

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

INFLUÊNCIA DA FIBRAGEM NA VIDA EM FADIGA DE COMPONENTES  
OBTIDOS PELO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE

Jaques Araripe Suris

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –  
PPGE3M

INFLUÊNCIA DA FIBRAGEM NA VIDA EM FADIGA DE COMPONENTES  
OBTIDOS PELO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE

Jaques Araripe Suris  
Engenheiro Mecânico,

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito - UFRGS

Dr. Eng. Alexandre Polozine - UFRGS

Prof. Dr. Diego Rodolfo Simões de Lima – IFSC

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Dedico a minha esposa Karen e ao meu filho Kauã que sempre estiveram do meu lado dando alegria e carinho.

Aos meus pais Nelson e Iára que sempre foram companheiros e incentivadores dos meus estudos.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer pela oportunidade, orientação e confiança no desenvolvimento deste mestrado.

Aos funcionários e colegas do Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, coordenado pelo Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer, pela contribuição para realização deste trabalho.

Ao amigo e colega M.sc. Eng<sup>o</sup> Charles Chemale Yurgel pelas orientações e parceria no desenvolvimento da Dissertação e publicação.

A Maxiforja Componentes Automotivos Ltda em especial a família Veit, pela oportunidade de desenvolver e incentivar este tipo trabalho nas dependências da empresa.

Ao colega e amigo Eng<sup>o</sup> Tomaz Petracco pelo incentivo e colaboração no desenvolvimento deste mestrado.

Ao Eng<sup>o</sup> Anderson Letti pela ajuda nos testes e simulações.

A todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

## SUMARIO

Agradecimentos.....	V
Sumário.....	VI
Lista de Figuras.....	V
Lista de Tabelas.....	IX
Lista de Símbolos.....	X
Resumo.....	XII
Abstract.....	XIII
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Forjamento a Quente.....	3
2.2 Fibragem e seu Efeitos.....	4
2.3 Ensaio Mecânicos.....	16
2.3.1 Fadiga.....	16
2.3.2 Determinação Teórica da Vida a Fadiga.....	23
2.3.2.1 Fatores Modificadores.....	26
2.3.2.2 Concentradores de Tensão e Sensibilidade ao Entalhe.....	29
3. Procedimento Experimental.....	32
3.1 Processo de Fabricação dos Corpos de Prova.....	34
3.2 Ensaio Metalográficos.....	41
3.3 Ensaio de Fadiga.....	43
3.4 Calculo Teórico de Vida a Fadiga.....	44
4. Resultados e Discussão.....	47
5. Conclusões.....	51
6. Sugestões de Trabalhos Futuros.....	52
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	53
ANEXOS.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fibragem em componente forjado.....	2
Figura 2 Principais parâmetro envolvidos no processo de forjamento.....	3
Figura 3 Efeito do grau de redução no forjamento a quente (antes e depois do forjamento) sobre as propriedades mecânicas de aço Ni-Cr.....	7
Figura 4 Gancho de aço forjado SAE 4140 mostrando a estrutura fibrosa (linhas de fluxo), resultante de forjamento a quente.....	8
Figura 5 Inclusões de MnS alongadas no sentido da conformação.....	8
Figura 6 Efeito da redução no trabalho a quente na força de impacto de aço níquel-cromo tratado termicamente. ....	9
Figura 7 Anisotropia em aço forjado.....	10
Figura 8 Efeito da fibragem com o local da partição do ferramental.....	13
Figura 9 Exemplo de especificação de fibragem adotada pela indústria automotiva.	15
Figura 10 Motor a combustão com virabrequim.....	15
Figura 11 Especificação da orientação da fibragem em virabrequins de Motoserras.....	16
Figura 12 Fadiga em barra de sistema de levante de trator após ensaio de fadiga.....	19
Figura 13 Três estágios de desenvolvimento da falha por fadiga.....	20
Figura 14 Dispositivo de ensaio de fadiga rotativa.....	21
Figura 15 Diagrama $S-N$ .....	22
Figura 16 Diagrama $\varepsilon-N$ .....	23
Figura 17 Exemplo de uma tensão senoidal flutuante.....	25
Figura 18 Determinação do fator $K_f$ para eixo redondo com filetagem.....	31
Figura 19 Configuração A.....	33
Figura 20 Configuração B.....	33
Figura 21 Configuração C.....	33
Figura 22 Desenho esquemático da retirada do blank para forjamento.....	36
Figura 23 Processo de usinagem do blank.....	36
Figura 24 Sequência do processo de forjamento simulado no QForm®.....	37
Figura 25 Fibragem simulada no QForm®.....	37
Figura 26 Forno de aquecimento dos blanks.....	38
Figura 27 Blank posicionado para forjamento.....	38
Figura 28 Amostra após forjamento.....	39
Figura 29 Desenho da ferramenta de forja.....	39

Figura 30 Desenho do CPs forjados.....	40
Figura 31 Programa de CAM para torneamento dos corpos de prova.....	41
Figura 32 Desenho corpos de prova usinados.....	41
Figura 33 Fibragem da Configuração A.....	42
Figura 34 Fibragem da Configuração B.....	42
Figura 35 Fibragem da Configuração C.....	42
Figura 36 Equipamento do ensaio de fadiga.....	43
Figura 37 Amostra em teste de fadiga.....	44
Figura 38 Simulação das tensões aplicadas nos corpos de prova.....	47
Figura 39 Resultados dos ensaios de fadiga.....	48
Figura 40 Resultados dos ensaios de fadiga agrupados.....	48
Figura 41 Região da fratura do corpo de prova.....	50

## LISTA TABELAS

Tabela 1 Parâmetros do fator de modificação da condição superficial $K_a$ .....	27
Tabela 2 Fatores de Confiabilidade ( $K_e$ ).....	29
Tabela 3 Parâmetro de Heywood para aços.....	30
Tabela 4 Fluxo de Operações para fabricação dos corpos de prova.....	34
Tabela 5 Composição química do aço testado.....	35
Tabela 6 Dados de entrada para simulação do forjamento no QForm®.....	37
Tabela 7 Resultados dos Ensaios de Fadiga.....	47

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	constante para calculo da vida a fadiga
$\sqrt{a}$	- Parâmetro de Heywood para aços, [ $\sqrt{\text{mm}}$ ]
$b$	constante para calculo da vida a fadiga
$b_l$	largura inicial do corpo de prova, [mm]
$b_0$	largura final do corpo de prova, [mm]
$d$	diâmetro do corpo de prova, [mm]
$f$	fração $f$ para calculo da vida a fadiga
$K_a$	fator de modificação de condição de superfície
$K_b$	fator de modificação de tamanho
$K_c$	fator de modificação de carga
$K_d$	fator de modificação de temperatura
$K_e$	fator de confiabilidade
$K_f$	fator de modificação por efeitos variados
$K_t$	fator de concentração de tensão
$k_f$	valor reduzido de $K_t$
$l_0$	comprimento inicial do corpo de prova, [mm]
$l_1$	comprimento do corpo de prova após certa deformação plástica, [mm]
$m$	sensibilidade a taxa de deformação
$N$	número de ciclos até a falha
$n$	coeficiente de encruamento
$\bar{r}$	coeficiente de anisotropia médio
$r$	coeficiente de anisotropia ou parâmetro de anisotropia
$R$	raio do corpo de prova, [mm]
$S$	resistência a fadiga, [MPa]
$S_l$	espessura inicial do corpo de prova, [mm]
$S_0$	espessura final do corpo de prova, [mm]

$S_e$  limite de resistência no local crítico de uma peça na geometria e na condição de uso, [MPa]

$S'_e$  limite de resistência à fadiga, [MPa]

$S_{ut}$  limite de resistência à tração, [MPa]

$T_f$  Temperatura, [°C]

$\phi$  deformação verdadeira

$\phi_b$  deformação verdadeira na largura

$\phi_s$  deformação verdadeira na espessura

$\varepsilon$  deformação convencional

$\sigma_a$  tensão completamente invertida, [MPa]

$\sigma_m$  tensão média, [MPa]

$\sigma_{min}$  tensão mínima, [MPa]

$\sigma_{max}$  tensão máxima, [MPa]

$\sigma_0$  tensão nominal, [MPa]

$\sigma'_f$  tensão corrigida, [MPa]

## RESUMO

Componentes mecânicos conformados, possuem maior resistência quando comparados aos produzidos por outros processos de fabricação como fundição ou usinagem. Entre os motivos está a heterogeneidade de sua estrutura resultante da orientação da fibragem. Isto se deve pelo fenômeno de anisotropia que o processo de conformação induz ao material. Sabendo desta afirmação, muitas vezes, projetistas se perguntam o quanto esta orientação representa na resistência e na vida de um componente ou se esta não estiver adequada ao projeto do componente, o quanto poderá comprometer seu desempenho. Este trabalho compara quantitativamente através de ensaio de fadiga flexo rotacional em corpos de prova forjados a quente a influência da orientação da fibragem, simulando uma configuração adequada, isto é, com a fibragem disposta longitudinalmente e orientada no sentido de laminação e uma configuração não adequada, com a fibragem disposta transversalmente a  $90^\circ$  do sentido de laminação. Por fim para efeito de comparação foram testados corpos de prova usinados diretamente da barra laminada, com sua fibragem disposta longitudinalmente para verificar qual o impacto desta situação frente ao processo de forjamento a quente. Os resultados dos testes demonstram a importância deste estudo, pois fica comprovado que os corpos de prova forjados com a fibragem disposta longitudinalmente no sentido de laminação, apresentaram uma vida a fadiga superior as demais configurações testadas. Já as demais configurações apresentaram valores semelhantes nos testes de fadiga.

## **ABSTRACT**

Mechanical formed components have greater resistance when compared with those produced by other manufacturing processes such as casting or machining. Among the reasons is the heterogeneity of its structure resulted from the grain flow orientation. This is due to the anisotropy phenomenon which forming process induces to the material. This statement knowledge often, make designers wonder how this orientation is related to the component resistance and life, or if it is not appropriate to the component design how it could implicate on their performance. This study compares quantitatively by rotational flexing fatigue test the grain flow orientation influence on forged specimens, simulating a suitable configuration, i.e. with the grain flow orientation longitudinally disposed and oriented to the rolling direction and another with a non-adequate configuration, with the grain flow orientation 90° transversely disposed to the rolling direction. Lastly specimens machined from the rolled bar were tested for comparison, with its grain flow orientation longitudinally disposed in order to check this situation impact compared to the hot forging process. The test results evidenced the importance of this study as it is proven that the forged specimens with the grain flow orientation disposed longitudinally to the rolling direction presented a higher fatigue life compared to the other tested configurations. The other studied settings presented similar values in fatigue tests.

## 1. Introdução

Componentes mecânicos conformados possuem maior resistência quando comparados aos produzidos por outros processos de fabricação, como fundição ou usinagem. Entre os motivos está a heterogeneidade de sua estrutura resultante da orientação da fibragem. Isto se deve pelo fenômeno de anisotropia que o processo de conformação induz ao material. Sabendo desta afirmação, muitas vezes, projetistas se perguntam o quanto esta orientação representa na resistência e na vida de um componente ou se esta não estiver adequada ao projeto do componente, o quanto poderá comprometer seu desempenho.

O processo de forjamento a quente é muito utilizado para fabricação de componentes e estruturas mecânicas, pois as propriedades mecânicas obtidas através deste processo são superiores quando comparado a outros processos de fabricação como fundição, usinagem ou soldagem [1]. Propriedades como resistência mecânica e vida à fadiga são melhoradas através deste processo, possibilitando aumento da vida útil do componente de 100 a 300%, assim reduzindo custos com manutenções prematuras e aumentando a segurança do mesmo [2].

A anisotropia induzida pelo processo de forjamento ao material é a principal causa pela melhora das propriedades mecânicas. A orientação dos defeitos e inclusões do material no sentido análogo à deformação que é chamada de fibragem do componente [3]. A Figura 1 exemplifica as linhas de fibramento geradas pelo processo de forjamento [4].

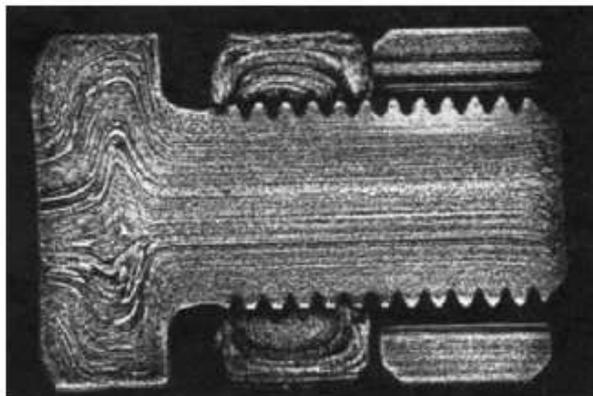


Figura 1 Fibragem em componente forjado [4]

Para aproveitar da melhor forma as vantagens do fibramento imposto pelo forjamento ao componente é necessário a correta orientação da mesma pelo fluxo do material no ferramental e o planejamento adequado das etapas de forjamento. Da mesma forma se a orientação da fibragem não for a adequada poderá comprometer as propriedades mecânicas do componente [2].

Este trabalho tem o objetivo de avaliar quantitativamente a influência da orientação da fibragem de um componente forjado a quente sobre a propriedade de vida à fadiga. O fator que motivou este tema foi a falta de normativas e literatura apropriada que aborde a questão de forma clara, demonstrando valores práticos obtidos em ensaios e não apenas qualitativamente como normalmente é encontrado. A relevância do tema é de suma importância para a indústria de componentes forjados, pois a segurança de um componente mecânico produzido pode ser afetado com a incorreta orientação de fibragem.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Forjamento a Quente

Forjamento é a operação de deformação a quente ou a frio, em que o material é forçado a fluir através de deformação plástica, dentro de uma matriz com o formato da peça desejada [3]. Os produtos metálicos semi-acabados não alongados, geralmente, são fabricados através da conformação mecânica por meio de processos como o forjamento a quente. Neste processo, têm-se etapas como a de aquecimento, que visa proporcionar aumento de ductilidade ao material para, em seguida, nas etapas de deformações, o produto se transformar de uma geometria simples para um outro de geometria complexa. Esta transformação ocorre através de matrizes e punções de penetração que determinam a geometria do produto [5].

Para se obter uma visão do processo de forjamento e os parâmetros necessários é importante ter o conhecimento de conceitos básicos relacionados a este processo, como: tensões, deformações, velocidade de deformação, temperatura, curva de escoamento, coeficiente de atrito, entre outros parâmetros [6]. Na Figura 2, se observam os principais parâmetros envolvidos no processo de forjamento.

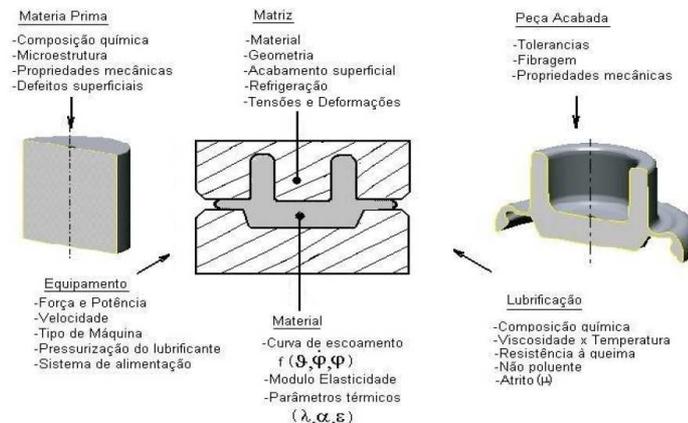


Figura 2 Principais parâmetro envolvidos no processo de forjamento [6]

As propriedades do material desempenham um papel importante no processo de conformação de metais. A conformabilidade depende das propriedades, tais como: coeficiente de encruamento ( $n$ ), o de sensibilidade a taxa de deformação ( $m$ ), o parâmetro de anisotropia ( $r$ ) e o tamanho de grão [7].

Os aços são submetidos a conformação mecânica por dois motivos principais: alteração da forma e dimensões e alteração de sua estrutura, onde as variáveis mais importantes neste processo são a temperatura e a taxa de deformação. Na metalurgia existe a distinção de deformação a frio e quente, onde esta não é caracterizada pela temperatura única e absoluta. Denomina-se deformação a frio a temperatura em que a energia de deformação é armazenada no material, não ocorrendo recuperação ou recristalização. Já a deformação a quente há ocorrência de alteração estruturais, eliminando em grande parte a energia introduzida no material pelo processo de recuperação e recristalização [6].

No processo de forjamento, o trabalho a quente refina os grãos, aumentando a resistência e ductilidade, da mesma forma que componentes forjados possuem baixa probabilidade de possuírem defeitos internos, ao contrário de fundidos. Parâmetros como defeitos internos podem ter influência ao projeto para fadiga [8].

Zoroufi e Fatemi evidenciaram em testes de fadiga a superioridade do forjado em aço de um componente de suspensão automotiva quando comparado ferro fundido e alumínio fundido [8].

## **2.2 Fibragem e Seu Efeito Sobre as Propriedades Mecânicas**

Como resultado do trabalho mecânico, as partículas de segunda fase como inclusões e segregações e também vazios, tendem a distribuir-se e assumir um formato, de forma grosseira, análogo à deformação da peça como um todo.

Se as partículas e inclusões são dúcteis e mais moles do que a matriz, assumem forma alongada, elipsoidal (ex. MnS no aço), se são frágeis, quebram-se em fragmentos que se orientam paralelamente à direção principal de trabalho (ex. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no aço); se são mais duras e mais resistentes do que a matriz, não se deformam (ex. SiO<sub>2</sub> no aço) [9].

Para classificar as inclusões em aços, normalmente utiliza-se as normas ASTM E-45 e a ASTM E-1122, como referência:

- a) A norma E-45 – “Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels” – estabelece os procedimentos de classificação manual, em muitas das vezes baseados na técnica de comparação de quadros (“chart comparison”), na qual o observador obtém uma imagem da amostra ao microscópio e a compara com quadros de referência que contém exemplos esquemáticos dos diversos tipos de inclusão [10].
- b) A norma E-1122 – “Standard Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis” – estabelece métodos quantitativos, baseados em análise digital de imagens, para identificar e classificar inclusões em imagens. Busca-se, neste caso, tornar o processo menos dependente da influência do operador humano [11].

Em ambos os casos acima, busca-se realizar a classificação de inclusões segundo os seguintes critérios:

- a) Tipo de Inclusão – dividindo as inclusões nos tipos A (Sulfetos), B (Alumina), C (Silicatos) e D (Óxidos).
- b) Formação de “stringers” – sequências de inclusões alinhadas na direção de laminação, com espaçamento máximo definido pela norma, e que devem ser tratadas como um único objeto. Esta definição não se aplica às inclusões do tipo D.

- c) Espessura ou diâmetro das inclusões ou “stringers” – separando em séries grossa ou fina, com limites diferentes por tipo de inclusão.
- d) Severidade – uma medida da densidade de inclusões em cada campo. Esta medida é obtida, em cada campo, a partir do comprimento total dos “stringers”, para inclusões dos tipos A, B e C, e a partir da contagem de inclusões, para o tipo D.

Inclusões são os principais contribuintes para a fadiga e a anisotropia mecânica no aço. É praticamente impossível ou comercialmente inviável evitar estes defeitos [12].

Um estudo bastante abrangente dos efeitos que as inclusões causam sobre a fadiga é descrito no trabalho de Lankford (apud GRANGE, R. A. [13]), o qual comenta que, com relação a dispersão dos dados experimentais, esses devem-se também aos efeitos de tamanho, morfologia, composição química (tipo), orientação, distribuição (localização junto à superfície) e densidade (quantidade) dessas descontinuidades. Aparentemente, esses são os fatores mais importantes para avaliar a criticalidade e/ou a nocividade de inclusões como iniciadoras de trincas de fadiga [13].

Em termos do crescimento da trinca de fadiga, a quantidade de inclusões aparenta ser um fator determinante. Seu efeito é manifestado através da anisotropia das taxas de crescimento de trinca com o aumento da quantidade de inclusões, mas nesse caso os sulfetos são mais prejudiciais que os óxidos. Com relação a iniciação da trinca de fadiga, Lankford (apud GRANGE, R. A. [13]) afirma que as inclusões mais nocivas, em ordem decrescente são aluminatos de cálcio, alumina e aluminato de magnésio [13].

Um dos efeitos associados ao trabalho a quente é sobre a alteração da forma e distribuição da segregação no aço. A redução da dimensão normais ao sentido de deformação dos produtos (espessura, em produtos planos e diâmetro em produtos cilíndricos) causa a redução dos espaços entre os braços das dendritas originadas no processo de solidificação. Esta redução é também favorável à homogeneização, por difusão. Por este motivo o grau de redução ou grau de deformação é importante nos processos de conformação como demonstrado na Figura 3 [3].

O efeito da deformação é mais facilmente observado na seção longitudinal que contém a maior deformação como ilustrado na Figura 4. A forte orientação das regiões microsegregadas originadas da solidificação no sentido de maior alongamento do material tem aspecto fibroso que dá o nome de fibragem do material. Outro efeito associado ao trabalho a quente em materiais metálicos são sobre as fases insolúveis como: inclusões não metálicas, carbonetos e nitretos estáveis. Estas são insolúveis às temperaturas do processo e tem sua forma e distribuição alterada com o trabalho a quente como exemplificado na Figura 5 [3].

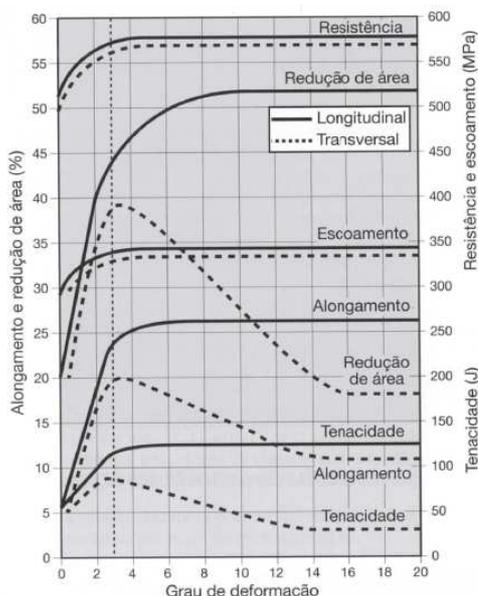


Figura 3 Efeito do grau de redução no forjamento a quente (antes e depois do forjamento) sobre as propriedades mecânicas de aço Ni-Cr [3]



Figura 4 Gancho de aço forjado SAE 4140 mostrando a estrutura fibrosa (linhas de fluxo), resultante de forjamento a quente [17]

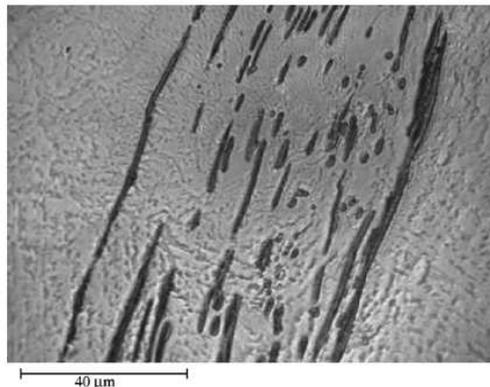


Figura 5 Inclusões de MnS alongadas no sentido da conformação [18]

Durante processos de conformação de metais como laminação e forjamento as inclusões de sulfetos de manganês (MnS) são alongadas e podem ter consideráveis efeitos adversos nas propriedades mecânicas se as mesmas não estiverem alinhadas no sentido de carregamento [14].

Sob os processos de conformação mecânica, tais como forjamento, extrusão, laminação, as microtrincas frequentemente formam-se na matriz deformada do aço, adjacente às partículas duras de óxido. Mais tarde poderão atuar como iniciadoras de trincas de fadiga, assumindo-se que estejam

favoravelmente orientadas ao campo de tensão aplicado [13] e próximas à superfície [12 - 15] do material.

Godefroid comenta que a variação do sentido de laminação longitudinal para transversal para materiais planos, é a que mais desloca a curva  $da/dN \times \Delta K$  para a esquerda, apresentando, portanto, ação negativa sobre a propagação da trinca de fadiga. Essa orientação também é prejudicial para ensaios de levantamento de curva S-N (resistência a fadiga x n° de Ciclos) [16].

Este rearranjo das inclusões no metal pelo processo de conformação a quente tem pouco efeito sobre a dureza e resistência do aço, mas certas propriedades mecânicas, tais como ductilidade, resistência ao impacto e resistência à fadiga, são melhoradas [17]. Outros importantes efeitos nas propriedades podem ser citados, como: redução de área e alongamento, tenacidade na região da fratura dúctil e na região de transição dúctil-frágil, capacidade de receber polimento e resistência a corrosão. Além disto as inclusões são decisivas para definir a anisotropia destas propriedades como ilustrado na Figura 6.

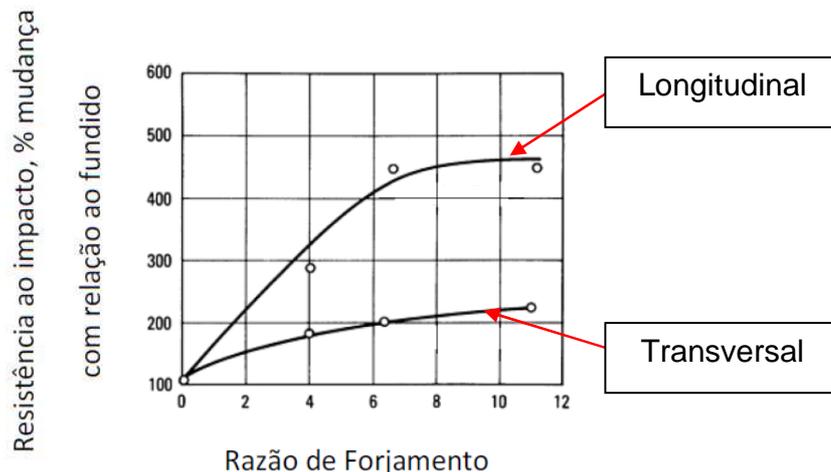


Figura 6 Efeito da redução no trabalho a quente na força de impacto de aço níquel-cromo tratado termicamente [Adaptado de 17]

Razão de Forjamento ou Taxa de Redução do Laminado é a relação da área da secção transversal inicial para a área da secção transversal final.

O efeito das inclusões não-metálicas sobre a propriedades relacionadas a fratura dúctil por exemplo, é bem caracterizada e dependente da fração de área da seção transversal a solicitação ocupada por estas partículas [3].

As inclusões de MnS alongadas possuem área efetiva diferente quando carregamento em eixos diferentes. Isto resulta na anisotropia de fadiga e propriedades mecânicas [14]. A anisotropia das propriedades mecânicas é maior na direção de trabalho longitudinal do que na direção transversal como ilustrado na Figura 7.

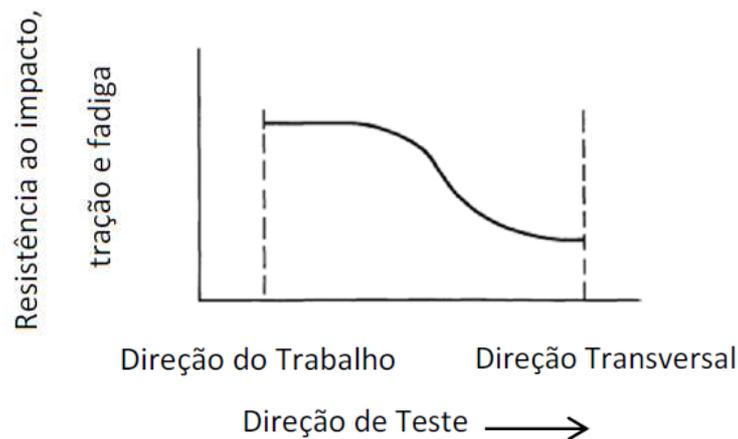


Figura 7 Anisotropia em aço forjado [Adaptado de 17]

O percentual de enxofre presente na composição química dos aços tem papel fundamental devido sua presença nas inclusões de sulfato de manganês (MnS). Cyril, Fatemi e Cryderman [14] compararam por fadiga, tração e impacto, o material SAE 4140 com três níveis de enxofre: alto (0,077%), baixo (0,012%) e ultra baixo (0,004%) e em duas durezas de 40 e 50 HRc, amostras com a orientação da fibragem disposta longitudinalmente e transversalmente. Nos testes orientados longitudinalmente na direção do carregamento as diferenças de enxofre não apresentaram qualquer alteração nos resultados de tração ou fadiga. No

entanto, no sentido de orientação das inclusões transversal, a tração indicaram ductilidade muito baixa do material de alto enxofre, assim as amostras falharam logo após escoar. Na fadiga material alto teor de enxofre teve uma resistência a fadiga 25% menor que ultra-baixo no carregamento transversal.

Temme em estudos para determinar o limite de fadiga em aços (0,004% e 0,042% S) relata redução do limite de fadiga na direção transversal em ambos os níveis. Entretanto com diferença 10x no percentual de enxofre, houve uma redução 38% na vida a fadiga com o aumento de enxofre [14].

Kage e Nisitani fizeram testes tensão-compressão, torção e fadiga rotacional com amostras variando a orientação da fibragem em 0°, 22,5°, 45°, 67,5° e 90° em relação ao sentido de laminação. Vid a a fadiga reduziu em 10,5% entre 0° e 90° [14].

Por definição, o coeficiente de anisotropia ou coeficiente de Lankford  $\bar{r}$  é a razão entre a deformação verdadeira na largura ( $\phi_b$ ) e na espessura ( $\phi_s$ ) de um corpo de prova de tração, após determinada deformação longitudinal pré-definida [9].

A medida da anisotropia é realizada através do ensaio de tração com a retirada de corpos de prova de três direções de uma chapa metálica por exemplo, na direção da laminação, a 45° e a 90° em relação à direção da laminação. Estes corpos de prova são tracionados dentro do limite de alongamento uniforme. Calcula-se o índice  $\bar{r}$  também chamado de anisotropia média, através da expressão abaixo para as três direções [19]:

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (1)$$

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{S_1}{S_0}} \quad (2)$$

Onde:

$b_0, S_0$  = largura e espessura iniciais do corpo de prova

$b_1, S_1$  = largura e espessura do corpo de prova após certa deformação plástica

Na prática é muito difícil de medir e registrar a alteração da espessura de um corpo de prova de uma chapa durante o ensaio de tração. Devido a isto a razão de deformação também é definida conforme a [20].

$$r = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_l + \varphi_b)} = \frac{\ln \frac{b_l}{b_0}}{\ln \frac{b_0 * l_0}{b_l * l_l}} \quad (3)$$

Onde:

$b_0, l_0$  = largura e comprimento iniciais do corpo de prova

$b_l, l_l$  = largura e comprimento do corpo de prova após certa deformação plástica

A partir desta podemos calcular a anisotropia planar conforme Equação 4.

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (4)$$

Um material isotrópico tem  $r = 1$ . Nos materiais para estampagem profunda um alto valor de  $r$  é desejado (maior resistência ao afinamento da chapa). Os valores de  $r$  em aços efervescetes variam entre 0,8 e 1,2. Em aços acalmados ao alumínio, adequadamente produzidos,  $r$  pode variar entre 1,5 e 1,8. Em alguns aços IF (*Interstitial free*)  $r$  pode ser tão alto quanto 2,2.

Na direção oposta, o cobre em aços inoxidáveis austeníticos pode originar  $r$  tão baixo quanto 0,1 [9].

Em análises no MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura, indicam uma topografia (após testes de fadiga) muito áspera e irregulares, indicando várias trincas provenientes da inclusões de MnS [14].

A fim de obter uma fibragem uniforme o metal deve ser capaz de fluir uniformemente na matriz durante o forjamento. Uma estrutura de fibras “perturbada” pode ocorrer quando as gravuras nas matrizes possuírem raios pequenos ou a partição são desfavoráveis, conforme ilustrado na Figura 8. Quando o raio da matriz é suficientemente grande, permite que o material flua uniformemente e continuamente, enchendo o molde completamente do fundo para o topo [21].

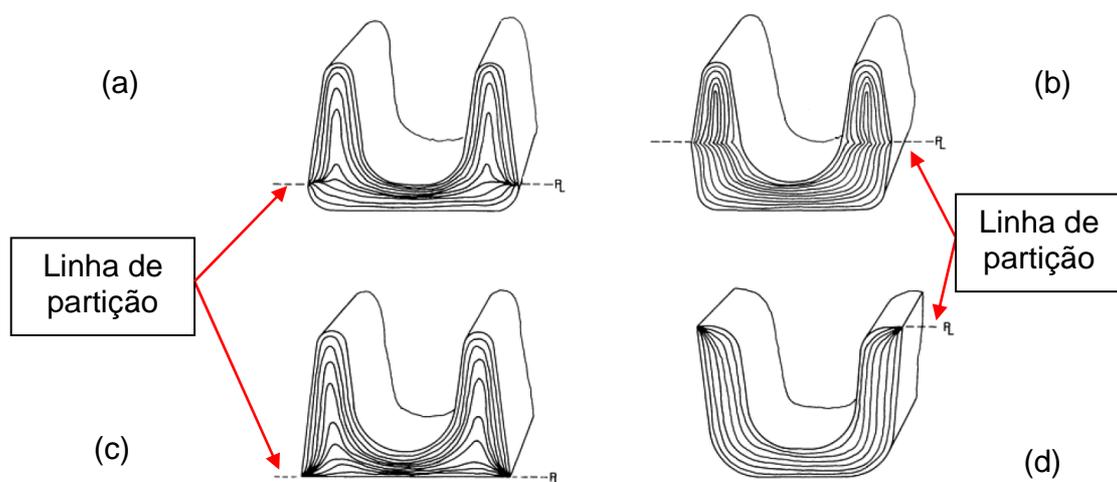


Figura 8 Efeito da fibragem com o local da partição do ferramental. (a) e (b) são partições não desejáveis devido o corte do fluxo de fibra. (c) e (d) são partições recomendadas no projeto de ferramentas [Adaptado 17]

Além do impacto nas propriedades mecânicas do componente o comportamento anisotrópico do material, tem um efeito muito significativo sobre a capacidade de estampagem profunda de chapas. Por isso a importância do seu

estudo para determinar a qualidade dos produtos obtidos neste processo de conformação [7].

Olt e Maksarov estudaram também a influência das propriedades anisotrópicas em chapas na fabricação de ferramentas de corte, onde estas propriedades possuem efeito de amortecimento de vibrações. Segundo eles a anisotropia das propriedades mecânicas provoca mudanças de velocidade de onda, trajetória de propagação e no coeficiente de dispersão [22].

Tratamento do aço com a adição de cálcio (Ca), pode endurecer a inclusão evitando sua deformação durante o trabalho mecânico. Em testes de fadiga demonstram que o material tratado com Ca tem seu comportamento melhorado, pois as inclusões de MnS são impedidas de deformar durante forjamento. Além disso com a redistribuição das inclusões há uma melhora nas propriedades mecânicas do material base [23].

O chumbo é utilizado em aço de alta resistência com finalidade de melhorar a usinabilidade do material com pequeno impacto nas propriedades mecânicas. Entretanto pelo apelo por proteção ambiental sua utilização está sendo eliminada. Opcionalmente pode-se utilizar o enxofre, pois o mesmo é bastante eficaz em facilitar a usinagem em contra ponto da sua adição em impactar nas propriedades mecânicas [24].

As empresas fornecedoras de componentes mecânicos possuem suas próprias especificações da orientação da fibragem, estas são especificadas através de cálculos estruturais, simulações através de método de elementos finitos, ensaios de bancadas e testes de campo. Desta forma um adequado *design* do componente forjado como ilustrado na Figura 9 se torna necessário, onde os carregamentos devem estar na direção das fibras de forjamento e a linha de partição das matrizes deve estar localizada de modo a minimizar a interrupção desta fibragem [17].

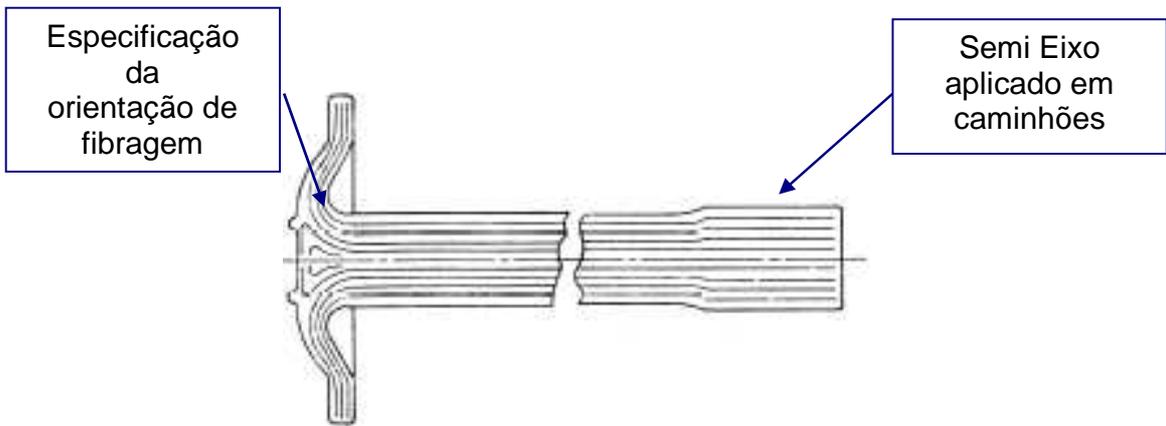


Figura 9 Exemplo de especificação de fibragem adotada pela indústria automotiva  
[Adaptado de 25. Norma na íntegra no Anexo A]

Como exemplo de aplicação e especificação da orientação da fibragem em componentes mecânicos, podemos citar virabrequins de motores a combustão, onde o local crítico ao qual os esforços atuantes tem grande impacto a vida a fadiga é na transição entre o munhão e a haste, conforme ilustrado na Figura 10 [26].

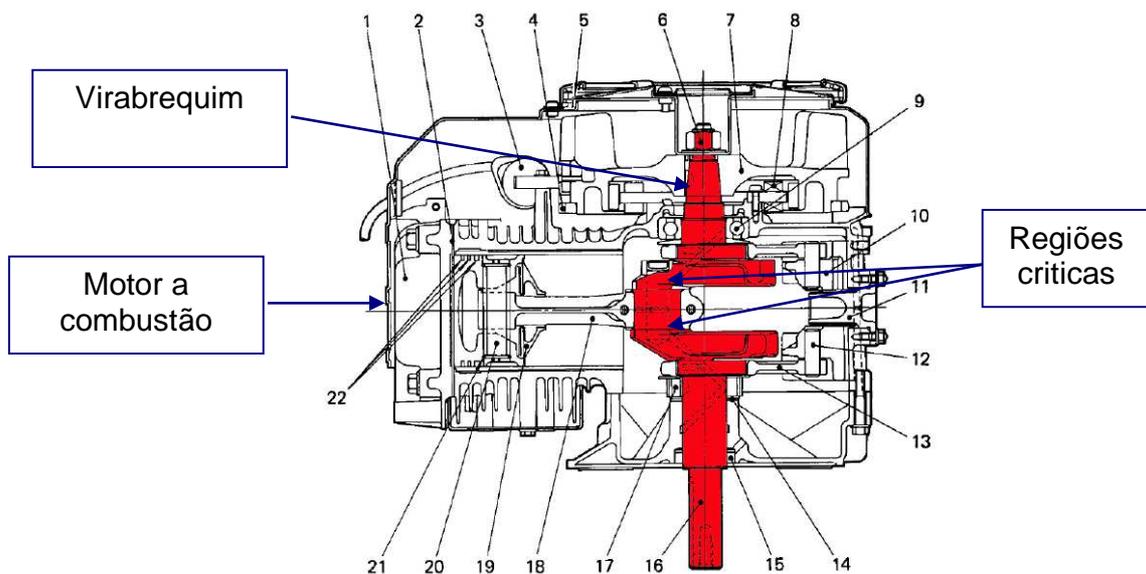


Figura 10 Motor a combustão com virabrequim [26]

Fornecedores de motosserras ou motocicletas por exemplo, especificam a orientação da fibragem em virabrequins de modo que a região crítica entre a transição do munhão e a haste, não permita ângulos superiores a 45°, pois o mesmo reduz a vida à fadiga. A Figura 11 ilustra esta especificação.

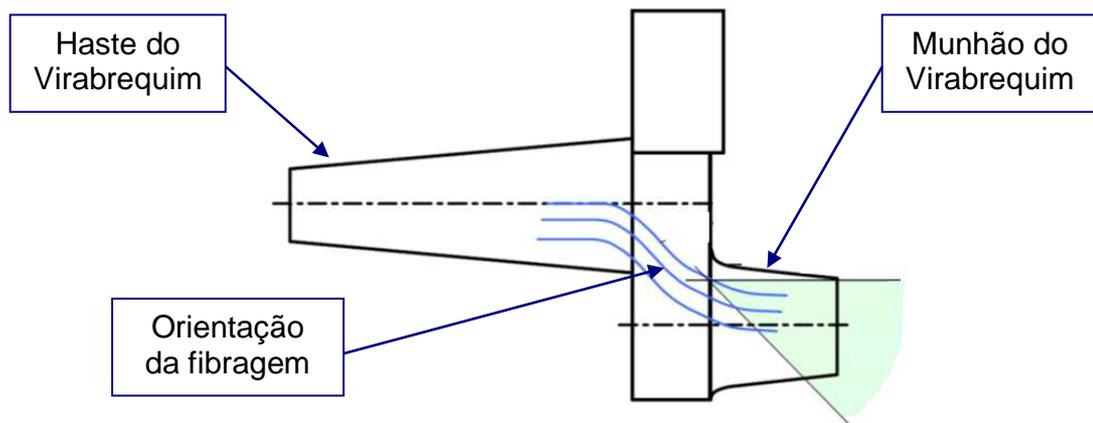


Figura 11 Especificação da orientação da fibragem em virabrequins de Motosserras  
[Adaptado de normas específicas de fornecedores de motosserra]

Williams e Fatemi compararam em testes de tração e fadiga virabrequins de motor a gasolina, fabricados em aço forjado e ferro fundido dúctil. Os resultados apresentam que os itens forjados possuem uma resistência a tração superior de 26% e sua vida a fadiga de 37% [26].

## **2.3 Ensaios Mecânicos**

### **2.3.1 Fadiga**

O termo fadiga foi utilizado primeiramente em 1838 por Poncelet na França, mas os primeiros estudos sobre o fenômeno datam de 1828 por Albert, na Alemanha, sobre falhas de um metal submetidos a solicitações repetidas [27]. O fenômeno já era de conhecimento prático na Europa no século XIX com a expansão da utilização de metais, pois havia uma série de casos e relatos de componentes e trilhos de trens que trincavam quando submetidos a cargas cíclicas, mesmo com tensões inferiores a tensão de ruptura do material. Outro fator que intrigava era que os componentes antes da entrada em serviço revelarem adequada ductilidade, a ruptura em serviço não apresentava sinais de apreciável deformação plástica.

O fenômeno de fadiga é causa raiz de 90% das falhas mecânicas de componentes em serviço [28]. Desta forma e de suma importância o estudo de práticas para evitar ou diminuir suas consequências em componentes, assim aumentando a sua vida útil e reduzindo custos de manutenção, além de buscar componentes e estruturas mais seguras e confiáveis.

O fenômeno de fadiga é caracterizado como o processo de alteração estrutural permanente, localizada e progressiva que ocorre em um material submetido a condições que produzem tensões e deformações flutuantes em algum ponto ou pontos do material e que podem culminar em trincas ou fratura completa após um número de flutuações suficientes [29].

Cronologicamente os conceitos e pesquisas sobre fadiga podem ser citados: Rankine (1843) trabalhos em concentração de tensão, Hodgkinson (1849) projeto contra fadiga, Wohler (1860) investigação sistemática em fadiga, Bauschinger (1868) efeito no limite elástico cíclico, Wohler (1870) limite de

resistência a fadiga, Goodman (1890) efeito das tensões médias, Ewing e Humfrey (1903) mecanismos de fadiga microscópica, Basquin (1910) curva log-log para relação  $\sigma-N$ , Griffith (1920) mecânica da fratura, Palmgren (1924) dano acumulado, Miner (1945) dano acumulado, Coffin e Manson (1954) deformação plástica, Paris (1961) crescimento da trinca, Peterson (1963) método de deformação-vida, Matsuishi e Endo (1967) contagem de ciclos, Elber (1970) mecânica de fechamento de trinca, Wirsching (1980), Dirlik (1985), Chaudhury e Dover (1985), Tunna (1986), Kam e Dover (1988), Hancock (1988), Bishop (1999), Steinberg (2000) e Petrucci e Zuccarello (2004) com modelo de estimativa de vida no domínio da frequência [30].

Entre os pesquisadores citados acima, devemos destacar Wohler como o mais importante, principalmente devido seus resultados e métodos serem empregados até hoje. Em suas pesquisas em corpos de prova lisos não entalhados e isentos de trincas pré-existentes, notou que estas fraturas iniciavam normalmente junto a uma mudança de seção, na vizinhança de entalhes ou qualquer descontinuidade do material, assim concluindo que existia um valor mínimo da amplitude de tensão abaixo da qual o corpo de prova não rompia, independente do número de ciclos de carga aplicados [31].

A aparência da fratura por fadiga é semelhante a fratura frágil como exemplificado na Figura 12, uma vez que as superfícies são planas e perpendiculares ao eixo de tensão, com ausência de estrição, entretanto as características são bem diferentes devido aos três estágios de desenvolvimento descritos abaixo e ilustrados na Figura 13 [32]:

a) Nucleação de trincas superficiais - O primeiro estágio é o que abrange o período de nucleação da falha, onde a iniciação ocorre devido à máxima tensão principal de cisalhamento a  $45^\circ$  com a tensão principal de tração aplicada. Neste estágio podem surgir uma ou várias microtrincas causadas

por deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica. Estas trincas do estágio inicial não são discerníveis a olho nu.

b) Propagação da trinca até a falha do componente - O segundo estágio compreende a propagação de uma trinca, na direção ortogonal a tensão de tração. Neste estágio há a evolução de microtrincas para macrotrincas, formando a superfícies de fratura com platôs paralelos e separados por sulcos paralelos. Estes são geralmente lisos e ortogonais a direção da tensão de tração máxima e comumente conhecida como marcas de praia.

c) Fratura final - Finalmente ocorre a ruptura catastrófica, que é o terceiro estágio, no momento em que a seção resistente diminui o suficiente para que não mais suporte um ciclo de carga e rompa por sobrecarga. Fase que depende basicamente de características da ponta da trinca e a falha pode ser dúctil, frágil ou a combinação das duas.



Figura 12 Fadiga em barra de sistema de levante de trator após ensaio de fadiga

[33]

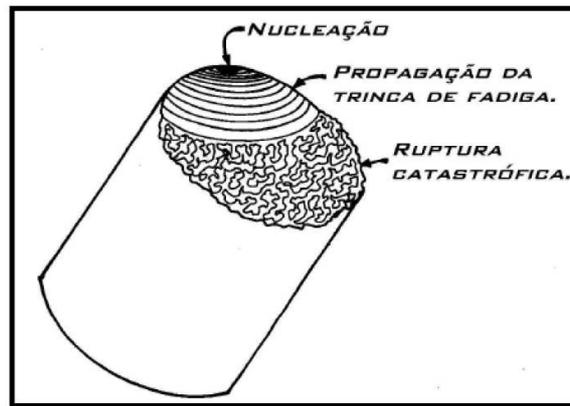


Figura 13 Três estágios de desenvolvimento da falha por fadiga [32]

A falha por fadiga inicia-se devido à formação de uma trinca e conseqüentemente a sua propagação, contudo esta trinca terá início numa descontinuidade no material quando submetida a uma tensão cíclica máxima. Estas descontinuidades podem ter as seguintes origens [32]:

- a) zonas com concentradores de tensões, como furos, chavetas, mudanças rápidas na secção transversal;
- b) regiões submetidas a altas pressões de contato, desenvolvendo tensões subsuperficiais concentradas;
- c) acabamento superficial grosseiro, como marcas de ferramentas, risco e rebarbas;
- d) projeto inadequado de juntas soldadas ou montagens inadequadas;
- e) processos de fabricação como laminação, forjamento, fundição, estiramento, tratamento térmicos que podem provocar descontinuidades no material, microscopicamente ou macroscopicamente, tais como inclusões, vazios, segregações, partículas duras precipitadas e descontinuidade cristalinas.

Existem três métodos utilizados em projetos de componentes para avaliação da vida à fadiga: *método da vida sob tensão*, o *método da vida sob deformação* e *da mecânica de fratura linear elástica*. Estes métodos tentam determinar a vida à fadiga, baseado em número de ciclos até a falha ( $N$ ), para um determinado nível de carregamento. Também são classificados como *fadiga de baixo ciclo*, para  $1 \leq N \leq 10^3$  ciclos e *alto ciclo*,  $N > 10^3$  ciclos [31].

a) Método da Vida sob Tensão: Este método é o menos preciso principalmente se adotado para baixo ciclo. Engloba situações nas quais o componente sofre uma tensão nominal que é menor que a tensão de escoamento do seu material. Convencionou-se, para o emprego desse tipo de modelo, que a vida do componente é superior a  $10^3$  ou  $10^4$  ciclos. As curvas  $S-N$  (tensão em função do número de ciclos até a fratura) são as curvas características mais importantes para esse modelo. O dispositivo de ensaio mais amplamente utilizado é a máquina de viga rotativa ou flexão rotativa, onde para estabelecer resistência à fadiga, adota-se um corpo de prova devidamente polido sujeito a flexão pura como ilustrado na Figura 14 [34, 35]. A Figura 15 exemplifica o diagrama  $S-N$  obtido através deste método.

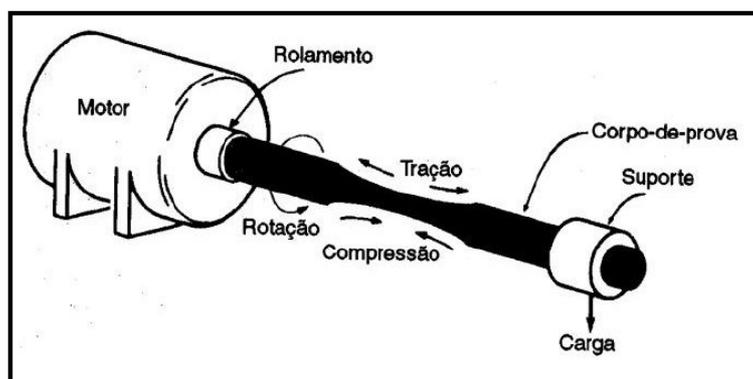


Figura 14 Dispositivo de ensaio de fadiga rotativa [35]

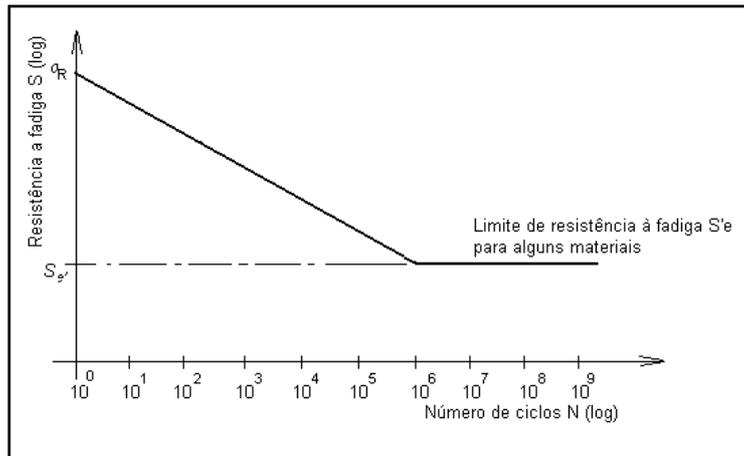


Figura 15 Diagrama S-N [36]

- b) Método da Vida sob Deformação: Neste método a fadiga é controlada por deformações cíclicas. Nesse caso, a tensão nominal aplicada no componente é maior que a tensão de escoamento do material e a vida desse componente é menor que  $10^3$  ou  $10^4$  ciclos. As curvas características dessa abordagem são as curvas de deformação em função do número de ciclos até a fratura, também chamadas de curvas  $\epsilon$ -N ilustrado na Figura 16. Espécimes de ensaio sujeitos a flexão inversa não são apropriados para deformação cíclica devido a dificuldade de medir deformações plásticas. Através de transdutores elétricos é possível gerar sinais proporcionais a tensão e a deformação respectivamente, assim traçar as curvas  $\epsilon$ -N por intermédio de osciloscópios [32].

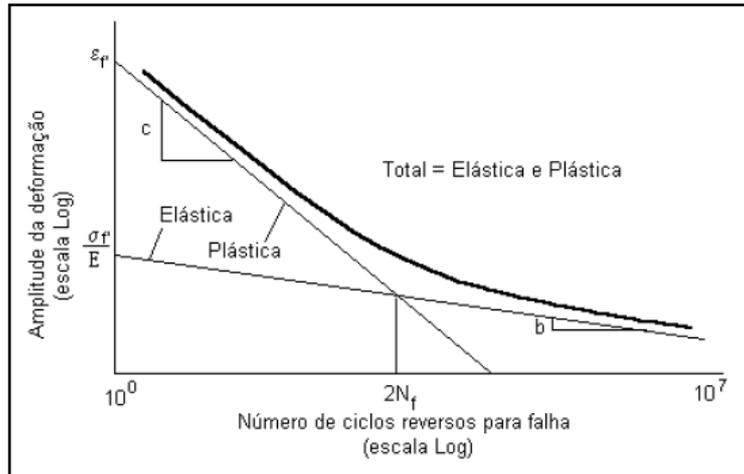


Figura 16 Diagrama  $\epsilon$ - $N$  [36]

- c) Método da Mecânica da Fratura Linear Elástica: Este método é baseado na teoria da mecânica de fratura, que trata do crescimento de trincas. A curva característica é a taxa de propagação da trinca por fadiga em função da variação do fator de intensidade de tensão. Essa abordagem, empregada em especial para materiais frágeis, permite o acompanhamento da vida em serviço de um componente, prevendo se uma trinca em um determinado estágio pode ou não levar a uma falha catastrófica. Este método comparado aos demais é o mais moderno, pois permite que se estime a vida de um componente mesmo que previamente trincado. O desenvolvimento deste método teve grande participação de Paris (1961) pela qual da nome a esta lei [32].

### 2.3.2 Determinação Teórica da Vida a Fadiga

Determinar os limites de resistência a fadiga por meio de ensaios de fadiga se tornou rotineiro, embora sejam ensaios longos. No entanto, algumas vezes é necessário um método rápido de estimar o limite de resistência à fadiga para um determinado componente na fase de projetos preliminares e de protótipos [32].

Em experimentos após uma grande quantidade de amostras, concluiu-se que o limite de resistência fadiga pode ser relacionado com a resistência à tração em aços conforme Equação 5 [37].

$$S'_e = 0,504.S_{ut} \text{ quando } S_{ut} \leq 1460 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$S'_e = 740 \text{ MPa quando } S_{ut} > 1460 \text{ MPa}$$

Na qual,  $S'_e$  é o limite de resistência à fadiga para corpos-de-prova submetidos ao ensaio de viga rotativa e  $S_{ut}$  é o limite de resistência à tração. No entanto, quando se conhece a microestrutura do material, é possível obter um resultado mais aproximado a partir das relações de  $S'_e/S_{ut}$  tabelados [32].

Para uma tensão invertida  $\sigma_a$  o número de ciclos  $N$  até a falha pode ser expresso conforme a Equação 6 [32]:

$$N = \left( \frac{\sigma_a}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (6)$$

Onde  $a$  e  $b$  são constantes e determinadas pelas Equações 7 e 8.

$$a = \frac{(f.S_{ut})^2}{S_e} \quad (7)$$

$$b = -\frac{\log\left(\frac{\sigma'_f}{S_e}\right)}{\log(2.N_e)} \quad (8)$$

Para cálculo das constantes, se faz necessário determinar a fração  $f$  e a tensão corrigida  $\sigma'_f$  conforme Equações 9 e 10:

$$f = \frac{\sigma'_f}{S_{ut}} (2 \cdot 10^3)^b \quad (9)$$

$$\sigma'_f = S_{ut} + 345 \text{MPa}, \text{ para aços com dureza HB} \leq 200 \quad (10)$$

Para que haja fadiga de um componente é necessária a presença de um carregamento cíclico ou variável com o tempo. A tensão estática aplicada equivale à tensão média, simbolizada por  $\sigma_m$ . A amplitude de tensão será simbolizada como  $\sigma_a$ , sendo  $\sigma_a$  a amplitude de tensão cíclica que provoca ruptura por fadiga. As tensões máxima e mínima são simbolizadas por  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ , respectivamente, como ilustra a Figura 17.

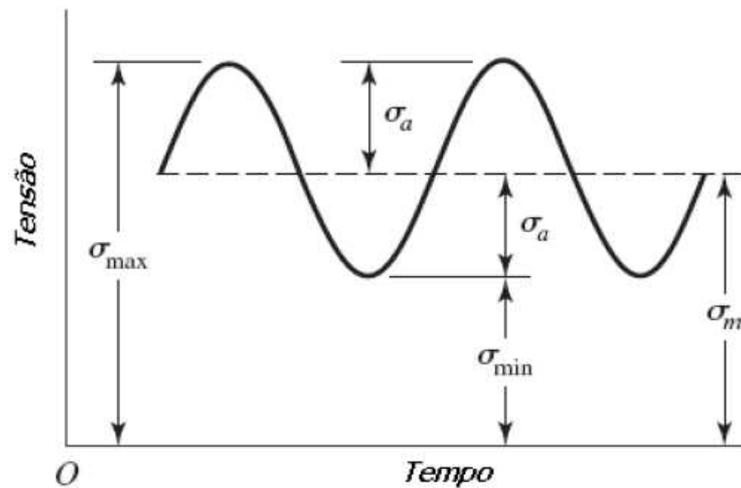


Figura 17 Exemplo de uma tensão senoidal flutuante [Adaptado de 32]

### 2.3.2.1 Fatores Modificadores

Os corpos de prova utilizados nos ensaios viga rotativa para determinar o limite de resistência são construídos com todo cuidado e ensaiados sob condições controladas. Entretanto é irrealista esperar que os valores obtidos em componentes mecânicos ou estruturais sejam idênticos aos obtidos em laboratório. Isto se deve pelas variáveis encontradas nos materiais, na composição, na manufatura, meio ambiente e projeto [32].

A partir desta colocação, Martin (apud SHIGLEY, J E. [32]) identificou fatores que qualificam os efeitos destas variáveis, que irão ajustar os valores do limite de resistência através de uma correção conforme Equação 11 [32].

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e \quad (11)$$

Onde,

$K_a$  = fator de modificação de condição de superfície

$K_b$  = fator de modificação de tamanho

$K_c$  = fator de modificação de carga

$K_d$  = fator de modificação de temperatura

$K_e$  = fator de confiabilidade

$K_f$  = fator de modificação por efeitos variados

$S'_e$  = limite de resistência de espécime de teste do tipo viga rotativa

$S_e$  = limite de resistência no local crítico de uma peça na geometria e na condição de uso.

O corpo de prova do ensaio de viga rotativa é polido na direção axial, sem riscos de polimento principalmente na direção circunferencial. O fator de

modificação da condição superficial ( $K_a$ ) depende da condição superficial do componente e deve ser calculado de acordo com a Equação 12 [32].

$$K_a = aS_{ut}^b \quad (12)$$

Na qual  $S_{ut}$  é a resistência a tração mínima,  $a$  e  $b$  são encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros do fator de modificação da condição superficial  $K_a$  [32]

Acabamento superficial	Coefficiente $a$ (para $S_{ut}$ em MPa)	Expoente $b$
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou trefilado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

O modelo atualmente proposto para o fator de modificação do tamanho ( $K_b$ ) em caso de solicitação em flexão e torção, pode ser expresso pela Equação 13 [32].

$$K_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} = 1,64.d^{-0,107} \quad 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \quad (13)$$

$$K_b = 1,51.d^{-0,157} \quad 51 \leq d \leq 254 \text{ mm} \quad (14)$$

Onde,  $d$  é o diâmetro do corpo de prova.

Para carregamento axial este efeito é desprezível, deste modo  $K_b = 1$

Os valores médios do fator de modificação do tipo de carregamento ( $K_c$ ) podem ser determinados de acordo com a Equação 15 [32].

$$K_c = 1 \quad \text{flexão} \quad (15)$$

$$K_c = 0,85 \quad \text{axial}$$

$$K_c = 0,59 \quad \text{torção}$$

A temperatura exerce grande influência no comportamento mecânico do aço. A grande maioria dos aços estruturais torna-se frágil em baixas temperaturas (abaixo da temperatura de transição), o que pode representar um sério problema. Em temperaturas altas (acima da ambiente) há diminuição da resistência mecânica e da resistência à corrosão e quanto maior a temperatura maior a diminuição. Além disso, em altas temperaturas podem ocorrer fenômenos metalúrgicos, como a fragilização do revenido, que podem comprometer a utilização da peça. Além do que foi anteriormente dito, quando o componente estrutural é utilizado acima da temperatura ambiente deve-se também considerar a sua influência no limite de fadiga [32].

O fator de modificação da temperatura ( $K_d$ ) é obtido por meio da Equação 16.

$$K_d = 0,975 + 0,432(10^{-3})T_f - 0,115(10^{-5})T_f^2 + 0,104(10^{-8})T_f^3 - 0,595(10^{-12})T_f^4 \quad (16)$$

Onde,  $70 \leq T_f \leq 1000^\circ\text{F}$

O fator de confiabilidade ( $K_e$ ) é de suma importância devido à dispersão dos resultados. Dados apresentados por Haugen e Wirching mostraram que o

desvio padrão associado ao limite de fadiga de aços é da ordem de 8% [32]. Desta forma o fator de confiabilidade ( $K_e$ ) pode ser obtido diretamente da Tabela 2.

O fator de modificação de efeitos diversos ( $K_f$ ) deve levar em consideração todos os outros fatores que influenciam a fadiga, tais como os aspectos metalúrgicos associados com fadiga, e que não foram considerados nos fatores anteriormente analisados. Assim, a presença de tensões residuais (decorrentes, por exemplo, do jateamento de granalhas de aço, etc.), a presença de uma camada eletrodepositada na superfície do componente estrutural, a possibilidade de corrosão, a frequência (quando esta influenciar a fadiga, como no caso da corrosão), entre outros [32].

Tabela 2 Fatores de Confiabilidade ( $K_e$ ) [31]

Confiabilidade (%)	Fator de Confiabilidade $K_e$
50	1,000
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659
99,9999	0,620

### 2.3.2.2 Concentrador de Tensão e Sensibilidade ao Entalhe

Conforme já descrito o material possui um série de irregularidades ou descontinuidades, tais com furos, reentrâncias ou entalhes e isto causa um aumento das tensões teóricas na vizinhança da descontinuidade. Devido a isto se definiu um fator de concentração de tensão  $K_t$ , que é utilizado com a tensão

nominal para obter a tensão máxima resultante. Esta tensão é descrita na Equação 17 [32].

$$\sigma_{\max} = K_f \sigma_0 \quad (17)$$

Onde,  $K_f$  é o valor reduzido de  $K_t$  e  $\sigma_0$  é a tensão nominal.

Para cálculo do  $K_f$ , utiliza-se a equação de Neuber conforme descreve a Equação 18:

$$K_f = \frac{K_t}{1 + \frac{2(K_t - 1) \sqrt{a}}{K_t \sqrt{r}}} \quad (18)$$

Onde,  $\sqrt{a}$  - Parâmetro de Heywood para aços, determinado Tabela 3 e  $r$  é o raio do corpo de prova.

Tabela 3 Parâmetro de Heywood para aços [32]

Atributo	$\sqrt{a}$ ( $\sqrt{mm}$ ), $S_{ut}$ (MPa)
Furo Transversal	174/ $S_{ut}$
Ombro	139/ $S_{ut}$
Fenda	104/ $S_{ut}$

Para determinar  $K_t$  utiliza-se o gráfico ilustrado na Figura 18:

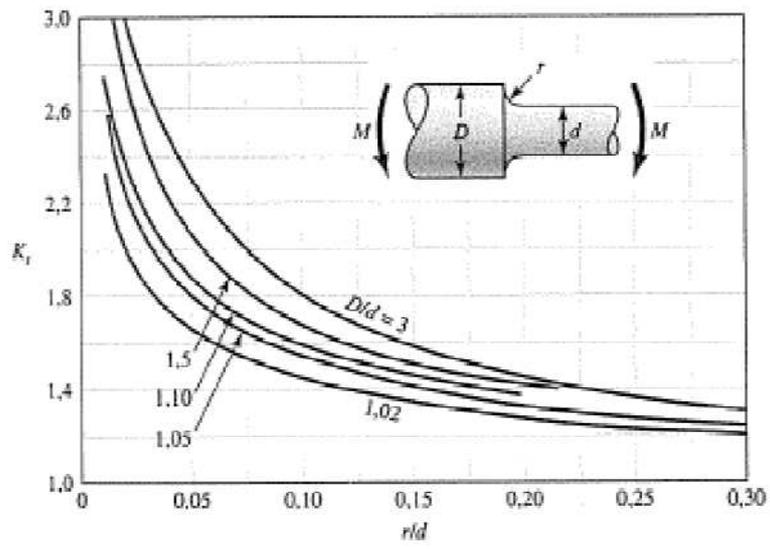


Figura 18 Determinação do fator  $K_t$  para eixo redondo com filetagem [32]

### 3. Procedimento Experimental

Com a finalidade de verificar quantitativamente a influência da fibragem na vida a fadiga e o seu impacto sobre a propriedade anisotrópica de um componente mecânico foi desenvolvido o experimento deste trabalho. Para tal, foram confeccionados corpos de prova em aço que tiveram sua orientação de fibras orientadas por usinagem e forjamento a quente e na sequência foram submetidas a ensaios de fadiga flexo rotacional em equipamento próprio para determinar sua vida a fadiga.

Corpos de prova foram desenvolvidos em três configurações de fibragem diferentes. Estas três configurações de fibragem são diferenciadas em:

- a) Configuração A (Figura 19)- simula um componente forjado com sua orientação adequada, pois seu fibramento esta disposto ao sentido longitudinal do corpo de prova, isto é a  $0^\circ$  do sentido de laminação;
- b) Configuração B (Figura 20) – simula um componente forjado com sua orientação não adequada, pois seu fibramento esta disposto ao sentido transversal do corpo de prova, isto é a  $90^\circ$  do sentido de laminação;
- c) Configuração C (Figura 21) - simula um componente não forjado que foi usinado direto de barra, desta forma suas fibras oriundas da laminação estão no sentido longitudinal, isto é a  $0^\circ$  do sentido de laminação mas cortadas.

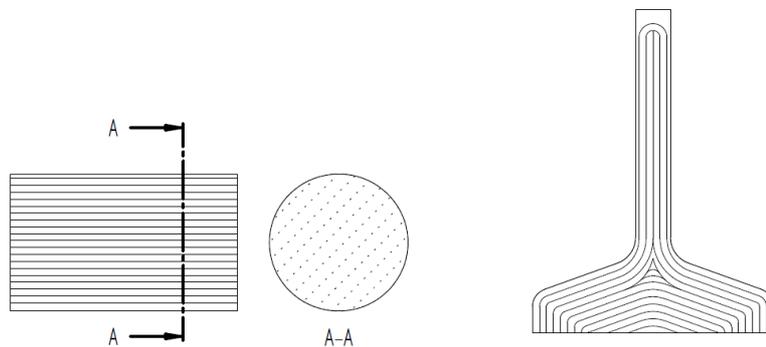


Figura 19 Configuração A (À esquerda *blank* com direção da fibragem longitudinal e à direita corpo de prova com fibragem resultante)

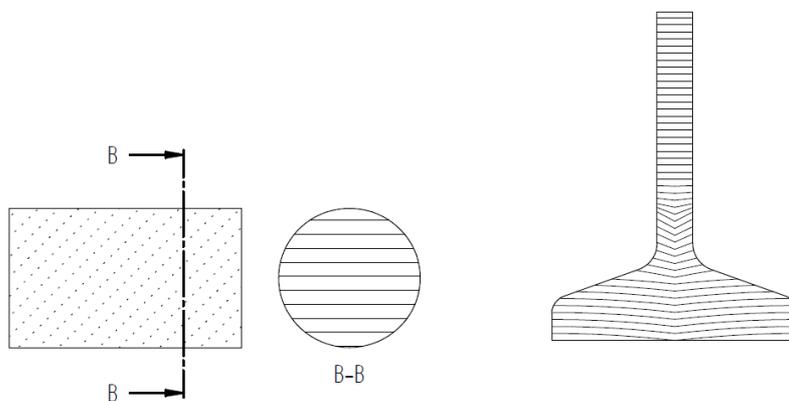


Figura 20 Configuração B (À esquerda *blank* usinado com direção da fibragem transversal e à direita corpo de prova com fibragem resultante)

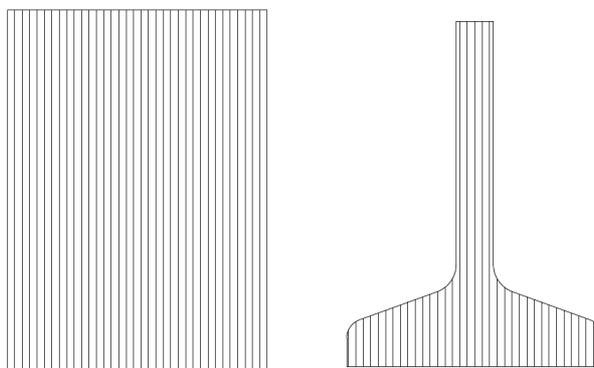


Figura 21 Configuração C (À esquerda *blank* com direção da fibragem longitudinal e à direita corpo de prova com fibragem resultante)

Os corpos de prova foram produzidos com o material SAE 1045 com diâmetros de  $\varnothing$  39,69 e  $\varnothing$  69,85 conforme fluxo de fabricação indicado na Tabela 4 e composição química na Tabela 5.

Tabela 4 Fluxo de Operações para fabricação dos corpos de prova

Configuração	Fluxo das Operações			
	Corte dos Blanks	Usinagem dos Blanks	Forjamento dos CPs	Usinagem dos CPs
A	X ( $\varnothing$ 39,69)	-	X ( $\varnothing$ 39,69)	X
B	X ( $\varnothing$ 69,85)	X ( $\varnothing$ 39,69)	X ( $\varnothing$ 39,69)	X
C	X ( $\varnothing$ 69,85)	-	-	X

Tabela 5 Composição química do aço testado (Valores em %)

SAE 1045H	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
	0,46	0,25	0,83	0,023	0,021	0,11	0,01	0,01	0,025	0,01

As inclusões foram classificadas conforme ASTM E45 [10] : 2 AF, 0,5 AG e 1 DF.

### 3.1 Processo de Fabricação dos Corpos de Prova

Para atingir a orientação da fibragem desejada nos corpos de prova, partiu-se para confecção dos mesmos conforme as três configurações descritas na sequência:

Configuração A – Para a fabricação dos corpos de prova desta configuração foi utilizado o material de  $\varnothing$  39,69 por 65mm de comprimento, onde o mesmo foi forjado a quente e posteriormente usinado para atingir a geometria final, como ilustrado no fluxo abaixo.



Configuração B - Para a fabricação dos corpos de prova desta configuração foi utilizado o material  $\varnothing$  69,85 por 110mm de comprimento. Este foi usinado transversalmente ao sentido da fibragem original da barra conforme ilustrado na Figura 22, conferindo ao material o diâmetro de  $\varnothing$  39,69. Na Figura 23 demonstra a usinagem do blank durante o processo de fresamento. Na sequência o corpo de prova foi forjado a quente e posteriormente usinado para atingir a geometria final, como ilustrado no fluxo abaixo.



Configuração C – Para esta configuração foi utilizado material de  $\varnothing$  69,85 e usinado na geometria final do corpo de prova, como ilustrado no fluxo abaixo.



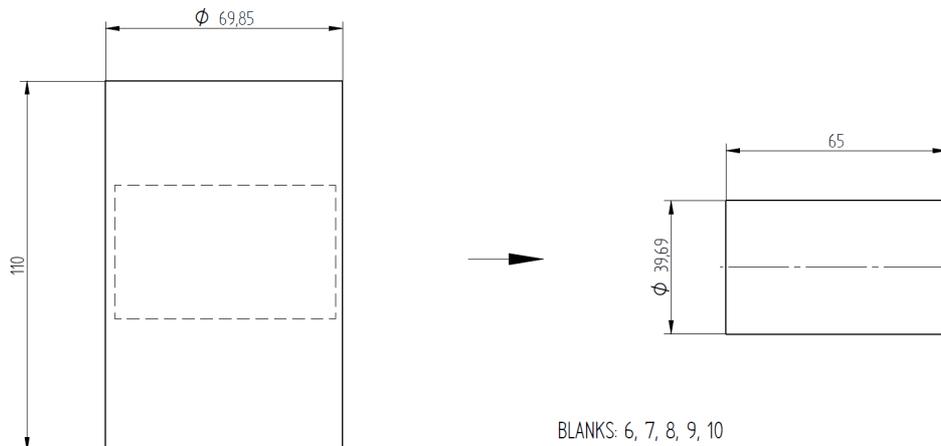


Figura 22 Desenho esquemático da retirada do blank para forjamento

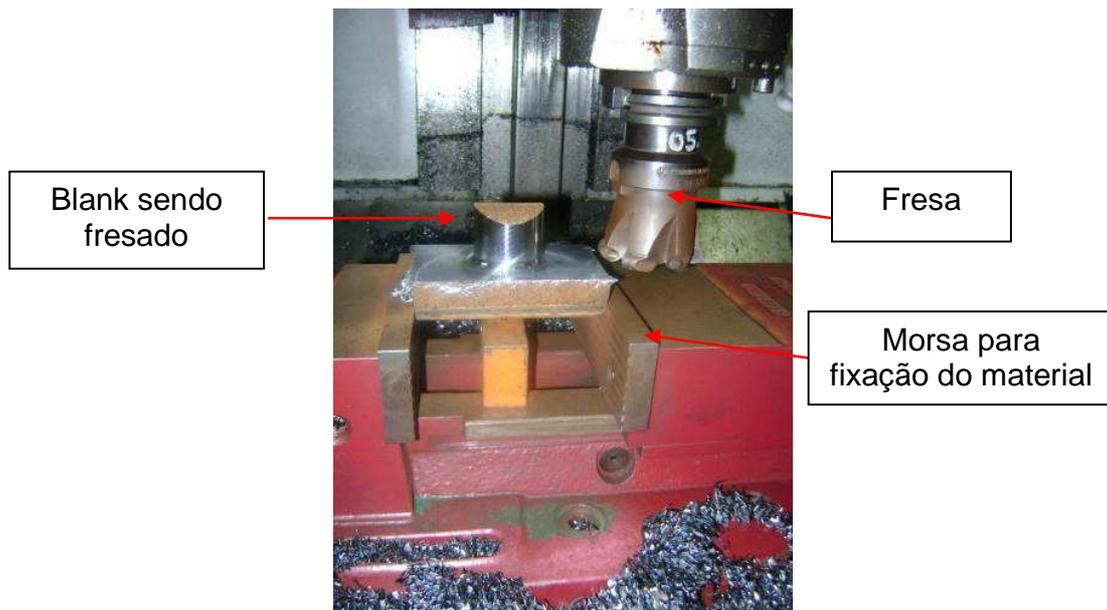


Figura 23 Processo de usinagem do blank

As Figura 24 e Figura 25 demonstram o posicionamento do blank no ferramental, o fluxo do material preenchendo a ferramenta e a orientação da fibragem pretendida. Tais imagens foram obtidas através de simulação do processo de forjamento no software QFORM<sup>®</sup> com os dados da Tabela 6. Esta

simulação foi utilizada unicamente para conferir se a quantidade de material era adequada ao forjamento real e a fibragem esperada para o corpo de prova.

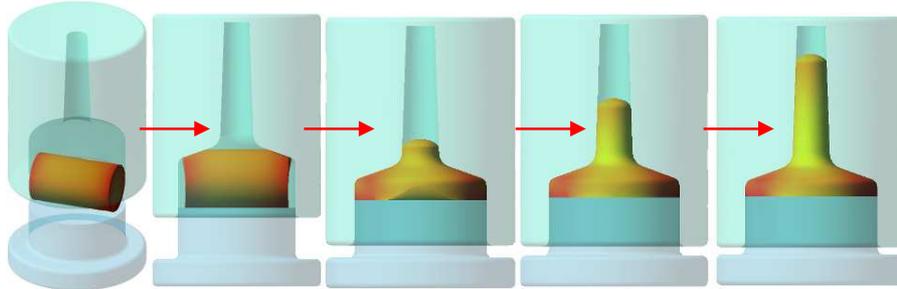


Figura 24 Sequência do processo de forjamento simulado no QForm® [33]

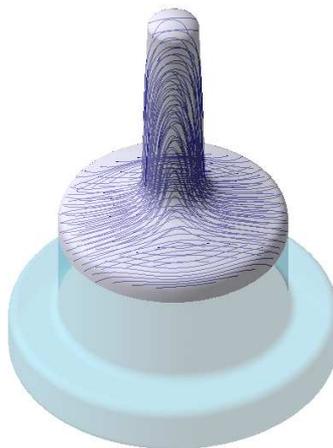


Figura 25 Fibragem simulada no QForm® [33]

Tabela 6 Dados de entrada para simulação do forjamento no QForm®

	Dados de Entrada
Material	SAE 1045
Coeficiente de Atrito	0,35
Temperatura de Aquecimento	1200 °C
Tempo de Resfriamento ao Ar	3 segundos
Tempo de Contato com Matriz	5 segundos
Equipamento	Prensa Mecânica - 10 MN

O processo de forjamento típico de extrusão foi processado numa prensa mecânica, onde primeiramente os blanks foram aquecidos em forno indutivo entre 1150/ 1200°C, conforme Figura 26 e na sequência foram forjados em uma prensa mecânica de 9800 kN, como ilustrado na Figura 27 e na Figura 28, numa ferramenta confeccionada com material AISI H13 previamente aquecido entre 200/ 250°C. Na Figura 29, é observado o desenho da disposição do ferramental de forja.

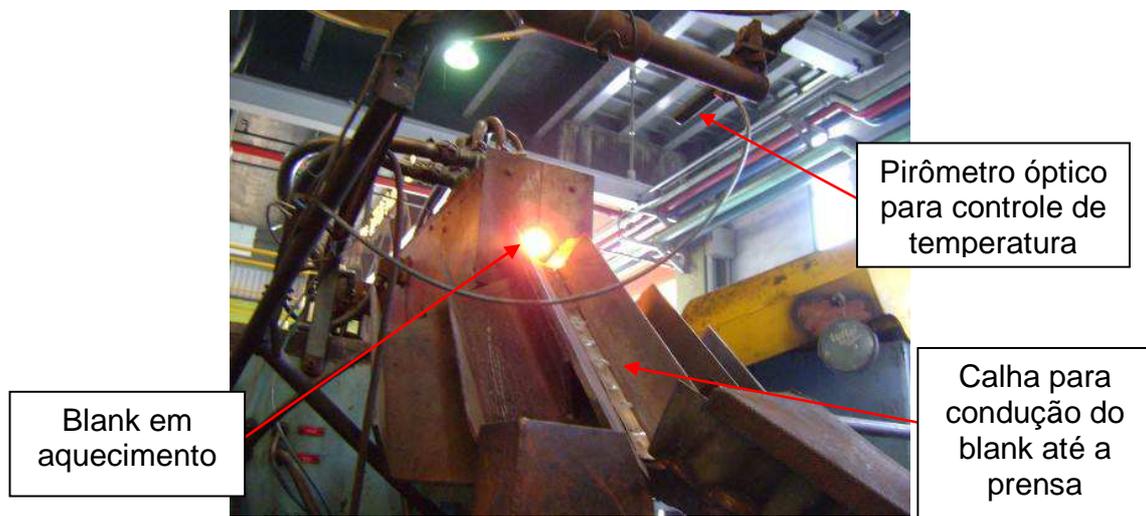


Figura 26 Forno de Aquecimento dos Blanks

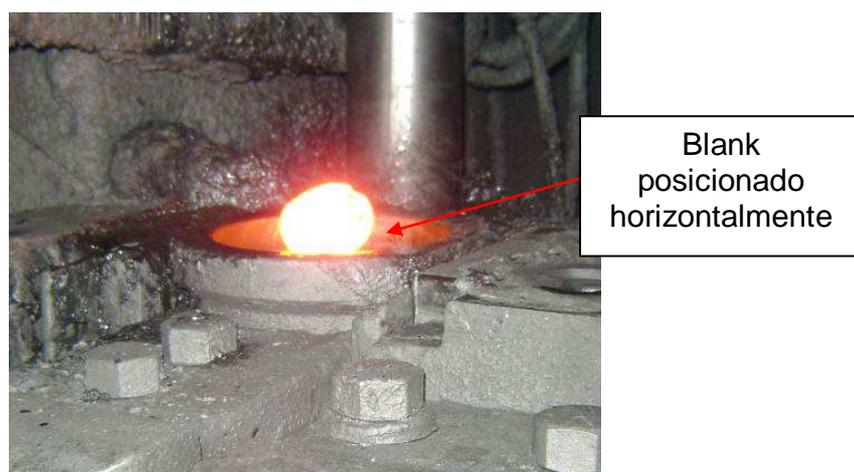


Figura 27 Blank posicionado para forjamento

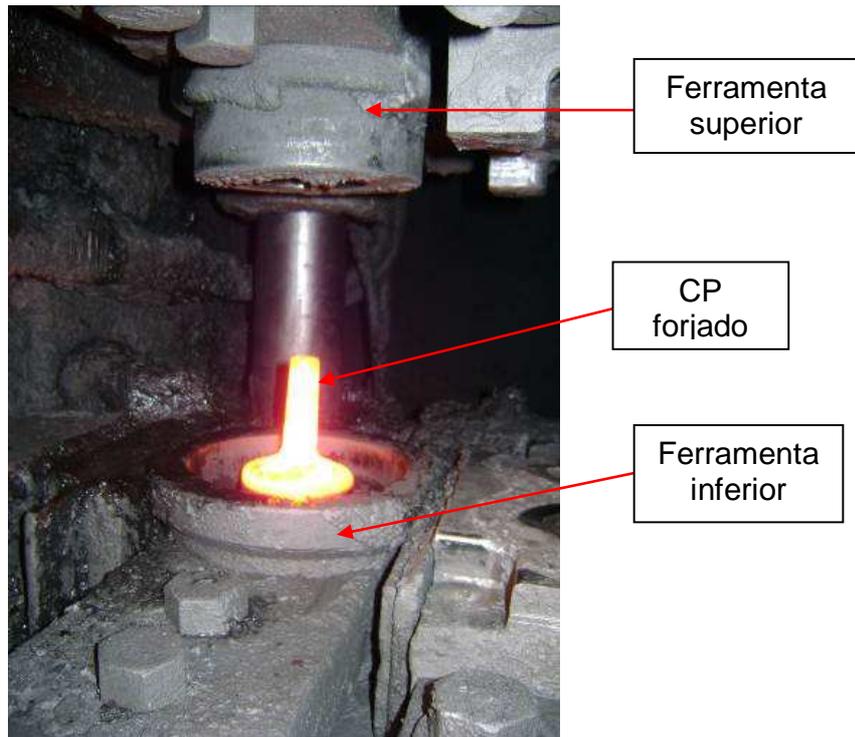


Figura 28 Amostra após forjamento

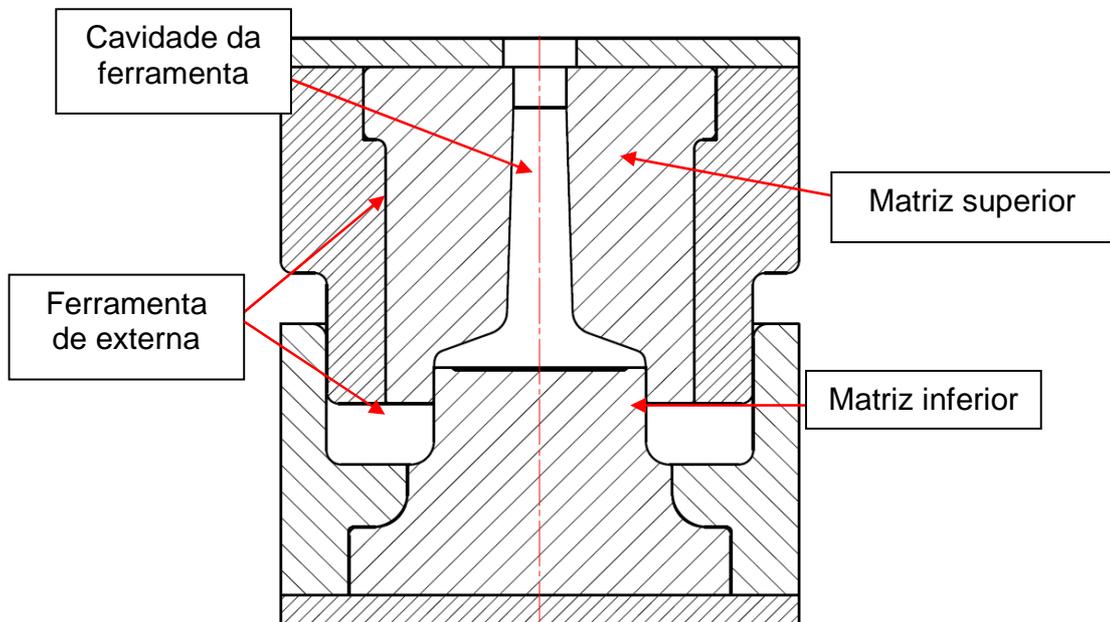


Figura 29 Desenho da Ferramenta de Forja

Na Figura 30, demonstra o desenho do corpo de prova com a geometria após a operação de forjamento. As tolerâncias aplicadas foram determinadas conforme DIN EN 10243 [38].

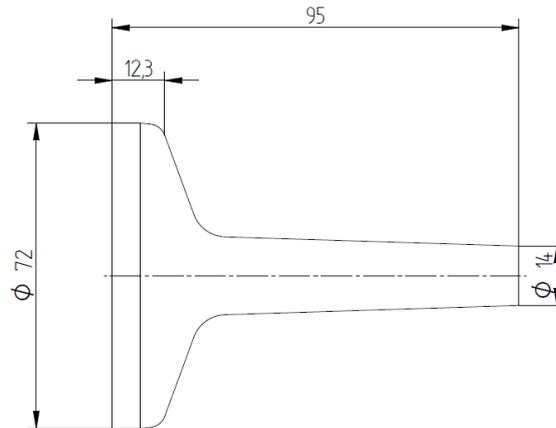


Figura 30 Desenho do CPs forjados

Finalizando o processo de fabricação dos corpos de prova, os mesmos foram usinados em um torno CNC, a fim de garantir a repetibilidade dimensional entre os corpos de prova, como ilustrado na Figura 31. No próprio torno os corpos de prova já torneados foram polidos na região do raio de transição do flange com a haste para a rugosidade não interferir nos resultados do ensaio de fadiga. Na sequência os corpos de prova foram furados na região do flange numa furadeira para posterior fixação no equipamento de ensaio de fadiga, como ilustra Figura 32 do desenho. As tolerâncias aplicadas para corpos de prova usinados foram determinadas conforme ISO 2768 [39].

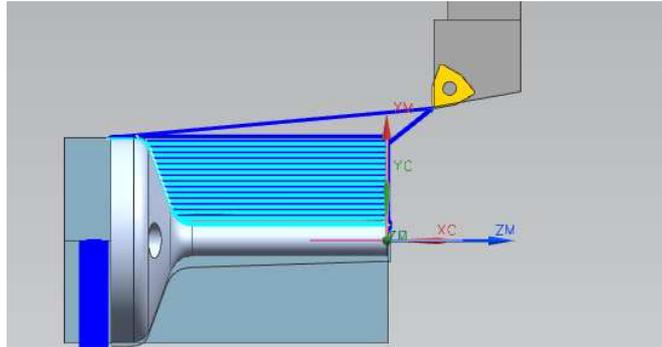


Figura 31 Programa de CAM para torneamento dos corpos de prova

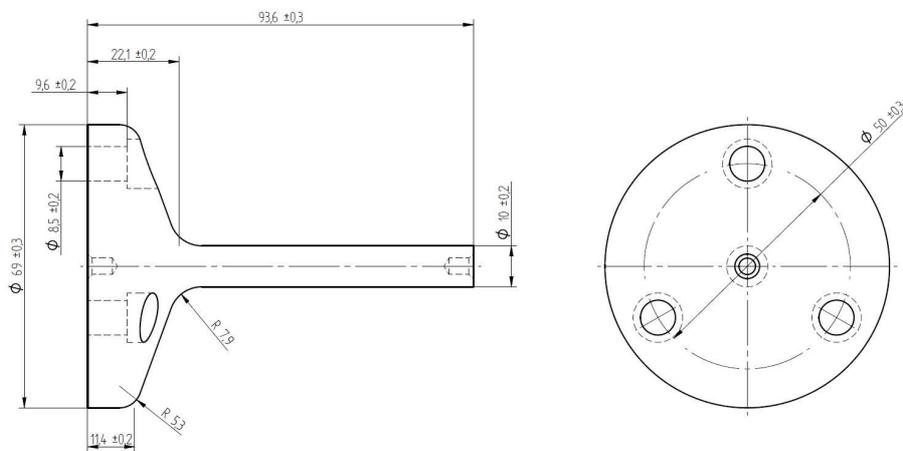


Figura 32 Desenho corpos de prova usinados

### 3.2 Ensaios Metalográficos

Para confirmar a orientação da fibragem gerados nos corpos de prova foi analisado metalograficamente uma amostra de cada configuração. Para isto primeiramente os corpos de prova foram cortados longitudinalmente, lixados e atacados numa solução de 30% de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) aquecida entre  $80^\circ C$  e  $90^\circ C$  conforme recomendado por norma ABNT NBR 8108 [40]. Para que as linhas de fibragem fiquem bem visíveis, aplicou-se tinta de traçagem na cor azul sobre a superfície atacada. As Figura 33, Figura 34 e Figura 35 demonstram as fibragem reveladas nos corpos de prova das três configurações propostas.

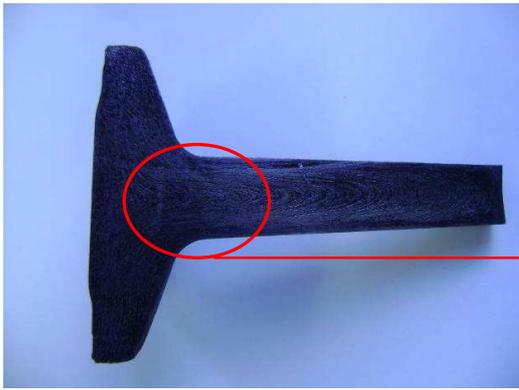


Figura 33 Fibragem da Configuração A

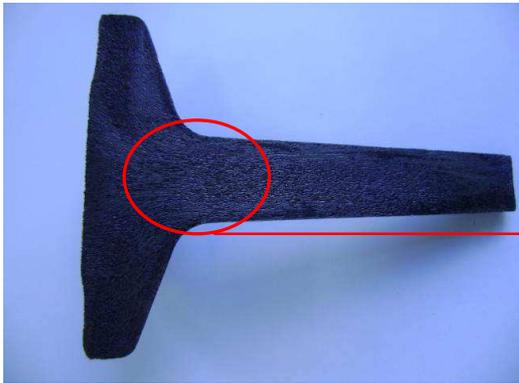


Figura 34 Fibragem da Configuração B

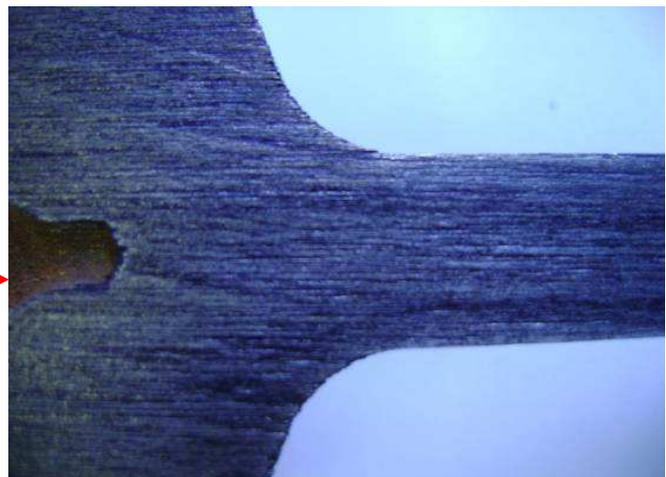
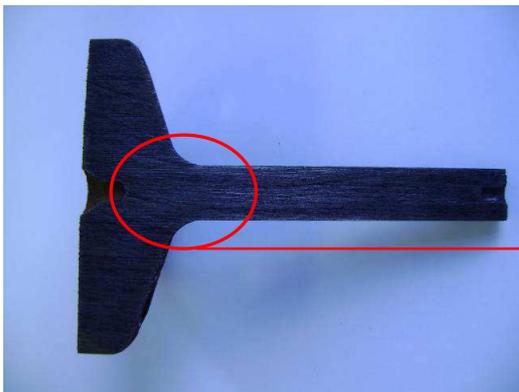


Figura 35 Fibragem da Configuração C

### 3.3 Ensaio de Fadiga

Para a avaliação da vida a fadiga do componente, foi utilizado o equipamento de ensaio de fadiga flexo rotacional ou viga rotativa que provoca na região do raio a tensão máxima, devido o momento provocado pela carga acoplada na extremidade do corpo de prova (Figura 36 e Figura 37). Foi aplicado nos corpos de prova uma carga de  $500 \pm 50$  N acoplada a 80mm do sistema de fixação com uma frequência constante de 8,33 Hz. O equipamento registra o número de ciclos aplicado a amostra até a ruptura da mesma.

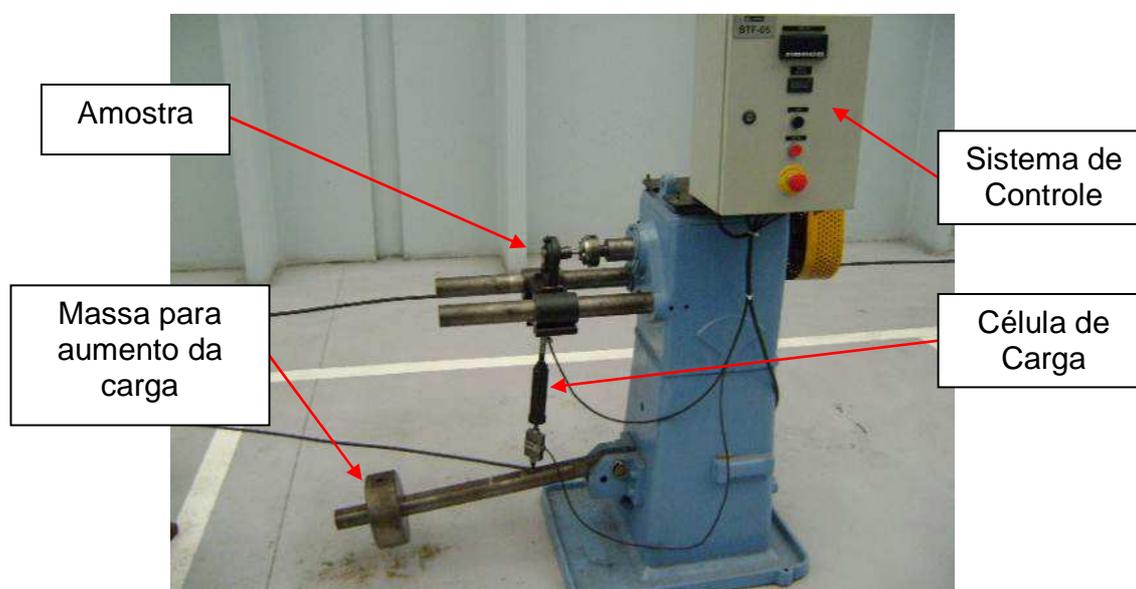
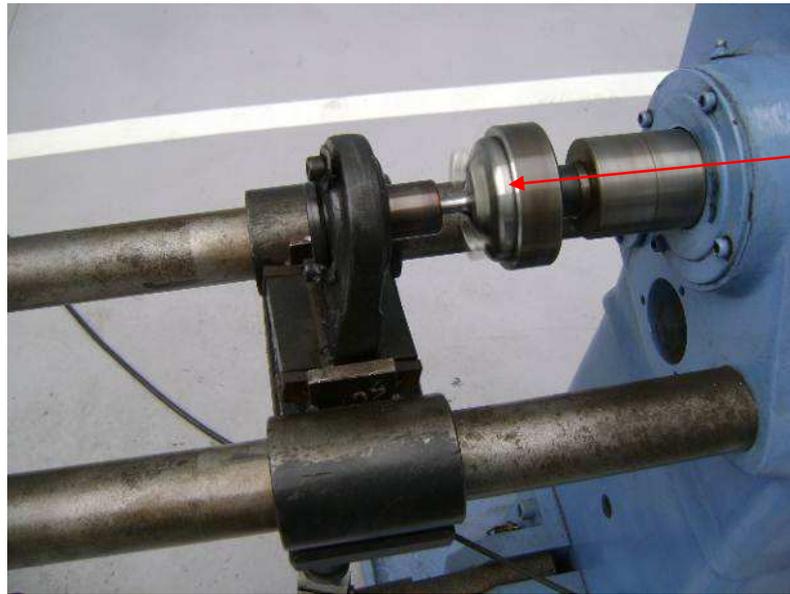


Figura 36 Equipamento do ensaio de fadiga



Amostra durante ensaio

Figura 37 Amostra em teste de fadiga

### 3.4 Calculo Teórico de Vida a Fadiga

Com objetivo de se verificar se as dimensões dos corpos de prova e o tempo de ensaio estão adequados, foi calculado o número de ciclos teórico até sua ruptura.

Dados do corpo de prova e do ensaio:

$L = 80 \text{ mm}$

$d = 12 \text{ mm}$

$D = 50$

$r = 5$

Carga = 500 N

$S_{ut} = 700 \text{ MPa}$

$S_y = 574 \text{ Mpa}$

Tipo de carregamento: Flexão

Acabamento Superficial do CP: Usinado

Confiabilidade Desejada: 99,9%

Calculo dos Fatores Modificadores:

$$a = 4,51 \text{ (Conforme Tabela 1)}$$

$$b = - 0,265 \text{ (Conforme Tabela 1)}$$

$$K_a = aS_{ut}^b = 0,795 \quad (12)$$

$$K_b = (d/7,62)^{-0,107} = 1,64.d^{-0,107} = 0,950 \quad (13)$$

$$K_c = 1 \text{ (flexão)} \quad (15)$$

$$K_d = 1 \text{ (temperatura ambiente)}$$

$$K_e = 0,753 \text{ (conforme Tabela 2)}$$

$$K_f = 1 \text{ (valor estimado)}$$

$$S'_e = 352,8 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$S_e = 200,68 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$K_t = 1,4 \text{ (conforme Figura 18 e } r/d = 0,42)$$

$$\sqrt{a} = 0,198 \text{ (conforme Tabela 3 – Atributo = ombro)}$$

$$K_f = 1,332 \quad (18)$$

$$\sigma'_f = 1045 \text{ Mpa} \quad (10)$$

$$b = -0,1137 \quad (8)$$

$$f = 0,6289 \quad (9)$$

$$a = 966 \text{ MPa} \quad (7)$$

$\sigma_{\max} = 245,6 \text{ MPa}$  (A tensão máxima aplicada no corpo de prova foi definida pela simulação do corpo de prova no software FEMAP<sup>®</sup> conforme indicado na Figura 38)

$\sigma_{\min} = - 245,6 \text{ MPa}$  (A tensão mínima aplicada no corpo de prova foi definida pela simulação do corpo de prova no software FEMAP<sup>®</sup> conforme indicado na Figura 38)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 245,6 \text{ MPa}$$

$$N = 13.576 \text{ ciclos} \quad (6)$$

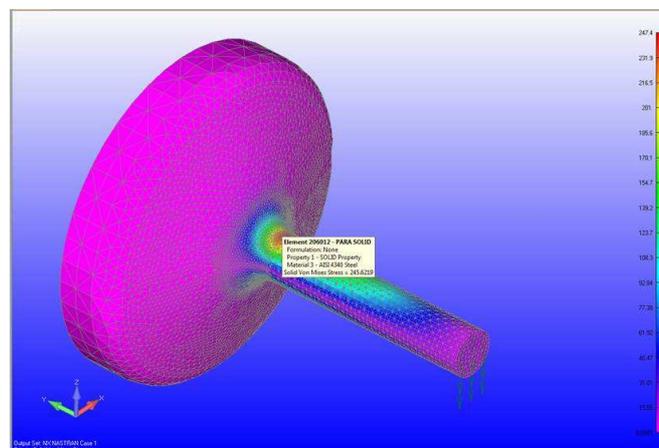


Figura 38 Simulação das tensões aplicadas no corpo de prova

#### 4. Resultados e Discussão

A resistência a fadiga de um componente possui muitas variáveis associadas, tornando a determinação de valores exatos uma tarefa muito difícil. Entretanto através de ensaios acelerados em bancadas, como o descrito neste trabalho, podemos comparar alterações de variáveis de processos de fabricação que implicam em mudanças nas características mecânicas e metalúrgicas, orientando o projeto do componente com segurança.

Na Tabela 7 e Figuras 39 e 40, demonstram os resultados obtidos após a ruptura dos corpos de prova submetidos aos ensaios de fadiga.

Tabela 7 Resultados dos Ensaios de Fadiga

Configuração de Fibragem	CPs	Ciclos	Media	Desvio Padrão
A	1	21000	24400	5176
	2	20000		
	3	23000		
	4	33000		
	5	25000		
B	6	17500	10500	7357
	7	5500		
	8	2500		
	9	8000		
	10	19000		
C	11	9500	11400	6076
	12	2500		
	13	19000		
	14	12000		
	15	14000		

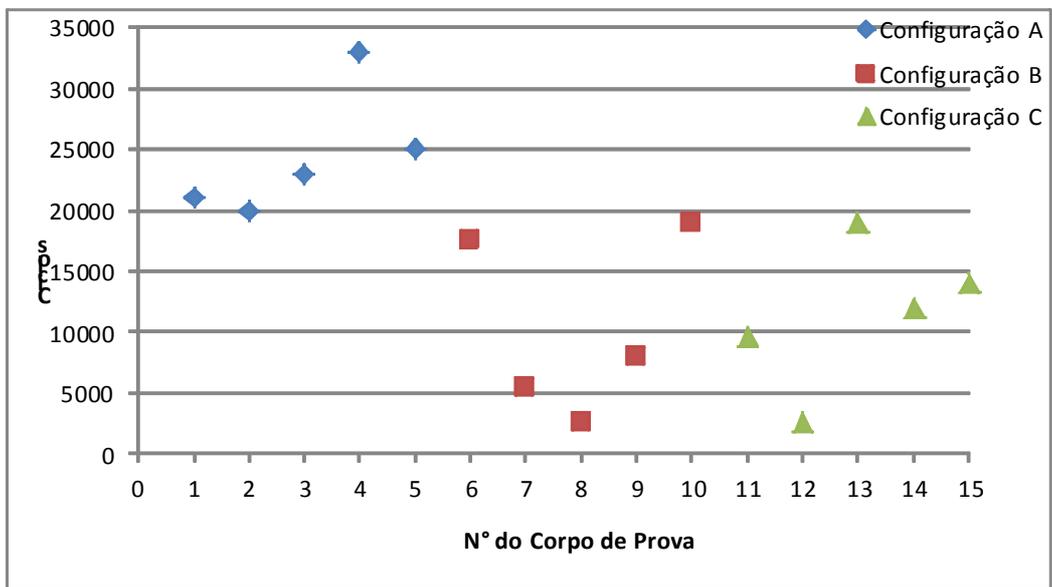


Figura 39 Resultados dos ensaios de fadiga

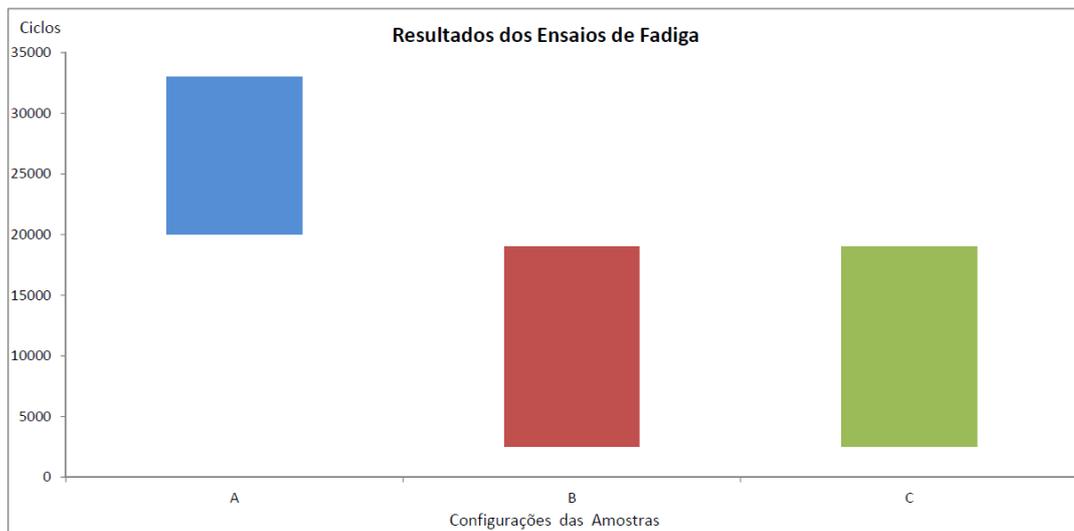


Figura 40 Resultados dos ensaios de fadiga agrupados

Os resultados demonstram que as amostras da Configuração A atingiram uma vida a fadiga superior as das Configurações B e C na ordem de 2 vezes sobre as médias. Já os resultados obtidos indicam um comportamento semelhante a vida a fadiga, entre as Configurações B e C. Importante ressaltar que este

comportamento semelhante entre estas duas configurações são válidos para este caso analisado, podendo não se comportar desta forma para outras geometrias de corpos de prova.

Podemos concluir com os testes realizados a importância da orientação correta da fibragem oriunda do processo de forjamento a quente na vida a fadiga de um componente mecânico. Da mesma forma que uma inadequada orientação desta fibragem pode comprometer sua vida a fadiga, tornando seu desempenho similar ao mesmo componente usinado direto de barra. Os resultados dos testes realizados nos corpos de prova, comprovam que a orientação da fibragem no sentido longitudinal de carregamento, possui uma vida a fadiga superior em 2,3 vezes quando comparado aos testes no sentido transversal.

Os cálculos teóricos da vida a fadiga, feitos a partir da análise de tensões por elementos finitos são importantes para se verificar se os parâmetros utilizados nos testes estão de acordo, como por exemplo: geometria dos corpos de prova, cargas utilizadas no ensaio e os tempos de ensaio. Como já mencionado a avaliação precisa da vida a fadiga se torna quase impossível diante das inúmeras variáveis envolvidas no processo, mas os resultados prévios obtidos em cálculo auxiliam no projeto dos testes assim reduzindo a possibilidade de erros e custos desnecessários.

Como esperado os corpos de prova submetidos aos ensaios romperam na mesma posição em ambas configurações, da mesma forma houve uma semelhança no aspecto morfológico da fratura, como ilustrado na Figura 41, seu aspecto é típico de um carregamento alternado.

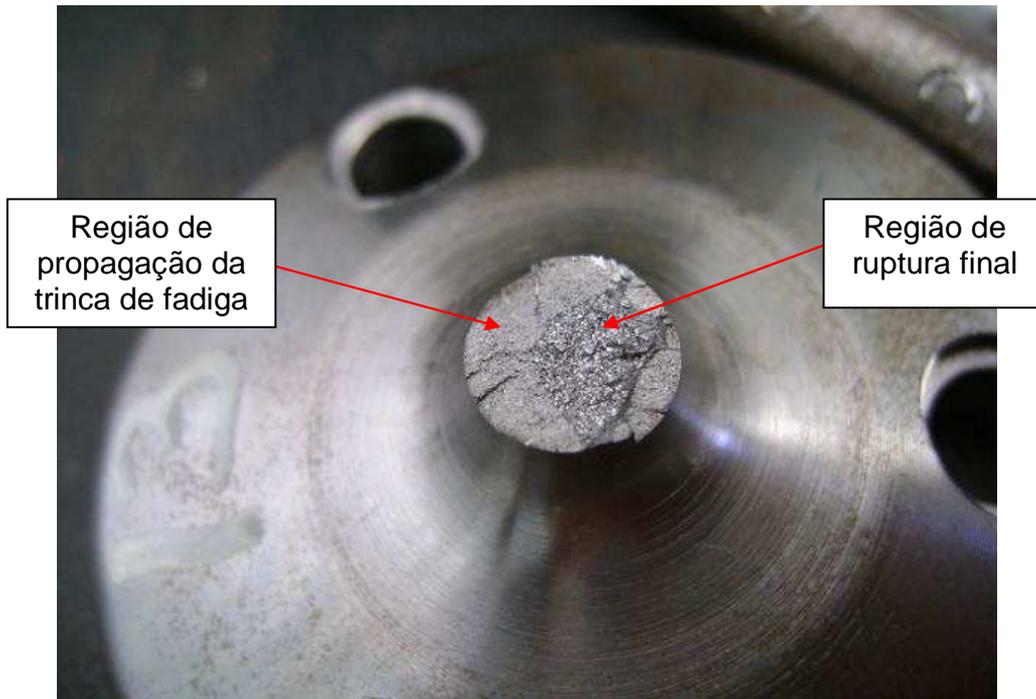


Figura 41 Região da fratura do corpo de prova

## 5. Conclusões

Conclui-se com trabalho desenvolvido a relevância do tema para a indústria de componentes forjados, pois em grande parte das vezes não há especificações claras da orientação da fibragem necessária para garantir a segurança de um componente mecânico por parte das montadoras ou sistemistas, tão pouco especificam os limites aceitos do desvio desta orientação. Sabemos que, altos coeficientes de segurança são aplicados nos cálculos estruturais de componentes, onde estes garantem em tese a vida do componente, mas sabemos também que isto implica em acréscimo de custos, como aumento na quantidade de material utilizado na fabricação ou acréscimo de processos posteriores como tratamentos térmicos.

Atualmente existem tecnologias que podem facilmente auxiliar um projetista no projeto das etapas e ferramental de forja com relativa precisão. Softwares do tipo CAE, simulam o fluxo do material no ferramental, podendo assim prever a orientação da fibragem final no produto.

Outra questão que justifica o incentivo a estudos sobre o tema é a crescente competitividade com tecnologias concorrentes que em muitas vezes possibilita substituição do forjamento por estas. Como exemplo podemos citar evolução de tratamentos térmicos em fundidos e a utilização de outros materiais, como chapas de alta resistência e plásticos de engenharia. A otimização da geometria de componentes forjados, considerando sua orientação de fibragem pode reduzir a quantidade de material utilizado na sua fabricação, podendo assim promover considerável redução custos.

## **6. Sugestão para Trabalhos Futuros**

Fazem-se algumas sugestões para possíveis trabalhos posteriores a este:

- testes com uma quantidade maior de amostras e determinar a curva com limite de fadiga do componente;
- testar novas amostras com a mesma qualidade de matéria prima, mas com percentuais de enxofre diferenciados;
- adaptar o equipamento de teste para a norma DIN 50113 e verificar impacto desta modificação nos resultados;
- efetuar testes de fadiga diretamente em componentes mecânicos, avaliando o impacto da orientação da fibragem na sua vida a fadiga.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

[1] MILESI M.; CHASTEL Y.; HACHEM E.; BERNACKI M.; LOGÉ R.E.; BOUCHARD P.O.; Explicit Microscopic Fatigue Analysis of Forged Components. Mines ParisTech, Center for Materials Forming (CEMEF). France, 2007.

[2] FORGING INDUSTRY ASSOCIATION (FIA). Forging Solutions: Design Engineering Information From FIA. USA, 2007.

[3] COLPAERT, H.; Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. Blucher, 4ª Edição. 2008.

[4] CHASTEL Y.; CAILLET N.; BOUCHARD P.O.; Quantitative analysis of the impact of forging operations on fatigue properties of steel components. Mines ParisTech, Center for Materials Forming (CEMEF). France, 2006.

[5] GENTILE F.C.; NEVES F.O.; REGONE W.; BUTTON S.T.; Análise numérica experimental da evolução microestrutural em forjamento a quente de um aço microligado ao V-Ti. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais. Natal/RN, 2002.

[6] SCHAEFER L.; Forjamento – Introdução ao processo. Porto Alegre/RS: Imprensa Livre, 2001. 202p.

[7] TAJALLY M.; EMADDODIN E.; QODS F.; An Experimental Study on Earing and Planar Anisotropy of Low Carbon Steel Sheets. Department of Materials, Faculty of Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, 2011.

[8] ZOROUI M.; FATEMI A.; Fatigue Life Comparisons of Competing Manufacturing Processes: A Study of Steering Knuckle. The University of Toledo, 2003.

[9] CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA (CIMM); Material Didático.

Diponível em: [http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico) Acessado em 11/05/2006

[10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM); ASTM E45 – 05: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels. 2005

[11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM); ASTM E-1122: Standard Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis. 1996

[12] CYRIL N.; FATEMI A.; Experimental evaluation and modeling of sulfur content and anisotropy of sulfide inclusions on fatigue behavior of steels. Mechanical, Industrial and Manufacturing Engineering Department, The University of Toledo. 2008

[13] GRANGE, R. A.; Effect of Microstructural Banding in Steel. Metallurgical Transactions. vol. 2, 1971, p. 417- 426.

[14] CYRIL N.; FATEMI A.; CRYDERMAN B.; Effects of Sulfur Level and Anisotropy of Sulfide Inclusions on Tensile, Impact, and Fatigue Properties of SAE 4140 Steel. The University of Toledo and MACSTEEL, Monroe Division. 2008.

[15] KHALIFA, T. A.; Fatigue Crack Initiation Associated with Inclusions in a Low-Carbon Steel. Journal of Materials. 1989.

[16] GODEFROID, L. B.; Fundamentos de Mecânica de Fratura. 1ª Edição, Ouro Preto, Editora UFOP. 1995.

[17] METALS HANDBOOK. Vol.14 - Forming and Forging. 9ª Edição. 1993.

[18] MILESI, M.; CHASTEL Y.; HACHEM E.; BERNACKI M.; LOGÉ R.E.; BOUCHARD P.O.; A multi-scale approach for high cycle anisotropic fatigue resistance: Application to forged components. MINES ParisTech, Center for Materials Forming (CEMEF). France, 2009.

[19] BRESCIANI, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T.; Conformação Plástica de Metais – Edição digital – EPUSP. São Paulo, 2011.

[20] SCHAEFER L.; Conformação Mecânica. Imprensa Livre. Porto Alegre/RS, 1999

[21] SIEGERT K.; MÖCK A.; NEHER R.; Forging Alloys. Institut für Umformtechnik, Universität, Stuttgart, 1994

[22] OLT J.; MAK SAROV V. V.; Using an Anisotropic Properties of Sheetmetal to Develop a Design of Vibrationless Cutting Tool. Institute of Technology, Estonian, 2012

[23] MCKELVEY S.; FATEMI A.; Effect of Forging Surface on Fatigue Behaviour of Steels: a Literature Review. The University of Toledo, Ohio, 2011.

[24] HASHIMURA M.; HIRATA H.; KANISAWA H.; NAITO K.; Development of Lead Free Micro Alloyed Steel for Crank Shafts. Muroran R&D Lab. and Nippon Steel Technical. 2003.

[25] ROCKWELL (MERITOR); 5-36658: Chart Forging Grain Flow. 1990 - Imagem autorizada por Meritor do Brasil.

[26] WILLIAMS J.; MONTAZERSADGH F.; FATEMI A.; Fatigue Performance Comparison and Life Prediction of Forged Steel and Ductile Cast Iron Crankshafts. The University of Toledo, Ohio, 2007.

[27] ALVES C. G.; Análise de confiabilidade em fadiga - Estudo de caso: Braço de controle de suspensão automotiva. Campinas/SP, 2008.

[28] DIETER, G.E.; Mechanical Metallurgy. SI Metric Edition. McGraw-Hill. 1988

[29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM); ASTM E 1823: Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing. 2007.

[30] NORTON R. L.; Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada. 2ª Ed. Bookman, Porto Alegre/RS, 2004.

[31] STROHAECKER T R.; REGULY A.; LIMBERGER I.; MACEDO M.; HOPPE R.; GRIZA S.; Fadiga e Análise de Falhas. Apostila de Aula – LAMEF/ UFRGS.

[32] SHIGLEY, J E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R G.; Projeto de Engenharia Mecânica. 7ª Ed., Bookman, Porto alegre/RS, 2005.

[33] LABORATÓRIO DE TESTES E ENSAIOS MECÂNICOS DA MAXIFORJA (LTEM). Acervo Técnico – Imagem autorizada

[34] Apostila Laboratório de Materiais do Centro Universitários da FEI. Disponível em: <http://www.fei.edu.br/mecanica/me541/LabMat.htm>. Acessado em: 27/02/2012

[35] GARCIA A.; SPIM J.; SANTOS C.; Ensaio de Materiais. Ed. LTC. 1999.

[36] PETRACCONI C.; Dissertação de Mestrado - Análise Comparativa do Comportamento de Fadiga do Gancho Reboque Posterior de um Veículo Automotor. Engenharia Mecânica da PUC Minas, 2008.

[37] MISCHKE C R.; Prediction of Stochastic Endurance Strength. Trans. Of ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, Vol.109, 1987.

[38] DEUTSCHEUS INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN); DIN EN 10243-1:Steel die forging – Tolerances on dimensions. 2000.

[39] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); ISO 2768-1: General tolerances. 1989.

[40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT); NBR 8108: Ataque com Reativo Metalográfico em Ligas Ferrosas. 1983.

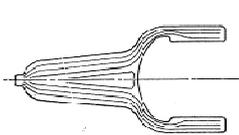
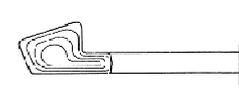
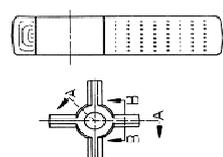
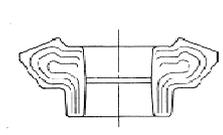
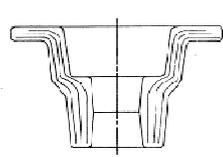
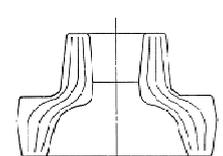
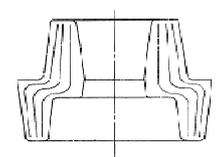
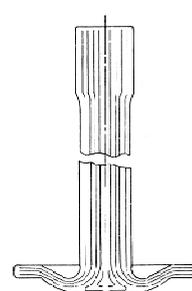
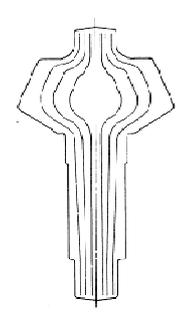
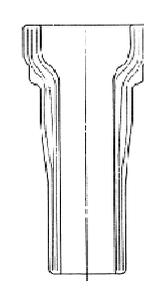
[41] ATAN, T.; NEGAILE, G.; SHEN, G.; Cold and Hot Forging – Fundamentals and Applications. ASM, 2007.

[42] DEUTSCHEUS INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN); DIN 50113: Corpos de Prova para Ensaio de Fadiga em Viga Rotativa. 1952.

[43] DOWLING, N. E.; Mechanical behavior of materials, Chapter 9: Fatigue of materials: introduction and stress approach. Prentice-hall, New Jersey, 1993.

# Anexos

## Anexo A - Exemplo de especificação de fibragem adotada pela indústria automotiva

 <b>FORK-SHIFT</b>		 <b>ADAPTER-BRAKE</b>		 <b>GEAR-DRIVE</b>		 <b>SECL. A-A</b> <b>SPIDER-DIFF</b>	
 <b>GEAR-DIFF SIDE</b>		 <b>FLANGE-COMPANION</b>		 <b>DIFF CASE-PLAIN HALE</b>		 <b>COLLAR-DIFF LOCKOUT</b>	
 <b>SHAFT-AXLE</b>		 <b>PINION-DRIVE</b>		 <b>SPINDLE-HOUSING</b>		<p>GRAIN FLOW IN LONGITUDINAL DIREZIONE  <b>SHALL BE PARALLEL TO THE EXTERIOR</b>            GUEARFACE SUCH THAT THE GRAIN FLOW            DOES NOT RUN UP TO THE EXTERIOR            SURFACE OR FLOW OVER UPON ITSELF.</p> <p>LAVORANDO DELLE FIBRE IN DIREZIONE            LONGITUDINALE DOVE ESSERE PARALLELO            ALLA SUPERFICIE ESTERNA IN POSTO CHE DA            NUN E' COMPLESSIVAMENTE RIPARABILI SU            SPINER.</p>	

REVISIONS

REV. 01	DATE	BY	APP. BY
1	01/11/11	...	...

APPROVED FOR PRODUCTION

PROJ. NO. 5-36649

REV. 01

DATE 01/11/11

BY ...

APP. BY ...

Anexo B - Certificado de Usina do Material SAE 1045H – Ø 39,69

**RAZÃO SOCIAL: GERDAU AÇOS ESPECIAIS S/A**  
 CNPJ: 07.359.611/0002-97

**CERTIFICADO DE QUALIDADE**  
 QUALITY CERTIFICATE  
 MILL'S TEST CERTIFICATE  
 CERTIFICADO DE CALIDAD

Nº **439929**

**ISO/TS 16949:2002**  
 Certificate Number: 3538

**GERDAU**  
**AÇOS ESPECIAIS PIRATINI**

LOT/BATCH: **8128847B**  
 COBRE/COIL: **88.073.095**

PRODUTO/PRODUCT: **BARRA LAMINADA REDONDA SEM TRATAMENTO ENDIREITADO**  
 NORMA/SPECIFICATION: **MAXIFORJA.IMP 109 REV.01**

NOTA FISCAL/INVOICE: <b>068224</b>	PROD.FORNEC./ORDER: <b>1083967 - 804391548</b>	QUALIDADE/GRADE: <b>SAE 1045H</b>	BRITOLA/SIZE (mm): <b>39,69</b>									
CLIENTE/CUSTOMER: <b>MAXIFORJA S/A FORJARIA METALURGIA</b>	ORD.FORNEC./ORDER: <b>1083967 - 804391548</b>	OC: <b>40036</b>										
ANÁLISE QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	N	Sn	DI
0,46	0,24	0,83	0,023	0,021	0,11	0,01	0,01	0,025	0,01	0,0080	0,001	1,29
ENSaios MECÂNICOS/MECHANICAL PROP.												
DUREZA												
HB												
206												
ENSaios METALÓGRAFICOS/METALLOGRAPHIC TESTS												
T GRÃO	FRATURA											
AUTÊNTICO	AZUL/H											
ASTM	ASTM											
7	7											
MICROINCLUSÕES/INCLUSION RATING NUMBERS												
AF	AG	BF	BG	CF	CG	DF	DG					
ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM					
2,0	0,5	0	0	0	0	1,0	0					
ESTRUTURA - FERRITA - FERRITA												
OBSERVAÇÕES/OBSERVATIONS												
Utensili, defeitos superficiais e controle de mistura aprovados. Material inspecionado em linha automática.												

DEPARTAMENTO DA QUALIDADE/QUALITY DEPARTMENT  
 CHARQUEADAS, 04.08.2008

  
 Ildeu Ilain Souza de Oliveira - CREA 117203

Anexo C - Certificado de Usina do Material SAE 1045H – Ø 69,85.



**GERDAU**  
AÇOS ESPECIAIS PIRATINI



ISO/TS 16949: 2002  
Certificate Number: 3338

CERTIFICADO DE QUALIDADE  
QUALITY CERTIFICATE  
MILL'S TEST CERTIFICATE  
CERTIFICADO DE CALIDAD

RAZÃO SOCIAL: GERDAU AÇOS ESPECIAIS S/A  
CNPJ: 07.359.841/0002-87

Nº 434655

NITEN/INVOICE 053986	PESO/WEIGHT (kg) 10886,00	PED. CLIENTE/CUSTOMER OC: 39.785	ORD. FORNECEDOR/SUPPLY 10681937 - 804179542	QUALIDADE/GRADE SAE 1045H	CORREDA/HEAT 88.073.095							
CLIENTE/CUSTOMER MAXIFORJA S/A FORJARIA METALURGIA			PRODUTO/PRODUCT BARRA LAMINADA REDONDA SEM TRATAMENTO ENDIREITADO									
NORMA/SPECIFICATION MAXIFORJA.IMP 109 REV.01			NORMA/SPECIFICATION MAXIFORJA.IMP 109 REV.01									
ANÁLISE QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	N	Sb	DI
0,46	0,24	0,83	0,023	0,021	0,11	0,01	0,01	0,025	0,01	0,0080	0,001	1,29
ENSaios MECÂNICOS/MECHANICAL PROP.												
DUREZA												
HB												
203												
ENSaios METALOGRAFICOS/METALLOGRAPHIC TESTS												
T.GRÃO FRAZURA												
AUSTENÍTICO AZUL(H)												
ASTM												
7												
MÉTRONCLIS/CONCLUSION RATING NUMBERS												
AF	AG	BF	BG	CF	CG	DF	DG					
ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM	ASTM					
2,0	0,5	0	0	0	0	1,0	0					
ESTRUTURA - FENÓTIPO - FERRITA												
OBSERVAÇÕES/OBSERVATIONS												
Ultrassom, defeitos superficiais e controle de mistura aprovados. Material inspecionado em linha automática.												
DEPARTAMENTO DA QUALIDADE/EQUALITY DEPARTMENT CHARQUEADAS, 30.06.2008 Ildo Junio Souza de Oliveira CREA 117201												