**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

JOÃO GILBERTO LÚCIO

Estudo do Processo de Dobramento a Frio de Grampo para Feixe de Mola

**São Carlos
2013**

JOÃO GILBERTO LÚCIO

Estudo do Processo de Dobramento a Frio de Grampo para Feixe de Mola

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Olívio
Figueiredo Terra Ruchert

Versão Original

**São Carlos
2013**

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

L937e Lúcio, João Gilberto
 Estudo do processo de dobramento a frio de grampo
 para feixe de mola / João Gilberto Lúcio; orientador
 Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert. São Carlos,
 2013.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Ciências e Engenharia de Materiais e Área de
 Concentração em -- Escola de Engenharia de São Carlos
 da Universidade de São Paulo, 2013.

 1. Análise de falha. 2. Mecânica da fratura. 3.
 Tratamento térmico. 4. Tensão residual. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOÃO GILBERTO LÚCIO**.

Título da dissertação: "Estudo do processo de dobramento a frio de grmpo para feixe de mola".

Data da defesa: 13/12/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Cassius Olivio Figueiredo Terra Ruchert (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Associada Laturalice de Campos Franceschini Canale
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. Vitor Luiz Sordi
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materias:
Prof. Titular **Waldek Wladimir Bose Filho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

À Deus por tudo que ele representa em minha vida.

Ao meu pai José Lúcio Filho “ em memória”.

A minha mãe Umbelina Laura Lúcio, pelo incentivo dado em toda minha vida.

Aos meus irmãos e irmãs que sempre me apoiaram.

A minha esposa, pela compreensão e apoio, principalmente nos momentos mais difíceis no período de elaboração de estudos para dissertação.

*Aos meus familiares e amigos,
por todo apoio e carinho*

AGRADECIMENTOS

Com a passagem dos anos descobrimos que os ensinamentos de escolas e ou universidades possuem prazo para acabar, mas a vida ensina que o conhecimento não. Com esse espírito que agradeço ao Prof. Dr. Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert, que nos anos agradáveis de convivência na USP muito me ensinou contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

Ao colega Jaime Milan que iniciou dentro da empresa caminhos para estudos de pós graduação em universidade pública, que foi trilhado posteriormente por Cleber Michel Chiquetti que foi meu grande incentivador.

Ao Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho, pela atenção e apoio durante o processo de definição e orientação.

Aos colegas Luís Henrique Camargo Bonazzi e Carla Isabel dos Santos Maciel pela ajuda na realização do trabalho experimental de tenacidade a fratura.

Ao colega Victor Luiz Barioto da Secretaria de Pós-Graduação Ciência e Engenharia de Materiais – USP pela orientação na fase final do trabalho.

Ao colega Fabiano Flores Fechner da empresa Gerdau, pela ajuda e incentivo.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Empresa Rassini-NHK Autopeças pela concessão de estudo de mestrado pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa e por colocar à minha disposição a área experimental e o laboratório.

Enfim, a todos que de uma forma ou outra estiveram envolvidos direta ou indiretamente na realização desde trabalho, e na participação desta etapa da minha vida, os meus sinceros agradecimentos.

Muito obrigado a todos!

"Não desista; é preciso caminhar".

Antonio Saraiva
(pai do fundador da empresa Habib's)

RESUMO

LÚCIO, J. G. **Estudo do processo de dobramento a frio de grampo para feixe de mola** 176 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O aço SAE 1552 modificado é um desenvolvimento recente da família do aço carbono manganês ligado ao silício, sendo utilizado para confecção de grampo U que tem como finalidade prender o feixe de molas no eixo do veículo. A somatória das fases de produção dessa matéria prima introduz os limites de resistência mecânica final necessária para atender a classe de resistência normativa. A peça produzida com esse aço tem alcançado crescimento de utilização na indústria automotiva devido à mesma apresentar propriedades mecânicas que atendem a requisitos normativos de classe de resistência e com vantagem de evitar tratamento térmico na fase de confecção do grampo e sendo esse processo realizado a frio em todas as suas fases. O objetivo desse trabalho foi estudar falha de grampo na etapa do processo de dobramento em forma de U e aplicar ensaios como: programa de simulação de tratamento térmico Stecal 3.0, ultrassom, fadiga, teste de cela e análise de fratura para solucionar essas falhas. Também foi realizado ensaios para prever fraturas catastróficas como: elementos finitos através de programa de computador Abaqus, ensaio de extensometria, tenacidade a fratura e medições de tensões residuais através de técnica de difração de raios-x. Foi concluído através dos resultados dos estudos de microestrutura resultante de tratamento térmico da matéria prima que o processo com resfriamento controlado em esteira é mais adequado para a produção do aço para confecção de grampo. O ensaio de ultrassom antes e após ensaio de fadiga possibilitou dimensionar o crescimento da profundidade da trinca em cotovelo de grampo e através de elementos finitos e extensometria associado com mecânica da fratura foi possível conhecer as tensões em ponto de estudo e entender o motivo de não ocorrer falha catastrófica. O ensaio de difração de raios-x permitiu o entendimento das tensões residuais introduzidas na peça de estudo.

Palavras-chave: Tratamento Térmico. Ultrassom. Ensaio de Fadiga. Análise de Falha. Elementos Finitos. Extensometria. Tenacidade a Fratura. Tensão Residual.

ABSTRACT

LÚCIO, J.G. Study of Cold Work Process at U-bolts for Leaf Spring 176 p. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SAE 1552 steel modified is a recent development of manganese carbon steel group linked to silicon, which is used to manufacture u-bolt that aims to fix leaf spring at vehicle axle in the back part. The sum of production stages of this raw material introduces the final mechanical resistance limits to meet class rules resistance. The piece produced with this steel has achieved growth of use in the automotive industry due to the mechanical properties it presents, which meet regulatory requirements for strength class and the advantage of avoiding heat treatment during manufacturing of the u-bolt and all the phases of this process are carried out in cold. This work aims to study the u-bolt failure during the folding process in the form of U and apply tests such as heat treatment simulation -Stecal 3.0, ultrasonic test, fatigue test, cell testing and analysis of crack. Other tests have been carried out to predict catastrophic fractures such as: finite element through computer program called Abaqus, extensometry testing, toughness testing for fracture and residual stress measurement by X ray diffraction technique. Results of heat treatment studies, by microstructure analysis, allowed choosing appropriate process for steel production. Ultrasonic testing before and after fatigue testing enabled to measure growth of crack depth on u-bolt elbow, and through finite element and extensometry testing associated with Mechanical of Fracture it was possible to know the stress concentrated at a point and to understand why catastrophic failure did not occur. Residual stress understanding has provided overall vision of u-bolt studied and contributed to have precision in measurement at inner and outer part of the u-bolt elbow.

Keywords: Heat treatment.Ultrasonic Testing, Fatigue Testing. Analysis of Failure. Finite Element.Extensometry.Thoughness for Fracture.Residual Stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A figura ilustra tipo de falha que pode ocorrer em veículo com desprendimento de peças Fonte: Folha VP online	34
Figura 2 : Fluxograma de processo de aço Fonte Gerdau(2013)	38
Figura 3: Microestrutura perlita e ferrita resultante no processo de resfriamento em esteira rotativa de formação de espiras Fonte: Rassini-NHK (2013)	40
Figura 4 : Etapas principais do processo de trefilação Fonte: Nunes (2008)	41
Figura 5: Desenho sem escala de grampo em forma de U	42
Figura 6: Esquema sugerido para fabricação dos grampos sem os tratamentos térmicos de têmpera e revenido Fonte: Ventura (2006)	42
Figura 7: Esquema mostrando o sistema de fixação do feixe de mola e o sentido das forças a que é submetido Fonte: Ventura (2006)	43
Figura 8: Tipo de aplicação de grampo na suspensão de veículo e detalhe de um tipo de peça. Gentileza: Suspensys Sistemas Automotivos (2013).	44
Figura 9: Diagrama de temperatura , tempo e transformação de um aço SAE 5160	45
Figura 10: Ciclo alternado de aplicação de tensão na forma senoidal Fonte: Garcia (2000)	49
Figura 11: Ciclo de tensões repetidas em torno de uma tensão média (σ_m) na qual as tensões máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e mínimas ($\sigma_{m\acute{i}n}$) não são iguais Fonte: Garcia (2000)	50
Figura 12: Ocorrência de variação com ciclos aleatórios em amplitude e frequência do nível de tensão Fonte: Garcia (2000)	51
Figura 13: Curva tensão-deformação de engenharia Fonte :Dieter (1981)	53
Figura 14: Fratura dúctil taça-cone em alumínio (a) e fratura frágil em aço médio carbono (b) Fonte: Callister (2007)	54
Figura 15: Três micro mecanismos de fratura em metais: (a) fratura dúctil, (b) clivagem e (c) fratura intergranular; e respectivas imagens de microscopia eletrônica. Fonte: Anderson (2005) e Electron Microanalysis (2013)	56
Figura 16: Fluxo do método de elementos finitos Fonte: Bathe (1996)	58
Figura 17: Sistema de codificação de extensômetro Fonte: Excel Sensores 2012	59
Figura 18: Modo de carregamento em uma trinca. Fonte: Adaptado de Callister (2007)	61
Figura 19: Exemplo de fatores de forma $f (a/w)$ para algumas geometrias de corpo de prova mais utilizadas. Fonte: adaptado Ruchert (2007)	63
Figura 20: Representação da lei de Bragg e detalhe do comprimento de onda λ do raio x	65

Figura 21: Direções de tensões primárias e distorções Fonte: Rigaku (2007)	68
Figura 22: Gráfico $2\theta - \sin^2\Psi$ para tensão de compressão Fonte: Rigaku (2007)	68
Figura 23: Gráfico $2\theta - \sin^2\Psi$ para tensão de tração Fonte: Rigaku (2007)	68
Figura 24: Método iso-inclinação. Fonte: Rigaku (2007)	69
Figura 25: Fluxograma de estudos	70
Figura 26: Dimensões do corpo de prova de tração em milímetros	72
Figura 27: Programa de simulação de tratamento térmico Stecal 3.0	73
Figura 28: Ensaio de ultrassom em cotovelo de grampo e dimensionamento de profundidade de trinca	75
Figura 29: Ensaio de fadiga em conjunto montado com grampo	76
Figura 30: Ensaio de cela em grampo Fonte CMP-USA (2012)	77
Figura 31 A figura mostra em (a) peça antes de posicionamento no dispositivo de dobramento; (b) região central engastada e início do dobramento; (c) conformação intermediária conforme geometria de ferramental; (d) conformação final	78
Figura 32: Modelo de caracterização do estudo e geometria da peça obtida no programa Abaqus	80
Figura 33: Fixação da superfície rígida representando a cela	80
Figura 34: Condição de simetria utilizada no modelo de estudo	81
Figura 35: A placa fica engastada e livre na direção Y ($U_2 \neq 0$)	81
Figura 36: Área de contato 1 da simulação realizada no cotovelo interno do grampo.	82
Figura 37: Área de contato 2 da simulação realizada na região roscada do grampo	82
Figura 38: Detalhe da união rígida realizada na região da rosca do grampo	83
Figura 39: Carregamento uniforme do modelo com 310,65KN	84
Figura 40: Malha do conjunto modelado no programa	85
Figura 41: Malha do grampo na zona de ruptura esperada	85
Figura 42: Dimensional de extensômetro uniaxial Fonte: Excelsensores (2013)	86
Figura 43: Aspecto visual após fixação de extensômetro	89
Figura 44: Proteção de silicone aplicado sobre extensômetro	89
Figura 45: Aspecto visual após finalização de colagem de extensômetro	89
Figura 46: Torquímetro fabricante Gedore, modelo R600 com capacidade até 600 N.m utilizado na aplicação de torque em porca	90
Figura 47: Visual de conjunto montado para teste de aplicação gradual de torque em grampo até atingir 450 N.m e teste de liberação gradual de torque	90

Figura 48: Dinamômetro Tinius Olsen Fonte: Rassini-NHK (2012)	91
Figura 49: Conjunto montado Fonte: Rassini-NHK (2012)	91
Figura 50: Local de retirada de corpo de prova com entalhe simples	92
Figura 51: Dimensional do corpo de prova com entalhe simples	92
Figura 52: A figura mostra em (a) aspecto da máquina servo hidráulica de ensaio universal MTS utilizada no ensaio, (b) dispositivo com 3 pontos de apoio.	
(c) aspecto visual de montagem do ensaio	95
Figura 53: Observação com lupa de crescimento de trinca no fundo do entalhe	96
Figura 54: Aspecto do corpo de prova no final do ensaio	96
Figura 55: Forma de medir tamanho de trinca em corpo de prova conforme ASTM E399	97
Figura 56:. Principais tipos de gráfico força x deslocamento. Fonte: ASTM E399-09	98
Figura 57: Fator de intensidade de tensão para: (a) uma trinca circular embutida sob tensão uniforme normal ao plano da trinca, (b) superfície da trinca metade circular, (c) trinca de canto 25% do círculo, (d) trinca metade circular na superfície de um eixo Fonte: Dowling (2007)	99
Figura 58: Principais medidas de fratura de grampo para cálculo de fator de intensidade de tensão K	100
Figura 59: Fator de intensidade de tensão para seções transversais retangulares (a) para superfície de trinca metade circular, sob tensão e / ou flexão. A forma (b) geral é dada por K, bem como as equações particulares para a superfície, e (c) ponto mais profundo para qualquer um a/t. Além disso, (b) mostra a resultante (d) da equação de Newman observado pela variação com (e) para a/t =0 e 0,5. Dowling (2007)	103
Figura 60: Fator de intensidade de tensão para: (a) uma trinca circular embutida, (b) uma superfície com trinca semi-elipítica. As equações fornecem K_D no ponto D para uma tensão uniforme, normal ao plano da trinca. Dowling (2007)	105
Figura 61: Equipamento de difração de raio-x modelo MSF-3 Fonte: Rigaku (2007)	108
Figura 62: Pontos de medição de tensão residual	108
Figura 63: Sentido de rotação do goniômetro e disposição do corpo de prova	109
Figura 64: A figura ilustra modelos de corpo de prova sendo que em (a) região de deformação plástica, em (b) região do cotovelo interno do grampo e em (c) cotovelo externo	109
Figura 65: Modelo de assentamento de amostra	110

Figura 66: Modelo de isolamento da parte metálica	110
Figura 67: Sistema de polimento eletrolítico Rigaku	110
Figura 68: Sistema de medição de profundidade	111
Figura 69: Alinhamento da medição no centro do quadrado desbastado	111
Figura 70: Regulagem de altura do emissor e receptor de raio x.	112
Figura 71: Diagrama TTTT do SAE 1552 com faixa de composição no mínimo especificado	113
Figura 72: Diagrama TTT do SAE 1552 com faixa de composição no máximo especificado	114
Figura 73: Diagrama TTT para composição química do SAE 1552 modificado pela indústria nacional	115
Figura 74: Diagrama TTT para composição química do aço SAE 1552 modificado pela indústria americana	116
Figura 75: Identificação de grampos utilizados em teste de cela.	118
Figura 76: Aspecto dos grampos 1 , 2 e 3 após ensaio de cela	119
Figura 77: Grampos 4 , 5 e 6 respectivamente	119
Figura 78: Grampos 7 , 8, 9 e 10 respectivamente	119
Figura 79: Mostra trinca observada na o cotovelo externo do grampo	120
Figura 80: Trinca iniciando em região com faixa clara e microestrutura perlita e ferrita	121
Figura 81: Local onde foi realizado ensaio com microdureza Vickers	121
Figura 82: Aspecto observado através de EDS . A camada branca possui picos idênticos a matriz	121
Figura 83: Aspecto da falha em local em local isento de defeito visível	123
Figura 84: Trinca secundária isenta de defeito visível	123
Figura 85: Detalhe ampliado da trinca secundária(a) e fratura com aspecto dúctil (b)	124
Figura 86: Ponto de inicio da falha da trinca considerada principal	124
Figura 87: Ponto de análise com MEV na superfície da amostra (a) e aspecto de fratura dúctil (b) obtida nessa região 2f	125
Figura 88: Inicio da falha apresentando heterogeneidade de microestrutura	125
Figura 89: Grão estrutural mais grosseiro na superfície da falha	126
Figura 90: Comparativo de dureza Knoop na região de inicio da falha (grão estrutural grosseiro) com região da matriz (grão estrutural mais fino)	126
Figura 91: Processo de resfriamento em esteira que permite espalhamento do aço e tipo de microestrutura observada na superfície do aço	127

Figura 92: Processo de resfriamento em forma de bobina, tipo de microestrutura e exemplo de falha observada para aplicação específica	128
Figura 93: Marca no sentido transversal da barra e fratura com vista frontal	129
Figura 94: Local de análise com microscopia eletrônica	129
Figura 95: Aspecto de fratura dúctil observado no início da falha	129
Figura 96: Resultado de tensão do conjunto para 11% do carregamento aplicado	130
Figura 97: Resultado de tensão em MPa do conjunto para 50% do carregamento aplicado que equivale a 310,67kN	131
Figura 98: Resultado de tensão em MPa do conjunto para 70% do carregamento aplicado que equivale a 434,94 kN	131
Figura 99: Resultado de tensão em MPa do conjunto para 100% de carregamento aplicado de 621.34 kN	131
Figura 100: Resultado de tensão versus torque de grampo fixado em feixe de mola	133
Figura 101: Resultado de tensão versus carregamento de grampo fixado em feixe de mola	134
Figura 102: Dimensionamento de trinca conforme norma ASTM E 399	135
Figura 103: Local de análise da fratura com baixa ampliação	136
Figura 104: Fratura por clivagem observada com microscopia eletrônica de corpo de prova após ensaio KIC	137
Figura 105: A seta demonstra o local com possível ocorrência de trinca em processo de dobramento. Os pontos de tensão são do conjunto para 100% do carregamento aplicado	141
Figura 106: A seta demonstra o local com possível ocorrência de trinca, em conjunto montado, em trabalho de fadiga. Os pontos de tensão são do conjunto para 100% do carregamento aplicado	143
Figura 107: Local de medição de tensão residual na região com deformação planar.	144
Figura 108: Perfil de tensão residual em região que sofreu somente deformação plástica de mudança de perfil redondo para chato	145
Figura 109: local de medição de tensão residual na região superficial externa do grampo	146
Figura 110: local de medição de tensão residual na região superficial interna do grampo	147
Figura 111: Perfil de tensão residual em região de cotovelo interno	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistema de designação AISI-SAE para alguns tipos de aço carbono e aço liga.	36
Tabela 2: Composição química especificada em percentual de aço SAE 1552, e resultados encontrados no SAE 1552 modificado que são praticados por usina nacional e usina americana	40
Tabela 3: Resultados de ensaio de tração e dureza Rockwell na escala C Tipicos de produtos após fabricação	41
Tabela 4: Propriedades mecânicas testada do aço SAE 1552 modificado	72
Tabela 5: Resultado em porcentagem em peso de composição química do aço SAE 1552 modificado com silício	72
Tabela 6: Tipos de experimentos realizados no programa de simulação Stecal	74
Tabela 7: Resultados de ensaio de cela	83
Tabela 8: Resultado de dimensional de trinca antes e após ensaio de fadiga	117
Tabela 9: Resultado de teste de cela em grampos que apresentaram trinca durante processo de dobramento. A força de ruptura está em Lbs e kN	118
Tabela 10: Dimensional de comprimento de trinca em mm do corpo de prova 1	135
Tabela 11: Dimensional de comprimento de trinca em mm do corpo de prova 2	135
Tabela 12: Dimensional de comprimento de trinca em mm do corpo de prova 3	136
Tabela 13: Resultado do SAE 1552 mod., e comparativo com limites de escoamento e tenacidade a fratura em deformação plana a temperatura ambiente para outros materiais de engenharia. Fonte: ASTM international (1990) e *Dowling (2007) e **Herzberg (1989)	138
Tabela 14: Relação entre fator de intensidade de tensão, trinca e fator de segurança.	140
Tabela 15: Cálculo de tamanho de trinca com unidade em milímetros contra a tensão com unidade em MPa. O resultado é a intensidade de tensão em MPa $\sqrt{m}$ para determinada profundidade de trinca crescente	142
Tabela 16: Cálculo de tamanho de trinca em milímetros contra a tensão com unidade em MPa. O resultado final é a intensidade de tensão em MPa $\sqrt{m}$ para determinada profundidade de trinca crescente	143
Tabela 17: Resultado de medição de tensão residual em MPa da superfície externa do grampo. Valores negativos indicam tensão de compressão	146
Tabela 18: resultado de medição de tensão residual em MPa da superfície	

interna do grampo. Valores negativos indicam tensão residual de compressão e valores positivos indicam tensão residual de tração

LISTA DE SIGLAS

a	Comprimento de trinca
B	Espessura do corpo de prova
AL	Alongamento
AISI	American Iron and Steel Institute ou Instituto Americano de Aço e Ferro
ASM	American Society for Metals ou Sociedade Americana para Metais
A ₀	Área da seção reta original antes de aplicar carga
B _s	Bainite Start (Início de transformação bainítica)
B50	Formação de 50 % de bainita
B99	Formação de 99 % de bainita
C	Carbono
CCT	Continuous Cooling Transformation -transformação por resfriamento contínuo
CMP	Consolidated Metal Products – Produtos de Metal Consolidado
Cr	Cromo
Cu	Cobre
<i>d</i>	Distância interplanar
E	Módulo elástico / elasticidade, ou, módulo de Young
EDS	Energy Dispersive System ou Sistema de Energia Dispersiva
F	Carga instantânea
FEM	Finite Elements Method ou Método de Elementos Finitos
GPa	Giga Pascal (10^9 . Pascal, onde $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ N/m}^2$)
HRC	Dureza Rockwell na escala C
HV	Hardness Vickers (Dureza Vickers)
Hz	Hertz
ITT	Isothermal Time Transformation - transformação isotérmica
KIC	Fator de intensidade de tensão crítico em deformação plana
KQ	Valor provisório de tenacidade da fratura
<i>l_i</i>	Comprimento instantâneo
<i>l₀</i>	Comprimento original
MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio

MPa	Mega Pascal (10^6 . Pascal, onde $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$)
m/s	Metro dividido por segundo
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
P _Q	Carga de ruptura
P _{max}	Carga máxima
Psi	Pound fource per square inch ou libra força por polegada quadrada
R	Razão de carregamento
RA	Redução de Área
s	Segundos
S	Enxofre
SAE	Society of Automotive Engineers ou Sociedade de Engenharia Automotiva
Si	Silício
Sn	Estanho
S _{ys (0.2%)}	Limite de escoamento a 0,2%
S _u	Limite de resistência a tração
TTT	Tempo , Temperatura ,Transformação
USA	United States of America ou Estados Unidos da América
V	Vanádio
V _l	Velocidade longitudinal
V _t	Velocidade transversal
V _s	Velocidade superficial
W	largura do corpo de prova

LISTA DE SIMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
Δl	Alongamento da deformação ou variação no comprimento a um dado instante.
λ	Comprimento de onda dos raios x espalhados.
θ	Ângulo de espalhamento de raios x.
d_0	Espaçamento da distorção do retículo cristalino.
θ_0	Ângulo de difração.
d_{ϕ}	Espaçamento do retículo cristalino.
θ_{ϕ}	Ângulo de difração.
Ψ	Plano de amostra
$\varnothing$	Diâmetro
%	Porcentagem
%p	Porcentagem em peso
γ	Gama
α	Alfa
$\sigma_{\max}$	Tensão máxima de tração
$\sigma_{\min}$	Tensão mínima de compressão
σ_m	Tensão média
σ_i	Intervalo de tensões
σ_a	Amplitude da tensão
σ	Tensão de engenharia
ξ	Deformação de engenharia
$Y = f(a/w)$	Fator geométrico ou de forma

SUMÁRIO

RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS	XXI
LISTA DE SIGLAS	XXIII
LISTA DE SIMBOLOS	XXV
 1 – INTRODUÇÃO	 33
1.1 – OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS	33
1.2 – OBJETIVO	35
 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 36
2.1.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS	36
2.1.2 – EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NO AÇO	37
2.1.3 – PROCESSO PRODUTIVO DE AÇO PARA GRAMPO	38
2.1.4 - PROCESSO PRODUTIVO DE GRAMPO	42
2.1.5 – UTILIZAÇÃO DE GRAMPO	43
2.2 – PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO	44
2.3 – TÉCNICA DE ENSAIO DE ULTRASSOM	46
2.3.1 – TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS	47
2.4 – ENSAIO DE FADIGA	48
2.5 – ENSAIO DE TRAÇÃO	51
2.6 – FUNDAMENTOS DA FRATURA DE MATERIAIS DE ENGENHARIA.	54
2.7 – MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	57
2.8 – TÉCNICA DE EXTENSOMETRIA	59
2.9 – PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DA FRATURA	60
2.9.1 – VARIAÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO (ΔK)	60
2.10 – TENSÃO RESIDUAL MEDIDA COM TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X	64

3 – MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1 – LINHAS DE ESTUDO	70
3.1.1 – LINHA 1 DE ESTUDO	70
3.1.2 – LINHA 2 DE ESTUDO	71
3.1.3 – MATERIAL ESTUDADO	71
3.2 – MÉTODO APLICADO PARA CADA LINHA DE ESTUDO	73
3.2.1 – LINHA 1: ESTUDO DA MICROESTRUTURA ATRAVÉS DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO STECAL 3.0	73
3.2.2 – LINHA 1: MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE DE TRINCA ATRAVÉS DE TÉCNICA DE ULTRASSOM	75
3.2.3 – LINHA 1: ENSAIO DE FADIGA EM CONJUNTO MONTADO PARA VERIFICAR CRESCIMENTO DE TRINCA	76
3.2.4 – LINHA 1: ENSAIO DE CELA	77
3.2.5 – LINHA 1: ANÁLISE DE GRAMPO QUE APRESENTOU TRINCA DURANTE PROCESSO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA	78
3.2.7 – LINHA 2: ESTUDO DAS TENSÕES ATRAVÉS DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO ABAQUS / CAE RELEASE 6.10	79
3.2.7.1 – CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO	79
3.2.7.2 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO	80
3.2.7.3 – CARREGAMENTO	83
3.2.7.4 – MODELO MATEMÁTICO	84
3.2.8 – LINHA 2: ENSAIO DE EXTENSOMETRIA EM COTOVELO EXTERNO DE GRAMPO	85
3.2.8.1 – PREPARAÇÃO DO COTOVELO DO GRAMPO	87
3.2.8.2 – FIXAÇÃO DO EXTENSÔMETRO	88
3.2.8.3 – REALIZAÇÃO DO TESTE EM GRAMPO MONTADO EM FEIXE	89
3.2.8.3.1 – ETAPA 1: APLICAÇÃO GRADUAL DE TORQUE EM GRAMPO	90
3.2.8.3.2 – ETAPA 2: CONJUNTO MONTADO EM TESTE COM DINAMOMETRO	91
3.2.9 – LINHA 2: ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA (KIC)	92
3.2.9.1 – LINHA 2 - EQUACIONAMENTO DE FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO K EM GRAMPO DE FEIXE DE MOLAS	99
3.2.9.1.2 – LINHA 2 – AVALIAÇÃO DE TRINCA CRÍTICA E PREMISSAS CONSIDERADAS PARA CÁLCULO DE INTENSIDADE DE TENSÃO K	102

3.2.9.2 – LINHA 2 - FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA SEÇÕES TRANSVERSAIS RETANGULARES PARA SUPERFÍCIE DE TRINCA METADE CIRCULAR, SOB TENSÃO E/OU FLEXÃO	103
3.2.9.3 – LINHA 2 - FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA UMA SUPERFÍCIE DE TRINCA SEMI-ELIPTICA	105
3.2.9.4 – LINHA 2 - AVALIAÇÃO DE TRINCA EM COTOVELO EXTERNO E INTERNO	107
3.2.10 LINHA 2: ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM COTOVELO DE GRAMPO ATRAVÉS DE TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X	108
3.2.10.1 – MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA	108
3.2.10.2 – MAPEAMENTO DO PERFIL DA TENSÃO RESIDUAL	109
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	113
4.1 – LINHA 1: RESULTADO DE ESTUDO DE MICROESTRUTURA ATRAVÉS DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO STECAL 3.0	113
4.1.1 - SAE 1552 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NO MÍNIMO ESPECIFICADO	113
4.1.2 - SAE 1552 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NO MÁXIMO ESPECIFICADO	114
4.1.3 - SAE 1552 MODIFICADO (BRASIL)	115
4.1.4 - SAE 1552 MODIFICADO (ESTADOS UNIDOS)	116
4.2 – LINHA 1: RESULTADO DA MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE TRINCA ATRAVÉS DE TÉCNICA DE ULTRASSOM, ANTES E DEPOIS DE ENSAIO DE FADIGA EM CONJUNTO MONTADO	117
4.3 – LINHA 1: RESULTADO DE ENSAIO DE CELA	118
4.4 – LINHA 1: RESULTADO DE ANÁLISE DE FALHA DE GRAMPOS QUE APRESENTARAM TRINCA DURANTE PROCESSO PRODUTIVO	120
4.4.1 – TRINCA INICIANDO EM MARCA BRILHANTE	120
4.4.1.2 – DISCUSSÃO DA AVALIAÇÃO DE TRINCA INICIANDO EM MARCA BRILHANTE	122
4.4.2 – TRINCA INICIANDO EM LOCAL ISENTO DE DEFEITO SUPERFICIAL	123
4.4.2.1 - ANÁLISE REALIZADA COM MICROSCOPIA ELETRONICA NA TRINCA SECUNDÁRIA 1S	123
4.4.2.2 - ANÁLISE REALIZADA COM MEV NA TRINCA PRINCIPAL 2P	124

4.4.2.3 - ANÁLISE REALIZADA COM METALOGRAFIA DA TRINCA PRINCIPAL	125
4.4.2.4 - ANÁLISE REALIZADA COM DUREZA KNOOP	126
4.4.2.5 – DISCUSSÃO DA ANÁLISE DE TRINCA, INICIANDO EM LOCAL ISENTO DE DEFEITO SUPERFICIAL	127
4.4.3 – TRINCA INICIANDO EM LOCAL QUE APRESENTA DEFEITO SUPERFICIAL NO INÍCIO DA FALHA	128
4.4.3.1 – ANÁLISE COM MICROSCOPIA ELETRONICA	129
4.4.3.2 – DISCUSSÃO DA ANÁLISE DE TRINCA, INICIANDO EM LOCAL COM DEFEITO SUPERFICIAL	130
4.5 - LINHA 2: RESULTADO DE ESTUDO DE TENSÕES COM AUXILIO DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO ABAQUS / CAE RELEASE 6.10	130
4.6 – LINHA 2: RESULTADO DE ENSAIO DE EXTENSOMETRIA EM COTOVELO DE GRAMPO	132
4.6.1 – RESULTADO DE EXTENSOMETRIA NA FIXAÇÃO DE GRAMPO EM CONJUNTO MONTADO	132
4.6.2 – RESULTADO DE EXTENSOMETRIA SOB CARREGAMENTO CRESCENTE	133
4.6.2 – DISCUSSÃO DE RESULTADO DE EXTENSOMETRIA	134
4.7 - LINHA 2: RESULTADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA (KIC).	134
4.7.1 – DIMENSIONAMENTOS DE CORPO DE PROVA	134
4.7.2 – ANÁLISE DA FRATURA COM MICROSCOPIA ELETRONICA	136
4.7.3 – RESULTADO DE TENACIDADE A FRATURA (KIC)	138
4.7.7 - RESULTADO CONSIDERANDO AS PREMISSAS E GEOMETRIA DE TRINCA	139
4.7.8 - RESULTADO : TAMANHO DE TRINCA EM COTOVELO EXTERNO	141
4.7.9 - RESULTADO: TAMANHO DE TRINCA EM COTOVELO INTERNO	142
4.8 - LINHA 2: RESULTADO DE MEDIÇÕES DE TENSÃO RESIDUAL	144
4.8.1 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL NA REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	144
4.8.2 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL NA REGIÃO DE COTOVELO EXTERNO	145
4.8.3 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL NA REGIÃO DE COTOVELO INTERNO	146
4.8.4 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DO PERFIL DE TENSÃO RESIDUAL	

EM COTOVELO INTERNO DE GRAMPO	147
4.8.5 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DO PERFIL DE TENSÃO RESIDUAL EM COTOVELO EXTERNO DE GRAMPO	148
5 – CONCLUSÕES	150
5.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	154
6 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	155
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156
8 – ANEXO	162
8.1 – RESULTADO DE APLICAÇÃO DE FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO K EM GRAMPO DE FEIXE DE MOLAS	162
8.2 – CÁLCULO DA TRINCA CRÍTICA CONSIDERANDO TENSÃO DE ESCOAMENTO	162
8.3 – PRIMEIRA PREMISSA: TENSÃO MÁXIMA PRÓXIMA DA MÉDIA DE ESCOAMENTO	163
8.4 – SEGUNDA PREMISSA: TENSÃO MÁXIMA PRÓXIMA DA MÉDIA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA	164
8.5 – TERCEIRA PREMISSA: TENSÃO DE 281 MPa OBTIDA EM ELEMENTOS FINITOS	165
8.6 – QUARTA PREMISSA: TENSÃO DE 747 MPa OBTIDA EM ELEMENTOS FINITOS	166
8.7 – QUINTA PREMISSA: TENSÃO RESIDUAL DE COMPRESSÃO E TENSÃO DE ESCOAMENTO	167
8.8 – RESULTADO PARA FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA SEÇÕES TRANSVERSAIS RETANGULARES PARA SUPERFÍCIE DE TRINCA METADE CIRCULAR, SOB TENSÃO E/OU FLEXÃO	168
8.9 – RESULTADO DE FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA UMA SUPERFÍCIE DE TRINCA SEMI-ELIPTICA	170

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS

Atualmente a demanda do mercado para novas tecnologias para peças automotivas vem crescendo em função da alta competitividade, volatilidade e globalização. Consumidores e usuários exigem produtos e serviços com qualidade, baixo custo e entrega em prazos cada vez menores. Para atender as necessidades observa-se uma contínua busca da melhoria em processos metalúrgicos que consequentemente tem levado ao desenvolvimento tecnológico e permitem atender as principais demandas do setor como: redução de custos do processo produtivo e inserção de alta tecnologia nos componentes dos veículos utilizando para isso materiais com alterações de processos e de composição química com finalidade de se obter um produto final com propriedades mecânicas que atendam a requisitos normativos.

O grampo U, assim chamado devido sua geometria em forma de U que é abordado nesse trabalho é produzido com trabalho a frio, ou seja sem tratamento térmico durante processo de conformação e tem alcançado crescimento de utilização na indústria automotiva, devido o mesmo apresentar propriedades mecânicas que atendem a requisitos normativos de classe de resistência e com vantagem de evitar processos convencionais e tradicionais de tratamento térmico que além de mais caro devido ao alto consumo de gás e energia elétrica, ainda requer controle mais rigoroso como na temperatura e tempo de forno que quando não são seguidos com critério podem gerar problema de qualidade destes componentes.

Conforme Ventura Et al. (2009) a combinação da adição de elementos de liga para aços e processos de produção mais avançados tecnologicamente têm-se revelado um caminho muito viável em obter resultados de propriedades mecânicas. Esta tendência foi também observada na produção de sistemas de suspensão de veículos que são constituídos de molas mantidas fixas através de parafusos em U.

Conforme Nath e Das Uttam (2006) os aços de médio carbono encontram amplas aplicações na fabricação de eixos, engrenagens de baixo custo e outros componentes similares. Entretanto a qualidade do produto deve satisfazer a requisitos estabelecidos sem gerar falha prematura.

Segundo Milan Et al. (2004) falhas podem comprometer um sistema e foi demonstrado um caso envolvendo vários parafusos que eram usados para caixas de redutor de velocidade fraturaram depois de algumas horas de operação. Baseado também na

possibilidade de ocorrência de falha em processo de fabricação inovador e que requer um acompanhamento minucioso de discontinuidades por mínima que seja devido esta falha em produto final ter o poder de gerar resultados negativos e em algumas situações colocar em risco uma organização e seus dirigentes e prepostos foi escolhido estudar o processo de dobramento a frio de grampo de feixe de molas. A figura 1 ilustra um tipo de falha que pode ocorrer em veículo.

Para enfatizar a necessidade da pesquisa foi estudado a responsabilidade de empresas sérias que respeitam o consumidor e um exemplo verificado está descrito em uma matéria da agência AutoData (2012) onde a empresa Mercedes Benz convocou um recall para chassi de ônibus produzidos no Brasil.

Foram chamados 11.147 modelos fabricados de novembro de 2010 a dezembro de 2011 e conforme comunicado da empresa o chamado deve-se a risco de quebra dos grampos de mola da suspensão traseira, com consequente desprendimento do eixo traseiro. A justificativa da substituição do componente foi devida: “A alta velocidade de aperto das máquinas na linha de produção pode ter provocado um alongamento nos grampos de mola, o que pode causar a perda de torque e a quebra dos mesmos”, afirma a montadora.

Figura 1: A figura ilustra tipo de falha que ocorreu em veículo com desprendimento de peças
Fonte: Folha VP online (2011).

1.2 - OBJETIVO

Os principais objetivos desse trabalho são:

Estudar e resolver o motivo de falha de grampo durante o processo produtivo de dobramento.

Aplicar ensaios para prever fraturas catastróficas.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

O aço é uma liga ferro-carbono que pode conter percentuais consideráveis de outros elementos de liga sendo que Shackelford (2008) define aço como uma liga ferrosa com até aproximadamente 2,0%p carbono e que os aços mais comuns são classificados de acordo com seu conteúdo de carbono baixo, médio e elevado teor, porém conforme *ASM Metals Handbook*, Vol. 01 (1993) os aços não obedecem a único critério de classificação sendo levado em consideração as variações na sua composição química, microestrutura, tipo de processo, propriedades e alguns casos específicos uso final do produto. Segundo a classificação normativa da AISI (*American Iron and Steel Institute*) e da SAE (*Society of Automotive Engineers*) a composição química da maioria dos aços são classificadas com uma série de quatro numerais que servem para designar respectivamente o tipo de liga e percentual de carbono. A tabela 1 ilustra o sistema de designação AISI-SAE.

Tabela 1: Sistema de designação AISI-SAE para alguns tipos de aço carbono e aço liga

Designação	Descrição
SAE – AISI	
Aço carbono	
10XX	Aços-carbono comum . Não resulfurado com 1,00 % máximo de Manganês
11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil , com alto S (resulfurado)
15XX	Aços-carbono comum (faixa máxima de Mn -1,00 – 1,65 %).
Aço Liga	
41XX	Aços-Cromo-Molibdênio com 0,50 % ou 0,90 % de Cr e 0,12 % ou 0,20 5 de Mo
51XX	Aços-Cromo com 0,80 % a 1,05 % de Cr
61XX	Aços-Cromo-Vanádio com 0,80 % ou 0,95 % de Cr; e 0,10 % ou 0,15% de V

Fonte: Databook (1980)

2.1.2 – EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NO AÇO

De acordo com o guia de tratamento térmico da ASM (1995) , a principal razão para o uso de elementos de liga nas séries padrão do aço é de aumentar a temperabilidade, porém é mencionado por Silva e Mei (2006) que cada elemento de liga tem finalidade específica:

O elemento químico manganês (Mn) possui solubilidade sólida no ferro γ sem limite e no ferro α 3% , endurecimento acentuado sobre a ferrita, reduzindo a ductilidade. A principal função é contrabalançar a fragilidade devido ao enxofre e aumentar a temperabilidade.

O silício (Si) é um agente desoxidante na produção do aço, que aumenta a resistência à corrosão e a resistência mecânica de aços com baixo teor de liga. Possui uma solubilidade de 2% (9 % com 0,35 % C) no ferro γ , e de 18,5 % (não muito alterada pelo carbono) no ferro α . Endurece a ferrita com perda de ductilidade e aumenta a temperabilidade.

O elemento fósforo (P) em diversos casos é considerado um elemento prejudicial resultante do processo de produção tornando o aço frágil, efeito que se acentua com o aumento do teor de carbono. Na influência sobre a ferrita observa-se que endurece fortemente em solução sólida.

O enxofre (S) na maioria das utilizações é considerado um elemento indesejável oriundo do processo de acearia, onde a combinação com o ferro na forma de sulfeto pode resultar em um aço fragilizado. Entretanto em caso específico a combinação com o manganês forma um respectivo sulfeto que favorece a usinagem com a formação de cavacos que se quebram facilmente.

O cromo (Cr) melhora a resistência à corrosão e desgaste para aços com alto teor de carbono e possui solubilidade sólida no ferro γ de 12,8% (20% com 0,5% de C) . O cromo endurece ligeiramente a ferrita e tem influência sobre a austenita.

O níquel (Ni) aumenta a resistência mecânica de aços recozidos e a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos, sobretudo a baixas temperaturas por solução sólida na ferrita. Tem solubilidade sem limite em solução sólida no ferro γ , e no ferro α 10% (sem relação com teor de carbono).

O molibdênio (Mo) possui solubilidade sólida no ferro γ de 3% (8% com 0,3 de C) , e de 37,5% no ferro α . Na influência sobre a ferrita verifica-se um sistema endurecível por precipitação nas ligas Fe-Mo.

O vanádio (V) refina a estrutura do aço elevando a temperatura de crescimento do grão da austenita. Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário. Possui

solubilidade sólida no ferro γ de 1% (4% com 0,2% de C) e sem limite no ferro α . Possui ação de endurecimento moderado por solução sólida na ferrita.

2.1.3 – PROCESSO PRODUTIVO DE AÇO PARA GRAMPO

O aço é produzido a partir do ferro gusa e utiliza minério de ferro, coque e cal em processo siderúrgico. Para realizar essa operação é necessário utilizar instalações denominadas usinas, ilustradas na figura 2 e segundo Mourão (2005) as usinas siderúrgicas atuais podem ser classificadas de acordo com o seu processo produtivo sendo chamadas de usinas integradas que possuem as três fases principais, sendo redução, refino e laminação do aço e de usinas semi-integradas que operam duas fases de produção constituindo de refino e laminação. São usinas que iniciam sua produção a partir de ferro gusa, ferro esponja e/ou sucata metálica.

Figura 2: Fluxograma de processo de aço.

Fonte: Gerdau (2013)

O aço SAE 1552 modificado com silício é uma derivação do SAE 1552 que é um aço carbono comum que possui uma faixa de manganês que oscila entre 1,00 % e 1,65 %.

O objetivo final de adicionar o elemento químico silício na produção do aço é aumentar a dureza da ferrita e consequentemente aumentar a dureza do material laminado quando comparado SAE 1552 com SAE 1552 modificado.

Para elaboração do SAE 1552 modificado utiliza-se processo de usina semi-integrada, onde a fonte principal de carbono é proveniente de gusa ficando necessário somente adicionar o manganês e a principal liga que é o silício. O aço final recebe elementos residuais como: cromo, níquel, molibdênio e vanádio que são provenientes de sucata.

O processo tem seu início com adição de ferro gusa e sucata em um forno elétrico a arco que é um processo de refino primário e possui um aquecimento através de três eletrodos e quatro queimadores de gás natural que geram um aquecimento em torno de 1650°C , sendo quente o suficiente para liquefazer a mistura em um tempo total em torno de 1 hora. A mistura fundida possui impurezas que sobem para superfície quando o metal está liquefeito e nessa fase é retirada a amostra do aço para determinar sua composição química. Na sequência dispositivos lançam oxigênio dentro da mistura que reduz a quantidade de carbono e faz uma homogeneização e acelera o processo.

Conforme Rizzo (2006) após a elaboração do aço no forno primário de fusão o processo de obtenção do aço com o inerente ajuste de composição química, de temperatura e limpidez, pode ser complementado através dos processos de refino secundário, portanto na sequência de produção a mistura líquida é transferida para um forno panela utilizando um orifício situado abaixo do forno. Nessa fase de processo de forno panela é realizada análise química para acerto final da composição química desejada, ilustrado na tabela 2, e também da temperatura necessária para iniciar um processo de solidificação e formação de tarugos em processo de lingotamento contínuo.

Com a obtenção de um tarugo quadrado com bitola em torno de 155 mm e já cortado em comprimento em torno de 6 metros se faz reaquecimento em um forno com temperatura média em torno de 1100°C durante duas horas para homogeneizar a microestrutura para posterior laminação. O tarugo reaquecido passa por 23 passes de laminação para obter uma bitola redonda, que obedece a uma relação de dimensional de produto laminado e trefilado que varia de 4% a 18%. A finalidade dessa relação dimensional é garantir que partindo de uma bitola laminada por exemplo de 24 mm e realizando uma trefilação para um diâmetro de 20,92 mm se obtenha as propriedades mecânicas finais do produto desejado.

No processo de resfriamento do laminado, é fundamental que na esteira rotativa do equipamento formador de espira ocorra um processo de resfriamento lento que garanta a microestrutura perlita e ferrita, conforme ilustrado na figura 3. Outros constituintes como bainita e martensita são indesejáveis na microestrutura final do aço laminado devido os mesmos apresentaram propriedades mecânicas mais elevadas e poderem causar falhas durante processo de trefilação e ainda impedem a obtenção de propriedades mecânicas finais desejadas.

Tabela 2: Composição química especificada em percentual do aço SAE 1552 e resultados encontrados no SAE 1552 modificado que são praticados por usina nacional e americana

Composição química em %			
Elementos	Especificação AISI / SAE 1552	SAE 1552 modificado por fornecedor nacional	SAE 1552 modificado produzido nos Estados Unidos
C	0,47 a 0,55	0,52	0,52
Mn	1,20 a 1,50	1,50	1,44
Si	---	0,27	0,21
P	0,040	0,014	0,014
S	0,050	0,006	0,016
Cr	---	0,11	0,10
Ni	---	0,07	0,10
Mo	---	0,03	0,02
V	---	0,083	0,07
Cu	---	0,005	0,12
Nb	---	0,009	0,002
Sn	---	0,008	0,007

Fonte: Rassini-NHK (2012)

Figura 3: Microestrutura perlita e ferrita resultante no processo de resfriamento em esteira rotativa de equipamento de formação de espiras

Fonte: Rassini-NHK(2012)

Não é realizado tratamento térmico intermediário entre laminação e trefilação e a microestrutura obtida no resfriamento do processo de laminação se manterá nos processos subsequentes até produto final.

No processo de trefilação, ilustrado na figura 4, é usada bobina de laminado de

diâmetro em torno de 24 mm, e através de pré-endireitamento e decapagem mecânica com jateamento o produto laminado é trefilado para uma bitola final de 20,92 mm. O material trefilado é cortado em comprimentos múltiplos em relação a peça final. Após a obtenção da barra trefilada é necessário realizar um polimento e um endireitamento para realização de inspeção de defeitos.

A fase final é a realização de ensaio de tração, para verificar as propriedades mecânicas que foram atribuídas a matéria prima e confrontar com especificação normativa.

Figura 4: Etapas principais do processo de trefilação

Fonte: Nunes (2008)

As verificações comuns na matéria prima do aço com aplicação direta para grampo com conformação a frio são: ensaio de tração (limite de resistência / escoamento, alongamento e redução de área), microestrutura e dureza Rockwell. A tabela 3 ilustra resultados típicos de produtos após fabricação.

Tabela 3: Resultados de ensaio de tração e dureza Rockwell na escala C típicos de produtos após trefilação

Amostra / propriedade mecânica.	Limite de Resistencia em MPa	Limite de Escoamento em MPa	Alongamento em %	Redução de área em %	Dureza média em HRC
1	1173	1035	17	38	33
2	1141	1032	19	40	33
3	1152	1057	19	35	34
4	1100	985	18	40	34
5	1110	1020	18	45	34
6	1120	1010	18	42	33

Fonte: Rassini-NHK (2011)

2.1.4 – PROCESSO PRODUTIVO DE GRAMPO

No fabricante do grampo as barras recebidas da usina de aço com diâmetro 20,92 mm são cortadas no comprimento final da peça, utilizando processos de cisalhamento. A barra é chanfrada em ambas as pontas e utilizam-se rolos laminadores para confecção da rosca. É possível realizar uma deformação planar na região central mantendo os limites normativos de limite de resistência / escoamento, alongamento e redução de área desde que não exceda 50% de redução dimensional entre a peça inicial e a peça deformada plasticamente. Finalmente o grampo é dobrado nas duas extremidades de forma ortogonal em relação ao centro, formando assim um grampo em forma de U, conforme ilustrado na figura 5.

Figura 5: Desenho sem escala de grampo em forma de U

Para realização de grampo produzido sem tratamento térmico e classe de resistência 10.9 existem dois processos possíveis: processo com deformação plástica em região central com posterior conformação final e processo de conformação direta. A figura 6 ilustra processo de fabricação sugerido por Ventura (2006).

Figura 6: Esquema sugerido para fabricação dos grampos sem o tratamento térmico de têmpera e revenido

Fonte: Ventura (2006)

2.1.5 – UTILIZAÇÃO DO GRAMPO

A finalidade do grampo é fixar o feixe de molas ao eixo do veículo constituindo um conjunto sólido dos três componentes da suspensão que são: eixo, feixe de mola e placa de apoio.

Na parte de suspensão de alguns tipos de veículos, alguns componentes estão combinados, formando uma complexa união com o grampo, sendo que cada um desses elementos possuem um efeito sobre o desempenho da união do grampo.

Conforme Ventura (2006) os grampos e outros componentes atuam com as forças de ação e reação e sempre em sentido contrário as molas da suspensão, portanto os grampos carregam sozinhos as forças de tração. Uma das funções do grampo é absorver as altas tensões geradas pela suspensão em ciclos de trabalho.

A suspensão unida está dinamicamente carregada e uma força mínima especificada de torque para montagem deve ser mantida ou o grampo falhará por fadiga.

Na figura 7 ilustra o sistema que é submetido a uma força – F proveniente da solicitação máxima que a mola em trabalho promove. Os grampos devem suportar a solicitação máxima. Na figura 8 ilustra aplicação de grampo na suspensão de veículo e detalhe de uma peça

Figura 7: Esquema mostrando o sistema de fixação do feixe de mola e o sentido das forças a que é submetido.

Fonte: Ventura (2006)

Figura 8: Tipo de aplicação de grampo na suspensão de veículo e detalhe de um tipo de peça

Gentileza: Suspensys Sistemas Automotivos (2013)

2.2 – PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO

De acordo com *ASM Metals Handbook – Heat Treating* (1991) o controle de temperatura é parte integrante das operações para tratamento térmico e também atmosfera e condições de resfriamento. Uma forma de acompanhar a formação de constituintes em tratamento térmico é utilizar curvas TTT - *Temperature, Time, Transformation* (Temperatura ,Tempo, Transformação), que subdividem em :

- i) ITT - *Isothermal Time Transformation* (transformação isotérmica).
- ii) CCT- *Continuous Cooling Transformation* (transformação por resfriamento contínuo).

Para obtenção de curvas TTT é utilizado dilatômetro, que é um equipamento com alta sensibilidade que mede a variação do comprimento do corpo de estudo provocada por alteração de temperatura ou por transformação de fase. A mudança de fase provoca a formação de novas fases, que por sua vez possuem densidades diferentes da fase original, ocasionando contração ou expansão dos corpo de estudo por diferenças estruturais que são percebidas pelo dilatômetro.

Outra forma de obter curvas TTT é através de programas de simulação de tratamento térmico para prever comportamentos e conforme citado por Ferguson e Freborg (2005), a simulação de processos de tratamento térmico deve incluir a evolução micro estrutural das fases. Foi enfatizado que a modelagem e simulação são elementos cruciais no projeto e otimização de sistemas de resfriamento.

Conforme Simsir e Gur (2009) o tratamento térmico de metais é uma parte essencial da cadeia de produção já que a maioria os produtos são pelo menos uma vez tratados a quente na fase de matéria-prima , intermediária ou produto final. A modelagem e simulação são elementos cruciais no projeto e otimização de sistemas de resfriamento. E segundo Nath e Das Uttam (2006) a microestrutura do aço tem uma forte influência sobre a tenacidade à fratura (K_{IC}) de aço médio carbono. A simulação da microestrutura e dureza final é intensamente dependente de uma simulação concisa da distribuição do transiente de temperaturas durante a solidificação e tratamento térmico do aço de estudo. O Stecal é um programa que utiliza um método empírico para calcular parâmetros de tratamento térmico e se baseia em dados de entrada a composição química do aço de estudo. A figura 9 ilustra um exemplo de diagrama TTT.

Figura 9: Diagrama de temperatura , tempo e transformação de um aço SAE 5160

2.3 – TÉCNICA DE ENSAIO DE ULTRASSOM

O ultrassom é um som a uma frequência aproximada de 20.000 Hz que é superior aquela que o ouvido do ser humano pode perceber e segundo Garcia, Spim e Santos (2000) a evolução da tecnologia trouxe a técnica de utilização de ondas ou impulsos ultrassônicos como mais um método de ensaio não destrutivo para detecção de defeitos superficiais ou internos nos materiais. Vibrações mecânicas de frequência muito superior a audível são conhecidas como vibrações ultrassônicas.

Conforme Doyle e Scala (1978) os métodos de ensaio com ultrassom são amplamente utilizados na detecção de defeitos internos e superficiais de materiais estruturais. Devido à crescente complexidade de projetos, por exemplo a aplicação de conceitos de mecânica da fratura para aeronaves há uma motivação especial para desenvolver técnicas quantitativas, ao invés de simplesmente qualitativas, para avaliação não-destrutiva.

Foi publicado por Date (1982), que os resultados que vários métodos de medição de descontinuidades com técnica de ultrassom foram altamente precisos, desde que o ângulo das sondas utilizadas para o ensaio fosse adequado.

Segundo Mak (1985) o método de análise espectral da técnica de ultrassom é de longe o mais confiável para a localização e dimensionamento de trincas por ser baseado na medição do tempo de viagem das ondas sonoras difratadas ou reflexão da trinca.

Ahmed (2000) cita uma medição não destrutiva com técnica de ultrassom de trincas na faixa de tamanho de 1 a 7 mm que a sensibilidade do instrumento permitiu avaliar trincas das quais estavam presentes ou que se desenvolveram durante a operação sendo que foi fundamental para avaliar a integridade dos componentes estruturais.

Segundo Andreucci (2003) o ensaio de ultrassom é um método de ensaio não destrutivo que tem como objetivo a detecção de descontinuidades ou defeitos internos que podem estar presentes nas variedades de materiais, principalmente em aços foi demonstrado por Masserey (2007) o de dimensionamento de trincas estreitas e de fadiga em partes de superfície de um avião com método de única medição com ultrassom que foi baseado no domínio do tempo e frequência.

Para dimensionar crescimento de trinca por ultrassom podem ser utilizados dois métodos de ensaio diferentes e que se completam, sendo:

i) método de transparência que utiliza vibrações constantes ultrassônicas são utilizadas em chapas e placas de metal barras e perfis metálicos e peças pequenas na localização da área do defeito em ensaios contínuos e automatizados.

ii) método de reflexão que se baseia em pulsos ultrassônicos que são empregados em barras e perfis metálicos, peças grandes forjadas ou fundidas e peças pequenas na localização da área da descontinuidade e na determinação da profundidade do defeito.

A preferência de um método ou outro deve-se à geometria da peça e natureza do tipo de defeito a ser detectado. E ainda quanto maior a frequência de vibração, menor é o tamanho da descontinuidade possível de ser detectada. Por outro lado, quanto maior a frequência maior é a absorção do sinal. Como referência os aços necessitam frequência de até 10 MHz que detectam falhas até 1 μm .

2.3.1 – TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS

O efeito piezoelétrico foi descoberto por Jacques e Piere Curie em 1880 que versa ao se cortar uma lâmina cristalina de quartzo e se aplicar carga mecânica em duas faces serão observadas a formação de cargas elétricas opostas. A condição inversa também se verificou quando foi aplicada tensão elétrica nas faces da lâmina com tendência de alterar de tamanho como se houvesse aplicação de uma carga mecânica. Constatou-se que esses materiais possuem a característica de converter um sinal elétrico em energia acústica que se propaga nos meios e vice-versa.

Inicialmente transdutores de ultrassom foram fabricados utilizando efeito piezoelétrico do quartzo e evoluiu para transdutores de titanato de bário. O transdutor (transmissor ou receptor) tratado também como cabeçote é montado numa pequena caixa metálica que contém a lâmina piezoelétrica e um material absorvente de vibrações mecânicas também no interior do cabeçote e em contato com o cristal. A função do material absorvente é amortecer a vibração do cristal e impedir que o metal continue a vibrar mesmo depois de cessado os impulsos elétricos.

Conforme Garcia, Spim e Santos (2000) no emprego da técnica de ultrassom deve ser levado em consideração o efeito da propagação da onda mecânica no interior do material a ser ensaiado, em que a velocidade de propagação é uma função do meio de perturbação, e também considerar que a propagação da onda mecânica é resultado de três tipos de ondas:

i) onda longitudinal (V_1) => velocidade longitudinal em todos materiais.

no ar = 330 m/s

na água = 1500 m/s

no aço = 5908 m/s

ii) onda transversal (V_t) => velocidade transversal somente em meios sólidos.

no aço = 3200 m/s

no alumínio = 3080 m/s

iii) onda superficial (V_s) => velocidade superficial em meio sólido e líquido.

Sólido e líquido = $0,9 \cdot V_t$

As velocidades de propagação das ondas longitudinais, transversais e superficiais são em função do módulo de elasticidade através do sólido, e também está diretamente relacionada ao comprimento de onda propagada e definida como:

$$V = \lambda \cdot f \quad (1)$$

onde: V = velocidade da onda (m/s)

λ = comprimento da onda (m)

f = frequência da onda (Hz)

Durante o ensaio a detecção da onda é visualizado em um tubo de raios catódicos o efeito do eco de retorno da onda mecânica e pode-se determinar, com relativa precisão, a posição e o tamanho do defeito.

Os sinais recebidos são indicados em um osciloscópio, onde o eixo horizontal do mostrador representa o tempo de propagação do sinal acústico e o eixo vertical indica a amplitude do sinal.

Tendo conhecimento da velocidade de propagação das ondas sonoras no material de estudo que está isento de defeitos, pode-se determinar com precisão o tempo de viagem das ondas, e por fim, verificar se um sinal demorou em chegar ou se chegou mais rápido, que é uma indicação que a onda encontrou uma descontinuidade interna que alterou sua propagação normal.

2.4 – ENSAIO DE FADIGA

Conforme *ASM Metals Handbook – Fatigue and Fracture* (1996), as propriedades obtidas por fadiga integram atividades de comparação dos materiais e oferece informações da vida estrutural e estimativa de vida do produto para muitas aplicações de engenharia.

De acordo com Garcia, Spim e Santos (2000) fadiga consiste na aplicação de carga cíclica em corpo de prova apropriado e padronizado segundo o tipo de ensaio a ser realizado, e, os primeiros estudos sobre o comportamento de materiais metálicos a esforços alternados e repetitivos foram feitos por August Wohler, na década de 1850.

A fadiga é uma falha em níveis relativamente baixos de tensão de estruturas sujeitas a tensões flutuantes e cíclicas e a ação de tais esforços cíclicos, ou seja, tensões flutuantes ou repetitivas sobre materiais metálicos podem levar a ruptura a tensões muito inferiores comparativamente com tensões determinadas em ensaio de tração e compressão. A ruptura gerada nesse ensaio é conhecida como ruptura por fadiga e segundo Geary (1992) é de conhecimento geral que o comportamento de propagação de trincas em metais depende de uma série de variáveis incluindo propriedades mecânicas, microestrutura, tamanho da amostra, ambientais e também condições de tensões que estão atuando na ponta da trinca.

É mencionado por Chapetti Et al. (2003) que a propagação de trinca de fadiga ocorre com iniciação superficial ou em descontinuidade interna e a resistência à fadiga de alto ciclo para um intervalo determinado de trinca é estimada pela resistência do material a propagação de uma trinca e em função do comprimento da trinca.

Os esforços aplicados no ensaio de fadiga podem ser axial, resistência à flexão ou torcional. Em geral três diferentes modos de fadiga são possíveis de acontecer. Na figura 10 é possível verificar um atrelamento regular e senoidal em relação ao tempo onde a amplitude é simétrica em volta de um estado médio zero de tensão. A alternância de tensão máxima de tração ($\sigma_{\max}$) e uma tensão mínima de compressão ($\sigma_{\min}$) de proporção idêntica é conhecida como ciclo de tensões alternadas.

Figura 10: Ciclo alternado de aplicação de tensão na forma senoidal

Fonte: Garcia (2000)

Na figura 11 o valor mínimo e máximo é assimétrico em referência ao nível zero de tensão e a grandeza dessa tensão é alternada em volta de uma tensão média (σ_m) que tem como definição a média entre as tensões máxima e mínima no ciclo equivalendo a:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (1)$$

Definindo o intervalo de tensões (σ_i), como a diferença entre $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\sigma_{m\acute{i}n}$, ou seja :

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2)$$

A amplitude da tensão (σ_a), é enunciada como metade do intervalo de tensões, traduzido como:

$$\sigma_a = \sigma_r = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (3)$$

Figura 11: Ciclo de tensões repetidas em torno de uma tensão média (σ_m) na qual as tensões máximas ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e mínimas ($\sigma_{m\acute{i}n}$) não são iguais

Fonte: Garcia (2000)

A figura 12 ilustra o ciclo de tensões aleatórias, que depende de acontecimento incerto, portanto randômico.

Figura 12: Ocorrência de variação com ciclos aleatórios em amplitude e frequência do nível de tensão

Fonte: Garcia (2000)

2.5 – ENSAIO DE TRAÇÃO

Considerando a diversidade de ensaios mecânicos disponíveis para mensurar as propriedades mecânicas o ensaio de tração é mais amplamente utilizado devido ser relativamente simples e rápido gerando informações essenciais para projetos e fabricação de produtos.

Segundo publicado por Christ e Swanson (1976) o ensaio de tração uniaxial é um método usado para medir a resistência e a ductilidade dos materiais e conforme definido por Garcia, Spim e Santos (2000) ensaio de tração consiste na aplicação de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até a ruptura.

O ensaio de tração mede a resistência de um material a um carregamento mecânico estático ou aplicado lentamente. Nesse ensaio um corpo de prova é tracionado por uma máquina com uma carga crescente que é aplicada de forma uniaxial ao longo de um eixo mais comprido do mesmo até sua fratura em um tempo curto e temperatura ambiente e com velocidade constante. A deformação fica limitada a região mais estreita do corpo de prova que possui um dimensional reto constante ao longo de seu comprimento. O equipamento possui uma célula que mensura a carga instantânea de forma contínua e simultânea e através de extensometria é medido o alongamento resultante. O corpo de ensaio após o teste possui uma deformação permanente e de modo geral apresenta fratura. O registro do ensaio pode ser observado em um gráfico com parâmetros de carga ou força em função de alongamento, porém é importante entender que a particularidade carga-deformação é dependente do

tamanho da amostra.

Para reduzir influencia de fator de geometria no ensaio, a carga e o alongamento são normalizados segundo seus correspondentes parâmetros de tensão e deformação de engenharia. A tensão de engenharia (σ) com unidade em MPa (SI) e libras-força por polegada quadrada (psi) é enunciada pela relação: A figura 13 ilustra curva tensão-deformação de engenharia.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Sendo que F é a carga instantânea em Newton (N que teve uma aplicação em direção perpendicular a seção reta da amostra e A_0 é a área em m^2 da seção reta original antes de aplicar carga.

De acordo com Shackelford (2008) deformação de engenharia (ϵ) pode ser definido como o aumento no comprimento da amostra sob determinada carga dividido pelo comprimento original (sem tensão). A deformação de engenharia é adimensional e traduz-se matematicamente da seguinte forma:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Onde:

l_0 = comprimento original antes da aplicação da carga e unidade em metro.

l_i = comprimento instantâneo e unidade em metro.

$\Delta l = l_i - l_0$ (alongamento da deformação ou variação no comprimento em metro a um dado instante em referencia ao comprimento original).

Figura 13: Curva tensão-deformação de engenharia.

Fonte: Dieter (1981)

Algumas das principais propriedades mecânicas obtidas em um ensaio de tração são:

- módulo de elasticidade (E) ou módulo de Young, que é a inclinação da curva tensão-deformação na região elástica. A linearidade da curva tensão-deformação na região elástica representa a lei de Hook graficamente e pode ser expressa da seguinte forma:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

- limite de proporcionalidade é o ponto sobre uma curva tensão-deformação em que cessa a proporcionalidade em linha reta entre a tensão e a deformação.

- tensão limite de escoamento é a tensão necessária para produzir uma quantidade de deformação plástica muito pequena, porém definitiva.

- tensão limite de resistência à tração é a máxima tensão de engenharia.

- estrição em material dúctil ilustrado na figura 14(a) ocorre com deformação em um ponto da amostra com grande redução de seção transversal persistindo até ruptura. Para materiais frágeis está ilustrado na figura 14(b).

Figura 14: Fratura dúctil taça-cone em alumínio (a); fratura frágil em aço médio carbono (b)

Fonte: Callister (2007)

2.6– FUNDAMENTOS DA FRATURA DE MATERIAIS DE ENGENHARIA

De acordo com Smith (1998) fratura é a separação de um sólido sob tensão em duas ou mais partes. Segundo publicado pela *ASM Handbook Fractography*, volume 12, referente os modos de fratura os metais falham de muitas maneiras diferentes e por razões diferentes e determinar a causa da falha é vital na prevenção da reincidência.

A superfície da fratura é uma das mais importantes fontes de informações sobre a causa da falha, sendo um registro detalhado de parte da história da falha que contém evidências de carregamento, efeitos ambientais e qualidade do material, sendo que a principal técnica usada para analisar esta evidência é microscopia eletrônica.

A formação e a proliferação de trincas são duas etapas de um processo de fratura, em resposta a uma tensão imposta, sendo que existe uma dependência da propagação da trinca com a modalidade da fratura.

Segundo Castro (2007) para materiais de engenharia há somente dois tipos de fratura: dúctil e frágil e essa classificação está baseada na habilidade de um material de experimentar uma deformação plástica.

A fratura dúctil tem como característica uma vasta deformação plástica nas cercanias de uma trinca que avança. Entende-se portanto que a fratura dúctil ocorre apenas após ampla deformação plástica e tem característica de propagação lenta de trincas resultantes da nucleação e crescimento de micro cavidades. A presença de deformação plástica gera indícios de uma fratura que em alguns casos permite se tomar uma ação antes da falha.

Já na fratura frágil as trincas tem a faculdade de alastrar de maneira rápida com acompanhamento de baixa deformação plástica, sendo caracterizado como instável, pois uma

vez iniciada a trinca ocorrerá uma continuação de forma espontânea sem que ocorra um incremento da magnitude da tensão.

Devido ocorrer propagação rápida de trincas que pode ser acompanhada de pouca ou nenhuma deformação, nos materiais cristalinos como, por exemplo, aço acontece em determinados planos cristalinos denominados planos de clivagem ou ao longo dos contornos de grão. A fratura frágil pode ocorrer de maneira catastrófica, sem ocorrência de um aviso em consequência da rapidez de propagação da trinca.

Levando em consideração um material convencional policristalino como o aço que nele existe uma enormidade de heterogeneidades microestruturais que por sua vez podem atuar como sítios de nucleação de cavidades.

O contorno de grão pode ter atuação como uma heterogeneidade microestrutural, sendo o mecanismo que predomina em fratura em materiais policristalinos dúcteis. O esgotamento plástico se desenvolve nas fronteiras de micro cavidades induzindo à ruptura gradual e contínua do material. Uma observação com microscopia eletrônica revela o mecanismo na superfície de fratura onde se constata a presença de alvéolos, que são os remanescentes das cavidades nucleadas. Uma ilustração pode ser observada nas figuras 15(a) e 14(d).

A fratura frágil transgranular por clivagem, ilustrada na figura 15(b) geralmente é aproximadamente perpendicular à tensão de tração aplicada e o resultado é uma superfície relativamente plana e brilhante. Em materiais policristalinos tem uma correspondência de fratura sucessiva das ligações atômicas no decorrer de um plano cristalográfico característico denominado plano de clivagem. Esse modelo de fratura que tem um relevo característico ilustrado na figura 15(e) é denominado marcas de rio e é característico em metais que apresentam algum impedimento para o escorregamento de discordâncias como por exemplo materiais com alta resistência mecânica. Esse tipo de morfologia permite através de fractografia a determinação da direção da propagação da trinca fazendo-se observação da superfície de fratura. Já na fratura frágil intergranular observa-se ocorrência da trinca em contorno de grão, devido esse contorno apresentar resistência mecânica menor que a matriz ocorrendo por exemplo devido precipitados frágeis no contorno ou estruturas cristalinas complexas. Uma característica marcante da fratura frágil é o trajeto da trinca que ocorre ao longo dos contornos de grão ilustrado na figura 15(c) revelando o seu formato tridimensional conforme figura 15(f).

Figura 15: Três micro mecanismos de fratura em metais: (a) fratura dúctil, (b) clivagem e (c) fratura intergranular; e respectivas imagens (d,e,f) realizada por microscopia eletrônica
 Fonte: Anderson (2005) e Electron Microanalysis (2013)

2.7 – MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Na atualidade a simulação utilizando a técnica MEF - Método de Elementos Finitos (*FEM - Finite Elements Method*) é utilizada amplamente por muitos pesquisadores para analisar os processos de variedades diversas.

Segundo Helmi Et al. (2012) desde o início da década de 1960 muito progresso tem sido feito no método de análise de elementos finitos e hoje é visto como um procedimento geral de resolver distintos problemas de forma matemática.

De acordo com Azevedo (2012) no âmbito da engenharia de estruturas o Método dos Elementos Finitos tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores.

Conforme Mohd e Amir (2012) foi demonstrado que através de métodos de elementos finitos a resistência e a rigidez do chassi submetido às cargas exigidas. Os resultados mostraram que o chassi foi capaz de suportar as cargas exigidas com desvios mínimos.

Bathe (1996) menciona que o método dos elementos finitos se usa para resolver problemas físicos na análise de engenharia e projeto e o diagrama de fluxo resume o processo.

O problema físico envolve tipicamente uma estrutura real ou componente estrutural submetido a uma determinada carga. A idealização do problema físico a um modelo matemático requer equações diferenciais que regem o modelo matemático portanto a análise por elementos finitos resolve este modelo matemático.

Uma vez que a técnica de solução de elementos finitos é um procedimento numérico que é necessário para a exatidão da solução e se os critérios não forem satisfeitos precisamente a solução por elementos finitos numéricos tem que ser repetida com parâmetros de solução refinados tais como malhas mais fina até uma precisão suficiente seja atingida. A figura 16 ilustra o fluxo do método de elementos finitos.

Figura 16: Fluxo do método de elementos finitos

Fonte: Bathe (1996)

2.8 – TÉCNICA DE EXTENSOMETRIA

Para medições de tensões têm sido explorado e desenvolvido diferentes métodos de inspeção não destrutivos, entretanto o extensômetro é um dispositivo que tem recebido uma vasta utilização devido a sua aplicabilidade e pode ser definido como um transdutor capaz de medir deformações de corpos, sendo que no ato que um material é deformado sua resistência elétrica é alterada. A fração de mudança na resistência é proporcional à fração de mudança no comprimento do material.

Segundo Andolfato, Camacho e Brito (2004) os medidores de deformação chamados extensômetros elétricos são dispositivos de medida que transformam pequenas variações nas dimensões em variações equivalentes em sua resistência elétrica. Pode ser encontrada uma variedade de modelos construtivos de extensômetros que dependem diretamente da sua aplicação e são fabricados com uma ou mais malhas de medição, sendo:

- i) modelo com uma malha de medição- uniaxial (medição somente em uma direção)
- ii) duas malhas de medição – biaxial (medição em duas direções)
- iii) três malhas de medição – rosetas (medição em três direções)
- iiii) quatro malhas de medição – rosetas (medição em quatro direções); e
- iiiii) cadeia de medição – (diversos extensômetros uniaxiais em paralelo)

Conforme ilustrado na figura 17 a codificação é feita por um conjunto de letras e números que identifica o extensômetro, conforme suas características.

Figura 17: Sistema de codificação de extensômetros

Fonte: Excel Sensores (2012)

2.9 – PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DA FRATURA

Segundo Shackelford (2008), mecânica da fratura é uma análise de material estrutural com defeito pré-existente e conforme Anderson (2005) os conceitos da mecânica da fratura que derivaram-se antes de 1960 são aplicáveis apenas aos materiais que obedecem a lei de Hooke. Embora as correções da plasticidade em pequena escala foram propostas logo em 1948, essas análises são restritas a estruturas cujo comportamento global é linear elástico. Desde 1960, teorias de mecânica de fratura foram desenvolvidas para ter em conta vários tipos de comportamento do material não linear (exemplos, plasticidade e viscoplasticidade) bem como efeitos dinâmicos. Todos os resultados das teses mais recentes, no entanto, são extensões da mecânica da fratura elástica linear (MFLE).

De forma geral, os materiais, dependendo do campo de tensões aplicadas, podem apresentar comportamento elástico e/ou plástico. A elasticidade é o comportamento de corpos sólidos que experimentam deformações que são reversíveis e plasticidade pode ser descrita como sendo o comportamento de corpos sólidos que se deformam permanentemente sob a ação de cargas externas.

Conforme descrito por Ruchert (2007) a tenacidade a fratura é determinada através do parâmetro denominado de fator de intensidade de tensão, K , que é uma medida da concentração de tensão na ponta da trinca, que se assemelha ao fator de concentração de tensão K_T , porém, não são equivalentes. E conforme Mandai (2010) A tenacidade a fratura K_{IC} de um material caracteriza sua resistência ao crescimento de uma trinca, ou seja, a quantidade de energia que o material pode absorver até o momento da falha.

2.9.1 – VARIAÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO (ΔK)

Conforme Hertzberg (1995) a superfície da fratura do objeto de estudo que ocorreu a falha também pode ser investigada pela análise de tensões baseado no conceito da teoria elástica, através de metodologia analítica descrita por Westergaard e Irvin que exibiram soluções da distribuição de tensões para a ponta da trinca agregada com três modos básicos de carregamentos, conforme ilustrado na figura 18.

Figura 18: Modo de carregamento em uma trinca.
 Fonte: Adaptado de Callister (2007)

Modo I : modo de carregamento em tração, onde ocorre deslocamento das superfícies da trinca perpendicular entre ambas.

Modo II : modo de deslizamento, onde ocorre um cisalhamento, com deslocamento das superfícies da trinca de modo paralelo e também perpendicular a frente da propagação.

Modo III : modo de rasgamento, ou cisalhamento fora do plano, com deslocamento das superfícies da trinca, onde ocorre movimento em direção contrária entre si e com paralelo referente a frente de propagação.

Conforme Anderson, T.L (1995), Irwin, a partir dos métodos analíticos desenvolvidos por Westergaard para quantificar as tensões na frente de uma trinca em materiais elásticos, definiu o fator de intensidade de tensão K, que no modo de carregamento trativo pode ser dado como:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy} \right\} \quad \text{Para } \theta = 0 \quad (1)$$

sendo que, σ_{yy} é a tensão normal ao plano da trinca e θ é o ângulo entre a direção longitudinal à frente da trinca e o plano de tensão estudado.

Para o caso de uma chapa com dimensões infinitas, contendo uma trinca planar passante, de comprimento $2a$ e carregada remotamente com uma tensão trativa uniaxial σ , perpendicular ao plano da trinca, a expressão do fator de intensidade de tensão será:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Uma expressão geral, no caso de corpos de prova de dimensões finitas, tem-se:

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (3)$$

onde Y é chamado fator de forma $f(a/W)$, e pode ser encontrado em normas e livros da área.

O fator de forma Y ou $f(a/W)$ representa um parâmetro ou função adimensional que depende tanto dos tamanhos quanto das geometrias da trinca e da amostra. Este fator foi calculado matematicamente para vários tipos de corpos de provas laboratoriais, como por exemplo, os quatro corpos de prova ilustrados na Figura 19. O que determinará a utilização do corpo de prova é a geometria real do componente associado ao tipo de carregamento empregado.

$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{K_I B \sqrt{W}}{P}$	
(a) Compacto de tração - C(T)	
$\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.60 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$	
(b) Compacto em forma de disco	
$\frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0.76 + 4.8 \left(\frac{a}{W}\right) - 11.58 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 11.43 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 4.08 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$	
(c) Corpo de prova de simples entalhe carregado em tres pontos (momento)	
$\frac{3 \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right]$	
(d) Corpo de prova de painel com furo central	
$\sqrt{\frac{\pi a}{4W}} \sec \frac{\pi a}{2W} \left[1 - 0.025 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.06 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$	

Figura 19: Exemplo de fatores de forma $f(a/w)$ para algumas geometrias de corpo de prova mais utilizadas

Fonte: Adaptado de Ruchert (2007)

2.10 – TENSÃO RESIDUAL MEDIDA COM TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Conforme Askeland e Phulé (2008) as tensões residuais são tensões introduzidas durante o processamento e resultam do trabalho a frio ou de expansão e contração de origem térmica.

De acordo com a publicação de Shackelford (2008) tensão residual é a tensão presente no interior de um material estrutural após todas as cargas aplicadas terem sido removidas.

A tensão residual pode ser introduzida por diversas formas e conforme *ASM Metals Handbook Volume 1* o padrão de tensão produzido por trefilação a frio depende do montante da redução e a configuração da peça bem como a microestrutura, dureza e classe do aço.

Segundo Nelson (1982) é bem conhecido que regiões com tensões residuais compressivas retardam a taxa de crescimento de trinca, enquanto que regiões de tensão residual de tração agem de forma contrária. Conforme mencionado por Kingston Et al. (2006) existe uma variedade de técnicas que permitem a medição de tensões residuais e elas geralmente são subdivididos em três categorias. Técnicas não destrutivas como difração de raios-x e difração de nêutrons que permitem várias medições no mesmo ponto espacial. As técnicas semi-destrutivas tais como superfície de furação e anel interior que danificam apenas uma pequena parte da amostra e assim permite mais medições em diferentes locais. Finalmente técnicas destrutivas por camadas que destroem completamente a amostra.

Conforme publicado pelo fabricante Rigaku (2007) o equipamento de difração de raios-x permite a medição de tensão residual de forma não-destrutiva na superfície de um material. Tais medições são feitas pelo cálculo de tensão residual causado pelas distorções do espaçamento interplanar que foram determinadas por difratometria de raios-x. Quando um metal ou outro material policristalino é deformado por uma força externa a força normalmente inclui forças de compressão e tração alterando o espaçamento interplanar em três dimensões e mudando a posição de pico do perfil de difração observado em maior medida do que nos casos sem distorção.

Em 1912 William Lawrence Bragg e William Henry Bragg formularam uma equação matemática que seria usada para prever ângulos onde seriam encontrados os picos de intensidade máxima de difração. Essa equação é conhecida como lei de Bragg e está ilustrada na figura 20 e equação (1). A tensão residual é calculada a partir dos deslocamentos de posição de pico. Conforme Ranganathan (1976), a teoria envolvida na determinação de tensões residuais por difração de raios-x relaciona ângulo normal da superfície da amostra normal e a bissetriz do ângulo entre os feixes de raios-x incidentes e difratados.

Figura 20: Representação da lei de Bragg e detalhe do comprimento de onda λ do raio x

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

Onde : d = distância interplanar.
 λ = comprimento de onda dos raios x espalhados.
 θ = ângulo de espalhamento.
 n = um inteiro.

Quando a equação (1) é diferenciada por θ , é obtida a seguinte relação entre o ângulo de difração e espaçamento interplanar da rede:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

A quantidade de distorção ε_Φ é definido aproximadamente pela seguinte equação:

$$\varepsilon_\Phi = \frac{\Delta d_\Phi}{d_0} = -\cot \theta_0 (\theta_\Phi - \theta_0) \quad (3)$$

Onde : d_0 = espaçamento da distorção do retículo cristalino.

θ_0 = o ângulo de difração.

d_Φ = espaçamento do retículo cristalino.

θ_Φ = ângulo de difração.

Considerando a relação entre a tensão planar da superfície da amostra e o estado de distorção deduzindo-se uma expressão que relaciona o estresse em um determinado ângulo superficial da amostra. Supondo que a inclinação é normal para o plano de difração do retículo cristalino e o plano de amostra é Ψ . Em referencia a medição no ponto 0 ilustrado na figura 21, supondo que as tensões primárias são σ_1 , σ_2 , e σ_3 e que as principais distorções são ε_1 , ε_2 , e ε_3 , conclui-se que a tensão no plano σ_3 na direção do eixo z é 0, portanto obtém-se:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \nu\sigma_2}{E} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2 - \nu\sigma_1}{E} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\nu(\sigma_1 - \nu\sigma_2)}{E} \quad (4.3)$$

Onde: E = módulo vertical de elasticidade

ν = razão de Poisson.

Assumindo que a tensão $\sigma_x \perp \sigma_y$, e distorção $\varepsilon_x \perp \varepsilon_y$, obtém-se:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \nu\sigma_y}{E} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu\sigma_x}{E} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_3 = \frac{\nu(\sigma_x - \nu\sigma_y)}{E} \quad (5.3)$$

A distorção $\varepsilon_{\Phi\Psi}$ é avaliada conforme a seguinte equação :

$$\varepsilon_{\Phi\Psi} = \varepsilon_1 \cos^2 \Phi \sin^2 \Psi + \varepsilon_2 \sin^2 \Phi \sin^2 \Psi + \varepsilon_3 \cos^2 \Psi = (\varepsilon_1 \cos^2 \Phi \sin^2 \Phi) \sin^2 \Psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \Psi) \quad (6)$$

Enquanto que:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 \cos^2 \Phi + \varepsilon_2 \sin^2 \Phi$$

Obtendo:

$$\varepsilon_{\Phi\Psi} = \varepsilon_x \sin^2 \Psi + \varepsilon_3 (1 - \sin^2 \Psi) \quad (7)$$

Das equações (5.1), (5.2), e (5.3), obtemos a seguinte condição:

$$\varepsilon_{\Phi\Psi} = \frac{\{(1+\nu)\sigma_x \sin^2 \Psi\}E}{E - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)} \quad (8)$$

A distorção é obtida pela inclinação da equação de Ψ , que expressa o ângulo entre o plano normal de difração do retículo cristalino e plano normal da amostra normal. (Rigaku, 2007)

$$\frac{\partial \varepsilon_{\Psi}}{\partial \sin^2 \Psi} = \frac{\{(1+\nu)\sigma_x\}}{E} \quad (9)$$

Através das equações (3) e (9) é obtida a equação (10) que expressa σ_x (valor da tensão residual):

$$\sigma_x = \left\{ \frac{E}{(1+\nu)} \right\} \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon_{\Psi}}{\partial \sin^2 \Psi} \right) = - \left(\frac{1}{2} \right) \left\{ \frac{E}{(1+\nu)} \right\} \cot \theta_0 \left(\frac{\partial 2\theta_{\Psi}}{\partial \sin^2 \Psi} \right) \left(\frac{\pi}{180} \right) \quad (10)$$

Conforme Rigaku (2007) , o valor de tensão residual pode ser deduzido a partir do pico do ângulo de 2θ e $\sin^2 \Psi$ em função da inclinação. Na realidade as medições e a superfície do espaçamento interplanar do retículo cristalino é medido em uma direção específica, em um plano perpendicular à superfície planar da amostra, que contém a direção da tensão. Portanto, o gráfico $2\theta - \sin^2 \Psi$ é derivado da distribuição da resultante da posição do pico (Ver pontos • indicados na Figuras 22 e 23).

Figura 21: Direções de tensões primárias e distorções
Fonte: Rigaku (2007)

Figura 22: Gráfico $2\theta - \sin^2\Psi$ para tensão de compressão
Fonte: Rigaku (2007)

Figura 23: Gráfico $2\theta - \sin^2\Psi$ para tensão de tração
Fonte: Rigaku (2007)

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – LINHAS DE ESTUDO

As falhas em componentes mecânicos geralmente possuem início em descontinuidades, que podem ser microscópica ou macroscópica, e, para entender os mecanismos que levam a ruptura de componentes, algumas vezes, uma análise específica pode gerar subsídios para solucionar problemas, porém devido a necessidade de aprofundamento para melhor entendimento da falha em grampo em processo produtivo, foram utilizadas duas linhas de estudo nesse trabalho, ilustrado na figura 25 com a finalidade de fornecer um número maior de informações para o entendimento da tecnologia estudada. As linhas do trabalho são:

Figura 25: Fluxograma de estudos

3.1.1 - LINHA 1 DE ESTUDO

- estudo de formação de microestrutura através de programa de simulação de

tratamento térmico denominado Stecal 3.0;

- medição de profundidade de trinca em cotovelo de grampo por meio da técnica de ultrassom;
- ensaio de fadiga em conjunto montado para verificar crescimento de trinca;
- ensaio de cela; e
- análise de trinca em peças que apresentaram trinca em cotovelo no processo produtivo.

3.1.2 - LINHA 2 DE ESTUDO

- estudo das tensões através de elementos finitos utilizando programa de computador denominado Abaqus / CAE release 6.10;
- ensaio de extensometria em cotovelo externo de grampo;
- estudo das tensões residuais em cotovelo através de difração de raio x; e
- uso da mecânica da fratura no componente grampo em estudo.

3.1.3 – MATERIAL ESTUDADO

A liga estudada é um aço SAE 1552 modificado com silício, que foi vazado via lingotamento contínuo com posterior laminação e subsequente resfriamento controlado para obter uma microestrutura perlita e ferrita. As propriedades mecânicas foram atribuídas através de processo de trefilação, conforme já explicado no item 2.1.3 desse trabalho.

Para os ensaios de tração, ultrassom, fadiga, ensaio de cela, análise de falha, extensometria, e medição de tensões residuais foram utilizados o aço SAE 1552 modificado, com diâmetro de 20,92 mm e comprimento total da barra 696 mm. Para o ensaio de tenacidade a fratura K_{IC} , foi utilizada barra redonda com diâmetro de 35,00 mm e 500 mm de comprimento. A respeito do processo de fabricação, o material é deformado planarmente (achatamento na região central) a frio, com posterior dobramento em formato de U com raio de canto de 25 mm, seguido de inspeção com técnica de líquido penetrante. Os ensaios de tração uniaxial foram realizados no laboratório da Gerdau utilizando-se de uma máquina universal marca INSTRON e de acordo com as recomendações da norma ASTM E8M. Os

testes foram realizados à temperatura ambiente e foram ensaiados três corpos de prova com dimensional conforme figura 26. Os corpos de prova foram retirados na direção de laminação da barra redonda diâmetro de 20,92 mm. Os resultados estão descritos na tabela 4.

Figura 26: Dimensões do corpo de prova de tração em milímetros

Tabela 4: Propriedades mecânicas testadas do aço SAE 1552 modificado

$S_{ys (0.2\%)} \text{ (MPa)}$	$S_u \text{ (MPa)}$	$E \text{ (GPa)}$	$AL(\%)$	$RA \text{ (}\%)$
1010	1130	209	15	39
985	1100	209	18	40
1035	1141	209	19	40

A composição química foi realizada no laboratório da Gerdau utilizando-se de um equipamento Leco CS-444LS para análise de Carbono e Enxofre, seguindo as recomendações da norma ASTM A751 e ASTM E1009. Para análise de manganês, silício, fosforo, cromo, níquel, vanádio, cobre, nióbio, alumínio e estanho foi utilizado equipamento Espectrômetro de Emissão Óptica ARL 3560 e de acordo com as recomendações da norma ASTM E350. Os resultados estão ilustrados na tabela 5.

Tabela 5: Resultado em porcentagem em peso de composição química do aço SAE 1552 modificado com silício

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Nb	Al	Sn
0.51	1.50	0.23	0.018	0.006	0.10	0.05	0.03	0.09	0.17	0.002	0.017	0.007

3.2 – MÉTODO APLICADO PARA CADA LINHA DE ESTUDO

O método aplicado para cada linha de estudo foi explanado individualmente para melhorar o entendimento desse trabalho.

3.2.1 – LINHA 1: ESTUDO DA MICROESTRUTURA ATRAVÉS DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO STECAL 3.0

O programa SteCal 3.0 é um aplicativo baseado no Microsoft Windows que calcula os parâmetros e propriedades comportamentais representativas de aços de baixa liga e prevê os parâmetros de tratamento térmico em tais aços.

Esse é um programa de simples utilização onde após abertura da tela principal já é possível inserir valores percentuais de elementos químicos tais como: C, Mn, P, S, Si, Ni, Cr, Mo. A figura 27 ilustra a configuração da tela principal do programa Stecal. Foi adotado tamanho de grão austenítico 7 ASTM para fins desse estudo. Por razões óbvias é impossível para o cálculo levar em conta os efeitos de elementos químicos que não são inseridos na composição da liga desse estudo.

Foram utilizados dados de percentual de composição química da tabela 2, e inseridos no programa Stecal 3.0 valores mínimo e máximo da composição química do aço SAE 1552 e para fins comparativos, foi introduzida composição química do aço SAE 1552 modificado nacional e aço importado.

Figura 27: Programa de simulação de tratamento térmico Stecal 3.0

Na tabela 6 podemos observar os quatro tipos de experimentos realizados no programa de simulação Stecal.

Tabela 6: Tipos de experimentos realizados no programa de simulação Stecal

Experiência	Descrição
1	SAE 1552 com composição química no mínimo especificada
2	SAE 1552 com composição química no máximo especificada
3	SAE 1552 modificado (Brasil)
4	SAE 1552 modificado (Estados Unidos)

O resultado da simulação, que são os parâmetros para realizar tratamento térmico, foi verificado acessando a barra de tarefas do programa. No ícone resultado (*results*) foi extraído os dados de curva TTT e parâmetros de tempo e temperatura para realizar o tratamento térmico.

3.2.2 – LINHA 1: MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE DE TRINCA ATRAVÉS DE TÉCNICA DE ULTRASSOM.

A Trinca gerada no processo de conformação do grampo foi observada no cotovelo externo e foi dimensionada para verificar sua geometria através da técnica de ultrassom. Foi utilizado o equipamento de ultrassom Karl Deutsch - Digital Echograph, marca GE , nº série 56928 com método pulso eco, e visualização da medida foi obtida em tela A – scan. A capacidade do equipamento utilizado varia de 0,5 a 25 MHz e foi empregado cabeçote angular de 60°.

O ensaio de ultrassom foi realizado por técnico especializado da empresa Gerdau e foi possível dimensionar a profundidade da trinca conforme ilustrado na figura 28.

Figura 28: Ensaio de ultrassom em cotovelo de grampo e dimensionamento de profundidade de trinca

3.2.3 – LINHA 1: ENSAIO DE FADIGA EM CONJUNTO MONTADO PARA VERIFICAR CRESCIMENTO DE TRINCA.

O ensaio de fadiga é muito utilizado pela indústria para desenvolvimento e controle de qualidade de feixes de mola e mola helicoidal. Com o advento de novas tecnologias de materiais esse ensaio tornou-se fundamental, pois a indústria tem uma base de dados sólida que permite comparar o desempenho de peças. Esse ensaio não é normativo, mas é padronizado pela empresa Rassini-NHK para fazer estudos de desempenho de peças. Uma vez obtendo ensaio sem falha catastrófica a peça tende a repetir bons resultados em teste de campo. Os grampos que foram inspecionados e separados no ensaio de líquido penetrante e dimensionadas as trincas pela técnica de ultrassom foram montados em dupla para fixação do conjunto montado do feixe de mola e submetidos a 150.000 ciclos em ensaio de fadiga em uma unidade hidráulica. O número de 150.000 ciclos é uma determinação para o fabricante do feixe de molas que não é objeto de estudo desse trabalho. Para a peça de estudo não existe nenhuma especificação normativa para ensaio de fadiga. A figura 29 ilustra o ensaio de fadiga em conjunto montado.

Figura 29: Ensaio de fadiga em conjunto montado com grampo

3.2.4 - LINHA 1: ENSAIO DE CELA

O ensaio de cela é ensaio de tração cujo resultado é analisado através de comparativo com um banco de dados que contém outros ensaios de cela já realizados anteriormente, portanto sendo comparativo não é normatizado. O ensaio mede a resistência à tração do grampo conforme sua geometria e para realizar essa avaliação foi utilizado máquina universal de ensaios com auxílio de um ferramental específico que apresenta mesma geometria de assentamento da peça de estudo. O objetivo desse ensaio é verificar qual a resistência do grampo quando solicitado à tração e ainda verificar se uma trinca tem alguma influência significativa. Na parte superior do dispositivo a geometria do ferramental acompanha o dimensional de assentamento do grampo e na parte inferior existe uma placa com dupla furação que permite a passagem das hastes roscadas da peça sem ocorrer interferência. Foram utilizadas arruelas e porcas em cada parte roscada do grampo para fixação da peça no dispositivo. Antes dos grampos serem ensaiados foi adicionada uma identificação vermelha na haste e no cotovelo para indicar que foi detectada uma trinca nesse cotovelo e ainda uma identificação verde na outra haste onde não foi detectada nenhuma trinca no cotovelo. A finalidade da identificação é somente facilitar a visualização da peça antes e após o ensaio de cela. Os ensaios foram realizados em dez corpos de prova na empresa *CMP (Consolidated Metal Products)*, que é detentora da tecnologia e do banco de dados desse ensaio em grampos produzidos com deformação a frio e foi utilizando uma máquina universal marca INSTRON e seguindo as recomendações da norma interna para ensaio de cela da empresa CMP. Os testes foram realizados à temperatura ambiente. Através de esforço na mesma direção foi tracionado o grampo até sua ruptura e observada a carga da falha. A figura 30 ilustra a condição de fixação de um grampo no ensaio de cela.

Figura 30: Ensaio de cela em grampo. Fonte: CMP-USA (2012)

3.2.5 – LINHA 1: ANÁLISE DE GRAMPO QUE APRESENTOU TRINCA DURANTE PROCESSO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA.

O grampo U desse estudo foi produzido a partir de um bastão cilíndrico com rosca em ambas as pontas das hastes, sendo posteriormente deformado planarmente, ou seja, achatado na região central. Através da fixação da peça em um dispositivo é realizado um dobramento na geometria desejada. Foi utilizada para esse dobramento uma unidade hidráulica para obter a geometria final em formato de U. A primeira fase do processo foi inserir a barra já deformada planarmente figura 31(a) na ferramenta de fixação. A garra de fixação prende a barra roscada no ferramental que através de movimentos na unidade hidráulica fornece um dobramento para a geometria final do grampo. O grampo U é conformado na indústria conforme processo ilustrado na figura 31 onde mostra a sequência de operação que a peça é submetida.

Figura 31: A figura mostra em (a) peça antes de posicionamento no dispositivo de dobramento; (b) região central engastada e início do dobramento; (c) conformação intermediária conforme geometria de ferramental; (d) conformação final

Durante o estudo de falhas para todo lote produtivo de peças foi selecionado grampas que apresentaram trincas no processo de dobramento. Para realizar essa separação foi utilizada técnica de líquido penetrante e com auxílio de estéreo microscópio e uma câmera digital Cyber-shot 7.2 foi registrado a imagem da região da falha.

Foi seccionado uma amostra de grampo fraturado durante processo de dobramento para análise em microscópio eletrônico de varredura e posterior corte com serra manual no sentido longitudinal da barra para obter amostra para embutimento para metalografia. Com a amostra embutida foi executado o procedimento de preparação metalográfica segundo norma ASTM E3 com lixamento utilizando lixa água com granulação 80, 180, 320, 600 e 1200. O polimento foi realizado com pasta de diamante com dimensional de 1 micron. A observação de corpos de prova de metalografia foi realizada em microscópio ótico Olympus BX51M com ampliação de 50 a 1000 vezes. O registro da imagem de metalografia foi realizado utilizando uma câmera digital Nikon DS-Ri1.

3.2.7 – LINHA 2: ESTUDO DO NÍVEL DAS TENSÕES POR MEIO DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO ABAQUS / CAE RELEASE 6.10

O objetivo dessa análise foi realizar a simulação por meio do método dos elementos finitos de um grampo que é ensaiado com esforço de tração quase estático. Foi avaliado o comportamento do grampo com a aplicação de uma carga para se obter o campo de tensões na peça. Foi utilizado o software Abaqus / CAE release 6.10 e realizado estudo de tensões geradas no cotovelo de um grampo para feixe de mola e analisado especificamente esta região da peça. O modelo possui simetria na geometria e carregamento, assim para a simulação foi considerada uma condição de simetria no plano passante no meio do conjunto. As condições do modelamento estão demonstradas nas figuras 32 até 41.

3.2.7.1 – CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

Foi modelado o problema e foi considerado o grampo, o selo do grampo, a placa “plate” e a porca que prende que restringi o movimento da placa ao longo do grampo. A figura 32 ilustra o modelo e geometria da peça obtido no programa Abaqus.

Figura 32: Modelo de caracterização do estudo e geometria da peça obtida no programa Abaqus

3.2.7.2 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO

Para da peça da montagem foram definidos os graus de liberdade através da aplicação de condições de contorno. Para a cela foi aplicada uma condição de contorno engaste, isto é sem movimento ou rotação em X, Y ou Z. A figura 33 ilustra a fixação da superfície rígida representando a cela.

Figura 33: Fixação da superfície rígida representando a cela

Para o grampo foi definido uma condição de contorno de simetria e dessa maneira a face onde foi aplicada a condição de contorno não tem translação em X nem rotação em Y e Z. Essa condição de contorno faz necessária por causa da simplificação de modelo realizada, dessa maneira foi modelado apenas metade e considerado a simetria para avaliar o todo. Este artifício é utilizado para diminuir o tamanho do problema analisado diminuindo o consumo de memória durante a análise tornando a mesma mais rápida. A figura 34 mostra a condição de simetria utilizada no modelo de estudo.

Figura 34: Condição de simetria utilizada no modelo de estudo

Na placa foi aplicado restrições de translação em X e Z e rotação nos 3 eixos, assim ficando um único grau de liberdade na translação em Y. A figura 35 ilustra direção Y e engastamento da placa.

Figura 35: A placa fica engastada e livre na direção Y ($U2 \neq 0$)

No modelamento do problema foram considerados os contatos entre a sela e o grampo e ainda o grampo e a placa. Para esses contatos não foram considerados o coeficiente de atrito entre as superfícies. A figura 36 ilustra a área de contato 1 da simulação e a figura 37 ilustra a área de contato 2 da simulação.

Figura 36: Área de contato 1 da simulação realizada no cotovelo interno do grampo

Figura 37: Área de contato 2 da simulação realizada na região roscada do grampo

Entre a região roscada do grampo e a placa foram consideradas uniões rígidas denominado no programa como tie. A figura 38 ilustra detalhe da união rígida realizada na região de rosca do grampo.

Figura 38: Detalhe da união rígida realizada na região da rosca do grampo

3.2.7.3 – CARREGAMENTO

Baseado nos dados dos ensaios de cela foi aplicada uma carga média na peça e foi desconsiderado o primeiro valor de 184.5 KN. O grampo 1 foi desconsiderado por apresentar trinca visualmente maior que os demais grampos e também porque serviu para regulagem da máquina. A tabela 7 ilustra os resultados obtidos em ensaio de cela.

Tabela 7: Resultados de ensaio de cela

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lbs	41480	133624	116906	126231	141572	145485	143539	159190	141622	148958
KN	184,5	594,4	520	561,5	629,8	647,2	638,5	708,1	630	662,6

Para cálculo da média foram somados os valores entre os grampos 2 e 10 e calculada a média dividindo a somatória por 9, ficando da seguinte forma:

$$\text{Força aplicada} = (594,4 + 520 + 561,5 + 629,8 + 647,2 + 638,5 + 708,1 + 630 + 662,6) \text{ KN} / 9 = \mathbf{621,34 \text{ KN}}$$

Como o modelo estudado é simétrico, portanto o carregamento no modelo será dado por:

$$\text{Força aplicada}_{\text{FEM}} = 621,34 \text{ KN} / 2 = \mathbf{310,65 \text{ KN}}$$

A figura 39 ilustra o carregamento uniforme do modelo com valor de cálculo de 310,65KN.

Figura 39: Carregamento uniforme do modelo com 310,65KN

3.2.7.4 – MODELO MATEMÁTICO

O problema foi modelado de acordo com o Método dos Elementos Finitos do programa Abaqus que consiste na divisão do domínio completo do problema em subdomínios chamados de elementos e o conjunto de elementos são denominados de malha. Para a geração dessa malha o programa utilizado possui um gerador próprio. A malha do modelo utilizado neste estudo tem as seguintes características: número de nós de 143444 e número de elementos de 133112 com a seguinte composição: 130298 hexaédricos lineares (C3D8R), 2790 quadrilateral lineares (R3D4) e 24 triangulares lineares (R3D3). A figura 40 ilustra a malha do conjunto modelado no programa.

Figura 40: Malha do conjunto modelado no programa

A região de interesse do grampo contém elementos menores assim aumentando a precisão do cálculo nessa região. A figura 41 ilustra a malha na zona de ruptura esperada.

Figura 41: Malha do grampo na zona de ruptura esperada

3.2.8 – LINHA 2: ENSAIO DE EXTENSOMETRIA EM COTOVELO EXTERNO DE GRAMPO

Para conhecer as tensões que atuam no cotovelo do grampo onde tem incidência de trincas foi escolhido o uso da técnica de extensometria. O objetivo desse trabalho foi obter através de extensômetro a reprodução fiel de todas as microdeformações que ocorrem na superfície de estudo da peça durante o ensaio e posteriormente converter através de cálculos

para valor de tensão. Para tanto a primeira condição foi o extensômetro estar firmemente aderido a esta superfície de cotovelo de estudo durante todo o tempo em que durar o ensaio.

A trinca de estudo em cotovelo de grampo está normalmente disposta no sentido transversal da barra e o esforço principal que faz a trinca aumentar de tamanho está disposto no sentido longitudinal da barra, portanto foi escolhido o extensômetro uniaxial modelo PA06250BA120 marca excelsensor devido o mesmo gerar resultados de microdeformação que servirá para se obter as tensões no sentido longitudinal da barra. A figura 42 ilustra dados dimensionais do extensômetro uniaxial utilizado neste ensaio.

Significado do código do extensômetro PA06250BA120

PA = poliamida

06 = dilatação do aço

250 = comprimento da grade

BA = formato uniaxial

120 = 120 Ohms

IDENTIFICAÇÃO				D I M E N S Õ E S						
BASE E METAL	COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA	TAMANHO E FORMA	RESISTÊNCIA ELÉTRICA	OPÇÕES	ESPAÇO DA GRELHA		ESPAÇO DA GRELHA COM SEUS TERMINAIS		ESPAÇO DA BASE	
				B (básico); S (pontos de solda) L (fios de cobre); EN (encapsulado); LEN (encapsulado com fios de cobre)						
OPÇÕES DISPONÍVEIS				COMPRIMENTO (a)	LARGURA (b)	COMPRIMENTO (c)	LARGURA (d)	COMPRIMENTO (e)	LARGURA (f)	
PA	06	250 BA	120	B; S; L; EN ; SEN; LEN	6,0 mm	3,0 mm	8,6 mm	3,0 mm	12 mm	5 mm
PA	09	250 BA	120							
PA	13	250 BA	120							

Figura 42: Dimensional de extensômetro uniaxial

Fonte: Excelsensores (2013)

3.2.8.1 - PREPARAÇÃO DO COTOVELO DO GRAMPO

A preparação da superfície e colagem do extensômetro na peça a ser ensaiada constitui-se numa etapa de grande importância, portanto se conduzida de forma imprópria pode comprometer os resultados a serem obtidos. Na preparação da superfície da peça foi necessário o uso de acetona para a remoção de ácidos graxos e impurezas mais grosseiras, no caso do grampo a tinta, e também micro impurezas que muitas vezes são imperceptíveis observados a olho nu tipo: oxidação, umidade, pequenas partículas de poeira e películas de gordura, que não devem se interpor entre o extensômetro e a peça. Os materiais usados na limpeza da superfície foram da mais alta pureza da classe PA (puro para análise), de tal forma que não introduzam resíduos. A área desengraxada foi de dimensões razoáveis, ou seja, foi utilizada toda a área do cotovelo para evitar eventuais contaminações das vizinhanças. A figura 43 ilustra a área desengraxada.

Depois de removida a tinta e limpo a região do cotovelo com acetona e algodão foi utilizado uma série de lixas com granulometrias diferentes iniciando-se da granulometria mais grossa para a mais fina. A sequência de lixamento utilizada foi lixa d'água nº 180, 280, 400 e 600. Para cada etapa de lixa foi limpo e desengraxado com acetona. Na preparação final foi utilizada lixa d'água 400 e 600 embebida no líquido condicionador, onde se trata de um produto ligeiramente ácido que promove um pequeno ataque superficial, removendo impurezas e oxidações. Após o lixamento concluído aplica-se condicionador. A aplicação é feita embebendo-se a ponta de um cotonete no líquido, sendo que o cotonete deve ser rolado na superfície partindo-se do centro para as laterais, de modo a não trazer possíveis contaminações das laterais para o centro. Em seguida secou-se com papel absorvente, também com movimentos do centro para as laterais. Repetiu-se este procedimento por 3 vezes até a limpeza completa. Foi observado o estado de limpeza do cotonete e do papel absorvente utilizado na limpeza em cada aplicação até não enxergar nenhuma sujeira.

A aplicação do neutralizador foi realizada com cotonetes e a secagem com papel absorvente, tal qual na etapa anterior onde se repetiu a operação por 3 vezes para assegurar a perfeita reação química de neutralização do condicionador e trazer a superfície para uma alcalinidade própria para receber os adesivos de forma adequada.

3.2.8.2 – FIXAÇÃO DO EXTENSÔMETRO

O extensômetro possui marcações apropriadas para a sua centralização na peça. Localizou-se o ponto exato, ou seja, o local onde ocorre trinca no cotovelo e foi fixado o extensômetro e foi traçado na superfície da peça dois riscos perpendiculares que cruzaram exatamente nesse ponto que coincidem com as marcações do extensômetro. Posicionou-se junto à área de trabalho um rolo de fita adesiva FK-1 em seu suporte onde estava com a sua extremidade desenrolada e estendida até a serrilha do cortador de fita. Com o uso de uma pinça o extensômetro foi retirado da embalagem e com a mesma tomou-se o cuidado de não deve pegar por sobre a grade do extensômetro, mas somente sobre a base, portanto do lado em que estão os terminais para não danificá-lo. O extensômetro foi levado para sob a fita estendida colando-o apenas sobre uma mínima faixa da base do lado oposto ao da pinça. A fita foi cortada deixando alguns milímetros além de cada lado do extensômetro.

O extensômetro, com a fita adesiva nele colada foi levado com pinça até o local de colagem e foi posicionado fazendo-se coincidir exatamente os traços de marcação feitos na superfície da peça com as marcações para centralização do extensômetro e portanto ficou preso à superfície da peça.

Foi aplicado adesivo e com uma pressão e um aquecimento por um determinado tempo conforme as instruções do adesivo. O aspecto visual após colagem de extensômetro está ilustrado na figura 43. No final foi aplicada uma proteção de silicone sobre o extensômetro conforme ilustrado na figura 44. Após a finalização de fixação de extensômetro as peças ficaram com aspecto visual conforme ilustrado na figura 45.

Figura 43: Aspecto visual após fixação de extensômetro

Figura 44: Proteção de silicone aplicado sobre extensômetro

Figura 45: Aspecto visual após finalização de colagem de extensômetro

3.2.8.3 – REALIZAÇÃO DO TESTE EM GRAMPO MONTADO EM FEIXE

Foi utilizado um feixe de molas, porcas e calços para realizar montagem do grampo no conjunto. Após este procedimento foi utilizada uma bancada com sistema pneumático para prender o feixe e evitar movimentação no ato de aplicação de carga com utilização de um torquímetro. Cada cotovelo foi colado um extensômetro e foi identificado com uma letra da seguinte forma: letras X e Y para o grampo 1 e para o grampo 2 foi utilizado as letras W e Z. Os cabos foram conectados a um condicionador de sinal que por sua vez estava conectado a um computador. O teste foi dividido em 3 etapas, sendo:

Etapa 1: aplicação gradual de torque em grampo até atingir 450 N.m

Etapa 2: colocação de conjunto montado em dinamômetro.

Etapa 3: liberação gradual de torque.

3.2.8.3.1 – ETAPA 1: APLICAÇÃO GRADUAL DE TORQUE EM GRAMPO.

Foi utilizado um torquímetro fabricante Gedore, modelo R600 com capacidade até 600 N.m para aplicação de torque em porca de forma gradual e alternada e foi seguido a ordem alfabética . A figura 46 ilustra o tipo de torquímetro utilizado no ensaio. A figura 47 ilustra o visual de conjunto montado para teste de aplicação gradual de torque em grampo até atingir 450 N.m e teste de liberação gradual de torque

Figura 46: Torquímetro fabricante Gedore, modelo R600 com capacidade até 600 N.m utilizado na aplicação de torque em porca

Figura 47: Visual de conjunto montado para teste de aplicação gradual de torque em grampo até atingir 450 N.m e teste de liberação gradual de torque

3.2.8.3.2 – ETAPA 2: ENSAIO EM CONJUNTO MONTADO UTILIZANDO UM DINAMOMETRO

Foi utilizado um dinamômetro da empresa Rassini-NHK marca Tinius Olsen com capacidade de 30 toneladas para aplicação de carga partindo de zero e com etapas variando de 1.000 Kgf até obter carga final de 7.000 Kgf no conjunto montado. O local de aplicação da força foi na placa superior do conjunto montado e a carga foi mantida durante 1 minuto. A figura 48 ilustra o tipo de dinamômetro utilizado no ensaio. A figura 49 ilustra o conjunto montado utilizado no ensaio.

Figura 48: Dinamômetro Tinius Olsen. Fonte: Rassini-NHK (2012)

Figura 49: Conjunto montado Fonte: Rassini-NHK (2012)

3.2.9 – LINHA 2: ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA (K_{IC}).

Os ensaios de tenacidade a fratura linear elástica para obtenção do K_{IC} foram realizados seguindo recomendações das normas ASTM E 399-05 e ASTM E-1820-01. A retirada de corpo de prova foi realizada na direção longitudinal da barra de tal forma que a direção de propagação (direção transversal) da trinca fosse a mesma que ocorre no grampo, conforme ilustração da figura 50. Baseado nos cálculos das normas referenciadas foi obtido dimensional de corpo de prova com entalhe simples no canto (em inglês SENB - Single Edge Notched Bend) para ensaio de flexão em três pontos, segundo a geometria ilustrada na figura 51. Todos os ensaios foram realizados a temperatura de 21°C.

Figura 50: Local de retirada de corpo de prova com entalhe simples

Figura 51: Dimensional do corpo de prova com entalhe simples

O corpo de prova foi dimensionado para uma espessura B de 15 mm; uma altura W de 30 mm; uma pré-trinca a de 15 mm; distância entre apoios S de 120 mm e comprimento total de 126 mm.

Para atender a recomendação da norma ASTM E 399-05 de maior acuidade possível do entalhe central com profundidade até metade da altura foi utilizada técnica de eletro-erosão para realizar essa atividade durante processo de confecção de corpo de prova.

A pré-trinca foi realizada em uma máquina servo hidráulica de ensaio universal MTS (Material Test System), modelo 312.31, serial 1140 , com célula de carga capacidade 100 kN e corpo de prova em carga de flexão em três pontos, ilustrado na figura 52(c).

Foram polidas as duas faces da região usinada do entalhe para melhorar a visualização da evolução da trinca. Após polimento através de um instrumento traçador de altura foi riscado um paralelo de 1 mm no fundo da trinca para facilitar observação da evolução do tamanho da trinca. Na parte inferior do eixo foi acoplada uma base com apoio em dois pontos e na parte superior foi acoplado um apoio formando assim três pontos de apoio . No entalhe foi colocado um sensor *clip on gage* para medir a abertura da trinca. O ensaio de corpo de prova foi monitorado na fase de pré-trinca com uma lupa de ampliação onde foi acompanhado o crescimento da trinca e também monitorado através de programa de computador de K_{IC} . Os dados obtidos no ensaio foram plotados em gráficos de carga e deslocamento. Para cálculo de carga de pré trinca foi seguido requisitos estabelecidos na norma ASTM E 1820-01 para corpos de prova com entalhe simples. Para avaliação de carga de ensaio foram utilizadas a expressão 1 e 2.

$$P_f = \frac{0,5 B b_0^2 \sigma_y}{S}, \text{ onde :} \quad (1)$$

B = espessura

$b_0^2 = (W - a_0)^2$ = ligamento original restante.

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{rup}}{2}, \text{ onde:} \quad (2)$$

σ_{ys} = Tensão de escoamento

σ_{rup} = Tensão de ruptura

S = 4W, onde:

W = altura

Para calcular a carga para fator de intensidade de tensão K foram utilizadas as equações 3 e 4, e foi atribuído para razão R o valor de 0,1 com finalidade de calcular carga máxima P_{max} e carga mínima P_{min} .

$$K_i = \left[\frac{P_I S}{(B B_N)^{1/2} W^{3/2}} \right] f(a_i/w) \quad (3)$$

$$P_I = P_a = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \quad (4)$$

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = 0,1, \text{ onde: } P_{min} = R \cdot P_{max}$$

$$P_a = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \Rightarrow P_a = \frac{P_{max} - R \cdot P_{max}}{2} \Rightarrow \frac{P_{max}(1-R)}{2} \Rightarrow P_a = 0,45 \cdot P_{max}$$

$$P_{max} = \frac{P_a}{0,45}$$

A figura 52(a) ilustra máquina servo hidráulica de ensaio universal *MTS -Material Test System* utilizada no ensaio de K_{IC} . A figura 52(b) ilustra o dispositivo com 3 pontos de apoio e a figura 52(c) aspecto visual de montagem do ensaio.

(a)

(b)

(c)

Figura 52: A figura mostra em (a) aspecto da máquina servo hidráulica de ensaio universal MTS utilizada no ensaio, (b) dispositivo com 3 pontos de apoio. (c) aspecto visual de montagem do ensaio

Durante o ensaio a evolução da trinca foi observada com uma lupa, conforme ilustrado na figura 53. No detalhe é possível verificar local onde ocorre a trinca.

Figura 53: Observação de crescimento de trinca no fundo do entalhe

Posteriormente a obtenção da pré-trinca, o corpo de prova foi solicitado a uma taxa de carregamento controlada, de tal forma que aumentou a intensidade de tensão e gerou a fratura do corpo de prova, conforme ilustrado na figura 54. Segundo norma ASTM E-1820-01 a variação da intensidade de tensão desse ensaio deveria estar entre $0,55$ e $2,75 \text{ MPa } \sqrt{m}$, portanto foi utilizado $1 \text{ MPa } \sqrt{m}$.

Figura 54: Aspecto do corpo de prova no final do ensaio

Seguindo orientação da norma ASTM E 399, após a obtenção de corpo de prova fraturado foi realizada uma medição com precisão do comprimento da trinca através de programa de imagem Metric da empresa M.Service Gerate. O tamanho da trinca (a) do corpo de prova foi medido em 5 pontos sendo uma medição no centro da espessura (B) e em dois quartos em quatro pontos divididos simetricamente. A média aritmética dos pontos medidos foi considerado o tamanho da trinca. A figura 55 ilustra a medição da trinca.

Figura 55: Forma de medir tamanho de trinca em corpo de prova conforme ASTM E 399

Para estabelecer a validade do valor de K_{IC} , primeiramente ocorre uma estimativa do valor provisório de tenacidade a fratura definido como K_Q , que em primeiro plano envolve a construção do gráfico força x deslocamento (PxV) mostrado na Figura 56, de onde é retirado o valor do P_Q .

$$K_Q = \frac{P_Q \cdot S}{B W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5)$$

A função $f\left(\frac{a}{W}\right)$ para corpo de prova com entalhe simples é adimensional e dada por:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} [1,99 - \left(\frac{a}{W}\right)(1 - \frac{a}{W}) \times (2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2)]}{2 (1 + 2\frac{a}{W})(1 - \frac{a}{W})^{3/2}} \quad (6)$$

Portanto:

P_Q = carga de ruptura

B = espessura

W = largura

a = tamanho da trinca

Figura 56: Principais tipos de gráfico força x deslocamento. Fonte: ASTM E399-09

O valor de P_Q é apontado através de uma linha secante de 5% paralela a curva $P \times V$. Observa-se na curva tipo I o ponto P_Q , que é o ponto de intersecção entre a curva e a secante, se as cargas em todos os pontos do gráfico que precedem P_5 são menores que P_5 . Entretanto caso exista uma carga máxima $P_{Máx}$ que preceda ou exceda P_5 , esta carga máxima $P_{Máx}$ será a P_Q , tipos II e III (ASM handbook; vol8, 1985).

Foi verificado se o resultado de K_Q satisfaz os seguintes requisitos:

- Relação entre o comprimento da trinca a e a largura do corpo de prova W .

$$0,45 \leq \frac{a}{W} \leq 0,55 \quad (7)$$

- Relação que envolve espessura B , comprimento de trinca a , largura do corpo W e limite de escoamento σ_E do material.

$$a, B, (W - a) \leq 2,5(K_{IC} / \sigma_E)^2 \quad (8)$$

- O valor da carga máxima $P_{MÁX}$ não pode exceder 10% do valor da carga de ruptura P_Q

$$P_{max} \leq 1,10 P_Q \quad (9)$$

Quando todos os requisitos impostos pela norma são satisfeitos determina-se que K_Q é K_{IC} .

O resultado de K_{IC} foi inserido em uma tabela com valores conhecidos de ensaio para fins comparativos.

3.2.9.1 – LINHA 2 – EQUACIONAMENTO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO K EM GRAMPO DE FEIXE DE MOLAS.

Nesse trabalho foram considerados alguns tópicos adicionais, estudados por Dowling (2007), e que são relacionados com a aplicação do fator de intensidade de tensão K para projeto e análise, que incluem algumas configurações especiais, ilustrado na figura 57.

Caso	S_t	S_b	F para a pequeno	Limite +/- 10% de F
(a)	$\frac{P}{4bt}$	—	$\frac{2}{\pi} = 0.637$	$\frac{a}{t}, \frac{a}{b} < 0.5$
(b)	$\frac{P}{2bt}$	$\frac{3M}{bt^2}$	0.728	$\frac{a}{t} < 0.4, \frac{a}{b} < 0.3$
(c)	$\frac{P}{bt}$	$\frac{6M}{bt^2}$	0.722	$\frac{a}{t} < 0.35, \frac{a}{b} < 0.2$
(d)	$\frac{4P}{\pi d^2}$	$\frac{32M}{\pi d^3}$	0.728	$\frac{a}{d} < 0.2 \text{ or } 0.35^1$

Figura 57: Fator de intensidade de tensão para: (a) uma trinca circular embutida sob tensão uniforme normal ao plano da trinca, (b) superfície da trinca metade circular, (c) trinca de canto 25% do círculo, (d) trinca metade circular na superfície de um eixo.

Fonte: Dowling (2007)

Nas aplicações práticas as trincas possuem formas que se aproximam de um círculo, meio círculo, ou um quarto de círculo. A geometria metade circular, (figura 56b) é especialmente comum, portanto, foi identificada que a trinca de grampo com falha em processo de dobramento se enquadra nessa geometria b, conforme pode ser observado na figura 58, onde se observa superfície da trinca metade circular. A figura 58 foi dimensionada utilizando o programa de imagem Metric da empresa M.Service Gerate.

Figura 58: Principais medidas de fratura de grampo para cálculo de fator de intensidade de tensão K

Após dimensionamento a fratura apresentou profundidade ou tamanho da trinca $a = 3,90$ mm e comprimento da trinca $2C = 8,47$ mm, portanto $C = 4,235$ mm.

Foi encontrado espessura ($t = B$) = 13,52 mm e largura $2b = 27,09$ mm, portanto $b = 13,545$ mm.

Para validar o fator de largura finita de mecânica da fratura $F = 0,728$, foi verificado atendimento aos limites de $\pm 10\%$ para esse fator, conforme expressão 10 e 11.

$$\frac{a}{t} < 0,4 \quad (10)$$

$$\frac{a}{b} < 0,3 \quad (11)$$

Com o fator $F = 0,728$ validado, foi calculado o fator de intensidade de tensão para fratura mecânica demonstrado na expressão 12. Também foi obtido o tamanho de trinca crítica a_c partindo da mesma fórmula.

$$K = FS\sqrt{\pi a} \quad (12)$$

Onde: K = fator de intensidade de tensão

F = fator de largura finita

S = Tensão nominal (média)

a = tamanho da trinca

A tensão nominal média S_t se equivale a expressão 13, conforme demonstrado:

$$S_t = \frac{P}{2bt} \quad (13)$$

Onde: P = F = força

A tensão σ foi calculada conforme formula 14.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Em função da área não mudar após a conformação planar, a área foi calculada conforme expressão 15 considerando a geometria inicial redonda e desconsiderando a geometria final que foi deformada planarmente.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (15)$$

Onde: D = diâmetro

Para o cálculo do fator de intensidade de tensão K da expressão 12 foi considerado somente o valor da tensão S_t da expressão 13. Essa consideração é devido o material de estudo apresentar predominância de esforço de tração.

3.2.9.1.2 – LINHA 2 - AVALIAÇÃO DA TRINCA CRÍTICA E PREMISSAS CONSIDERADAS PARA CÁLCULO DE INTENSIDADE DE TENSÃO K.

A trinca crítica denominada a_c foi calculada a partir da expressão 12 e foi utilizado como referência a tensão limite de escoamento.

Para realização do cálculo de intensidade de tensão K foram utilizadas às referências da figura 57 para uma superfície da trinca metade circular e foram consideradas algumas premissas, tais como:

Primeira premissa: foi considerado a tensão máxima estar próxima da média do escoamento que equivale a 104 kgf/mm^2 ou 1023 MPa . Foi utilizada a profundidade de trinca de $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ que foi obtida em medição de grampo que apresentou falha catastrófica em processo de dobramento.

Segunda premissa: foi considerado a tensão máxima estar próxima da média do limite de resistência que equivale a 115 kgf/mm^2 , que equivale a 1127 MPa .

Terceira premissa: foi utilizada a tensão de 281 MPa que foi obtida através de elementos finitos. Essa tensão está na região de cotovelo de grampo onde pode ocorrer trinca durante processo de dobramento de peça em processo produtivo.

Quarta premissa: foi utilizada a tensão máxima de 747 MPa que foi obtida através de elementos finitos. Essa é tensão máxima que está na região de cotovelo de grampo.

Quinta premissa: foi utilizada a média da tensão residual de compressão (tensão negativa) na região de cotovelo externo e também foi utilizado a tensão média do escoamento que equivale a 104 kgf/mm^2 ou 1023 MPa . Foi utilizada uma profundidade de trinca de $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Para todas as premissas para fins comparativos, foi recalculada a intensidade de tensão K considerando trinca crítica baseada no limite de escoamento.

3.2.9.2 – LINHA 2 - FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA SEÇÕES TRANSVERSAIS RETANGULARES PARA SUPERFÍCIE DE TRINCA METADE CIRCULAR, SOB TENSÃO E/OU FLEXÃO.

Conforme Dowling (2007) é possível obter um cálculo de intensidade de tensão utilizando maiores detalhes de verificação de trinca metade circular. A figura 59 ilustra o fator de intensidade de tensão para seções transversais retangulares (a) para superfície de trinca metade circular, sob tensão e / ou flexão. A forma geral é dada por K, bem como as equações particulares para a superfície, e ponto mais profundo para qualquer um a/t .

Formas funcionais para $a/b < 0.5, h/b > 1$:

$$K = f_a f_w \frac{2}{\pi} (S_t + f_b S_b) \sqrt{\pi a}, \quad f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi a}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right)}$$

Onde $f_a = f_a(a/t, \theta)$, $f_b = f_b(a/t)$

Expressões para $\theta = 0$ e 180° (superfície) para todo a/t :

$$f_a = (1.04 + 0.2017\alpha^2 - 0.1061\alpha^4)(1.1 + 0.35\alpha^2), \quad f_b = 1 - 0.45\alpha$$

Expressões para $\theta = 90^\circ$ (ponto mais profundo) para todo $\alpha = a/t$:

$$f_a = 1.04 + 0.2017\alpha^2 - 0.1061\alpha^4, \quad f_b = 1 - 1.34\alpha - 0.03\alpha^2$$

Figura 59: Fator de intensidade de tensão para seções transversais retangulares (a) para superfície de trinca metade circular, sob tensão e / ou flexão (b) mostra a resultante da equação de Newman observada pela variação com para $a/t = 0$ e 0.5

Fonte: Dowling (2007)

Para validar o cálculo baseado nas fórmulas da figura 59, foi verificado primeiramente

atendimento as expressões funcionais 16 e 17.

$$\frac{a}{b} < 0,5 \quad (16)$$

$$\frac{h}{b} > 1 \quad (17)$$

O fator de intensidade de tensão foi obtido através da formula 18.

$$K = f_a f_w \frac{2}{\pi} (S_t + f_b S_b) \sqrt{\pi a} \quad (18)$$

Para calcular f_w foi utilizada a expressão 19.

$$f_w = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}}\right)} \quad (19)$$

Observando a figura 60a foi considerado um ângulo θ de 90° , onde foi obtida a maior profundidade da trinca, portanto foi adotado expressão $\theta = 90^\circ$ (*ponto mais profundo*) para todo $\alpha = a/t$.

O comprimento relativo da trinca (α) é : a/t , e foi verificado pela expressão 20. Conforme expressão $\theta = 90^\circ$ da figura 59 o valor de f_a foi verificado pela fórmula 21 e o valor de f_b pela fórmula 22.

$$\alpha = \frac{a}{t} \quad (20)$$

$$f_a = 1,04 + 0,2017\alpha^2 - 0,1061\alpha^4 \quad (21)$$

$$f_b = 1 - 1,34\alpha - 0,03\alpha^2 \quad (22)$$

3.2.9.3 – LINHA 2 - FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA UMA SUPERFÍCIE DE TRINCA SEMI-ELIPTICA.

Segundo Dowling (2007) outra forma de verificar o fator de intensidade de tensão K é através da observação de uma superfície com trinca semi-elíptica. A figura 60 ilustra fator de intensidade de tensão para: (a) uma trinca circular embutida, (b) uma superfície com trinca semi-elíptica. As equações fornecem a intensidade de tensão K_D no ponto de maior profundidade D para uma tensão uniforme normal ao plano da trinca.

$$K_D = F_D S \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}, \quad Q \approx 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad (a/c \leq 1)$$

Caso	Valor para pequeno $a/t, c/b$	Limites para 10% de precisão
(a)	$F_D = 1$	$a/t < 0,4, c/b < 0,2$
(a)	$F_D \approx 1$	$a/t < 0,3^1, c/b < 0,2$

Nota: ¹Exceto limite para $a/t < 0,16$ se $a/c < 0,25$.

Figura 60: Fator de intensidade de tensão para: (a) uma trinca circular embutida, (b) uma superfície com trinca semi-elíptica

Fonte: Dowling (2007)

Primeiramente foi calculado os limites estabelecidos na figura 60 utilizando a fórmula 23 que tem uma relação entre tamanho da trinca(a) com o comprimento da trinca (c) .

$$\left(\frac{a}{c} \leq 1 \right) \quad (23)$$

Conforme figura 61, a equação 24 forneceu K_D no ponto D para uma tensão uniforme, normal ao plano da trinca.

$$K_D = F_D s \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (24)$$

O valor da energia de ativação Q foi encontrada pela expressão 25.

$$Q \approx 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad (25)$$

Satisfazendo $\left(\frac{a}{c} \leq 1 \right)$, conforme Dowling (2007) as equações dadas para F_D para qualquer a/t foi verificado pela equação 26.

$$F_D = \left[g_1 + g_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + g_3 + \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] f_w \quad (26)$$

Onde:

$$g_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right) \quad (27)$$

$$g_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}} \quad (28)$$

$$g_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24} \quad (29)$$

Para validar f_w foi necessário verificar atendimento a relação c/b demonstrado na formula 30. O cálculo de f_w foi realizado conforme formula 31.

$$\left(\frac{c}{b} < 0.5 \right) \quad (30)$$

$$f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right)} \quad (31)$$

3.2.9.4 – LINHA 2 - AVALIAÇÃO DE TRINCA EM COTOVELO EXTERNO.E INTERNO

Para avaliar o tamanho de trinca crítica foi considerado o resultado dos pontos de tensão do ensaio de elementos finitos.

Foi calculado primeiramente o cotovelo externo que é o local com possível ocorrência de trinca em processo de dobramento. Foram consideradas somente as tensões atuantes que foram indicadas por elementos finitos, e foi construída uma tabela que considerou o tamanho de trinca (mm) contra a tensão (MPa) no cotovelo do grampo. O resultado é a intensidade de tensão em MPa $\sqrt{m}$ para determinada profundidade de trinca.

Foi possível montar uma tabela com uma visão geral de intensidade de tensão em MPa $\sqrt{m}$ para uma determinada profundidade de trinca em milímetros, para todos os pontos de tensão do conjunto para 100% do carregamento aplicado.

3.2.10 – LINHA 2: ESTUDO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM COTOVELO DE GRAMPO ATRAVÉS DE TÉCNICA DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X.

Para realizar a medição de tensão residual foi utilizado um equipamento de difração de raios x marca Rigaku ; modelo MSF-3 conforme ilustrado na figura 61.

Figura 61: Equipamento de difração de raio-x modelo MSF-3

Fonte: Rigaku (2007)

Foi realizada duas formas de medição de tensão residual, sendo:

a) superficial, na região da deformação plástica em pontos de interesse de estudo, conforme ilustrado na figura 62.

b) mapeamento do perfil da tensão residual na região com deformação planar, e em região de cotovelo interno e externo após dobramento de peça.

Figura 62: Pontos de medição de tensão residual

3.2.10.1 – MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA SUPERFÍCIE DA AMOSTRA

Para realizar a medição das tensões residuais em superfície de grampo, a amostra foi presa em uma morsa. O corpo de prova ficou disposto no sentido longitudinal e a rotação do

goniômetro no mesmo sentido, conforme ilustrado na figura 63.

Figura 63: Sentido de rotação do goniômetro e disposição do corpo de prova

3.2.10.2 – MAPEAMENTO DO PERFIL DA TENSÃO RESIDUAL

Para mapear o perfil da tensão residual foram cortados corpos de prova na região de deformação planar (a), na região do cotovelo interno do grampo (b) e cotovelo externo (c). Os corpos de prova estão ilustrados na figura 64.

Figura 64: A figura ilustra modelos de corpo de prova sendo que em (a) região de deformação planar, (b) região do cotovelo interno do grampo e em (c) cotovelo externo

Para melhorar a precisão da medição foi utilizada uma base acrílica com uma massa de modelar com finalidade de assentar corpo de prova. Para manter um paralelismo da amostra com o goniômetro foi utilizado prensa manual, conforme ilustrado na figura 65.

Figura 65: Modelo de assentamento de amostra

Antes de medir a tensão residual, foi cortado fita adesiva em formato quadrado de 8 mm de lado e colado no corpo de prova conforme ilustrado na figura 66. A finalidade desse isolamento é permitir desbaste eletrolítico somente na área de estudo.

Figura 66: Modelo de isolamento da parte metálica

Para todos os testes onde que foi necessário realizar desbaste na profundidade foi utilizado equipamento de polimento eletrolítico, conforme ilustrado na figura 67.

Figura 67: Sistema de polimento eletrolítico Rigaku

Para dimensionar a profundidade do quadrado que foi desbastado no processo eletrolítico a amostra foi acondicionada em base magnética e foi utilizado um relógio apalpador Mitutoyo com precisão de 0,01 mm acoplado em um traçador de altura Mitutoyo,

com capacidade de 300 mm. O ponto de medição foi considerado o centro do quadrado, conforme ilustrado na figura 68 (a) cotovelo convexo e figura 68(b) cotovelo côncavo.

Figura 68: Sistema de medição de profundidade

Para medir a tensão residual o corpo de prova foi alinhado com o goniômetro utilizando ponta seca, conforme ilustrado na figura 68a, e nessa operação de alinhamento foi utilizado como ponto de referência de medição da tensão residual o centro do quadrado, conforme ilustrado na figura 69(a) e (b).

A escolha do centro do quadrado para medição da profundidade de desbaste garante que o local de medição da tensão residual seja sempre no mesmo ponto e possibilita uma maior precisão na realização de curva do perfil da tensão residual.

Figura 69: Alinhamento da medição no centro do quadrado desbastado

A altura do emissor e receptor dos raios-x é determinada pelo dispositivo de alinhamento que possui uma referência em sua circunferência. A figura 70 ilustra a regulação de altura do emissor e receptor de raios x. A seta indica a referência usada na circunferência do dispositivo de alinhamento.

Figura 70: Regulagem de altura do emissor e receptor de raios x

Para realizar a medição de tensão residual foi escolhido o método de iso-inclinação com fixação Ψ_0 , sem oscilação e foi necessário introduzir no programa de computador as condições de realização do teste. Foi utilizado tubo de Cromo e filtro de K alpha com tensão de 30 kV e amperagem de 6 mA. A região de verificação está entre 145.000e 165.000 degradianos procurando ângulo de pico de 156.400 degradianos. Foi considerada a constante de tensão de -299,10 MPa/deg , o módulo de Young de 210000.00 MPa e coeficiente de Poison de 0,28.

4 = RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – LINHA 1: RESULTADO DE ESTUDO DE MICROESTRUTURA ATRAVÉS DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO STECAL 3.0

4.1.1 - SAE 1552 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NO MÍNIMO ESPECIFICADO

Os dados inseridos do material SAE 1552, com faixa de composição química no mínimo do especificado geraram uma curva TTT (Tempo, Temperatura, Transformação) específica da composição química estudada, ilustrado na figura 71. Para os demais estudos também foram obtidas curvas específicas. A simulação demonstra com tracejado vermelho que o início de formação de perlita ocorre após 3 segundos de resfriamento em uma temperatura de 640°C e após 7 segundos ocorre 50% da transformação. Esse resfriamento gera um produto final com dureza em torno de 170 HV. A linha tracejada azul mostra que o início da formação de bainita ocorre a 595°C, e com tempo de resfriamento de 8 segundos, e após 70 segundos obtém-se 50% de transformação e 99% da transformação em 10 min. A martensita é resultante de resfriamento brusco que tem início de formação a 307 °C em um tempo de resfriamento máximo de até 15 segundos.

Figura 71: Diagrama TTT do SAE 1552 com faixa de composição no mínimo especificado

4.1.2 - SAE 1552 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NO MÁXIMO ESPECIFICADO

Para o aço SAE 1552 com faixa de composição no máximo especificado a simulação ilustrada na figura 72 demonstra na linha tracejada vermelha que o início de formação de perlita acontece após 6 segundos de resfriamento a uma temperatura de 634°C, e com 15 segundos observa-se 50% de transformação. O início de formação de bainita representada pela linha tracejada azul ocorre a 546 °C e termina com temperatura de 426 °C. Sendo que o início da transformação ocorre a 15 segundos de resfriamento ocorre 50% transformação a 2 minutos e 99% da transformação em 15 minutos. O início da formação de martensita ilustrada pela linha tracejada verde ocorre a 270°C, em um tempo até 15 segundos.

O programa indica que o produto final para microestrutura perlita e ferrita origina uma dureza em torno de 205 HV que foi confirmado através de medição de dureza Vickers.

Figura 72: Diagrama TTT do SAE 1552 com faixa de composição no máximo especificado

4.1.3 - SAE 1552 MODIFICADO (BRASIL)

O aço SAE 1552 com composição química modificada pela indústria nacional apresenta curva TTT ilustrada na figura 73 e apresenta formação de perlita após 6 segundos de resfriamento lento a uma temperatura em torno de 634°C e após 15 segundos de arrefecimento alcança 50% de transformação. Nessa condição após resfriamento final o aço apresenta uma microestrutura perlita e ferrita, que é adequada para os processos subsequentes para grampo conformados a frio, devido a dureza de o produto laminado atingir um valor em torno de 215 HV.

O começo de formação de bainita advém de uma temperatura em torno de 542°C em um tempo de 15 segundos e finaliza com aproximadamente 99% de transformação a uma temperatura de 422°C e tempo de 15 minutos. Essa microestrutura é indesejada para grampos para conformação a frio. O desenvolvimento da microestrutura martensita ocorre a uma temperatura de 276°C em resfriamento brusco. A microestrutura martensítica também é indesejada devido a sua alta dureza não permitir processos de conformação a frio subsequentes.

Figura 73: Diagrama TTT para composição química do SAE 1552 modificado pela indústria nacional

4.1.4 - SAE 1552 MODIFICADO (ESTADOS UNIDOS)

O aço SAE 1552 com composição química alterada pela indústria americana apresenta curva TTT conforme ilustrado na figura 74 e exibe uma formação de perlita principiando a uma temperatura em torno de 636°C em um tempo de 7 segundos de resfriamento lento, sendo que obtém 50% de transformação após 15 segundos de abrandamento da temperatura.

O aço apresenta uma microestrutura final de perlita e ferrita que tem uma adequação para os processos subsequentes para grampo conformados a frio, devido a dureza de o produto laminado atingir valor em torno de 210 HV.

O início de transformação de bainita ocorre a uma temperatura em torno de 548°C e terminando a transformação com 428°C. O tempo da transformação bainítica ocorre respectivamente com 15 segundos e finalizando com 99% da transformação em 15 minutos. Essa microestrutura também é indesejada para grampos, pois necessitam conformação a frio posterior. O desenvolvimento da microestrutura martensita incide a uma temperatura de 278°C em resfriamento brusco, sendo a microestrutura martensítica também é indesejada devido a alta dureza não permitir processos de conformação a frio subsequentes.

Figura 74: diagrama TTT para composição química do aço SAE 1552 modificado pela indústria americana

4.2 – LINHA 1: RESULTADO DA MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE TRINCA ATRAVÉS DE TÉCNICA DE ULTRASSOM, ANTES E DEPOIS DE ENSAIO DE FADIGA EM CONJUNTO MONTADO.

O teste de fadiga em conjunto montado tinha como objetivo dimensionar o crescimento de trinca após 150.000 ciclos de ensaio. A expectativa desse ensaio era verificar se não ocorreria falha catastrófica do sistema. As peças foram ensaiadas em dupla e os resultados dimensionais da profundidade das trincas em cotovelo de grampo estão descritas na tabela 8. Os grampos 1 e 2 apresentaram aumento percentual do crescimento da trinca 16,6% e 2,7% respectivamente e não foi observada falha da estrutura montada. Para o par ensaiado número de peças 3 e 4 foi notado crescimento da profundidade da trinca sem falha do conjunto montado, porém, existe uma discrepância percentual de crescimento da trinca entre essas peças. Foi observado aumento da profundidade da 3,57% para o grampo 3 e 233,33% para o grampo 4 e os grampos 5 e 6 também não apresentaram fratura catastrófica e foi observado um crescimento da profundidade da trinca concomitantemente 309,09 % e 150% . As peças número 7 e 8 cresceram seu tamanho de trinca simultaneamente 64,7% e 225%, sem ruptura no conjunto montado. O ultimo par analisado com identificação número 9 e 10 tiveram um aumento da profundidade da descontinuidade respectivamente 44,73% e 195,45%. Através do ensaio de ultrassom antes e após de ensaio de fadiga não foi possível entender a causa do aumento percentual significativo da profundidade de trinca entre as peças de mesmo ensaio e esse fato deve-se possivelmente a erros de medida pela técnica utilizada e também pela falta da expressão de $da/dN \times \Delta K$ para o cálculo preciso.

Tabela 8: Resultado de dimensional de trinca antes e após ensaio de fadiga

Peça	Ciclagem	Dimensional da profundidade de trinca antes do ensaio de fadiga	Dimensional da profundidade de trinca após do ensaio de fadiga
1	156.883	2,40 (+/- 0,20) mm	2,80 (+/- 0,30) mm
2	156.883	3,70 (+/- 0,20) mm	3,80 (+/- 0,20) mm
3	157.421	2,80 (+/- 0,20) mm	2,90 (+/- 0,20) mm
4	157.421	1,80 (+/- 0,10) mm	6,00 (+/- 0,50) mm
5	155.209	1,10 (+/- 0,20) mm	4,50 (+/- 0,50) mm
6	155.209	2,20 (+/- 0,20) mm	5,50 (+/- 0,50) mm
7	156.429	1,70 (+/- 0,20) mm	2,80 (+/- 0,20) mm
8	156.429	1,20 (+/- 0,20) mm	3,90 (+/- 0,10) mm
9	153.728	1,90 (+/- 0,20) mm	2,75 (+/- 0,25) mm
10	153.728	1,10 (+/- 0,20) mm	3,25 (+/- 0,75) mm

Com o ensaio de ultrassom antes e após ensaio de fadiga foi medido o crescimento da

profundidade da trinca em cotovelo de grampo e não foi observada falha catastrófica em nenhum dos ensaios realizados, porém foi observado que existe uma discrepância percentual de crescimento da trinca. Por meio do ensaio de ultrassom antes e após de ensaio de fadiga não foi possível entender a causa do aumento percentual significativo da profundidade de trinca ocorrida em alguns ensaios de fadiga, portanto o ensaio de extensometria e elementos finitos foram escolhidos para auxiliar com informações para entender melhor os resultados observados.

4.3 – LINHA 1: RESULTADO DE ENSAIO DE CELA

Os grampos após os ensaios de cela foram perfilados lado a lado para obtenção de uma visão geral das regiões de fratura, conforme ilustrado na figura 75 . A visualização das partes fraturadas foi facilitada pela esfera colorida verde e vermelho introduzido antes dos ensaios. Os valores de força de ruptura obtidos no ensaio estão descritos na tabela 9.

Figura 75: Identificação de grampos utilizados em teste de cela

Tabela 9: Resultado de teste de cela em grampos que apresentaram trinca durante processo de dobramento. A força de ruptura está em Lbs e kN

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lbs	41480	133624	116906	126231	141572	145485	143539	159190	141622	148958
KN	184,5	594,4	520	561,5	629,8	647,2	638,5	708,1	630	662,6

Na figura 76 observou-se um indicativo de cor vermelha que serviu como orientação de cotovelo com trinca de processo de dobramento nessa região. A parte cilíndrica indicou também qual seria a haste que teoricamente poderia ocorrer a falha em função da descontinuidade pré-existente no cotovelo. O grampo 1 fraturou com carga de 184,5 KN e a ruptura iniciou exatamente na trinca pré-existente no cotovelo e foi desconsiderado devido o grampo 1 apresentar trinca visualmente maior que os demais grampos e também porque serviu para regulagem da máquina. O grampo 2 falhou com 594,4 KN e a falha iniciou em região distante da trinca inicial e o grampo 3 foi solicitado até 520 KN e não apresentou

rompimento.

A figura 77 mostra os grampos 4, 5 e 6 que apresentaram falha sucessivamente com cargas de 561,5 KN, 629,8 KN e 647,2 KN e foi verificado que em nenhuma dessas amostras a ruptura propagou a partir da descontinuidade conhecida.

Na figura 78 podemos observar os grampos 7, 8, 9 e 10 que romperam com as respectivas cargas de 638,5 KN, 708,1 KN, 630 KN e 662,6 KN. A seta vermelha no grampo 7 indica que a peça fraturou no segmento onde estava localizado uma trinca, porém a falha não se iniciou na descontinuidade. Os grampos 8, 9 e 10 romperam na região contrária de local da probabilidade de fratura.

Figura 76: Aspecto dos grampos 1, 2 e 3 após ensaio de cela

Figura 77: Grampos 4, 5 e 6 respectivamente

Figura 78: Grampos 7, 8, 9 e 10 respectivamente

O teste de cela indicou uma peça entre dez com falha iniciando exatamente na trinca pré-existente no cotovelo, porém, foi desconsiderado devido o grampo apresentar trinca visualmente maior que os demais grampos e também porque serviu para regulagem da máquina. Em 33% dos grampos ensaiados a ruptura iniciou no cotovelo onde existia indicação de trinca, porém somente uma peça apresentou fratura com início exato na descontinuidade pré-existente. Foi observada em 66% dos grampos ensaiados falha iniciando no cotovelo oposto de onde existia uma trinca pré-existente.

4.4 – LINHA 1: RESULTADO DE ANÁLISE DE FALHA DE GRAMPOS QUE APRESENTARAM TRINCA DURANTE PROCESSO PRODUTIVO

4.4.1 – TRINCA INICIANDO EM MARCA BRILHANTE

Por meio de uso de lupa com ampliação de 30 vezes foi possível verificar a existência de uma trinca transversal (a) ao sentido longitudinal da barra que está disposta na face com deformação planar. Na região central da trinca observa-se marca brilhante disposta no sentido longitudinal (b). A figura 79 ilustra a trinca na região da face do cotovelo do grampo.

Figura 79: Mostra trinca observada no cotovelo externo do grampo

Com o uso de técnica de metalografia foi observado que no início da trinca existe uma região clara com aspecto de encruamento, ilustrado na figura 80(a) e a microestrutura observada perlita e ferrita, ilustrado na figura 80(b). A amostra foi cortada perpendicular a

trinca para facilitar visualização da origem da marca brilhante.

Figura 80: Trinca iniciando em região com faixa clara que está indicado com seta vermelha na figura a. O aspecto da faixa clara é de encruamento. Na figura b foi observada microestrutura perlita e ferrita

Através de ensaio com microdureza Vickers foi obtido o valor da dureza na região clara (região encruada com 16 microns de profundidade) ilustrado na figura 81(a) e foi observado 606 HV0,5 conforme ilustrado na figura 81(b) e na matriz foi obtido 350 HV0,5 ilustrado na figura 81(b).

Figura 81: Local onde foi realizado ensaio com microdureza Vickers

A análise química realizada através de microscopia eletrônica demonstra que não existia heterogeneidade química entre a região clara na região do início da trinca comparativamente com região da matriz. A figura 82 ilustra o resultado.

Figura 82: Aspecto observado através de EDS . A camada branca possui picos idênticos a matriz

4.4.1.2 – DISCUSSÃO DA AVALIAÇÃO DE TRINCA INICIANDO EM MARCA BRILHANTE.

A trinca nucleou em local com dureza mais elevada onde existia um encruamento localizado, que causou aumento de resistência pontualmente na região de dobramento e em resposta a resistência à tração ocorrida na superfície da barra ocorreu a falha observada.

A região de encruamento que inseriu aumento de dureza e resistência mecânica foi comprovada com a medição de microdureza Vickers, onde foi observado 606 HV1 que equivale a 55 HRC e relacionou-se essa dureza com a região da matriz da peça onde foi observada 360 HV1 que equivale a 36,5 HRC. Descartou-se a possibilidade de ser incrustação de material diferente da matriz, pois através da análise da composição química via análise de EDS foi constatado que tratar-se de mesmo material entre região clara e a matriz da peça.

4.4.2 – TRINCA INICIANDO EM LOCAL VISUALMENTE ISENTO DE DEFEITO SUPERFICIAL.

A peça analisada apresentou trincas com orientação transversal ao sentido de laminação da barra. A trinca identificada como (1s) ilustrada na figura 83(a) foi considerada secundária, pois a falha catastrófica não iniciou nesse ponto. A trinca que está na origem da falha catastrófica foi considerada trinca principal e identificada como 2p e está ilustrada no ponto 2 da figura 83(b). Tanto na trinca 1s como 2s não foi observada nenhuma marca superficial visível no início da falha.

Figura 83: Aspecto do início falha em local isento de defeito visível

4.4.2.1 - ANÁLISE REALIZADA COM MICROSCOPIA ELETRÔNICA NA TRINCA SECUNDÁRIA 1S

A trinca secundária 1s foi caracterizada utilizando microscópio eletrônico de varredura, conforme ilustrado na figura 84. Na trinca ampliada figura 85(a) foi observada sua fratura com aspecto dúctil com presença de coalescência de microvazios (*dimples*), conforme ilustrado na figura 85(b).

Figura 84: Trinca secundária isenta de defeito visível

Figura 85: Detalhe ampliado da trinca secundária (a) e fratura com aspecto dúctil (b)

4.4.2.2 - ANÁLISE REALIZADA COM MEV NA TRINCA PRINCIPAL 2P.

Na figura 86 é ilustrado o local da análise da trinca principal 2p. O exame com microscopia eletrônica na trinca 2p com menor ampliação ilustrada na figura 87(a) e posteriormente com maior ampliação ilustrada na figura 87(b) indica uma fratura de aspecto dúctil.

Figura 86: Ponto de início da falha da trinca considerada principal

Figura 87: Ponto de análise com MEV na superfície da amostra (a) e aspecto de fratura dúctil (b) obtida nessa região 2f

4.4.2.3 - ANÁLISE REALIZADA COM METALOGRAFIA DA TRINCA PRINCIPAL

Com o uso da técnica de metalografia foi observada uma heterogeneidade de microestrutura no início da falha, ilustrada na figura 88. A figura 89(a) ilustra com baixa ampliação o grão estrutural mais grosseiro no início da falha e mais fino na matriz.

Na figura 89(b) com maior aumento ilustra grão estrutural mais grosseiro na superfície da falha e mais fino na matriz.

Figura 88: Início da falha apresentando heterogeneidade de microestrutura

Figura 89: Grão estrutural mais grosseiro na superfície da falha

4.4.2.4 - ANÁLISE REALIZADA COM DUREZA KNOOP

Após o ensaio com dureza Knoop, ilustrado na figura 90, foi observada a dureza na região com grão estrutural mais grosseiro com 316 ± 10 HK0,5. Na região da matriz que apresenta grão estrutural mais fino foi observada 315 ± 15 HK0,5. Os valores médios se equivalem entre as regiões avaliadas, portanto não ocorreu diferença de dureza em função da granulação.

Figura 90: Comparativo de dureza Knoop na região de início da falha (grão estrutural grosseiro) com região da matriz (grão estrutural mais fino)

4.4.2.5 – DISCUSSÃO DA ANÁLISE DE TRINCA, INICIANDO EM LOCAL ISENTO DE DEFEITO SUPERFICIAL.

A análise de microscopia eletrônica de varredura no grampo que apresentou trinca iniciando em local que está isento de defeito superficial na superfície identificou fratura com aspecto dúctil corroborado pela presença de coalescência de microvazios “*dimples*” que é característica dessa fratura. Por meio de metalografia foi caracterizada a existência de heterogeneidade da microestrutura. Para aprofundar o entendimento da falha foi estudado o processo de produção de aço e através de investigação da causa foi possível observar que na produção do aço existem 2 rotas possíveis para resfriamento do aço laminado. A primeira rota está ilustrada na figura 91 e foi caracterizada que o resfriamento do aço laminado passa por uma esteira que comporta um espalhamento do material e que permite fazer um controle mais rigoroso da estrutura final desejada e por consequência se obtém uma microestrutura perlita e ferrita com granulação mais homogênea.

Já o segundo processo ilustrado na figura 92 foi caracterizado que o enrolamento do aço em forma de uma bobina permite um resfriamento controlado, porém, o toque entre espiras associado com temperatura prolongada da barra gera crescimento do grão estrutural que para algumas aplicações diretas e específicas dessa matéria prima para grampo ocorre trincas que podem levar a falhas catastróficas.

Figura 91: Processo de resfriamento em esteira que permite espalhamento do aço e tipo de microestrutura observada na superfície do aço

Através de programa de simulação de tratamento térmico foi possível conhecer a condição apropriada para resfriamento do aço SAE 1552 com composição química modificada pela indústria nacional, que possibilitou a escolha adequada do processo de resfriamento lento a partir da temperatura em torno de 634°C para obter uma microestrutura perlita e ferrita que é fundamental para os processos subsequentes para grampo conformados a frio devido a dureza do aço laminado atingir um valor em torno de 215 HV.

Também foi possível verificar que a temperatura em torno de 542°C em um resfriamento em torno de 15 segundos forma microestrutura indesejável como bainita e temperatura em torno de 276°C em um resfriamento em torno de 7 segundos forma microestrutura indesejável como a martensita. A resultante de dureza dos respectivos processos é elevada e não permitem processos de conformação a frio subsequentes.

Figura 92: Processo de resfriamento em forma de bobina, tipo de microestrutura e exemplo de falha observada para aplicação específica em grampo

4.4.3 – TRINCA INICIANDO EM LOCAL QUE APRESENTA DEFEITO SUPERFICIAL NO INÍCIO DA FALHA.

Na análise visual em grampo que apresentou falha catastrófica durante processo produtivo foi observado que no início da fratura existe uma marca no sentido transversal da barra, ilustrada na figura 93(a). Observando a fratura com vista frontal, conforme ilustrado na figura 93(b) é possível verificar que no início da fratura existe coincidência exata com a marca observada.

Figura 93: Marca no sentido transversal da barra e fratura com vista frontal

4.4.3.1 – ANÁLISE COM MICROSCOPIA ELETRÔNICA.

Foi escolhida somente a técnica de microscopia eletrônica para avaliar a fratura, devido o início da falha apresentar uma marca que é um concentrador de tensão importante, conforme ilustrado na figura 94. O ponto 3 indicado na figura 94 é a região de interesse de avaliação. Foi observada fratura com aspecto dúctil, evidenciado na figura 95.

Figura 94: Local de análise com microscopia eletrônica

Figura 95: Aspecto de fratura dúctil observado no início da falha

4.4.3.2 – DISCUSSÃO DA ANÁLISE DE TRINCA, INICIANDO EM LOCAL COM DEFEITO SUPERFICIAL.

Através da análise de falha do grampo que apresentou fratura catastrófica durante processo produtivo e através da utilização de microscopia eletrônica de varredura evidenciou-se que a fratura tem aspecto dúctil e foi observado que no início da fratura existe uma marca no sentido transversal da barra e o início da fratura coincide exatamente com a marca observada. A marca foi considerada como um concentrador de tensão importante e foi o causador causa da falha durante o processo de produção do grampo. A fratura dúctil revelou que não existe problema na matéria prima e a falha foi associada a marca observada, que após investigação descobriu-se que foi causada por batida durante o processo de produção.

4.5 - LINHA 2: RESULTADO DE ESTUDO DE TENSÕES COM AUXILIO DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO ABAQUS / CAE RELEASE 6.10

Na região do cotovelo onde ocorre incidência de trinca durante processo de dobramento foi notada uma tensão de 44 MPa durante um carregamento de 68,34 kN que equivale a 11 %. Foi observado também que ocorre um acréscimo de tensão conforme aumenta o carregamento. As figuras de 96 até 98 ilustram esse crescimento. Com 100% de carregamento que equivale a 621,34 kN foi observado uma tensão de 281 MPa, ilustrada na figura 99 na região do cotovelo onde ocorre incidência de trinca durante processo de dobramento. O resultado dessa simulação foi confrontado com o resultado do ensaio de extensometria e foi observado valores considerados próximos entre si. O resultado de ensaio de extensometria está descrito no item 4.6 desse trabalho.

Figura 96: Resultado de tensão em MPa do conjunto para 11% do carregamento aplicado

Figura 97: Resultado de tensión en MPa del conjunto para 50% del carregamento aplicado que equivale a 310,67kN

Figura 98: Resultado de tensión en MPa del conjunto para 70% del carregamento aplicado que equivale a 434,94 kN

Figura 99: Resultado de tensión en MPa del conjunto para 100% de carregamento aplicado de 621.34 kN

A simulação por meio do método dos elementos finitos de um grampo realizado com auxílio do programa Abaqus e que foi testado com esforço de tração quase estático possibilitou a avaliação do comportamento do grampo com a aplicação de carga para obter o campo de tensões na peça. A tensão do conjunto para 11% do carregamento aplicado resultou na região do cotovelo de 44 a 58 MPa e na evolução do carregamento aplicado foi observado de 200 a 270 MPa. Foi observada uma tensão de 281 MPa no ponto onde ocorre trinca no cotovelo do grampo para 100% do carregamento, porém, quando se observa a região próxima onde ocorre as trincas é verificado uma tensão de 747,36 MPa.

4.6 – LINHA 2: RESULTADO DE ENSAIO DE EXTENSOMETRIA EM COTOVELO DE GRAMPO.

Pela técnica de extensometria também foi obtido resultado das tensões no cotovelo dos grampos, porém apresentaram diferença de tensão entre os pontos avaliados X, Y, Z e W, provavelmente devido à forma de aperto do sistema de fixação do grampo no conjunto montado de feixe de mola, ou seja, as porcas que fixavam o grampo deveriam ser apertadas de forma simultânea.

4.6.1 – RESULTADO DE EXTENSOMETRIA NA FIXAÇÃO DE GRAMPO EM CONJUNTO MONTADO.

O grampo 1 identificado pelas letras X e Y após receber um torque de 120 Nm apresentou uma diferença inicial da tensão entre os dois pontos de aperto avaliados em torno de 120 MPa, ilustrado na figura 100. A tensão negativa observada no grampo Y no início do teste ocorreu devido o aperto não ser simultâneo, que e causou um desbalanceamento das tensões em função da haste X assentar no dispositivo primeiro em relação a haste Y.

A diferença de tensão decresceu para 50 MPa com um torque de 300 Nm. A finalização do teste ocorreu com um torque de 450 Nm e uma diferença de tensão em torno de 75 MPa. O resultado final apresentou uma variação de tensão de 204.6 MPa até 304.6 MPa.

Figura 100: Resultado de tensão versus torque de grampo fixado em feixe de mola

4.6.2 – RESULTADO DE EXTENSOMETRIA SOB CARREGAMENTO CRESCENTE.

Quando o conjunto montado foi submetido a um dinamômetro Tinius Olsen, com capacidade de 30 toneladas para aplicação de carga partindo de zero e com etapas variando de 1.000 Kgf até obter carga final de projeto de 7.000 Kgf no conjunto montado, observou-se que a diferença inicial entre os pontos X e Y do grampo 1 se mantiveram em 75 MPa, ilustrado na figura 101. No decorrer do carregamento com 4.000 kgf observou-se que a diferença de tensão entre Xe Y aumentou para 100 MPa . O carregamento de 7.000 kgf revela que a tensão no ponto Y atinge 100 Mpa enquanto que no ponto X atinge valor em torno de 220 MPa.

O decréscimo de tensão observado no cotovelo é proveniente do alívio que ocorre no grampo quando o feixe de mola vai modificando sua geometria de curva para uma reta e deixando de exercer força sobre o grampo.

Figura 101: Resultado de tensão versus carregamento de grampo fixado em feixe de mola

4.6.2 – DISCUSSÃO DE RESULTADO DE EXTENSOMETRIA

O resultado médio final do ensaio de extensometria foi de 260 MPa e confrontando com o resultado da simulação de tensões verificado pelo programa abaqus foi observada uma tensão de 281 MPa. A diferença de resultado comparativo entre os estudos que não é significativo pode estar associada ao tipo de aperto do grampo que não foi homogêneo e que promoveu desalinhamento.

4.7 - LINHA 2: RESULTADO DE ENSAIO DE TENACIDADE A FRATURA (KIC).

4.7.1 – DIMENSIONAMENTOS DE CORPO DE PROVA

Através da adoção das diretrizes da norma ASTM E 399 o corpo de prova fraturado foi dimensionado o comprimento da trinca com precisão através de programa de imagem e os pontos medidos estão ilustrados na figura 102. Foi observado comprimento médio de 0,93 mm da trinca do corpo de prova 1, e os resultados estão descritos na tabela 10. Foi observado comprimento médio de 1,39 mm da trinca do corpo de prova 2 e 3 e os resultados estão descritos respectivamente nas tabelas 11 e 12.

Figura 102: Dimensionamento de trinca conforme norma ASTM E 399

Tabela 10: Dimensional de comprimento de trinca em milímetros do corpo de prova 1

Característica	Posição central x	Comprimento da trinca (ASTM E 399)	Entalhe L6	Pré-trinca
medição 1 (L1)	33,24	0,63	13,50	14,13
medição 2 (L2)	33,33	1,04	13,50	14,54
medição 3 (L3)	33,29	0,89	13,50	14,39
medição 4 (L4)	33,37	1,11	13,50	14,61
medição 5 (L5)	33,29	0,96	13,50	14,46
Valor médio		0,93		14,43

Tabela 11: Dimensional de comprimento de trinca em milímetros do corpo de prova 2

Característica	Posição central x	Comprimento da trinca (ASTM E 399)	Entalhe L6	Pré-trinca
medição 1 (L1)	32,94	1,83	13,50	15,33
medição 2 (L2)	32,65	1,37	13,50	14,87
medição 3 (L3)	32,78	1,41	13,50	14,91
medição 4 (L4)	32,50	1,19	13,50	14,69
medição 5 (L5)	32,70	1,14	13,50	14,64
Valor médio		1,39		14,89

Tabela 12: Dimensional de comprimento de trinca em milímetros do corpo de prova 3

Característica	Posição central x	Comprimento da trinca (ASTM E 399)	Entalhe L6	Pré-trinca
medição 1 (L1)	33,16	1,57	13,50	15,07
medição 2 (L2)	33,03	1,51	13,50	15,01
medição 3 (L3)	33,23	1,49	13,50	14,99
medição 4 (L4)	33,16	1,29	13,50	14,77
medição 5 (L5)	32,86	1,29	13,50	14,79
Valor médio		1,39		14,92

4.7.2 – ANÁLISE DA FRATURA COM MICROSCOPIA ELETRONICA

Os corpos de prova K_{IC} após fratura foram analisados com microscopia eletrônica para verificar mecanismo da fratura. A figura 103 ilustra local A e B da análise com MEV. A partir da análise das figuras 104(A) e (B) foi possível observar morfologia de fratura frágil por clivagem.

Figura 103: Local de análise da fratura com baixa ampliação

Figura 104: Fratura por clivagem observada com microscopia eletrônica de varredura nas regiões A e B do corpo de prova 1 após ensaio KIC

4.7.3 – RESULTADO DE TENACIDADE A FRATURA (KIC)

A matéria prima SAE 1552 modificado com silício apresentou resultado de tenacidade a fratura de $51,8 \pm 2,8 \text{ MPa}\sqrt{m}$. O resultado foi inserido em uma tabela com resultados conhecidos de outros materiais para fazer uma comparação, e está demonstrado na tabela 13.

Tabela 13: Resultado do SAE 1552 mod., e comparativo com limites de escoamento e tenacidade a fratura em deformação plana a temperatura ambiente para outros materiais de engenharia. Fonte: ASTM international (1990), *Dowling (2007) e **Herzberg (1989)

Material	limite de escoamento		KIC	
	MPa	ksi	$\text{MPa}\sqrt{m}$	$\text{ksi}\sqrt{in}$
Metais				
Liga de alumínio (7075 -T651)	495	72	24	22
Liga de alumínio (2024-T3)	345	50	44	40
Aço-Liga (AISI 4140) *	1090	158	110	100
Aço-Liga (AISI 4340 revenido a 260°C)	1640	238	50	45,8
Aço-Liga (AISI 4340 revenido a 425°C)	1420	206	87,4	80
Aço Maraging 350**	1550	225	55	50
SAE 1552 modificado	1010	146	51,8 $\pm$ 2,8	47 $\pm$ 2,5
Cerâmicos				
Concreto	$\underline{x}$	$\underline{x}$	0,2-1,4	0,18-1,27
Vidro a base de cal de soda	$\underline{x}$	$\underline{x}$	0,7-0,8	0,64-0,73
Óxido de alumínio	$\underline{x}$	$\underline{x}$	2,7-5,0	2,5-4,6
Polímeros				
Poliestireno(PS)	$\underline{x}$	$\underline{x}$	0,7-1,1	0,64-1,0
Metacrilato de Polimetila (PMMA)	53,8-73,1	7,8-10,6	0,7-1,6	0,64-1,5
Polycarbonato (PC)	62,1	9	2,2	2

Quando foi comparado o resultado com outros materiais de engenharia como por exemplo o aço AISI 4340 revenido a 260°C, que é um aço que é utilizado para alguns modelos de sistema de trem de pouso de aviação e também é utilizado para fazer grampo foi observado valores de tenacidade semelhantes. Outro material que foi comparado foi o aço Maraging 350 onde também os valores de tenacidade à fratura são próximos.

4.7.7 - RESULTADO CONSIDERANDO AS PREMISSAS E GEOMETRIA DE TRINCA

Os cálculos realizados estão demonstrados no anexo A.

A tabela 14 relaciona o fator de intensidade de tensão, tamanho de trinca e fator de segurança e quando foram avaliadas as premissas propostas foi possível verificar que a intensidade de tensão para uma trinca crítica de 1,54 mm não levará a falha do componente com ressalva da segunda premissa que leva em conta o limite de resistência de 1127 MPa, que apresenta uma intensidade de tensão de $53,59 \text{ MPa} \sqrt{m}$ que comparado com $K_{IC} = 51,8 \text{ MPa} \sqrt{m} \pm 2,8 \text{ MPa} \sqrt{m}$ é possível notar que valor está dentro de limite do K_{IC} .

Entretanto quando a referência é a trinca com 3,90 mm somente a terceira premissa (tensão 281 MPa) não ocorre falha. Os resultados quarta premissa e quinta premissa foram similares onde se observa que em ambos ocorre fratura catastrófica com uma trinca de 3,90 mm e não ocorre falha com uma trinca crítica.

Quando foi verificada a intensidade de tensão para uma trinca metade circular sob tensão e levando em consideração a tensão de escoamento de 1023 MPa foi observado que a falha irá ocorrer para uma trinca de 3,90 milímetros. A falha também acontecerá para uma trinca semielíptica com 3,90 milímetros de profundidade.

Tabela 14: relação entre fator de intensidade de tensão, trinca e fator de segurança

Condição estabelecida	Tensão utilizada nos cálculos	Intensidade de tensão K em (MPa $\sqrt{\text{m}}$)		Fator de segurança	
		a 3,90 mm	a _c 1,54 mm	a 3,90 mm	a _c 1,54 mm
Primeira premissa	Escoamento 1023 MPa	77,36	48,61	0,67	1,06
Segunda premissa	Limite de Resistência 1127 MPa	85,28	53,59	0,61	0,96
Terceira premissa	281 MPa	21,15	14,22	2,44	3,64
Quarta premissa	747,36 MPa	60,22	37,84	0,86	1,36
Quinta premissa	Escoamento 1023 MPa e Tensão residual de – 210,36 MPa	60,41	37,96	0,85	1,36
Trinca metade circular, sob tensão	Escoamento 1023 MPa	69,7	43,46	0,74	1,19
Trinca semi-elíptica	Escoamento 1023 MPa	70,42	36,65	0,73	1,32

4.7.8 - RESULTADO: TAMANHO DE TRINCA EM COTOVELO EXTERNO.

O tamanho de trinca em cotovelo externo foi calculado para as tensões observadas em elementos finitos e permite entender o motivo de não ocorrência de falha catastrófica quando foi realizado ensaio de fadiga utilizando grampos que tinham trinca em cotovelo externo. Os valores em azul justificam a não ocorrência de falha em ensaio de fadiga e em verde são valores dentro da média obtida em ensaio e em amarelo são as condições em que ocorre falha catastrófica, lembrando que no ensaio foi obtido $K_{IC} = 51,8 \text{ MPa } \sqrt{m} \pm 2,8 \text{ MPa } \sqrt{m}$.

A figura 105 ilustra com uma seta o local com possível ocorrência de trinca em processo de dobramento. Os pontos de tensão são do conjunto para 100% do carregamento aplicado.

A tabela 15 relaciona tamanho de trinca e a tensão obtida no cotovelo externo na simulação de elementos finitos. O resultado é a intensidade de tensão em $\text{MPa } \sqrt{m}$ para determinada profundidade de trinca crescente.

Figura 105: A seta demonstra o local com possível ocorrência de trinca em processo de dobramento. Os pontos de tensão são do conjunto para 100% do carregamento aplicado

Tabela 15: Resultado de cálculo de tamanho de trinca com unidade em milímetros contra a tensão com unidade em MPa. O resultado é a intensidade de tensão em MPa $\sqrt{m}$ para determinada profundidade de trinca crescente. Foi utilizada a equação $K = FS\sqrt{\pi a}$

Trinca em mm	Tensão em MPa					
	281,5	374,0	467,0	561,0	654,0	747,0
1,0	11,49	15,26	19,06	22,89	26,69	30,48
1,5	14,07	18,69	23,34	28,04	32,68	37,33
2,0	16,24	21,58	26,95	32,37	37,74	43,11
2,5	18,16	24,13	30,13	36,19	42,19	48,19
3,0	19,90	26,43	33,01	39,65	46,22	52,79
3,5	21,49	28,55	35,65	42,83	49,92	57,02
4,0	22,97	30,52	38,11	45,78	53,37	60,96
4,5	24,37	32,37	40,42	48,56	56,61	64,66
5,0	25,68	34,12	42,61	51,19	59,67	68,16
5,5	26,94	35,79	44,69	53,68	62,58	71,48
6,0	28,14	37,38	46,68	56,07	65,37	74,66
6,5	29,28	38,91	48,58	58,36	68,04	77,71
7,0	30,39	40,38	50,42	60,56	70,60	80,64
7,5	31,46	41,79	52,19	62,69	73,08	83,48
8,0	32,49	43,16	53,90	64,75	75,48	86,21
8,5	33,49	44,49	55,56	66,74	77,80	88,87
9,0	34,46	45,78	57,17	68,67	80,06	91,44
9,5	35,40	47,04	58,73	70,56	82,25	93,95
10,0	36,32	48,26	60,26	72,39	84,39	96,39

4.7.9 - RESULTADO: TAMANHO DE TRINCA EM COTOVELO INTERNO.

Na análise da tabela 16 foi possível observar resultados menores de tamanho de trinca para determinada intensidade de tensão no cotovelo interno que variam de 840,5 MPa até a tensão máxima de 1120 MPa. Foi utilizada a mesma referência de tamanho de trinca em milímetros para esse cálculo com diferença de tensão maior com unidade em MPa. Foi utilizada a equação $K = FS\sqrt{\pi a}$ onde e foi obtida uma profundidade máxima de trinca de 1,25 mm antes da fratura catastrófica.

A figura 106 ilustra com uma seta o local com possível ocorrência de trinca em conjunto montado em trabalho de fadiga.

Figura 106: A seta demonstra o local com possível ocorrência de trinca em conjunto montado para trabalho em fadiga. Os pontos de tensão são do conjunto para 100% do carregamento aplicado

Tabela 16: Cálculo de tamanho de trinca em milímetros contra a tensão com unidade em MPa. O resultado final é a intensidade de tensão em MPa $\sqrt{m}$ para determinada profundidade de trinca crescente. Foi utilizada a equação $K = FS\sqrt{\pi a}$

Trinca em mm	Tensão em MPa			
	840,5	933,6	1026,8	1120,0
1,0	34,30	38,09	41,90	45,70
1,5	42,00	46,66	51,31	55,97
2,0	48,50	53,87	59,25	64,63
2,5	54,23	60,23	66,25	72,26
3,0	59,40	65,98	72,57	79,16
3,5	64,16	71,27	78,38	85,50
4,0	68,59	76,19	83,80	91,40
4,5	72,75	80,81	88,88	96,95
5,0	76,69	85,18	93,69	102,19
5,5	80,43	89,34	98,26	107,18
6,0	84,01	93,31	102,63	111,94
6,5	87,44	97,12	106,82	116,51
7,0	90,74	100,79	110,85	120,91
7,5	93,92	104,33	114,74	125,16
8,0	97,00	107,75	118,51	129,26
8,5	99,99	111,06	122,15	133,24
9,0	102,89	114,28	125,69	137,10
9,5	105,71	117,42	129,14	140,86
10,0	108,45	120,47	132,49	144,52

4.8 - LINHA 2: RESULTADO DE MEDIÇÕES DE TENSÃO RESIDUAL

O resultado da medição de tensão residual foi subdividido em superficial, ou seja, medição na região da deformação plástica descrito no item 4.8.1 e mapeamento do perfil da tensão residual na região somente com operação de deformação plástica, ou seja, na região de cotovelo interno e externo após dobramento de grampo descrito no item 4.8.2.

4.8.1 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL NA REGIÃO DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

A figura 107 ilustra o local de medição de tensão residual na região com deformação planar, ou seja achatamento ocorrido durante processo de conformação. Essa região sofreu somente deformação plástica de mudança de perfil redondo para perfil chato.

A partir da análise do gráfico ilustrado na figura 108 foi possível concluir que existem somente tensões de compressão na superfície externa do grampo indicado pelos valores negativos em MPa.

Quando foi verificado o mapeamento do perfil da tensão residual na região somente com operação de deformação plástica foi medido tensões residuais de compressão em todas as amostras avaliadas.

Para as barras identificadas como grampo 1, 2 e 3 foram verificadas que ocorrem um valor mais elevado de tensão residual na superfície e na profundidade do perfil as tensões residuais de compressão tendem a se manter constante.

Figura 107: Local de medição de tensão residual na região com deformação planar

Figura 108: Perfil de tensão residual em região que sofreu somente deformação plástica de mudança de perfil redondo para chato

4.8.2 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL NA REGIÃO DE COTOVELO EXTERNO

Foi observada tensões residuais de compressão na superfície externa do grampo realizada entre as regiões A até E, ilustrado na figura 109 e os resultados são reportados na tabela 17. Foi observada uma redução do valor das tensões de compressão nos pontos B e D que são região de cotovelo. Nos pontos A e E ocorre uma queda da tensão residual compressiva em relação ao ponto C que é um ponto adotado como referência. Os valores de tensão residual de compressão no cotovelo externo do grampo tem um efeito benéfico para vida em fadiga devido retardar a fase 1 (estágio de propagação de uma trinca em fadiga).

A queda dos valores de tensão de compressão nos cotovelos externos pode ser explicada devido ao retorno mola “*spring back*” da barra na operação de dobramento, ou seja, no processo de dobramento em formato U a barra ultrapassa da linha perpendicular em relação ao seu centro e no retorno da barra para posição perpendicular ocorre alívio da tensão residual diminuindo seus valores.

Figura 109: Local de medição de tensão residual na região superficial externa do grampo

Tabela 17: Resultado de medição de tensão residual em MPa da superfície externa do grampo. Valores negativos indicam tensão de compressão

Dado	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
Grampo 1	- 413,33 +/- 24,65	- 224,18 +/- 18,91	- 502,17 +/- 31,53	- 206,64 +/- 17,11	- 400,49 +/- 29,69
Grampo 2	- 391,42 +/- 8,25	- 285,75 +/- 21,31	- 365,95 +/- 6,10	- 226,88 +/- 13,81	- 319,18 +/- 5,92
Grampo 3	- 381,15 +/- 15,23	- 121,15 +/- 9,88	- 463,73 +/- 21,15	- 145,91 +/- 17,28	- 344,56 +/- 10,73

4.8.3 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL NA REGIÃO DE COTOVELO INTERNO

Foi observada alternância de tensões de compressão e tração na superfície interna do grampo realizada nas regiões A até E, ilustrado na figura 110 onde os resultados são reportados na tabela 18.

Em todos os grampos analisados as tensões residuais de compressão dos pontos A até E apresentaram uma queda de valor quando comparado com o ponto C. Os cotovelos internos apresentam tensão de tração nos respectivos pontos B e D. A alternância dos valores de tensão de compressão para tensão de tração ocorreu devido ao retorno mola “*spring back*” da barra na operação de dobramento, ou seja, no processo de dobramento em formato U a barra ultrapassa da linha perpendicular em relação ao seu centro e no retorno da barra para posição perpendicular ocorre alívio da tensão residual diminuindo seus valores.

Figura 110: Local de medição de tensão residual na região superficial interna do grampo

Tabela 18: resultado de medição de tensão residual em MPa da superfície interna do grampo. Valores negativos indicam tensão residual de compressão e valores positivos indicam tensão residual de tração

Dado	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Ponto E
Grampo 1	- 291,47 +/- 18,11	+ 383,19 +/- 8,93	- 411,23 +/- 17,54	+ 288,63 +/- 17,40	- 273,55 +/- 17,23
Grampo 2	- 171,24 +/- 18,91	+ 324,19 +/- 29,06	- 267,99 +/- 11,34	+ 297,07 +/- 9,58	- 126,98 +/- 11,57
Grampo 3	- 201,01 +/- 7,72	+ 253,43 +/- 20,38	- 398,77 +/- 11,61	+ 261,10 +/- 13,73	- 231,43 +/- 9,92

4.8.4 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DO PERFIL DE TENSÃO RESIDUAL EM COTOVELO INTERNO DE GRAMPO.

A partir da análise da figura 111 que ilustra o perfil de tensão residual em região de cotovelo interno de grampo pode-se observar que as amostras apresentaram tensões de tração que variaram entre 250 a 380 MPa na superfície e exibiram no transcorrer do perfil um pico de tensão residual entre 0,03 e 0,05 mm de profundidade onde o valor da tensão residual atinge valores que variam de 391 a 555 MPa. O deslocamento do pico de tensão residual está associado a descarbonetação da matéria prima.

A partir de 0,05 mm de profundidade ocorre um decréscimo da tensão residual, porém todos os valores observados se mantiveram superiores aos valores de tensão residual de tração medido na superfície.

Figura 111: Perfil de tensão residual em região de cotovelo interno

4.8.5 – RESULTADO DE MEDIÇÃO DO PERFIL DE TENSÃO RESIDUAL EM COTOVELO EXTERNO DE GRAMPO.

A partir da análise da figura 112 que ilustra o perfil de tensão residual em região de cotovelo externo de grampo pode-se observar que as amostras apresentaram tensões de compressão que variaram entre -121MPa até -285 MPa na superfície. Foi verificado que no transcorrer do perfil, ocorre um pico de tensão residual entre 0,05 e 0,06 mm de profundidade, onde a tensão residual atinge valores que variam de -213 MPa até -369 MPa. O deslocamento do pico de tensão residual está associado a descarbonetação da matéria prima.

A partir de 0,05 mm e 0,06 mm de profundidade ocorre um decréscimo da tensão residual. Foi observado que todo o perfil se mantém com tensões residuais de compressão.

Figura 112: Perfil de tensão residual em região de cotovelo externo

5 – CONCLUSÕES FINAIS

Através de programa de simulação de tratamento térmico foi possível conhecer a condição apropriada para resfriamento do aço SAE 1552 com composição química modificada com silício pela indústria nacional, que possibilitou a escolha adequada do processo de resfriamento lento a partir da temperatura em torno de 634°C para obter uma microestrutura perlita e ferrita que é fundamental para os processos subsequentes para grampo conformados a frio devido a dureza do aço laminado atingir um valor em torno de 215 HV.

Também foi possível verificar que a temperatura em torno de 542°C em um resfriamento em torno de 15 segundos forma microestrutura indesejável como bainita e temperatura em torno de 276°C em um resfriamento em torno de 7 segundos forma microestrutura indesejável como a martensita. A resultante de dureza dos respectivos processos é elevada e não permitem processos de conformação a frio subsequentes.

O ensaio de ultrassom antes e após ensaio de fadiga possibilitou dimensionar o crescimento da profundidade da trinca em cotovelo de grampo. Não foi observada falha catastrófica em nenhum dos ensaios realizados, porém foi observado que existe uma discrepância percentual de crescimento de trinca. Por meio do ensaio de ultrassom antes e após de ensaio de fadiga não foi possível entender a causa do aumento percentual significativo da profundidade de trinca. O ensaio de extensometria e elementos finitos foram escolhidos para auxiliar com informações para entender melhor os resultados observados.

O teste de cela indicou uma peça entre dez com falha iniciando exatamente na trinca pré-existente no cotovelo, porém, foi desconsiderado devido o grampo apresentar trinca visualmente maior que os demais grampos e também porque serviu para regulagem da máquina. Em 33% dos grampos ensaiados as rupturas iniciaram no cotovelo onde existia indicação de trinca, porém somente uma peça apresentou fratura com início exato na descontinuidade pré-existente. Foram observados em 66% dos grampos ensaiados uma falha iniciando no cotovelo oposto de onde existe a trinca pré-existente.

Quando foi verificada análise de fratura de grampo que apresentou trinca iniciando em marca brilhante evidenciou-se que a descontinuidade nucleou em ponto onde a dureza estava mais elevada por existir um encruamento, sendo que o encruamento foi evidenciado através de medição de microdureza Vickers onde foi observado 606 HV1, que equivale a 55 HRC. Foi confrontado resultado com a região da matriz da peça onde foi observado 360 HV1 que equivale a 36,5 HRC. Descartou-se a possibilidade de ser incrustação de material diferente superfície da barra em comparação com a matriz através de realização de composição

química.

A análise por microscopia eletrônica de varredura no grampo que apresentou trinca iniciando em local isento de defeito superficial na superfície identificou fratura com aspecto dúctil corroborado pela presença de coalescência de microvazios “*dimples*”. Através de metalografia foi observado que no início da falha existia grão estrutural mais grosseiro na superfície onde iniciou a falha e mais fino na matriz. A heterogeneidade de microestrutura foi avaliada com dureza Knoop para verificar a existência de diferença de dureza. Foi medido a dureza na região com grão estrutural mais grosseiro e a dureza apresentava valor de 316 +/- 10 HK0,5. Na região da matriz que apresentava grão estrutural mais fino foi observado 315 +/- 15 HK0,5. Ambos os resultados serviram para descartar a diferença de dureza. Concluiu-se que essa heterogeneidade de granulação entre superfície e núcleo levou a falha catastrófica. A investigação de causa na produção do aço na usina constatou que existem duas rotas possíveis para resfriamento do aço laminado. A primeira rota observada foi caracterizada pelo espalhamento do material e resfriamento lento da bobina e o resultado era uma microestrutura perlita e ferrita com granulação homogênea. O segundo processo investigado na usina foi caracterizado pelo enrolamento do aço em forma de uma bobina que permitia um resfriamento lento entre as espiras e foi constatado que o toque entre espiras associado com temperatura provocava crescimento do grão estrutural. O tamanho do grão em um metal policristalino influencia diretamente nas suas propriedades mecânicas. Os grãos adjacentes geralmente possuem orientações cristalográficas diferentes e contorno de grão em comum. O contorno de grão dificulta os movimentos de discordâncias e materiais com granulação fina são mais resistentes do que mesmo material com granulação grosseira por apresentar maior área total de contornos de grão.

Para o grampo que apresentou fratura catastrófica durante processo de dobramento, a análise através de microscopia eletrônica de varredura evidenciou fratura com aspecto dúctil e foi observado que no início da fratura existe uma marca no sentido transversal da barra e o início da fratura coincide exatamente com a marca observada e foi considerado que esse defeito é um concentrador de tensão importante e que foi o causador da falha.

A simulação realizada por método dos elementos finitos de um grampo realizado com auxílio do programa Abaqus e que foi testado com esforço de tração quase estático possibilitou avaliar o comportamento do grampo com a aplicação de carga para obter o campo de tensões na peça. A tensão do conjunto para 11% do carregamento aplicado resultou na região do cotovelo de 44 MPa até 58 MPa e na evolução do carregamento aplicado foi

observado de 200 MPa até 270 MPa. Foi observada uma tensão no ponto onde ocorre trinca no valor de 281 MPa no cotovelo do grampo para 100% do carregamento. Nessa mesma região foi encontrada uma tensão de 747,36 MPa.

Quando as tensões no cotovelo do grampo em conjunto montado foram medidas por técnica de extensometria foi verificado que devido o aperto não simultâneo do sistema de fixação no conjunto montado de feixe de mola os grampos apresentaram entre as extremidades uma diferença de tensão de 120 MPa. A diferença de tensão decresceu no decorrer de aumento de torque, porém com torque final de 450 Nm ainda persistiu uma diferença de tensão em torno de 100 MPa entre as extremidades roscadas. Quando o mesmo conjunto montado foi submetido a um dinamômetro Tinius Olsen com capacidade de 30 toneladas e foi aplicado uma carga partindo de zero e com etapas variando de 1.000 Kgf até obter carga final de 7.000 Kgf no conjunto montado observou-se que a diferença de tensão de 75 MPa entre os grampos estudados. O carregamento final com 7.000 kgf revela uma tensão no cotovelo de 100 MPa em uma extremidade e na outra extremidade 220 MPa. A diferença de tensão observada em ambos os cotovelos do grampo ajuda a interpretar o aumento significativo de profundidade de trinca observado através de técnica de ultrassom, antes e depois de ensaio de fadiga. Também favorece o entendimento de resultados do teste de cela, onde os resultados teoricamente esperados não foram satisfeitos devido a falha catastrófica não ocorrer na descontinuidade pré-existente.

A matéria prima SAE 1552 modificado apresentou resultado de tenacidade a fratura de $51,8 \pm 2,8 \text{ MPa}\sqrt{m}$, e quando foi comparado o resultado com outros materiais de engenharia como por exemplo o aço AISI 4340 revenido a 260°C que é um aço que é utilizado para alguns modelos de sistema de trem de pouso de aviação e também é utilizado para fazer grampo, foi observado valores de tenacidade semelhantes. Quando foram avaliados os resultados de intensidade de tensão considerando as premissas e geometria de trinca foi possível verificar que a intensidade de tensão para uma trinca crítica de 1,54 mm não levará a falha do componente. Foi possível observar que não ocorrerá falha no cotovelo onde a trinca está localizada no cotovelo externo e com tensão variando de 281 a 374 MPa. Os valores de tensão no cotovelo externo justificam a não ocorrência de falha em ensaio de fadiga.

A medição de tensão residual com técnica de difração de raio X demonstrou que no mapeamento do perfil da tensão residual na região somente com operação de deformação plástica ocorre somente tensões de compressão em todas as amostras avaliadas. Foi verificado que ocorre um valor mais elevado das tensões na superfície e no decorrer do perfil as tensões residuais de compressão tendem a se manter uma constante. Quando foram avaliadas as

tensões residuais na superfície externa do grampo foi observada uma redução do valor das tensões de compressão nos pontos na região de cotovelo em comparação com a região deformada planarmente. Para amostras que foram avaliadas o perfil de tensão residual no cotovelo interno do grampo foram observadas tensões de tração que variaram entre 250 MPa até 380 MPa na superfície. Foi notado que na profundidade do perfil ocorre um pico de tensão residual entre 0,03 e 0,05 mm de profundidade onde a tensão residual atinge valores que variam de 391 MPa até 555 MPa. A partir de 0,05 mm de profundidade ocorre um decréscimo da tensão residual, porém todos os valores observados se mantiveram superiores aos valores de tensão residual de tração medido na superfície. Na avaliação das tensões residuais no cotovelo externo do grampo, foi observado que apresentaram tensões de compressão que variaram entre -121 MPa até -285 MPa na superfície. Foi notado que no perfil ocorre um pico de tensão residual entre 0,05 mm e 0,06 mm de profundidade onde a tensão residual atinge valores que variam de -213MPa até -369 MPa. A partir de 0,05 mm e 0,06 mm de profundidade ocorre um decréscimo da tensão residual. Foi observado que todo o perfil se mantém com tensões residuais de compressão.

5.1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais motivos de trincas durante o processo de dobramento de grampos foram estudados e permitiram eliminar as causas das falhas. A definição de única de rota de tratamento térmico na fase de matéria-prima e a supressão de encruamento superficial localizado, microestrutura heterogênea e marcas superficiais foram fundamentais para entendimento do processo de dobramento de processo a frio de grampo para feixe de mola.

A aplicação de ensaios dos ensaios ultrassom, fadiga, cela e programas de simulação de tratamento térmico e elementos finitos juntamente com extensometria, tenacidade a fratura e difração de raios x permitiram uma visão mais aprofundada do processo e servirão como base para melhorias futuras.

6 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- a) Estudar ensaio de fadiga de grampo em conjunto montado com aperto simultâneo das extremidades roscadas de grampo.
- b) Pesquisar e normatizar o ensaio de cela com realização de aperto simultâneo das extremidades roscadas de grampo.
- c) Examinar efeito da textura em processos de conformação a frio, partindo da referência de NATH et al (2006), que enfatiza a microestrutura do aço tem uma forte influência sobre a tenacidade à fratura (KIC) de aço médio carbono.
- d) Verificar viabilidade técnica e econômica de produção de parafusos com classe de resistência 8.8 e 10.9 sem utilização de tratamento térmico .

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED,S.R.; SAKA, M. (2000). **A new ultrasonic angle-beam technique for sensitive evaluation of closed cracks**. Department of Mechanical Engineering, Tohoku University, Sendai , Japan. Elsevier .

ANDERSON, T.L. (2005) – **Fracture Mechanics – fundamentals and applications**. 3. ed. Boca Raton, FL CRC Press. pag. 25

ANDOLFATO R. P. ; CAMACHO J.S. ; BRITO G.A. (2004) . **Extensometria básica**. Nepae – Núcleo de Ensino de Pesquisa em alvenaria da UNESP. Disponível em: <[http:// www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Extensometria%20basica.pdf](http://www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Extensometria%20basica.pdf)>. Acesso em: 10 março 2013.

ANDREUCCI, R. (2003). **Ensaio de ultra-som** . Editora Abende . São Paulo . pag. 7 – 43.

ASKELAND D. R.; PHULÉ P. P. (2008). **Ciência e Engenharia dos Materiais**. Cengage Learning. pag. 150 - 240

ASM International (1995) **Heat Treater's Guide : Practices and Procedures for Irons and Steels**. pag. 116.

ASM International (1987)- **Metals Handbook, Volume 12, fractography. Modes of Fracture**. pag. 33 - 62

ASM International (1993). **Metals Handbook, Volume 01 - Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys. Residual Stresses**. pag. 689 – 693

ASM International (1993). **Metals Handbook, Volume 04 - Heat Treating. Temperature control in Heating Treating**. pag. 1162 – 1164

ASM International (1996). **Metals Handbook, Volume 19 Fadigue and Fracture. Fatigue Properties in Engineering** pag. 36 – 37

ASTM Designation (1995). **E8M 95a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic**

Materials [Metric].

ASTM International (2001). **E 1820-01**: - Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.

ASTM International (2005). **E 399 – 05**: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness *K_{IC}* of Metallic Materials.

ASTM International (2008). **A 751 -08**: Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products .

ASTM International (2005). **E350 - 05**: Standard test methods for chemical analysis of carbon steel, low-alloy steel, silicon electrical steel, ingot iron, and wrought iron .

ASTM International (2006). **E1009 -06**: Standard Practice for Evaluating and Optical Emission Vacuum Spectrometer to Analyze Carbon and Low-alloy Steel.

AutoData, Agência de Notícias. (2012) . edição nº 2980, ano 13 de 12 de outubro de 2012.

AZEVEDO, A.F.M. (2003). **Métodos de Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. pag. 4.

BATHE K.J. (1996). **Finite Elements Procedures**. Prentice Hall

CALLISTER, W. D. (2007) **Materials Science and Engineering - An Introduction**
7ª ed.

CASTRO, D.V. (2007) . **Influência da temperatura de austenitização para tempera e de revenimento na tenacidade e na vida em fadiga do aço SAE 5160 com diferentes teores de fósforo**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CHAPETTI, M.D.; et al. (2003). **Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels**

part I: review and analysis of the mechanism of failure. Elsevier.

CHRIST, B. W.; SWANSON, S. R. (1976). **Alignment Problems in the Tensile Test.** **Journal of Testing and Evaluation.** JTEVA, Vol. 4, No. 6, Nov. pag. 405--417.

DATABOOK (1980). editado pela American Society for Metals.

DATE , K.; SHIMADA, H.; IKENAGA , N. (1982) . **Crack height measurement—an evaluation of the accuracy of ultrasonic timing methods.** NDT International, December.

DIETER, G.E. (1981) : **Metalurgia Mecânica. 2ª Ed.** Tradução Silva, A.S.S.; Almeida, L.H. e Miranda, P.E.V., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, pag.283-500

DOWLING, NORMAN E. (2007). **Mechanical Behavior of Materials – Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 3ª ed.** Pearson Prentice Hall. Pag.337 - 357

DOYLE, P. A.; SCALA , C. M. (1978) . **Crack depth measurement by ultrasonics: a review.** Ultrasonics , July.

FERGUSON, B.L.; FREBORG, Z. Li. (2005). **Modeling heat treatment of steel parts.** Elsevier

FOLHA VP ONLINE, acesso em 23 de agosto de 2011.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. (2000). **Ensaaios dos materiais.** Editora LTC. Rio de Janeiro , pag. 129- 204

GEARY, W. (1992) . **A review of some aspects of fatigue crack growth under variable amplitude loading.** International Journal Fatigue 14 No 6 (1992), pag 377-386

HAMON, F. et al (2010). **CDM approach applied to fatigue crack propagation on airframe structural alloys.** Elsevier.

HELMI, R. et al (2012). **Design Review of Scissors Lifts Structure for Commercial Aircraft Ground Support Equipment using Finite Element Analysis** . IRIS 2012 - International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors . Elsevier.

HERZBERG, R. W. (1989). **Deformation and fracture Mechanics of engineering materials**. 3 ed. Willey

ISO 898–1 (2009). **Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel -- Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes -- Coarse thread and fine pitch thread**

JOHNSON, Alan A.; STOREY Randall J. (2007) **The impact fatigue properties of iron and steel**. Elsevier.

KINGSTON E.J. et al. (2006) **Novel Applications of the Deep-Hole Drilling Technique for Measuring Through-Thickness Residual Stress Distributions**. Journal of ASTM International, April 2006, Vol. 3, No. 4

MAK, D. K. (1985). **Ultrasonic methods for measuring crack location, crack height and crack angle**. Ultrasonics, September.

MANDAI, J.T. (2010). **Determinação de parâmetros para crescimento de trinca em ligas metálicas : modelagem e experimentação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília. 2010.

MARIANESCHI , E.; TILI. T. (1983) **A note on the smallest defect that can be detected using ultrasonics** . NDT International, April.

MASSEREY, B.; MAZZA , E. (2007). **Ultrasonic sizing of short surface cracks**. Elsevier.

MILAN, M.T. et al (2004) **Failure analysis of a SAE 4340 steel locking bolt** . Elsevier

MOHD, H. M.; AMIR, R. A. G.. (2012). **Design and Analysis of ‘Eco’ Car Chassis**. IRIS 2012 -International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors . Elsevier.

MOURÃO, M. B. (2005). **Siderurgia para não siderurgistas**. São Paulo:ABM. pag. 4 -8

NATH, S. K. ; DAS UTTAM KR. (2006). **Effect of microstructure and notches on the fracture toughness of medium carbon steel**. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering – june

NELSON, D. V.(1982). **Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation, Residual Stress Effects in Fatigue**. ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials, pag. 172-194.

NUNES, R.M. (2008). **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008

RANGANATHAN, B.N.; WERT, J. J.; CLOTFELTER, W. N. (1976) . **"X-Ray Residual Stress Calibration Data of Certain Ferrous and Nonferrous Alloys,"** Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 4, No. 3, May , pag. 218-219.

RIGAKU (2007). **X-Ray Stress analyzers MSF-3M, PSF-3M**. Rigaku Corporation

RIZZO, E.M.S. (2006). **Introdução aos processos de lingotamento contínuo**. São Paulo: ABM. Pag. 5 a 20.

RUCHERT, Cassius O.F. T. (2007). **Estudo da inferência de carregamento em histórias de vôos simulados na liga de alumínio aeronáutico SAE-AMS 7475 T7351**. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SHACKELFORD, J. F.S. (2008) . **Ciência dos Materiais 6ª edição**. Editora Pearson Prentice Hall. pag. 515 a 532

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. (2006) **Aços e ligas especiais**. 2ª edição. Editora Edgard Blucher Ltda. pag. 300 a 304

SIMSIR, C.; GUR, C. H. (2009). **A Review on Modeling and Simulation of Quenching**. Journal of ASTM International., Vol. 6, No. 2. doi:10.1520/JAI101766.

SMITH F.W. (1998). **Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais** . 3 edit. McGRAW-HILL . pag. 303 - 332

VENTURA , J.M. (2006). **Desenvolvimento de aços para conformação a frio de elemento de elemento de fixação do feixe de molas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VENTURA, J.M. Et al. (2009). **Modified Steels for Cold-Forming U-Bolts Used In Leaf Springs Systems**. ASM International, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 18(7) October 2009.

8 - ANEXO - RESULTADOS DE CÁLCULOS DE INTENSIDADE DE TENSÃO

8.1 - RESULTADO DE APLICAÇÃO DE FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO K EM GRAMPO DE FEIXE DE MOLAS.

Para validar o fator de largura finita de mecânica da fratura $F = 0,728$, foi verificado atendimento aos limites de $\pm 10\%$ para esse fator, conforme expressão 10 e 11.

$$\frac{a}{t} < 0,4 \quad (10)$$

$$\frac{3,90}{13,52} < 0,4$$

$$0,288 < 0,4$$

$$\frac{a}{b} < 0,3 \quad (11)$$

$$\frac{3,90}{13,545} < 0,3$$

$$0,287 < 0,3$$

8.2 - CÁLCULO DA TRINCA CRÍTICA CONSIDERANDO TENSÃO DE ESCOAMENTO.

Com o fator $F = 0,728$ validado foi calculado o tamanho de trinca crítica a_c partindo da fórmula 12.

$$K = FS\sqrt{\pi a_c} \quad (12)$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{K_{1c}}{\sigma * Y} \right)^2$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} * \left(\frac{51,8}{1023 * 0,728} \right)^2$$

$$a_c = 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$a_c = 1,54 \text{ mm}$$

8.3 - PRIMEIRA PREMISA: TENSÃO MÁXIMA PRÓXIMA DA MÉDIA DE

ESCOAMENTO.

Utilizando a relação entre tensão de escoamento, força e área, foi obtido o valor da força através da equação 14. Foi considerada geometria circular para fins de cálculo de área.

Considerado escoamento igual a 1023 MPa que equivale a 104,32 kgf/mm^2 .

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (14)$$

$$104,32 \text{ kgf}/\text{mm}^2 = \frac{F}{\frac{\pi * 20,92^2}{4}}$$

$$P = F = 35.857,56 \text{ kgf}$$

Utilizando o resultado da equação 14 e aplicando na equação 13 obtemos a tensão nominal média aplicada.

$$S_t = \frac{P}{2bt} \quad (13)$$

$$S_t = \frac{35.857,56 \text{ kgf}}{2 * 13,545 * 13,52}$$

$$S_t = S = 97,90 \text{ kgf}/\text{mm}^2 \text{ ou } 960,07 \text{ MPa}$$

Conhecendo o valor da tensão nominal S da equação 13 foi adicionado tal valor na equação 12 para cálculo da intensidade de tensão K.

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 960,07 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,0039m}$$

Para tensão máxima próxima do escoamento o $K = 77,36 \text{ MPa} \sqrt{m}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{77,36} \quad x_s = 0,67$$

Recálculo da intensidade de tensão considerando valor de trinca crítica a_c .

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 960,07 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,00154m}$$

Para tensão máxima próxima do escoamento e trinca crítica 1,54 mm o valor obtido para intensidade de tensão **$K = 48,61 \text{ MPa} \sqrt{m}$**

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{IC}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{48,61} \quad x_s = 1,06$$

8.4 - SEGUNDA PREMISA: TENSÃO MÁXIMA PRÓXIMA DA MÉDIA DO LIMITE DE RESISTÊNCIA.

Foi considerado a tensão máxima estar próxima da média do limite de resistência que equivale a 115 kgf/mm², que equivale a 1127 MPa e utilizando a equação 14 foi obtido P.

$$115 \text{ kgf/mm}^2 = \frac{F}{\frac{\pi * 20,92^2}{4}}$$

$$\mathbf{P = F = 39.527,8 \text{ kgf}}$$

Utilizando o resultado da equação 14, e aplicando na equação 13, obtemos:

$$S_t = \frac{P}{2bt}$$

$$S_t = \frac{39.527,8 \text{ kgf}}{2 * 13,545 * 13,52}$$

$$S_t = S = 107,92 \text{ kgf/mm}^2 \text{ ou } 1.058,37 \text{ MPa}$$

Conhecendo o valor da tensão nominal S da equação 13, foi adicionado na equação 12:

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 1.058,37 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,0039m}$$

Para tensão máxima próxima do limite de resistência o $K = 85,28 \text{ MPa} \sqrt{m}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{IC}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{85,28} \quad x_s = 0,61$$

Recálculo da intensidade de tensão considerando valor de trinca crítica a_c .

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 1.058,37 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,00154 \text{ m}}$$

Para tensão máxima próxima do limite de resistência o $K = 53,59 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{IC}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{53,59} \quad x_s = 0,96$$

8.5 - TERCEIRA PREMISSE: TENSÃO DE 281 MPa OBTIDA EM ELEMENTOS FINITOS

Foi utilizada a tensão de 281 MPa que foi obtida através de elementos finitos e utilizado a formula 12 para calcular a intensidade de tensão K.

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 281 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,0039 \text{ m}}$$

Para tensão máxima próxima do escoamento o $K = 21,15 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{IC}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{21,15} \quad x_s = 2,449$$

Recálculo da intensidade de tensão considerando valor de trinca crítica a_c .

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 281 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,00154 \text{ m}}$$

Para tensão máxima próxima do escoamento o $K = 14,22 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{21,15} \quad x_s = 3,64$$

8.6 - QUARTA PREMISA: TENSÃO DE 747 MPa OBTIDA EM ELEMENTOS FINITOS

Foi utilizada a tensão máxima de 747 MPa obtida através de elementos finitos e utilizado a formula 12 para calcular a intensidade de tensão K.

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 747,36 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,0039m}$$

Para tensão máxima próxima do escoamento o $K = 60,22 \text{ MPa} \sqrt{m}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{60,22} \quad x_s = 0,86$$

Recálculo da intensidade de tensão considerando valor de trinca crítica a_c .

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 747,36 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,00154m}$$

Para tensão máxima próxima do escoamento o $K = 37,84 \text{ MPa} \sqrt{m}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{37,84} \quad x_s = 1,36$$

8.7 - QUINTA PREMISA: TENSÃO RESIDUAL DE COMPRESSÃO E TENSÃO DE ESCOAMENTO.

Utilizando o resultado do item 4.7.4.2 da página 139 obtemos o valor a tensão nominal média aplicada de $S_t = S = 97,90 \text{ kgf/mm}^2$ ou $960,07 \text{ MPa}$.

Conhecendo o valor de $-210,36 \text{ MPa}$ que é a média nominal da tensão residual de compressão (tensão negativa) na região do cotovelo externo B ilustrado na tabela 17 e utilizando dimensional de trinca de $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ obtém-se os seguintes resultados:

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 960,07 \text{ MPa} - 210,36 \text{ MPa} \sqrt{\pi 0,0039 \text{ m}}$$

Para tensão máxima próxima do escoamento o $K = 60,41 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{60,41} \quad x_s = 0,85$$

Recálculo da intensidade de tensão considerando valor de trinca crítica a_c .

$$K = FS\sqrt{\pi a}$$

$$K = 0,728 * 960,07 \text{ MPa} - 210,36 \sqrt{\pi 0,00154 \text{ m}}$$

Para trinca crítica $1,54 \text{ mm}$ o valor obtido para intensidade de tensão $K = 37,96 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{37,96} \quad x_s = 1,36$$

8.8 - RESULTADO PARA FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA SEÇÕES TRANSVERSAIS RETANGULARES PARA SUPERFÍCIE DE TRINCA METADE CIRCULAR, SOB TENSÃO E/OU FLEXÃO.

Para validar o cálculo baseado nas fórmulas de Dowling ilustrados figura 59 foi verificado primeiramente atendimento as expressões funcionais 16 e 17.

$$\frac{a}{b} < 0,5 \quad (16)$$

$$\frac{3,90}{13,545} < 0,5$$

$$0,287 < 0,5$$

$$\frac{h}{b} > 1 \quad (17)$$

$$\frac{30}{13,545} > 1$$

$$2,21484 > 1$$

Foi calculado o comprimento relativo da trinca utilizando a expressão 20.

$$\alpha = \frac{a}{t} \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{3,90}{13,52}$$

$$\alpha = 0,288461538$$

Para calcular f_w foi utilizada a expressão 21.

$$f_w = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}}\right)} \quad (21)$$

$$f_w = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi * 3,90}{2 * 13,545} \sqrt{\frac{3,90}{13,52}}\right)}$$

$$f_w = 1,00$$

Utilizado formula 21 para calcular f_a .

$$f_a = 1,04 + 0,2017\alpha^2 - 0,1061\alpha^4$$

$$f_a = 1,04 + 0,2017\alpha^2 - 0,1061\alpha^4$$

$$f_a = 1,04 + 0,2017 * 0,288461538^2 - 0,1061 * 0,288461538^4$$

$$f_a = 1,022481904$$

Utilizado formula 22 para calcular f_b

$$f_b = 1 - 1,34\alpha - 0,03\alpha^2$$

$$f_b = 1 - 1,34 * 0,288461538 - 0,03 * 0,288461538^2$$

$$f_b = 0,610965237$$

$S_b = 0$ (não tem flexão), portanto $f_b S_b = 0$

S_t = foi calculado em resultado 4.7.3.2 e foi considerado tensão de escoamento de 1023 MPa que gerou um S_t de 960,07 MPa.

$$K = f_a f_w \frac{2}{\pi} (S_t + f_b S_b) \sqrt{\pi a}$$

$$K = 1,022481904 * 1,00 * \frac{2}{\pi} * 960,07 \text{ MPa} * \sqrt{\pi * 0,0039 \text{ m}}$$

$$K = 69,17 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Para seções transversais retangulares e trinca metade circular o valor de $K = 69,17 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{69,17} \quad x_s = 0,75$$

Recálculo da intensidade de tensão considerando valor de trinca crítica a_c .

$$K = f_a f_w \frac{2}{\pi} (S_t + f_b S_b) \sqrt{\pi a}$$

$$K = 1,022481904 * 1,00 * \frac{2}{\pi} * 960,07 \text{ MPa} * \sqrt{\pi * 0,00154 \text{ m}}$$

$$K = 43,46 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Considerando a trinca crítica a_c , Para seções transversais retangulares e trinca metade circular o valor de $K = 43,46 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{43,46} \quad x_s = 1,19$$

8.9 - RESULTADO DE FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO PARA UMA SUPERFICIE DE TRINCA SEMI-ELIPTICA.

Conhecendo a profundidade ou tamanho da trinca $a = 3,90 \text{ mm}$ e comprimento da trinca $2C = 8,47 \text{ mm}$ e valor de $C = 4,235 \text{ mm}$ e adicionando valor de a e c na equação 16 obtemos:

$$\left(\frac{a}{c} \leq 1 \right)$$

$$\left(\frac{3,90}{4,235} \leq 1 \right)$$

$$0,92 \leq 1$$

$$g_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$g_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{3.90}{4.235} \right)$$

$$g_1 = 1,047119244$$

$$g_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}}$$

$$g_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{3.90}{4.235}}$$

$$g_2 = 0,254006741$$

$$g_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24}$$

$$g_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{3,90}{4.235}} + 14 \left(1 - \frac{3.90}{4.235} \right)^{24}$$

$$g_3 = -0,136578858$$

$$f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right)}$$

$$f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi * 4.235}{2 * 13.545} \sqrt{\frac{3.90}{13.52}} \right)}$$

$$f_w = 1$$

$$\left(\frac{c}{b} < 0.5 \right)$$

$$\left(\frac{4.235}{13.545} < 0.5 \right)$$

$$(0,312 < 0.5)$$

Foi calculado o fator F_D pela expressão 26.

$$F_D = \left[g_1 + g_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + g_3 + \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] f_w$$

$$F_D = \left[1,047119244 + 0,254006741 \left(\frac{3,90}{13,52} \right)^2 - 0,136578858 + \left(\frac{3,90}{13,52} \right)^4 \right] * 1$$

$$F_D = 0,938600215$$

Foi calculado o fator Q pela expressão 25.

$$Q \approx 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}$$

$$Q \approx 1 + 1.464 \left(\frac{3,90}{4,235} \right)^{1.65}$$

$$Q \approx 2,277878444$$

Foi calculado o valor de K_D pela expressão 24.

$$K_D = F_D s \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Utilizado o valor de limite de escoamento = 1023 MPa.

$$K_D = 0,938600215 * 1023 \text{ MPa} * \sqrt{\frac{\pi * 0,0039 \text{ m}}{2,277878444}}$$

$$K_D = 70,42 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Para trinca semi elíptica o valor de $K = 70,42 \text{ MPa} \sqrt{m}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$x_s = \frac{K_{1C}}{K} \quad x_s = \frac{51,8}{70,42} \quad x_s = 0,73$$

Recálculo da intensidade de tensão considerando valor de trinca crítica $a_c = 1,54 \text{ mm}$, considerando o comprimento de trinca $c = 4,235 \text{ mm}$

Adicionando valor de a e c na equação 16 obtemos:

$$\left(\frac{a}{c} \leq 1 \right)$$

$$\left(\frac{1,54}{4,235} \leq 1 \right)$$

$$0,363636363 \leq 1$$

$$g_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$g_1 = 1.13 - 0.09 * 0,363636363$$

$$g_1 = 1,097272727$$

$$g_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + 0,363636363}$$

$$g_2 = 1,039032436$$

$$g_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + 0,363636363} + 14 (1 - 0,363636363)^{24}$$

$$g_3 = -0,48681939$$

$$f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right)}$$

$$f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi * 4.235}{2 * 13.545} \sqrt{\frac{1,54}{13.52}} \right)}$$

$$f_w = 0,9999958154$$

$$\left(\frac{c}{b} < 0.5 \right)$$

$$\left(\frac{4.235}{13.545} < 0.5 \right)$$

$$(0,312 < 0.5)$$

$$g_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + 0,363636363} + 14 (1 - 0,363636363)^{24}$$

$$g_3 = -0,48681939$$

Foi calculado o fator F_D pela expressão 26.

$$F_D = \left[g_1 + g_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + g_3 + \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] f_w$$

$$F_D = [1,097272727 + 1,039032436 (0,113905325)^2 - 0,48681939 \\ + (0,113905325)^4] * 0,9999958154$$

$$F_D = 0,62$$

Foi calculado o fator Q pela expressão 25.

$$Q \approx 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}$$

$$Q \approx 1 + 1,464 \left(\frac{1,54}{4,235} \right)^{1,65}$$

$$Q \approx 1,275830402$$

Foi calculado o valor de K_D pela expressão 24.

$$K_D = F_D s \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Utilizado o valor de limite de escoamento = 1023 MPa e trinca crítica 1,54 mm.

$$K_D = 0,62 * 1023 \text{ MPa} * \sqrt{\frac{\pi * 0,00154 \text{ m}}{1,275830402}}$$

Para trinca semi elíptica o valor de $K = 39,05 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$

Fator de tensão de segurança em relação a fratura frágil

$$\chi_s = \frac{K_{IC}}{K} \quad \chi_s = \frac{51,8}{39,05} \quad \chi_s = 1,32$$