

## **Fractura por Fadiga em Estruturas Metálicas.**



Projecto Final de Licenciatura em Engenharia dos Materiais,  
Elaborado por Helder Silva Nunes (20152023)

Orientadores: Prof. Dr. Tessaleno Devesas

Prof. Dr. Manuel Freitas

Barcarena, Julho de 2018

Escola Universitária de Ciências Empresariais, Saúde, Tecnologias e  
Engenharia

# **Fractura por Fadiga em Estruturas Metálicas.**

Projecto Final de Licenciatura em Engenharia dos Materiais,  
Elaborado por Helder Silva Nunes (20152023)

Orientadores: Prof. Dr. Tessaleno Devesas

Prof. Dr Manuel Freitas

Barcarena, Julho de 2018

O autor é o único responsável pelas ideias e conteúdos expressos neste documento.

---

Imagem da Capa, refere-se a uma fractura por fadiga ocorrida num veio de uma charrua, (Fonte – Galucho)

## Agradecimentos

*A realização deste trabalho marca o fim de uma “etapa do caminho” e o princípio de outras que se seguem, na minha procura constante pelo desenvolvimento pessoal;*

*Agradeço a todos aqueles que de várias formas, dentro ou fora do âmbito académico e em tempos diferentes contribuíram para a conclusão deste objectivo;*

*Agradeço à empresa Galucho, à qual dedico quase 20 anos da minha vida. Sem a sua ajuda dificilmente teria concluído esta licenciatura;*

*A todos os meus professores e formadores, sobretudo aos mais exigentes e motivantes, foram eles que talharam uma parte de mim e das minhas capacidades;*

*Ao meu director e amigo Eng. Eduardo Nunes, ao qual devo muito daquilo que sei e que sou hoje em dia;*

*Ao meu Tio J. Marta e Silva, que desde criança me mostrou que o caminho mais provável para o desenvolvimento era a escola e o esforço. A conclusão desta “etapa”, também é muito para ele;*

*Aos meus dois filhos, a Mariana e o Duarte. Alimentos substanciais da minha motivação, para dia após dia levar por diante este projecto nesta fase da minha vida. Para que entendam que o desenvolvimento pessoal e o conhecimento não têm tempos determinados e que uma boa parte das variáveis da vida apenas dependem de nós próprios.*

*Aos meus pais por tudo. A toda a minha família e amigos, o meu obrigado.*

Palavras Chave:

(Aço – Maquinação – Soldadura – Fadiga – Fractura)

## **Fractura por Fadiga em Estruturas Metálicas**

### **Resumo:**

Este trabalho visa abordar o conceito de fractura por fadiga em peças ou estruturas metálicas. A abordagem ao tema começou com os tipos de fractura (frágil e dúctil), tal como o conceito de fadiga, referindo-se o modo de nucleação de fissuras a partir de defeitos, ou regiões da peça onde se verifiquem a concentração de tensões e ainda a propagação da fractura. Considerou-se a importância da textura da superfície de fractura para a obtenção, rápida e prática (se possível), das possíveis causas que estiveram na origem da ruína da peça. Abordou - se a fadiga em estruturas soldadas, tendo em conta o tipo de soldadura, preparação de juntas, defeitos de soldadura etc.. Foram analisados do ponto de vista macrográfico as superfícies de sete fracturas por fadiga, tendo sido analisada a morfologia da superfície, quantificada (em alguns casos), a intensidade da concentração de tensões e apontadas as razões da fractura. De uma forma global foram enunciadas um conjunto de boas práticas em projecto e também em processos de produção de forma a minimizar a ocorrência dos tipos de fractura mais comuns, observados nos componentes produzidos pela empresa Galucho.

### **Abstract:**

This work aims to approach the concept of fatigue fracture in metallic parts or structures. The approach to the subject began with the types of fracture (fragile and ductile), as well as the concept of fatigue, referring to the mode of cracking, or regions of the part where the concentration of tensions is the most probable cause of the propagation of the fracture. It was consider the texture of the fracture surface to conclude (quickly and practically) about the possible causes that were in the origin, of the ruin of the piece. Fatigue was considered in welded structures, taking into account the type of welding, preparation of joints, welding defects, etc. The surfaces of seven fatigue fractures were analyzed from the macrographically, and the surface morphology, quantified (in some cases) the intensity of the stress concentration and the ratios were determined. In global way, a set of good design practices and also in production processes were formulated in order to minimize the occurrence of the most common types of fractures that are observed in the components produced by Galucho.

# Índice Geral

	Pág.
- Introdução:.....	1
- Desenvolvimento:.....	5
1 - Estudo da Fractura por Fadiga.....	5
1.1 - Fractura .....	5
1.2 - Fadiga.....	6
1.3 - Previsão de vida .....	10
1.4 – Fractura por fadiga em estruturas soldadas.....	14
2 - Caracterização de casos reais.....	21
2.1 - Morfologia.....	21
2.2 – Casos analisados:.....	23
- Conclusões.....	37
- Bibliografia.....	41

## Anexo A, Informação complementar dos casos analisados (capítulo 2)

C1) - Veio de Charrua: .....	i
C2) - Manga de eixo de grade A2CP:.....	ii
C3) - Extremidade do eixo de grade GVR: .....	iii
C4) - Pinhão de engrenagem (Veio):.....	iv
C5) - Roda dentada:.....	v
C6) - Manivela de toldo:.....	vi
C7) - Perno de fixação de máquina ferramenta: .....	vii

## Anexo B, Desenhos técnicos (capítulo 2)

C1) - Veio de Charrua .....	i
C3) - Extremidade do eixo de grade GVR .....	iii
C4) - Pinhão de engrenagem (Veio).....	iv
C5) - Roda dentada.....	v
C6) - Manivela de toldo.....	vi

## Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1 - Classificação de "Não Conformidades", registadas na empresa Galucho, nos anos de 2016 e 2017.....	2
Figura 2 - Percentagem de fractura em serviço na totalidade das "Não Conformidades" observadas. ....	3
Figura 3 - Tipos de fractura Frágil - (Brittle fracture), - Dúctil (Ductile fracture) .....	5
Figura 4 - Perfil de possíveis faces de fractura por fadiga .....	8
Figura 5 - Tipos de solicitações de tensão em função do tempo.....	9
Figura 6 – Resistência à fadiga (Curvas S-N, para um aço-carbono (curva A); para uma liga de Al (curva B)) .....	11
Figura 7 - a) Definição de concentração de tensão $k_t$ , b) Fluxo de "linhas" de força presentes em torno do furo da peça.....	12
Figura 8 - Charrua de dois ferros (aivecas).....	24
Figura 9 - Dois extremos do veio resultantes da fractura.....	24
Figura 10 - Relação entre o Factor de Concentração de Tensões e o raio de concordância, em variações de secção .....	26
Figura 11 - Grade A2CP.....	26
Figura 12 - Duas superfícies resultantes da fractura do eixo .....	27
Figura 13 - Relação entre o Factor de Concentração de Tensões e o raio de concordância, em variações de secção .....	28
Figura 14 - Grade GVR.....	29
Figura 15 - Extremidade do eixo da grade GVR fracturada.....	29

	Pág.
Figura 16 - Corta mato .....	30
Figura 17 - Veio (pinhão) fracturado.....	30
Figura 18 - Brocadora .....	31
Figura 19 - Roda dentada fracturada .....	32
Figura 20 - Relação entre o Factor de Concentração de Tensões e o raio de concordância, em variações de secção .....	33
Figura 21 - Localização do enrolador do toldo .....	33
Figura 22 - Parte da manivela fracturada.....	34
Figura 23 - Perno roscado para fixação .....	35
Figura 24 - Superfície de fractura do perno .....	35
Figura 25 - Análise de elementos finitos de um veio (à flexão), com variações de secção .....	37
Figura 26 - Macrografia de um cordão de soldadura com uma "perna" refundida .....	39

## Lista de Abreviaturas:

HC = Referente a uma estrutura hexagonal compacta

$\sigma_{f0}$  = Tensão limite de fadiga

$\sigma_R$  = Tensão de rotura

$\epsilon$  = Deformação / extensão

N = Número de ciclos

S = Tensão

S-N = Referente a curvas expressas num gráfico em que as variáveis são a tensão e o número de ciclos

$\epsilon$ -N = Referente a curvas expressas num gráfico em que as variáveis são a extensão e o número de ciclos

$\sigma_n$  = Tensão limite de fadiga obtido por ensaio laboratorial

$\sigma_0$  = Tensão nominal

$\sigma_{max}$  = Tensão máxima

$k_t$  = Factor de concentração de tensões

$k_a$  = Factor de correcção devido ao acabamento da superfície da peça

$k_b$  = Factor de correcção devido às dimensões da peça em causa

$k_c$  = Factor de fiabilidade

$k_d$  = Factor de correcção de temperatura

$k_e$  = Outras afectações consideradas

$k_I$  = Factor de intensidade de tensão

$k_{IC}$  = Factor crítico de intensidade de tensão (tenacidade à fractura)

Y = Constante geométrica adimensional da ordem de I

a = Comprimento do defeito superficial / metade do comprimento do defeito interno

## Lista de Abreviaturas (continuação):

LCF – (Low cycle fatigue) = Fadiga de baixo ciclo – Oligocíclica

HCF – (High cycle fatigue) = Fadiga de alto ciclo

MIG = Processo de soldadura – Metal Inert Gas

MAG = Processo de soldadura – Metal Active Gas

TIG = Processo de soldadura – Tungsténio Inerte Gas

MEV = Microscopia electrónica por varrimento

C1, C2... = Casos práticos avaliados

Al = Elemento químico Alumínio

CO<sub>2</sub> = Elemento químico Dióxido de carbono

Cr = Elemento químico Crómio

Mo = Elemento químico Molibdénio

C = Elemento químico Carbono

K = Elemento químico Potássio

Ni = Elemento químico Níquel

## - Introdução:

Os critérios de dimensionamento de peças ou outras estruturas têm, como finalidade principal, estabelecer a tensão máxima em torno da secção menos favorável das mesmas. Existem contudo, outros factores relacionados com as cargas e respectivas tensões: estas podem ser abruptas ou lentas, estáticas ou dinâmicas e podem ocorrer ainda em consequência de ambientes corrosivos, ou devido a variações térmicas. Todos estes factores podem provocar a propagação sub-crítica de fissuras que levam ao colapso final da peça ou estrutura. (Smith 2008)

Também os processos de produção podem induzir tensões residuais em regiões onde a concentração de tensões possa ocorrer. Todas estas variáveis contribuem para um necessário dimensionamento, contemplando ainda um factor de segurança, resultando num sobredimensionamento que minimiza os factores acima mencionados, mas que, entretanto, não pode ser demasiado elevado ao ponto de aumentar o peso da peça ou da estrutura.

Uma das causas mais comuns para a falha de estruturas metálicas (cerca de 80% das falhas, segundo Smith 2008) está relacionada com a fadiga em órgãos sujeitos a esforços dinâmicos / cíclicos. As fracturas iniciam – se, normalmente, em pontos da peça onde possam existir concentração de tensões. Uma vez aberta, a fissura vai-se propagando através da secção menor da peça em causa, até à sua divisão.

A superfície da fractura poderá revelar, em princípio, as causas e o modo como a fractura se propagou, obtendo – se informação substancial para a formulação de acções correctivas a implementar no projecto dos órgãos em causa.

A escolha deste tema para desenvolvimento do projecto final de licenciatura prende-se ao facto do autor desenvolver a sua actividade profissional no sector da metalomecânica, na empresa Galucho – Industrias Metalomecânicas, que tornou possível a frequência deste curso pelo autor.

A empresa Galucho produz uma ampla gama de produtos, entre os quais alfaia agrícolas e meios de transporte rodoviários, sujeitos a condições de utilização severas, o que faz com que a falência de órgãos constituintes possa ocorrer, representando uma perda nos ganhos da empresa, tal como na sua imagem para os clientes.

Como ponto de partida para este trabalho, foi recolhida e analisada informação relacionada com não conformidades registadas e reclamações de clientes. A figura 1, mostra uma classificação das “não conformidades” registadas nos anos de 2016 e 2017, tendo sido esta informação disponibilizada pelo departamento de assistência após venda da empresa.

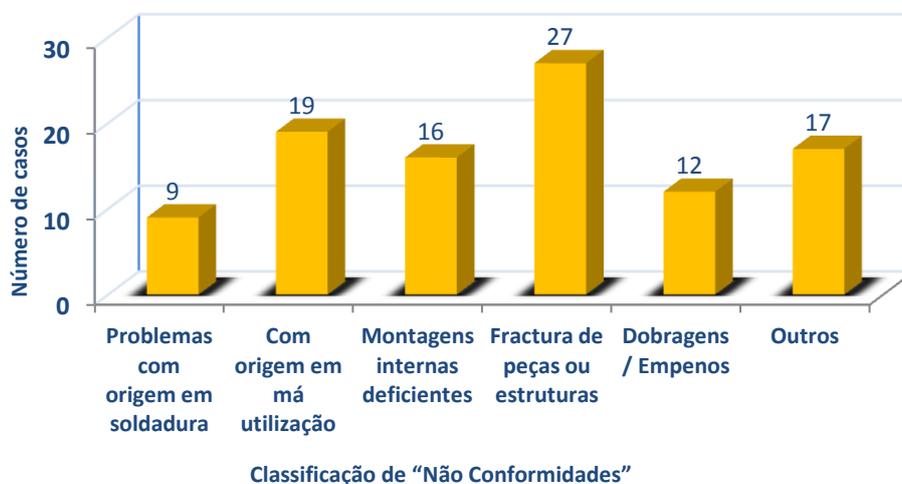


Figura 1 - Classificação de "Não Conformidades", registadas na empresa Galucho, nos anos de 2016 e 2017.

Conforme podemos inferir dos dados apresentados na figura 1 (total de 100 casos absolutos), cerca de 27% das “não conformidades” observadas deveram-se à fractura de peças em serviço, conforme representado no diagrama da figura 2.

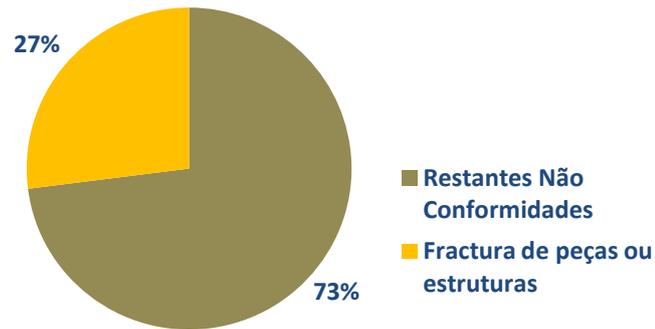


Figura 2 - Percentagem de fractura em serviço na totalidade das "Não Conformidades" observadas.

Este trabalho procurou abordar o fenómeno da fractura por fadiga em estruturas metálicas (aço), de forma a sensibilizar as áreas da organização envolvidas (Projecto, Produção), tendo sido seleccionados um conjunto de casos de peças fraturadas por fadiga e discutidas as causas das respectivas falhas, com o intuito de enunciar recomendações práticas e acessíveis, a serem levadas em conta no projecto e fabricação de peças e conjuntos duradouros.



## - Desenvolvimento:

### 1 - Estudo da Fractura por Fadiga

#### 1.1 - Fractura

A definição de fractura pode ser considerada como a separação de um corpo sólido em duas ou mais partes. De um modo geral os materiais metálicos podem apresentar dois tipos diferentes de fractura: frágeis ou dúcteis. (Smith 1998)

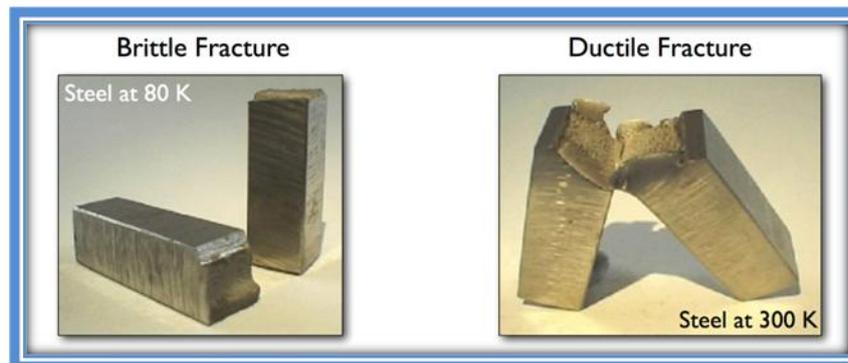


Figura 3 - Tipos de fractura Frágil - (Brittle fracture), - Dúctil (Ductile fracture)  
(Failuremechanisms – Junho / 2018)

A fractura dúctil, numa peça metálica, acontece após uma grande deformação plástica, durante a qual a propagação da fissura ocorre de forma lenta e a tensão local pode exceder a tensão de rotura;

A fractura frágil ocorre em planos cristalográficos específicos, designados planos de clivagem, sendo neste caso a propagação da fissura mais rápida. É mais comum em metais com estrutura HC (Hexagonal Compacta), dado estes terem poucos planos de escorregamento. Nos materiais policristalinos, grande parte das fracturas frágeis é de natureza transgranular, ou seja, a fissura desenvolve-se através do grão. No entanto, se o limite do grão apresentar elementos prejudiciais, como o enxofre, por exemplo, segregados durante o processo de fabricação / tratamentos, pode ocorrer uma fractura frágil intergranular.

Pode-se dividir a fractura frágil em três fases: (Moura B. – 1998)

- a) A deformação plástica concentra as deslocações junto a obstáculos nos planos de escorregamento;
- b) Em regiões onde as deslocações estão bloqueadas geram-se tensões de corte, começando a ocorrer a nucleação de microfissuras;
- c) A propagação de microfissuras devido à energia elástica armazenada pelo próprio material.

A tenacidade é um indicador que quantifica a capacidade de absorção de energia de um material, antes do início do processo de nucleação de fissuras. É uma medida a considerar em construção mecânica ou estrutural. Um dos métodos utilizados para medir a tenacidade é um ensaio de resistência ao impacto, sujeitando um provete de Charpy a um embate de uma massa (pêndulo). A diferença entre a posição inicial (em altura), e a posição final (após o embate), indicará a energia absorvida pelo provete.

Normalmente, aços com elevado teor de carbono apresentam menor capacidade de absorção de energia, sendo assim mais frágeis. As temperaturas mais baixas também tendem a diminuir a tenacidade dos aços.

## 1.2 - Fadiga

A fractura por fadiga começou a ganhar importância com a revolução industrial e com a máquina a vapor, nomeadamente o comboio. Em meados do século XIX, Wohler (Eugenio S. - 2017) estudou as fracturas ocorridas em veios de comboio, que até à época estariam “bem” dimensionados.

Este tipo de fractura designa-se por um fenómeno de falha ou ruptura progressiva de materiais sujeitos a esforços dinâmicos e cíclicos e depende muito da intensidade e da frequência desses mesmos esforços.

Normalmente, as tensões em causa podem ser mais baixas do que aquelas que a peça suportaria quando sujeitas a tensões estáticas. A fractura por fadiga está associada a uma fractura do tipo frágil, com origem na alta concentração de tensões em regiões específicas da peça em causa, ou em inclusões intergranulares do material.

O estudo do fenómeno é muito importante em fase de projeto, dado que a grande maioria das fracturas verificadas em serviço têm a fadiga como causa. Podemos encontrar na empresa várias peças que se tenham fracturado por fadiga, como por exemplo: engrenagens, veios transmissores, manivelas, braços, eixos, etc. .

O mecanismo da fratura por fadiga desenvolve-se através de várias fases sucessivas: a nucleação de fissura; a propagação e a rotura final. (Smith W. – 1998)

A iniciação (nucleação) da fissura acontece normalmente na superfície da peça ou estrutura, tendo em conta que é na superfície que se verifica uma maior concentração de tensões. Também é na superfície que os grãos se encontram menos “ligados” mutuamente, comparando com os grãos no interior da peça, onde estão em contacto com outros grãos em todas as direcções, ficando os da superfície mais vulneráveis a uma deformação plástica quando sujeitos a uma tensão. Na superfície da peça também incidem outros factores promotores da fractura por fadiga, como a oxidação ou as variações térmicas.

Após nucleada a fissura, esta propaga-se inicialmente num sentido de 45° relativamente à direcção das solicitações, progredindo depois a 90° em relação à direcção das forças. A propagação avança quando a tensão é máxima por ciclo, provocando uma deformação plástica na extremidade da fissura, a tensão, ao cessar, “fecha” de novo parte da fissura, mas no entanto, irá acomodar uma pequena deformação plástica, gerando uma nova estria (metais ducteis). Estas estrias formadas são um registo que permitirá deduzir informações sobre as causas e o modo de evolução da fractura. Em vez de estrias, pode ser gerada em alguns materiais mais duros uma “rugosidade fina”. A velocidade de propagação depende da amplitude das tensões que incidem na peça, da sujeição desta a ambientes corrosivos, ou mesmo a possíveis variações térmicas a que a peça esteja exposta.

A fissura evolui até ao momento em que a secção remanescente não consegue suportar a tensão aplicada, dando-se a fractura instável da peça. A figura 4, exemplifica o perfil de fracturas possíveis de provetes de secção redonda para diferentes tensões e também diferentes tipos de secção de provete. (Moura B. – 1998)

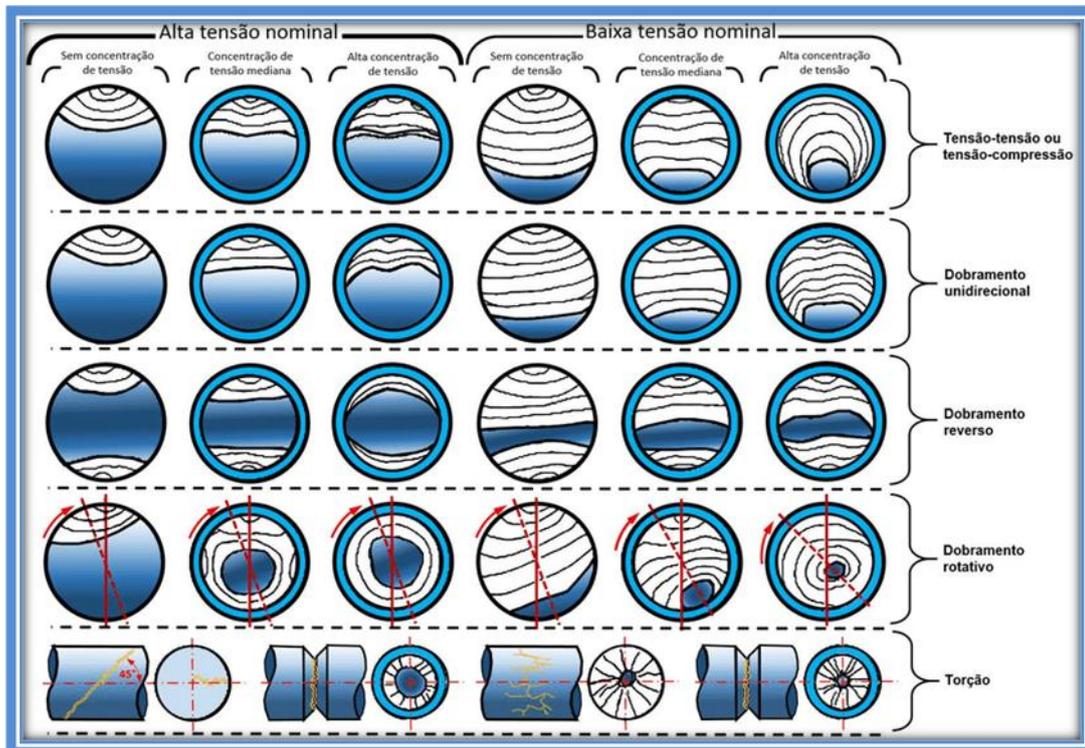


Figura 4 - Perfil de possíveis faces de fractura por fadiga (Inspecaoequipto.blogspot – Julho / 2018)

Para uma melhor compreensão dos termos (conceitos), mencionados à direita na figura 4, segue a “tradução”, sendo os seguintes termos utilizados nos casos estudados:

- ✓ Tensão-Tensão / Tensão-Compressão → **Tracção-Tracção / Tracção-Compressão**
- ✓ Dobramento unidireccional → **Flexão num sentido**
- ✓ Dobramento reverso → **Flexão nos dois sentidos**
- ✓ Dobramento rotativo → **Flexão rotativa**
- ✓ Torção → **Torção**

Dependendo do valor médio das tensões geradas (compressão, flexão, torção), a solicitação pode ser classificada como: alternada, repetida ou pulsante e ondulada. Na realidade, o espectro da fractura pode não encaixar perfeitamente em nenhum destes casos, apresentando um perfil aleatório ou mesmo uma combinação de vários casos. A classificação do espectro traz vantagem na análise da situação em causa, no entanto deve-se ter em conta a interação de ciclos do espectro real. A figura 5, abaixo mostra os tipos de solicitações. (Moura B. – 1998)

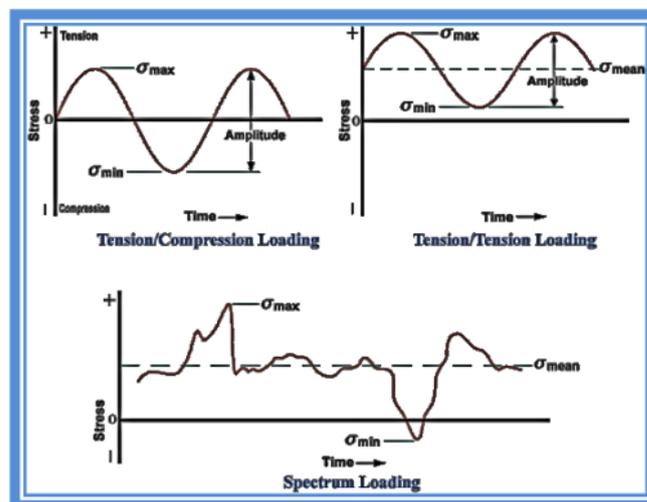


Figura 5 - Tipos de solicitações de tensão em função do tempo  
(NDT-Resouce Center – Julho / 2018)

Tendo por base o caso de tensões alternadas puras, são realizados estudos práticos, que, em determinadas condições (provete isentos de defeitos, sujeitos a flexão rotativa, etc.), podem, através da quantificação do número de ciclos possíveis e até o provete atingir a ruptura, levar à obtenção de um valor limite de tensão (ou tensão limite de fadiga -  $\sigma_{f0}$ ), que, caso não seja ultrapassado, traduz-se numa vida muito longa do provete / material. No caso de aços com uma tensão de ruptura " $\sigma_R$ " aproximadamente 1000 N / mm<sup>2</sup>, o valor da  $\sigma_{f0}$  (tensão limite de fadiga), é sensivelmente metade da tensão de ruptura. Também se verifica, no caso dos aços, uma relação mais ou menos linear entre a dureza superficial medida em Brinel (ensaio não destrutivo) e a tensão de ruptura, sendo que, a partir desta, podemos achar aproximadamente a tensão limite de fadiga, ou seja, para aços até uma determinada  $\sigma_R$ , através da dureza superficial, obtem-se um valor próximo da tensão limite de fadiga.

No estudo de casos reais, o valor da tensão limite de fadiga pode variar consoante o tipo de carga a que a peça em causa está sujeita, sendo necessário considerar factores de correcção: por exemplo, para uma carga axial, verifica-se que o valor de tensão à fadiga é menor do que uma carga aplicada à mesma peça em flexão. Um valor de correcção que tome em conta este efeito será  $C_1 = 0,85$ ; sendo  $C_1 = 1$ , para o caso da flexão. Outros factores devem ser ponderados para a correcção do valor da  $\sigma_{f0}$ , tais como: o tamanho da secção em causa da peça ou estrutura, o efeito do acabamento superficial das peças ou de zonas críticas de estruturas, defeitos internos, a anisotropia dos materiais, a corrosão ou mesmo as condições de serviço (variações térmicas). (Moura B. – 1998)

### 1.3 - Previsão de vida

A previsão de vida de uma peça ou estrutura sujeita à fadiga pode ser analisada de três modos diferentes:

- a) - A iniciação ou nucleação de fenda (curva  $\epsilon$ -N), relação entre a deformação e o número de ciclos;
- b) - O método de vida total/ fadiga de alto ciclo (metodologia S-N), a relação entre a tensão e o número de ciclos a que a rutura ocorre;
- c) - O crescimento da fenda (baseado na mecânica da fractura linear elástica).

(Eugenio S. – 2017)

**a)** – Neste primeiro caso, LCF (Low Cycle Fatigue – fadiga oligocíclica), utilizado em componentes de elevadas prestações e fiabilidade (turbinas ou reactores nucleares), a fadiga desenvolve-se com um número de ciclos relativamente baixo ( $10^4 - 10^5$  ciclos), sendo a magnitude das tensões elevada em torno do defeito, gerando um escoamento dos planos atómicos na região. Para a análise dos casos, utiliza-se a metodologia  $\epsilon$ -N (fadiga controlada por deformações cíclicas); (Moura B. – 1998)

b) – Outro método bastante utilizado em órgãos rotativos de máquinas é o HCF (– High Cycle Fatigue), em que o número de ciclos considerado é bastante elevado (superior a  $10^5 - 10^6$  ciclos). Verifica-se, para tensões nominais elásticas relativamente baixas (os níveis de tensão e deformação não podem ultrapassar o limite elástico do material), sendo necessário um grande número de ciclos para que a fractura por fadiga ocorra. Em laboratório e com dispositivos concebidos para o efeito, submetem-se provetes normalizados a ensaios de flexão, em que o número de ciclos é contabilizado numa escala logarítmica até à falha do provete. A informação é extraída para um gráfico onde é analisada a curva resultante designada como S-N (“stress – number of cycles”), que estabelece uma relação entre a tensão e o número de ciclos em que a rotura ocorreu. Quanto maior for a tensão aplicada, menor será o número de ciclos que o material suportou. Em ligas de aço carbono, a curva S-N (figura 6, curva - A) mostra que a resistência à fadiga diminui com aumento do número de ciclos até atingir uma tensão em que a resistência à fadiga estabiliza independente do aumento do número de ciclos, ou seja, o material atingiu a sua tensão limite de fadiga, abaixo do qual a falha por fadiga não vai ocorrer. Muitas ligas ferrosas apresentam uma tensão limite de fadiga, que é sensivelmente metade da sua tensão de rotura. As ligas não ferrosas (figura 6, curva – B), como por exemplo, ligas de alumínio, não apresentam tensão limite de fadiga e podem ter uma resistência à fadiga na ordem de um terço da sua resistência à tracção. (Moura B. – 1998)

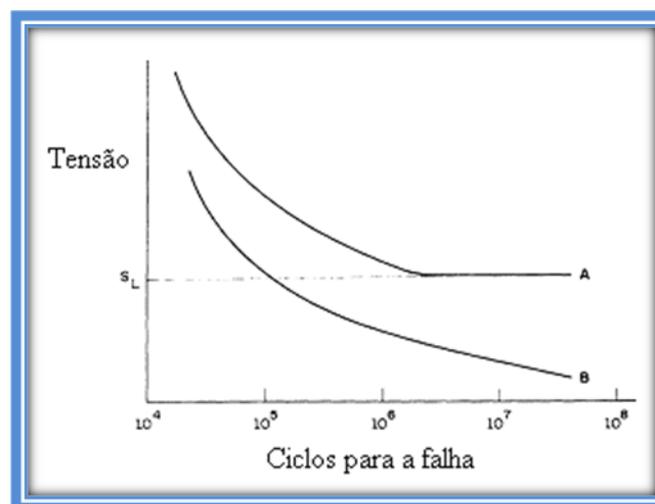


Figura 6 – Resistência à fadiga (Curvas S-N, para um aço-carbono (curva A); para uma liga de Al (curva B))  
([slideplayer.com.br/slide/10423299/](http://slideplayer.com.br/slide/10423299/) - Junho / 2018)

c) - A compreensão do efeito de concentração de tensões, que é caracterizado por um parâmetro designado por  $k_t$  pode ser comparável ao do escoamento de um fluido dentro de um canal. Como mostrado na figura 7 b), as linhas/fluxos de força estão uniformemente distribuídos por toda a secção do “perfil”, até se aproximarem do furo, entalhe, ou defeito sofrendo um constrangimento em torno do obstáculo em causa. A quantificação do factor de concentração de tensões é calculado através de equações analíticas, métodos numéricos, ou através de gráficos que traduzem a concentração de tensões. Um exemplo da concentração de tensões  $k_t$  para um furo numa placa submetida a tracção está exemplificado na Figura 7 a). É um factor primordial no projecto de componentes mecânicos, devendo ser considerada logo na fase de projecto de estruturas ou peças que venham a ser solicitadas a esforços intensos e dinâmicos. A geometria e o design das peças devem ser o mais “harmónico” possível. Uma fenda iniciada por fadiga normalmente ocorre em regiões da peça ou estrutura onde a concentração de tensões é significativa, como por exemplo: reduções abruptas de secção, cantos, entalhes, roscas, etc, ou também a partir de inclusões (defeitos internos), resultantes dos processos produtivos ou de processamento deficiente. (Smith W. – 1999 /

Eugenio S. – 2017)

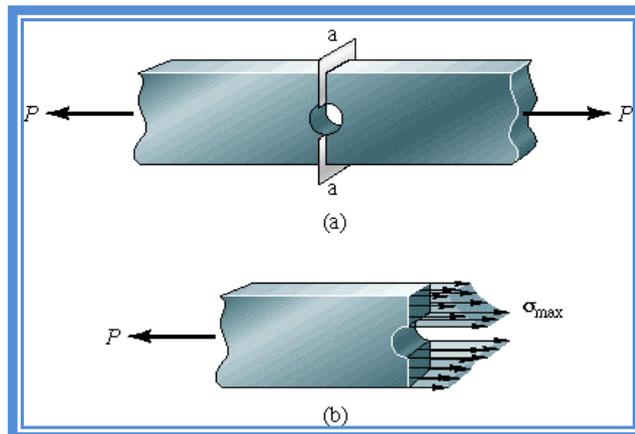


Figura 7 - a) Definição de concentração de tensão  $k_t$ , b) Fluxo de "linhas" de força presentes em torno do furo da peça. (Freitas M. – 2018 – Aula sobre a quantificação do cálculo de FCT)

$$k_t = \frac{\sigma_{max.}}{\sigma_0} \quad (a)$$

$\sigma_0$  = Tensão nominal

No entanto, quando se trata de um orgão ou estrutura de um sistema, a tensão limite de fadiga -  $\sigma_{f0}$  correspondente pode ser consideravelmente menor do que o valor de  $\sigma_{f0}$  obtida por ensaio do material em causa. Esta diferença pode ser tomada em consideração através da introdução de coeficientes de correcção: (Moura B. – 1998)

$$\sigma_{f0} = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * \sigma_n \quad (b)$$

Em que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{f0} = \text{Tensão limite de fadiga corrigida para um caso prático;} \\ \sigma_n = \text{Tensão limite de fadiga obtido por ensaio laboratorial;} \\ k_a = \text{Factor de correcção devido ao acabamento da superfície da peça;} \\ k_b = \text{Factor de correcção devido às dimensões em causa;} \\ k_c = \text{Factor de fiabilidade;} \\ k_d = \text{Factor de temperatura;} \\ k_e = \text{Outras afectações consideradas.} \end{array} \right.$$

A metodologia da mecânica de fractura linear elástica (MFLE) é baseada num procedimento analítico que relaciona a distribuição do campo de tensões na vizinhança da extremidade do defeito com a tensão nominal aplicada na peça ou estrutura e também com o tamanho, a forma e a orientação do defeito. O foco da análise deste tipo de fractura são as tensões em torno da extremidade dum defeito.

Para analisar a tensão na extremidade de um defeito é utilizado um parâmetro denominado “ $K_I$ ” (para o modo I de ensaio, no qual a abertura da fenda é provocada por uma tracção). O  $K_I$  é um factor de intensidade de tensão na extremidade do defeito e é calculado por:

$$K_I = Y * \sigma * \sqrt{\pi * a} \quad (c)$$

Em que:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_I = \text{Factor de intensidade de tensão;} \\ Y = \text{Constante geométrica adimensional da ordem de 1;} \\ \sigma_c = \text{Tensão nominal aplicada;} \\ a = \text{comprimento do defeito superficial / metade do comprimento do defeito interno.} \end{array} \right.$$

O valor crítico do factor de intensidade de tensão que provoca a fractura da peça (propagação), designa-se por tenacidade à fractura “ $K_{IC}$ ” do material e pode ser obtido através de:

$$K_{IC} = Y * \sigma_c * \sqrt{\pi * a} \quad (d)$$

Em que:  $K_{IC}$  = Factor crítico de intensidade de tensão (tenacidade à fractura);

Numa estrutura / peça com defeitos em que o  $K_I$  atinge o valor de  $K_{IC}$  da tenacidade do material, ocorre a propagação da fissura e fractura de forma instável, sendo que para materiais frágeis, tem-se baixos valores de  $K_{IC}$ , enquanto para materiais dúcteis, verificam-se altos valores de  $K_{IC}$ .

Os valores de  $K_{IC}$  dos materiais são obtidos através de ensaios com provetes normalizados e em condições determinadas (ASTM E399).

#### 1.4 – Fractura por fadiga em estruturas soldadas

A soldadura como mecanismo de ligação entre peças e conjuntos assume na empresa e na metalomecânica em geral um papel importante face ao tempo despendido, comparando com outros modos de ligação (aparafusagem, rebitagem) e considerando, também o baixo custo do processo.

No entanto, o processo implica algumas desvantagens, tendo em conta o comportamento à fadiga das juntas soldadas. Maioritariamente, os processos mais utilizados são o Mig-Mag (“metal inert gas” / “metal active gas”), em que o gás projetado sobre o banho do cordão (metal de adição e os bordos das peças a soldar no estado líquido), irá protegê-lo da envolvente atmosférica até à sua solidificação. O processo utilizado na empresa é o Mag, dado que na mistura de gases entra uma parte de CO<sub>2</sub>, fazendo com que a mistura deixe de ser totalmente inerte. O comportamento de juntas soldadas à fadiga pode depender de muitos factores, tais como:

- ✿ A) - Geometria das juntas (juntas topo a topo, canto);
- ✿ B) - Distribuição de tensões (geometria / design);
- ✿ C) - Material de base e o seu estado metalúrgico;
- ✿ D) - Meio ambiente (variações térmicas e meio corrosivo);
- ✿ E) - Tensões residuais;
- ✿ F) - Defeitos de soldadura.

(Moura B. – 1998 / Eugenio S. - 2017).

**A)** As juntas podem ser de topo a topo ou de canto (tipo de junta mais utilizado na empresa), podendo cada uma destas assumir algumas formas diferentes de perfil, consoante o tipo de chanfros utilizados. O modo mais comum de analisar o comportamento à fadiga de juntas soldadas é através das curvas S-N, utilizando a tensão nominal em ordenadas. Dependendo do valor da tensão nominal e do tipo de solicitação (tracção, torção, flexão), actuante nas peças em causa, consegue-se quantificar a resistência do conjunto soldado em causa. O comportamento da junta pode também ser condicionado pela forma de como é realizado o chanfro. Este pode ser feito mecanicamente com uma ferramenta de corte por arranque de avara, ou através de oxicorte (maiores espessuras ou peças complexas / pesadas), sendo que, de ambos os modos de abertura de chanfro, se obtêm rugosidades diferentes. Uma superfície obtida por oxicorte deve ser rectificadas, para que possa diminuir significativamente a sua rugosidade a fim de diminuir a probabilidade da nucleação de fissuras.

A posição de realização do cordão de soldadura também é uma variável importante no estudo das juntas, dado que um cordão assimétrico ou irregular gera zonas de pouca penetração na raiz da junta, ou uma penetração mais pronunciada num dos bordos da junta. As posições ao “baixo” devem ser preferidas em vez das posições “verticais” e ao “tecto”, dado que o operador tem mais facilidade em controlar o “banho” (metal fundido pouco viscoso). (Moura B. – 1998)

**B)** A propagação de uma fissura numa peça é muito potenciada pela concentração de tensões induzidas pela descontinuidade geométrica provocada pelo cordão, comparando com uma peça de iguais características sem um cordão de soldadura (lisa). Se a intensidade da tensão nominal (ou o factor de concentração de tensões) atingir uma tensão máxima superior à tensão de cedência do material, a intensificação das tensões localizadas nas regiões adjacentes será cerca de três vezes superiores à tensão nominal, podendo provocar a plastificação dessas zonas. Caso exista um defeito de soldadura, a concentração de tensões aumenta consideravelmente. (Moura B. – 1998)

**C)** O carbono é um elemento que aumenta efectivamente o endurecimento do metal, contribuindo para o aumento da resistência mecânica deste, no entanto produz desvantagens nas características de soldabilidade de um aço, devido à formação de estruturas perlíticas e ou bainíticas. A adição de elementos como o azoto, o alumínio, o nióbio e o vanádio vão produzir reacções de endurecimento pela precipitação de nitretos, provocando a formação de ferrite com um grão mais fino, o que permite reduzir os teores de carbono até 0,05%, melhorando substancialmente a soldabilidade do aço. Estes tipos de aços podem apresentar tensões de cedência na ordem dos 450 – 550 N/mm<sup>2</sup>. Para espessuras superiores a 25 mm, podem ser obtidos aços cujas propriedades se obtêm por tratamentos térmicos (têmpera e revenido) e com a adição de crómio, molibdénio ou níquel, estes aços podem apresentar tensões de cedência que podem chegar a 700 N/mm<sup>2</sup>, mantendo ainda assim boas condições de soldabilidade.

A escolha de um aço deve satisfazer um compromisso entre uma boa resistência mecânica, uma boa tenacidade à fractura e uma resistência considerável à fadiga (se a peça estiver sujeita a cargas cíclicas, tal como a possibilidade de conformação e soldabilidade). Um aço que não tenha boas características de soldabilidade pode originar defeitos como o arrancamento lamelar, a fissuração induzida pela presença de hidrogénio ou a fissuração na solidificação do banho do cordão. (Moura B. – 1998)

**D)** Existem vários parâmetros que condicionam a fractura por fadiga por corrosão (tensão aplicada, a constituição do material, a relação entre a tensão e o tempo, a intensidade da corrosão). Um provete que esteja ou tenha estado sujeito a um ambiente corrosivo, comparado com um provete igual que permaneça ao “ar” apresenta curvas S-N diferentes, sendo que o primeiro tem menor resistência à fadiga, resultante da corrosão, que funcionam como zonas de concentração de tensões (por exemplo a corrosão por picadas). Em meio corrosivo, o número de ciclos necessário para a iniciação e propagação de uma fissura é menor, em comparação com um mesmo provete exposto ao ar atmosférico. Um provete com uma junta soldada comparado com um provete liso (ambos expostos ao mesmo ambiente corrosivo) apresenta diferenças consideráveis se for considerada a periodicidade da molhagem (solução corrosiva), ou seja, a resistência de uma peça sujeita a fadiga é maior se a junta for molhada por períodos mais curtos (na ordem de alguns minutos). A oxidação atmosférica diminui a resistência à fadiga, fruto de transformações estruturais ocorridas no provete com junta soldada (comparando com o provete liso). Se, ao ambiente corrosivo e à fadiga, juntamos o aumento de temperatura, a resistência à fadiga de uma peça soldada irá baixar ainda mais. (Moura B. – 1998 / Eugenio S. - 2017)

**E)** As tensões residuais são aquelas que permanecem numa peça ou estrutura na ausência de solicitações exteriores, sendo fruto de deformações térmicas ou mecânicas em paralelo com a cedência plástica do metal. Estas tensões podem ter origem em operações de laminagem, conformação, tratamentos térmicos, ou soldadura. As tensões geradas em juntas soldadas devem-se a deformações inelásticas aleatórias geradas pelo efeito dos ciclos térmicos da soldadura por fusão (por exemplo no processo Mig-Mag).

A região em torno da junta das peças a unir é sujeita a um gradiente térmico considerável, provocando dilatações e contrações no metal depositado e no metal base. Estas variações dimensionais, ao serem restringidas, provocam na peça tensões residuais, sendo que, para o comportamento à fadiga da junta soldada, são particularmente importantes as tensões residuais de tracção (nas direcções longitudinais e transversais). Quando uma peça soldada em que estão presentes tensões residuais é solicitada por uma carga de tracção numa direcção coincidente com as tensões pré existentes, verifica-se uma interacção com as forças residuais e a carga aplicada, que somadas podem atingir a tensão de cedência do metal e nuclearem uma fissura. Por outro lado, a progressão da fissura pode anular ou minimizar as tensões residuais, o que não invalida a fractura por fadiga, uma vez nucleada a fissura. (Moura B. – 1998)

**F)** Na construção soldada, podem ocorrer defeitos com origem no processo de soldadura ou originados por fadiga. A aceitabilidade desses defeitos depende de muitos factores relacionados com as características dos defeitos em causa em função das condições de serviço a que a estrutura irá estar sujeita. Os defeitos não planares são porosidades e inclusões no cordão ainda no estado líquido; Os defeitos podem ser classificados como “planares”, tratando-se essencialmente de fissuras e defeitos de forma (mordeduras, sulcos, concavidades na raiz). A influência da porosidade é quantificada através de radiografia que permite deduzir qual a percentagem da redução da secção do cordão devido à presença de poros (área da secção do cordão menos o somatório das áreas dos poros presentes num determinado ponto do cordão). Este parâmetro designa-se por “severidade do defeito”. Existem dois tipos de poros: os internos e os poros de superfície, sendo estes os mais graves e que podem ainda agravar as suas consequências, quando sujeitos ambientes corrosivos. A resistência à fadiga diminui com o aumento da porosidade, dado esta actuar como concentradores de tensão, provocando a nucleação de fissuras.

Os defeitos planares têm nas fendas os casos mais graves, dado que a fenda é uma evidência, estando pronta a propagar-se provocando a fractura da peça.

Quanto aos defeitos de forma, estão essencialmente relacionados com os parâmetros de processo e a preparação das juntas. Actuam tal como os poros, sendo pontos ou “linhas” concentradoras de tensão. Consoante as condições de serviço da peça ou estrutura, devem ser estabelecidos critérios de aceitação de defeitos para que se possa diminuir a probabilidade de falha. (Moura B. – 1998)



## 2 - Caracterização de casos reais

### 2.1 - Morfologia

A morfologia de uma superfície de fractura por fadiga é condicionada pelos factores que afectam o processo de fractura, ou seja, depende do estado de tensão em causa e o meio onde a peça está inserida (alta temperatura e/ou meios corrosivos). Aquilo que define o mecanismo de fractura pode ser dividido em dois tipos de características distintas: macroscópicas e microscópicas. (Moura B. – 1998)

**Microfractografia** – A análise de uma fractura por fadiga pode ser seriamente condicionada pela não existência de linhas de paragem ou radiais, entre outras características. O avanço tecnológico (MEV – Microscopia electrónica por varrimento, ou SEM “em inglês”), tornou possível o estudo microscópico de fracturas que não evidenciem características ao nível macroscópico. Com a ajuda destes recursos, vieram-se a revelar outras características comuns em superfícies de fracturas por fadiga, por exemplo as “estrias”, nomeadamente as fracturas que ocorrem em planos a 90°. As estrias desenvolvem-se a nível microscópico dentro de uma área limitada por marcas macroscópica do tipo – linhas de paragem. Cada uma destas áreas pode ter associadas milhares de estrias. Cada estria é produzida por um ciclo de carga, embora a presença de estrias indique de forma evidente a fadiga como causa da fractura. No entanto, nem todos os ciclos de carga produzem necessariamente uma nova estria.

Para valores muito elevados da variação de “ $k_t$ ” (factor de concentração de tensões em torno da extremidade do defeito), pode ocorrer a formação de microcavidades características de fracturas dúcteis. Para valores baixos da variação de “ $k_t$ ”, podem ocorrer fracturas por mecanismos de clivagem, com a formação de faces de clivagem. Para valores intermédios de variação de “ $k_t$ ” e no caso de materiais pouco tenazes, o mecanismo de crescimento de uma fissura pode ter a contribuição de modos de fractura diferentes do mecanismo de fractura por formação de estrias, podendo ocorrer através de mecanismos de fractura mistos, dependendo estes do estado de tensão, do tipo de sollicitação, fissuração intergranular e até a coalescência de microcavidades. (Moura B. – 1998)

**Macrofractografia** – Uma fractura por fadiga propaga-se numa direcção normal à direcção de aplicação de carga. Normalmente pode ter uma aparência lisa e sem sinais de deformação plástica, sendo semelhante a uma fractura frágil. Ainda assim, pode ter marcas ou outras particularidades que permitem caracterizar este tipo de fractura. Uma vez iniciada, a fissura propaga-se lentamente e quase sempre a progressão não é uniforme, havendo zonas que indicam um crescimento rápido e outras que indicam um crescimento lento. Esta intermitência na progressão promove o aparecimento das chamadas “linhas de paragem” ou “linhas frontais”, sendo fruto da variação da tensão aplicada. São uma das características morfológicas macroscópicas duma superfície de fractura por fadiga. Uma fractura por fadiga pode iniciar-se em vários pontos de uma peça, propagando-se no mesmo plano ou em planos paralelos, que a determinada altura se podem ligar entre si, formando um degrau. Uma outra característica macroscópica, além das linhas de paragem, são as linhas radiais ou nervuras, que “apontam” para o defeito que originou a fissura.

Quando uma fissura por fadiga atinge dimensões críticas, para a tenacidade do material e tensão aplicada, acontece o colapso instável da peça ou estrutura em causa, por fractura dúctil (superfície menos rugosa) ou frágil (superfície com maior rugosidade e com eventuais linhas de paragem). Habitualmente, esta região apresenta uma superfície com uma textura mais rugosa e sem linhas de paragem, o que facilita a distinção fácil dos dois tipos de fractura em causa.

Quer as linhas de paragem, quer as linhas radiais, são evidências macroscópicas importantes para a análise da fractura, no sentido de encontrar a sua causa, para que possam ser estabelecidas acções correctivas futuras, de forma a evitar situações idênticas. (Moura B. – 1998)

## 2.2 – Casos analisados:

Foram analisadas algumas peças constituintes de produtos da empresa, que fracturaram em serviço, tendo sido reservadas pelo Departamento da Qualidade, para utilizações como acções de sensibilização e formação. Pretendeu-se referir em cada caso: o material constituinte da peça fracturada em causa e através de uma verificação macrográfica, tentar classificar com base na figura 4, o tipo de fractura ocorrida, tal como as solicitações que contribuíram para a ruína de cada peça. O anexo contém informação fotografica complementar a cada caso, assim como os desenhos técnicos referentes a cada peça analisada, excepto o caso “Perno de fixação” de máquina ferramenta, do qual não existe desenho.

Os casos considerados foram ordenados de “C1 a C7”:

- ✿ C1) - Veio de Charrua;
- ✿ C2) - Manga de eixo de grade A2CP;
- ✿ C3) - Extremidade de eixo de grade GVR;
- ✿ C4) - Pinhão de engrenagem (Veio);
- ✿ C5) - Roda dentada;
- ✿ C6) - Manivela de toldo;
- ✿ C7) - Perno de fixação de máquina ferramenta.

(As fotos mencionadas do subcapítulo 2.2 e no anexo complementar, têm como fonte, os departamentos da Qualidade e Comercial da Galucho).

### **C1) - Veio de Charrua:**

Uma charrua (figura 8), é uma alfaia agrícola composta por duas partes ligadas pelo veio em causa (ver figura 1 do anexo A). Este liga o “corpo”, que é acoplado ao tractor agrícola, ao suporte que sustenta as aivecas (lâminas), que entram na terra e fazem-na virar. Este suporte das aivecas roda sobre si mesmo mecanicamente a 180°, para que o tractor possa lavrar em sentidos diferentes. O material (veio com 77 mm de diâmetro), constituinte é um aço 42CrMo4 – tratado ( $1000\text{N/mm}^2$  – têmpera e revenido).

A fractura da peça mostrada na figura 9, apresenta linhas de paragem e regiões opostas bastante pronunciadas e uma região respeitante à fractura final muito irregular. Com base na figura 4, deduz-se que o veio foi sujeito a tensões nominais elevadas, sujeito a uma flexão alternada - sentidos opostos, dada a rotação dos 180°, com uma acumulação média de tensões. Estas tensões geram-se na superfície do veio, devido à rugosidade (sulcos) deixada pelo acabamento na fase de torneamento do veio. A razão para a ruína da peça pode ser minimizada com um melhor acabamento (polimento) do veio.

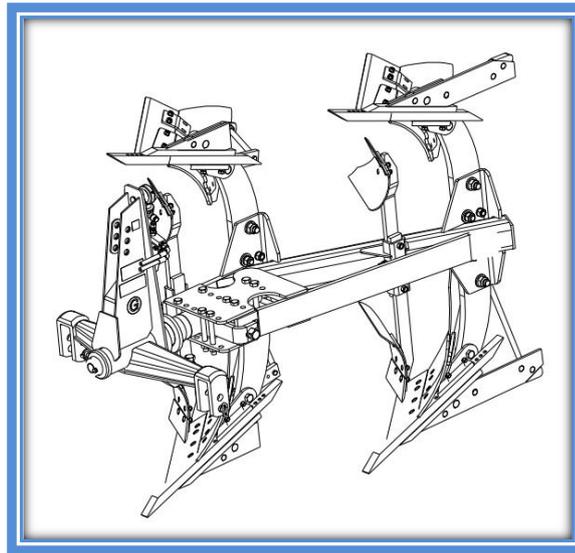


Figura 8 - Charrua de dois ferros (aivecas)

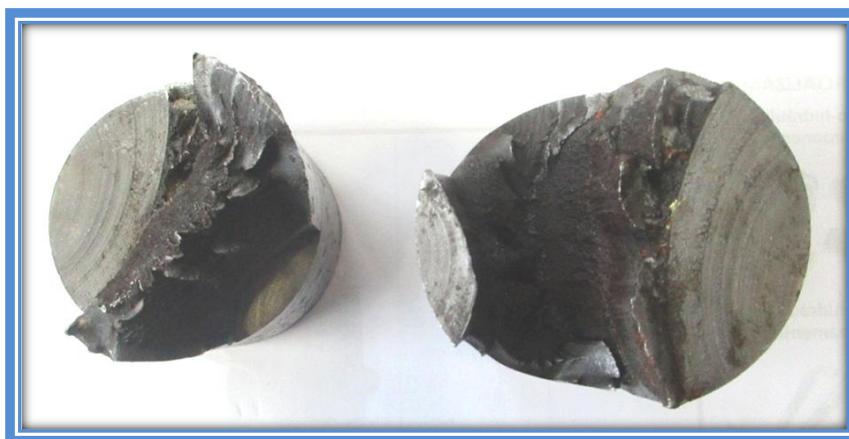


Figura 9 - Dois extremos do veio resultantes da fractura.

**C2) - Manga de eixo de grade A2CP:**

A grade A2CP (figura 11), faz parte da gama de “grades ligeiras” que a Galucho oferece no seu catálogo. Esta consiste num chassis que se articula no mesmo plano, entre duas partes que acabam por ser dois suportes de rolos de discos que rasgam o solo, revirando a terra. Devido ao peso, para o transporte da grade em estrada, é feito baixar um trem com um eixo e duas rodas acopoladas. A peça fracturada é a manga de eixo que suporta o cubo da roda. O aço utilizado para o veio (50 mm de diâmetro), é um aço 42CrMo4 – tratado ( $1000 \text{ N/mm}^2$  – têmpera e revenido), bastante utilizado em construção de peças já com alguma complexidade em termos mecânicos (articulações, engrenagens, peças maquinadas, etc.).

A superfície fracturada mostrada na figura 12, apresenta claramente as regiões respeitantes à progressão da fractura, como as linhas de paragem e as linhas radiais / nervuras, tal como a região respeitante à fractura instável. Tendo por base a figura 4, conclui-se que estão em causa altas tensões nominais, tratando-se de uma flexão alternada, com um nível elevado de concentração de tensões. A concentração de tensões em causa é devida ao pequeno raio de concordância verificado na redução de secção que a peça apresenta naquela região. A acção correctiva desta fractura passou por aumentar o raio de concordância de 1 para 2 mm, tendo em conta o polimento da superfície. Outra possibilidade teria sido o aumento do diâmetro do veio, de forma a deixar de ter tensões nominais elevadas. Esta medida teria uma enorme implicância noutras peças contíguas.

Analisando a figura 10, podemos através do gráfico apresentado, quantificar aproximadamente a redução do factor de concentração de tensões, considerando o raio de concordância existente antes da fractura e o raio de concordância corrigido (aumentado), entre as duas secções distintas. Começou-se por seleccionar uma das curvas referidas no gráfico, dividindo o diâmetro maior pelo diâmetro menor ( $45/30 = 1,5$ ). Seguiu-se a obtenção do valor que relaciona cada raio de concordância com o menor diâmetro em causa ( $1^\circ \text{ raio} = 1/30 = 0,033$ ; depois da correcção o  $2^\circ \text{ raio} = 2/30 = 0,066$ ). Estes valores foram posicionados no eixo das abcissas e “elevados” até atingirem a curva “1,5”, sendo depois reflectidos no eixo das ordenadas obtendo-se o factor de concentração de tensões “ $k_t$ ”, antes e depois da alteração do raio de concordância.

De seguida achou-se a diferença entre os dois valores ( $2,32 - 1,92 = \mathbf{0,39}$ ), sendo que o valor máximo de  $k_t$  foi os 2,32 deduz-se que houve uma redução do factor de concentração de tensões de aproximadamente **17%**, após o aumento do raio de concordância entre as diferentes secções.

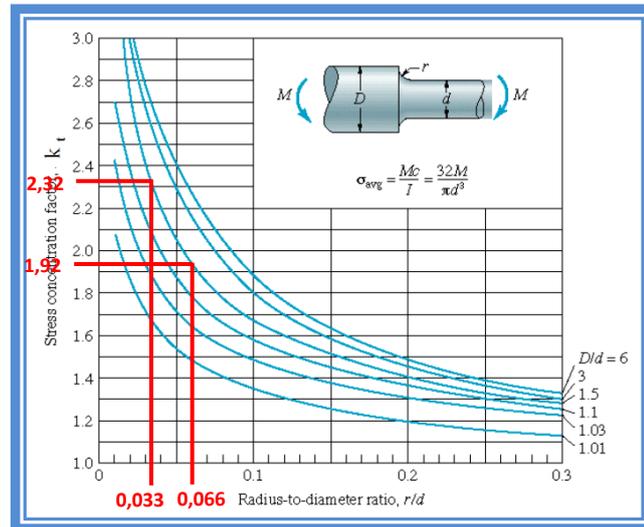


Figura 10 - Relação entre o Factor de Concentração de Tensões e o raio de concordância, em variações de secção

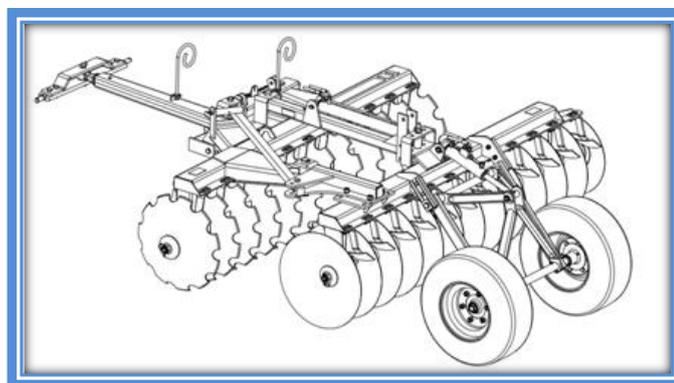


Figura 11 - Grade A2CP



Figura 12 - Duas superfícies resultantes da fractura do eixo

### C3) - Extremidade do eixo de grade GVR:

Este eixo é aplicado em quase toda a gama das grades pesadas. Este tipo de grades (figura 14) são essencialmente um chassis rígido rebocado sobre um eixo, suportando sob a sua estrutura um conjunto variável de braços, que por sua vez sustentam rolos de discos que sulcam e reviram a superfície do solo. A diferença entre esta gama de grades e as grades ligeiras prende-se com a largura de trabalho, ou seja, grada mais metros em relação às grades ligeiras. Logo as forças, tal como a massa em causa, são maiores. O aço empregue neste veio de secção quadrada (lado igual a 70 mm) é um CK45, ( $700 \text{ N/mm}^2 - \sigma_R$ ).

Na superfície de fractura do eixo, apresentada na figura 15, verifica-se notoriamente os dois tipos de textura resultante da progressão da fractura por fadiga (linhas de paragem e as linhas radiais / nervura) e ainda outra relativa à ruptura abrupta da secção remanescente. Comparando com os modelos da figura 4, depreende-se que estão em causa elevadas tensões nominais, tratando-se de uma flexão unidireccional, sendo o nível de concentração de tensões mediano. A concentração de tensões deve-se neste caso ao raio de concordância entre as secções não ter a dimensão suficiente para permitir um escoamento razoavelmente “fluido” entre as duas cotas. A correcção desta situação passou por aumentar o raio de concordância de 0,8mm para 2 mm, tendo sempre em conta o polimento da superfície do raio.

A figura 13 expõe o mesmo raciocínio exposto no caso C2, tendo-se verificado uma redução do factor de concentração de tensões próxima de **18%**, em relação às dimensões do primeiro raio de concordância (0,8mm).

Na verdade, esta fractura consiste numa flexão em dois sentidos, ou seja, existem duas regiões opostas que evidenciam linhas de paragem. Mas entretanto, uma delas é muito pequena, razão pela qual foi menosprezada, uma vez que os casos atrás referidos já são classificados como “flexão nos dois sentidos”. Numa primeira abordagem e pensando nas condições de serviço, é inequívoco tratar-se de uma flexão unidireccional, dado ser um eixo estático em que as suas extremidades estão sujeitas à flexão. Porém, quando a grade é deslocada em estrada ou caminhos rurais, os braços que suportam os rolos sobem para uma posição vertical fazendo subir bastante o centro de gravidade da grade, que somando o facto da grade em causa estar equipada com uns pneus com uma largura considerável (grande volume de ar), provocam um balanceamento lateral na máquina em movimento, provocando a alternância da flexão, originando a pequena região de propagação de fractura menosprezada na discussão do caso.

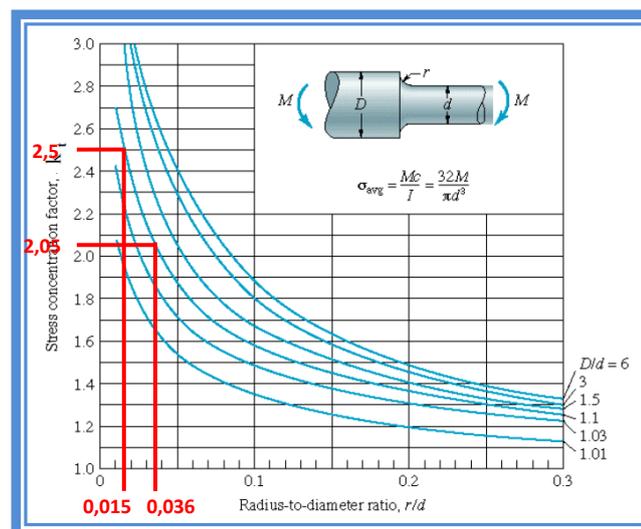


Figura 13 - Relação entre o Factor de Concentração de Tensões e o raio de concordância, em variações de secção

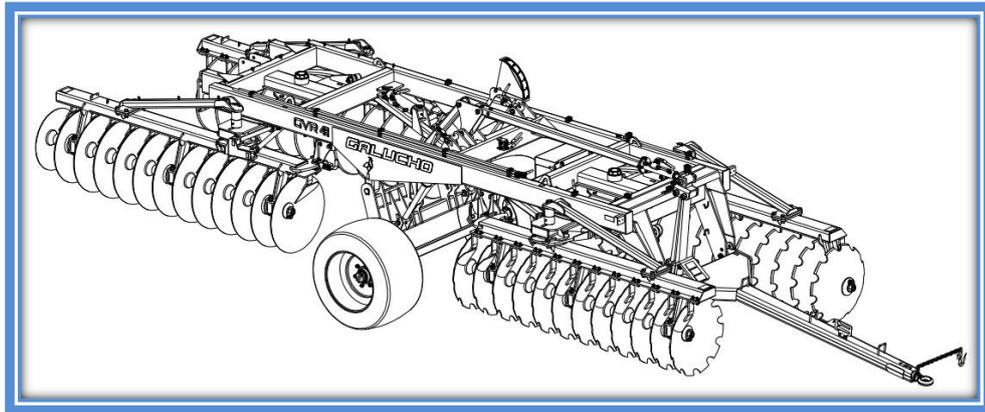


Figura 14 - Grade GVR



Figura 15 - Extremidade do eixo da grade GVR fracturada

#### **C4) - Pinhão de engrenagem (Veio):**

Trata-se de um veio maquinado constituínte duma “caixa redutora” aplicada a um “corta mato” (figura 16), que é uma alfaia agrícola, que sendo acoplada a um tractor e accionada por este, faz girar um conjunto de “facas” com a finalidade de limpar ervas e arbustos na preparação de terrenos para as sementeiras. O aço empregue nesta peça é um 15CrNi6, cementado após maquinagem (elevada dureza superficial).

A superfície de fractura do veio, mostrada na figura 17, apresenta alguma oxidação (dada a idade da peça), o que faz com que, mesmo na melhor das fotos, não seja muito perceptível a região onde se verificam as poucas linhas de paragem (pelo facto de quase não haver concentração de tensões). Apenas com a observação atenta da própria peça, as linhas de paragem são visíveis. Com base na figura 4, pode-se concluir que a tensão nominal da peça é elevada em determinado momento (quando a alfaia é levantada para manobra do tractor), estando o “pinhão”, sujeito a um misto entre torção e flexão (mais significativo), com um baixo nível de concentração de tensões, que ainda assim se localizavam num dos vértices interiores dos escateis abertos no veio. A fractura final descreve um ângulo de  $45^\circ$  em relação ao eixo do veio e quase não apresenta linhas de paragem, dado a alta tensão nominal e a baixa concentração de tensões. Concluiu-se que as causas para falência da peça estiveram relacionadas com a má utilização por parte do operador, ou seja, o facto de ter sido utilizado um cardan (veio de ligação com o comprimento variável e as extremidades articuladas), com tamanho excessivo, que provocou uma tensão entre o corta mato e o tractor através do cardan, gerando assim uma “flexão rotativa” no pinhão da caixa redutora, levando-o à fractura. Foram recomendadas ao utilizador da alfaia, as dimensões adequadas para o cardan.

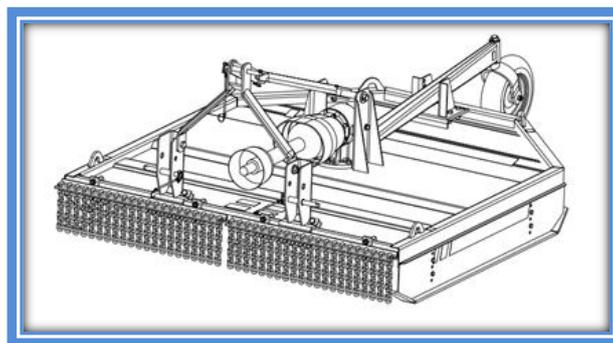


Figura 16 - Corta mato



Figura 17 - Veio  
(pinhão)  
fracturado

**C5) - Roda dentada:**

A roda dentada (cónica de dentes rectos), analisada de seguida, faz parte de um conjunto de órgãos mecânicos constituintes de uma “caixa redutora” aplicada numa “brocadora” (figura 18 - alfaia que sendo acoplada a um tractor serve para abrir furos na terra). O aço utilizado nesta roda dentada é um 15CrNi6 cementado após maquinagem (elevada dureza superficial).

Na superfície de fractura que pode ser observada na figura 19, são visíveis as duas texturas distintas: a parte correspondente à progressão da fractura por fadiga (ao centro), tal como as partes laterais correspondentes à fractura abrupta. De salientar que as fotografias apenas contemplam uma parte da peça fracturada. Tendo em conta a figura 4, conclui-se que a fractura ocorre sob uma tensão nominal baixa, sendo a peça sujeita a uma flexão unidireccional, com média concentração de tensões. A fractura ocorre a partir de um possível vértice correspondente a uma variação de secção, ou uma descontinuidade geométrica, onde se verifique uma concentração de tensões. A acção correctiva centrou-se na utilização de ferramentas de corte (torneamentos e fresagem), em que o raio das pastilhas aumentou até ao ponto de não deixar marcas pronunciadas de maquinagem nas peças.

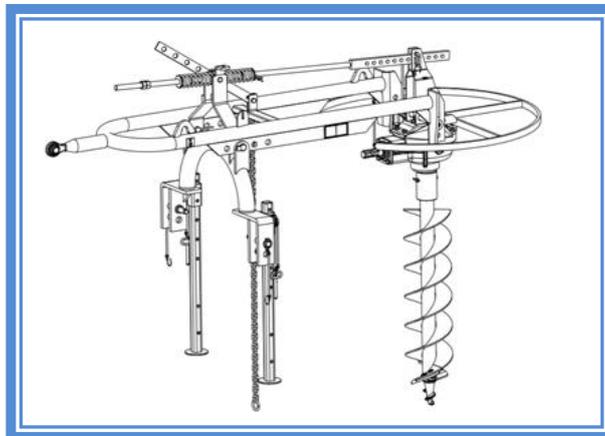


Figura 18 - Brocadora



Figura 19 - Roda dentada fracturada

### C6) - Manivela de toldo:

A manivela em causa é a primeira de duas peças que não faz parte duma alfaia agrícola, é parte de um acessório dos semi reboques (materias circulantes rodoviários), que a empresa constrói para o transporte de inertes. Faz parte do enrolador manual de um toldo (figura 21), que cobre a superfície da carga. O aço utilizado é um varão com 25 mm de diâmetro, em CK45 (calibrado).

Embora a peça esteja um pouco oxidada, a superfície da fractura expressa claramente as duas texturas distintas (a sequência das linhas de paragem e a rotura final). Comparando a fractura com as hipóteses da figura 4, conclui-se que estavam em causa tensões nominais baixas (esforço manual), tratando-se duma flexão alternada, com uma elevada concentração de tensões. As fotos não mostram a parte mais pequena resultante da fractura e a peça consiste na extremidade de um varão que é desbastado (fresagem) de ambos os lados. A fractura ocorre devido à inexistência de um raio de concordância entre as faces perpendiculares. A acção correctiva passou por realizar a operação de fresagem com uma ferramenta que permita a execução de um raio de concordância com cerca de 2 mm, tendo em conta o polimento da superfície. A figura 20, tenta de uma forma comparativa e um pouco vaga (dado as secções em causa não serem as mesmas do exemplo do gráfico), quantificar a redução do factor de concentração de tensões, depois do aumento do raio de concordância.

O raciocínio teórico é o mesmo que foi realizado no caso “C2”, tendo-se obtido uma redução de cerca de **~ 72%** do factor de concentração de tensões.

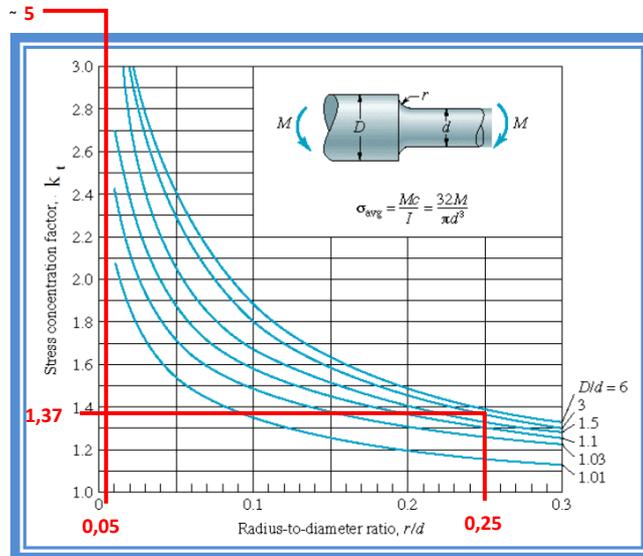


Figura 20 - Relação entre o Factor de Concentração de Tensões e o raio de concordância, em variações de secção

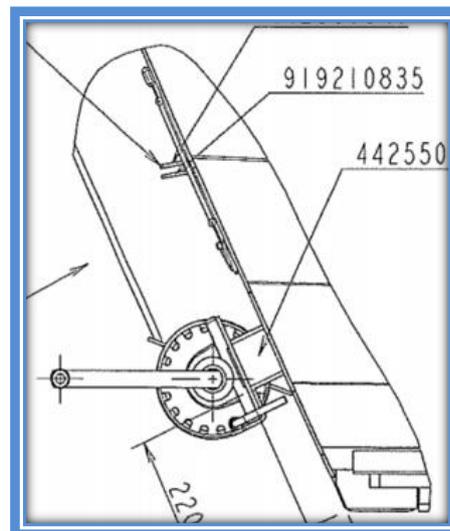


Figura 21 - Localização do enrolador do toldo



Figura 22 - Parte da manivela fracturada

### **C7) - Perno de fixação de máquina ferramenta:**

O perno em causa apresentado na figura 23, não faz parte de nenhum produto da empresa, sendo uma peça de fixação de uma prensa hidráulica ao solo. Liga a base da máquina a uma placa metálica de assentamento que está “chumbada” na fundação de betão armado. É um varão com uma polegada e meia de diâmetro, em aço CK45 (não tratado).

Na face da fractura mostrada na figura 24, são evidentes as duas regiões relacionadas com a progressão das sucessivas linhas de paragem e a região da ruptura final. Comparando a face de fractura com os exemplos da figura 4, depreende-se que a tensão nominal é baixa, tratando-se de uma tracção, com um nível de concentração de tensões médio. A fratura acontece no início de uma rosca na qual os vértices interiores entre os filetes da rosca estavam muito agudos (ângulo muito pequeno), conjugado com a possibilidade do perno estar pouco apertado. Estando ainda o perno sujeito a trações consecutivas e a um nível vibracional elevado, ocorre a fractura do perno de fixação. A acção correctiva passou por içar a prensa hidráulica e colocar um amortecedor entre a base da máquina e as placas de aço fixas no betão para baixar o nível de vibrações transmitido aos pernos, assim como fazer a rosca por esmagamento em vez do processo convencional (ferramenta de corte).



Figura 23 - Perno roscado para fixação



Figura 24 - Superfície de fractura do perno



## - Conclusões

Os casos estudados (C1, C4, C5, C7), são exemplos práticos de como a produção / maquinação de peças (processos subtrativos - levantamento de apara), através de ferramentas de corte podem potenciar a iniciação de fissuras. Este tipo de processos, carecem de cuidados acrescidos no acabamento superficial das peças, para que não sejam geradores de concentração de tensões superficiais. É comum verificar-se em peças marcas de maquinagem (torneamento e fresagem), vértices de ângulos muito pequenos, etc. Para contornar estas más práticas, deve ter-se em conta alguns pormenores tais como: as pastilhas das ferramentas de corte devem respeitar os raios originais depois de afiadas (desbastes, abertura de roscas, raios de concordância); também a superfície das peças deve ser lixada, ou mesmo polida, em algumas regiões da peça em causa, onde se venha a verificar uma maior concentração de tensões, nomeadamente em variações de secção.

Os casos (C2, C3, C6), estão relacionados com os insuficientes raios de concordância na variação da secção de veios, tal como mencionado na figura 25 (concentração de tensões em variações de secção). Também pode ocorrer em peças (em chapa), quinadas, sendo que devem ser respeitadas as indicações do projecto, mesmo que impliquem algumas transformações processuais ou aquisição de novas ferramentas, pois os custos das correcções de produto serão sempre superiores.

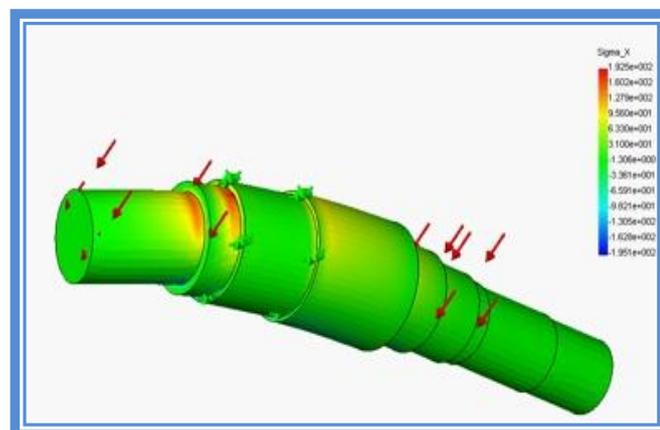


Figura 25 - Análise de elementos finitos de um veio (à flexão), com variações de secção (pmt.usp.br) – Julho / 2018)

No caso da “abertura de caixas” para rolamentos, o raio de concordância deve ser no mínimo, o raio das pistas do rolamento, tal como na quinagem de chapa, o uso de um punção com um ângulo demasiado pequeno irá gerar um vinco bastante pronunciado no interior da dobragem, onde se irão concentrar tensões, assim como uma diminuição da espessura original da chapa (peça), quinada. No futuro, é possível que as tecnologias relacionadas com os processos aditivos de fabricação possam vir a diminuir consideravelmente este conjunto de causas relacionadas com os processos subtrativos (levantamento de aparas).

A introdução de tensões residuais de compressão também é um processo eficaz, na medida em que as tensões resultantes da sobreposição de qualquer ciclo de tensões aplicado, em conjunto com tensões residuais de compressão sejam razoavelmente menores. As tensões residuais de compressão na superfície reduzem a probabilidade da iniciação de fissuras, uma vez que provocam o fecho de sulcos e entalhes (de reduzida dimensão), potenciadores de propagação de fissuras. Existem várias técnicas possíveis para formar este tipo de tensões residuais: martelagem superficial, granalhagem superficial, pré esforçoamento, compressão localizada, aquecimento localizado. Tendo em conta a realidade dos processos existentes na empresa, apenas se abordará a granalhagem.

Este processo visa o aumento da resistência à fadiga em componentes mecânicos não soldados, sendo que também pode ser aplicado com resultados satisfatórios (inferiores ao processo de martelagem), em juntas soldadas. Consiste no bombardeamento da superfície com esferas de aço (0,5 a 1 mm de diâmetro). A eficiência deste processo depende de algumas variáveis possíveis, como o diâmetro das partículas projectadas, a distância da fonte de projecção, a velocidade de impacto, a intensidade, o tempo e o ângulo de projecção na superfície. Existe alguma resistência na utilização dos tratamentos mecânicos a frio, dado que poderão fragilizar o material, reduzindo a resistência à fractura, o que pode ser uma realidade. Contudo, trata-se de valores muito inferiores, comparando com o aumento da resistência à fadiga, obtido a partir destes processos. (Moura B. – 1998)

Os cordões de soldadura podem conter alguns defeitos relacionados com muitas variáveis possíveis (processo, matérias, parâmetros de soldadura, etc). Devem existir critérios de aceitação para os vários defeitos possíveis, sendo que existem ainda algumas técnicas para a sua minimização e a consequente recuperação das estruturas em causa. Os poros superficiais devem ser “escavados” e preenchidos com novo cordão, os bordos queimados (se não forem demasiado profundos) podem ser rectificados de maneira a suavizar o declive da “mordedura” para aumentar o fluxo de tensões nas imediações da “perna” (um dos lados) do cordão. Outra técnica utilizada, especialmente quando a exigência da estrutura pode estar em causa, é a refusão (através do processo TIG – “tungsténio gás inerte”, eléctrodo de tungsténio como fonte de calor e neste caso sem metal aditivo), da perna do cordão que apresenta o bordo queimado (Figura 26). Esta consiste no refundimento de parte do cordão e de um dos bordos unidos, aumentando assim a área de ligação entre as peças, como também o raio entre os planos a unir (no caso de uma soldadura de canto). A refusão elimina também os poros, as fissuras e a falta de penetração da “perna” em causa (figura 23). No entanto deve ter-se em conta que uma primeira passagem vai aumentar substancialmente a dureza nas imediações do cordão (zonas afectadas termicamente), o que poderá implicar uma segunda passagem (a 3 ou 4 mm da perna do cordão em causa), que irá “revenir” a martensite formada na primeira passagem. Na projecção de estruturas, deve optar-se por juntas soldadas mais favoráveis (mais resistentes à fadiga), como uma junta “topo a topo”, em vez de uma junta de “canto”, tal como, fazendo uso do cálculo de elementos finitos, colocar as juntas em partes da estrutura onde as tensões nominais sejam menores (caso seja possível).

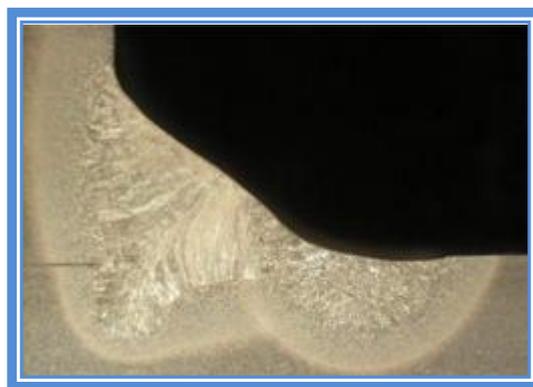


Figura 26 - Macrografia de um cordão de soldadura com uma "perna" refundida (Sciencedirect – Junho / 2018)

A protecção da superfície de estruturas metálicas (soldadas ou não) contra a corrosão também contribui para a manutenção da resistência à fadiga, principalmente em aços carbono que têm pouca resistência à fadiga quando apresentam corrosão acentuada. Técnicas como a protecção catódica (ânodo sacrificado), são utilizadas na protecção de grandes estruturas sujeitas a ambientes agressivos. Os revestimentos metálicos (galvanização) que também colmatam os defeitos superficiais, filmes oleofóbicos (compostos orgânicos – álcoois e aminas) e as tintas epoxídicas cada vez mais aderentes e elásticas conseguem evitar o contacto da superfície metálica com a água e a atmosfera, retardando bastante o surgimento de corrosão. (Eugenio S. - 2017)

O facto das peças poderem conter defeitos elimina a fase de iniciação de fissura por fadiga, podendo assim, resumir a vida útil de uma estrutura à fase de propagação da fissura. Em estruturas de grande responsabilidade (pontes, indústria aeronáutica e nuclear, etc.), a ideia de projecto pode dividir-se em dois grupos, baseados em conceitos de duração: “safe life design” (design de vida seguro), que tem como princípio a hipótese do material empregue estar isento de defeitos ou que não venha a ser submetido a tensões suficientes para provocarem propagação de fissuras a partir de algum defeito existente (durante a vida do componente não haverá fractura catastrófica); “fail safe design” (design seguro contra falhas), assenta na hipótese da existência de defeitos e que o componente / estrutura deverá continuar a garantir a sua integridade estrutural, mantendo-se em serviço até que o defeito seja detectado e reparado. O “fail safe design” utiliza a redundância estrutural, ou seja, a existência de alternativas que suportem a carga, no caso de parte da estrutura falhar. É um conceito que nos dias de hoje não será fácil de implementar em indústrias metalomecânicas como a Galucho, dado os custos envolvidos. No entanto, com conhecimento e muita criatividade, a filosofia pode ir transitando para este tipo de indústrias, promovendo produtos fiáveis e melhorados continuamente. (Moura B. – 1998)

## - Bibliografia

- Callister W. – 2014 - Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução;
- Eugénio S. – 2017 – Aulas da disciplina de “Materiais Metálicos”;
- Eugénio S. – 2017 - Aulas da disciplina de “Corrosão e protecção de materiais”;
- Freitas M. – 2018 – Aula sobre a quantificação do cálculo de FCT;
- Miodownik M – 2014 - A Vida Secreta dos Materiais;
- Moura B. – 1998 - Fadiga de Estruturas Soldadas;
- Silva F. – 2014 - Mecânica de Fratura e Fadiga;
- Smith W. – 1999 - Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.

ABCM (VI-Congresso nacional de engenharia mecânica) – Análise de fractura de um rolo motriz de correia transportadora, visualizado e 15/6/2018 - <https://pt.slideshare.net/Douglasbirkheuer/analise-de-fratura-1>

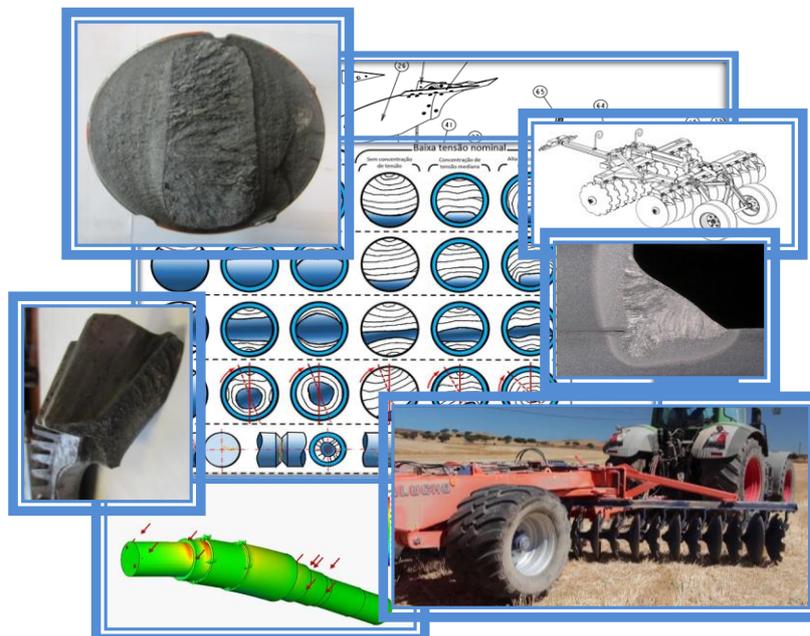
Cruz A. - Mecânica de fractura e fadiga de materiais - Universidade de S Paulo – Núcleo de ensaios de materiais e análise de falhas, visualizado em 20/6/2018 - [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/241323/mod\\_resource/content/2/AULA%20D E%20FADIGA%20E%20FRATURA2.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/241323/mod_resource/content/2/AULA%20D E%20FADIGA%20E%20FRATURA2.pdf)

Mendes M. – Fadiga de juntas soldadas em aços estruturais de alto limite elástico, visualizado e 20/6/2018 - <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/20421>

Velhinho E. - Análise da vida à fadiga de ligações soldadas em T – Universidade nova de Lisboa, visualizado e 21/6/2018  
[https://run.unl.pt/bitstream/10362/9324/1/Velhinho\\_2013.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/9324/1/Velhinho_2013.pdf)

# **Anexo A**

## **Informação complementar dos casos analisados (capítulo 2)**



Projecto Final de Licenciatura, Elaborado por Helder Silva Nunes

(20152023)

Barcarena, Julho de 2018



## C1) - Veio de Charrua:



Imagem 1 - Charrua em serviço

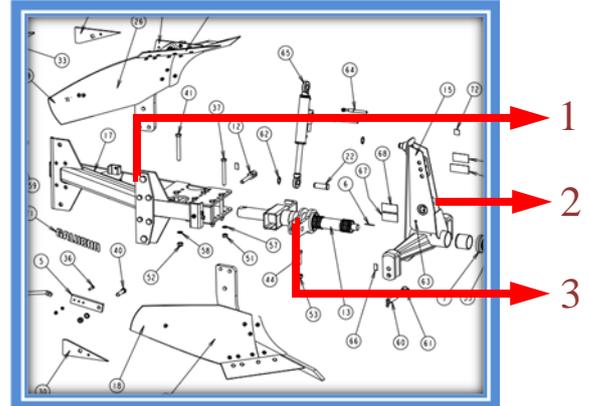


Imagem 2 - Charrua de dois ferros "expandida"

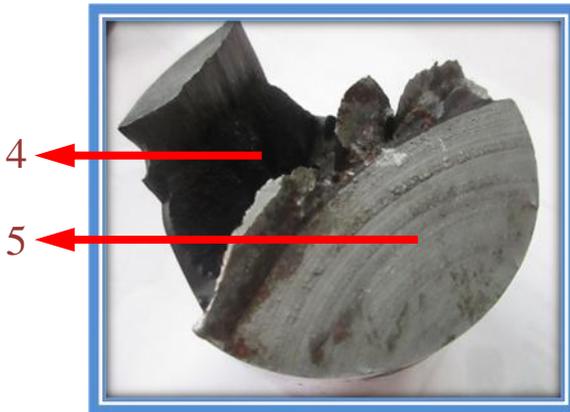


Imagem 3 – Face de fractura com diferentes tipos de textura



Imagem 4 – Face de fractura - ruptura final



Imagem 5 – Os dois extremos resultantes da fractura

### Legenda:

- 1** – Suporte das aivecas
- 2** – Corpo de ligação ao tractor
- 3** – Conjunto do veio de ligação
- 4** – Área correspondente à fractura por fadiga
- 5** – Área correspondente à ruptura final

## C2) - Manga de eixo de grade A2CP:



Imagem 6 – Grade A2CP, em serviço

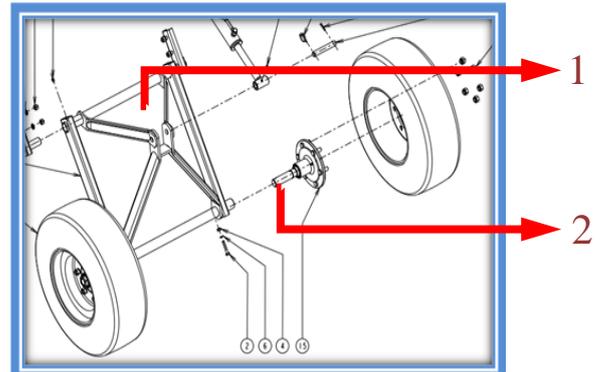


Imagem 7 – Trem de transporte "expandido"

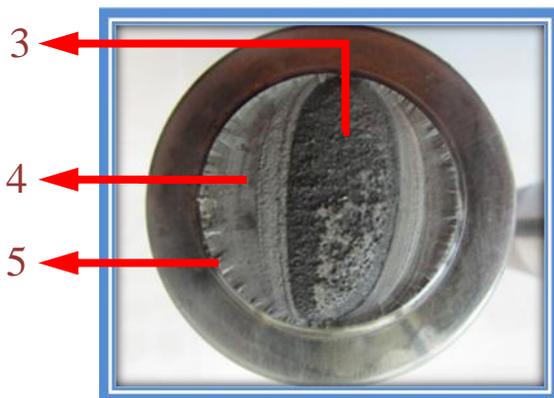


Imagem 8 – Face de fractura (variação de secção)

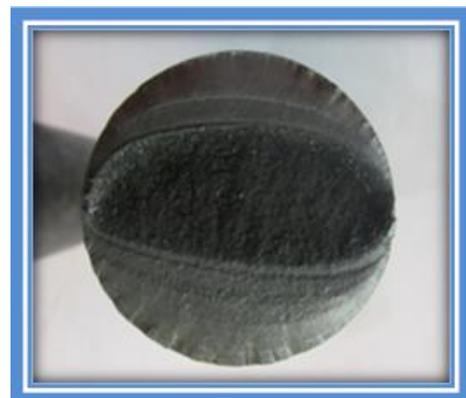


Imagem 9 – Face de fractura da extremidade da manga de eixo



Imagem 10 – Manga de eixo

### Legenda:

- 1** – Trem de transporte da grade
- 2** – Manga de eixo (veio)
- 3** – Área correspondente à rotura final
- 4** – Área correspondente à fractura por fadiga
- 5** – Linhas radiais / nervuras

### C3) - Extremidade do eixo de grade GVR:



Imagem 11 – Grade "Pesada" , GVR

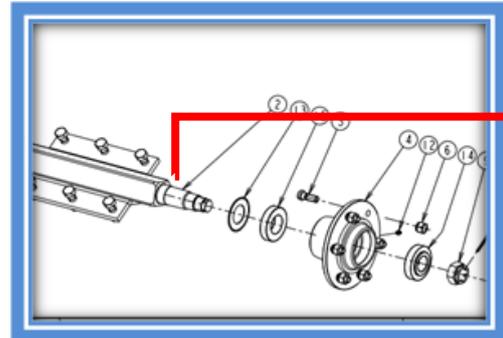


Imagem 12 – Extremidade do eixo de Grade "expandido"

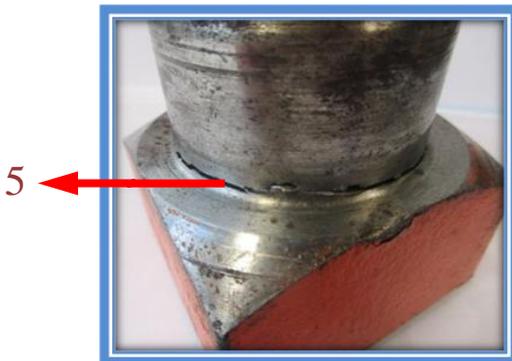


Imagem 13 – Fractura coincidente com o raio de concordância insuficiente



Imagem 14 – As duas faces de fractura resultantes



Imagem 15 – Extremidade do eixo fracturado

#### Legenda:

- 1 – Manga do eixo
- 2 – Linhas radiais / nervuras
- 3 – Área correspondente à fractura por fadiga. Até sensivelmente metade da secção do veio, o que pode traduzir algum sobre dimensionamento
- 4 – Área correspondente à ruptura final
- 5 – Raio de concordância entre a variação de secções

## C4) - Pinhão de engrenagem (Veio):



Imagem 16 – Corta Mato

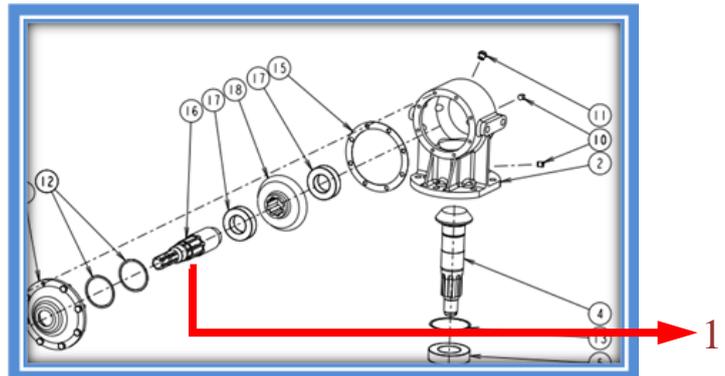


Imagem 17 – Caixa redutora "expandida"



Imagem 18 – Secção do veio fracturado



Imagem 19 – Veio fracturado (com um ângulo de fractura de 45 °)

### Legenda:

**1** – Veio (pinhão), fracturado

**2** – Região onde provavelmente se terá iniciado a propagação da fissura. Muito poucas linhas de paragem, perceptíveis na fotografia.

**C5) - Roda dentada:**

Imagem 20 – Brocadora em serviço

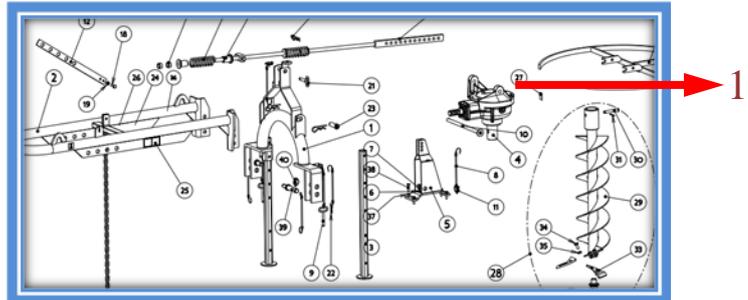


Imagem 21 – Brocadora "expandida"



Imagem 22 – Superfície de fractura da roda dentada



Imagem 23 – Textura da superfície correspondente à fractura final

**Legenda:**

**1** – Caixa redutora da qual faz parte o veio fracturado

**2** – Área correspondente à fractura por fadiga

**3** – Área correspondente à ruptura final

## C6) - Manivela de toldo:



Imagem 24 – Semi-reboque, com toldo



Imagem 25 – Superfície de fractura

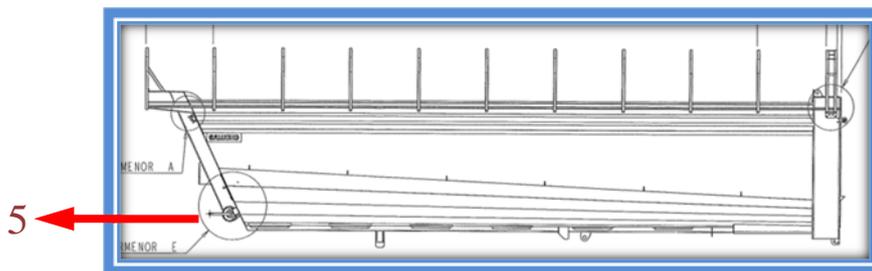


Imagem 26 – Desenho de conjunto (caixa de carga)



Imagem 27 – Manivela fracturada

### Legenda:

- 1** – Tambor enrolador do toldo
- 2** – Vértice a 90°, sem raio de concordância
- 3** – Área correspondente à fractura por fadiga
- 4** – Área correspondente à rotura final
- 5** – Conjunto do “tambor” com manivela

**C7) - Perno de fixação de máquina ferramenta:**

Imagem 28 – Prensa hidráulica

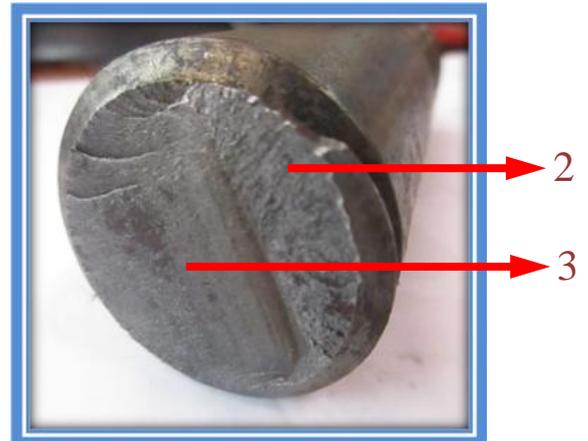


Imagem 29 – Superfície de fractura do perno

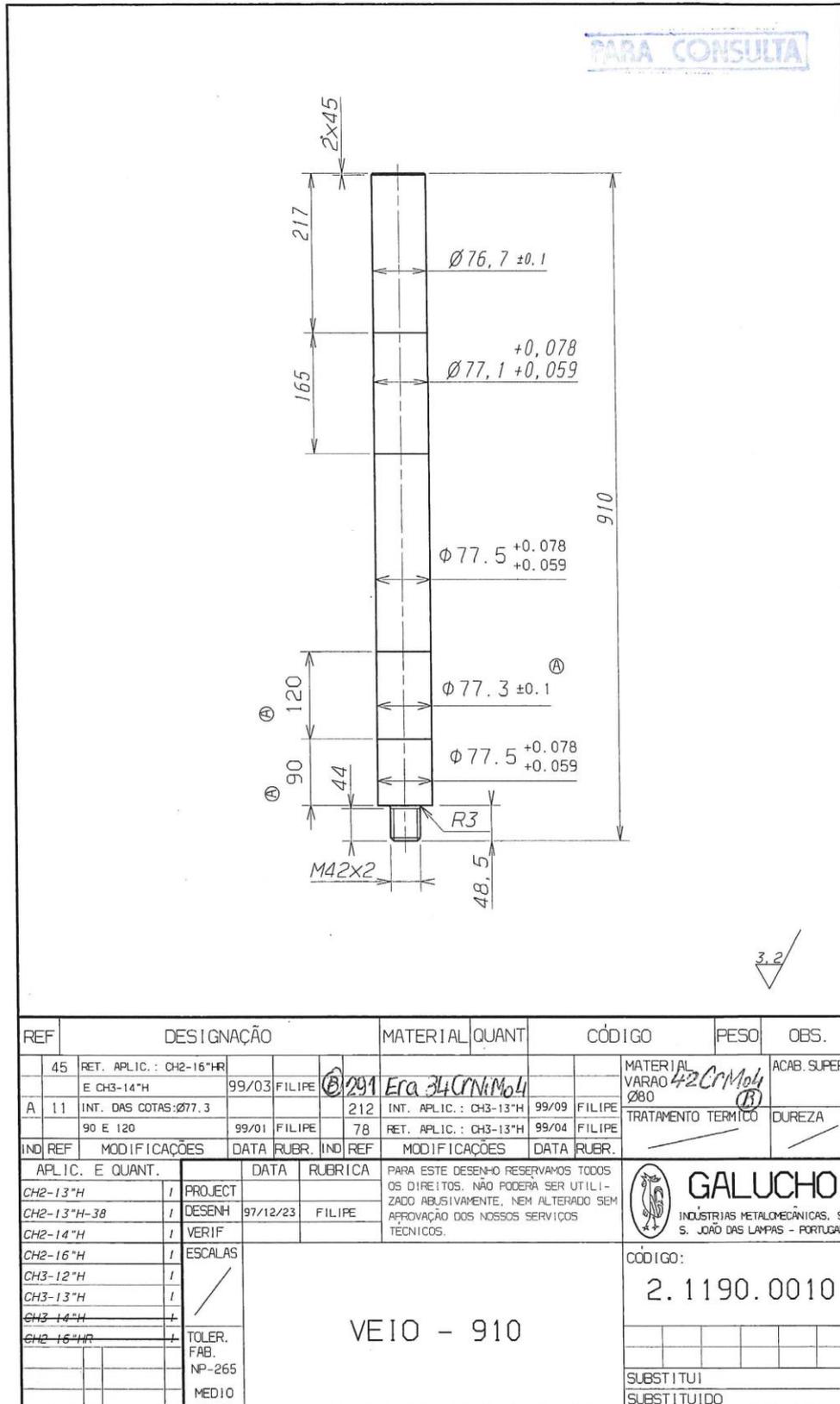


Imagem 30 – Parte do perno fracturado, faltando a extremidade roscada oposta

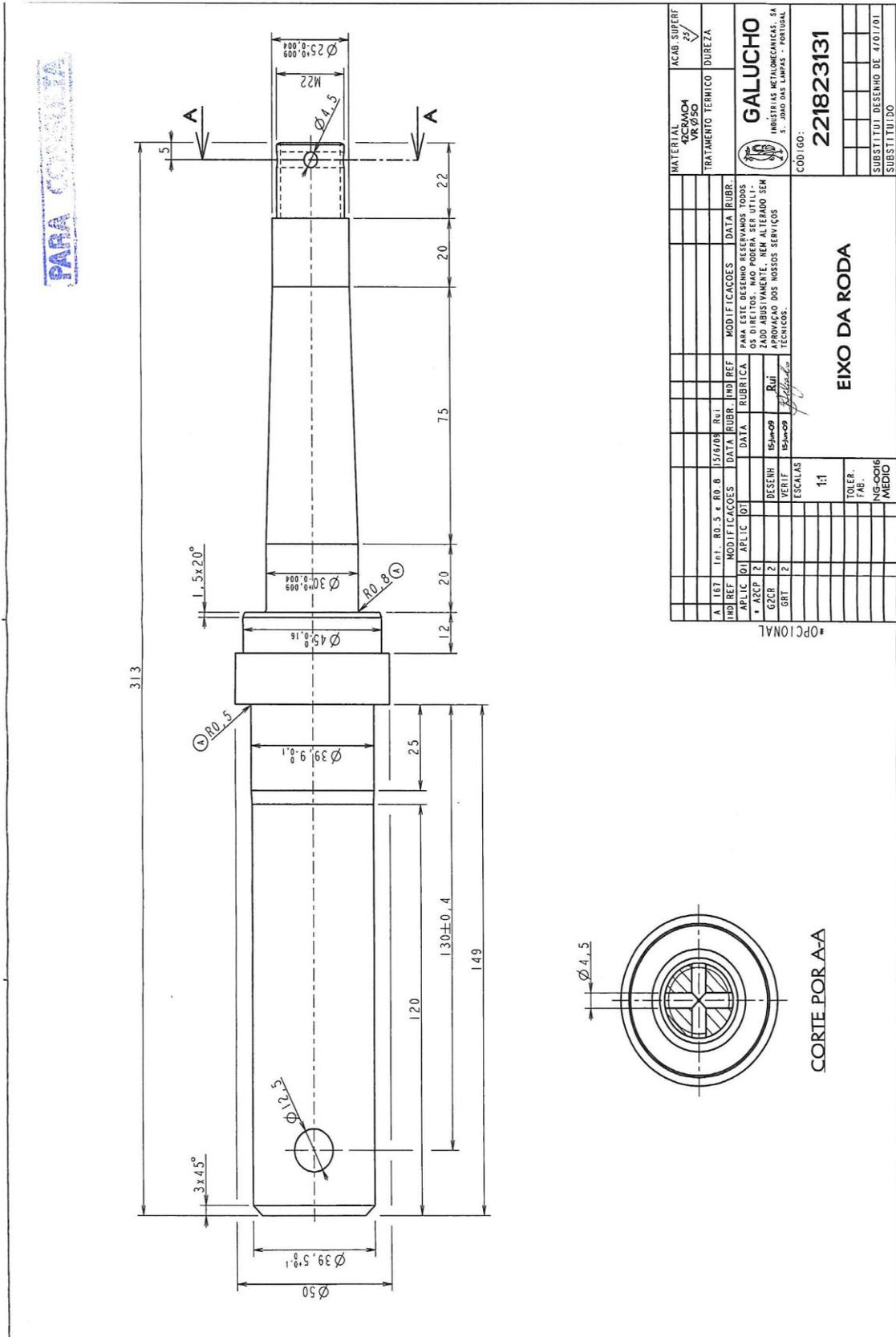
**Legenda:**

- 1** – Região de fixação da base da prensa ao solo
- 2** – Área correspondente à fractura por fadiga
- 3** – Área correspondente à rotura final

### C1) - Veio de Charrua



C2) - Manga de eixo de grade A2CP





### C4) - Pinhão de engrenagem (Veio)

