Evaluating High Residual Stresses Using the Blind Hole Drilling Method, Including the Effect of Plasticity**. Universidade de Pisa. Pisa - Italy, p. 301 -314. 2009.
10. HSU, Y. L.; YU, C. C. Computer simulation of casting process of aluminium wheels - a case study, Taiwan - China, 2005.
11. PADILHA, A. F.; FILHO, F. A. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo - Brasil: Hemus Livraria, distribuidora e editora , 2004.
12. SCHÖN, C. G. **Mecânica dos materiais**. São Paulo - Brasil: EPUSP, 2010.
13. CALLISTER, W. D. J. **Materials Science and Engineering**. New York - USA: John Wiley&Sons, 2007.
14. LEKHNITSKII, S. G. **Theory of Elasticity of an Anisotropic Body**. Moscow: MIR Publishers, 1981.

15. CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Rio de Janeiro - Brasil: LTC Editora, 2002.
16. TIMOSHENKO, S. **Theory of elastic stability**. New York - USA: McGraw-Hill, 1936.
17. VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. 4a. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1977.
18. COLOSIO, M. A. Uma Abordagem da Vida em Fadiga em Barra Estabilizador Automotiva Considerando Defeito Superficial Fisicamente Pequeno, São Paulo - Brasil, 2003.
19. JAMES, M. N. et al. Residual stresses and fatigue performance. **Engineering Failure Analysis**, New York - USA, v. 14, p. 384-395, April 2007.
20. MUSKHELISHVILI, N. I. **Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity**. Tradução de J. R.M. Radok. third. ed. Groningen - Holland: P.Noordhoff Ltda., 1953.
21. MIRANDA, P. E. V.; RODRIGUES, J. A. **Gases em Metais e Ligas Fundamentos e Aplicações na Engenharia**. Rio de Janeiro: EDC Editora Didática e Científica Ltda, 1994.
22. HOLFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Darmstadt - Germain: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.
23. PERRY, C. C.; LISSNER, H. R. **The Strain Gage Primer**. New York - USA: McGraw-Hill Book, 1962.
24. CONSTANTINESCU, A.; KORSUNSKY, A. **Elasticity with Mathematica - An Introduction to Continuum Mechanics and Linear Elasticity**. New York: Cambridge University, 2007.
25. POLMEAR, I. J. Light Alloys. **Metallurgy of the Light Metals**, 1989. 39, 144-159.
26. SCHAJER, G. S. et al. Hole-Drilling and Core Method, Ontario - Canada, 1996.
27. GUIDORIZZI, H. L. **Um Curso de Cálculo**. 5a. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Ltda, v. 3o., 2008.
28. FONSECA DE ALBUQUERQUE, M. C.; MACHADO, R.; RIBEIRO, C. R.

- Determinação de Tensões Residuais por Difractometria de raios-X, São Carlos, 2008.
29. BUCH, A. **Fatigue strength calculation**. Brookfield - USA: Brookfield Publisher Co., 1987.
 30. BROBERG, K. B. On crack paths. **Engineering fracture mechanisms**, Lund - Sweden, v. 28, n. 5/6, p. 663-679, 1987.
 31. GUINIER, A. Advances in X-Ray and Neutron Diffraction Techniques. In: **Diffraction and Imaging Techniques in Material Science**. Paris: North-Holland Publishing Company, 1978.
 32. ROSSI, J. L. **The Fatigue Damage in a Fibre Reinforced Alloy**. Manchester: University of Manchester, 1991.
 33. SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos Fundamentos Práticos e Teóricos**. São Paulo - Brasil: Editora Blücher, 1982.
 34. HATCH, J. E. Aluminum: Properties and Physical Metalurgy. **ASM American Society for Metals, Aluminum Association**, New York - USA, n. 10a., p. 2-15, Abril 2005.
 35. DAVAMI, K.; BESHARATI, M. K.; SHAYGAN, M. Modeling of solidification conditions and melt treatment on microporosity formation. **International Journal of Mathematics and Computers in Simulation**, Isfahan - Iran, v. 2, n. 2, 2008.
 36. MURRAY, W. M.; STAIN, P. K. **Strain Gage Techniques Fundamentals Applications**. Massachusetts - USA: MIT Press, 1962.
 37. LU, J.; JAMES, M. R. Residual Stresses Measuring Methods, Senlis - France, 1996.
 38. FILDS, R. A.; MONAGHAN, R. C. Experiments to study strain-gage load calibrations on a wing structure at elevated temperatures. **NASA Flight Research Center**, Edwards - USA, August 1973.
 39. MONAGHAM, R. C.; FIELDS, R. A. Experiments to Study Strain-Gage Load Calibration on a Wing Structure at Elevated Temperatures. **National Aeronautics and Space Administration-Flight Research Center**, Edwards, 12 March 1973. 2-25.

40. ODEN, J. T. **Finite Elements of Nonlinear Continua**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972.
41. COLOSIO, M. A.; FERRANTE, R. P.; SANTOS, J. C. Virtual Simulation of Residual Stress in Aluminum Wheel Designs. **SAE International**, Detroit - USA, April 2009.
42. COLOSIO, M. A.; SANTOS, J. C. Influence of residual stresses in aluminum wheel design. **SAE International**, São Paulo - Brasil, October 2008. ISSN 2008-36-0139.
43. VANIN, V. R.; GOUFFON, P.; HELENE, O. **Análise Estatística de Medidas em Ciências Exatas**. São Paulo: [s.n.], 2005.
44. REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. 3ra. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
45. KOSTIC, M. Calibration of an measurements with strain gages. **Experimental Methods in mechanical engineering**, Illinois - USA, 1997.
46. MENIG, R. et al. Depth Profiles of Macro Residual Stresses in Thin Shot Peened Steel Plates Determined by X-Ray and Neutron Diffraction. **Scripta Materialia**, Karlsruhe, p. 977-983, Setembro 2001.
47. OSGOOD, W. R. **Residual Stress in Metals and Metal Construction**. New York - USA: Reinhold Publishing Corporation, 1954.
48. BEGHINI, M. et al. **Experimental Verification of the Hole Drilling Plasticity Effect Correction**. SINT Technology. Calenzano - Italy, p. 1 - 8. 2010.
49. NEUBERT, H. K. P. **Strain gauges kind and uses**. New York - USA: Macmillan&Co Ltda, 1967.
50. MODOLFO, L. F. ALUMINUM ALLOYS: Structure and Properties. **Butterworths**, 1976. 759-787.
51. LONSDALE, C.; DEMILLY, F.; FABBRO, V. D. Wheel RIM residual stress measurements, Dunkerque - France, 2000.
52. METHOD-E837-99, S. T. **"Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method"**. ASTM. [S.I.]. 1999.