LUIZ HENRIQUE DE MORAES ASSANO

**Aplicação do método de Neuber para obtenção de tensões não-lineares em
componentes automotivos fabricados em ferro fundido nodular**

São Paulo
(2018)

LUIZ HENRIQUE DE MORAES ASSANO

**Aplicação do método de Neuber para obtenção de tensões não-lineares em
componentes automotivos fabricados em ferro fundido nodular**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador:
Prof. Dr. Flavius Portella Ribas Martins

São Paulo
(2018)

LUIZ HENRIQUE DE MORAES ASSANO

**Aplicação do método de Neuber para obtenção de tensões não-lineares em
componentes automotivos fabricados em ferro fundido nodular**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador:
Prof. Dr. Flavius Portella Ribas Martins

São Paulo
(2018)

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Assano, Luiz Henrique de Moraes

Aplicação do método de Neuber para obtenção de tensões não-lineares em componentes automotivos fabricados em ferro fundido nodular / L. H. M. Assano -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

81 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Centro de Engenharia Automotiva.

1.Método de Neuber 2.Resistência dos materiais 3.Método dos elementos finitos 4.Tensão dos materiais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Centro de Engenharia Automotiva II.t.

*Dedico este trabalho a minha
família, que me deu toda a
força necessária para que o
mesmo pudesse se realizar.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por iluminar meus caminhos durante toda minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Flavius Portella Ribas Martins, que sempre esteve presente quando necessário, entendendo as dificuldades e contribuindo para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais Luiz e Selma, pelo constante incentivo aos estudos, carinho e amor dedicados durante toda minha vida.

Ao departamento de engenharia de produto (divisão automotiva) da ZF do Brasil da planta de Sorocaba, pelo constante incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao laboratório de materiais, laboratório dimensional e engenharia experimental da ZF do Brasil, pelos testes realizados.

À Universidade de São Paulo e ao Centro de Engenharia Automotiva (CEA) por todo suporte e resolução dos processos burocráticos.

Aos meus amigos e familiares que de alguma forma contribuíram para execução deste trabalho.

“Tudo posso naquele que me fortalece”.
(Filipenses 4:13)

RESUMO

As análises de tensões não-lineares por elementos finitos situadas no regime plástico do material demandam maior tempo de processamento computacional quando comparadas às análises lineares situadas no regime elástico. Os valores de tensões não-lineares podem ser obtidos por meio de metodologias analíticas de previsão de tensão aplicadas a componentes entalhados. Entre os métodos de obtenção de tensão em entalhes, destaca-se o método de Neuber. O presente trabalho visa avaliar a aplicação deste método aliado à análise de elementos finitos para a obtenção de tensões não-lineares em componentes automotivos fabricados em ferro fundido nodular contendo descontinuidades geométricas na superfície. Como referência foram utilizados valores de tensões obtidos através da técnica de extensometria, aplicados em dois diferentes modelos de alavancas contidas em transmissões de ônibus e caminhões. Todos os dados de entrada para os cálculos de elementos finitos foram obtidos através da caracterização do material por meio da realização de ensaios de dureza, tração e metalografia. A fim de verificar possíveis trincas ocasionadas pelos carregamentos aplicados, os componentes testados foram submetidos a ensaios de partículas magnéticas. Busca-se, assim, uma contribuição para a redução do tempo de desenvolvimento de novos produtos fabricados em componentes de ferro fundido nodular.

Palavras-Chave: Método de Neuber. Resistência dos materiais. Método dos elementos finitos. Tensão dos materiais.

ABSTRACT

The analyzes of nonlinear stresses by finite elements located in the plastic regime of the material demand a longer time of computational processing when compared to the linear analyzes located in the elastic regime. The values of nonlinear stresses can be obtained by analytical methodologies of stress prediction applied to notched components. Among the methods of obtaining stresses in notches, the Neuber method is outstanding. The present work aims to evaluate the application of this method, combined with the finite element analysis to obtain nonlinear stresses in automotive components made of nodular cast iron containing geometric surface discontinuities. As reference, stress values obtained through the strain gauge technique were used, applied in two different shift levers contained in bus and truck transmissions. All input data for the finite element calculations were obtained through the characterization of the material by means of hardness, tensile and metallography tests. In order to verify possible cracks caused by the applied loads, the tested components were subjected to magnetic particle tests. Thus, a contribution is made to reduce the development time of new products manufactured in nodular cast iron components.

Keywords: Neuber method. Strength of materials. Finite element method. Material stress.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	–	Fluxograma das sequencia dos processos realizados	13
Figura 2	–	Modelo de alavanca A	14
Figura 3	–	Modelo de alavanca B	15
Figura 4	–	Gradiente de tensão de um carregamento monotônico em um componente com concentrador de tensão	16
Figura 5	–	Variação dos fatores de concentração de tensão $K\sigma$ e deformação $K\epsilon$	17
Figura 6	–	Diferença entre os valores de tensão e deformação obtidos quando utilizados K_t , $K\sigma$ e $K\epsilon$.	18
Figura 7	–	Intersecção entre as curvas obtidas pelo método de Neuber, Ramberg-Osgood e Hooke	21
Figura 8	–	Representação gráfica da densidade de energia de deformação	22
Figura 9	–	Microscópio ICM 405 de platina invertida	24
Figura 10	–	Corpo de prova utilizado para análise metalográfica	25
Figura 11	–	Equipamento modelo Wolpert 300B utilizado para teste de dureza Brinell	26
Figura 12	–	Máquina Wolpert modelo 30 TUZ 757 utilizada para teste de tração	28
Figura 13	–	Dimensões do corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio de tração	29
Figura 14	–	Dimensões do corpo de prova retangular utilizado no ensaio de tração	29
Figura 15	–	Limas e lixas d'água utilizadas na preparação da superfície de colagem do extensômetro	31
Figura 16	–	Componentes utilizados para marcação e colagem	32
Figura 17	–	Equipamentos utilizados para soldagem dos terminais	33
Figura 18	–	Data Logger IMC CS 7008N utilizado para adquirir os dados do extensômetro	34
Figura 19	–	Interface do software IMC Studio 5.0 utilizado para configurar o sistema de aquisição de dados	35
Figura 20	–	Detalhamento do ambiente onde foi realizado os testes com extensômetros da alavanca do modelo A	36

Figura 21	–	a) Célula de carga modelo Typ C9B com capacidade de 50kN; b) Sensor de deslocamento modelo MT2A-30E	37
Figura 22	–	Aplicação do torque na alavanca por meio de um torquímetro unido a um prolongador	37
Figura 23	–	Prolongador adaptado para medição de torque	38
Figura 24	–	a) Agulha do perfilômetro na região analisada b) Tubo de seção circular ligado ao perfilômetro	40
Figura 25	–	a) Alavanca sendo banhada por um líquido contendo pó de ferro. b) Alavanca sendo exposta a fontes de luz negra	40
Figura 26	–	Ensaio de partículas magnéticas com excesso cola na região de análise	41
Figura 27	–	Adequação do modelo CAD na região em estudo da alavanca A	42
Figura 28	–	Adequação do modelo CAD na região em estudo da alavanca B	42
Figura 29	–	Alavanca do moelo A - (a) Perfil geométrico bruto; (b) Perfil geométrico modificado	43
Figura 30	–	Alavanca do modelo B - (a) Perfil geométrico bruto; (b) Perfil geométrico modificado	44
Figura 31	–	Tipos de contatos utilizados nas interfaces entre o parafuso e a alavanca	45
Figura 32	–	Alavanca do modelo A - (a) região de contato entre a morsa e a alavanca; (b) região à que foi atribuída a restrição no modelo de elementos finitos	45
Figura 33	–	Alavanca do modelo B - (a) região de contato entre a morsa e a alavanca; (b) região à que foi atribuída a restrição no modelo de elementos finitos	46
Figura 34	–	Força aplicada na alavanca do modelo A	47
Figura 35	–	Pré-carga do parafuso atribuída ao modelo de elementos finitos	49
Figura 36	–	Malha atribuída aos modelos matemáticos utilizados para os cálculos por elementos finitos; a) Alavanca A; b) Alavanca B	50
Figura 37	–	Micrografia de ferro fundido nodular GJS-400-15 com ampliação de 100x sem ataque químico	51
Figura 38	–	Micrografia do ferro fundido nodular GJS-400-15 com ampliação de 100x submetido a ataque químico de nital de 3%	53
Figura 39	–	Gráfico de tensão por deformação com alguns pontos utilizados para a obtenção do coeficiente e expoente de encruamento	55

monotônico

Figura 40	– a) Resultado de ensaio com partículas magnéticas na alavanca A; (b Resultado de ensaio com partículas magnéticas na alavanca B	56
Figura 41	– Perfil geométrico das alavancas	56
Figura 42	– Gráfico de tensão e força dos testes com extensômetros realizados nas alavancas do modelo A	57
Figura 43	– Gráfico de tensão e torque dos testes com extensômetros realizados nas alavancas do modelo B	59
Figura 44	– Resultado de tensão da análise linear por elementos finitos da alavanca de modelo A	61
Figura 45	– Resultado de tensão da análise não-linear por elementos finitos da alavanca de modelo A	62
Figura 46	– Resultado de tensão da análise linear por elementos finitos da alavanca de modelo B	64
Figura 47	– Resultado de tensão da análise não-linear por elementos finitos da alavanca de modelo B	65
Figura 48	– Gráfico com as curvas de tensão e deformação do material, curva de Neuber e resultado linear da alavanca de modelo A Gráfico com as curvas de tensão e deformação do material, curva de Neuber e resultado linear da alavanca de modelo A	67
Figura 49	– Gráfico com as curvas de tensão e deformação do material, curva de Neuber e resultado linear da alavanca de modelo B	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Estudo de convergência do tamanho ideal do elemento.....
Tabela 2	-	Resultados de dureza dos corpos de prova retirados das alavancas dos modelos A e B.....
Tabela 3	-	Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GJS-400-15 obtidas através de ensaio de tração.....
Tabela 4	-	Expoentes e coeficientes de encruamento monotônico.....
Tabela 5	-	Valores de forças encontradas referentes à tensão de 350MPa.....
Tabela 6	-	Valores de torques encontrados referentes à tensão de 350MPa.....
Tabela 7	-	Valores de tensão das análises de FEA e os respectivos resultados obtidos pelo método de Neuber.....

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
d	Diâmetro obtido no teste de dureza Brinell
d_2	diâmetro do passo da rosca do parafuso
D	Diâmetro da esfera
DK_m	Diâmetro efetivo na cabeça do parafuso
E	Módulo de elasticidade
F_{kgf}	Força em kgf
K	Coeficiente de encruamento monotônico
P	Passo da rosca
L_0	Comprimento inicial
L_f	Comprimento final
W_{nom}	Densidade de energia de deformação nominal
$W_{loc,e}$	Densidade de energia de deformação local no regime elástico do material
$W_{loc,p}$	Densidade de energia de deformação local no regime plástico do material
n	Expoente de encruamento monotônico
K_t	Fator de concentração de tensão em entalhe
K_σ	Fator de concentração de tensão
K_ϵ	Fator de concentração de deformação
σ_{loc}	Tensão local
σ_{nom}	Tensão nominal
$\sigma_{loc,e}$	Tensão local no regime elástico do material
$\sigma_{loc,p}$	Tensão local no regime plástico do material
ϵ	Deformação específica
ϵ_{loc}	Deformação local no entalhe
ϵ_{nom}	Deformação nominal no entalhe
$\epsilon_{loc,e}$	Deformação local no regime elástico do material
$\epsilon_{loc,p}$	Deformação local no regime plástico do material
μ_G	Coeficiente de atrito na rosca do parafuso
μ_K	Coeficiente de atrito na cabeça do parafuso

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	15
3. ESTADO DA ARTE	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1. Análise de tensão-deformação em entalhes no regime elastoplástico	22
4.1.1. Fator de concentração de tensão	22
4.1.2. Curva de tensão-deformação de Ramberg e Osgood	25
4.1.3. Métodos de previsão de aproximação de tensão na raiz de entalhes	26
4.2. Caracterização do material	31
4.2.1. Análise metalográfica	31
4.2.2. Ensaio de dureza	33
4.2.3. Ensaio de tração	34
4.3. Extensometria	37
4.3.1. Introdução	37
4.3.2. Colagem dos extensômetros	37
4.3.3. Modelo de extensômetro utilizado	40
4.3.4. Aquisição de dados	41
4.3.5. Aplicação dos carregamentos	42
4.4. Perfilometria	46
4.5. Ensaio de partículas magnéticas	47
4.6. Caracterização do modelo de elementos finitos	48
4.6.1. Introdução	48
4.6.2. Modelo matemático	49
4.6.3. Software de elementos finitos	51
4.6.4. Pré-processamento	51
4.6.5. Malha	55
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	58
5.1. Análise metalográfica	58
5.2. Ensaio de dureza	59
5.3. Ensaio de tração	60
5.3.1. Ensaio de tração com corpos de prova cilíndricos	60
5.3.2. Ensaio de tração com corpos de prova retangular	61
5.4. Partículas magnéticas	62
5.5. Perfilometria	64
5.6. Resultados dos testes com extensometria	66
5.6.1. Alavanca A	66
5.6.2. Alavanca B	67
5.7. Elementos finitos	69
5.7.1. Alavanca A	69
5.7.2. Alavanca B	71
5.8. Aplicação do método de Neuber	73
6. CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A – Planilha com a tabela do método de Neuber	81

1. INTRODUÇÃO

Em virtude da competitividade entre as empresas, pesquisas para obter tanto a redução de tempo como de custos no desenvolvimento de novos produtos têm crescido a cada dia, justificando investimentos em know-how e tecnologia. Com o objetivo de manter a qualidade dos produtos fornecidos e diminuir a quantidade de testes necessários para validá-los, as empresas utilizam ferramentas auxiliares como simulações computacionais, nas quais é possível sugerir a geometria mais adequada para um produto ou componente antes mesmo deste ser fabricado. Entretanto, para a utilização eficaz destas ferramentas deve-se ter amplo conhecimento dos dados de entrada e das propriedades dos materiais a serem declarados.

Vários componentes de engenharia contêm descontinuidades geométricas, como ranhuras, furos, roscas e nervuras, geralmente, denominados de entalhe. Quando um componente é solicitado por um carregamento externo, normalmente a tensão se concentra nestas regiões de entalhes. Em alguns casos, as tensões nestas regiões podem ultrapassar o limite de escoamento do material ocasionando uma deformação plástica de uma pequena área ao redor do entalhe ou uma pequena fissura tendo como consequência a redução da vida útil e/com a fadiga do material.

Através de análise não-linear, pelo método dos elementos finitos, é possível prever a tensão em regiões com entalhes quando solicitada por um carregamento estático ou cíclico. No entanto, para realizar uma análise não-linear, além de demandar muito tempo, requer equipamentos de alto desempenho, bem como softwares apropriados para compreensão correta do comportamento do material. A fim de simplificar este processo, é utilizada a teoria da conversão de tensão linear em não-linear em entalhes, proposta, em 1961, por Heinz Neuber.

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho consiste em verificar a adequação da metodologia de obtenção de tensões não-lineares em entalhes, proposta por Neuber, à análise de componentes fabricados em ferro fundido nodular de transmissões para ônibus e caminhões. Pretende-se ainda, neste trabalho, investigar a possibilidade de inclusão do método de Neuber como método de pré-cálculo, antecedendo assim a etapa de análise não-linear pelo método dos elementos finitos. Como o desenvolvimento de um novo produto decorre de duas fases de cálculo – a primária, que verifica as regiões nas quais há necessidade de alteração de geometria, e a secundária, cujo objetivo é aprovar a geometria para início dos testes –, pretende-se reduzir a apenas uma fase os cálculos realizados no desenvolvimento de novos componentes submetidos a deformações plásticas.

O cumprimento dos objetivos propostos será concretizado tendo por base dados experimentais e a partir da utilização do método dos elementos finitos em um caso vigente da empresa ZF do Brasil, em que um determinado componente em ferro fundido para transmissões de ônibus e caminhões sofre deformação plástica quando submetido a um dado carregamento.

3. ESTADO DA ARTE

A técnica mais conhecida de análise de previsão de tensões e deformações não-lineares em entalhes se dá através do método proposto por Neuber, que descreve a tensão e a deformação no regime elastoplástico, com o estabelecimento de relações entre as propriedades monotônicas do material. Neste capítulo, apresenta-se o resultado de alguns estudos pertinentes ao desenvolvimento de metodologias, para a previsão de tensões e deformações em entalhes, baseado no método de Neuber, bem como a análise de alguns projetos que tange à solução de problemas similares ao que é objeto de investigação deste trabalho.

Analisar somente as tensões e deformações em entalhes, quando submetidos apenas a carregamentos monotônicos, pode comprometer a durabilidade do componente. Com o propósito de desenvolver um método analítico para a obtenção de tensões e deformações não-lineares, em condições cíclicas, Topper, Wetzel e Morrow (1967) propuseram em seu trabalho uma metodologia para previsão de vida em fadiga de componentes com entalhes, na qual são utilizados como parâmetros de entrada os resultados obtidos pelo método de Neuber e os níveis de tensões residuais decorrentes da histerese do material, obtidos em testes a partir dos primeiros ciclos de amplitude constante. Para a validação do método, foram realizados testes em corpos de provas fabricados em chapas de alumínio, com entalhes submetidos a cargas cíclicas completamente reversas e, posteriormente, comparados à metodologia analítica. Outro estudo realizado para a obtenção das tensões e das deformações em entalhes submetidos a cargas cíclicas foi proposto por Wu (1988), trata-se de um método aprimorado da fórmula de Neuber, quando exposto à fadiga de baixo ciclo. Este método consiste em acrescentar à referida fórmula um fator denominado pela letra m , o qual tem o propósito de aumentar a precisão dos resultados de tensão e deformação em fadiga de baixo ciclo.

Grande parte dos componentes mecânicos, em situações de funcionamento, é submetida a diferentes tipos de carregamentos de forma simultânea, resultando, assim, em um estado multiaxial de tensões. Para encontrar as tensões no estado multiaxial, Hoffman e Seeger (1989) propuseram um método analítico de previsão de tensões em entalhes, quando submetidos a carregamentos multiaxiais. O método é dividido em duas partes: primeiro, estabelece-se a relação entre o carregamento

aplicado e a tensão na raiz do entalhe, para o estado multiaxial de tensões, na qual são substituídos os valores uniaxiais por valores de tensão e deformação equivalentes, baseando-se no critério de escoamento de von Mises ou Tresca. Na segunda etapa, a tensão e a deformação principal, na raiz do entalhe, são relacionadas com a tensão e a deformação equivalente, obtidas na primeira parte, ao aplicar a teoria da plasticidade proposta por Ramberg e Osgood (1943). A validação deste método foi feita por meio de experimentos em uma barra de seção circular com entalhe e submetido a carregamentos de tração, torção e flexão.

Diante de vários métodos propostos por diferentes pesquisadores, para a obtenção de tensões em entalhes no regime elastoplástico, Navathe (1997) realizou um estudo comparativo entre os métodos de Neuber (1961), Neuber modificado (WU, 1988) e o método de densidade de energia de deformação local, proposto por Glinka e Molski (1980), quando submetidos a carregamentos cíclicos. Através de resultados experimentais realizados em corpos de prova, o autor concluiu que o método convencional proposto por Neuber superestima os valores de tensão na raiz do entalhe, enquanto que o método de densidade de energia de deformação subestima os valores de tensão. Os resultados obtidos pelo método de Neuber modificado resultaram em valores de tensão mais próximos dos obtidos em testes, portanto, o mais indicado para solicitações de carregamentos cíclicos.

Levando em consideração situações em que há variações de temperatura do meio externo, às quais o componente está submetido, Lucas e Martin (1983) realizaram um estudo para verificar a eficácia do método proposto por Neuber, quando aplicados em componentes com entalhes expostos a altas temperaturas. Este estudo foi elaborado para a validação de componentes agregados a motores para indústria de aeronaves, como, por exemplo, lâminas de turbinas, palhetas e componentes que compõem as câmaras de motores de combustão interna. Como parte do estudo, foram realizados testes com auxílio de extensômetros em componentes submetidos a carregamentos cíclicos quando expostos à temperatura de 650°C.

Com a finalidade de utilizar princípios da termodinâmica para a obtenção de tensões em componentes mecânicos, Duij, Hertel e Vormwald (2008) propuseram uma expressão unificada para as deformações de corpos sólidos, quando

submetidos a carregamentos cíclicos no estado multiaxial de tensões. O objetivo do estudo residiu em estabelecer uma relação entre o método de previsão de tensão em entalhes e a primeira lei da termodinâmica para a obtenção de tensões no regime elastoplástico do material. No mesmo ano, seguindo a premissa de encontrar um método alternativo para a obtenção de tensões e deformações em componentes mecânicos, Samuelsson (2008) apresentou, em seu artigo, o estudo de uma técnica para a obtenção de tensão no regime elastoplástico do material em superfícies com descontinuidades geométricas. A técnica é denominada de Super Neuber Technique, e teve seu desenvolvimento baseado na fórmula que origina a figura geométrica superelipse e na regra convencional da hipérbole de Neuber. Para utilização desta técnica, é necessária a calibração dos parâmetros de entrada realizada através de análises não-lineares por elementos. Quando estes parâmetros já estão determinados, é possível calcular a tensão e a deformação corrigida para a sequência completa de carregamentos cíclicos. No artigo, o autor compara a qualidade dos resultados com análises não-lineares de elementos finitos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de atingir os objetivos deste trabalho, estabeleceram-se algumas etapas fundamentais para a verificação da metodologia aplicada. Para melhor compreensão da teoria utilizada no presente estudo, no tópico que se inicia serão apresentadas algumas fundamentações teóricas, referentes à análise de tensão e deformação em entalhes no regime elastoplástico. Posteriormente, serão apresentados todos os ensaios realizados para a verificação da autenticidade do ferro fundido GJS-400-15, nesta etapa foram utilizados corpos de prova retirados do próprio componente com o intuito de se obter as propriedades reais do material. No tópico seguinte, serão descritos de forma minuciosa não só todos os passos para a colagem dos extensômetros, bem como a limpeza da região em que foi colado, nesta etapa foi necessário remover uma pequena parcela de material para manter a superfície livre de irregularidades, por isso, fez-se necessário retroalimentar o modelo matemático com o novo perfil, encontrado através da técnica de perfilometria, também tratado neste capítulo, e, por fim, será apresentada a caracterização do modelo de elementos finitos. A seguir, é apresentado um fluxograma com a sequência dos processos realizados:

Figura 1 – Fluxograma das sequencia dos processos realizados

Todas as etapas indicadas na figura acima são descritas minuciosamente nos tópicos que se seguem.

Os componentes escolhidos para o estudo de caso deste trabalho foram duas alavancas de mudança da empresa ZF do Brasil. Estes componentes são fabricados em ferro fundido nodular do tipo GJS-400-15, com aplicações em veículos comerciais como ônibus e caminhões da linha pesada. As alavancas, que neste trabalho serão denominadas Alavanca do modelo A e Alavanca do modelo B, são responsáveis por receberem os esforços para a seleção e a troca de marcha dos veículos, proveniente da mão do motorista, através de um cabo de aço fixado em um pino localizado na região extrema das alavancas.

As alavancas são montadas em um eixo de extremidade hexagonal e fixadas por um parafuso que, após o aperto, mantém o contato entre as duas peças. As figuras 24 e 25, mostradas a seguir, são representações dos modelos em CAD das alavancas montadas nas respectivas transmissões:

Figura 2 – Modelo de alavanca A

Figura 3 - Modelo de alavanca B

Existem diferentes modelos de alavancas vigentes para uma gama diversificada de transmissões, assim como diferentes materiais utilizados para fabricação destas. Entretanto, a escolha destes modelos de alavancas para os testes apresentados neste estudo foi feita em função da disponibilidade de estoque, região hábil para a colagem dos extensômetros e o volume de material adequado para a retirada de corpos de prova, utilizados posteriormente para a obtenção das propriedades do material.

4.1. Análise de tensão-deformação em entalhes no regime elastoplástico

4.1.1. Fator de concentração de tensão

A teoria elementar sobre tensão utilizada para o desenvolvimento de novos componentes se fundamenta nas partes com seções constantes ou seções com variações graduais no contorno. É possível citar como exemplo de concentração de tensão regiões com ranhuras, furos, rebaixos, entalhes ou outros tipos de descontinuidades que resultam em tensões localizadas ou mudanças na distribuição da tensão cujas regiões são chamadas de concentração de tensão.

Emprega-se um fator de concentração de tensão para relacionar a tensão nominal na descontinuidade com a tensão local. Este fator será denominado neste trabalho como K_t e pode ser obtido através do quociente entre tensão local (σ_{loc}) e tensão nominal (σ_{nom}), conforme equação a seguir:

$$K_t = \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{nom}} \quad (4.1)$$

A figura 1 ilustra um modelo geométrico submetido a um carregamento monotônico uniaxial (F) com concentrador de tensão de fator (K_t). O modelo foi dividido em duas regiões, sendo região de tensão nominal (σ_{nom}), situado na superfície em que não há descontinuidades geométricas e tensão local (σ_{loc}) situado na região com concentração de tensão:

Figura 4 – Gradiente de tensão de um carregamento monotônico em um componente com concentrador de tensão

De acordo com Bannantine (1989), o fator de concentração de tensão mantém-se constante até o limite de escoamento demarcado como ponto A da figura 2 apresentada a seguir. Após o escoamento do material, este fator divide-se em fator de concentração de tensão e fator de concentração de deformação, não sendo mais

relacionado linearmente entre eles. Portanto, os valores de concentração de tensão e deformação passam a ser respectivamente K_σ e K_ϵ , conforme gráfico a seguir:

Figura 5 - Variação dos fatores de concentração de tensão K_σ e deformação K_ϵ

O fator de concentração de deformação (K_ϵ) é definido como o quociente entre a deformação local no entalhe (ϵ_{loc}) e a deformação nominal (ϵ_{nom}), conforme equação apresentada a seguir:

$$K_\epsilon = \frac{\epsilon_{loc}}{\epsilon_{nom}} \quad (4.2)$$

Analogamente o fator de concentração de tensão (K_σ) é definido como o quociente entre a tensão local (σ_{loc}) no entalhe e a tensão nominal (σ_{nom}), conforme equação a seguir:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{nom}} \quad (4.3)$$

Após o escoamento do material, o fator de concentração de tensão (K_σ) diminui em relação à (K_t), enquanto o fator de concentração de deformação (K_ϵ) aumenta.

A tensão e a deformação obtidas pelo método de Hooke variam quando passado o limite de escoamento do material, esse comportamento denominado de plasticidade é apresentado na figura 3. No gráfico, a tensão local no regime elástico ($\sigma_{loc,e}$) marcada no ponto A é mais alta quando comparada à tensão local no regime plástico ($\sigma_{loc,p}$) marcada no ponto B, isto se deve ao uso do fator de concentração de tensão (K_t), utilizado para a obtenção da tensão localizada.

Figura 6 – Diferença entre os valores de tensão e deformação obtidos quando utilizados K_t , K_σ e K_ϵ .

4.1.2. Curva de tensão-deformação de Ramberg e Osgood

As curvas de tensão-deformação dos materiais são comumente necessárias para os cálculos estruturais. No entanto, sem dados de teste representativos, é necessária uma aproximação da curva. A equação proposta por Ramberg e Osgood (1943) pode ser usada para aproximar a curva tensão-deformação de um material sabendo apenas o módulo de elasticidade, o limite de escoamento e o coeficiente e

expoente de encruamento monotônicos do material. A curva tensão-deformação pode ser descrita como a soma das deformações elástica e plástica, conforme equação apresentada a seguir:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.4)$$

Em que:

E: módulo de elasticidade

K: coeficiente de encruamento monotônico

n: expoente de encruamento monotônico

O coeficiente de encruamento monotônico (K) determina a magnitude da tensão no regime plástico da curva tensão-deformação, sendo representado pela unidade de tensão (MPa). O expoente de encruamento monotônico (n) compreende uma medida da taxa de endurecimento da curva de tensão-deformação do material.

4.1.3. Métodos de previsão de aproximação de tensão na raiz de entalhes

4.1.3.1. Método de Neuber

No início da década de 60, Heinz Neuber propôs um método para calcular a tensão e a deformação na raiz de entalhes quando excedido o limite de escoamento do material, no qual é utilizado como parâmetro o fator de concentração de tensão (K_t). Este método é indicado para as situações em que não haja disponibilidade de ferramentas computacionais para cálculos não-lineares. A regra proposta por Neuber determina que o coeficiente de concentração de tensão (K_t) seja equivalente à média geométrica dos fatores de concentração de tensão e deformação. Em outras palavras, é a raiz quadrada do produto K_σ e K_ε , conforme equação apresentada a seguir:

$$K_t = \sqrt{K_\sigma \cdot K_\varepsilon} \quad (4.5)$$

Substituindo as equações (4.2) e (4.3) na equação (4.5) e admitindo-se que o comportamento de deformação nominal é elástico, ou seja, seguindo a lei estabelecida por Hooke ($\sigma = \varepsilon \cdot E$), obtém-se a seguinte relação:

$$\sigma \cdot \varepsilon = \frac{(K_t \cdot \sigma_{nom})^2}{E} \quad (4.6)$$

Para a aplicação deste método é necessário vincular a fórmula proposta por Neuber à curva tensão-deformação do material obtida através da equação proposta por Ramberg e Osgood, apresentada no tópico 4.1.2. A intersecção dessas duas curvas define o valor de tensão desejado no regime de plasticidade do material.

A figura 4, apresentada a seguir, exhibe a aplicação do método em um carregamento monotônico em que o ponto A é o valor obtido seguindo a lei de Hooke; e o ponto B é o valor de tensão obtido pelo método de aproximação de tensão proposto por Neuber.

Figura 7 – Intersecção entre as curvas obtidas pelo método de Neuber, Ramberg-Osgood e Hooke

4.1.3.2. Método de Molski e Glinka

De acordo com Stephens et al. (2001), outro procedimento de aproximação de tensão no regime elastoplástico que pode ser usado de forma similar ao método de Neuber é o método proposto por Glinka, em 1985. Este método é baseado em considerações energéticas, o qual leva em consideração que a densidade de energia de deformação local no entalhe quando no regime elástico é aproximadamente igual quando comparado ao regime plástico do material, desde que a região de plasticidade esteja confinada a um pequeno volume sitiado por um campo de tensão. A representação gráfica desta teoria é apresentada na figura 5,

onde as energias de deformação elástica e plástica são representadas respectivamente por W_e e W_p .

Figura 8 - Representação gráfica da densidade de energia de deformação.

Para a tensão nominal (σ_{nom}) (região em que não há descontinuidades geométricas) no regime elástico do material, a densidade de energia de deformação (W_{nom}) é dada por:

$$W_{nom} = \int_0^{\epsilon_{nom}} \sigma_{nom} d\epsilon_{nom} = \int_0^{\sigma_{nom}} \frac{\sigma_{nom}}{E} d\sigma_{nom} = \frac{\sigma_{nom}^2}{2E} \quad (4.7)$$

Considerando um fator de concentração de tensão (K_t) na raiz do entalhe, bem como um comportamento linear elástico, define-se a densidade de energia de deformação através da seguinte equação:

$$W_{loc,e} = \int_0^{\varepsilon_{loc,e}} \sigma_{loc,e} d\varepsilon_{loc,e} = \int_0^{\sigma_{loc,e}} \frac{\sigma_{loc,e}}{E} d\sigma_{loc,e} = \frac{\sigma_{loc,e}^2}{2E} = \frac{(K_t \sigma_{nom})^2}{2E} \quad (4.8)$$

Assumindo um comportamento elastoplástico na raiz do entalhe, define-se a densidade de energia de deformação quando também incorporado o método proposto por Ramberg-Osgood por:

$$W_{loc,p} = \int_0^{\varepsilon_{loc,p}} \sigma_{loc,p} d\varepsilon_{loc,p} = \frac{\sigma_{loc,p}^2}{2E} + \frac{\sigma_{loc,p}}{n+1} \cdot \left(\frac{\sigma_{loc,p}}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4.9)$$

E por fim, igualando as densidades de energia de deformação, dadas pelas duas equações anteriores, define-se para um carregamento monotônico as seguintes equações:

$$W_p = W_e \quad (4.10)$$

$$\frac{\sigma_{loc,p}^2}{2 \cdot E} + \frac{\sigma_{loc,p}}{n+1} \cdot \left(\frac{\sigma_{loc,p}}{K} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{(K_t \cdot \sigma_{nom})^2}{2E} \quad (4.11)$$

4.2. Caracterização do material

Este tópico tem como propósito apresentar a caracterização do material ferro fundido nodular GJS 400-15, a partir de ensaios realizados na ZF do Brasil. Todos os valores obtidos através de testes aqui apresentados serviram como base para alimentar os cálculos por elementos finitos e verificar a autenticidade do material.

A caracterização do material foi realizada em três etapas, sendo elas: a análise metalográfica, o ensaio de dureza e o ensaio de tração. Os resultados foram utilizados para comparar com as respectivas normas vigentes que especifica as tolerâncias admissíveis das propriedades do material e também utilizados para alimentar os dados de entrada dos cálculos por elementos finitos. Tais etapas serão descritas pormenorizadamente nos tópicos seguintes.

4.2.1. Análise metalográfica

A análise metalográfica do material utilizado no componente em estudo foi realizada no laboratório de materiais da ZF do Brasil, através de um microscópio da marca Zeiss modelo ICM 405 de platina invertida com capacidade de ampliação de até 500x, conforme apresentado na figura 6, cujo principal objetivo era verificar se o formato da microestrutura atende aos requisitos da norma DIN 945 estabelecida para o ferro fundido nodular GJS-400-15.

Figura 9 – Microscópio ICM 405 de platina invertida

Para a obtenção de bons resultados e devido à capacidade do campo focal do equipamento, é necessário que a preparação da amostra seja realizada com alto rigor de precisão, pois se encontra ligada diretamente à qualidade das análises. Por este motivo, e com o propósito de manter a representação do modelo real, o corpo de prova foi retirado da própria peça. A figura 7 exibe o corpo de prova após receber todos os processos de adequação da superfície. As etapas de preparação da superfície da amostra iniciaram-se com a retirada de um volume bruto da peça com a forma de um cubo, com dimensões suficientes para adequar-se ao alojamento do microscópio, bem como ao alojamento da máquina de ensaio de dureza. O corte da amostra bruta foi feito com discos de corte abrasivo, perante refrigeração, que possibilitou obter seções com boa qualidade e baixo nível de modificação na superfície da estrutura. Em seguida, a superfície da amostra foi lixada e polida, em que ambos os processos foram realizados em um equipamento com discos rotativos submetidos à refrigeração e, por último, embutida em um volume de baquelite, este processo de embutimento foi realizado à alta temperatura por resultar em boa qualidade da superfície em um curto espaço de tempo e sua cura ocorreu sob pressão de aproximadamente 190 kgf/cm². O baquelite utilizado para envolver a amostra tem como propósito protegê-la durante a preparação e facilitar o seu manuseio. A fim de revelar as interfaces entre os diferentes constituintes que compõe o material, a amostra foi submetida à ataque com reagente químico de nital (ácido nítrico e álcool). As análises de metalografia foram realizadas com ampliação de 100x.

Figura 10 – Corpo de prova utilizado para análise metalográfica

4.2.2. Ensaio de dureza

De acordo com a norma ASTM E 10, o teste Brinell compreende um método para a obtenção de dureza que utiliza um penetrador em formato esférico, geralmente de tungstênio. A esfera é colocada em contato com a superfície plana da amostra e mantida com uma força constante, por um tempo de 10 a 30 segundos. A magnitude da força e o diâmetro da esfera podem variar de acordo com o material a ser testado.

Para determinar a dureza Brinell do material da alavanca, foi utilizado o mesmo corpo de prova da análise metalográfica, na qual a preparação da superfície foi retratada no tópico anterior. Foi utilizado um equipamento da marca Otto Wolpert, modelo 300B, com capacidade de 4.000kg, conforme apresentado na figura 8, com carga de 765kgf e esfera de 5mm de diâmetro. Este procedimento foi realizado seguindo os parâmetros estabelecidos na norma ASTM E 10.

Figura 11 – Equipamento modelo Wolpert 300B utilizado para teste de dureza Brinell

Conforme a norma ASTM E10, os valores de dureza Brinell são obtidos através da seguinte fórmula:

$$HBW = \frac{2F_{kgf}}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4.12)$$

Onde:

F_{kgf} : força aplicada em kgf

D : diâmetro da esfera em mm

d : diâmetro em mm obtido após aplicação da força

4.2.3. Ensaio de tração

Segundo Souza (1982), o ensaio de tração consiste em submeter um corpo sólido a um carregamento que tende a estendê-lo. O ensaio, normalmente, é feito em amostras com dimensões estabelecidas por normas para que, posteriormente, os valores obtidos sejam correlacionados ou reproduzidos. A amostra é presa em uma máquina para ensaios de tração e submetida a um carregamento contínuo na direção axial até a sua ruptura, tendo como objetivo obter os valores de deformação e tensão.

Os ensaios de tração para a obtenção das propriedades do material ferro fundido GJS-400-15 foram separados em duas partes: ensaios com corpos de prova de seção circular e ensaios com corpos de prova de seção retangular. Foram realizados no laboratório de materiais da ZF do Brasil, em uma máquina universal da empresa Otto Wolpert modelo 30 TUZ 757, conforme figura 9, com capacidade de até 30 toneladas, apropriada para ensaios de tração e compressão. Os resultados foram plotados no software de determinação de propriedades mecânicas Dina Teste.

Figura 12 – Máquina Wolpert modelo 30 TUZ 757 utilizada para teste de tração

Os ensaios de tração, com corpos de provas de seção circular, foram realizados com o propósito encontrar o limite de escoamento, limite de ruptura e módulo de elasticidade, além de verificar se os valores obtidos enquadram-se nas especificações da norma referente aos ferros fundidos nodulares. Foram utilizados quatro corpos de prova, retirados das próprias alavancas, com dimensões conforme as especificações da norma DIN 50125, ilustrado na figura 10, que são apropriadas para corpos de provas metálicos:

Figura 13 – Dimensões do corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio de tração

Os ensaios de tração, com corpos de provas de seção retangular, foram realizados com o propósito encontrar o coeficiente e o expoente de encruamento monotônico. Devido ao tamanho dos corpos de prova utilizados para este tipo de ensaio ser maior do que a área hábil para retirada de material das alavancas, foi necessário utilizar corpos de prova retirados de blocos em formato Y, fornecidos pela empresa Schulz, contendo o mesmo material adotado na fabricação das alavancas em estudo com dimensões conforme as especificações da norma ASTM E646, ilustrado na figura 11:

Figura 14 – Dimensões do corpo de prova retangular utilizado no ensaio de tração

4.3. Extensometria

4.3.1. Introdução

A técnica de extensometria foi utilizada com o propósito de obter valores de referência para os cálculos de elementos finitos e para a aplicação da metodologia de previsão de tensão na raiz de entalhes. O monitoramento das tensões foi realizado com a instalação de extensômetros elétricos na peça em estudo e ligados a um sistema de aquisição de dados fornecidos pela IMC. De acordo com Portela (2006), os extensômetros são definidos como equipamento utilizado experimentalmente para analisar as deformações ocorridas em um ponto e direção específica de uma peça ou corpo de prova. Na prática, os extensômetros medem a variação de espaço ΔL de dois pontos inicialmente distante, distância essa que se designa por base de medida, sendo a deformação dada por:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (4.13)$$

Onde:

ε : deformação específica

L_o : comprimento inicial

L_f : comprimento final

Todos os procedimentos experimentais com extensometria foram realizados na engenharia experimental da ZF do Brasil e serão descritas de forma minuciosa nos tópicos a seguir.

4.3.2. Colagem dos extensômetros

Para a colagem dos extensômetros foi necessário, primeiramente, a preparação da região a ser analisada, objetivando melhor aderência dos extensômetros. Esta preparação consistiu na remoção de uma pequena parcela de material e impurezas

através do uso de ferramentas apropriadas para este tipo de atividade. Este processo foi dividido em quatro etapas, sendo estas:

- a) Limpeza primária;
- b) Limpeza secundária;
- c) Colagem;
- d) Soldagem.

A região em que foi colado o extensômetro foi escolhida e orientada com base em resultados de cálculos por elementos finitos que mostrou ser uma região com valores de tensão acima do limite de escoamento. Todas as etapas do processo de preparação para colagem do extensômetro são descritas nos tópicos a seguir:

- a) Limpeza primária:** esta etapa constituiu em deixar a face de colagem do extensômetro plana, livre de irregularidades e tinta. Por se tratar de um componente fabricado em ferro fundido, a superfície detém altas irregularidades como, por exemplo, o ângulo de saída que é definido ainda na fase do projeto e tem como propósito facilitar a retirada da peça do molde. Nesta etapa foram utilizadas limas para deixar a superfície regular e lixas d'água para diminuir a rugosidade da superfície, conforme figura 12. É indicado que a face que será colada os extensômetros mantenha uma superfície com certo grau de rugosidade para permitir a melhor aderência da cola, por isso, a superfície foi lixada na diagonal (aproximadamente 45°) em relação ao plano de trabalho do extensômetro.

Figura 15 - Limas e lixas d'água utilizadas na preparação da superfície de colagem do extensômetro

- b) Limpeza secundária:** A limpeza secundária foi feita com o uso de álcool isopropílico, pois contém baixo teor de água e diminui as chances de oxidação da região analisada. Esta fase teve como objetivo retirar pequenas impurezas contidas na superfície que pudesse vir a influenciar na eficácia da colagem.
- c) Colagem:** Para colagem dos extensômetros foi necessário o uso de alguns componentes para realizar a marcação da região a ser colada, conforme demonstrado na figura 13. Primeiramente, com uma régua e a esfera contida na ponta de uma caneta esferográfica foi feita uma leve marcação da região em que seria alocado o extensômetro. O uso da caneta esferográfica se fez necessário, pois a marcação deve ser pequena o suficiente a ponto de ser visível e não criar uma região de concentração de tensão influenciando, assim, o valor do resultado final. Em seguida, usou-se uma fita adesiva transparente e, com auxílio de um pedaço de papel, foi feita a colagem utilizando a cola do modelo Loctite 496, ideal para este tipo de aplicação.

Figura 16 - Componentes utilizados para marcação e colagem

d) Soldagem: após ser feita a colagem dos extensômetros foi realizada a colagem dos terminais utilizados para unir os fios provenientes do extensômetro com o sistema de aquisição de dados. O processo de colagem dos terminais foi efetuado de forma idêntica à colagem dos extensômetros, conforme citado anteriormente. Para a soldagem do fio de cobre do extensômetro com a fiação do sistema de aquisição de dados foram utilizados uma estação de solda e um fio de níquel de 0,5mm de diâmetro. Convém observar que a limpeza da oxidação contida na superfície dos terminais que foi feita com o uso de um lápis borracha. O último passo foi verificar se o sistema não estava em curto, para isso foi utilizado um multímetro digital. Todos os componentes utilizados nesta etapa estão apresentados na figura a seguir:

Figura 17 - Equipamentos utilizados para soldagem dos terminais

4.3.3. Modelo de extensômetro utilizado

Para a obtenção das tensões na região em estudo foi empregada a técnica de extensometria com extensômetros elétricos do PA-06-120-L da empresa Excel Sensores com configuração para a aplicação de carregamentos unidirecionais e compensador de temperatura. Escolheu-se este modelo por atender as especificações para deformação de até 2% em carregamentos estáticos com deformação unidirecional.

4.3.4. Aquisição de dados

Para a aquisição dos dados obtidos através dos testes com extensômetros foi utilizado um Data Logger IMC CS 7008N, conforme figura 15, configurado com circuito de $\frac{1}{4}$ de ponte. O equipamento foi conectado a um notebook Lenovo T460 através de cabo de rede com plug RJ45. Para a leitura e a configuração do sistema utilizou-se o software IMC Studio 5.0, cuja interface é apresentada na figura 16.

Figura 18 – Data Logger IMC CS 7008N utilizado para adquirir os dados do extensômetro

Figura 19 – Interface do software IMC Studio 5.0 utilizado para configurar o sistema de aquisição de dados

4.3.5. Aplicação dos carregamentos

Os carregamentos aplicados nos testes das alavancas foram divididos em duas partes, força uniaxial vertical aplicada nas alavancas de modelo A e pré-carga de parafuso, utilizado nas alavancas de modelo B. Esta divisão foi realizada para ter dois parâmetros diferentes de resultados. Os testes das alavancas do modelo B são resultados mais próximos da realidade de montagem da alavanca, enquanto que o carregamento da alavanca do modelo A elimina a variável contato, reduzindo, desse modo, o uso computacional. A seguir serão apresentadas minuciosamente as etapas para aplicação dos carregamentos da alavanca de modelo A e modelo B.

4.3.5.1. Aplicação do carregamento na alavanca de modelo A

Este processo consistiu em aplicar uma força vertical no mesmo sentido de aplicação da pré-carga do parafuso. Foram utilizados sensores de deslocamento e celular de carga ligados diretamente em um data logger. A força foi aplicada através de uma prensa manual suportada por uma bancada de aço. A alavanca foi colocada sobre a bancada e nivelada com o auxílio de dois dispositivos colocados em cada extremo da alavanca. A figura 17, apresentada a seguir, exhibe o ambiente em que foi realizada a aplicação da força vertical:

Figura 20 - Detalhamento do ambiente onde foi realizado os testes com extensômetros da alavanca do modelo A

Os sensores utilizados para este teste foram: célula de carga da marca HBM modelo Typ C9B com capacidade de carga de 50kN e um sensor de deslocamento da marca Celesco e modelo MT2A-30E-9, conforme exibido na figura 18 apresentada a seguir:

Figura 21 - a) Célula de carga modelo Typ C9B com capacidade de 50kN; b) Sensor de deslocamento modelo MT2A-30E

4.3.5.2. Aplicação do carregamento na alavanca de modelo B

Em uma ocasião em que se deseja uma conexão que possa vir a ser desmontada a posteriori sem utilizar métodos destrutivos e que seja, suficientemente, resistente para suportar os carregamentos externos de tração, cisalhamento ou a combinação destas, a solução ideal é empregar uma junta aparafusada. O efeito da aplicação do torque é a pré-carga do parafuso que tem como propósito não apenas dar às partes em contato maior resistência aos carregamentos externos, como também aumentar o atrito entre as peças. No estudo de caso apresentado neste trabalho o parafuso foi utilizado para aproximar duas regiões de uma alavanca de mudança simulando um caso real de montagem da empresa. O resultado foi a obtenção de tensão no regime plástico do material em uma região específica da superfície da peça.

A pré-carga utilizada para a obtenção das tensões não-lineares na região estudada foi aplicada através de um torquímetro preparado com extensômetro do modelo roseta na superfície do corpo do prolongador responsável pela transferência do torque entre o torquímetro e o parafuso. A aplicação do torque é apresentada na figura a seguir:

Figura 22 – Aplicação do torque na alavanca por meio de um torquímetro unido a um prolongador

O extensômetro utilizado teve como propósito adquirir a tensão instantânea de torção no prolongador do torquímetro convertida em torque resultando em um gráfico de torque por tensão. Todo o sistema utilizado para aplicação do carregamento foi calibrado. O prolongador adaptado com o extensômetro é apresentado na figura a seguir:

Figura 23 – Prolongador adaptado para medição de torque

4.4. Perfilometria

A técnica de perfilometria é utilizada quando se deseja obter o perfil geométrico de um determinado componente, que pode ser exportado para softwares de CAD através de pontos, os quais são ligados entre si por uma curva para formar o perfil geométrico do modelo real. Em virtude da limpeza e, conseqüentemente, da remoção de uma pequena quantia de material da face em que foram colados os extensômetros, o raio contido na região analisada foi alterado em relação ao modelo real de projeto. Para a obtenção das dimensões do novo perfil foi utilizado um equipamento denominado perfilômetro do modelo MarSurf PCV XC20. Este equipamento é constituído de uma agulha localizada no extremo de um tubo de seção circular, fabricado em fibra de carbono. Quando está em movimento o braço segue a direção longitudinal da peça e a agulha, que está em contato com a superfície, descreve o perfil da região a ser analisada. A figura a seguir exhibe o perfilômetro utilizado para a obtenção do novo perfil:

Figura 24 - a) Agulha do perfilômetro na região analisada b) Tubo de seção circular ligado ao perfilômetro

4.5. Ensaio de partículas magnéticas

A fim de verificar a existência de possíveis trincas das alavancas testadas, foram realizados ensaios utilizando a técnica de partículas magnéticas. O ensaio consiste em banhar as alavancas com um líquido contendo pó de ferro e submetê-las a um campo magnético criado por uma bobina que circunda a peça. Posteriormente, as alavancas foram expostas à luz negra para revelar possíveis irregularidades.

Figura 25 - a) Alavanca sendo banhada por um líquido contendo pó de ferro.
b) Alavanca sendo exposta a fontes de luz negra.

Os primeiros ensaios foram realizados com os extensômetros ainda colados nas regiões testadas das alavancas. Contudo, devido à influência do excesso de cola utilizada para fixar os extensômetros, não foi possível avaliar os resultados de forma clara, por este motivo, foi necessário remover o excesso de cola e refazer os ensaios. A figura a seguir apresenta um resultado com excesso de cola na superfície avaliada:

Figura 26 - Ensaio de partículas magnéticas com excesso cola na região de análise

Após a remoção da cola e dos extensômetros, bem como uma limpeza na superfície da região analisada, foi realizada uma nova sequência de ensaios, seguindo as mesmas etapas descritas anteriormente, as quais resultaram em uma análise mais precisa.

4.6. Caracterização do modelo de elementos finitos

4.6.1. Introdução

Como parte teórica da verificação estrutural deste trabalho, foram realizados cálculos por elementos finitos em um modelo CAD de uma alavanca de mudança típica para transmissões de veículos comerciais como ônibus e caminhões. Estes cálculos constituíram de análises estáticas lineares e não-lineares quando submetidos à condição do parafuso apertado no momento da montagem. Todas as análises por elementos finitos apresentadas neste estudo tiveram como propósito verificar a aplicabilidade do método analítico de previsão de tensão na raiz de

entalhes em componentes com discontinuidades geométricas fabricados em ferro fundido nodular.

O processo de cálculo por elementos finitos apresentado neste trabalho foi subdividido em algumas fases fundamentais:

- a) Adequação da geometria;
- b) Pré-processamento;
- c) Solução;
- d) Pós-processamento.

Todas as etapas serão descritas mais claramente nos tópicos apresentados a seguir.

4.6.2. Modelo matemático

4.6.2.1. Adequação do modelo matemático

A utilização da técnica de extensometria para a verificação do método de previsão de tensão exigiu uma limpeza na superfície da região de colagem do extensômetro. Esta limpeza consistiu na remoção de uma pequena parcela de material, objetivando melhor aderência da cola. Este processo é melhor apresentado no tópico 4.3 deste trabalho. Por este motivo, e com o propósito de obter resultados mais precisos, foi necessário adequar o modelo CAD para o novo perfil geométrico da superfície modificada. As figura 26 e 27, apresentam as curvas obtidas através do perfilômetro utilizada para adequação dos modelos.

Figura 27 – Adequação do modelo CAD na região em estudo da alavanca A

Figura 28 – Adequação do modelo CAD na região em estudo da alavanca B

As curvas obtidas no perfilômetro foram inseridas no software Creo Parametric e adequada ao novo perfil geométrico, através de uma ferramenta de remoção de material. As figuras 28 e 29, mostradas a seguir, apresentam os modelos em CAD dos perfis geométricos antes e depois da remoção de material:

Figura 29 – Alavanca do moelo A - (a) Perfil geométrico bruto; (b) Perfil geométrico modificado

Figura 30 – Alavanca do modelo B - (a) Perfil geométrico bruto; (b) Perfil geométrico modificado

4.6.3 Software de elementos finitos

Os cálculos lineares e não-lineares por elementos finitos apresentados neste estudo foram realizados no software Hypermesh 14.0 fornecido pela empresa Altair Engineering do Brasil. Trata-se de um pré-processador de elementos finitos de alta performance que oferece um ambiente altamente iterativo e visual para analisar o desempenho do design do produto com um amplo conjunto de interfaces para sistemas CAD e CAE. Uma das principais qualidades do Hypermesh refere-se à capacidade de gerar, rapidamente, malha de alta qualidade, além de possuir ferramentas avançadas de montagem de modelos capazes de suportar a geração e montagem de subsistemas complexos, o software possui também interface para a modelagem de compósitos laminados por ferramentas avançadas de criação, edição e visualização.

4.6.4 Pré-processamento

4.6.4.1 Contatos

Uma vez criados a malha e o modelo geométrico, é necessário estabelecer os dados de entrada para as interfaces existentes na montagem. Convém adequar as interfaces no modelo de elementos finitos o mais próximo da situação real para obter

resultados mais precisos. Dos diferentes tipos de classe de contato oferecido pelo software Hypermesh foram utilizados dois tipos: contato colado e contato com atrito. O contato colado foi utilizado na região da rosca que faz interface entre o parafuso e a alavanca, já o contato com coeficiente de atrito foi utilizado na região que faz interface entre a cabeça do parafuso e a alavanca. Neste último, empregou-se um coeficiente de atrito (μ) de 0,14, as regiões das interfaces de ambos os casos estão apresentadas na figura a seguir:

Figura 31 – Tipos de contatos utilizados nas interfaces entre o parafuso e a alavanca

4.6.4.2 Restrições

Enquanto os carregamentos são responsáveis por colocar as peças em movimento, as restrições limitam esses movimentos que podem ser divididos em translação, rotação ou ambos. Em elementos finitos, as restrições limitam os graus de liberdade do modelo matemático. Ao atribuir as restrições no modelo de elementos finitos, procurou-se adequar os graus de liberdade o mais próximo da situação real de teste. Desta forma, a região em que foram atribuídas as restrições de movimento retrata a região de interface entre a alavanca e a base conforme teste realizado e apresentado na figura 31 e 32. As imagens a seguir mostram a região de interface entre a alavanca e a morsa e a área que foi restringida no cálculo de elementos finitos:

Figura 32 – Alavanca do modelo A - (a) região de contato entre a morsa e a alavanca; (b) região à que foi atribuída a restrição no modelo de elementos finitos

Figura 33 – Alavanca do modelo B - (a) região de contato entre a morsa e a alavanca; (b) região à que foi atribuída a restrição no modelo de elementos finitos

Por se tratar de um conjunto com apenas dois componentes pequenos, não houve a necessidade de simplificar o modelo matemático a fim de reduzir o tempo de análise.

4.6.4.3 Carregamento

Na alavanca do modelo A foi atribuído uma força uniaxial vertical de 1831N. A representação da força atribuída é apresentada a seguir:

Figura 34 – Força aplicada na alavanca do modelo A

Na alavanca do modelo B para que a análise por elementos finitos resultasse em valores de tensão na região de estudo foi necessário atribuir um carregamento no corpo do parafuso seguindo a mesma direção do seu eixo. O carregamento aplicado visa deformar a alavanca em regiões específicas resultando em deformações elasto-plásticas.

O carregamento utilizado no software de elementos finitos foi uma pré-carga de parafuso resultado do torque de aperto, cuja base foi o modelo real dos componentes utilizados nos testes, compostos por uma alavanca e um parafuso M8. O torque utilizado como dado de entrada para a obtenção da pré-carga do parafuso foi de 3,61Nm que, de acordo com a fórmula (4.14), apresentada a seguir, resultou em um valor de pré-carga de 2545N.

$$F_M = \frac{M_A}{\left(0,16 \times P + 0,58 \times d_2 \times \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_K\right)} \quad (4.14)$$

Onde:

M_A : torque de montagem do parafuso

P : passo da rosca

d_2 : diâmetro do passo da rosca do parafuso

μ_G : coeficiente de atrito na rosca do parafuso

μ_K : coeficiente de atrito na cabeça do parafuso

D_{Km} : diâmetro efetivo na cabeça do parafuso

Conforme figura 34, demonstrada a seguir, foi criada uma região entre a cabeça do parafuso e a região de interface da rosca para aplicação da pré-carga.

Figura 35 – Pré-carga do parafuso atribuída ao modelo de elementos finitos

4.6.5 Malha

Em cálculos de elementos finitos, quanto mais refinada for a malha maior será a precisão dos resultados. Contudo, ao passo que a malha se torna mais refinada, o

tempo para realizar o cálculo aumenta. Um método vastamente utilizado para obter não só o tamanho ideal dos elementos e que satisfaça a precisão dos resultados assim como os recursos computacionais que se detêm é denominado de método de convergência de malha. Este método consiste em submeter o modelo matemático a um carregamento com diferentes tamanhos de elemento na região de interesse e encontrar o ponto de início de convergência dos resultados. Já existem no mercado softwares com ferramentas para a obtenção do tamanho ideal do elemento, porém neste capítulo será apresentado apenas o método da convergência de malha, utilizado para a obtenção do tamanho ideal do elemento nas regiões de interesse do componente em estudo. Portanto, seguindo o método descrito e com o objetivo de encontrar o tamanho ideal do elemento para esta geometria, submeteu-se a peça a sete análises lineares estáticas com carregamentos e condições de contorno exatamente iguais reduzindo apenas o tamanho do elemento na região de interesse com o propósito verificar a variação de tensão para encontrar o tamanho de elemento de malha ideal. Os valores obtidos no estudo são exibidos na tabela a seguir:

Tabela 1 – Estudo de convergência do tamanho ideal do elemento

Tamanho do elemento	Tensão (MPa)	Quantidade de elementos
Padrão do software	205,44	9595
4	249,04	9924
2	240,73	10642
1	246,07	12717
0,5	244,91	18734
0,3	245,7	33371
0,1	245,2	211176

De acordo com os resultados obtidos e apresentados na tabela 1, o tamanho ideal de elemento seguindo o método de convergência de malha aplicado foi de

0,5mm. Este tamanho de elemento foi escolhido, pois se trata do ponto inicial de convergência dos resultados de tensão obtidos pelas análises de elementos finitos.

As malhas empregadas nas simulações, apresentadas na figura 35, são constituídas de elementos tetraédricos, denominada pelo software Hypermesh de “tetra4”. As imagens a seguir apresentam não apenas a discretização da malha utilizada no modelo matemático, mas também as regiões que receberam maior refinamento:

Figura 36 - Malha atribuída aos modelos matemáticos utilizados para os cálculos por elementos finitos; a) Alavanca A; b) Alavanca B

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Análise metalográfica

A análise da amostra metalograficamente preparada, no estado quimicamente atacado com nital, permitiu a observação e a caracterização dos nódulos de grafita nodular. Foram encontrados nódulos do tipo VI de tamanho 6/7, que se distribuem por toda a extensão da amostra. Os resultados experimentais comprovaram a autenticidade do material ferro fundido nodular GJS-400-15, quando comparados com as especificações da norma ASTM A247-16a. As figuras 36 e 37 apresentam a microestrutura da amostra ampliado em 100x com e sem ataque químico, respectivamente:

Figura 37 - Micrografia de ferro fundido nodular GJS-400-15 com ampliação de 100x sem ataque químico

Figura 38 - Micrografia do ferro fundido nodular GJS-400-15 com ampliação de 100x submetido a ataque químico de nital de 3%

5.2. Ensaio de dureza

Foram realizados ensaios de dureza em três diferentes pontos, de corpos de prova retirados dos dois modelos de alavanca, os procedimentos seguiram as orientações da norma ASTM E10. A tabela a seguir apresenta os valores de dureza obtidos de cada corpo de prova.

Tabela 2 - Resultados de dureza dos corpos de prova retirados das alavancas dos modelos A e B

Dureza Brinell (HBW)	
Alavanca A	Alavanca B
157	161
155	165
159	168

Os resultados obtidos através dos testes encontram-se dentro dos limites estipulados para o ferro fundido GJS-400-15 conforme norma DIN EN 1563.

5.3. Ensaio de tração

5.3.1. Ensaio de tração com corpos de prova cilíndricos

Os ensaios de tração, com corpos de prova de seção circular, foram realizados seguindo as diretrizes da norma DIN 50125, cuja finalidade era encontrar os valores de limite de escoamento, o limite de resistência e o módulo de elasticidade do material. Todos os resultados encontrados nos testes foram comparados com os limites estabelecidos pela norma DIN 1563, que determina as propriedades ideais para os diferentes tipos de ferro fundido nodular. A tabela a seguir apresenta os valores de tensão de escoamento (σ_e), tensão de ruptura (σ_r) e o módulo de elasticidade (E), dos quatro corpos de provas:

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do ferro fundido nodular GJS-400-15 obtidas através de ensaio de tração

	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de ruptura [MPa]
CPC - 1	182	325	535
CPC - 2	179	311	513
CPC - 3	181	319	540
CPC - 4	176	332	509
Média	179,5	321,75	524,25

Por meio dos resultados obtidos pelos ensaios de tração, conclui-se que o material encontra-se em conformidade com os valores que regem a norma DIN 1563, assegurando, assim, a autenticidade do ferro fundido GJS-400-15.

5.3.2. Ensaios de tração com corpos de prova retangular

Os ensaios de tração, com corpos de prova de seção retangular, foram realizados seguindo as diretrizes da norma ASTM E646, que teve o propósito de encontrar a constante e o expoente de encruamento monotônico do material.

5.3.2.1. Obtenção dos valores de K e n

O coeficiente K, e o expoente n, de encruamento monotônico são determinados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E646, em que são escolhidos, pelo menos, cinco pontos do gráfico de tensão por deformação, conforme figura 38, apresentada a seguir o:

Figura 39 -Gráfico de tensão por deformação com alguns pontos utilizados para a obtenção do coeficiente e expoente de encruamento monotônico

Após a escolha dos pontos é utilizado regressão linear, transformada para a seguinte forma logarítmica:

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (4.15)$$

Os resultados obtidos com cada corpo de prova são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 4 - Expoentes e coeficientes de encruamento monotônico

	Expoente de encruamento (n)	Coeficiente de encruamento (K)
CPR - 1	0,162	1006
CPR - 2	0,179	1025
CPR - 3	0,176	994
CPR - 4	0,159	984
CPR - 5	0,175	1011
CPR - 6	0,164	1058
CPR - 7	0,172	985
Média	0,169	1009

5.4. Partículas magnéticas

Os ensaios com partículas magnéticas foram realizados para verificar a existência de possíveis trincas ocasionadas pela deformação plástica, decorrentes

dos carregamentos aplicados nos testes com extensômetros. O procedimento para os ensaios foram explicados de forma minuciosa no capítulo 4.6. Conforme é possível observar na figura 39, apresentadas a seguir, as regiões com gradiente de cores azul representam as áreas com vestígios de cola utilizada para a fixação dos extensômetros, estas regiões devem ser desconsideradas da análise, pois não representam descontinuidades estruturais. As regiões restantes, para ambos os modelos de alavancas, não apresentaram qualquer indício de existência de trincas na região de interesse.

a)

b)

Figura 40 - a) Resultado de ensaio com partículas magnéticas na alavanca A; (b) Resultado de ensaio com partículas magnéticas na alavanca B

5.5. Perfilometria

A utilização da técnica de perfilometria resultou em um perfil com aproximadamente 30 mil pontos interligados entre si, com referência a uma coordenada x, y e z, conforme figura 40 apresentada a seguir. Estes pontos foram exportados para o Excel e, posteriormente, inseridos no software Creo Parametric, responsável por ligar os pontos e gerar o perfil geométrico da respectiva superfície do modelo real. Os resultados destas análises são apresentados nas figuras a seguir:

Figura 41 – Perfil geométrico das alavancas

5.6. Resultados dos testes com extensometria

5.6.1. Alavanca A

Seguindo os parâmetros do modelo anterior, o gráfico da figura 41, apresentado a seguir, exibe os valores de tensão dos testes realizados nas três alavancas do modelo A, quando submetidas a um carregamento uniaxial. A linha tracejada, exibida na cor vermelha, traçada sobre o gráfico, representa o valor de tensão de 350MPa, escolhido como referência para os cálculos de elementos finitos e a aplicação do método Neuber, por se tratar de um valor localizado entre a tensão de escoamento e a tensão de ruptura do material.

Figura 42 - Gráfico de tensão e força dos testes com extensômetros realizados nas alavancas do modelo A

Os valores de força referentes à tensão de 350MPa foram anotados e posteriormente calculada a média aritmética. Conforme tabela a seguir:

Tabela 5 - Valores de forças encontradas referentes à tensão de 350MPa

Alavanca	Força (N)
A - 1	1924
A - 2	1746
A - 3	1823
Média	1831

A média encontrada para a força aplicada foi de 1831N. Este valor foi utilizado como parâmetro de entrada para os cálculos lineares e não-lineares por elementos finitos das alavancas do modelo A.

5.6.2. Alavanca B

O gráfico da figura 42, apresentado a seguir, exibe os valores de tensão dos testes realizados nas três alavancas do modelo B, quando submetidas ao carregamento proveniente do torque aplicado no parafuso. A linha tracejada, exibida na cor vermelha, traçada sobre o gráfico, representa o valor de tensão de 350MPa, escolhido como referência para os cálculos de elementos finitos e aplicação do método Neuber, por se tratar de um valor localizado entre a tensão de escoamento e a tensão de ruptura do material.

Figura 43 - Gráfico de tensão e torque dos testes com extensômetros realizados nas alavancas do modelo B

Os valores de torque referentes à tensão de 350MPa foram anotados e, posteriormente, calculou-se a média aritmética. Conforme tabela a seguir:

Tabela 6 - Valores de torques encontrados referentes à tensão de 350MPa

Alavanca	Torque (Nm)
B - 1	3,49
B - 2	3,67
B - 3	3,66
Média	3,61

A média encontrada para o torque aplicado foi de 3,61Nm. Este valor foi utilizado como parâmetro de entrada para os cálculos lineares e não-lineares por elementos finitos das alavancas do modelo B.

5.7. Elementos finitos

Todos os cálculos por elementos finitos foram executados utilizando os parâmetros obtidos nos testes, que foram apresentados nos tópicos anteriores. Nos cálculos da alavanca do modelo A, procurou-se analisar um modelo simples, reduzindo ao máximo as variáveis e, consequentemente, menor uso computacional. Já no modelo de alavanca B, procurou-se realizar uma análise mais próxima da situação real de montagem, desta forma, foi acrescentado o parafuso.

5.7.1. Alavanca A

Nas análises de elementos finitos da alavanca de modelo A, o modelo sólido foi submetido a carregamentos uniaxiais na direção vertical, simulando um aperto de parafuso. Neste tipo de análise procurou-se gerar resultados de tensão com menor quantidade de variáveis possíveis reduzindo, assim, o uso computacional.

5.7.1.1. Análise linear

A tensão máxima principal da análise linear correspondente ao carregamento proveniente de uma força uniaxial da mesma direção de montagem do parafuso foi 594MPa, conforme ilustrado na figura 43, apresentada a seguir:

Figura 44 - Resultado de tensão da análise linear por elementos finitos da alavanca de modelo A

5.7.1.2. Análise não-linear

A tensão máxima principal da análise não-linear correspondente ao carregamento proveniente da pré-carga do parafuso foi de 359MPa, conforme ilustrado na figura 44, apresentada a seguir:

Figura 45 - Resultado de tensão da análise não-linear por elementos finitos da alavanca de modelo A

5.7.2. Alavanca B

As análises de elementos finitos da alavanca de modelo B foram realizadas em situações em que a alavanca está submetida ao aperto do parafuso. Neste tipo de análise, procurou-se aproximar o mais próximo da situação real de montagem.

5.7.2.1. Análise linear

A tensão máxima principal da análise linear correspondente ao carregamento proveniente da pré-carga do parafuso foi de 611MPa, conforme ilustrado na figura 45, apresentada a seguir:

Figura 46 - Resultado de tensão da análise linear por elementos finitos da alavanca de modelo B

5.7.2.2. Análise não-linear

A tensão máxima principal da análise não-linear correspondente ao carregamento proveniente da pré-carga do parafuso foi de 365MPa, conforme ilustrado na figura 46, apresentada a seguir:

Figura 47 - Resultado de tensão da análise não-linear por elementos finitos da alavanca de modelo B

5.8. Aplicação do método de Neuber

A aplicação do método de Neuber foi realizada utilizando os valores de tensões lineares obtidos pelo método dos elementos finitos para cada tipo de alavanca. Os resultados foram colocados em uma planilha (Apêndice A) que contém as curvas de Ramberg-Osgood, a curva de Neuber e os resultados lineares, para a alavanca do modelo A foi obtido o valor de tensão de 379MPa e para a alavanca de modelo B foi obtido o valor de 392MPa. As figuras 47 e 48, exibidas a seguir, apresentam os valores de tensão máxima de cada modelo de alavanca:

Figura 48 - Gráfico com as curvas de tensão e deformação do material, curva de Neuber e resultado linear da alavanca de modelo A

Figura 49 - Gráfico com as curvas de tensão e deformação do material, curva de Neuber e resultado linear da alavanca de modelo B

Na tabela 7, exibida a seguir, é apresentado um resumo de todos os valores obtidos não apenas das análises linear e não-linear dos dois modelos de alavanca, bem como dos resultados de tensão obtidos através da aplicação do método de Neuber:

Tabela 7 - Valores de tensão das análises de FEA e os respectivos resultados obtidos pelo método de Neuber

	FEA não-linear (MPa)	Neuber (MPa)
Alavanca A	359	379
Alavanca B	365	392

Comparando os resultados das análises não-lineares dos modelos A e B de alavancas, cujos valores de tensão máxima foram de 359MPa e 365MPa, respectivamente, nota-se uma pequena diferença quando comparado ao valor de 350MPa, utilizado como referência. A análise de elementos finitos realizada na alavanca do modelo B utilizou o aperto do parafuso objetivando condições mais próximas da realidade de montagem da alavanca na transmissão, enquanto que o modelo A utilizou uma força uniaxial eliminando a variável de contato entre os componentes. Em ambas as análises, os resultados de tensão máxima ficaram acima do limite de escoamento do material, mantendo a condição de deformação no regime plástico.

A partir da comparação entre os resultados dos dois modelos de alavancas, realizados em componentes fabricados em ferro fundido nodular, é possível concluir que a variação de tensão de 7,65% e 10,71%, para os modelos A e B, respectivamente, são relativamente baixa, uma vez que a aplicação do método de Neuber compreende uma metodologia de caráter aproximado, onde o objetivo reside em prever de forma mais clara o nível de tensão em uma dada região submetida à deformação no regime plástico do material reduzindo, assim, o tempo de ciclo de

desenvolvimento de um novo produto. Cabe salientar que as propriedades mecânicas obtidas através de testes do material ferro fundido nodular GJS-400-15 podem variar com o lote de fabricação e a variação de tempo de resfriamento do componente, ainda durante o processo de resfriamento do modelo bruto, que podem acarretar em um volume de material como dureza não homogênea, em sua maioria ocasionada em componentes com descontinuidades geométricas.

6. CONCLUSÕES

A partir do estudo desenvolvido foi possível, através de dados obtidos pela discretização do material, testes com extensômetros e cálculos por elementos finitos, verificar o método proposto por Neuber para a obtenção de tensão em raiz de entalhes de alavancas com geometrias irregulares fabricadas em ferro fundido nodular. A utilização do método proposto por Neuber durante o desenvolvimento de novos produtos que sofrem deformações plásticas é importante e viável, pois, reduz o ciclo de cálculos para componentes de transmissões de ônibus e caminhões fabricados em ferro fundido nodular por elementos finitos e modelagem 3D em 50%.

Cabe destacar que, embora o método de Neuber seja de fácil utilização quando se tem o conhecimento das propriedades do material que será atribuído, sua utilização não é exata, podendo variar os resultados de acordo com a precisão dos parâmetros de entrada, portanto, sua aplicação será de caráter aproximado, podendo ser empregado durante o desenvolvimento de novos produtos com diferentes geometrias fabricados em ferro fundido nodular.

Através dos ensaios de tração, dureza e metalografia realizados nas amostras fabricadas conforme as normas que regem as especificações de cada teste foram possíveis aumentar o banco de dados disponíveis no departamento de engenharia de produto da ZF do Brasil.

O estudo de caso mostrou que a atribuição de contatos entre os modelos matemáticos, dentre outras variáveis, podem influenciar nos resultados finais de tensão.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSAN, A. E. Método dos Elementos Finitos: Primeiros Passos. Campinas: Editora da Unicamp, 1999.
- [2] AZEVEDO, R.; SANCHES, H. Medições com strain gage. Disponível em: <ftp://ftp.ni.com/pub/branches/latam/brazil/Sensor_fundamentals/pt_medicoes_de_d_eformacao.pdf> Acesso em: 22 set. 2017.
- [3] BANNANTINE, J. A.; COMER, J. J.; HANDROCK, J. L. Fundamentals of Metal Fatigue Analysis. New Jersey: Prentice Hall, 1989.
- [4] BATHE, K. J. Finite Element Procedures. 2nd ed. Watertown: Pearson, 2016.
- [5] DALLY, J. W.; RILEY, W. F. Experimental stress analysis. 3rd ed. USA: McGraw-Hill, 1991.
- [6] DAVIS, J. R. Metals Handbook. 2nd ed. Ohio: ASM, 1998.
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 1563:2012-03: Founding – Spheroidal graphite cast irons. Berlim, 2012.
- [9] DOWLING, N. E.; Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue. 4ª ed. Westford: PEARSON, 2013.
- [10] DUYI, Y.; HERTEL, O.; VORMWALD, M. A unified expression of Elastic-Plastic Notch Stress-Strain Calculation in Bodies Subjected to Multiaxial Cyclic Loading. International Journal of Solids and Fractures, p. 6177-6189, 2008.
- [11] ELLIOT, R. Cast Iron Technology. 1st ed. London: Butterworth, 1988.

- [12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1560:2011: E: Fouding – Designation system for cast iron – Material symbols and material numbers. Bruxelas, 2011.
- [13] GLINKA, G.; MOLSKI, K. A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root. Narbuta: Elsevier. v 50. P. 93-100, 1980.
- [14] GONZAGA, A. A Fenaf da recuperação. ABIFA, São Paulo. Jun. 2017.
<<http://www.abifa.org.br/a-fenaf-da-recuperacao-diz-presidente-da-abifa/>>.
Acesso em: 28 set. 2017.
- [15] HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5th ed. USA: McGraw-Hill, 2002.
- [16] HEARN, E. J. An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [18] HOFFMANN, K. An Introduction to Measurements using Strain Gages. Darmestádio: HBM, 1989.
- [19] KYOWA. Strain Gages. Tóquio, [2015] 100p. (101JE1-1 SMS)
- [20] LUCAS, L. J; Martin J. F. Experimental Verification of the Neuber Relation at Room and Elevated Temperatures. East Lansing: NASA TRS, 1983.
- [21] MURRAY, W. M.; MILLER, W. R. The bonded Electrical Resistance Strain Gage: An Introduction. 1st ed. Oxford: Oxford University Press, 1992.
- [22] NEUBER, H. Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary nonlinear Stress-Strain Law. ASME J. Appl. Mech, v. 28, p. 544-550, 1961.

- [23] PORTELA, A.; SILVA, A. Mecânica dos Materiais. EDIÇÃO Lisboa: Plátano, 2006.
- [24] RAMBERG, W.; OSGOODG, W. R. Description of stress-strain curves by three parameters. NACA Technical Note No. 902, 1943.
- [25] RAO, S. S. The Finite Element Method in Engineering. 5th ed. Oxford: Elsevier, 2011.
- [26] SAMUELSSON, L. Fatigue Analysis: The Super-Neuber Technique for Correction of Linear Elastic FE results. Sweden: Volvo Aero Corporation, 2008.
- [27] SANTOS, A. B. S.; CASTELLO BRANCO, H. C. Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares. 3ª ed. São Paulo: IPT. 1989.
- [28] STEPHENS, R. I. et al. Metal Fatigue in Engineering. 2nd ed. Danvers: Wiley Interscience, 2001.
- [29] TOPPER, T. H.; WETZEL, R. M.; MORROW, J. Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens. Philadelphia: NAEC. 1967
- [30] WALTON, C. F. The Gray Iron Castings Handbook. 1st ed. Cleveland: AFS, 1958.
- [31] ZENG, Z.; FATEMI, A. Elasto-plastic stress and strain behavior at notch roots under monotonic and cyclic loadings. Journal of strain analysis. Vol 36, pg 287-300, 2001.

APÊNDICE A – Planilha com a tabela do método de Neuber

	A	B	C	D	E	F
1	Material	GJS 400 15	Resistência [MPa]	524	FEA	611
2	K'	1009	Escoamento [MPa]	321		
3	n'	0,169	E [MPa]	179500		
4						
5	Ramberg-Osgood		Linear		Neuber	
6	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ	σ [MPa]	ϵ
7	1	0,000005571	1	0,0000056	300	0,00693
8	2	0,0000111	2	0,0000111	301	0,00691
9	3	0,0000167	3	0,0000167	302	0,00689
10	4	0,0000223	4	0,0000223	303	0,00686
11	5	0,0000279	5	0,0000279	304	0,00684
12	6	0,0000334	6	0,0000334	305	0,00682
13	7	0,0000390	7	0,0000390	306	0,00680
14	8	0,0000446	8	0,0000446	307	0,00677
15	9	0,0000501	9	0,0000501	308	0,00675
16	10	0,0000557	10	0,0000557	309	0,00673
17	11	0,0000613	11	0,0000613	310	0,00671
18	12	0,0000669	12	0,0000669	311	0,00669
19	13	0,0000724	13	0,0000724	312	0,00667
20	14	0,0000780	14	0,0000780	313	0,00664
21	15	0,0000836	15	0,0000836	314	0,00662
22	16	0,0000891	16	0,0000891	315	0,00660
23	17	0,0000947	17	0,0000947	316	0,00658
24	18	0,0001003	18	0,0001003	317	0,00656
25	19	0,0001058	19	0,0001058	318	0,00654
26	20	0,0001114	20	0,0001114	319	0,00652
27	21	0,0001170	21	0,0001170	320	0,00650
28	22	0,0001226	22	0,0001226	321	0,00648
29	23	0,0001281	23	0,0001281	322	0,00646
30	24	0,0001337	24	0,0001337	323	0,00644
31	25	0,0001393	25	0,0001393	324	0,00642
32	26	0,0001448	26	0,0001448	325	0,00640
33	27	0,0001504	27	0,0001504	326	0,00638
34	28	0,0001560	28	0,0001560	327	0,00636
35	29	0,0001616	29	0,0001616	328	0,00634
36	30	0,0001671	30	0,0001671	329	0,00632
37	31	0,0001727	31	0,0001727	330	0,00630
38	32	0,0001783	32	0,0001783	331	0,00628
39	33	0,0001838	33	0,0001838	332	0,00626
40	34	0,0001894	34	0,0001894	333	0,00625