

RENAULT

INFLUENCIA DO ENCRUAMENTO SUPERFICIAL
NA RESISTENCIA À FADIGA: O CASO DAS CÂMBOTAS
DE MOTORES DE EXPLOÇÃO

RENAULT PORTUGUESA

669(047.3)
LEMM 1986/SILm

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

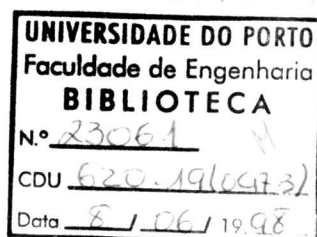
DATA DE ENTREGA	DATA DE ENTREGA

INFLUENCIA DO ENCRUAMENTO SUPERFICIAL
NA RESISTENCIA À FADIGA: O CASO DAS CAMBOTAS
DE MOTORES DE EXPLOSÃO

SEMINARIO 1986-1987

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA DA FEUP

INFLUENCIA DO ENCRUAMENTO SUPERFICIAL NA RESISTENCIA A FADIGA:
O CASO DAS CAMBOTAS DE MOTORES DE EXPLOSAO



REALIZADO POR : MARIA DE FATIMA OLIVEIRA VALLES DA SILVA

RESPONSÁVEL DA DISCIPLINA: PROF. DOUTOR JOSE R.T. CAVALHEIRO
ORIENTADOR: ENG. FERNANDO J. GONÇALVES RAMOS

AGRADECIMENTOS

Maria de Fátima Oliveira Valles da Silva, aluna do 5º ano do Curso de Engenharia Metalúrgica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, exprime os seus agradecimentos às várias pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste trabalho, designadamente:

- Fábrica da Renault Portuguesa (Cacia)
- Laboratório Tecnológico de Materiais (Dep. de Eng. Mecânica, FEUP)
- Prof. Catedrático, Eng. Horácio Maia Costa (Dep. de Eng. Metalúrgica, FEUP)
- Prof.Doutor José R.T. Cavalheiro (Dep. de Eng. Metalúrgica, FEUP)
- Eng. Fernando J. Gonçalves Ramos (Fábrica da Renault Portuguesa, Cacia)



INDICE

1. Objectivo

2. Introdução: considerações teóricas

2.1. Fadiga dos metais: generalidades

2.1.1 Evolução do processo de fadiga

2.1.2 Morfologia das superfícies de fractura por fadiga

2.1.3 Aspectos microscópicos do processo de fadiga:

-mecanismos de nucleação e crescimento de fendas

-mecanismos de crescimento de fendas

2.1.4 Parâmetros do comportamento à fadiga

3. Ensaaios

3.1 Ensaio de fadiga

3.2 Caracterização da peça a ensaiar e relação com os ensaios de fadiga

3.3 Descrição sumária do processo de fabrico

3.4 Descrição pormenorizada da operação de galetagem

3.5 Resultados experimentais

3.5.1 plano de execução

3.5.2 ensaios realizados e resultados obtidos

3.6 Conclusões

4. Bibliografia

1.OBJECTIVO

O objectivo deste trabalho é a verificação experimental da alteração da resistência à fadiga de cambotas de motores de automóvel submetidas a diferentes níveis de forças de pressão nas zonas consideradas críticas.

O desenvolvimento do trabalho percorre as seguintes etapas:

- Caracterização estrutural do material
- Determinação do raio de curvatura de entalhe após maquinagem
- Determinação do encruamento superficial após encalque. Correlação da pressão utilizada com a profundidade da zona deformada
- Observação da progressão de uma fissura após a sua iniciação num ensaio normal (peça não encalcada)
- Observação da progressão de uma fissura após a sua iniciação num ensaio com peça encalcada
- Observação de fácies de fractura
- Curvas de Wöhler e sua relação com os pontos anteriores

2. INTRODUÇÃO: CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

2.1 Fadiga dos metais: Generalidades

As solicitações dinâmicas são as mais frequentes em órgãos de máquinas. Estas solicitações podem provocar um tipo de rotura, conhecido como fadiga.

Actualmente constata-se que a fadiga é responsável por 80% a 90% de todas as roturas de peças submetidas a esforços mecânicos, geralmente após um período de serviço considerável.

A fadiga de um metal define-se como "um fenómeno de enfraquecimento progressivo de um metal quando sujeito a cargas dinâmicas ou repetidas"

As principais roturas por fadiga que tiveram certa importância económica, começaram a ser estudadas em meados do século passado. Antes de essa época já muitas outras roturas por fadiga se haviam verificado, mas os primeiros estudos sobre fadiga, conhecidos, são da autoria do Eng. Wöhler [1] e foram realizados, na indústria ferroviária Alemã em meados de 1840, em eixos de locomotivas que estavam a sofrer roturas frequentes. Antes dessa altura, nunca o problema da fadiga teve grande importância porque as máquinas tinham um funcionamento rudimentar, com solicitações predominantemente estáticas.

Actualmente, devido à importância deste fenómeno, que é a causa principal da rotura de órgãos mecânicos, a investigação em fadiga é a mais significativa na área do comportamento mecânico dos metais. Os objectivos principais da investigação podem ser encarados segundo duas perspectivas:

- desenvolvimento de materiais económicos, possuindo a máxima resistência à fadiga
- desenvolvimento de métodos de concepção e cálculo de estruturas

sujeitas à fadiga.

2.1.1 Evolução do processo de fadiga

A rotura por fadiga é provocada pela nucleação e propagação mais ou menos lenta de fendas, que aparecem numa peça submetida a solicitações cíclicas.

O processo de fadiga pode ser considerado em quatro fases:

- nucleação da(s) fenda(s)
- crescimento microscópico da(s) fenda(s)
- propagação da(s) fenda(s)
- rotura final

As duas primeiras fases constituem o período de iniciação da fenda. A propagação macroscópica da fenda constitui o período de propagação da fenda. Para que se verifique fadiga é necessário que haja nucleação de uma fenda, numa determinada região do material e que haja propagação dessa fenda, podendo conduzir a uma rotura final.

A ASTM [1] definiu a fadiga como "um processo de alteração estrutural permanente progressivo e localizado que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos e que pode culminar em fendas ou numa fractura completa, após um numero suficiente de variações da carga".

A duração de uma peça à fadiga define-se geralmente pelo numero de ciclos de aplicação da carga até à rotura. O numero de ciclos de rotura (N_r) será a soma do numero de ciclos de nucleação+iniciação da fenda (N_i) com o numero de ciclos de propagação da fenda (N_p):

$$N_r = N_i + N_p$$

Com experiências realizadas e baseadas no diagrama de Schjive [1] concluiu-se que, no caso de uma peça isenta de defeitos (superfície polida) a percentagem de duração total à fadiga, gasta simultaneamente no período de nucleação de um fenda e na fase microfenda é da ordem dos

90%. Se o defeito inicial não for detectado pela técnica de ensaios não destrutivos como por exemplo uma inclusão, o mesmo período é da ordem dos 80%. No caso do defeito inicial ser visível o numero de ciclos de propagação é muito superior ao da nucleação+iniciação da fenda.

2.1.2 Morfologia das superfícies de fractura por fadiga

As fracturas de fadiga apresentam, em geral, aspectos muito característicos e específicos. A análise morfológica pode fornecer informações muito concretas acerca dos vários parâmetros que de um ou de outro modo, estarão relacionados com o processo de rotura:

- tipo e intensidade das solicitações
- influência da geometria da peça
- características físicas e químicas do material

Na maioria dos casos, a análise morfológica efectuada unicamente com base na observação do fâcies da fractura, é suficiente para identificar a fissuração progressiva. Todavia, em casos de dúvida, a observação ao microscópio electrónico de varrimento permitirá, em geral, confirmar a existência de aspectos microscópicos característicos.

As superfícies de fractura têm um aspecto de tipo "frágil", sem sinais de deformação plástica a nível macroscópico, porque na maioria dos casos a rotura dá-se para tensões aplicadas inferiores à tensão de cedência do material. Apesar de não haver deformação plástica macroscópica, ela existe a nível microscópico nos cristais constituindo um processo irreversível de deformação.

Em geral as fracturas de fadiga apresentam duas zonas distintas [3]: zona de fissuração progressiva e zona de rotura final.

Zona de fissuração progressiva:

Esta zona apresenta-se ,em geral, lisa, polida e plana, de grão mais ou menos fino, sedoso e brilhante.

Em geral, a propagação da fenda não é uniforme, processando-se normalmente de um modo intermitente com zonas de crescimento rápido e zonas de crescimento lento. Este modo de propagação descontínuo origina o aparecimento na superfície de fractura, de marcas designadas "linhas de paragem" ou "linhas frontais" (fig. 2.1.A) [2], que se formam quando se verificam variações de velocidade de propagação, paragens ou acelerações, por efeito de alterações da tensão aplicada por factores internos ou externos vários.

Estas marcas têm normalmente uma forma em meia-lua, e constituem uma das características morfológicas macroscópicas de uma superfície de fractura por fadiga.

As linhas de paragem, quando presentes, são em geral côncavas em relação à origem, facilitando assim a identificação do ponto de iniciação da fenda. Notar contudo que a presença de tensões residuais ou a sensibilidade do material à presença de um entalhe pode alterar o modo como se propaga a fenda, podendo, em materiais sensíveis ao entalhe, as linhas de paragem ser convexas em relação à origem.

Assim como as linhas de paragem são uma característica comum a muitas superfícies de fractura por fadiga, as "linhas radiais" ou "nervuras" também o são (fig. 2.1.B) [2]. As linhas radiais têm a sua origem no ponto de iniciação. Tanto as linhas de paragem como as linhas radiais são características que podem ajudar a identificação do ponto de iniciação da fenda, elemento fundamental na eventual acção correctiva a empreender no sentido de evitar futuras roturas por fadiga.

Uma fenda pode iniciar-se em diversos pontos de um mesmo componente, propagando-se num mesmo plano ou planos paralelos que poderão ligar-se entre si, formando degraus (fig. 2.1.B). A fenda principal de fadiga, pode ser acompanhada de fissuração secundária ou ramificação da fenda principal seguindo uma direcção normal à superfície de fractura.

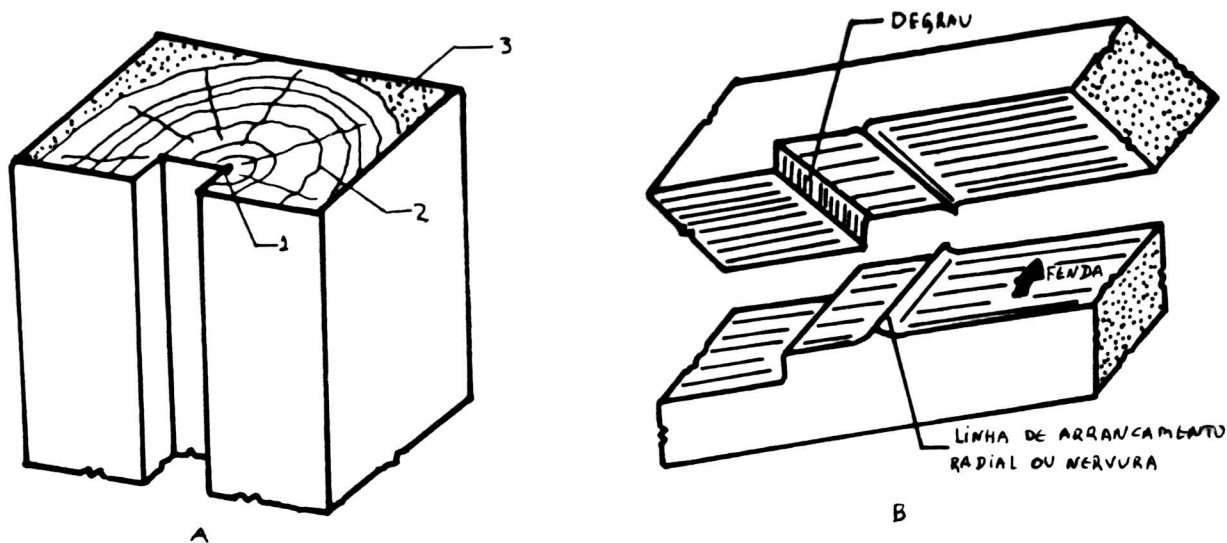


figura 2.1

A- Esquema de uma superfície de fractura por fadiga

1-ponto de iniciação

2-linhas de paragem

3-fractura instável final

B- Esquema de linhas de arrancamento radial ou nervuras e degraus de corte

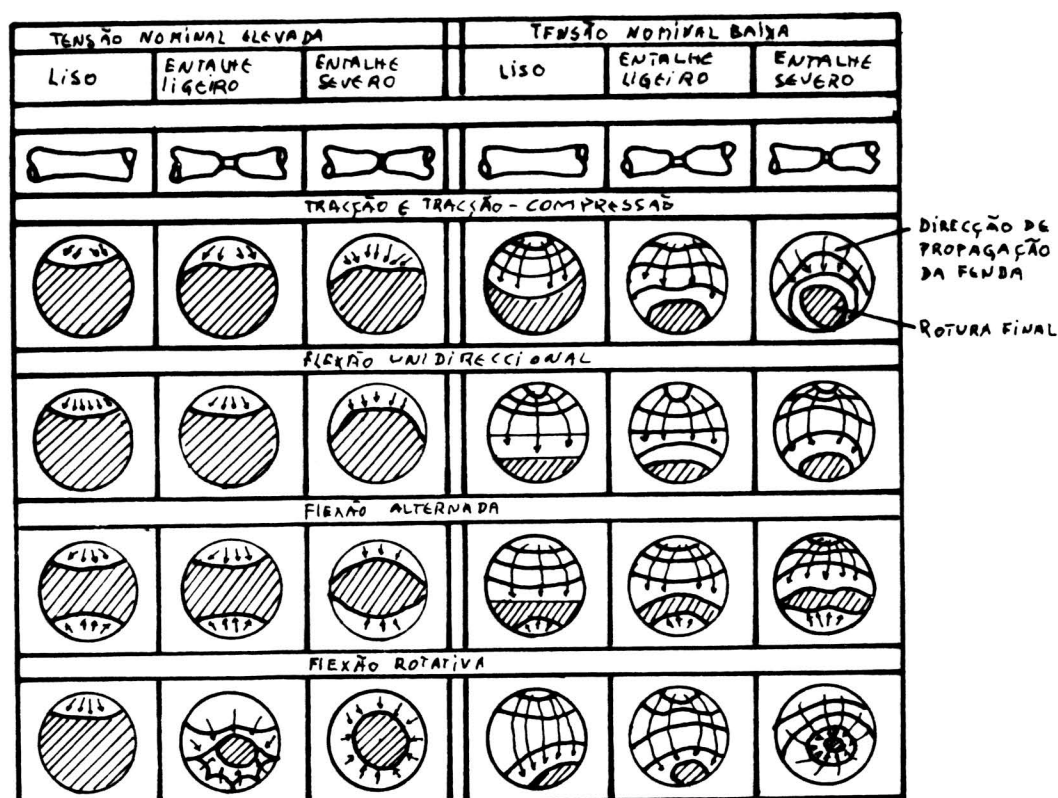
Zona de rotura final

Esta zona apresenta um aspecto grosseiro, não regular nem brilhante. Corresponde à região de rotura final da peça, quando a secção transversal restante (não fendida), já não é capaz de suportar a tensão aplicada.

A rotura final dá-se instantâneamente e pode ser do tipo dúctil ou frágil, dependendo do material e do nível de tensão aplicada.

As roturas por fadiga apresentam as seguintes características comuns:

- zona de iniciação de fenda(s)
- estrias ou bandas indicadoras da propagação da fenda (zona de propagação de fendas)
- zona de fractura final a seguir à zona de propagação da fenda



quadro 2.1

No quadro 2.1 [1] pode ver-se uma síntese da morfologia das superfícies de fractura por fadiga, para solicitações axiais. A tracejado representa-se a zona de rotura final na peça, cuja dimensão aumenta com a tensão aplicada.

Se a tensão nominal é elevada, a região de propagação progressiva da fenda é pequena e vice-versa. Poderá bastar, portanto, observar a superfície de fractura para concluir se a tensão nominal aplicada à peça estava a ser baixa ou elevada.

Há um conjunto de variáveis imprescindível para que se verifique a rotura por fadiga:

- tensão principal máxima, suficientemente elevada (na maioria dos casos esta tensão é inferior à tensão de cedência)
- variação ou flutuação da tensão aplicada, suficientemente grande

-numero de ciclos de tensão aplicada suficientemente grande

2.1.3 Aspectos microscópicos do processo de fadiga

A nível microscópico, o processo de fadiga pode ser descrito por diferentes mecanismos. No entanto, o número de mecanismos proposto é grande, pelo que, sómente os que têm tido maior aceitação serão referidos [1].

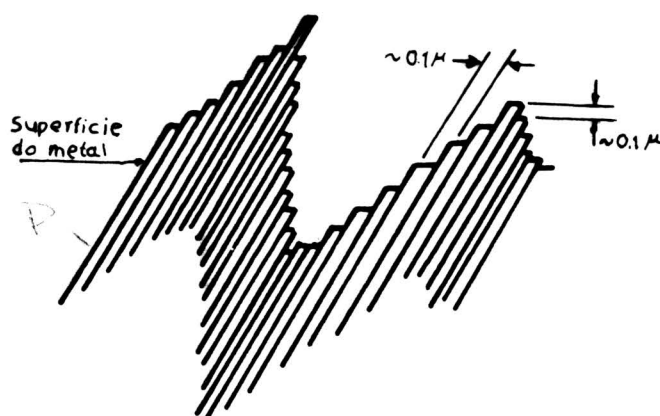
Mecanismo de nucleação e crescimento de fendas

Numa peça sem defeitos internos, a fenda de fadiga inicia-se sempre na sua superfície e na zona em que a tensão seja máxima.

A nucleação das fendas de fadiga à superfície é facilitada pelo facto da deformação plástica dos grãos cristalinos que se encontram à superfície ser mais fácil que a dos grãos localizados no interior. Isto deve-se ao facto dos grãos cristalinos localizados à superfície terem menor constrangimento à deformação porque encontram a superfície livre da peça para se deformarem sem encontrar resistência. Assim, uma fenda de fadiga deve ser procurada preferencialmente à superfície da peça e numa zona em que a tensão seja máxima.

Através de estudos efectuados por Lynch sobre os mecanismos de nucleação e iniciação das fendas pode concluir-se que há três tipos de nucleação, cada um deles aplicado aos seguintes casos [1].

- metais puros policristalinos para tensões baixas
- metais puros policristalinos para tensões elevadas
- ligas polifásicas



Formação de extrusões e intrusões na superfície da peça

figura 2.2

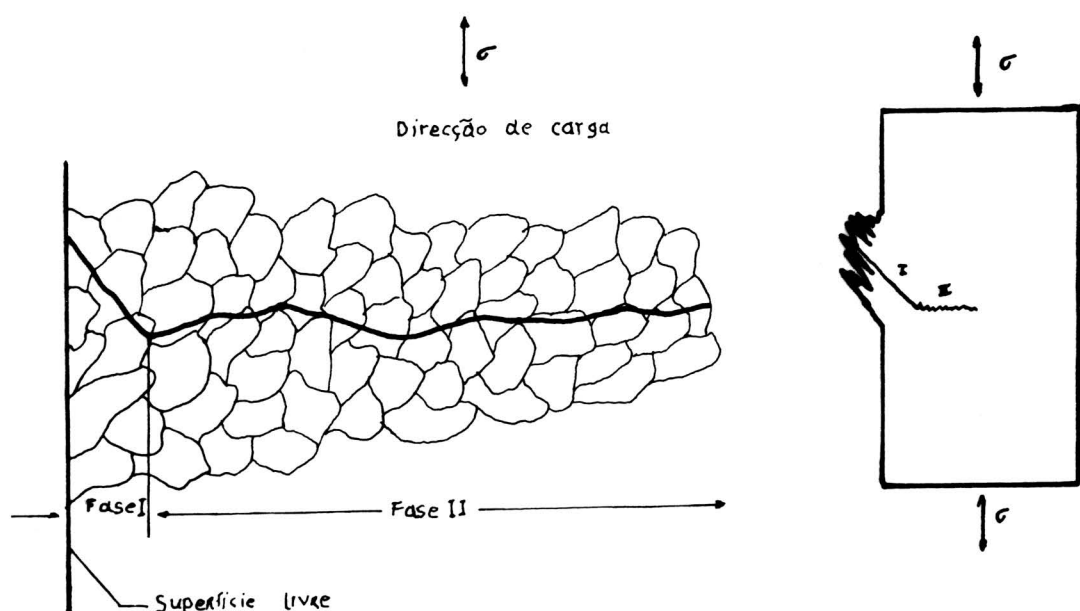
Os metais puros policristalinos para tensões baixas são geralmente dúcteis. Devido à aplicação de cargas cíclicas formam-se linhas de escorregamento à superfície, que aparecem logo na fase inicial da vida da peça. Nas linhas de escorregamento a densidade de deslocamentos é muito elevada e o escorregamento é intenso e irreversível.

A deformação plástica é mais intensa nas linhas de escorregamento e ao fim de determinado número de ciclos de aplicação da carga, as zonas de deformação plástica tornam-se salientes, à superfície da peça, constituindo extrusões e intrusões com deslocamento do material para o exterior ou interior da superfície da peça [1]. (fig.2.2)

As zonas de extrusão e intrusão são zonas em que a concentração de tensões é muito elevada devido ao efeito pronunciado de entalhe aí existente. A tensão localizada nestas zonas depende essencialmente das tensões de corte que provocam o escorregamento, podendo atingir valores muito elevados, igualando a tensão de rotura local. Se a amplitude da tensão de corte máxima na zona de escorregamento e o número de repetições de carga forem suficientemente elevadas, formam-se microfendas ou fendas. Este mecanismo ocorre a uma tensão nominal inferior à tensão de cedência do material, logo só pode ocorrer em materiais dúcteis, que admitem uma deformação plástica significativa e desde que a tensão de corte seja suficientemente elevada.

Nos metais puros policristalinos para tensões elevadas (na zona de tensão de cedência do material), a nucleação de fendas verifica-se geralmente nas fronteiras de grão. Quando a deformação plástica se estende a todo o grão a fenda inicia-se pela multiplicação de cavidades formadas pela coalescência de poros que se criaram no início da vida da peça.

Nas ligas polifásicas de alta resistência, ou em materiais frágeis, a nucleação de fendas tem origem nas discontinuidades existentes à superfície da peça (inclusões não metálicas, partículas duras, cavidades) porque são zonas em que a concentração de tensões é mais elevada. Trata-se geralmente de partículas de segunda fase ou impurezas que não foram dissolvidas durante o processo de obtenção do material.



Propagação microscópica e transcristalina de uma fenda de fadiga nas fases I e II

figura 2.3

O mecanismo de crescimento de microfendas foi descrito segundo Forsyth da seguinte forma: Uma vez iniciada a fenda de fadiga, a

propagação dá-se em três fases [2] (fig. 2.3).

A fase I consiste num crescimento a 45° relativamente à direcção da solicitação, o que corresponde à propagação do defeito inicial em planos sujeitos a valores elevados da tensão de corte. Na fase II a fissura tende a propagar-se perpendicularmente à solicitação externa, comportamento provavelmente governado pelo valor da tensão normal. A transição I-II é geralmente atribuída à redução do quociente tensão de corte/tensão normal na vizinhança da extremidade da fissura. A velocidade de propagação na fase II é função da amplitude do factor de intensidade de tensão. Finalmente, atingindo um valor crítico do comprimento da fissura, dá-se a rotura instável final. A fase II apresenta normalmente estrias perpendiculares à direcção de propagação, especialmente em materiais dúcteis.

A maioria das fendas de fadiga são transcristalinas, mas algumas podem ser intercristalinas quando as tensões aplicadas são elevadas.

As microfendas podem ser várias e combinarem-se numa fenda principal de propagação que atinge um tamanho crítico que provoca a fractura instável. Quanto maior for a tensão aplicada mais cedo estes processos ocorrem, mas como o processo de fadiga se inicia geralmente à superfície, este irá depender do estado da superfície do material e das zonas de concentração de tensões existentes na peça.

Mecanismos de propagação da fenda



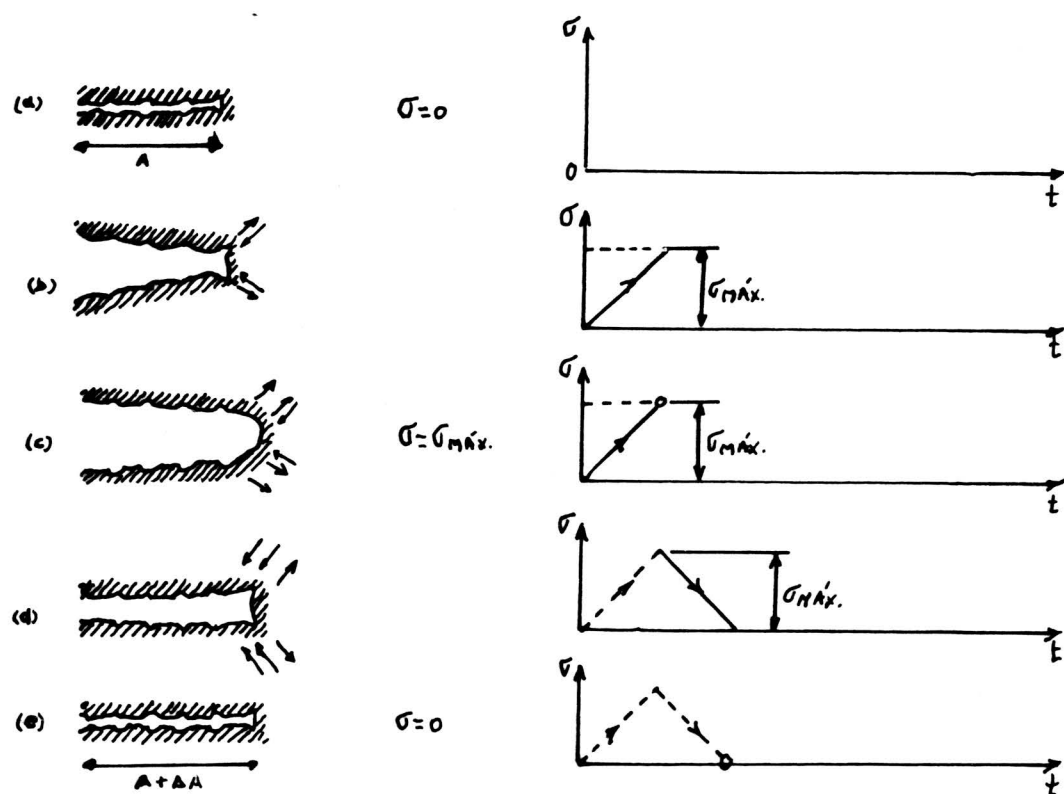
superfícies de fractura

figura 2.4

A propagação da fenda pode ser explicada por vários mecanismos diferentes. Segundo Crooker os mais comuns são [1]: (fig. 2.4)

- a) Estriação dúctil (a) ou frágil
- b) Coalescência de microcavidades (b)
- c) Microclivagem (c)

O processo de estriação e coalescência de microcavidades surge principalmente em materiais dúcteis, enquanto que a microclivagem surge principalmente em materiais de alta resistência ou frágeis.



Formação da estriação de fadiga

figura 2.5

Devido à importância do processo de estriação dúctil, somente este processo será referido com pormenor. A propagação da fenda dá-se perpendicularmente à tensão principal máxima e por um processo de encruamento plástico descrito por C.Laird [1] (fig 2.5).

Segundo este mecanismo, no início do ciclo de carga a

extermidade da fenda está aguçada(a). Quando se aplica a carga de tracção o pequeno entalhe duplo existente na extremidade da fenda concentra o escorregamento em planos de 45° com o plano da fenda (b). Quando se atinge a carga máxima, a fenda avança por deformação plástica segundo a direcção da tensão de corte máxima e a sua ponta torna-se curva (c). Na fase do ciclo de tensões em que há redução de carga inverte-se o sentido de escorregamento na extremidade da fenda (d) e as faces da fenda encostam (e) voltando à posição inicial (a) com uma pequena deformação plástica irreversível de A para $A+\Delta A$, repetindo-se o processo no ciclo de carga seguinte e assim sucessivamente. A fenda propaga-se como se fosse um fole que enche e avança simultâneamente, ficando a superfície de fractura com estrias cujo espaçamento será o avanço da fenda por ciclo.

2.1.4. Parâmetros do comportamento à fadiga

O comportamento dos materiais à fadiga é afectado por vários parâmetros, entre os quais se destacam [1]:

- acabamento superficial, revestimento e tensões residuais à superfície da peça
- geometria e tamanho da peça
- concentração de tensões
- estado de tensões
- meio ambiente
- temperatura
- material e tratamento térmico

A influência de cada parâmetro no comportamento da peça à fadiga não é genérico e depende da situação concreta em que a peça está inserida. De seguida, refere-se sucintamente a influência de cada um dos parâmetros apresentados na resistência de uma peça à fadiga [1]:

Acabamento superficial e tensões residuais à superfície da peça

Em virtude de quase todas as roturas por fadiga começarem na superfície da peça, o estudo das variáveis que podem afectar o estado da superfície da peça reveste-se de grande importancia. Tais variáveis podem ser divididas em três categorias:

- rugosidade da peça
- variações de qualquer material existente à superfície, na resistência à fadiga
- variações na distribuição de tensões residuais à superfície

O acabamento superficial tem grande influência na resistência à fadiga. Verificou-se experimentalmente que as peças produzidas com elevado polimento e baixa rugosidade têm elevada resistência à fadiga, em comparação com peças de acabamento superficial mais grosseiro. Este comportamento deve-se ao facto das peças com melhor acabamento superficial terem menos riscos, poros, e outros defeitos superficiais capazes de provocar concentração de tensões, o que dificulta a nucleação de fendas. Assim, para iniciar uma fenda numa peça altamente polida é necessário aplicar um maior número de ciclos de tensão para criar um número suficiente de deslocações que possibilitem a formação das intrusões e extrusões.

Nas peças com defeitos superficiais, o escorregamento irreversível é mais pronunciado nas zonas onde existem os defeitos, porque têm as tensões mais elevadas. Desta maneira, a tensão de rotura é atingida mais facilmente com menor número de ciclos.

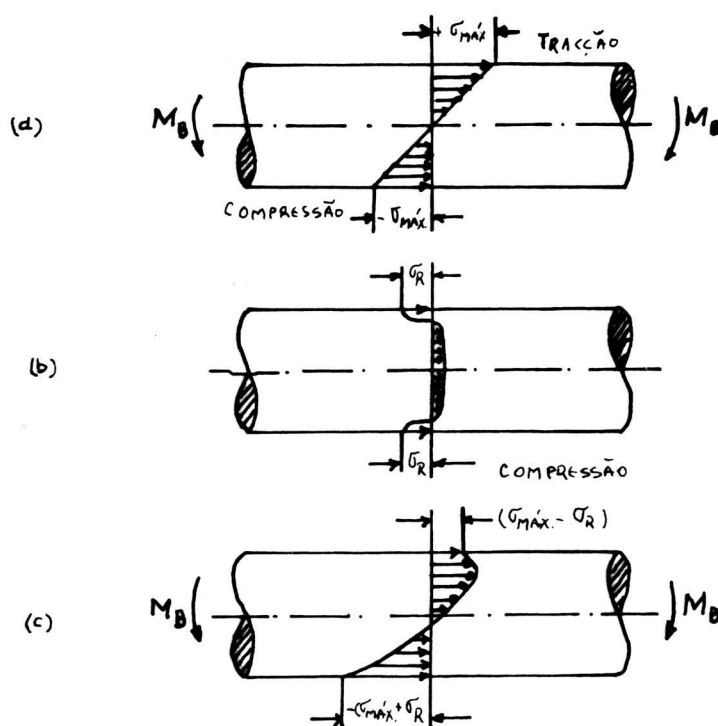
Os revestimentos e outros acabamentos e tratamentos superficiais também influenciam a resistência à fadiga. Por exemplo, os tratamentos térmicos de superfície (cementação, carbonitruração ...), que conduzem à formação de superfícies com dureza elevada, aumentam a resistência à fadiga porque dificultam a iniciação de fendas.

O revestimento electrolítico, a cromagem e a cadmiagem

reduzem o limite de fadiga nas peças de aços.

O endurecimento superficial também pode ser aumentado através de transformações de fase o qual inclui chama, indução e técnicas de tratamento térmico por laser [7].

A formação de um estado de tensões residuais de compressão, à superfície da peça, é um método eficaz de aumentar a resistência à fadiga. A sobreposição de uma tensão residual de compressão, na superfície, com uma tensão de tracção aplicada externamente, diminui a probabilidade de ocorrência de uma rotura por fadiga nesse ponto.



Tensões residuais por tratamento superficial

figura 2.6

Este efeito é exemplificado na figura 2.6 [1], onde se representa a distribuição elástica de tensões numa peça sem tensões residuais submetida ao momento flector M_b (a), a distribuição permanente de tensões que poderá produzir um tratamento de martelamento superficial (b) e a distribuição da tensão residual resultante. Após a análise dos gráficos verifica-se que a sobreposição das tensões de serviço com as tensões de martelamento reduz a tensão máxima de tracção que está deslocada para o interior da barra, e aumenta as tensões de compressão. Assim, a iniciação das fendas de fadiga é dificultada porque se reduziram as tensões de tracção na superfície e aumentaram as tensões de compressão. Isto acontece devido ao facto das tensões de compressão tenderem a fechar as faces das fendas impedindo a propagação das mesmas.

A laminagem superficial (galetagem) e a grenalhagem encontram-se entre os processos tecnológicos mais importantes e mais utilizados na indústria, para criar tensões residuais de compressão. No entanto estes processos devem ser aplicados sob controlo adequado, pois se no processamento a superfície da peça for danificada, a resistência à fadiga diminui em vez de aumentar.

A laminagem superficial é usada principalmente em grandes peças (veios e cambotas no caso de peças para motores). Este processo consiste na utilização de cargas de compressão superficial, aplicadas por rolos pressionados de encontro à peça, geralmente na zona de concentração de tensões (por exemplo zona de concordância em veios e cambotas). As tensões de compressão induzidas dependem do diâmetro dos rolos e da força de encosto.

O tratamento de grenalhagem é normamente utilizado em peças pequenas e consiste em projectar, contra a superfície da peça, esferas de aço ou ferro fundido a grande velocidade. As tensões de impacto, produzidas no choque das esferas contra a peça, são tensões de compressão e estendem-se para o interior da peça. A distribuição destas

tensões depende das diferentes variáveis do processo: velocidade, tipo, tamanho e dureza dos projecteis.

As tensões superficiais de tracção prejudicam a resistência da peça à fadiga, pelas mesmas razões que as tensões de compressão a favorecem. Assim os tratamentos de rectificação podem causar tensões superficiais de tracção pelo que devem ser realizadas sob condições controladas. O tratamento térmico de têmpera total também cria tensões superficiais de tracção e, desta maneira, as peças submetidas a este tratamento é que irão trabalhar sujeitas à fadiga, devem ser revenidas.

Geometria e tamanho da peça

Um dos problemas importantes no projecto das peças sujeitas à fadiga é a previsão do comportamento de peças com grandes dimensões a partir dos resultados obtidos em ensaios de fadiga realizados com pequenos provetes laboratoriais. No entanto, os resultados experimentais obtidos nesta área têm sido bastante contraditórios no que se refere à origem e influência de um efeito de tamanho, visto que, em geral, a resistência à fadiga diminui quando as dimensões da peça aumentam. Assim, deve-se ensaiar a própria peça à fadiga, sempre que possível (tal ensaio pode ter um custo elevado e ser bastante demorado).

Concentração de tensões

Muitos órgãos de máquinas e estruturas metálicas têm zonas de concentração de tensões devidas à existência de roscas, chavetas, orifícios, concordâncias, entalhes, rebaixos, soldaduras, etc.

Na maioria dos casos, estas zonas reduzem a resistência à fadiga provocada pela concentração de tensões porque são locais de nucleação de fendas. Apenas será de referir, neste trabalho, as concentrações de tensões introduzidas por descontinuidades geométricas, embora as concentrações de tensões também possam surgir devido a rugosidades

superficiais e factores metalúrgicos tais como inclusões e sobreaquecimento local na rectificação e descarburacão.

Estudos efectuados nesta área [1], concluíram que a presença de um entalhe num provete sujeito a carga uniaxial produz três efeitos :

- aumento ou concentração de tensões na ponta do entalhe
- gradiente de tensões orientado da ponta do entalhe para o centro do provete
- estado triaxial de tensões

O método de avaliar quantitativamente a influência da concentração de tensões na resistência à fadiga consiste em comparar as curvas S-N obtidas em provetes lisos e com entalhe . Deste modo pode-se concluir que a curva S-N para o provete com entalhe fica abaixo da curva S-N do provete liso, podendo em muitos casos nem sequer haver tensão limite de fadiga.

Define-se factor de redução de resistência à fadiga (K_f), como a relação entre a tensão limite de fadiga de um provete liso (σ_{f_0}) e a correspondente para um provete semelhante com entalhe (σ_{f_e}):
 $K_f = \sigma_{f_0} / \sigma_{f_e}$.

Para materiais que não apresentam limite de fadiga, o valor de K_f é baseado na resistência à fadiga para um determinado número de ciclos. Os valores de K_f variam com a severidade do entalhe, tipos de entalhe , material, tipo de solicitações e nível das tensões.

Meio ambiente

A acção simultânea de tensões dinâmicas e ataque químico numa peça denomina-se fadiga com corrosão. Para que haja fadiga com corrosão é necessário que o meio ambiente que rodeia a peça reaja quimicamente com o metal, havendo formação de picadas na superfície.

As zonas preferenciais para a formação destas picadas são aquelas em que as tensões são mais elevadas. Assim as tensões dinâmicas favorecem a sua formação. Por outro lado, as picadas funcionam como

pequenos entalhes onde a nucleação das fendas de fadiga se processam com mais facilidade devido à concentração de tensões. Por este facto a resistência à fadiga em ambientes corrosivos diminui.

As curvas S-N constituem um meio bastante útil de comparar a resistência dos materiais à fadiga com corrosão e de avaliar o grau de agressividade do meio.

Para minimizar os danos provocados pela fadiga com corrosão deve-se utilizar os seguintes métodos:

- escolha do material com base na resistência à corrosão
- revestimentos adequados
- existência de tensões residuais de compressão (martelagem, grenalhagem, tratamentos térmicos superficiais)
- descontinuidades geométricas mínimas

Temperatura

Os ensaios realizados a temperatura abaixo da temperatura ambiente indicam que a resistência à fadiga aumenta quando a temperatura baixa. Quando se considera a aplicação de cargas dinâmicas a altas temperaturas, a resistência à fadiga baixa quando a temperatura aumenta acima da temperatura ambiente. Geralmente os materiais utilizados a alta temperatura, apresentam interacção entre fadiga e fluência acima de uma certa temperatura, .

As tensões que provocam a rotura por fadiga podem não ter origem mecânica mas sim térmica. As tensões térmicas aparecem quando a variação e dimensões de uma peça provocada por variações de temperatura estiver a ser constrangida. Assim quando a rotura se verifica devido a variações de tensões provocadas por variações de temperatura, a fadiga denomina-se fadiga térmica. A fadiga térmica verifica-se, normalmente, nos equipamentos que trabalham a alta temperatura como fornos, pás de turbinas, reactores, componentes de motores de combustão interna etc.

Variáveis metalúrgicas

A resistência dos materiais à fadiga depende bastante da estrutura. No entanto, existem poucos processos metalúrgicos de melhorar a resistência à fadiga. Essa melhoria é frequentemente procurada por processos mecânicos, tais como a redução da concentração de tensões na peça, o acabamento superficial melhorado e a aplicação de tensões residuais de compressão na superfície da peça.

Um dos parâmetros utilizados para avaliar a resistência à fadiga é a relação de fadiga, quociente entre a tensão limite de fadiga e a resistência à tração, sendo, no entanto, limitado somente ao uso de provetes de laboratório com pequenas dimensões, altamente polidos, sem concentração de tensões e ensaiados com uma tensão média nula à temperatura ambiente.

Do ponto de vista metalúrgico, nos aços de baixa liga de tratamento térmico, obtém-se a melhor resistência à fadiga com uma estrutura temperada e revenida. Mas quando a dureza ultrapassa 40 HRC, a estrutura bainítica produzida por austêmpera dá uma melhor resistência à fadiga do que a estrutura temperada e revenida com a mesma dureza. Nos aços temperados e revenidos o limite de fadiga aumenta quando se baixa a temperatura de revenido acompanhando o aumento da resistência à tração, mas quando a dureza atinge valores entre 45 HRC e 55 HRC, dependendo do tipo do aço, o limite de fadiga diminui.

Nos aços e ligas não ferrosas de alta resistência, a resistência à fadiga diminui com a quantidade e distribuição das inclusões existentes. Este problema pode ser eliminado por controlo da precipitação nas fronteiras de grão, mas exige normalmente processos de vazamento em atmosfera controlada para reduzir os gases libertados e, consequentemente, reduzir os compostos não metálicos criados.

Nos ferros fundidos nodulares, a resistência à fadiga pode ser favorecida pela redução da percentagem de manganês e pela diminuição da

percentagem de perlite na matriz.

Os nódulos de grafite têm um papel importante nos mecanismos de fractura por fadiga ao promoverem, numa matriz relativamente uniforme, a nucleação de fissuras através de microtensões locais; ao mesmo tempo têm um efeito contrário porque promovem a mudança de curvatura, local, da frente da fenda [9].

3 ENSAIOS

3.1. Ensaio de fadiga

O comportamento dos materiais, componentes e estruturas em termos de resistência à fadiga é avaliada com os resultados obtidos nos ensaios de fadiga. Os ensaios de fadiga podem ser realizados em provetes do material ou nas próprias peças, estruturas ou detalhes.

Os ensaios de fadiga em provetes, destinam-se quase exclusivamente a caracterizar e fazer selecção de materiais, tratamentos térmicos, mecânicos ou químicos, condições de processamento, etc. Frequentemente os ensaios em provetes só têm interesse comparativo, entre outras razões porque só muito raramente o provete a ensaiar terá geometria idêntica à da peça em serviço. No entanto, são os ensaios mais vulgarizados por serem os de mais fácil execução e menor custo de realização [1].

Os ensaios em estruturas são utilizados para fins comparativos, em termos de materiais e para optimização de formas geométricas e estabelecimento de solicitações admissíveis. São geralmente ensaios dispendiosos que só se justificam se o custo da construção for elevado e se a informação obtida do ensaio for de grande importância para a optimização do projecto [1].

Sendo vários os equipamentos e técnicas utilizadas na execução destes ensaios, sómente será referido o ensaio executado nos órgãos mecânicos objecto deste estudo, isto é, as cambotas de motores de explosão.

Tipo de ensaio:

Flexão com $R=0$ (R = momento mínimo/momento máximo).

Provetes:

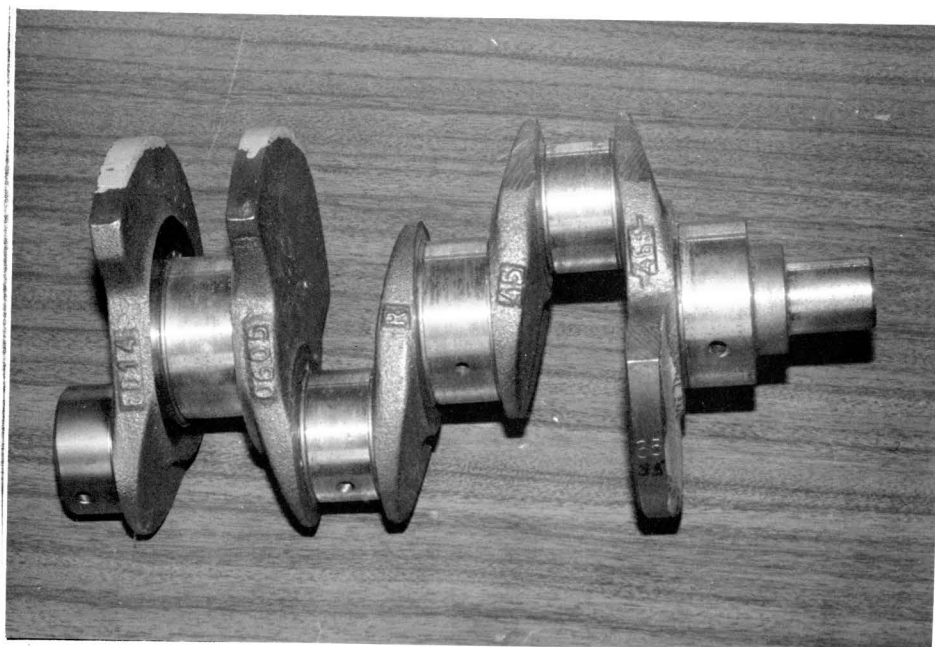


figura 3.1

Os provetes são realizados nas próprias peças (cambotas), seleccionando a parte da peça que se quer analisar (4º apoio do lado do volante)

Equipamento [4]

O ensaio é conduzido numa máquina Sonntag Universal, produzida pela SATEC SYSTEMS, INC., modelo SF-1U com as seguintes características:

-Constante da mola igual a 71,28 kg/ 0.1 mm

-Capacidade

- carga dinâmica ± 500 kg
- carga estática de 0 a 500 kg

-amplitude

- deslocamento máximo do oscilador igual a ± 0.9 cm
- deslocamento máximo do oscilador com carga total aplicada igual a ± 0.3 cm

-motor síncrono de 380 V, 50 Hz, 1500 rpm

-frequência da operação 1500 rpm com precisão de ± 0.25 %



figura 3.2

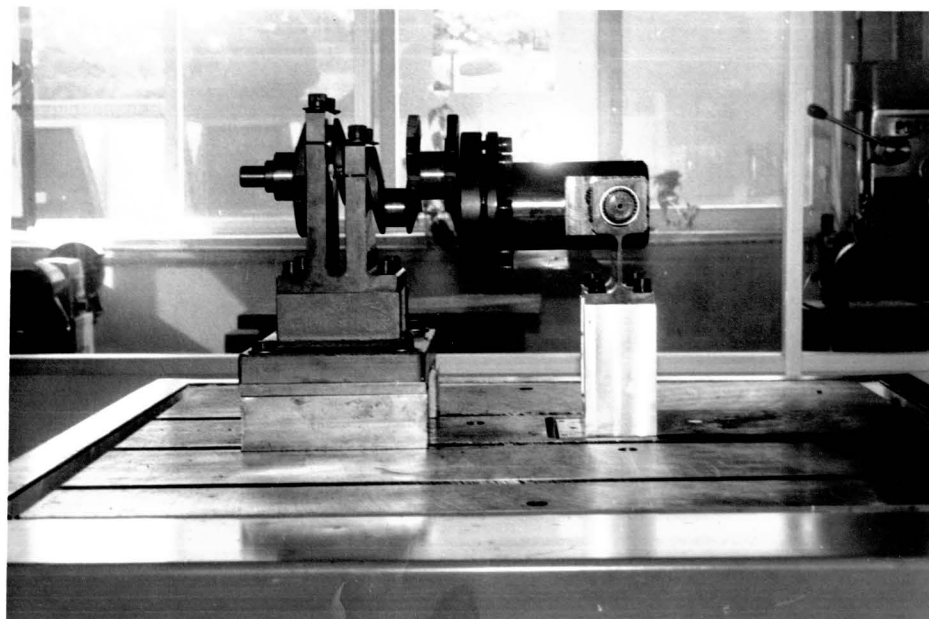
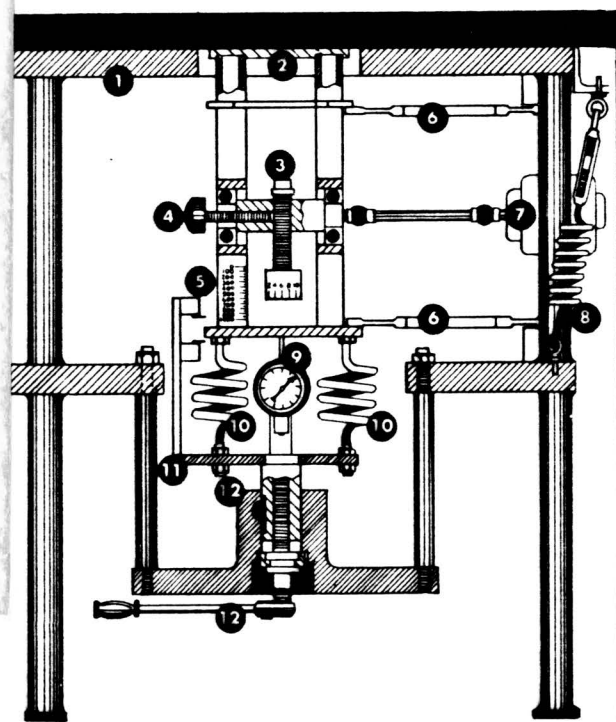


figura 3.3



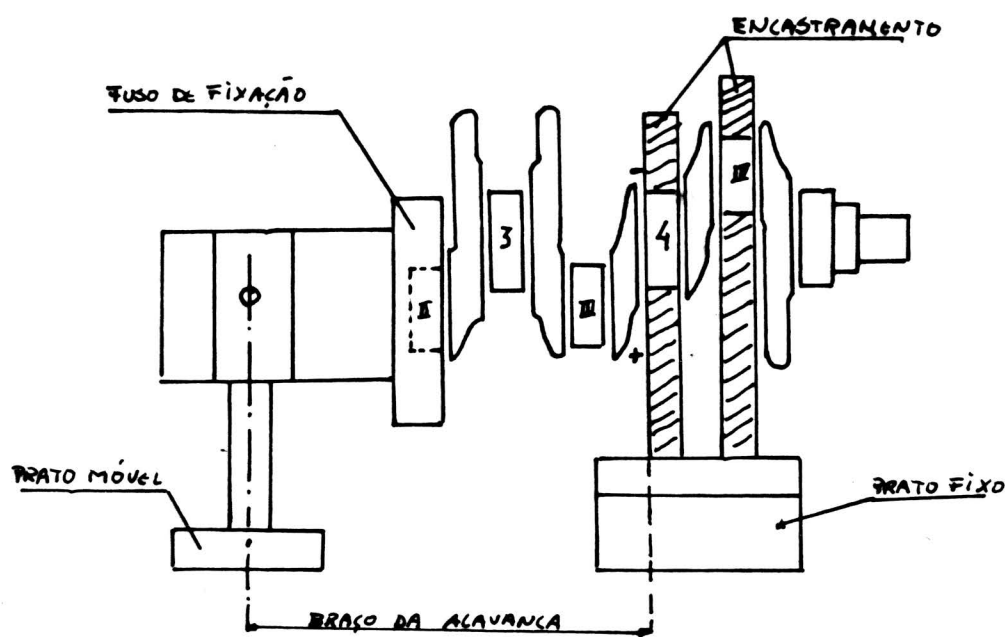
Legenda:

- 1-Prato estático
- 2-Prato móvel
- 3-Excêntrico
- 4-Fixação do excêntrico
- 5-Escala
- 6-Barras de absorção da força centrífuga horizontal
- 7-Motor síncrono
- 8-Molas de anulação de vibrações
- 9-Comparador
- 10-Molas de absorção da força de inércia produzida pela vibração vertical
- 11-Prato de fixação das molas
- 12-Mecanismo de pré-carga

figura 3.4



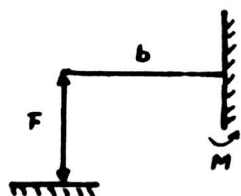
Descrição do ensaio



Esquema do ensaio de fadiga

figura 3.5

- 1- Colocar o prato móvel ao nível da mesa
- 2- Colocar o apoio da cambota, sem apertar, no fuso de fixação do apoio móvel
- 3- Posicionar a cambota nos encastramentos, apertando-a definitivamente
- 4- Aplicar uma ligeira pré-carga de modo a imobilizar o apoio móvel, subindo ligeiramente o prato móvel. Apertar então a cambota no fuso com a regulação indicada para o binário dos parafusos de aperto
- 5- Suprimir a pré-carga anterior e fixar na máquina o comparador de medida da pré-carga fazendo o zero desta
- 6- Definição da pré-carga (carga estática)



$$M = F \times b$$

$b = \text{BRAÇO}$
 $M = \text{MOMENTO}$
 $F = \text{FORÇA}$

6.1-Determinação do deslocamento a dar à mesa para aplicar a carga estática. Como exemplo se $F=80/b$, sendo a constante da mola igual a 71,28kg/0.01 mm então

$$\begin{array}{l} 71.28\text{-----}0.01 \\ 80/b\text{-----} x \end{array}$$

O deslocamento de "x" milímetros mede-se colocando um comparador sobre a parte móvel da máquina, junto da zona de fixação das molas

6.2-A carga dinâmica deve ser igual à carga estática, à qual ela se sobrepõe, de modo que se opere em repetido, isto é com $R=0$

6.3-Medir com um comparador a amplitude do deslocamento do prato móvel por referência à mesa para:

- a pré-carga desejada
- o dobro desta pré-carga (máximo do ciclo)

A diferença dá a amplitude dinâmica a obter, sendo a rigidez estática e dinâmica praticamente iguais (esta operação deve ser feita três vezes a fim de assegurar a colocação das peças e a diferença é feita na terceira medição que não deve, praticamente, diferir da segunda.

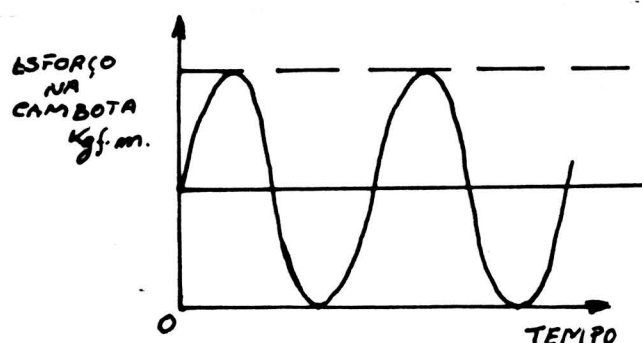
6.4-Aplicar a pré-carga estática e recolher o valor da pré-carga

7-Aplicação da carga dinâmica

Como a carga dinâmica máxima deve ser igual ao dobro da pré-carga, as deslocações lidas na cambota em movimento (com a máquina a aplicar ciclos de fadiga), devem ser o dobro da deslocação obtida com a pré-carga, lidas no prato móvel.

Coloca-se um comparador invertido sobre a fixação móvel da cambota (para maior facilidade de leitura) e, após ter regulado o excêntrico que vai produzir o movimento alternado, numa posição ao acaso, colocar a máquina em movimento.

Com o comparador lê-se o deslocamento que a máquina está a produzir. Se for igual ao dobro do deslocamento introduzido com a pré-carga a máquina está bem regulada; caso contrário repetir a operação por tentativas e sucessivas regulações do excêntrico.



Ciclo de tensão de fadiga repetido com $R=0$

figura 3.6

8-Fixar o excêntrico de modo a garantir que não se movimenta durante o ensaio

9-posicionar correctamente os fins de curso de segurança

10-ligar a máquina tendo o cuidado de pôr o contador de ciclos a zero

Análise de resultados obtidos em ensaios de fadiga

O método mais utilizado na análise de resultados obtidos nos ensaios de fadiga, baseia-se nas curvas tensão aplicada em função do número de ciclos de rotura, designadas por curvas S-N.

O processo de obter essas curvas consiste em registar o número de ciclos até à rotura de provetes submetidos a diferentes tensões aplicadas. Cada provete está submetido a uma determinada amplitude de tensão que se mantém constante durante todo o ensaio.

O ensaio termina quando se verificar a rotura do provete ou quando se exceder um determinado número de ciclos suficientemente longo (usualmente 10^7 ciclos).

Os valores da tensão que entram na curva S-N, são em geral tensões nominais, sem entrar com concentrações de tensões, tensões residuais ou térmicas.

Em alguns materiais a curva S-N torna-se horizontal para uma determinada tensão limite que funciona como assíntota da curva. Para tensões abaixo dessa tensão limite, denominada tensão limite de fadiga o material poderá, provavelmente, suportar um número infinito de ciclos sem partir. No entanto, este comportamento não pode ser generalizado, porque em muitos metais não ferrosos a curva S-N tem uma inclinação que decresce gradualmente com o número de ciclos de rotura. Neste caso em que os materiais não tenham limite de fadiga verdadeiro pode definir-se uma tensão limite de fadiga convencional para 10^7 ou 10^8 ciclos.

Os resultados dos ensaios de fadiga são caracterizados por uma grande dispersão, devida a vários factores entre os quais se podem salientar variações nas dimensões e acabamento superficial dos provetes, falta de homogeneidade do material e nível de precisão da máquina de ensaio.

No caso dos ensaios objecto deste relatório, a representação dos resultados é feita em termos de momento flector aplicado versus número de ciclos até à rotura, por ser esta a forma de representação com interesse industrial.

Naturalmente, a haver interesse numa representação do tipo tensão versus número de ciclos até à rotura, apenas haveria que determinar a tensão nominal na secção de encastramento, através da bem conhecida relação da resistência de materiais:

$$\sigma = \frac{M (d/2)}{\pi d^4 / 64}$$

Chama-se porém a atenção para o facto do objectivo deste trabalho não ser a caracterização laboratorial do material, mas o estudo das condições de serviço de um componente real. Desejando-se a caracterização do material, naturalmente que o provete a utilizar teria sido outro.

3.2 Caracterização da peça a ensaiar ; relação com os ensaios de fadiga

Caracterização da peça [5]

- Função principal: receber o esforço transmitido pelos pistons e bielas, fornecendo um movimento circular à saída do motor, ou seja, transformar o movimento alternativo dos pistons-bielas em movimento rotativo (fig.3.7).

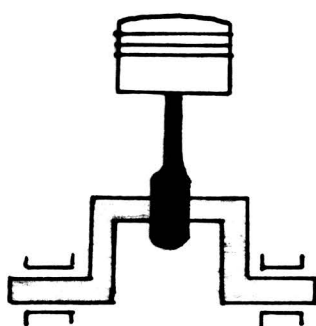


figura 3.7

- Funções secundárias: transmitir movimento à árvore de cames, à bomba de óleo do circuito de lubrificação, ao alternador, ao distribuidor e à bomba de água.
- Características mecânicas: deverá possuir suficiente rigidez para suportar os esforços de flexão e torção a que vai estar submetida, e estar equilibrada quer estática quer dinamicamente.
- Características do material utilizado: a peça é em ferro fundido esferoidal perlítico com tratamento "GS".
- A composição química: carbono 3.5 a 3.9%; silício 1.8 a 2.8%; magnésio 0.2 a 0.9%; enxofre < 0.02%; fósforo menos de 0.05%.
- Estrutura: esférolas > 85%; perlite-ferrite < 25%; cementite < 2%.
- Dureza: 241 a 269 HB

- resistência à tracção (R_m) $\geq 750 \text{ N/mm}^2$.
- Alongamento $> 3\%$
- Resiliência $\geq 6 \text{ Joules/cm}^2$.

Concepção da peça

-Cambota de 5 apoios e 4 manivelas. Os 5 apoios contribuem para aumentar a rigidez. Tanto os apoios como as manivelas são obtidos por rectificação

-A ligação apoios-manivelas é feita com contrapesos que têm também função de equilibragem.

-Para melhorar as características mecânicas da cambota, as extremidades das manivelas e dos apoios são submetidas a uma operação de "galetagem" (fig 3.8). Esta operação consiste em encruar o material por compressão e é fundamental para garantir a desejada resistência à fadiga.

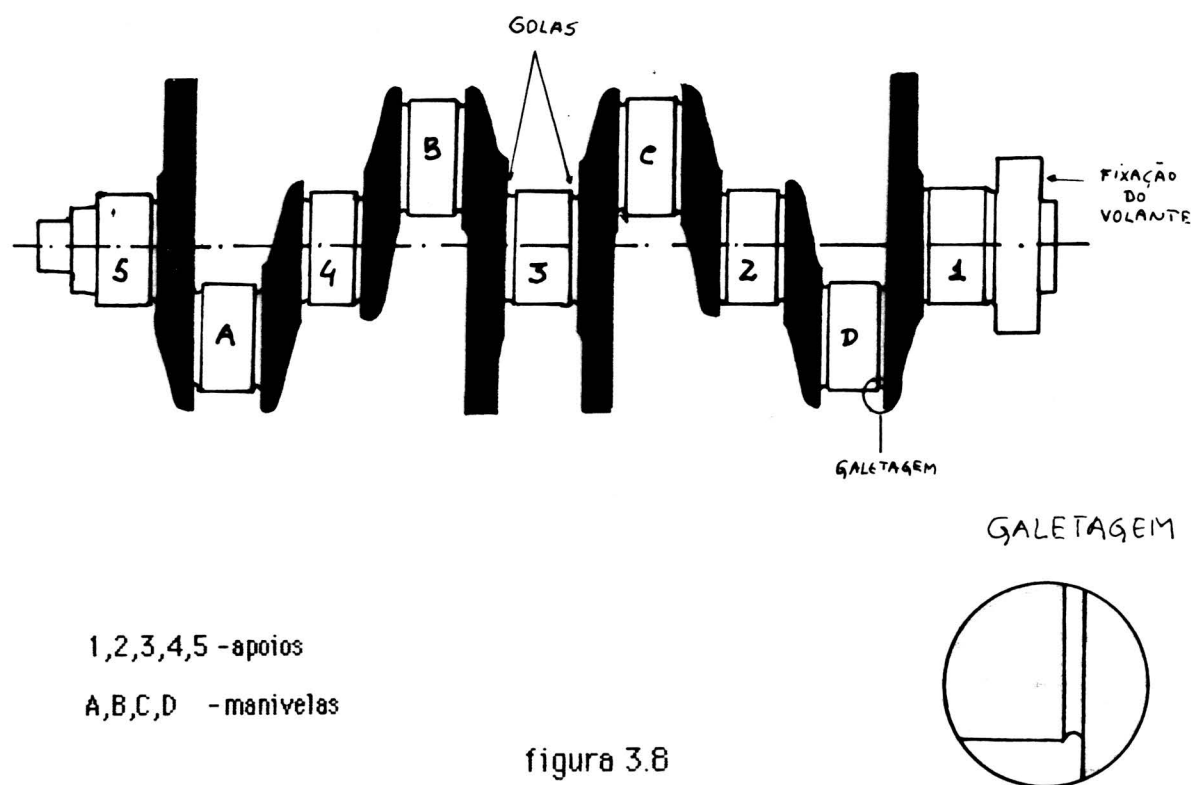


figura 3.8

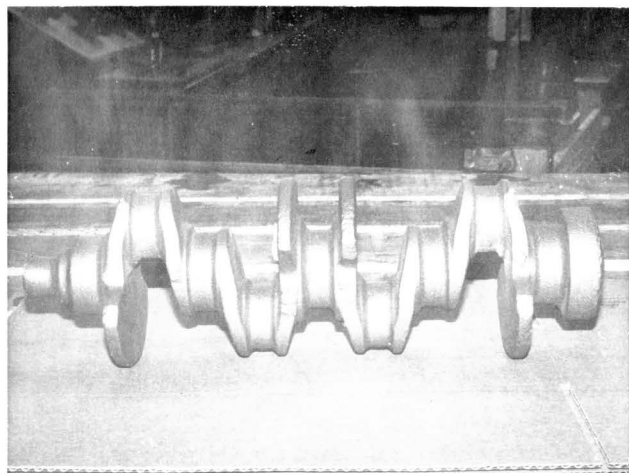
Ensaio de fadiga

Como a cambota está sujeita a esforços cíclicos, torna-se necessário efectuar ensaios com cargas alternativas para verificar a resistência à

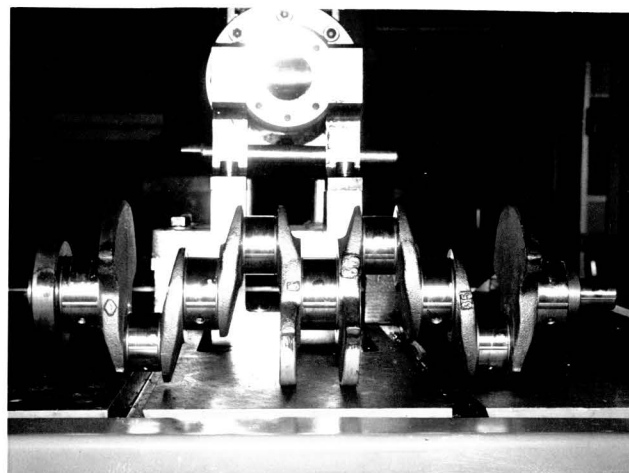
fadiga.

Para simulação das condições de serviço, a solicitação aplicada é um momento flector com $R=0$ permitindo traçar uma curva de Wöhler padrão. Os desvios em relação ao especificado são detectados por resultados fora da curva padrão.

3.3 Processo de fabrico (descrição sumária)



Cambota no estado bruto de fundição
figura 3.9



Cambota no estado final de acabamento
figura 3.10

A operação de maquinagem é feita em três fases:

- operações de torno
- rectificação
- acabamento

Na primeira fase a cambota sofre operações de torno a fim de ser preparada para a rectificação. Em seguida, com a operação de rectificação, a peça aproxima-se da fase final. O acabamento tem em vista equilibrar dinamicamente a peça e dar-lhe o acabamento final.

Depois das operações de torno, a peça sofre uma operação de galetagem, referente aos apoios e manivelas.

3.4 Galetagem (descrição promenorizada)

Generalidades

A galetagem tem por efeito criar tensões superficiais de compressão, aumentar a dureza superficial e criar uma superfície polida de forma a aumentar consideravelmente a endurance das cambotas.

Estudos efectuados sobre cambotas em "fontes GS", mostraram que a resistência à fadiga era multiplicada por um factor de dois, após uma boa galetagem [6]. Nestas condições, a galetagem é imposta nos raios ou locais de elevada concentração de tensões em serviço, que podem levar a peça à rotura. Esta operação deve ser correctamente realizada pois uma má galetagem pode reduzir a resistência a metade. [6]

Pastilhas de encalcamento [6]

Tipos:

-simples (utilizada no caso em estudo)

$$\varnothing G = 15 \pm 0.02 ; R_G = 1.35 - 0.05$$

-cónicas (aplicada em motores de alta cilindrada)

$$\varnothing G = 15 \pm 0.02 ; R_G = 1.35 - 0.05 ; \vartheta = 124^\circ \pm 1$$

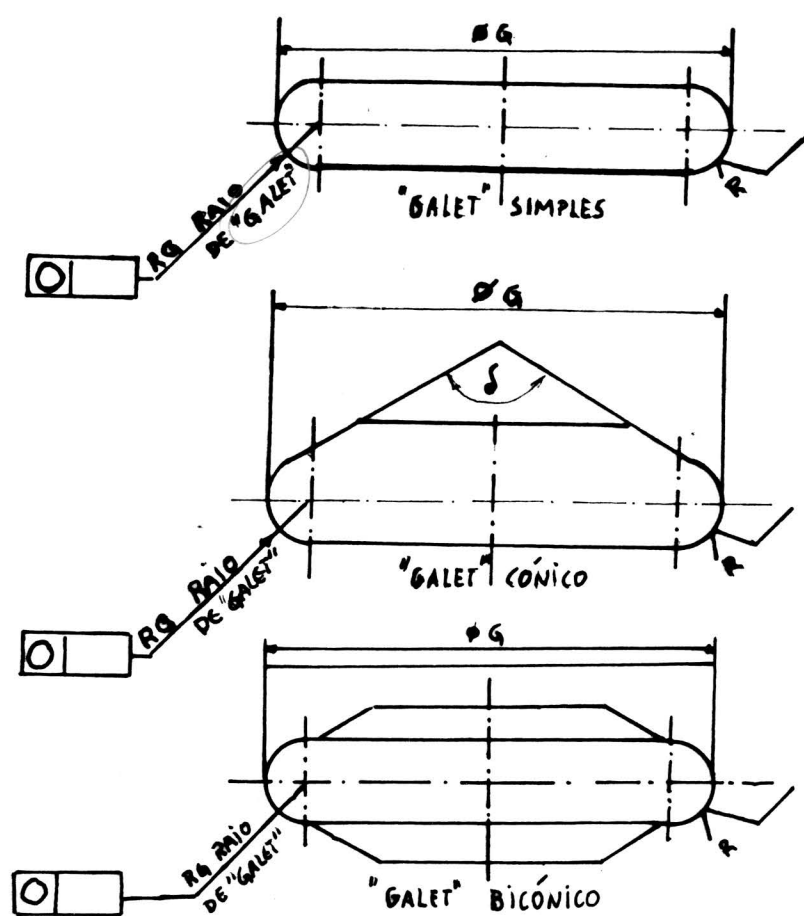
-bicónica (aplicada em motores de alta potência: turbo)

$$\varnothing G = 15 \pm 0.02 ; R_G = 1.35 - 0.05$$

Material: aço rápido 280 WD com tratamento T6

Dureza: HRC > 62

Estado de superfície do raio: $R = 1.25 \sqrt{FR + RM}$



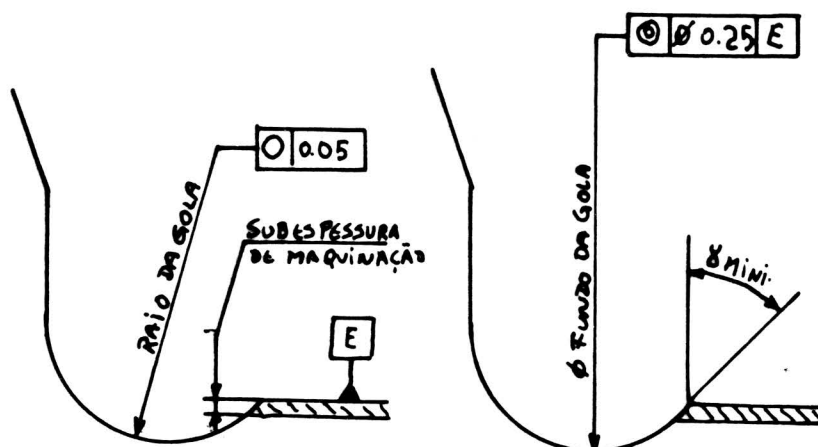
Esquemas dos tipos de pastilhas

figura 3.11

Golas antes da galetagem [6]

Geometria: antes da galetagem (forma, posição, concordância), difere da geometria de uma peça acabada, pela presença duma subespessura de maquinagem sobre manivelas e apoios. Essa subespessura não deve em nenhum caso dificultar o trabalho da pastilha (fricção da pastilha sobre a subespessura de maquinação).

O respeito dimensional da forma absoluta da gola (circularidade do raio, valor do raio) é necessário. Os outros parâmetros estão indicados na figura 3.12



NOTA:

RAIO DE CURVATURA:

$1,35 \pm 0,1$

γ MÍNIMO: 45°

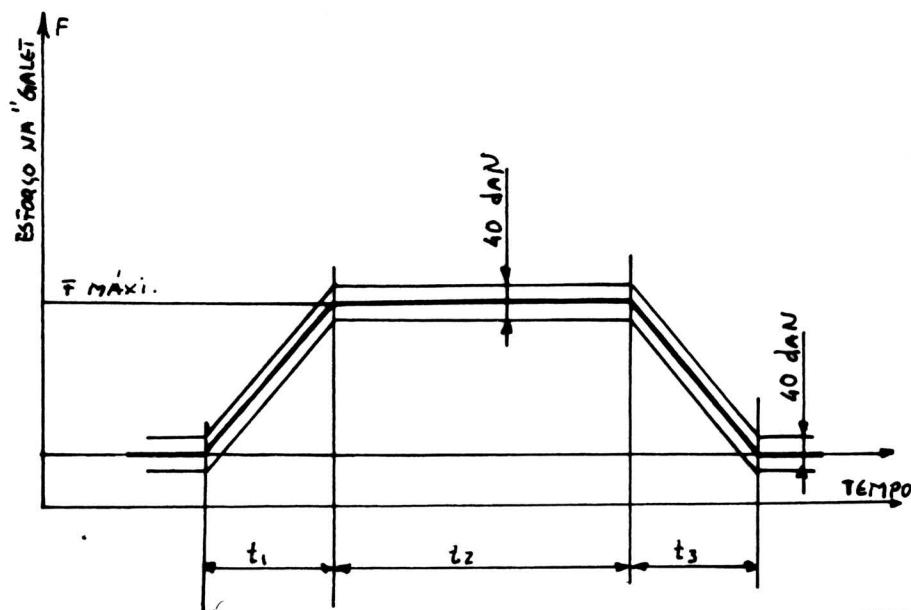
Esquema do perfil da gola

figura 3.12

Estado de superfície das golas

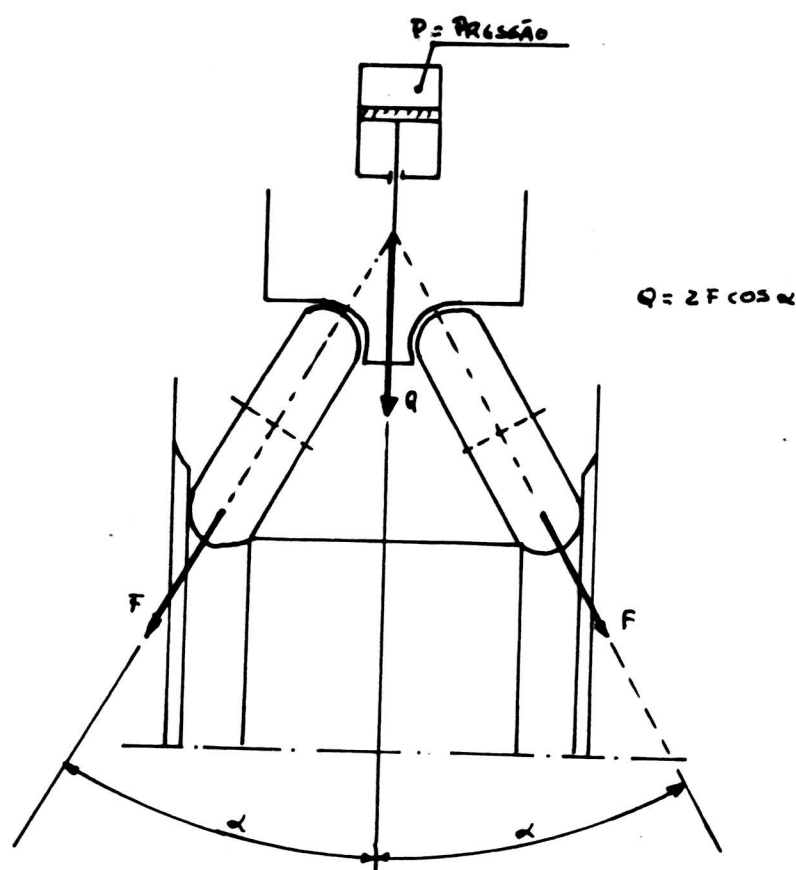
O estado de superfície das golas antes da galetagem deve ser $R12\sqrt{EA}$ [6]

Operação de galetagem



Ciclo de operação de galetagem

figura 3.13



Esquema da operação de galetagem

figura 3.14

O esquema geral da operação de galetagem, especificado pelo fabricante Renault, consiste no seguinte: o tempo total de aplicação dos esforços é, no mínimo, de 18 segundos (14 voltas) fig.3.13. O esforço é aplicado, sem descontinuidades, dentro da seguinte margem:

ESFORÇO MÁXIMO DA PASTILHA: F (dan)	PRESSÃO MÁXIMA P (bar)	α	ROTAÇÃO DA CAMBOTA (Nº DE VOLTAS)	
480 ± 20	28 ± 1	30°	t_1	3 ± 0.5
			t_2	8 ± 0.5
			t_3	3 ± 0.5

Em alterações posteriores no sentido de aumentar o rendimento da

operação, foram eliminados os ciclos t1 e t3, estando actualmente a funcionar com os seguintes parâmetros :t2=11 voltas; P= 24 bar.

Lubrificação

Uma lubrificação adequada contribui para a eficácia da galetagem e evita, em particular, uma deterioração muito rápida das pastilhas.

Natureza do óleo: óleo hidráulico tipo HM 68 ou HM32

Débito por braço: 5 l/mm

Operações complementares

O desempenho das cambotas após galetagem é posterior. A gama de fabricação deve prever esta operação caso seja necessário.

Uma segunda galetagem não é autorizada sobre uma superfície conforme. Caso contrário é imperativo, não devendo ser utilizada directamente para fazer desaparecer um defeito de superfície.

Controlo

A obtenção de uma boa galetagem supõe o respeito pelos seguintes parâmetros:

- esforço sobre as pastilhas
- duração da galetagem
- estado de superfície das golas após galetagem
- raios da patilha e golas após galetagem

Controlo de aspecto

Este controlo permite assegurar, após a galetagem, que a operação foi correctamente efectuada, com um estado de superfície perfeito, mas não permite garantir que os valores de todos os parâmetros foram respeitados.

Controlo destrutivo

Amostragem frequencial efectuada por ensaios de endurance na máquina de ensaios de fadiga. A frequência é determinada após acordo com o gabinete de estudos, pelo controlo-qualidade da fábrica, de forma a ser possível fazer o seguimento da produção.

Máquina de galetagem [9]

Referência: Hegenscheidt tipo 7812 K

Modo operativo:

A máquina é alimentada por basculamento de um dispositivo de alimentação após engrenagem de dois botões colocados lateralmente. Depois do ciclo de trabalho automático a cambota sofre a operação de galetagem deixa a máquina através do mesmo dispositivo.

- 1-Seleccionar o ciclo automático através do botão correspondente, assim como o botão de comando.
- 2-O carregador basculante posiciona a cambota na máquina entre as unidades
- 3-As cabeças de apoio inferior deslocam-se, centrando a cambota com a pressão inicial pré-seleccionada.
- 4-Após a obtenção da pressão inicial, o motor de comando entra em funcionamento. Durante o tempo de galetagem pré seleccionado a operação efectua-se com a pressão de galetagem escolhida; findo o tempo de aplicação da pressão máxima, a pressão diminui até à pressão inicial.
- 5-As cabeças de apoio abrem e libertam a peça. Após a descida das cabeças de apoio o descarregador retira a cambota.

Principio de funcionamento [9]

Baseia-se no "transporte" da peça pela cambota padrão. É necessário que as cambotas a maquinar correspondam em dimensões iguais com uma tolerancia inferior a 3 mm segundo especificação do fabricante. Para cada tipo de cambota é necessário ter um padrão.

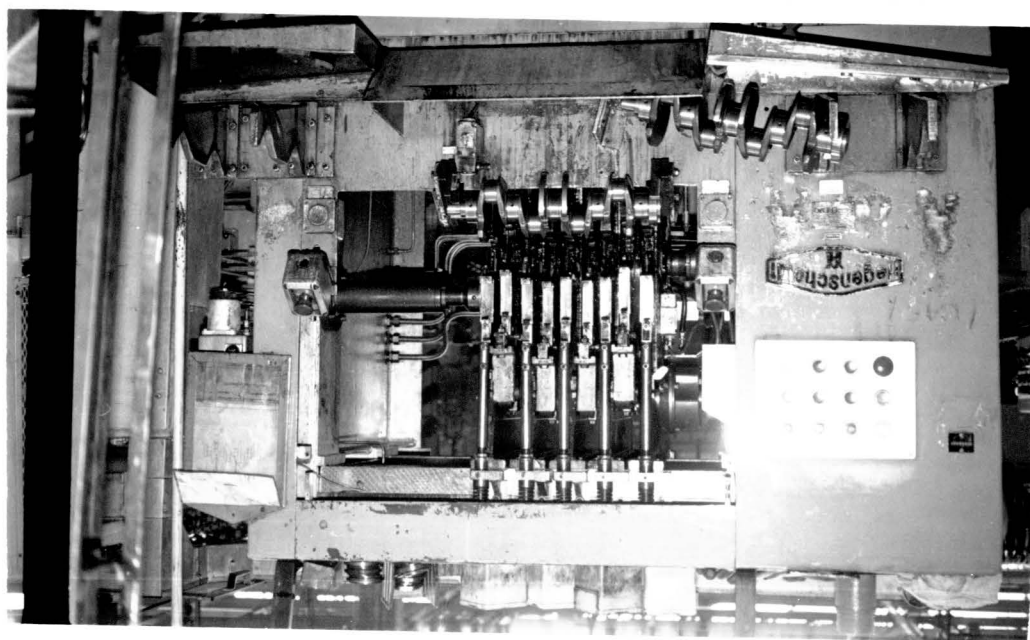


figura 3.15

3.4 Parte experimental

3.4.1 Plano de trabalho

- a) Determinação da curva de Wohler padrão, para uma amostra de 50 cambotas, retiradas aleatoriamente da produção diária.
- b) Estudo da influência da pressão e rotação da cambota na operação de galetagem:
 - 1- Para garantir o mínimo de heterogeneidade nas peças em estudo, em relação ao material e geometria da peça, procedeu-se da seguinte forma:
 - retiraram-se peças do mesmo fornecimento da fundição
 - as peças foram maquinadas num período de tempo sucessivo
 - determinação da excêntricidade e raio de curvatura, antes da operação de galetagem

-determinação das características metalúrgicas do material, numa peça, referente a cada curva de Wöhler segundo o gráfico 3 II.

2-Determinação das curvas de Wöhler para diferentes pressões de galetagem e rotação da cambota.

REFER. DA CURVA	PRESSÃO DE GALETAGEM (BAR)	ROTAÇÃO DA CAMBOTA (Nº DE VOLTAS)	MOMENTO FLECTOR CORRESPONDENTE À PRÉ-CARGA (Kgf.m)
0	SEM GALETAGEM	—	80 ; 70 ; 60
1	20	11	80 ; 70 ; 60
2	24	11	80 ; 70 ; 60
3	28	11	80 ; 70 ; 60
4	20	8	80 ; 70 ; 60
5	24	8	80 ; 70 ; 60
6	28	8	80 ; 70 ; 60

3-Determinação do raio de curvatura e excentricidade entre pontos, antes e após galetagem.

4-Relação de dureza na gola antes e após encalcamento e relação com a pressão aplicada.

c) Análise dos fácies de fractura de fadiga

d) Micrografia na zona da fractura antes e após encalcamento; análise da progressão duma fissura no ensaio de fadiga antes e após o encalcamento.

3.4.2 Ensaio realizados e resultados obtidos

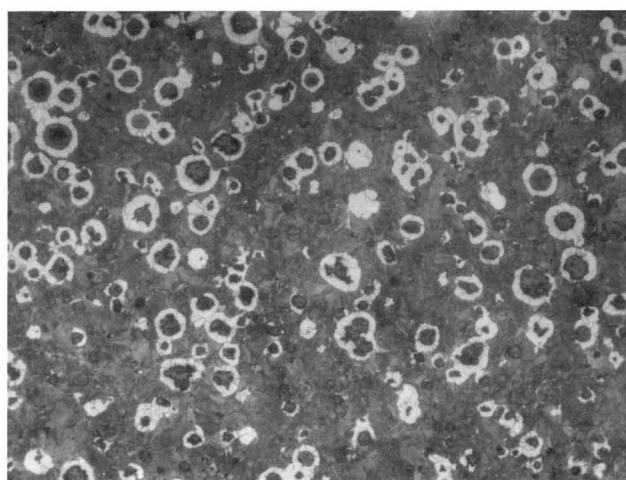
a) Curva de Wöhler padrão (gráfico 3.1): representação gráfica do momento flector correspondente à pré-carga em função do número de ciclos. Nesta mesma representação gráfica, foi calculada a recta de regressão e os limites de confiança a 95% para os valores entre 85 Kgf.m e 60 Kgf.m, excluindo os valores correspondentes ao limite de fadiga

(10⁷)[2].

b) Curvas de Wöhler para diferentes pressões de galetagem e rotação da cambota (gráfico 3.2).

- para cada curva foram efectuados ensaios de fadiga para os seguintes momentos flectores: 60 Kgf.m, 70 Kgf.m, 80 Kgf.m
- cada valor representado no gráfico corresponde ao valor médio durante o ensaio de fadiga, que decorre como já se disse em condições de R=0
- as rectas a vermelho são os limites de confiança a 95% determinados no gráfico 3.1.
- a curva Ø corresponde a ensaios de fadiga em cambotas sem galetagem e situa-se abaixo dos limites de confiança a 95%
- à medida que a pressão de galetagem aumenta, as curvas deslocam-se para cima
- Em geral, a influência da rotação da cambota na galetagem é mais efectiva para altas pressões do que para baixas (comparação entre as curvas 1-4, 5-2, 6-3), devido possivelmente ao facto das curvas com P=20 bar se aproximarem do limite de confiança inferior.

c) Ensaios mecânicos, análise química e micrografia, numa peça referente respectivamente a cada curva do gráfico 3.1. (QUADRO 3.1.)



Estrutura numa peça em estudo (amp 100 x) Ferro fundido esferoidal perlítico

figura 3.15

d) Determinação do raio de curvatura da gola antes e após galetagem
-referência do equipamento: projector de perfil Werth, tipo record 73

-peças ensaiadas: todas as do gráfico 3.2. (GRÁFICO 3.3)

e) Determinação da excêntricidade entre pontos, antes e após galetagem

-tipo de equipamento: entre pontos e comparadores tesa 0,00

-peças ensaiadas: todas as do gráfico 3.2.

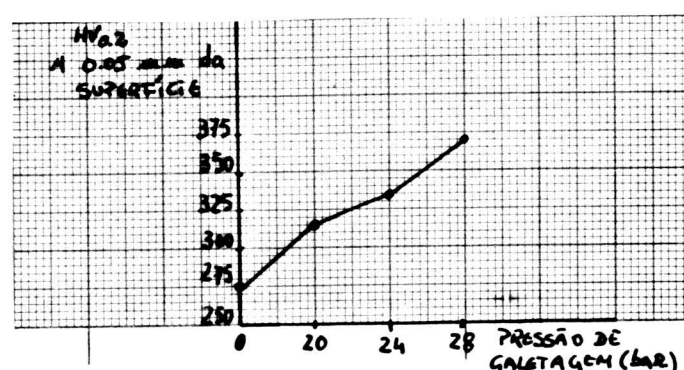
-resultados : gráfico 3.4

f) Relação de dureza na zona da gola

-foram efectuados ensaios de microdureza na zona da gola, antes e após galetagem, e sua relação com a pressão aplicada

-as peças de ensaio são referentes às respectivas curvas 0, 1, 2 e 3 do gráfico 3.2

-a localização da dureza foi efectuada sómente na matriz perlítica



g) Aspectos macroscópicos da superfície de fractura

Após análise de várias superfícies de fractura temos de realçar os seguintes aspectos:

-foram identificadas as seguintes zonas: (fig. 3.18)

1-início de fractura na zona da gola sujeita a esforços de tracção

2-zona de fissuração progressiva de grão mais ou menos fino

3-zona de fissuração progressiva de grão grosseiro e brilhante

4-zona de rotura final de grão grosseiro e irregular

-para peças com iguais parâmetros na operação de galetagem e submetidas a esforços diferentes no ensaio de fadiga, verifica-se que em geral quanto maior fôr o esforço aplicado, maior é a zona de rotura final (fig. 3.16)

-na zona 2 visualiza-se, a partir da zona de iniciação de fractura, as linhas RADIAIS ou nervuras características de fractura por fadiga (fig. 3.18).

h) Aspectos microscópicos da superfície de fractura

Após análise de várias superfícies de fractura, constata-se o seguinte:

-as fendas têm origem na zona da gola. O início da fractura por fadiga pode ter origem em várias fendas, fracturando sómente através da fissura principal (figs. 3.41 e 3.42). Nas figuras 3.37 e 3.38 observa-se a propagação de uma fenda secundária que se propaga pelo interior da esfera de grafite.

-análise comparativa das seguintes zonas:

1-zona de fissuração progressiva de grão fino

2-zona de fissuração progressiva de grão grosseiro

3-zona de rotura final

A primeira zona apresenta-se muito deformada, com uma superfície muito "nervurada ou enrugada ou em couve" típica da fractura por fadiga (fig. 3.35). Esta zona apresenta maior percentagem de esferas de grafite soltas que na zona 2 e 3 (figs. 3.30, 3.31, 3.32)

A zona 2 é a zona de grão grosseiro com pontos brilhantes de fractura frágil (figs. 3.33 e 3.34). Esta zona apresenta menor percentagem de esferas soltas de grafite com elevada deformação ao longo dos contornos das esferas e com maior rugosidade que na zona anterior (figs 3.30, 3.31, 3.32)

Quanto à zona de rotura final, apresenta-se com maior percentagem de pontos frágeis com baixa deformação plástica em relação às zonas anteriores (figs. 3.29 e 3.32)

A presença de estriação dúctil na superfície de fractura, foi

visualizada na zona 1 e 2 como mostram as figuras 3.39 e 3.40. Estando pouco desenvolvidos na zona 1 em virtude de uma estrutura heterogenea e um ensaio de fadiga com $R=0$. As estrias localizam-se nas zonas dúcteis do material, que é a ferrite que contorna as esferas de grafite.

Quanto à progressão da fissura na fractura por fadiga, num ensaio de fadiga sem rotura final verifica-se que a fissura principal se propaga de uma forma mais ou menos irregular por toda a matriz (figs. 3.44 e 3.45).

3.6 Conclusões

Após a realização deste trabalho a autora pensa que se conseguiram realizar os objectivos propostos:

- observar experimentalmente que as tensões de compressão residuais na zona da gola, aumentam a resistência à fadiga (gráfico 3.2)
- as variações dos parâmetros da galetagem, utilizados, apresentam resistência à fadiga dentro dos limites de confiança determinados na curva padrão (gráfico 3.1).
- quanto maior a pressão de galetagem (encruamento) maior a resistência à fadiga; para pressões elevadas quanto maior a rotação da cambota maior a resistência à fadiga (gráfico 3.2)
- em termos de rendimento da operação de galetagem, consegue-se um aumento da resistência à fadiga aumentando a pressão e diminuindo o número de voltas sendo os valores aceitáveis observados experimentalmente $P=28$ e $V=6$ (gráfico 3.2).
- quanto ao raio de curvatura antes e após galetagem, a variação observada não é significativa o que está de acordo com uma boa operação de galetagem
- quanto à excêntricidade, uma boa operação de galetagem contribui para o desempenho da peça; caso contrário a peça deverá ser submetida à operação de desempenho.

donde
da fadiga
é a fadiga

↓ muito rigor

K_c

4-BIBLOGRAFIA

- [1] Branco, Carlos A.G., "Mecânica dos Materiais" cap. 14, 1985
- [2] Branco, Carlos A.G., Fernandes, A.A., Castro, P.M., "Fadiga de Estruturas Soldadas" cap. 2, apêndice B, 1986
- [3] Seabra, A.W., Salta, M.M., "Casos Práticos de Fractura de Fadiga", I Jornadas Ibéricas de Fadiga
- [4] "Instruction Manual, Satec Systems, Inc. for Sonntag Fatigue Testing Machine Model SF-1U"
- [5] "Technologie Automobile", Moteur à Essence a 4 Temps, Edition Renault Francaise 1984
- [6] "Specifications Techniques: Galetage des Gorges de Vilebrequins em Fonte G.S."
- [7] "Journal of Engineering Materials and Technology", Transactions of ASTM, vol. 109/179, July 1987
- [8] "Fatigue Fracture Engineering Materials Structural", vol.10 nº3, pp 223-237, 1987
- [9] "Manuel de Service d'Entretien pour Machine à Galeter les Vilebrequins" Referência Hegenscheidt tipo 7812 k

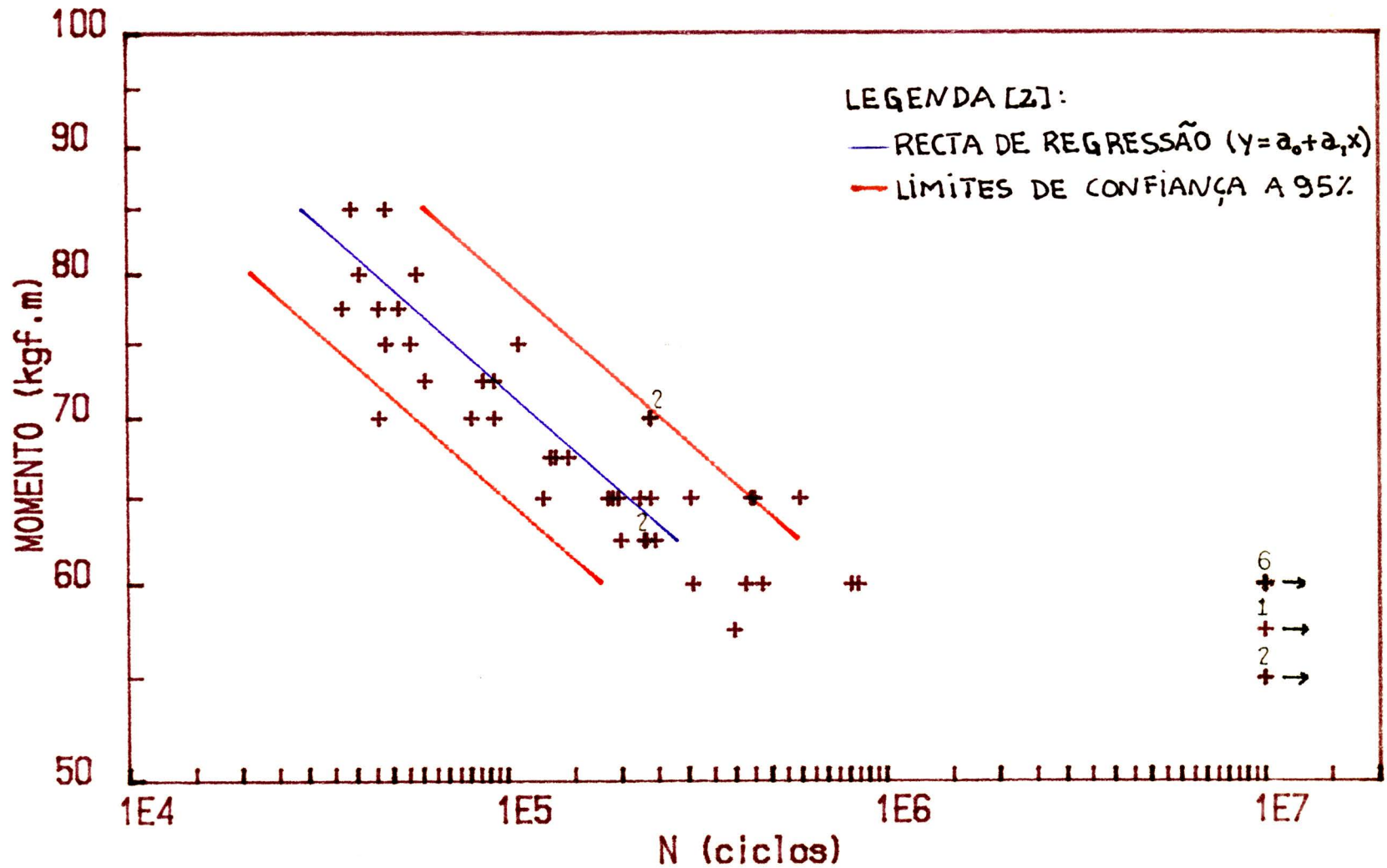
ANEXOS

QUADRO 3.1.

REF. DA CURVA	ANÁLISE		DUREZA HB _{2.5/187.5}	ENS. TRACÇÃO		RESILIÊNCIA Joules / cm ²	MICROGRAFIA	
	QUÍMICA			R _m	A		GRAFITE	ESTRUTURA
	% C	% S		kg / mm ²	%			
0	3,50	0.015	255	85,99	7,07	7.5	ESFERAS > 85%	PERLITE - FER- RITE < 25 %.
1	3,72	0.014	241	85,58	7,93	8	ESFERAS > 85%	PERLITE - FER- RITE < 25 %.
2	3,67	0.015	248	86,78	8,45	8	ESFERAS > 85%	PERLITE - FER- RITE < 25 %.
3	3,49	0.02	248	85,97	6,72	9	ESFERAS > 85%	PERLITE - FER- RITE < 25 %.
4	3,61	0.013	248	86,78	6,38	8	ESFERAS > 85%	PERLITE - FER- RITE < 25 %.
5	3,70	0.014	262	81,21	6,21	7	ESFERAS > 85%	PERLITE - FER- RITE < 25 %.
6	3,68	0.017	248	87,58	6,21	8	ESFERAS > 85%	PERLITE - FER- RITE < 25 %.

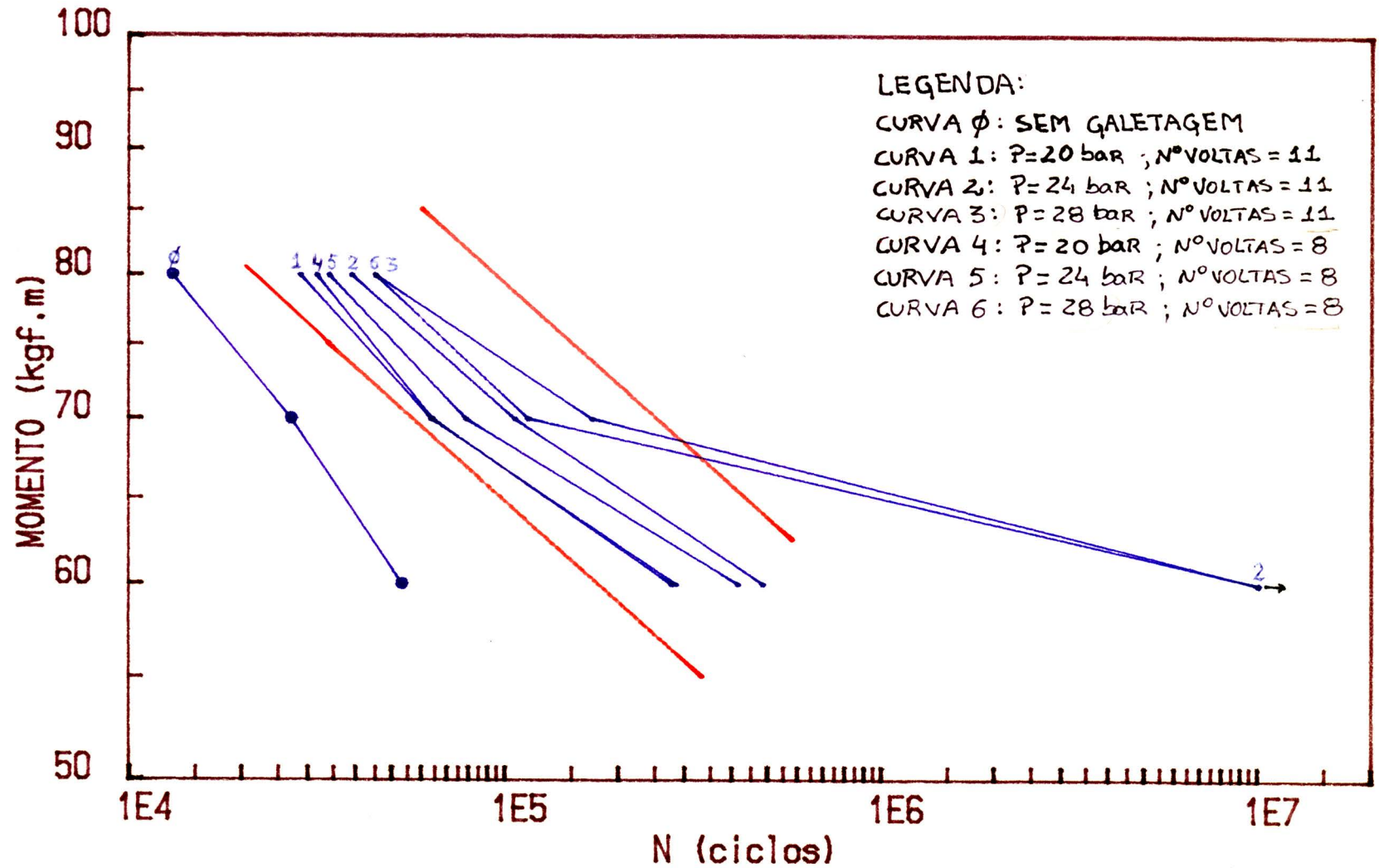
CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS NUMA PEÇA REFERENTE A CADA CURVA DO GRÁFICO 3.2.

GRÁFICO 3.1



CURVA DE WÖHLER PADRÃO: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA MOMENTO FLECTOR CORRESPONDENTE À PRÉ-CARGA EM FUNÇÃO DO Nº DE CICLOS ($\log M$ VERSUS $\log N$). ENSAIO DE FADIGA COM $R=0$

GRÁFICO 3.2



CURVAS DE WÖHLER PARA DIFERENTES VALORES DE PRESSÃO DE GALETAGEM E ROTAÇÃO DA CAMBOTA: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA MOMENTO FLECTOR CORRESPONDENTE À PRÉ-CARGA EM FUNÇÃO DO Nº DE CICLOS ($\log M$ VERSUS $\log N$), CORRESPONDENTE AO VALOR MÉDIO DURANTE O ENSAIO DE FADIGA COM $R=0$

GRÁFICO 3.3

RAIO DE CURVATURA DA GOLA

LEGENDA:

x ANTES DA GALETAGEM

• APÓS GALETAGEM (V.N. = $1,35 + 0,1 \mu\text{m}$)

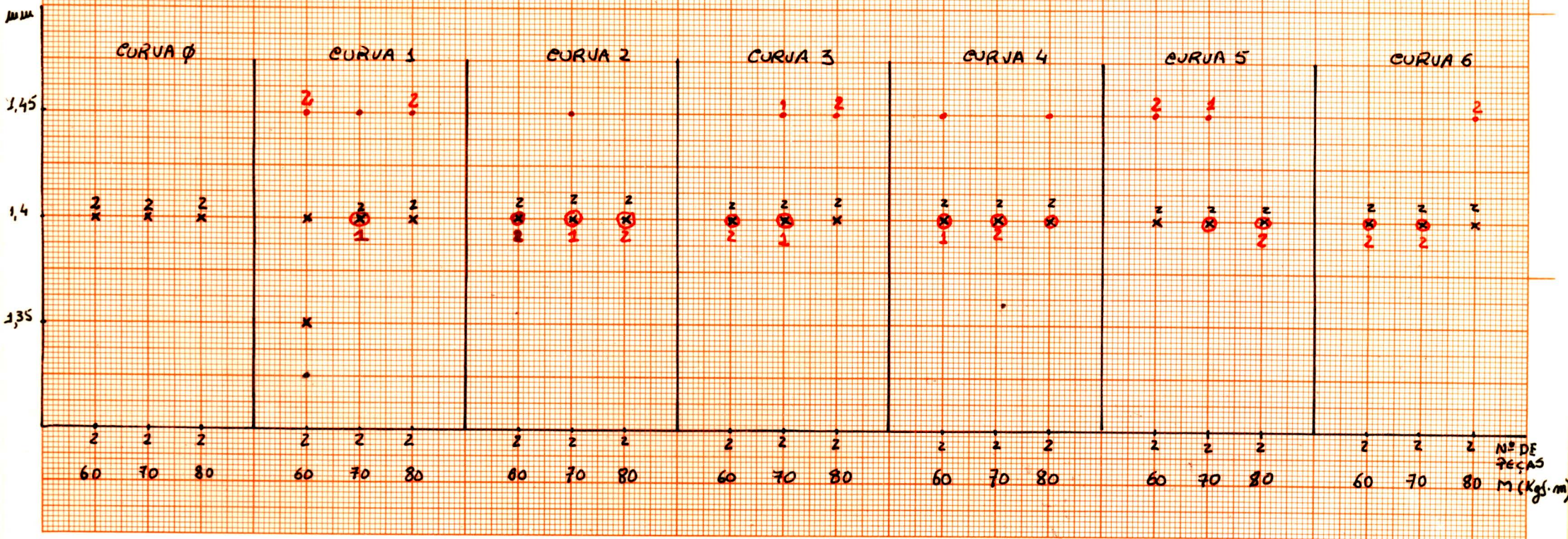
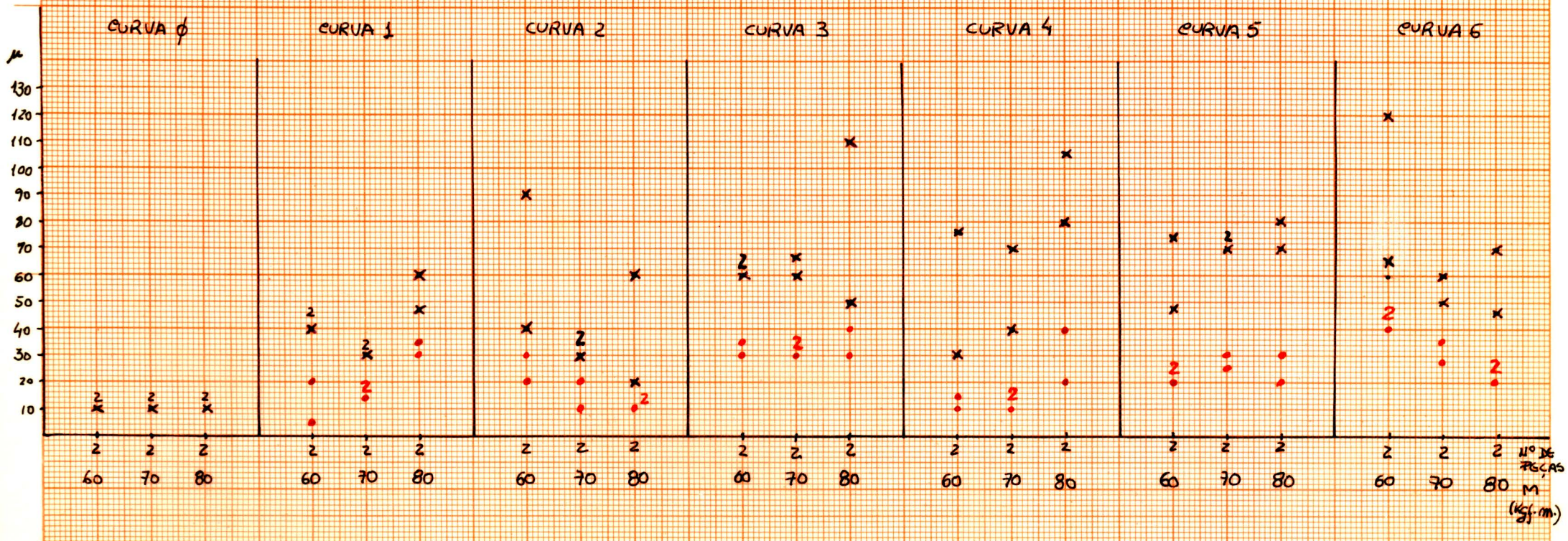


GRÁFICO 3.4.

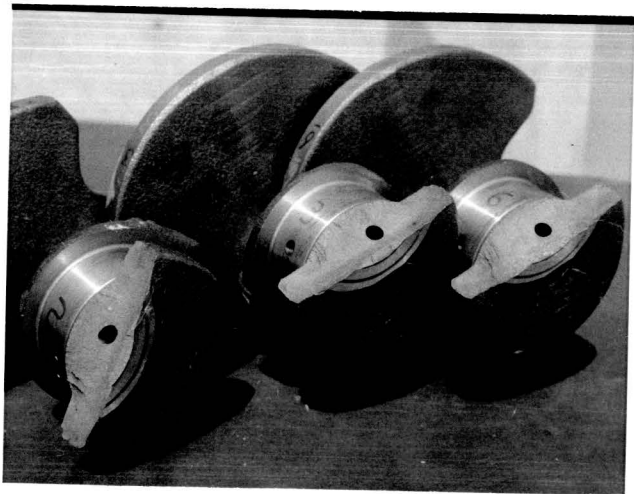
EXCÊNTRICIDADE DA CAMBOTA ENTRE PONTOS

LEGENDA:

- X ANTES DA GALETAGEM (V.N: 0.2 mm)
- APÓS GALETAGEM (V.N: 0.02 mm)



SUPERFÍCIES DE FRACTURA EM PEÇAS SEM OPERAÇÃO DE
GALETAGEM



REFÊRÊNCIA:

PEÇA 2: $M = 80 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

PEÇA 3: $M = 70 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

PEÇA 6: $M = 60 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

FIGURA 3.16

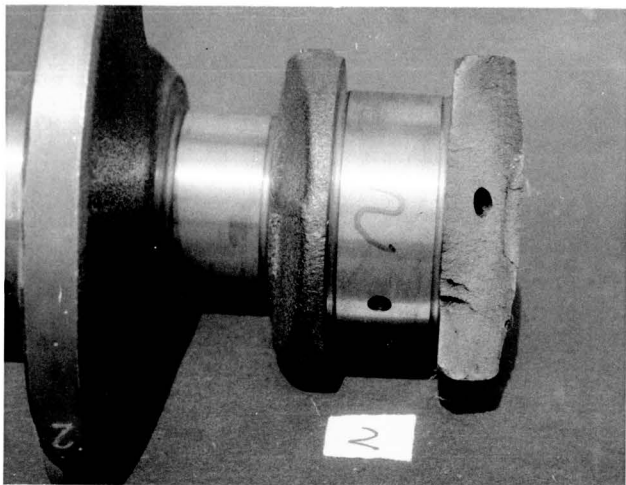


FIGURA 3.17

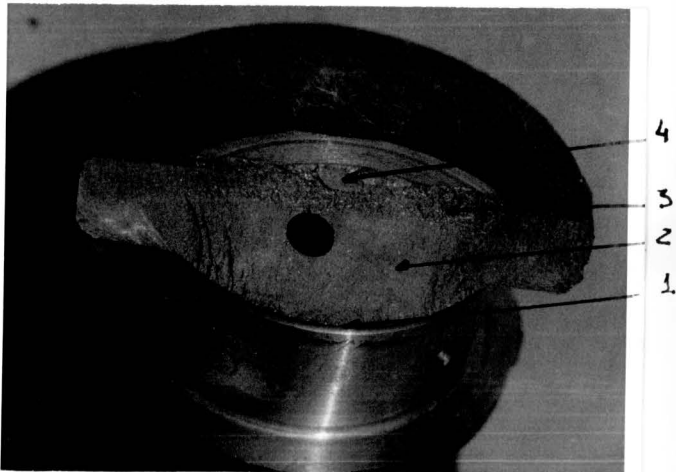
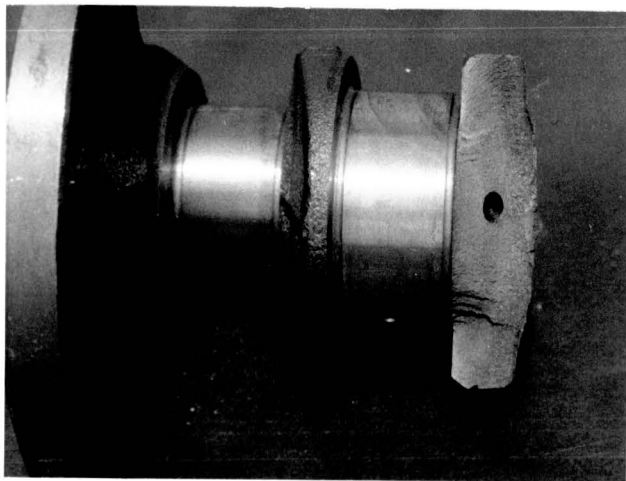


FIGURA 3.18

SUPERFÍCIES DE FRATURA EM PEÇAS REFERENTES À CURVA 1
(P=20 bar ; 11 VOLTAS)

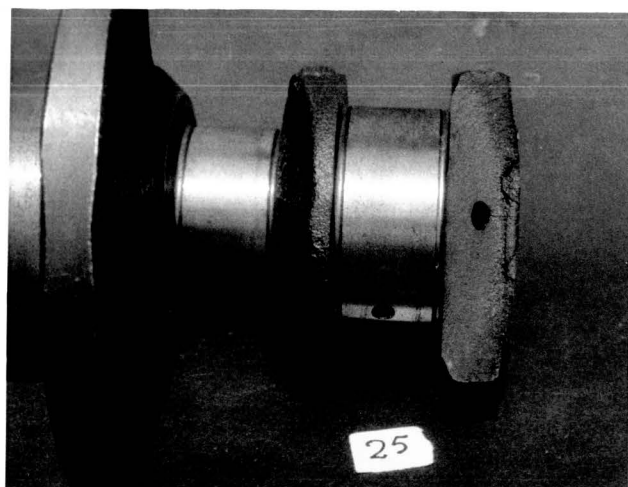


FIGURA 3.19 : $M=60 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

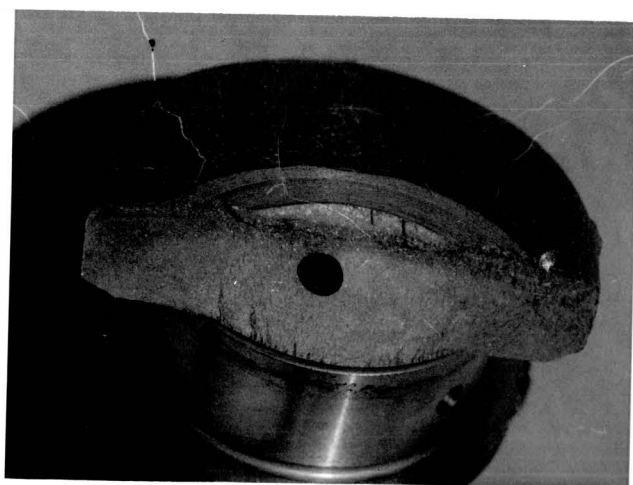
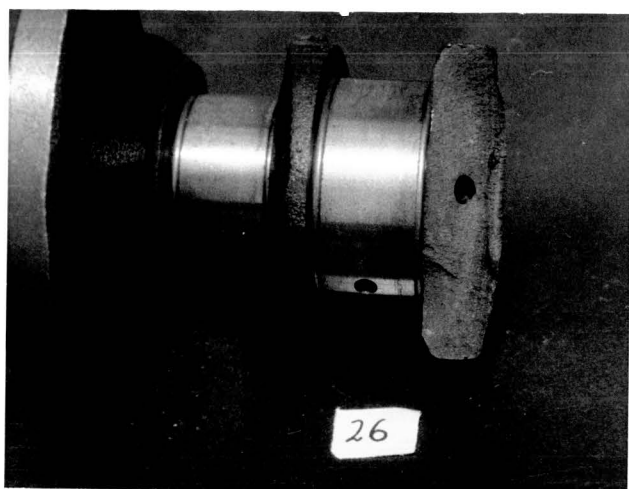


FIGURA 3.20 : $M=70 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

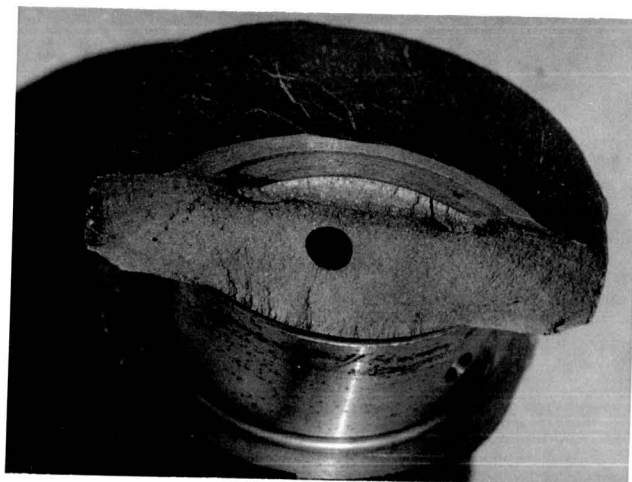
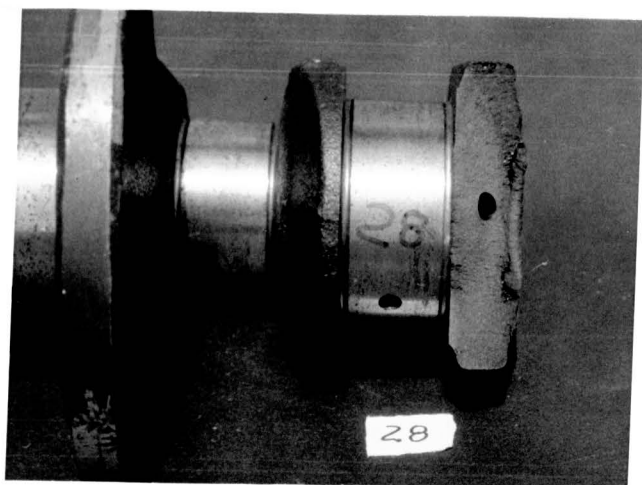


FIGURA 3.21 : $M=80 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

SUPERFÍCIES DE FRACTURA EM PEÇAS REFERENTES À CURVA 3
($P=28 \text{ bar}$; 11 VOLTAS)

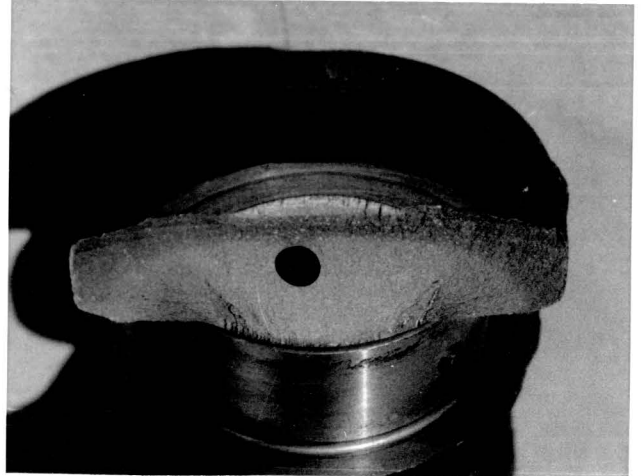
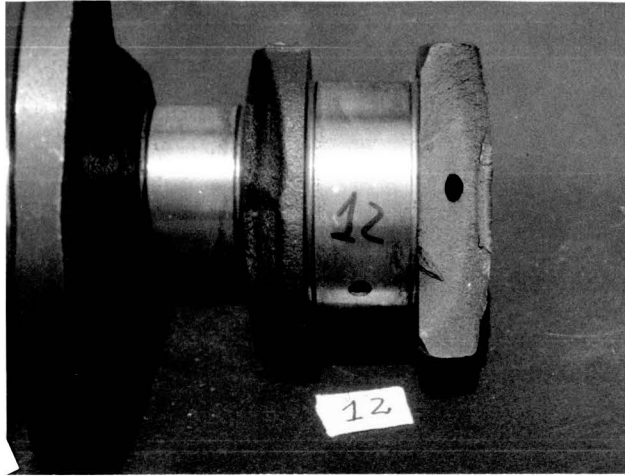


FIGURA 3.22: $M=70 \text{ Kg}\cdot\text{m}$

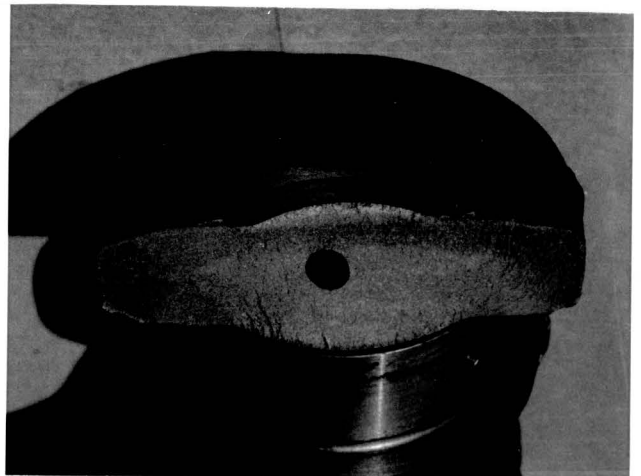
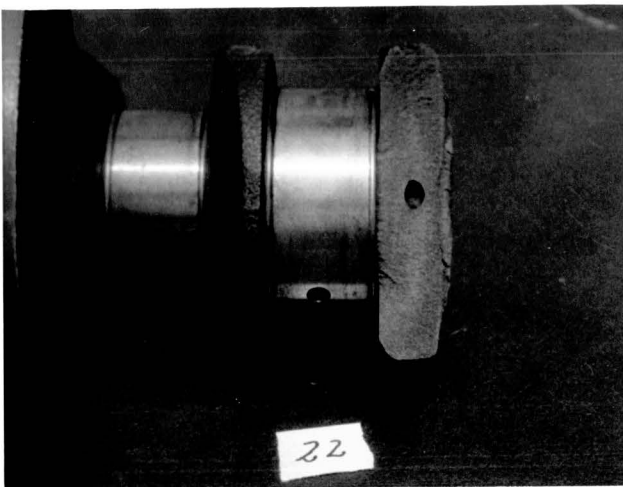


FIGURA 3.23: $M=80 \text{ Kg}\cdot\text{m}$

SUPERFÍCIES DE FRACTURA EM PEÇAS REFERENTES À CURVA 2
($P=24 \text{ bar.}$; 11 VOLTAS)

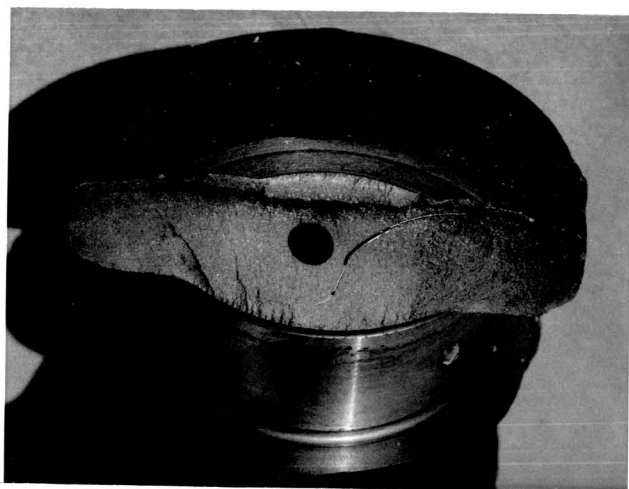
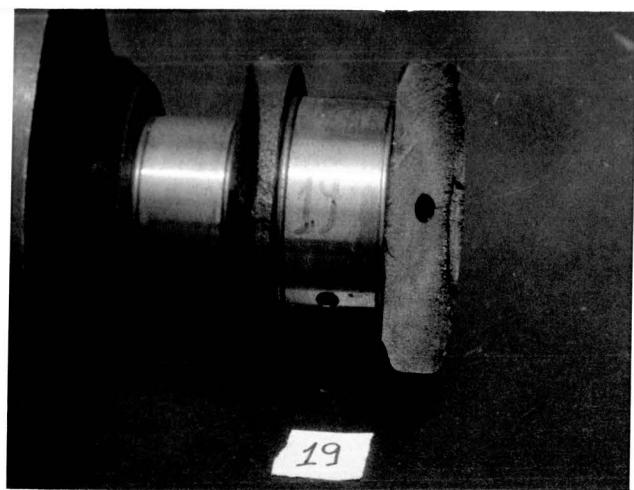


FIGURA 3.24: $M=60 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

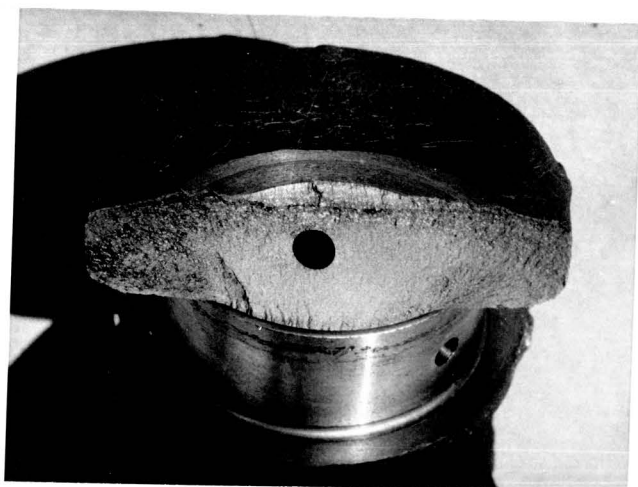
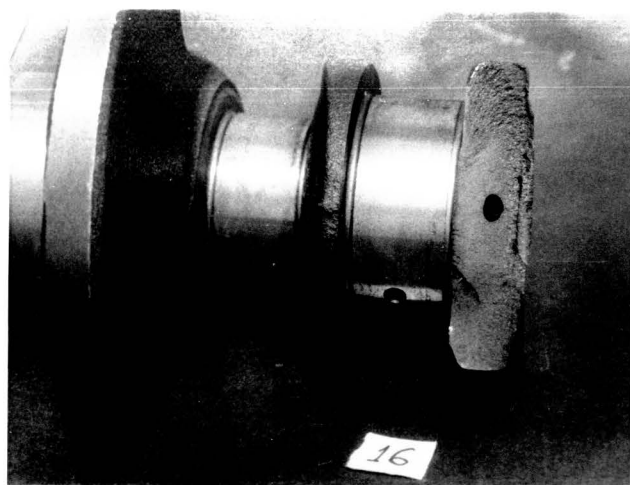


FIGURA 3.25: $M=70 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

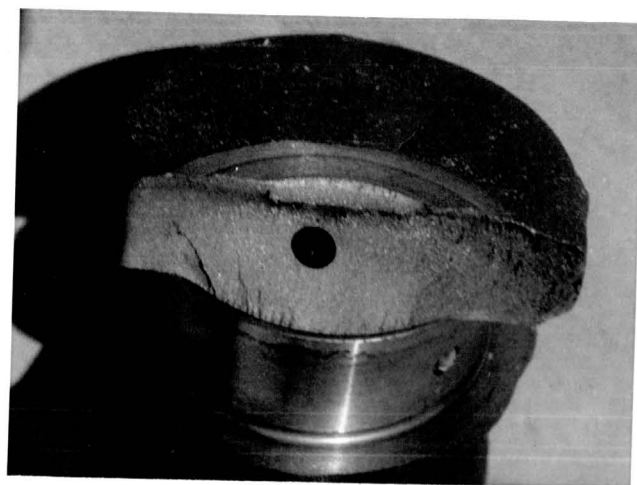
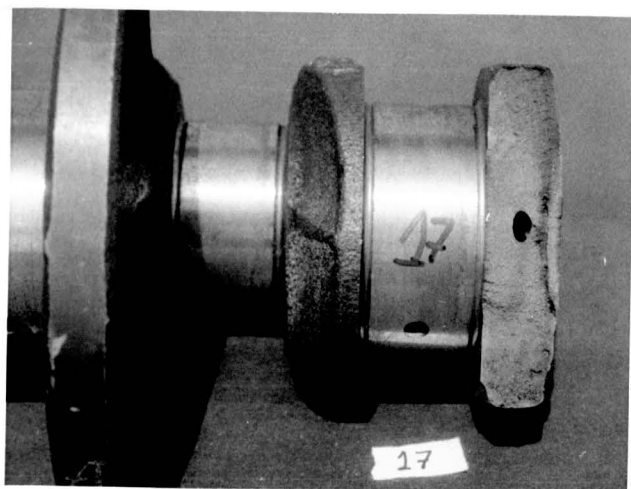


FIGURA 3.26: $M=80 \text{ kgf}\cdot\text{m}$

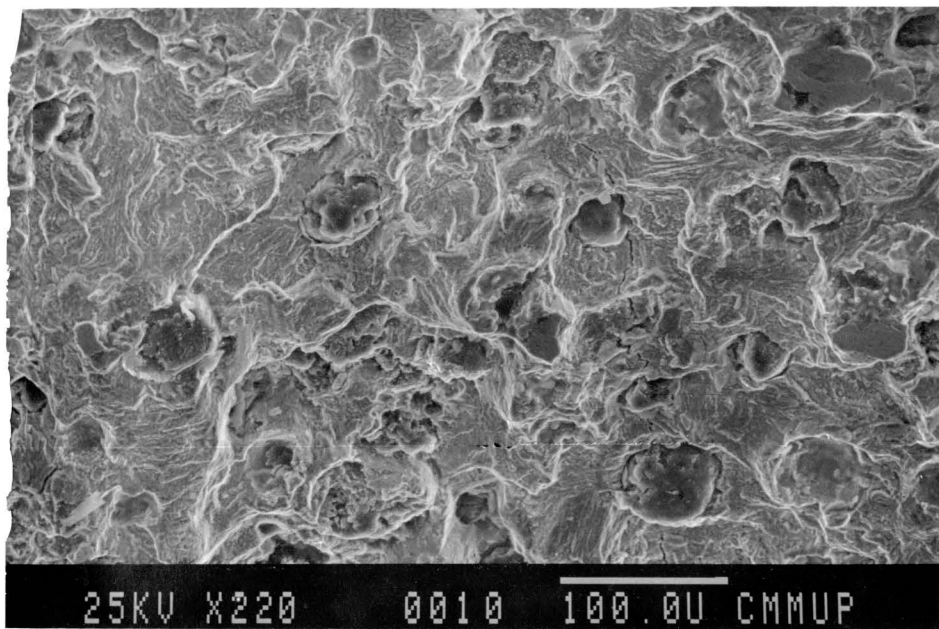


FIGURA 3.27

ZONA DE FISSURAÇÃO PRO-
GRESSIVA DE GRÃO FINO
JUNTO À GOLA.

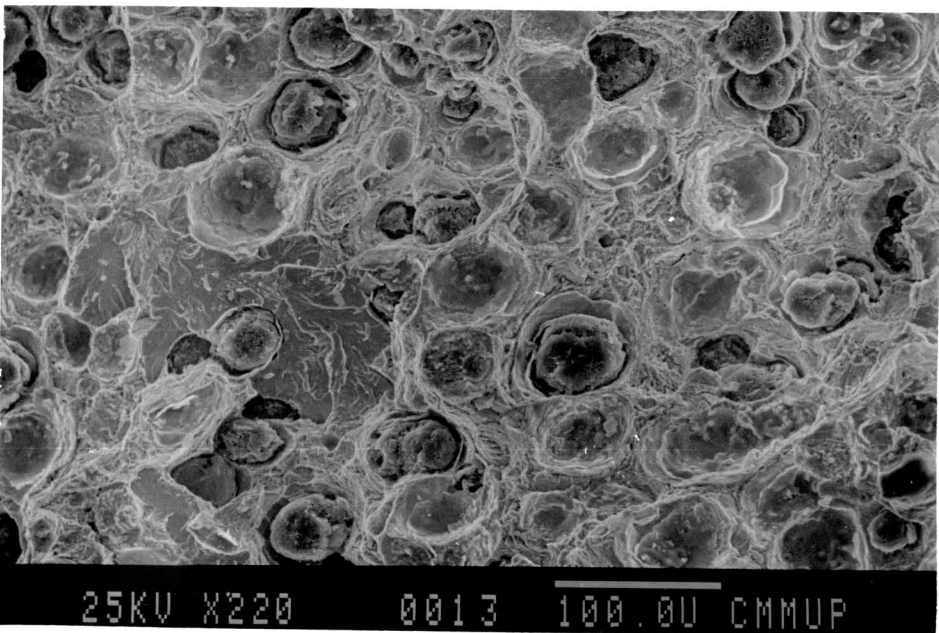


FIGURA 3.28

ZONA DE FISSURAÇÃO PRO-
GRESSIVA DE GRÃO GROS-
SEIRO

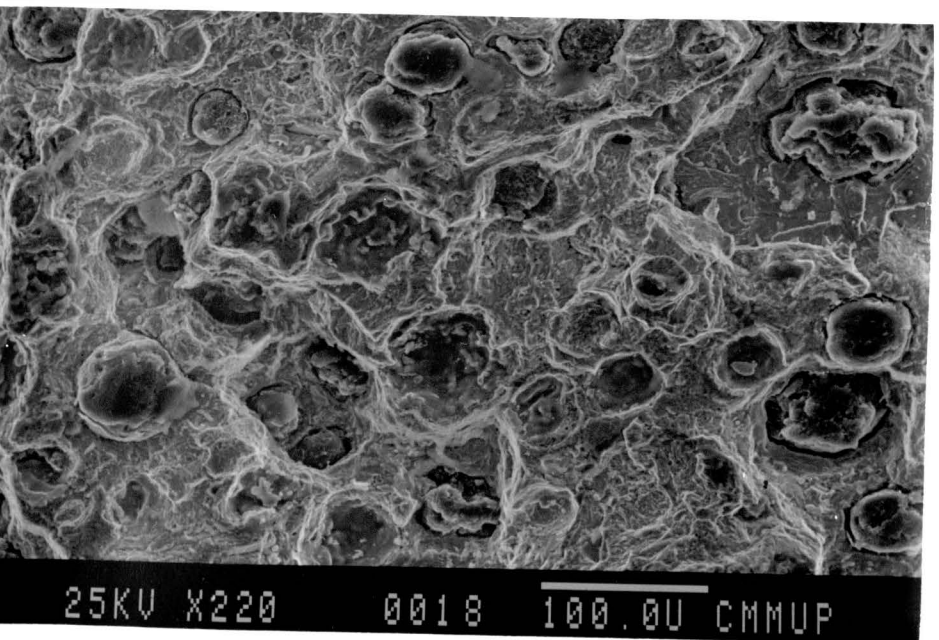


FIGURA 3.29

ZONA DE ROTURA FINAL

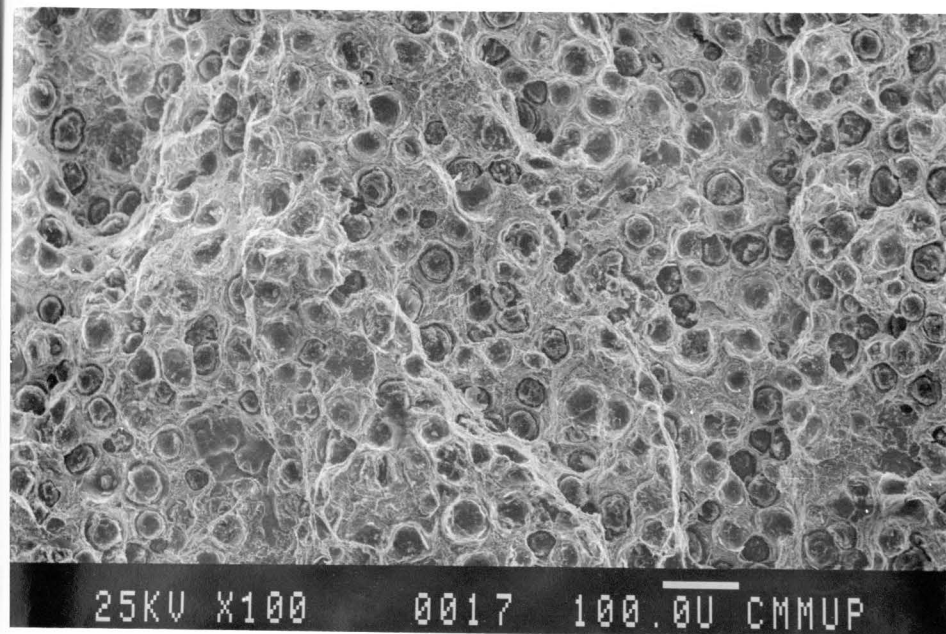


FIGURA 3.30

ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA DE GRÃO FINO, JUNTO À GOLA.

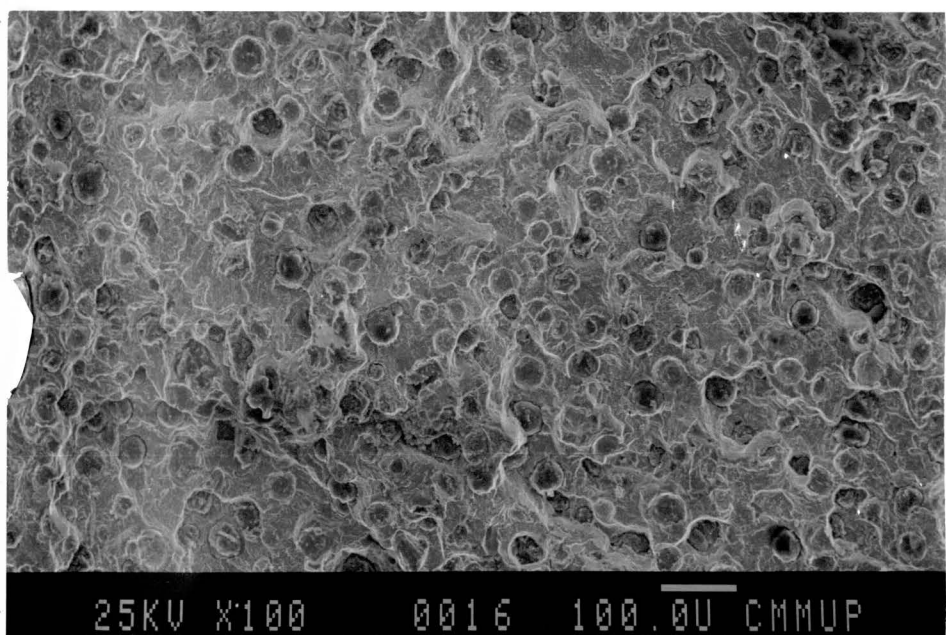


FIGURA 3.31

ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA DE GRÃO GROSSO.

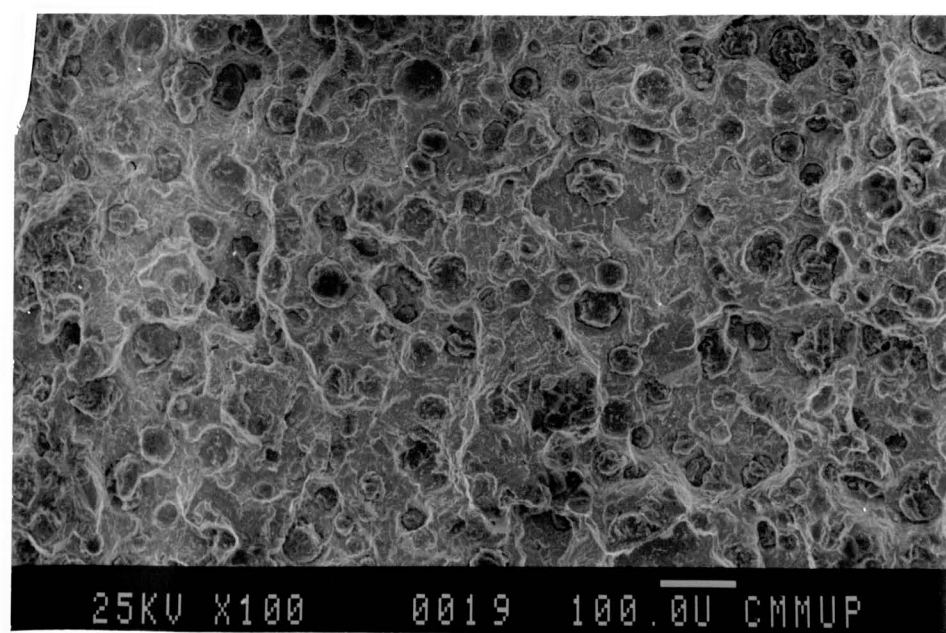


FIGURA 3.32

ZONA DE ROTURA FINAL

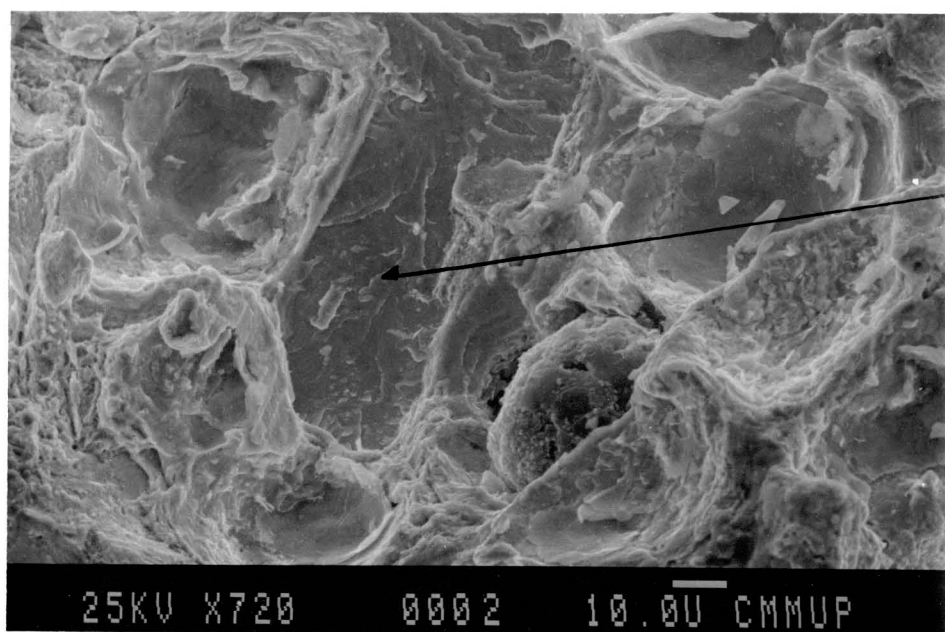


FIGURA 3.33: ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA
DE GRÃO GROSSEIRO

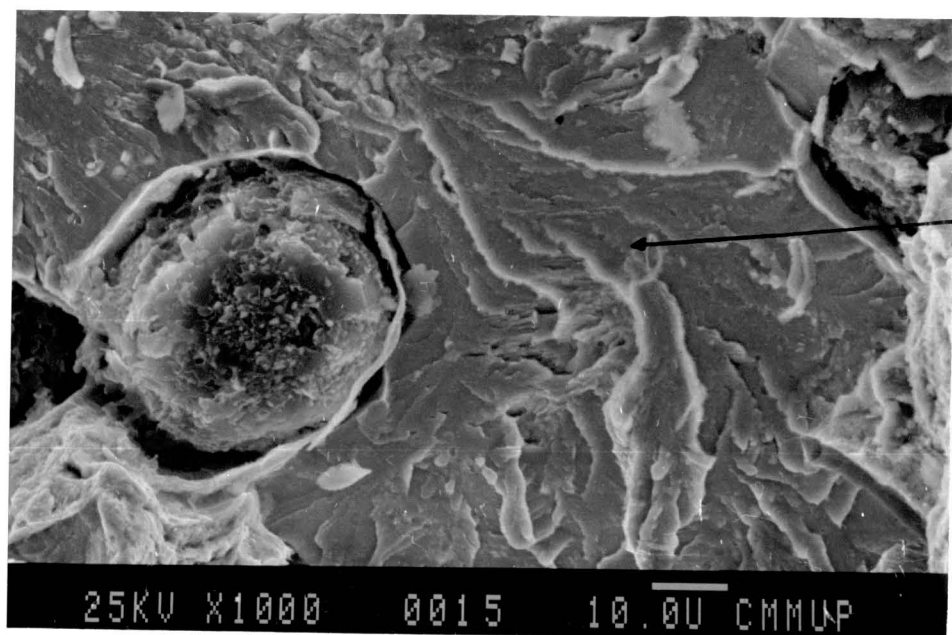


FIGURA 3.34: ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA
DE GRÃO GROSSEIRO

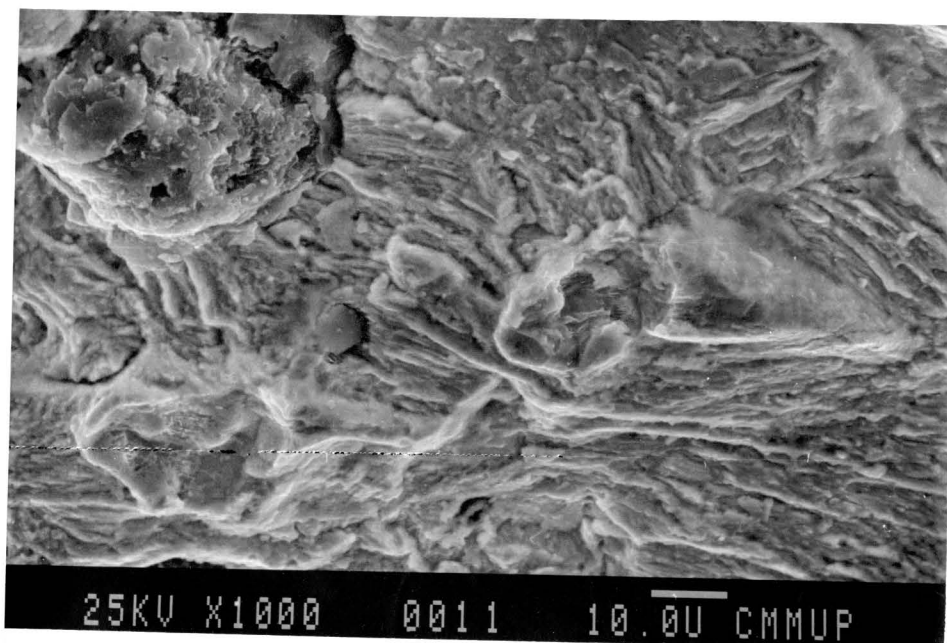


FIGURA 335: ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA JUNTO À GOLA. ASPECTO EM "CORRE OU NEURURADO"

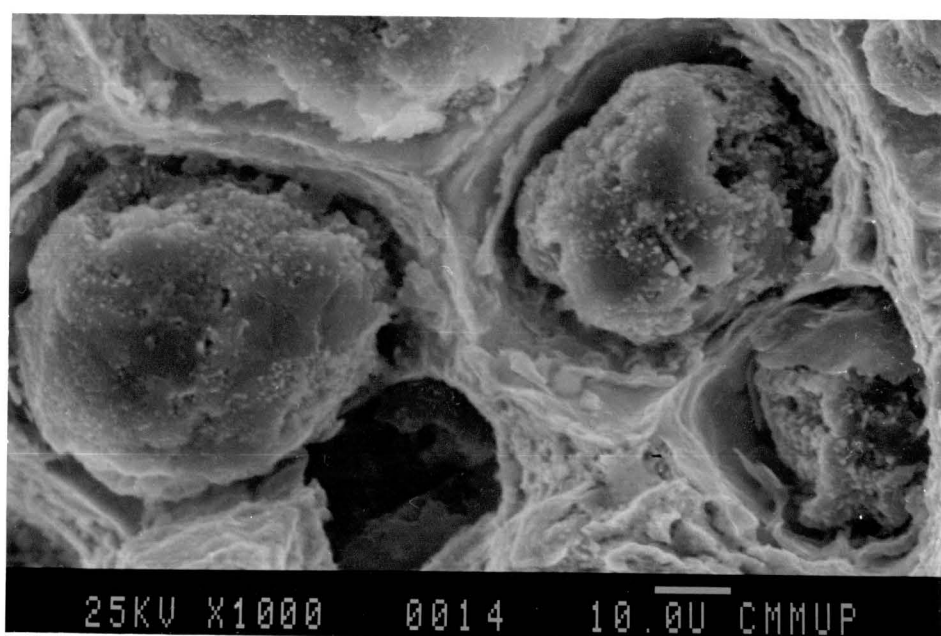


FIGURA 336: ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA DE GRÃO GROSSEIRO. DEFORMAÇÃO AO LONGO DOS CONTORES DA GRAFITE

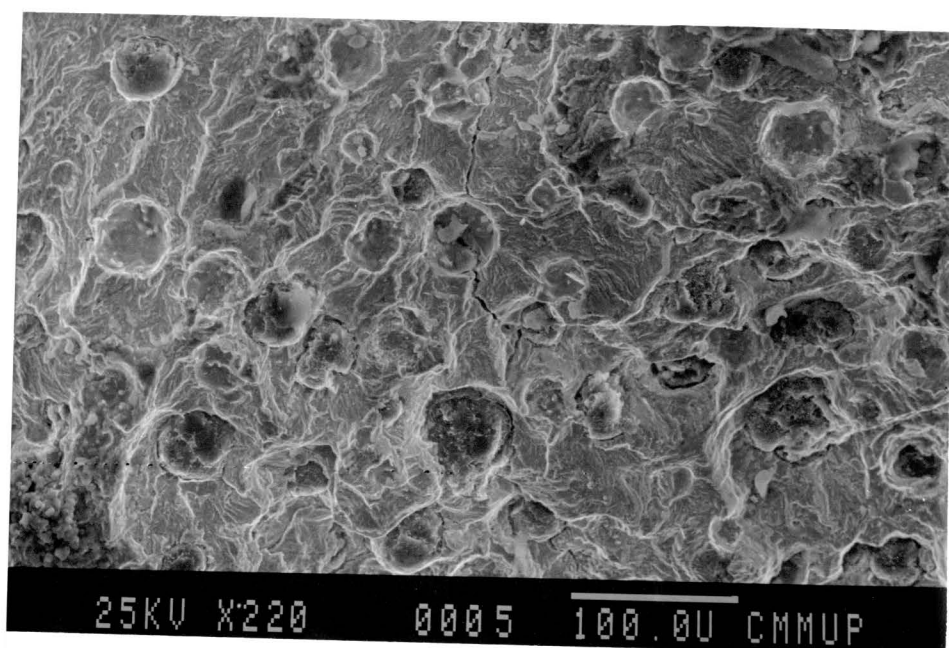


FIGURA 3.37: ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA JUNTO
À GOLA: FISSURAÇÃO SECUNDÁRIA

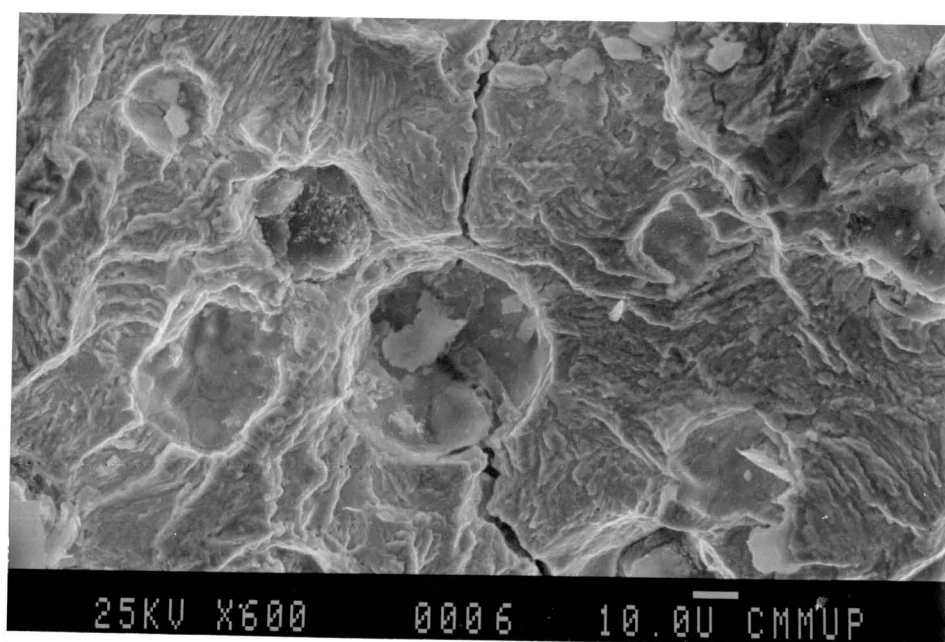


FIGURA 3.38: DETALHE DA FIGURA ANTERIOR

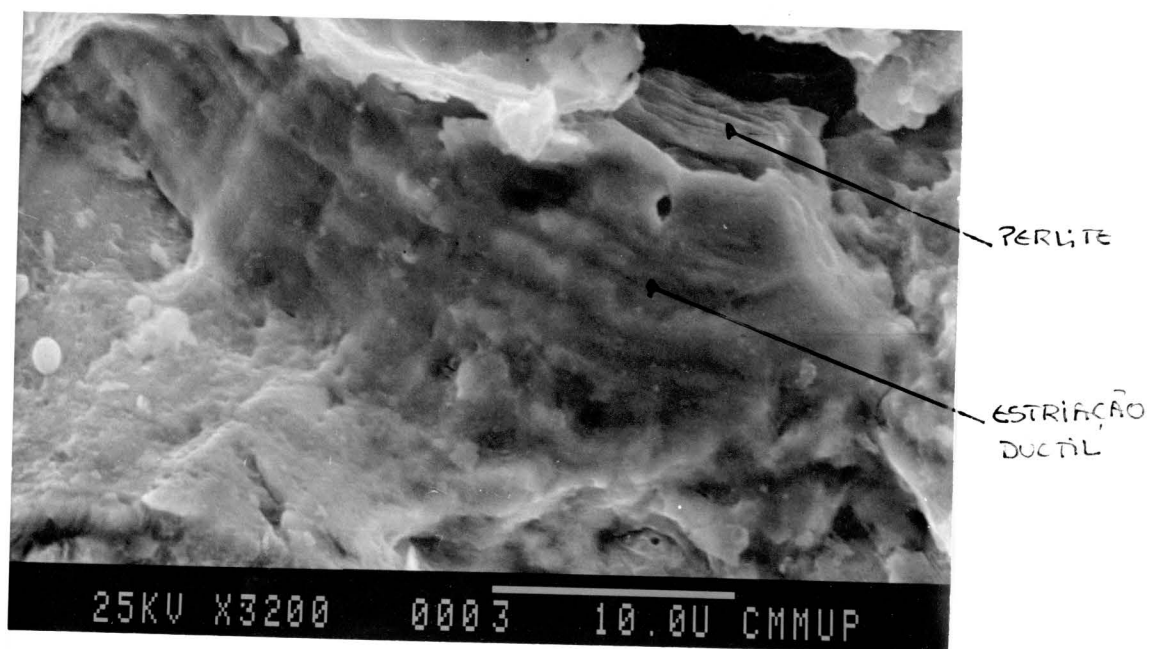


FIGURA 3.39: ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA DE GRÃO FINO. ESTRIAÇÃO DÚCTIL

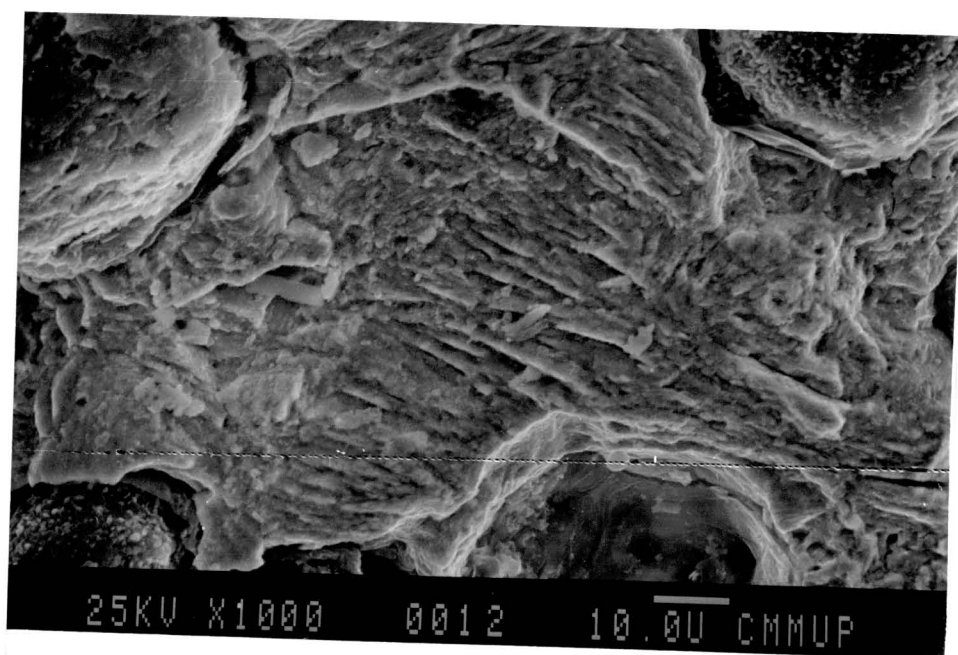


FIGURA 3.40: ZONA DE FISSURAÇÃO PROGRESSIVA DE GRÃO GROSSEIRO. ESTRIAÇÃO DÚCTIL

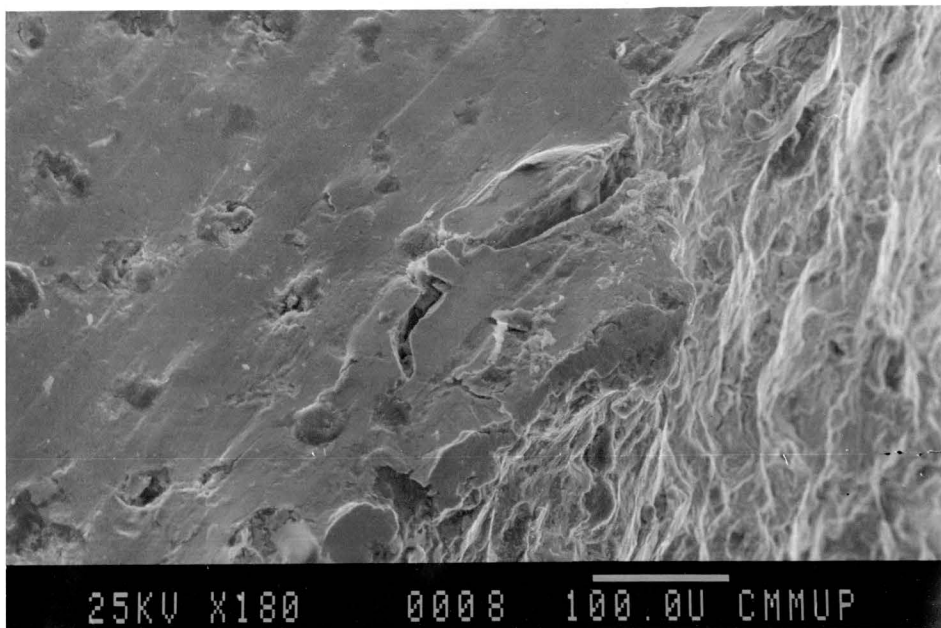


FIGURA 3.41: ZONA DA GOLA - ZONA DE INICIAÇÃO DE FISSURAS

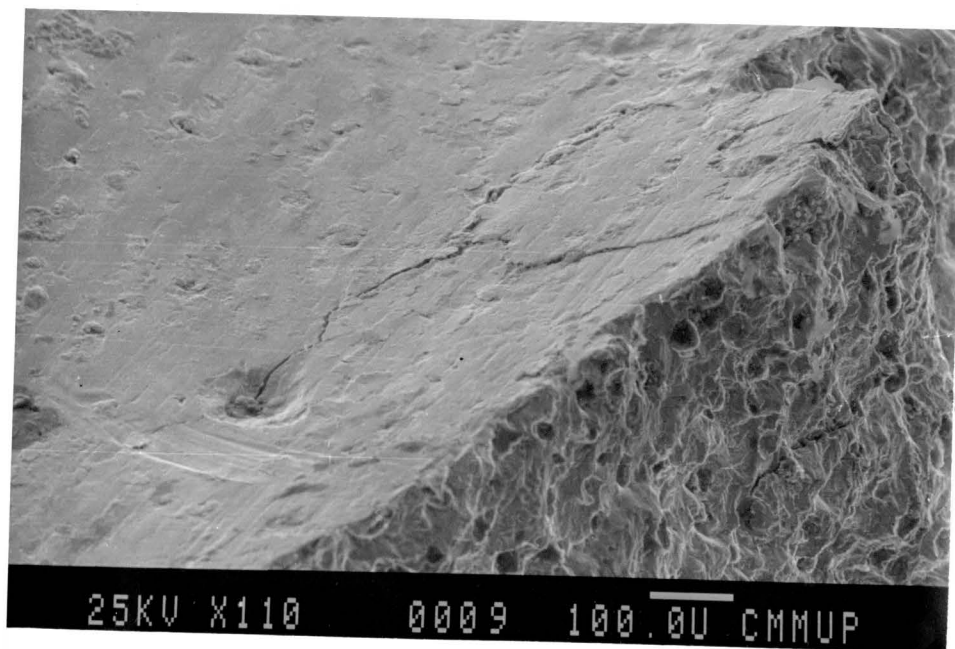


FIGURA 3.42: DETALHE DA FIGURA ANTERIOR

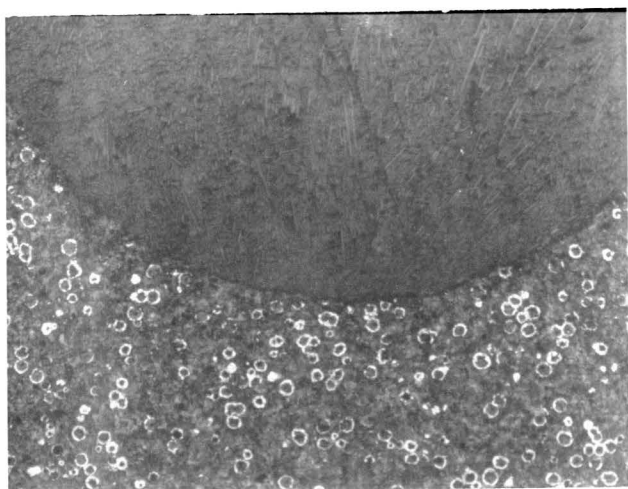


FIGURA 3.43: ZONA DA GOLA ANTES DO
ENSAIO DE FADIGA

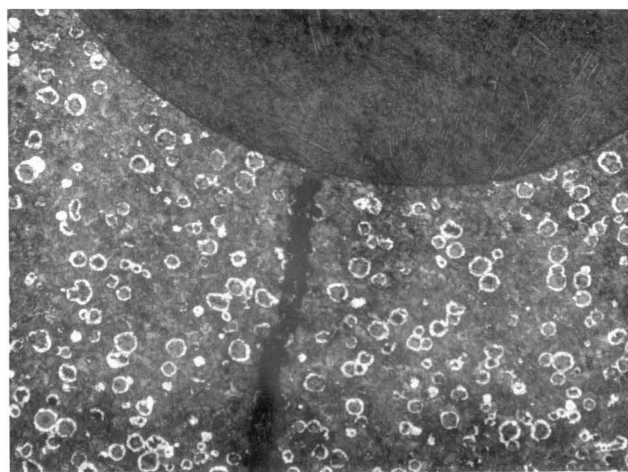


FIGURA 3.44: ZONA DA GOLA APÓS O
ENSAIO DE FADIGA SEM ROTU-
RA FINAL

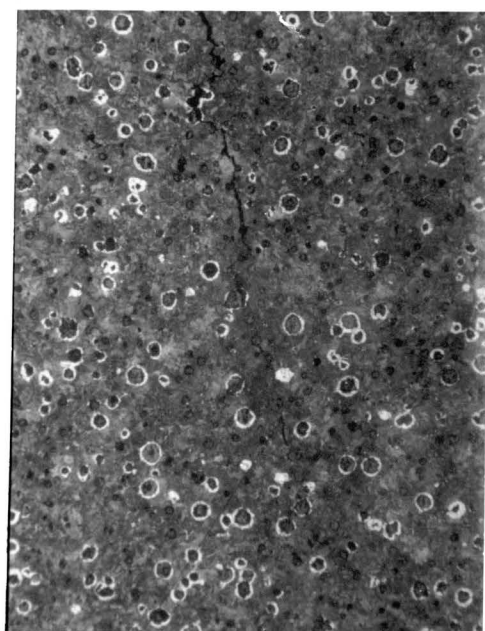


FIGURA 3.45: ZONA DO FIM DA FISSURA, APÓS
ENSAIO DE FADIGA SEM ROTU-
RA FINAL.

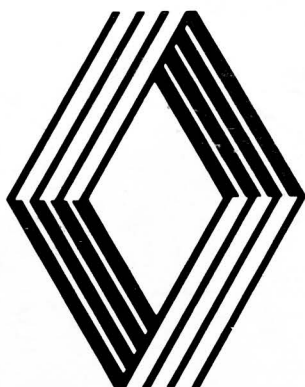
DEPARTAMENTO DE ENG.ª METALÚRGICA

Autor Silve Maria de Fátima V. Valles

Título Seminário 86/87 Fadiga em

Referência 462-XXXX

DATA DE ENTREGA	RUBRICA DO REQUISITANTE	N.º
27-04-92	Vaxo Miguel	12
17-05-92	Vaxo Miguel	12
20-05-92	Vaxo Miguel	12
28-05-92	Vaxo Miguel	12
27-07-99	Viana	117
23-08-99	Artur Mendes	246
02-05-00	Artur Mendes	246



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000023061